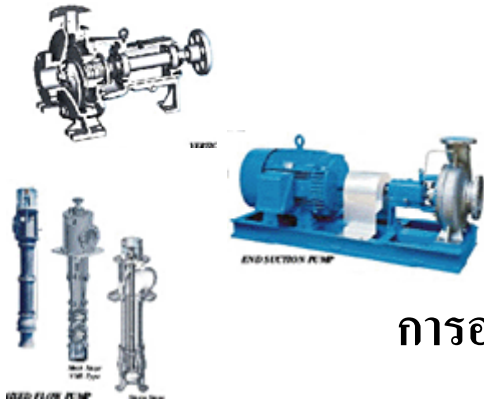




บทที่ 6

การอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องสูบน้ำ

(Energy Conservation for Water Pump)

ความสำคัญของเนื้อหาวิชา

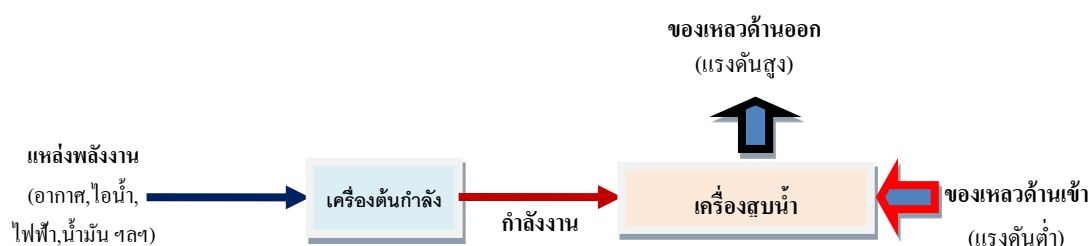
เครื่องสูบน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยสูบน้ำหรือทำให้น้ำเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง ปัจจุบันเครื่องสูบน้ำเป็นอุปกรณ์ที่มีความจำเป็นสำหรับบ้านพักอาศัยโดยเฉพาะอาคารชุดหรืออาคารที่มีความสูงหลายชั้น เครื่องสูบน้ำทำงานโดยใช้พลังงานไฟฟ้า ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำ จะช่วยให้ทราบถึงแนวทางในการใช้งานและบำรุงรักษาเครื่องสูบน้ำอย่างถูกวิธีจะทำให้ประหยัดน้ำและไฟฟ้า

วัตถุประสงค์

1. ทราบชนิดและหลักการทำงานของเครื่องสูบน้ำ
2. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำ
3. ทราบวิธีการสำรวจและประเมินประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำ
4. สามารถประเมินประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำจากตัวอย่างข้อมูลการสำรวจ
5. ทราบแนวทางการอนุรักษ์พลังงานของเครื่องสูบน้ำ

6.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำหรือปั๊ม เป็นอุปกรณ์สำหรับขับเคลื่อนของเหลวหรือก๊าซผ่านทางระบบท่อบีบ (Pipe) ไปสู่จุดหมาย การใช้งานที่ต้องการโดยการเพิ่มความดันและเพิ่มพลังงานให้แก่ของไหลนั้นๆ เป็นผลให้ของไหลนั้นเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หรือจากระดับหนึ่งไปยังอีกระดับหนึ่ง แต่กลไกที่ใช้ในการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะใบพัด อาจเป็นได้ทั้งใบพัด (Impeller) เกลียว (Screw) ลูกสูบ (Piston) ไดอะแฟรม (Diaphragm) เฟือง (Gear) และกลไกอื่นๆ ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดพลังงานให้กับของเหลวได้ ซึ่งเครื่องสูบแต่ละแบบมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างๆ แตกต่างกันไป การเลือกใช้จะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอีกมากมายหลายอย่าง ดังรูปที่ 6.1-1

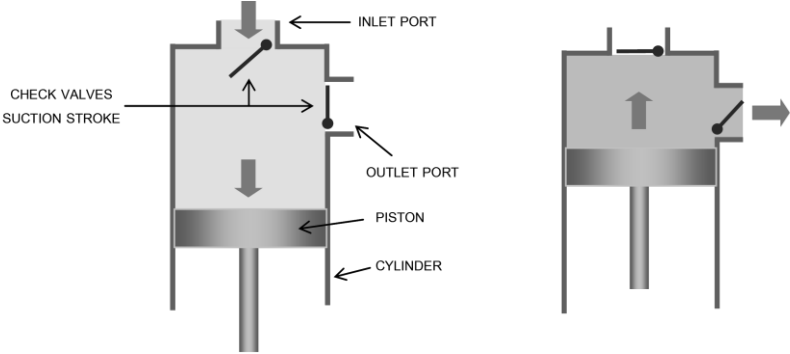


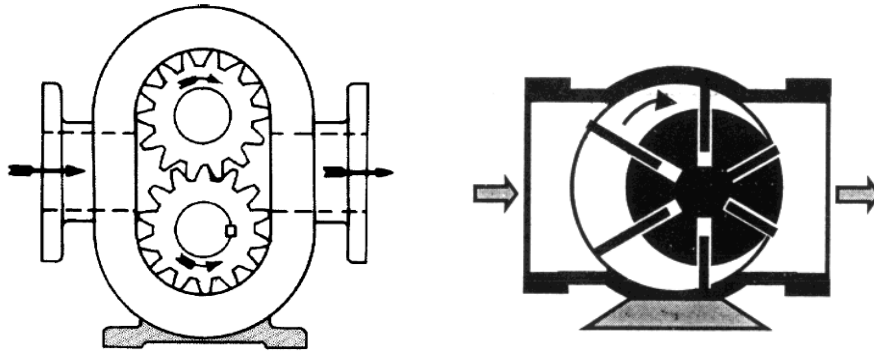
รูปที่ 6.1-1 การเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเพิ่มแรงดันให้แก่ของไหล

6.2 ประเภทของเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำสามารถจัดแบ่งประเภทได้หลายรูปแบบ และมีการเรียกชื่อแตกต่างกันออกไปมากมาย โดยนิยมแบ่งเป็นอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ

6.2.1 แยกตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว หรือการไหลของของเหลวในเครื่องสูบ ซึ่งได้แก่	
1. ประเภทแบบเครื่องสูบน้ำแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump)	เป็นเครื่องสูบที่มีการทำงานโดยการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เครื่องสูบแบบนี้บางครั้งเรียกว่าเป็นแบบ Roto-dynamic
2. ประเภทโรตารี (Rotary Pump)	เป็นเครื่องสูบที่มีการทำงานโดยการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยการหมุนของฟันเฟืองรอบแกนกลาง
3. ประเภทลูกสูบ (Reciprocating Pump)	เป็นเครื่องสูบที่มีการทำงานโดยการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยการอัดโดยตรงในกระบอกสูบ
4. ประเภทพิเศษ (Special Pump)	เป็นเครื่องสูบที่มีลักษณะพิเศษไม่สามารถจัดให้อยู่ในสามประเภทข้างต้นได้

6.2.2 แยกตามลักษณะการขับเคลื่อนของเหลวในเครื่องสูบน้ำ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ
1. ปริมาตรแทนที่เชิงบวก หรือแทนที่โดยตรง (Positive Displacement)
เครื่องสูบน้ำประเภทปริมาตรแทนที่เชิงบวก หรือแทนที่โดยตรง เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดที่มีการถ่ายเทพลังงานให้แก่ของไหลแบบไม่ต่อเนื่อง โดยการดูดของไหลเข้าไปในห้องปิดแล้วลดปริมาตรของห้องนั้นให้เล็กลงเพื่อให้ความดันเพิ่มขึ้น โดยเครื่องสูบน้ำที่จัดอยู่ในประเภทนี้ คือ เครื่องสูบลูกสูบ (Reciprocating Pump) และเครื่องสูบโรตารี (Rotary Pump) เครื่องสูบน้ำชนิดนี้จะจ่ายของไหลด้วยปริมาณที่แน่นอนค่าหนึ่งต่อการหมุนรอบหนึ่งของเพลลา และสามารถรับความดันที่สูงขึ้นในระบบได้ดี เครื่องสูบน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับสูบของไหลในปริมาณที่ไม่มากนัก แต่ต้องการเสถียรในระบบที่สูง
1.1 เครื่องสูบบแบบลูกสูบ
มีลักษณะการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา โดยมีลูกสูบทำหน้าที่ในการอัดของไหลภายในกระบอกสูบให้มีความดันสูงขึ้น ของเหลวที่ใช้เครื่องสูบน้ำประเภทนี้จะต้องมีความสะอาดเพียงพอที่ไม่ทำให้ชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ภายในกระบอกสูบเกิดการสึกหรอที่เร็วขึ้น การอัดตัวของของไหลแต่ละครั้งจะเป็นจังหวะตามการเคลื่อนที่กลับไปมาของลูกสูบ ไม่มีการต่อเนื่องกันจึงทำให้การไหลของของไหลมีลักษณะเป็นห้วงๆ (Pulsation)  รูปที่ 6.2-1 ลักษณะการทำงานของเครื่องสูบลูกสูบในจังหวะดูด (ซ้าย) และจังหวะจ่าย (ขวา)
1.2 เครื่องสูบโรตารี
ทำงานโดยเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว โดยอาศัยการหมุนของชิ้นส่วนที่เรียกว่า โรเตอร์ รอบแกนกลาง ซึ่งหมุนเพื่อทำให้เกิดความแตกต่างของความดันภายในระบบ ของเหลวจะถูกดูดเข้าและอัดให้เกิดแรงดันสูงขึ้นแล้วปล่อยออกมาทางด้านส่งไปใช้งาน การหมุนของโรเตอร์ จะก่อให้เกิดการแทนที่ของเหลวขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ของไหลที่ไหลผ่านเครื่องสูบน้ำมีอัตราการไหลอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เครื่องสูบน้ำแบบนี้จะมีอัตราการสูบน้ำต่ำกว่าเครื่องสูบน้ำประเภทอื่นๆ เนื่องจากอัตราการแทนที่ของเหลวมีค่าต่ำ



