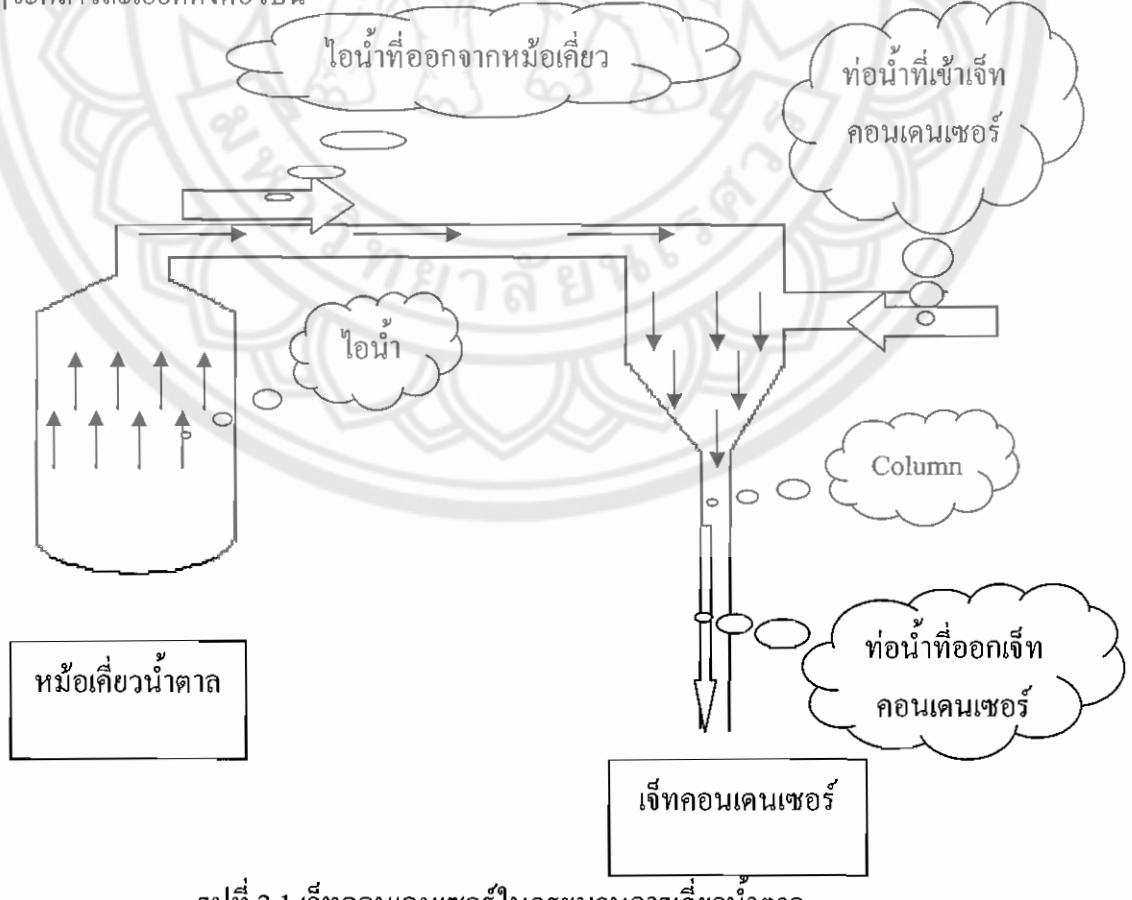
บทที่ 2
หลักการและทฤษฎี

จากการออกแบบการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเจ็ทคอนเดนเซอร์โดยใช้ออริฟิชเป็นแบบจำลองของ เจ็ทคอนเดนเซอร์ ซึ่งเจ็ทคอนเดนเซอร์เป็นระบบทำสุญญากาศของหม้อเคี่ยวน้ำตาลโดยอาศัยการดึงอากาศจากหัวฉีด (Nozzle) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นการออกแบบการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของเจ็ทคอนเดนเซอร์จึงต้องหาปริมาณน้ำ ปริมาณอากาศจาก ออริฟิชที่สภาวะสุญญากาศต่างๆซึ่งจะต้องติดตั้งชุดทดลองให้ได้ความสูงที่ทำให้ความเร็วของน้ำภายในคอลัมน์(Column)ให้เป็น 4 m /s และรวบรวมข้อมูลของการทำงานของ เจ็ทคอนเดนเซอร์ ซึ่งจะเก็บค่าความเข้มข้นน้ำเชื่อมจากกระบวนการเคี่ยวน้ำตาล, อุณหภูมิน้ำเข้าของเจ็ทคอนเดนเซอร์ ,อุณหภูมิน้ำออกของเจ็ทคอนเดนเซอร์, อุณหภูมิไอน้ำและค่าสุญญากาศของหม้อเคี่ยว และนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ผลโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานทางกลศาสตร์ของของไหล และสร้างสมการขึ้นมาเพื่อให้ง่ายในการนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพเจ็ทคอนเดนเซอร์ ประสิทธิภาพของเจ็ทคอนเดนเซอร์ ขึ้นอยู่กับความแตกต่างอุณหภูมิไอกับอุณหภูมิน้ำขาออกจากเจ็ทคอนเดนเซอร์ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมควรจะแตกต่างกันไม่เกิน 5-7 °c โดยหลักการและทฤษฎีต่างๆจะกล่าวละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 เจ็ทคอนเดนเซอร์ในกระบวนการเคี่ยวน้ำตาล

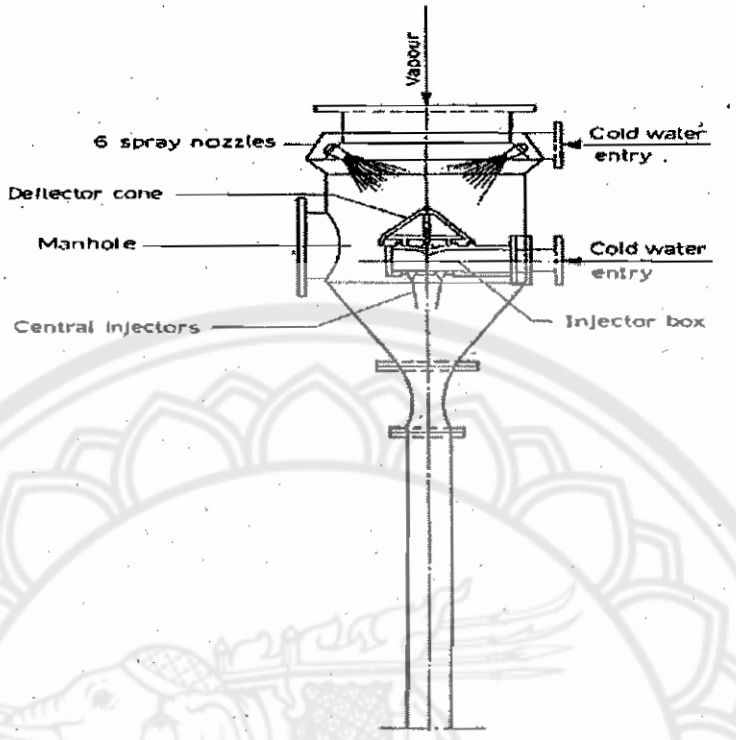
2.1 กระบวนการเคี่ยวน้ำเชื่อม

กระบวนการเคี่ยวน้ำเชื่อมเป็นกระบวนการตกผลึกน้ำเชื่อมเพื่อแยกน้ำตาลออกจากน้ำเชื่อม หลักการเคี่ยวน้ำเชื่อมจะอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนของไอน้ำกับน้ำเชื่อมโดยเริ่มต้นที่การป้อนน้ำเชื่อมเข้าตัวหม้อเคี่ยวแล้วทำการต้มละเหยน้ำเชื่อมจนถึงจุดอิ่มตัวโดยผ่านท่อสแตนเลสที่อยู่ภายในตัวหม้อเคี่ยวและควบคุมอุณหภูมิของน้ำเชื่อมให้ต่ำกว่าจุดเดือดของบรรยากาศกล่าวคือให้ภายในหม้อเคี่ยวมีสภาพเป็นสุญญากาศที่ 26-28 นิ้วของปรอทโดยอาศัยการทำสุญญากาศของอุปกรณ์ที่เรียกว่า เจ็ทคอนเดนเซอร์ (Jet Condensers) จากนั้นจะป้อนเชื้อน้ำตาลเข้าไปเป็นแกนให้กับน้ำเชื่อมเพื่อทำการฟอกผลึกให้โตขึ้น ซึ่งในระหว่างการเคี่ยวจะมีการตรวจสอบขนาดผลึกน้ำตาลอย่างสม่ำเสมอเมื่อเคี่ยวได้ระดับแล้วและได้คุณภาพตามที่กำหนดแล้วจะปล่อยลงสู่รางพักด้านล่าง

2.2 เจ็ทคอนเดนเซอร์ (Jet Condensers)

เจ็ทคอนเดนเซอร์เป็นเครื่องควบแน่นแบบไหลในทิศทางเดียวกัน (Co-current Condensers) บางครั้งเราเรียกกันผิดๆอีกอย่างหนึ่งว่า เครื่องควบแน่นแบบไหลขนาน (Parallel-current Condensers) เครื่องควบแน่นแบบนี้จะมีหลักการทำงานเหมือนกับเครื่องควบแน่นแบบอากาศเปียกคือน้ำและไอน้ำที่ต้องการควบแน่นจะเคลื่อนที่ไปทางเดียวกัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่โรงงานน้ำตาลโดยทั่วไปใช้กันมากซึ่งมีข้อดี คือไม่ต้องทำการติดตั้งปั๊มสุญญากาศ และใช้ปริมาณน้ำน้อยในการควบแน่นไอน้ำ ส่วนข้อเสียต้องติดตั้งให้ได้ความสูงที่ทำให้ความเร็วของน้ำภายในคอลัมน์ (Column)เป็น 4 m /s ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจะแตกต่างกับระบบเครื่องควบแน่นแบบไหลสวนทางกัน (Counter-current condensers)ซึ่งมีหลักการทำงานคือน้ำและไอน้ำที่ต้องการควบแน่นจะเคลื่อนที่สวนทางกัน เช่นบาร์รอเมตริกคอนเดนเซอร์ Barometric Condensers ซึ่งมีข้อดี คือสามารถติดตั้งในสถานที่มีความสูงน้อยแต่ยังสามารถดึงอากาศที่ไม่ควบแน่นได้เพราะมีการติดตั้งปั๊มสุญญากาศ ส่วนข้อเสียต้องติดตั้ง ปั๊มสุญญากาศและต้องมีการดูแลและตรวจเช็กสภาพปั๊มสุญญากาศอยู่เสมอ ซึ่งส่วนประกอบของเจ็ทคอนเดนเซอร์ มีดังนี้

1. ท่อไอน้ำ ที่ต่อมาจากด้านบนของหม้อเคี่ยวน้ำตาลและจะต่อเข้าทางด้านบนของเจ็ทคอนเดนเซอร์
2. ท่อน้ำเข้าเจ็ทคอนเดนเซอร์ จะมีน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำต่อเข้าทางด้านข้างของเจ็ทคอนเดนเซอร์โตยจะแบ่งจ่ายน้ำให้กับตัว spray nozzles ซึ่งทำหน้าที่ควบแน่นไอน้ำที่สามารถกลั่นตัวได้ ส่วน injector box ซึ่งมีนอตเซิลอยู่ภายในทำหน้าที่ในการดึงอากาศที่มาจากไอน้ำที่ไม่กลั่นตัว
3. ท่อน้ำออกเจ็ทคอนเดนเซอร์ หรือเรียกว่าคอลัมน์ (Column)ซึ่งจะต้องติดตั้งให้ได้ความสูงที่ทำให้ความเร็วของน้ำภายในคอลัมน์ (Column)เป็น 4 m /s



รูปที่ 2.2 เจ็ทคอนเดนเซอร์ (jet condenser)

2.3 การคำนวณหาความสูงของ คอลัมน์ (Column) (Height of Column)

สามารถหาได้จากสมการ

$$H = H_0 + h + s \qquad \text{.....(2.1)}$$

โดย H = ความสูงของคอลัมน์ (Column) (m) ดังแสดงในรูป 2.2

H_0 = ความสูงของท่อน้ำที่ต้องการสุญญากาศ (Vacuum) สูงสุดในคอนเดนเซอร์

h = เฮดความเร็วของน้ำที่ต้องการให้น้ำตกลงมาด้วยความเร็วที่เหมาะสม (m)

s = ค่าความเผื่อในการเปลี่ยนแปลงระดับของน้ำโดยค่าที่เหมาะสมประมาณ 0.5 m (m)