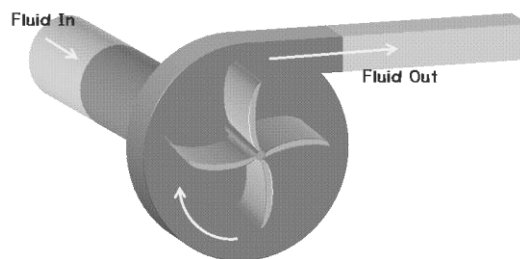
รูปที่ 6.2-2 เครื่องสูบน้ำโรตารีชนิดบีมเฟือง (ซ้าย) และเครื่องสูบน้ำแบบแผ่นกวาด (ขวา)

2. ไคเนติกส์ (Kinetic) หรือปริมาตรแทนที่ไม่เชิงบวก (Non-positive Displacement)

เครื่องสูบน้ำประเภทไคเนติกส์ เป็นเครื่องสูบน้ำชนิดที่มีการถ่ายเทพลังงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความเร็วให้แก่ของไหล โดยการใช้ใบพัดที่หมุนด้วยความเร็วสูงส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่ของไหลโดยตรง ไม่มีการกักไว้ในชั่วขณะใดเลย โดยเครื่องสูบน้ำที่จัดอยู่ในประเภทนี้ได้แก่ เครื่องสูบน้ำแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Pump) เครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแกน (Axial Flow Pump) และเครื่องสูบน้ำแบบไหลผสม (Mixed Flow Pump)

2.1 เครื่องสูบน้ำแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

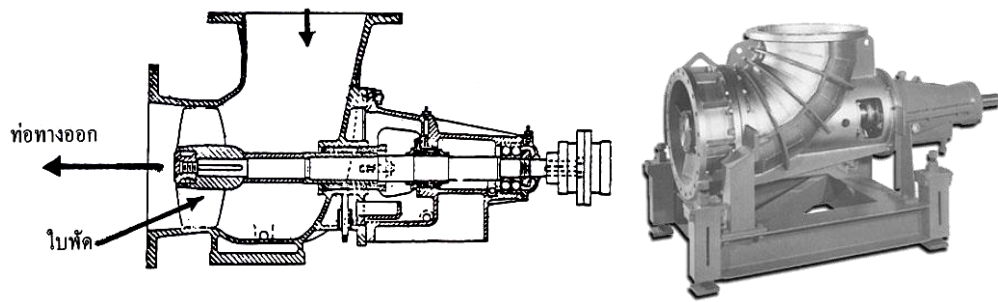
นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ชิ้นส่วนที่หมุนอยู่ภายในเรือนเครื่องสูบน้ำจะทำให้เกิดการขับเคลื่อนของไหล ของไหลที่ถูกสูบจะไหลผ่านเข้าสู่ช่องทางเข้าซึ่งขนานกับพื้นระนาบ และถูกผลักดันออกไปตามแนวรัศมีของใบพัด ดังลากับเพลลา ดังรูปที่ 6.2-3



รูปที่ 6.2-3 ลักษณะการทำงานของ Centrifugal Pump

2.2 เครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแกน

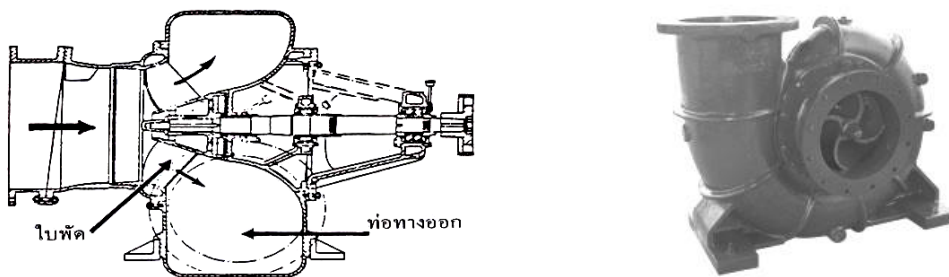
ทำงานโดยให้ของเหลวไหลเข้าและออกขนานกับเพลลา สามารถใช้ได้กับของไหลที่มีสารแขวนลอยปะปนมาด้วย นิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งต้องการความดันต่ำๆ แต่มีอัตราการไหลสูง ดังรูปที่ 6.2-4



รูปที่ 6.2-4 เครื่องสูบแบบไหลตามแกน Axial Flow Pump

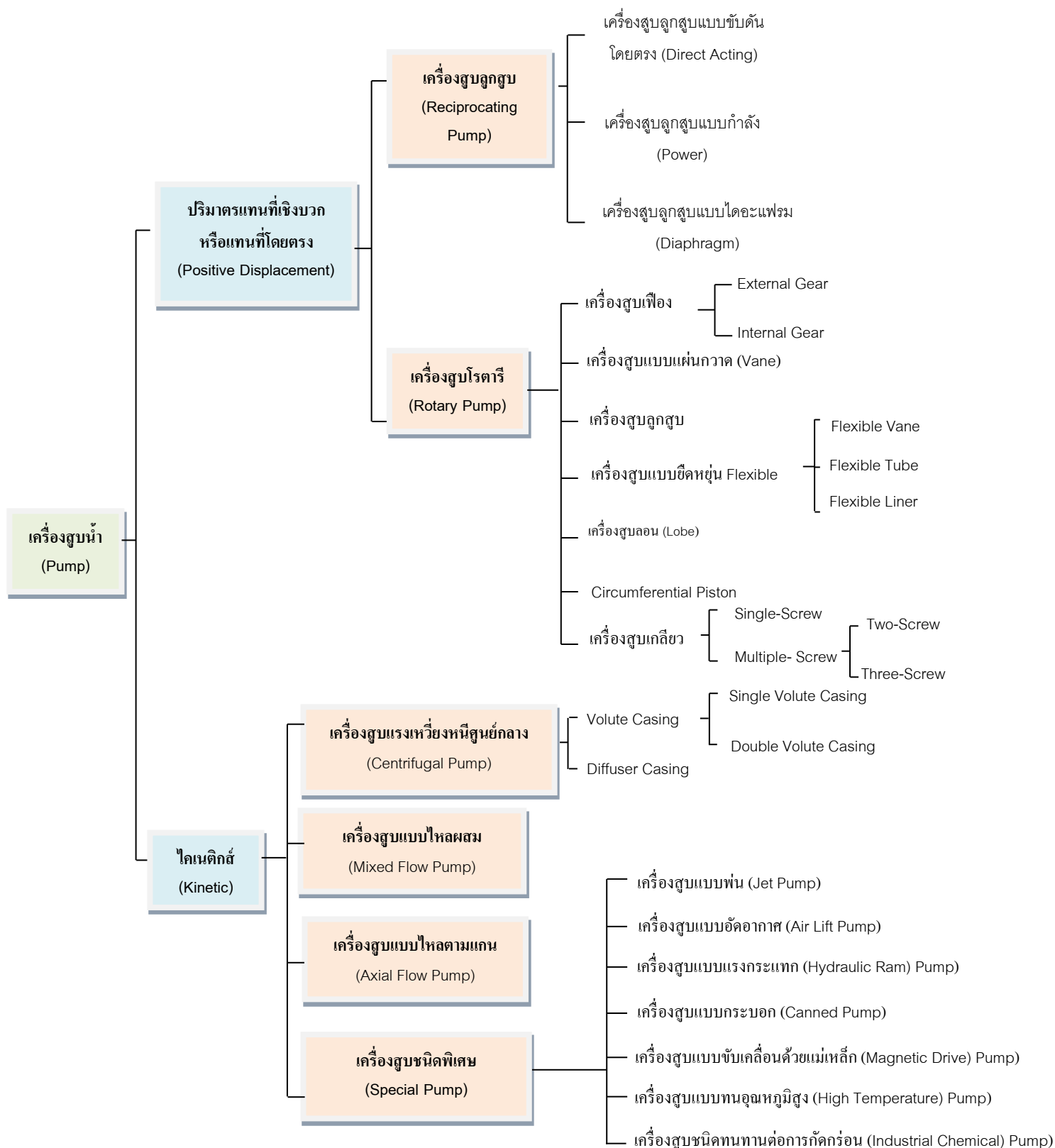
2.3 เครื่องสูบแบบไหลผสม

จะขับเคลื่อนของเหลวที่ไหลเข้ามาในทิศทางขนานกับเพลา ให้ไหลออกจากเครื่องสูบโดยทำมุมกับเพลา ตั้งแต่ 45 - 80 องศา การไหลทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมีของใบพัดจะทำให้เกิดแรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกนขึ้น ช่วยในการขับเคลื่อนของไหล นิยมใช้กับงานที่ต้องการความดันต่ำๆ แต่มีอัตราการไหลสูง ดังรูปที่ 6.2-5