ซึ่งสามารถหาความสูงของท่อน้ำที่ต้องการสุญญากาศ (Vacuum) สูงสุดในคอนเดนเซอร์ หาจาก

$$H_0 = 10.33 \times \frac{Vacuum}{76} \qquad \text{.....(2.2)}$$

โดยที่ Vacuum คือ สุญญากาศสูงสุดในคอนเดนเซอร์ (cm of water)

ส่วนเฮดความเร็วของน้ำที่ต้องการให้น้ำตกลงมาด้วยความเร็วที่เหมาะสม (m)หาจาก

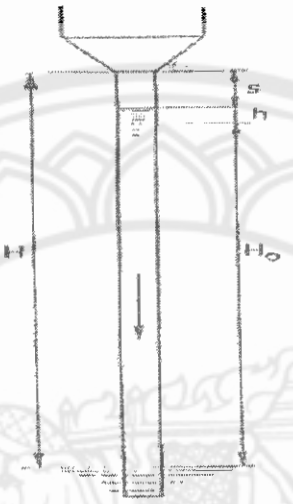
$$h = (1+\infty)\frac{\nu^2}{2g} \qquad \text{.....(2.3)}$$

โดยที่ ν = เฮดความเร็วของน้ำที่ต้องการให้น้ำตกลงมาด้วยความเร็วที่เหมาะสม (3-4 m/s)

ค่าความเร็วในคอลัมน์ (Column)ที่เหมาะสม มาจาก(หนังสือ HANDBOOK OF CANE SUGAR ENGINEERING หน้า 900)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 m/s^2)

$\propto$ = ค่าสัมประสิทธิ์ จาก (table40.19 จากหนังสือHANDBOOK IF CANE SUGAR ENGINEERING



รูปที่ 2.3 ความสูงของ คอลัมน์ (Column) (Height of Column)

2.4 การหาประสิทธิภาพของคอนเดนเซอร์ (Approach Temperature)

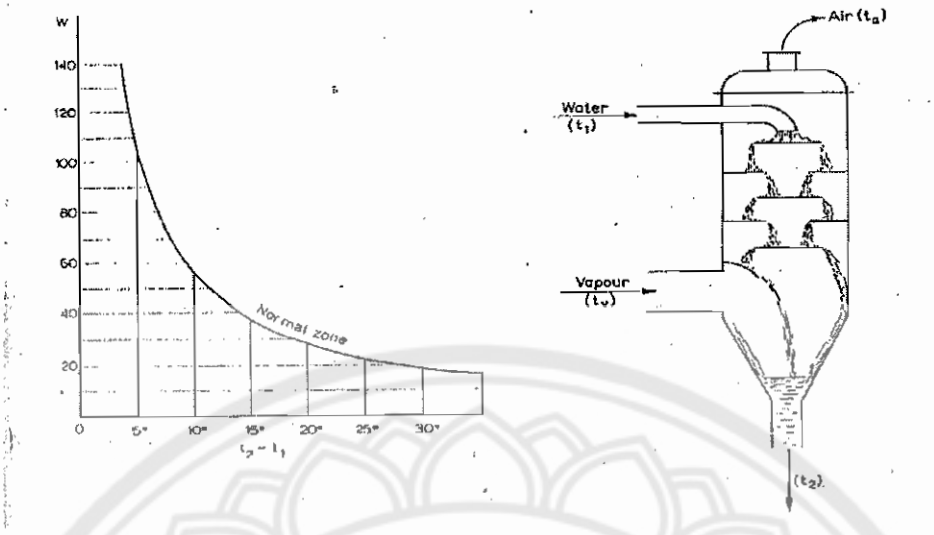
Approach Temperature คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากคอนเดนเซอร์กับอุณหภูมิของไอน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ ซึ่งค่าที่เหมาะสมควรจะแตกต่างกันไม่เกิน 5-7 °C ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\text{Approach temperature} = t_v - t_2 \quad °C\ (°F) \qquad \text{.....(2.4)}$$

โดย t_v = อุณหภูมิของไอน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

t_2 = อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากคอนเดนเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ถ้าค่า Approach Temperature มีค่ามากแสดงว่าประสิทธิภาพคอนเดนเซอร์ต่ำ เพราะว่าอุณหภูมิไอน้ำไม่ได้ถูกควบแน่นจึงทำให้อุณหภูมิไอน้ำมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากคอนเดนเซอร์ แต่ถ้าค่า Approach Temperature มีค่าต่ำแสดงว่าประสิทธิภาพคอนเดนเซอร์สูง เพราะว่าอุณหภูมิไอน้ำได้ถูกควบแน่นจึงทำให้อุณหภูมิไอน้ำมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากคอนเดนเซอร์



รูปที่ 2.4 Approach temperature

2.5 การคำนวณหาปริมาตรของอากาศที่ต้องดึงออกโดยเจ็ทคอนเดนเซอร์

การหาปริมาตรของอากาศที่ต้องดึงออกโดยเจ็ทคอนเดนเซอร์ซึ่งปริมาตรอากาศที่ต้องดึงออกโดยเจ็ทคอนเตนเซอร์มี 4 ส่วน ดังนี้

2.5.1 อากาศที่มาจากการต้มระเหย เราสามารถคำนวณอากาศในส่วนนี้ได้จาก

$a_1 = 5 - 10$ p.p.m. ของไอน้ำที่มาจากหม้อต้ม

2.5.2 อากาศและแก๊สที่ไม่ควบแน่นที่มาจากน้ำเชื่อม เราสามารถคำนวณอากาศได้จาก

- การต้มระเหย $a_2 = 200 - 250$ p.p.m. ของปริมาณน้ำเชื่อมที่เข้าหม้อต้ม
- หม้อเคี่ยว A และ B $a_2 = 100$ p.p.m. ของปริมาณน้ำตาลที่เข้าหม้อเคี่ยว
- หม้อเคี่ยว C $a_2 = 50$ p.p.m. ของปริมาณน้ำตาลที่เข้าหม้อเคี่ยว

2.5.3 อากาศที่มากับน้ำที่เข้าคอนเดนเซอร์ เราสามารถคำนวณอากาศในส่วนนี้ได้จาก

- น้ำที่มาจากแม่น้ำหรือบึง $a_3 = 20 - 30$ p.p.m.
- น้ำที่มาจากลำธารหรือน้ำตก $a_3 = 50 - 150$ p.p.m.
- น้ำทะเล $a_3 = 10 - 20$ p.p.m.
- น้ำที่มาจากบ่อพัก $a_3 = 30 - 40$ p.p.m.

2.5.4 อากาศที่มาจากการรั่วตามจุดต่าง ๆ เราสามารถคำนวณอากาศในส่วนนี้ได้จาก

- หม้อต้ม $a_4 = 3500$ p.p.m. ของปริมาณไอที่ควบแน่นในหม้อสุดท้าย
- หม้อเคี่ยว $a_4 = 500$ p.p.m. ต่อชั่วโมงสำหรับปริมาตรของหม้อที่ใช้

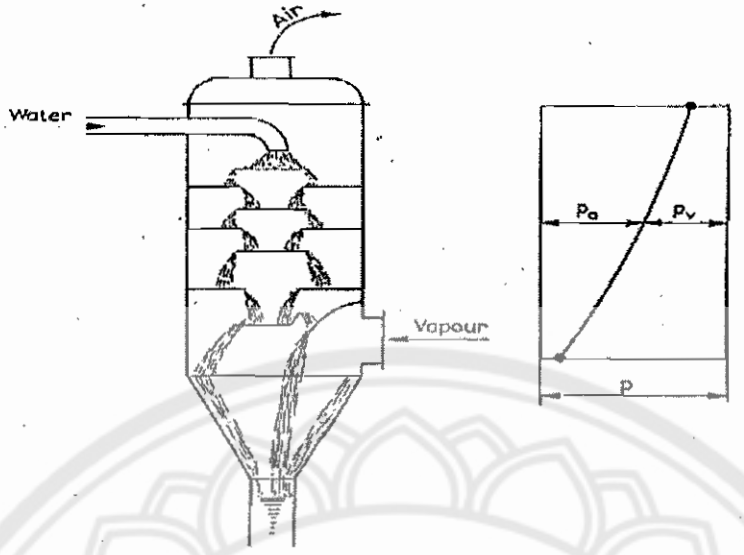


Fig. 40.12. Pressure in condenser.