รูปที่ 6.2-5 เครื่องสูบแบบผสม Mixed Flow Pump

จากวิธีจำแนกประเภทของเครื่องสูบน้ำที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นแผนภูมิการจำแนกประเภทปั๊มน้ำตามวิธีข้างต้นได้ดังรูปที่ 6.2-6



รูปที่ 6.2-6 การจำแนกประเภทของเครื่องสูบน้ำ

6.3 เฮด (Head)

การเข้าใจถึงพลังงานของของไหลเป็นสิ่งจำเป็นในการวิเคราะห์การทำงานและการกำหนดขนาดของเครื่องสูบลำพลังงานของของไหลประกอบด้วยพลังงานสามส่วนคือ พลังงานเนื่องจากความดันของของไหล พลังงานจลน์เนื่องจากความเร็วของของไหล และพลังงานศักย์เนื่องจากความสูง พลังงานทั้งสามส่วนนี้จะมีหน่วยในการคำนวณเป็นหน่วย จูล (J)

เมื่อนำพลังงานของไหลมาคำนวณเทียบกับน้ำหนักของของไหล จะมีหน่วยเป็นความสูงของของไหลและเรียกว่า เฮด มีหน่วยเป็นเมตร (m) ในระบบ SI หรือ นิ้ว (in) ในระบบอังกฤษ เฮดทั้งหมดที่ใช้ในการวิเคราะห์ในระบบเครื่องสูบน้ำหรือ Total Dynamic Head (TDH) ประกอบด้วย พลังงานสามส่วนของของไหลของไหลที่กล่าวมาข้างต้นและพลังงานที่สูญเสียไปในระหว่างการไหล กล่าวคือ เฮดความดัน เฮดความเร็ว เฮดความสูง และเฮดการสูญเสียรวม

6.3.1 เฮดความดัน (Pressure Head, H_p)

ค่าความดันนอกจากจะบอกเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เช่น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) แล้ว ถ้าเป็นความดันของของเหลวก็มักจะนิยมบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่จะก่อให้เกิดความดันที่กำหนดบนผิวหน้าซึ่งรองรับแท่งของเหลวนั้น ความดันซึ่งบอกเป็นแท่งความสูงของของเหลวนี้เรียกว่า เฮดความดัน (Pressure Head) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และเฮดความดัน H_p คือ

$$H_p = \frac{P}{\gamma} = \frac{P}{\rho g} \quad (6-1)$$

เมื่อ γ คือ น้ำหนักจำเพาะ มีหน่วยเป็น N/m^3

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว มีหน่วยเป็น kg/m^3

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก มีหน่วยเป็น m/s^2

6.3.2 เฮดความเร็ว (Velocity Head, H_v)

ของเหลวที่ไหลในท่อหรือทางน้ำเปิดด้วยความเร็วใดๆ นั้นมีพลังงานจลน์อยู่ พลังงานส่วนนี้เมื่อบอกในรูปของเฮดความเร็ว คือ

$$H_v = \frac{V^2}{2g} \quad (6-2)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของการไหล มีหน่วยเป็น m/s

เสดความเร็วอาจให้คำจำกัดความอีกอย่างหนึ่งว่า เป็นความสูงที่ของเหลวตกลงมาด้วยแรงดึงดูดของโลก จนได้ความเร็วเท่ากับความเร็วในการไหลของของเหลวนั้น

6.3.3 เสดสถิตย (Potential Head, Z)

เสดสถิตย คือระยะทางตามแนวตั้งของของเหลวที่ไหลผ่านท่อหรือทางน้ำเปิดซึ่งมีพลังงานศักย์อยู่ในพลังงานศักย์ส่วนนี้ สามารถเขียนในรูปเสดความสูงได้เป็น

$$\text{เสดความสูง} = Z \quad (6-3)$$

6.3.4 เสดการสูญเสียรวม (Total Head Loss, H_L)

Osborne Reynolds วิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ทำการทดลองเพื่อแบ่งรูปแบบการไหลของของไหล โดยกำหนดตามอัตราส่วนของแรงเฉื่อย ต่อแรงหนืด (หรือแรงที่เกิดเนื่องจากความฝืดของของไหล) และเรียกอัตรส่วนของแรงเฉื่อยกับแรงหนืดนี้ว่า ค่าเรย์โนลด์ (Re) คำนวณหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (6-4)$$

เมื่อ V = ความเร็วการไหลในท่อ (m/s)

D = ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

ρ = ความหนาแน่นของไหล (kg/m³)

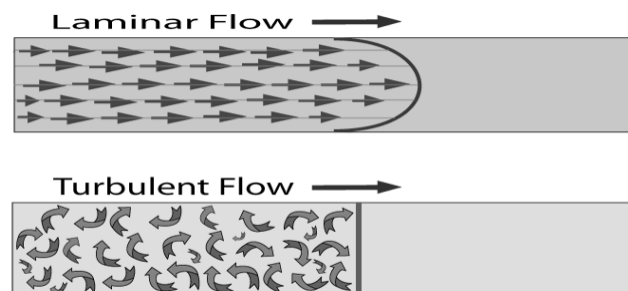
μ = ความหนืดสมบูรณ (N.s/m²)

ν = ความหนืดจลน (m²/s)

ถ้าค่า $Re \leq 2000$ ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ

$Re \geq 4000$ ถือว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

$2000 \leq Re \leq 4000$ ถือว่าเป็นการไหลที่อยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.3-1 ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ (บน) และแบบปั่นป่วน (ล่าง)

ในขณะที่ของเหลวไหลผ่านระบบท่อทั้งทางด้านดูดและด้านจ่าย พลังงานหรือเฮดในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังภายในของท่อ และพลังงานหรือเฮดในการไหลอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากการสูญเสียพลังงานจลน์เมื่อไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ผลรวมของการสูญเสียพลังงานหรือเฮดทั้งสองส่วนนี้รวมเรียกว่าเฮดการสูญเสียรวม

6.3.4.1 การเสียเฮดความฝืดหรือการสูญเสียหลัก

เมื่อของเหลวไหลภายในท่อจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับของเหลว ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความดันสูญเสียของของเหลวภายในท่อ การสูญเสียพลังงานในลักษณะนี้เรียกว่าการเสียเฮดความฝืดหรือการสูญเสียหลัก (Major Losses) โดยสามารถคำนวณได้จากวิธีคำนวณของ Darcy – Weisbach

$$H_{Lf} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (6-5)$$

เมื่อ H_{Lf} = เฮดของการสูญเสียเนื่องจากความฝืด หรือเฮดการสูญเสียหลัก (m)

f = ตัวประกอบความเสียดทาน

L = ความยาวท่อ (m)

D = ขนาดวัดผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

V = ความเร็วของการไหล (m/s)

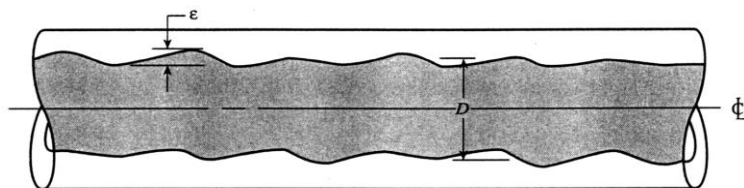
ค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของท่อ ลักษณะการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนและความขรุขระของผนังท่อ (ε)

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบราบเรียบ ค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการ

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Laminar Flow, } Re \leq 2,000) \quad (6-6)$$

สำหรับการไหลเป็นแบบปั่นป่วนที่มีค่าเรย์โนลด์มีค่ามากกว่าประมาณ 4,000 นั้น ค่าตัวประกอบความเสียดทาน f ก็จะขึ้นอยู่กับทั้ง Re และอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผนังท่อต่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ε/D) ค่าความขรุขระของผนังท่อ (ε) ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อดังตารางที่ 6.3-1 และการหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน f นั้นสามารถหาได้จากแผนภาพมูดี้ (Moody Diagram) ดังแสดงในรูป 6.3-2

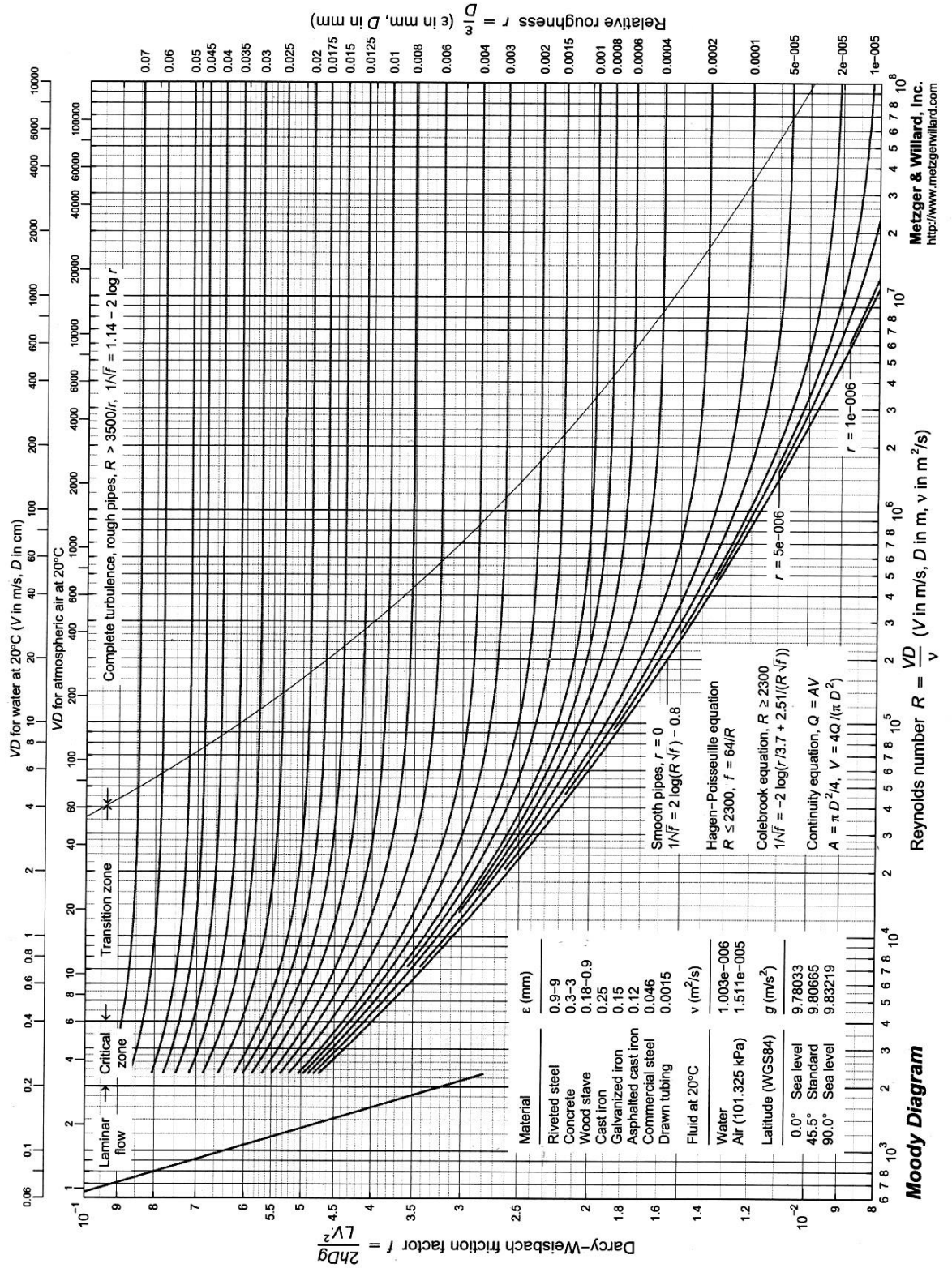
ตารางที่ 6.3-1 ค่าความขรุขระของผนังท่อ



Pipe Material	Absolute Roughness (ϵ)	
	Feet	Millimeters
Glass or plastic	0.0 (smooth)	0.0 (smooth)
Drawn tubing	0.000005	0.0015
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.045
Galvanized iron	0.0005	0.15
Cast iron	0.00085	0.26
Wood stave	0.0006–0.003	0.18–0.90
Concrete	0.001–0.01	0.3–3.0
Riveted steel	0.003–0.03	0.9–9.0

ตัวอย่างที่ 6-1 ท่อเหล็กหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ยาว 400 ม. ใช้ส่งน้ำที่อุณหภูมิ 20°C ด้วยอัตราการไหล 74.2 ลิตร/วินาที จงหาค่าเสดการสูญเสียหลักในท่อ

วิธีทำ	จากตารางที่ 6.3-1 ท่อเหล็กหล่อมีค่า	$\epsilon = 0.26 \text{ mm}$
	ความขรุขระสัมพัทธ์	$\epsilon/D = 0.26/150 = 0.0017$
	จากตารางน้ำที่อุณหภูมิ 20°C มีค่า	$U = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
	ความเร็วการไหลในท่อ	$V = Q/A$ $= (74.2 \times 10^{-3}) / ((\pi/4)(0.15^2)) \text{ m}^3/\text{s} = 4.22 \text{ m/s}$
	ค่าเรโนลด์นัมเบอร์	$Re = VD/U$ $= (4.22 \times 0.15) / (1.007 \times 10^{-6}) = 6.29 \times 10^5$
	ค่า Re มากกว่า 4000 แสดงว่าเป็นการไหลแบบปั่นป่วน	
	นำค่า Re และค่า ϵ/D ไปหาค่า f จากแผนภาพมูดี ได้ค่า $f = 0.0226$	
	คำนวณเสดการสูญเสียหลัก	$H_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$ $= 0.0226 \times (400/0.15) \times (4.22^2 / (2 \times 9.81))$ $= 54.70 \text{ m}$



รูปที่ 6.3-2 แผนภาพแฟรต (Moody Diagram)

6.3.4.2 การเสียheadเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์หรือการสูญเสียรอง

ในระบบท่อ จำเป็นต้องมีส่วนประกอบจำพวก ข้อต่อ ข้อลด ข้อขยาย และวาล์วชนิดต่างๆ การไหลของของเหลวผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการไหล การสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ในระบบท่อดังกล่าวเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า การสูญเสียรอง (Minor Losses) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$H_{Le} = K \frac{V^2}{2g} \quad (6-7)$$

เมื่อ H_{Le} = การเสียheadเนื่องจากอุปกรณ์หรือการสูญเสียรอง (m)

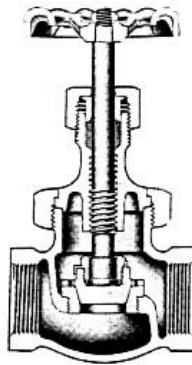
K = สัมประสิทธิ์ความต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์
ไม่มีหน่วย

V = ความเร็วของการไหล (m/s)

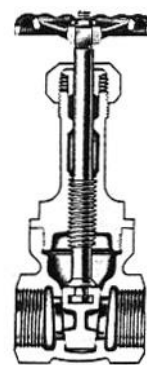
ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง K สามารถหาได้จากตารางหรือจากกราฟของอุปกรณ์ประกอบท่อแต่ละชนิดเช่น วาล์ว ข้อต่อ และข้องอต่างๆ ตารางที่ 6.3-2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของอุปกรณ์แต่ละชนิด รูป 6.3-3 ถึงรูป 6.3-7 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ประกอบท่อ

ตารางที่ 6.3-2 แสดงค่า Loss coefficients (K_L) ของวาล์วและข้อต่อต่างๆ

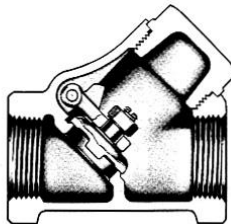
Valve or Fitting	Loss Coefficient K_L
1. Globe valve	
Fully open	10.0
½ open	12.5
2. Gate valve	
Fully open	0.19
¾ open	0.90
½ open	4.5
¼ open	24.0
3. Swing check valve	
Through flow	2.0
Blocked flow	∞
4. Tee	
Line flow	0.40
Branch flow	1.5
5. Elbow	
45°	0.40
90°	0.75
6. Return bend	2.2



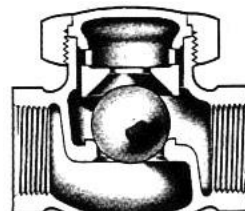
รูปที่ 6.3-3 ลักษณะโครงสร้างของโกลบวาล์ว