รูปที่ 2.5 การเกิดอากาศภายในคอนเดนเซอร์

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานกลศาสตร์ของของไหล

2.6.1 การหาปริมาตรจำเพาะโดยใช้ Mariotte's Law

$$v = \frac{RT_a}{p_a} \qquad \text{.....(2.5)}$$

โดยที่ v = ปริมาตรจำเพาะของอากาศที่ความดันสัมบูรณ์และอุณหภูมิสัมบูรณ์ (l/g)

R = ค่าคงที่ของแก๊สสมบูรณ์มีค่าเท่ากับ 0.002927

T_a = อุณหภูมิของอากาศในหน่วย เคลวิน (K)

p_a = ความดันอากาศที่ออกจากคอนเดนเซอร์ (kg/cm^2)มีการคำนวณจาก ความตันในคอนเดนเซอร์ที่สุญญากาศต้องการ – ความดันไอน้ำ ซึ่งเปิดจาก(ตาราง 32.1จากหนังสือ HANDBOOK IF CANE SUGAR ENGINEERING หน้า 495)

2.6.2 การหาปริมาณน้ำที่จ่ายให้กับหัวฉีด (The quantity of water delivered by a nozzle)

ปริมาณน้ำที่จ่ายให้กับหัวฉีดคำนวณจาก

$$q = 3{,}600 \frac{cs}{10{,}000} \sqrt{2gH}$$

หรือ

$$q = 0.36cs\sqrt{2gH}$$

จะได้

$$q = 1.6cs\sqrt{H} \qquad \text{.....(2.6)}$$

โดย q = อัตราการไหลของหัวฉีด (m^3/h)

c = สัมประสิทธิ์การตีบตัว

s = พื้นที่หน้าตัดของหัวฉีด (cm^2)

H = ความดันของน้ำที่หัวฉีด (m of water)

2.6.3 การคำนวณหาค่าความหนาแน่น (mass density)

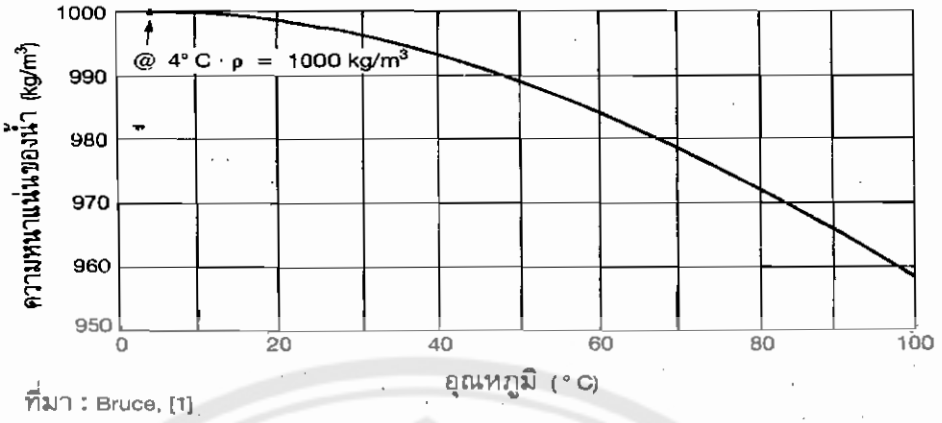
ความหนาแน่น (mass density) คือมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ปกติจะใช้สัญลักษณ์เป็นภาษากรีกคือ ρ (rho)

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad \text{.....(2.7)}$$

เมื่อ m คือ มวล

v คือ ปริมาตร

สำหรับความหนาแน่นของน้ำ หาได้โดยการนำน้ำที่รู้ปริมาตร V ไปชั่งหามวล m ก็จะสามารถหาความหนาแน่นของน้ำได้ตามสมการข้างต้น ซึ่งจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าความหนาแน่นของน้ำจะมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.5 อย่างไรก็ตาม ในการปฏิบัติงานทางวิศวกรรมแหล่งน้ำ ถ้าปัญหาที่นำมาพิจารณาไม่มีการกำหนดอุณหภูมิของน้ำมาให้ ก็มีข้อแนะนำให้ใช้เกณฑ์มาตรฐานสากล คือ ที่ความดันมาตรฐาน 1 บรรยากาศน้ำจะมีความหนาแน่น 1000 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ 4° C หมายความว่าในปริมาตรน้ำ 1 m^3 มีมวลน้ำ 1000 kg ซึ่งเป็นความหนาแน่นของน้ำที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิอื่น ๆ ซึ่งการนำค่าความหนาแน่นของน้ำ 1000 kg/m^3 ไปประยุกต์ใช้ในปัญหาทางชลศาสตร์ ก็ถือได้ว่าได้เผื่อความปลอดภัยไว้แล้ว เพราะในสภาพจริงทางธรรมชาติของน้ำ มีโอกาสเป็นไปได้ทุกอุณหภูมิ