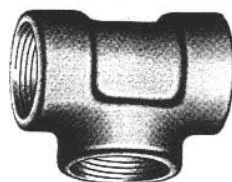
รูปที่ 6.3-4 ลักษณะโครงสร้างของเกตวาล์ว



รูปที่ 6.3-5 Swing Check Valve



รูปที่ 6.3-6 Ball Check Valve



(a) Tee



(b) 90° elbow



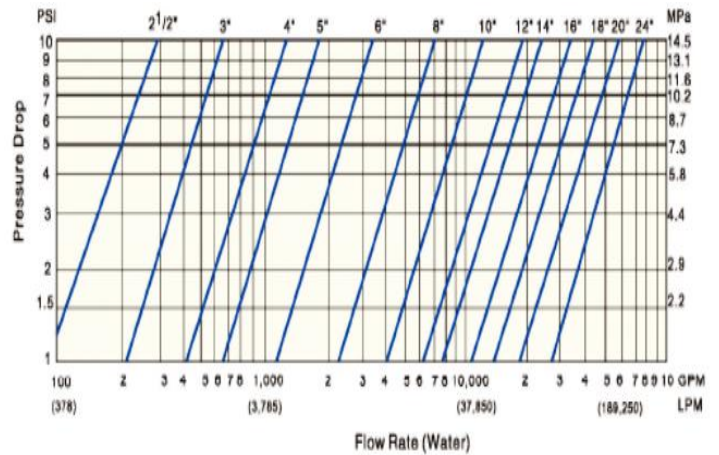
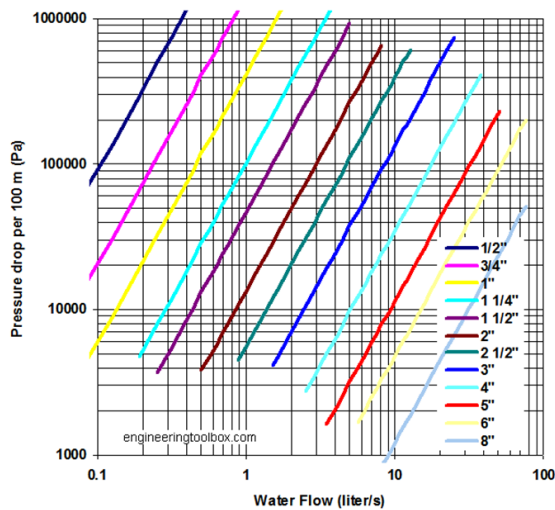
(c) 45° elbow

รูปที่ 6.3-7 ข้อต่อตัว T และข้องอ 90 และ 45 องศา

การสูญเสียพลังงานทั้งหมดในการไหลของไหลประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากความฝืดหรือการสูญเสียหลัก และการสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์หรือการสูญเสียรอง ดังแสดงในสมการ

$$H_L = H_{L_f} + H_{L_e} \quad (6-8)$$

และยังสามารถหาค่าการสูญเสียหลักและการสูญเสียรองได้จากแผนภาพความดันสูญเสียในท่อ (Pressure drop in pipes) และแผนภาพความดันสูญเสียในอุปกรณ์ประกอบท่อ ของบริษัทผู้ผลิตท่อและวาล์วซึ่งในปัจจุบันทางผู้ผลิตได้มีการจัดทำไว้เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์มากยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างในรูป 6.3-7/1



รูปที่ 6.3-7/1 ตัวอย่างแผนภาพความดันสูญเสียในท่อ Steel Pipe Schedule 40 (ซ้าย) และ Butterfly Valve (ขวา)

6.3.5 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)

กราฟเฮดของระบบ คือ กราฟซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านระบบกับเฮดรวมของระบบ ซึ่งเฮดรวมก็คือพลังงานที่เครื่องสูบน้ำจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อก่อให้เกิดการไหลนั้น โดยพลังงานที่เครื่องสูบน้ำจะต้องให้ (บอกเป็นความสูงของแท่งของเหลวหรือเฮด) มีค่าเท่ากับผลรวมของพลังงานสองอย่างด้วยกัน คือ

1. ความต่างระดับของของเหลวที่ปลายของท่อดูดหรือท่อจ่ายหรือเฮดสถิตย์
2. พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความฝืดในท่อ และจากการไหลผ่านอุปกรณ์ประกอบระบบท่อ

กราฟเฮดของระบบเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณานำมาใช้ในการออกแบบระบบเครื่องสูบน้ำ โดยการเขียนกราฟเฮดของระบบอาจจะแยกเขียนพลังงานที่เครื่องสูบน้ำจะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวตามข้อ 1 และ 2 ข้างต้น ในกรณีที่ความต่างระดับของของเหลวมีค่าคงที่ กราฟของพลังงานส่วนนี้จะเป็นเส้นราบขนานไปกับแกนนอน ซึ่งเป็นแกนของอัตราการไหล สำหรับการสูญเสียพลังงานหรือเฮดในข้อ 2 นั้น จะเป็นสัดส่วนกับกำลังสองของอัตราการไหล ดังนั้นลักษณะของกราฟจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลา เมื่อมีการเขียนแยกกัน กราฟของข้อ 1 เรียกว่า กราฟเฮดสถิตย์ (Static Head Curve) และ กราฟของข้อ 2 เรียกว่า กราฟเฮดความฝืด (Friction Head Curve หรือ Dynamic Head Curve) เมื่อรวมทั้งสองกราฟเข้าด้วยกันก็จะได้เป็น กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve หรือ Total Dynamic Head -TDH- Curve)

เฮดของระบบ = เฮดความดัน + เฮดสถิตย์ + เฮดการสูญเสียรวม

$$TDH = \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma} \right) + (Z_2 - Z_1) + H_L \quad (6-9)$$

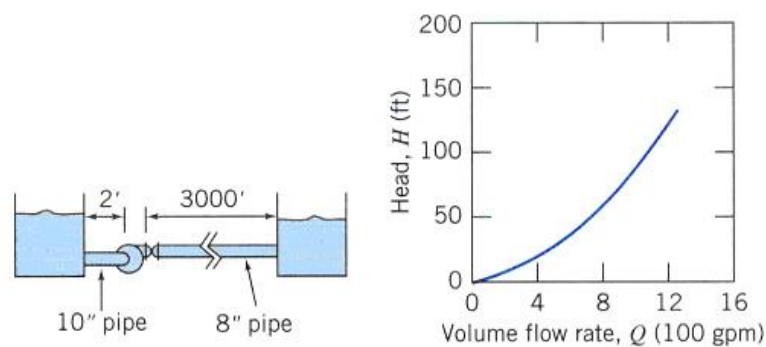
ในกรณีที่ความแตกต่างของความดันของของเหลวที่จุด 1 และที่จุด 2 มีค่าใกล้เคียงกัน สมการ (6-9) ลดรูปเป็น

$$\text{TDH} = (Z_2 - Z_1) + H_L$$

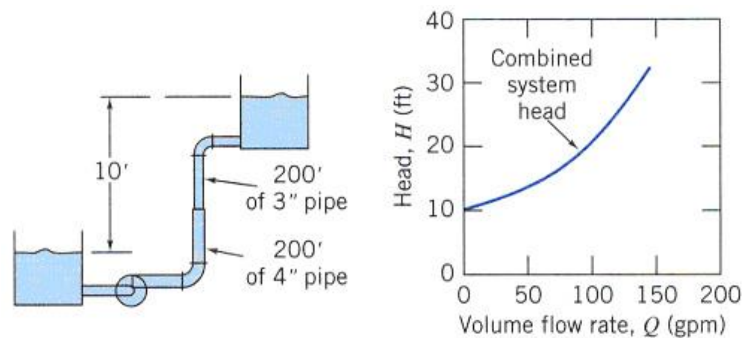
$$= (Z_2 - Z_1) + CQ^2 \quad (6-10)$$

เมื่อ
$$C = \left(f \times \frac{L}{D} \times \frac{1}{2gA^2} + \frac{K}{2gA^2} \right)$$

รูปที่ 6.3-8 และ 6.3-9 แสดงตัวอย่างกราฟเฮดของระบบท่อเมื่อไม่มีเปลี่ยนแปลงความสูง กราฟเฮดของระบบท่อเมื่อมีเปลี่ยนแปลงความสูง ตามลำดับ



รูปที่ 6.3-8 กราฟเฮดของระบบท่อเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงความสูง

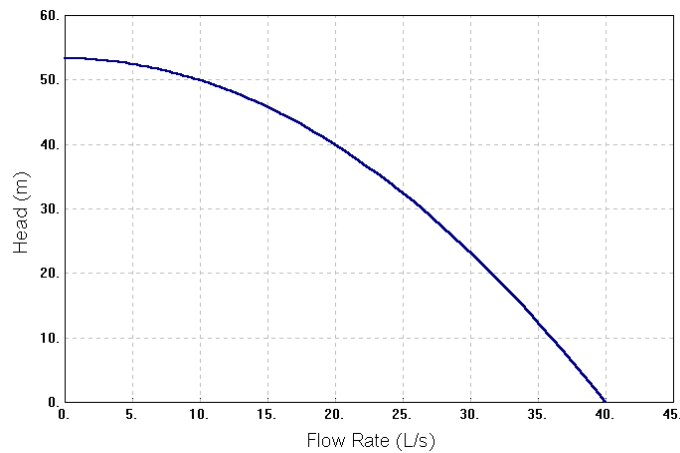


รูปที่ 6.3-9 กราฟเฮดของระบบท่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูง

6.3.6 กราฟเฮดของเครื่องสูบน้ำ

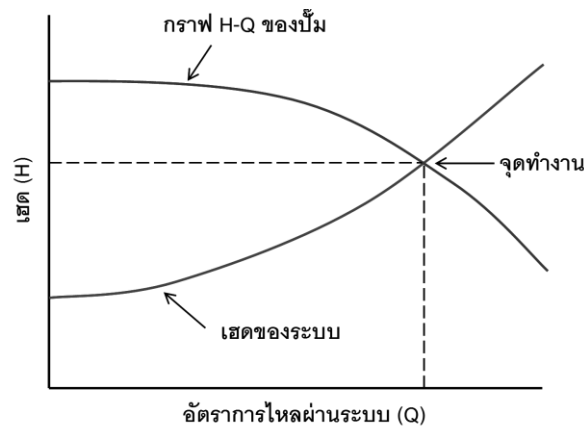
ในการเลือกใช้เครื่องสูบน้ำให้เหมาะกับสภาพการใช้งานจริง นอกจากพิจารณาถึงเฮดของระบบแล้ว ยังต้องพิจารณากราฟเฮด (หรือกราฟ H-Q) ของเครื่องสูบน้ำด้วย กราฟเฮดของปั๊มเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสูบของปั๊มหรืออัตราการไหลกับเฮด ตั้งแต่อัตราการไหลศูนย์ถึงอัตราการไหลสูงสุดของเครื่องสูบน้ำ กราฟเฮดของเครื่องสูบน้ำสามารถหาได้จากบริษัทผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำ กราฟเฮดยังสามารถหาได้

จากการทดลอง โดยการนำอัตราการไหลของปั๊มมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับผลต่างเสถียรความดันตรงทางออก และตรงทางเข้าของเครื่องสูบน้ำที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 6.3-10 กราฟคุณลักษณะ (กราฟเสถียรหรือกราฟ H-Q) ของเครื่องสูบน้ำ

เมื่อนำกราฟเสถียรของระบบและกราฟเสถียรของเครื่องสูบน้ำมาเขียนรวมกันดังรูปที่ 6.3-11 พบว่าเส้นกราฟทั้งสองตัดกันที่จุดทำงาน (Operation Point) ของเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 6.3-11 จุดทำงานของเครื่องสูบน้ำคือจุดตัดของกราฟเสถียรของระบบและกราฟเสถียรของเครื่องสูบน้ำ

6.3.7 ความเร็วจำเพาะและคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำ

เครื่องสูบน้ำที่กล่าวถึงในบทนี้เป็นเครื่องสูบน้ำกังหันแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งได้แก่ เครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง แรงเหวี่ยง หรือแบบไหลตามแนวรัศมี, เครื่องสูบน้ำไหลผสม และเครื่องสูบน้ำแบบไหลตามแกน เครื่องสูบน้ำแบบไหลต่อเนื่องเหล่านี้ได้รับการออกแบบตามแนวความคิดทำนองเดียวกันทั้งสิ้น นั่นก็คือ เครื่องสูบน้ำจะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานภายในของของไหล โดยอาศัยใบจักร ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่อัดให้ของไหลมีพลังงานมากขึ้น และเมื่อของไหลเดินทางทะลุผ่านช่องของใบจักรแล้วก็จะไปเลือกหอยโข่งลดความเร็วของของไหลพร้อมทั้งจะอัดนำของเหลวให้ไหลไปสู่ที่สูงได้ หรืออัดเข้าหม้อความดันได้

แม้จะยังมีเครื่องสูบน้ำที่ทำงานด้วยหลักการอื่นอยู่อีกหลายอย่าง เช่น สูบชัก สูบหมุน แต่ของไหลไม่ไหลต่อเนื่อง แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนี้เครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่ ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องสูบน้ำแบบไหลต่อเนื่องแทบทั้งสิ้น ไม่ว่าจะใช้เพื่อการสูบน้ำหรือใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องสูบของเหลวอย่างอื่นที่ไม่ใช่น้ำ

องค์ประกอบที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการพัฒนาเครื่องสูบน้ำ และในการใช้เครื่องสูบน้ำแบบไหลต่อเนื่อง มีดังนี้
(1) การนำมอเตอร์ไฟฟ้าและ/หรือเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือเครื่องกำเนิดพลังงานไอน้ำมาขับเคลื่อนด้วยความเร็วรอบสูง ๆ

(2) เครื่องสูบน้ำแบบไหลต่อเนื่องนี้จะมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับเครื่องสูบน้ำแบบอื่น ณ จุดปริมาณการสูบน้ำใกล้เคียงกัน นอกจากนี้เครื่องสูบน้ำแบบนี้ยังมีราคาถูกกว่าด้วย

(3) สามารถใช้สูบน้ำในช่วงที่กว้างมาก เช่น จาก 1 ลิตรต่อวินาที ไปจนถึงหลายพันลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และหัวความดันที่ได้ก็มีตั้งแต่ต่ำกว่า 1 เมตร ความสูงของน้ำจนถึง 300 เท่าของบรรยากาศ (ประมาณเป็นความสูงของน้ำประมาณ 3,000 ม.)

(4) สูบน้ำได้ประสิทธิภาพสูงในขณะที่อัตราการใช้พลังงานมีค่าต่ำเมื่อพิจารณา

(5) ผลิตหรือสร้างได้ง่าย ใช้และซ่อมง่าย

6.3.7.1 ค่าความเร็วจำเพาะ

การที่จะศึกษาการทำงานเชิงกลศาสตร์ของเครื่องสูบน้ำนั้นจะต้องศึกษาค่าตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวดังนี้

(1) อัตราการสูบ หรืออัตราการไหลของของไหลผ่านเครื่องสูบน้ำ (Q) ซึ่งเป็นปริมาณของไหลที่เครื่องสูบน้ำสูบส่งให้ต่อช่วงเวลาปฏิบัติการ ปกติจะวัดเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (m^3/min) หรือ ลิตรต่อวินาที

(2) ค่าหัวความดันรวม (H) ซึ่งก็คือ ค่าพลังงานทั้งพลังงานความดัน พลังงานศักย์ และพลังงานจลน์ของของไหล อาจหาได้จากผลต่างระหว่างค่าปริมาณพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของไหล ที่ทางเข้ากับที่ทางออก ค่าหัวความดันนี้ไม่ขึ้นกับค่าน้ำหนักจำเพาะของของไหล และโดยปกติจะแสดงค่าเป็นเมตรของน้ำ

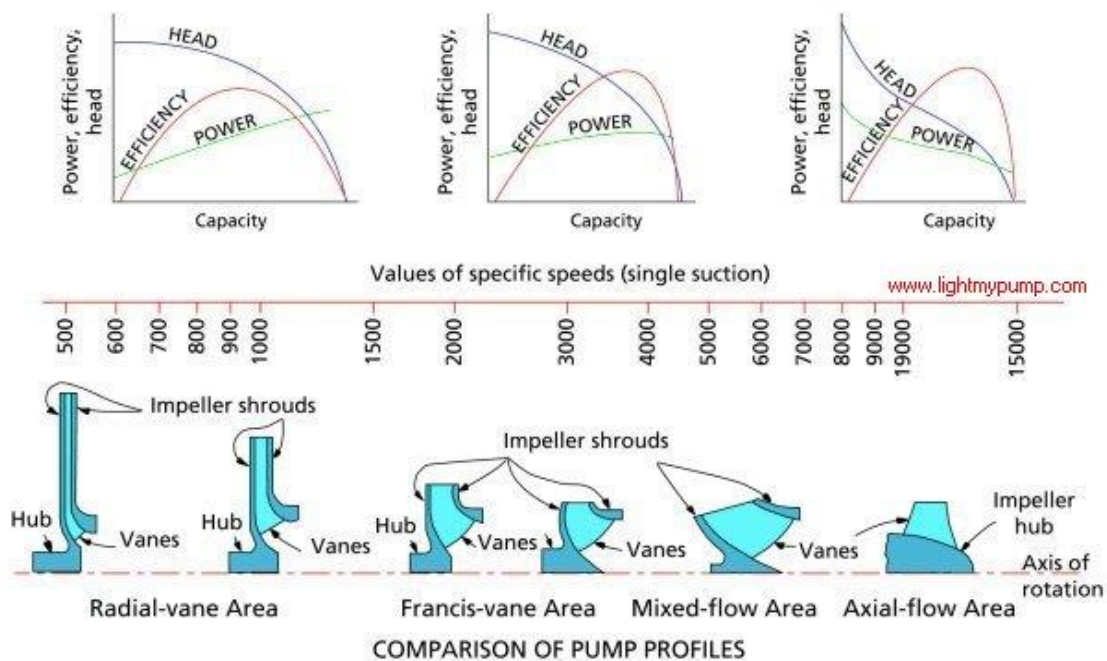
(3) ค่าความเร็วรอบ (N) ซึ่งเป็นความเร็วรอบของการหมุนของเพลลาของเครื่องสูบน้ำ แสดงไว้เป็นจำนวนรอบต่อวินาที (rpm)