ที่มา : Bruce, [1]

รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของน้ำและอุณหภูมิ

2.6.4 การคำนวณหาปริมาตรจำเพาะ (Specific volume)

ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) คือปริมาตรของสารในหนึ่งหน่วยมวล หรือส่วนกลับของความหนาแน่น

$$v_s = \frac{v}{m} = \frac{1}{\rho} \qquad \text{.....(2.8)}$$

เมื่อ Vs คือ ปริมาตรจำเพาะ

ปริมาตรจำเพาะของน้ำจะมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับความหนาแน่นของน้ำ

2.6.5 การคำนวณหาความเร็วและอัตราการไหล

ความเร็วเฉลี่ยของการไหลคือ อัตราส่วนระหว่างค่าอัตราการไหล (Flow Rate) กับพื้นที่หน้าตัด

(Cross Section) ของการไหล

$$v = \frac{Q}{A} \qquad \text{.....(2.9)}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหล (m^3/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)

V คือ ความเร็วในการไหล

2.6.6 สมการการไหลต่อเนื่อง (Equation of Continuity)

พิจารณารูป 2.6 เมื่อมีของไหลในท่อจากจุด 1 ไปยังจุด 2 มวลของของไหลที่จุด 1 และจุด 2 จะมีค่าคงที่ตามหลักทรงมวล (Conservation of mass) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \qquad \text{.....(2.10)}$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2)

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

ในกรณีที่เป็นของไหลชนิดเดียวกัน $\rho_1 = \rho_2$ ดังนั้น สมการ สามารถเขียนใหม่เป็น

รูปที่ 2.7 สมการการไหลต่อเนื่อง (Equation of Continuity)

2.6.7 สมการพลังงาน (Energy Equation)

จากกฎการทรงพลังงาน (Conservation of Energy) ซึ่งพลังงานจะไม่สูญหายหรือเกิดขึ้นมาได้เองสำหรับกรณีที่เป็นการไหลแบบคงที่ในของไหลที่อัดตัวไม่ได้ พลังงานรวมที่ตำแหน่งต่างๆของของไหลจะมีค่าคงที่ดังสมการ

มีชื่อเรียกว่า สมการเบอร์นูลี่ (Bernoulli's Equation)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \qquad \text{.....(2.11)}$$

ในบางกรณีอาจมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นในระหว่าง การไหล เช่น จากจุด 1 ไปยังจุด 2 ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจาก ความเสียดทานเป็นต้น สมการพลังงานของการไหลจะเป็น

เมื่อ h_L คือ ความสูญเสีย (Head Loss) ที่เกิดระหว่างการไหลจากจุด 1 ไปยังจุด 2

2.6.8 มาตรวัดแบบรูระบาย (Orifice meter)

มาตรวัดแบบรูระบาย (Orifice meter) คือเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหล ซึ่งมีแผ่นโลหะที่มีรูขอบคมตรงกลางแผ่นขวางทิศทางการไหลของของไหลซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหาอัตราการไหลของน้ำในท่อได้ง่ายเพราะสามารถควบคุมตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้ง่ายกว่ามาตรวัดแบบหัวฉีด (Nozzle) และแบบมาตรวัดแบบเวนจูรี(Venturi meter) และยังสามารถหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาอัตราการไหลได้ง่ายโดยการหาอัตราการไหลจากสมการ ดังนี้

$$Q_{คำนวณ} = CA_0 \times \sqrt{(2gH)} \qquad \text{.....(2.12)}$$

โดยที่ $Q_{คำนวณ}$ คือ อัตราการไหลของน้ำ (cm^3/min)

C คือ coefficient of orifice

A_0 คือ พื้นที่ของรูออริฟิช (m^2)

H คือ ความดันของน้ำ (m of water)