ตัวแปรไร้มิติที่สำคัญของเครื่องสูบน้ำ คือ ค่า “ความเร็วจำเพาะ” (N_s) นั้นหาได้จากสมการที่ (1) ตัวแปรไร้มิตินี้สามารถใช้เป็นเกณฑ์ที่จะกำหนดรูปแบบของใบจักร และค่าคุณลักษณะอื่นของเครื่องสูบน้ำได้

$$N_s = \frac{N \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (6-11)$$

เมื่อ N = ความเร็วรอบ, rpm
 Q = อัตราการสูบ, m³/min
 H = หัวความดันรวม, m

ค่าความเร็วจำเพาะที่คำนวณได้นี้สามารถนำไปใช้เลือกใบจักรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด หรือจะใช้ค่า “ตัวเลขบอกชนิด” เครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะมีค่าเหมือนกันสำหรับใบจักรที่รูปร่างเหมือนกัน ค่าความเร็วจำเพาะนี้หาจากกฎความคล้ายคลึงกันของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะบอกความเร็วของใบจักรเครื่องสูบน้ำที่ทำงานภายใต้หัวความดันหน่วยและสูบน้ำได้ หน่วยอัตราการสูบ รูปร่างของใบจักรเครื่องสูบน้ำจะเปลี่ยนไปตามค่าความเร็วจำเพาะ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.3-12

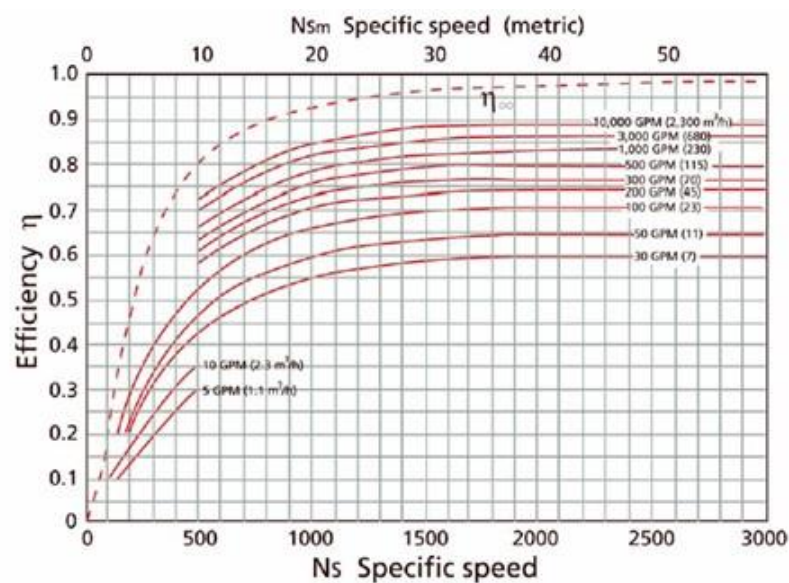


รูปที่ 6.3-12 ภาคตัดของใบจักรที่ความเร็วจำเพาะต่าง ๆ

โดยทั่วไปแล้ว ค่าความเร็วจำเพาะต่ำจะเป็นเครื่องสูบน้ำที่สูบได้หัวความดันสูงแต่อัตราการสูบต่ำ ในขณะที่ค่าความเร็วจำเพาะสูงเหมาะที่จะใช้สูบของไหลที่หัวความดันต่ำแต่อัตราการสูบสูง ควรจำไว้ด้วยว่าเครื่องสูบน้ำที่มีค่าความเร็วจำเพาะสูง จะมีใบจักรขนาดเล็กลง

ตารางที่ 6.3-3 การเลือกชนิดเครื่องสูบน้ำ

ชนิด	ความเร็วรอบ จำเพาะ	เพลาวาง	
		แนวนอน	แนวตั้ง
แรงเหวี่ยงหยอยโป่ง (ไหลตามแนวรัศมี)	100-600	สูบชั้นเดียวหัวความดัน 10-15 ม. สูบหลายชั้นหัวความดันเกิน 50 ม.	สูบชั้นเดียว 10-200 ม. สูบหลายชั้นหัวความดันเกิน
ไหลผสม	400-1,400	หัวความดัน 4-15 ม.	สูบชั้นเดียวหัวความดัน 40-60 หลายชั้น หัวความดันเกิน 10 ม.
ไหลตามแกน	1,300-2,000	หัวความดันไม่เกิน 6 ม.	หัวความดัน 8 ม.



รูปที่ 6.3-13 แสดงเส้นโค้งคุณสมบัติเครื่องสูบน้ำที่ความเร็วรอบจำเพาะต่าง ๆ

ค่าประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ ยังคงเป็นดังแสดงในสมการที่ (6-12)

$$e = \frac{0.163 \gamma Q H}{L_s} \quad (6-12)$$

เมื่อ e = ประสิทธิภาพ
 γ = น้ำหนักจำเพาะของไหลที่ถูกสูบ, kg/l
 Q = อัตราการสูบ, m³/min
 H = หัวความดันรวม, m
 L_s = กำลังขับเพลาน้ำ, kW

6.4 หลักการของ NPSH

6.4.1 หลักพื้นฐานและความเข้าใจเกี่ยวกับ NPSH

6.4.1.1 ลักษณะของความดันตามเส้นทางเดินของของไหล

รูปที่ 6.4-1 แสดงความดันของของไหลที่ทางเข้าของเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงที่ทำงาน ณ จุดที่ออกแบบ ระหว่างจุด (1) และจุด (A) ก่อนทางเข้าที่ขอบของครีปใบพัด ความดันสมบูรณ์สามารถหาได้จากสมการอนุรักษ์พลังงาน โดย $P_{abs,1}$ และ $P_{abs,A}$ เป็นความดันสมบูรณ์, V_1, V_2 เป็นความเร็วเฉลี่ย H_{1-A} เป็นความสูญเสีย (Head Losses) ระหว่างจุด (1) กับ จุด (A) นับจากจุด (A) จนถึงจุด (B) ความดันจะลดลงเนื่องจากของไหลถูกเร่งเข้าสู่ทางเข้าของครีปใบพัด ความแตกต่างของความสูงระหว่างจุด (1) และ จุด (A) จะประมาณว่าเท่ากับศูนย์ จากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{P_{abs,1}}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_{abs,A}}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + \Delta H_{1-A} \quad (6-13)$$

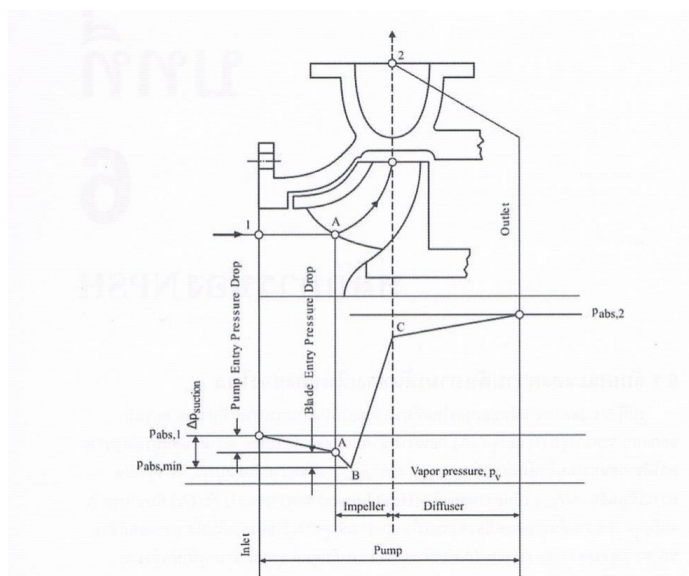
$$H_{abs,1} = \frac{P_{abs,1}}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} \quad (6-14)$$

เมื่อ $H_{abs,1}$ = ความดันสมบูรณ์ที่ทางเข้าของใบพัดในรูปของความสูง (เฮด)

6.4.1.2 คำจำกัดความของ NPSH

6.4.1.2.1 หลักพื้นฐาน

ให้ P_v เป็นความดันไอของของเหลวซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของของเหลว ความดันรวมสมบูรณ์ (Absolute Total Pressure) $P_{abs,t}$ ที่จุด (1) จะต้องมากกว่า (P_v) เสมอ



รูปที่ 6.4-1 ความดันของของไหลที่ทางเข้าจนถึงทางออกของเครื่องสูบน้ำแรงเหวี่ยง

นั่นคือ

$$P_{abs,t} > P_v$$

หรือ

$$\frac{P_{abs,t}}{\rho g} > \frac{P_v}{\rho g}$$

สาเหตุที่ใช้ความดันสมบูรณ์เพราะว่า ค่าของความดันไอ, P_v ส่วนใหญ่จะเป็นความดันสมบูรณ์

จาก

$$\frac{P_{abs,t}}{\rho g} > \frac{P_v}{\rho g}$$

$$\frac{P_{abs,t}}{\rho g} = \frac{P_v}{\rho g} + \text{NPSH} \quad (6-15)$$

มีหน่วยเป็นความสูงเช่น เมตร หรือ ฟุต นั่นคือ NPSH คือ เสด หรือความดัน ที่อยู่ในรูปของความสูงของของเหลวที่ใส่เข้าไปหรือให้แก่เครื่องสูบน้ำเพื่อไม่ให้ของเหลวกลายเป็นไอนั่นเอง

$$\text{NPSH} = \frac{P_{abs,t}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (6-16)$$

ความดันสมบูรณ์ = ความดันสถิติกสมบูรณ์ + ความดันไดนามิก

$$\frac{P_{abs,t}}{\rho g} = \frac{P_{abs,l}}{\rho g} + \frac{V_l^2}{2g} = H_{abs,l} \quad (6-17)$$

ความดันสถิติกสมบูรณ์ = ความดันสถิติกเกจ Eye ของใบพัด + ความดันบรรยากาศ

$$\text{NPSH} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{P_{g,l}}{\rho g} + \frac{V_l^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (6-18)$$

เมื่อ $P_{g,l}$ = ความดันเกจที่ตำแหน่ง Eye ของใบพัด

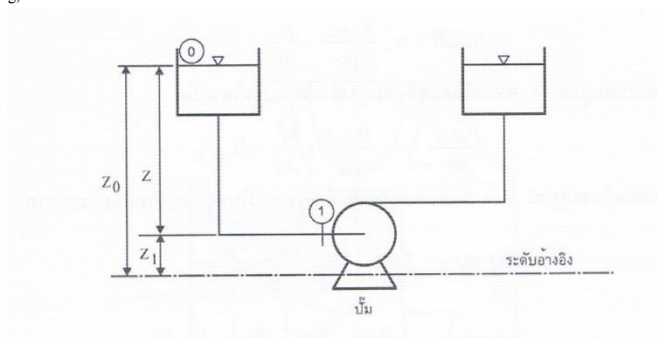
V_l = ความเร็วที่ตำแหน่ง Eye ของใบพัด

ค่าของ NPSN มี 2 ค่าคือ NPSHA (Net Position Suction Head Available) กับ NPSHR (Net Positive Suction Head Required) การติดตั้งจะพิจารณาเฉพาะ NPSHA สำหรับ NPSHR เป็นหน้าที่ของผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำจะต้องทดสอบและแสดงไว้ในกราฟที่แสดงถึงสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ (Performance Curve) เราจะเริ่มต้นศึกษาวิธีการหา NPSHA สำหรับผู้ติดตั้งเครื่องสูบน้ำจะต้องระลึกไว้เสมอว่าค่าของ NPSHA มากกว่า NPSHR เสมอ ตัวอย่างการคำนวณ NPSHA จากรูปที่ 6.4-2 กำหนดให้ Z เท่ากับ 3 เมตร อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 80°C จากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{\text{Loss}(0-1)} \quad (6-19)$$

$$\frac{P_{g,1}}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_{\text{Loss}(0-1)} = Z_0 - Z_1 = Z \quad (6-20)$$

เมื่อ $P_1 = P_{g,1}$



รูปที่ 6.4-2 การหาสมการสำหรับ NPSHA

จาก

$$\text{NPSH} = \frac{P_{\text{atm}}}{\rho g} + \frac{P_{g,1}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g}$$

ดังนั้น

$$\text{NPSH} = \frac{P_{\text{atm}}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} + Z - h_{\text{Loss}(0-1)} \quad (6-21)$$

ในการคำนวณค่าของ $h_{\text{Loss}(0-1)}$ ทำได้ดังนี้

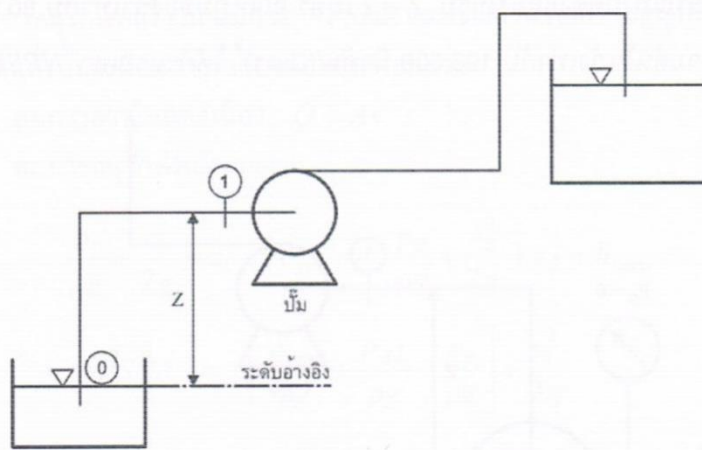
Major Losses คำนวณได้จาก	$h_{\text{Loss}(0-1)} = f \frac{L}{d} \frac{V_1^2}{2g}$	
Minor Losses คำนวณได้จาก	$h_{m(0-1)} = \frac{KV_1^2}{2g}$	(6.22)

K = แฟกเตอร์ความสูญเสียในข้อต่อ, ข้องอ, วาล์ว ฯลฯ

ตัวอย่างที่ 6-2 รายละเอียดการสูบส่งน้ำดังนี้ ความดันบรรยากาศ (P_{atm}) = 100,000 นิวตัน/(เมตร)² ความดันไอของน้ำที่ 80 °C (P_v) = 47,400 นิวตัน/(เมตร)² ความหนาแน่นของน้ำ (ρ) = 973 กิโลกรัม/(เมตร)³ สมมติว่า ความสูญเสีย ($h_{Loss(0-1)}$) = 1.5 เมตร และ ระยะความสูง (Z) = 3 เมตร จงหาค่า NPSHA

$$\begin{aligned} NPSHA &= \frac{P_{atm}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} + Z - h_{Loss(0-1)} \\ &= \frac{100,000 - 47,400}{973 \times 9.81} + 3 - 1.5 \\ &= 7 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 6-3 จากรูปที่ที่กำหนดให้ $Z = 4$ เมตร อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 20 °C ความดันบรรยากาศ (P_{atm}) = 102,000 นิวตัน/(เมตร)² ความดันไอของน้ำที่ 20 °C (P_v) = 2,340 นิวตัน/(เมตร)² ความหนาแน่นของน้ำ (ρ) = 999 กิโลกรัม/(เมตร)³ สมมติว่า ความสูญเสีย, $h_{Loss(0-1)}$ = 1.2 เมตร จงหา NPSHA



รูปที่ 6.4-3 สำหรับตัวอย่างที่ 6-3

สมการอนุรักษ์พลังงานระหว่างจุด (0) กับ (1)

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{Loss(0-1)}$$

$$P_1 = P_{g.1}$$

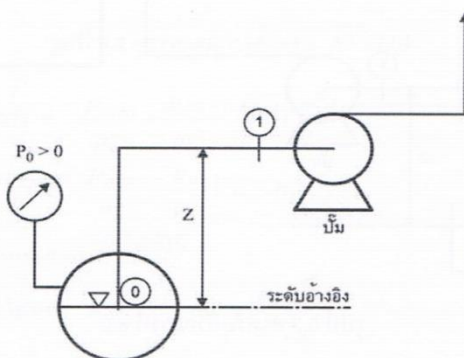
$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{P_{g.1}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} + \frac{V_1^2}{\rho g}$$

จากสมการอนุรักษ์พลังงานจะได้

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = -Z_1 - h_{Loss(0-1)}$$

ดังนั้น	$NPSH = \frac{P_{atm}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - Z - h_{Loss(0-1)}$
	$NPSHA = \frac{102,000 - 2,340}{999 \cdot 9.81} - 4 - 1.2$ $= 5 \text{ เมตร}$

ตัวอย่างที่ 6-4 ในกรณีดังแสดงในรูป $Z = 2$ เมตร อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 80°C ความดันในถังเท่ากับ $196,000$ นิวตัน/(เมตร)² ให้คำนวณหา NPSHA



รูปที่ 6.4-4 สำหรับตัวอย่างที่ 6-4

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน $\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{Loss(0-1)}$

จากสมการอนุรักษ์พลังงาน เราจะได้ $\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_0}{\rho g} - Z_1 + h_{Loss(0-1)}$

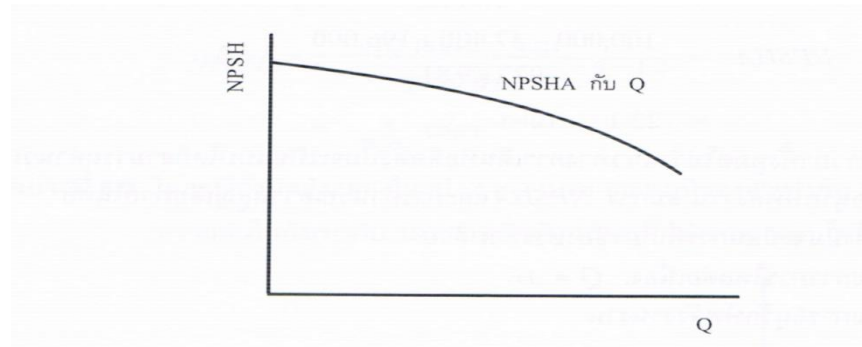
ดังนั้น
$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} + \frac{P_0}{\rho g} - Z - h_{Loss(0-1)}$$

ความดันบรรยากาศ;	P_{atm}	=	100,000	นิวตัน/(เมตร) ²
ความดันไอของน้ำที่ 80°C , P_v		=	999	นิวตัน/(เมตร) ²
ความหนาแน่นของน้ำที่ 80°C , ρ		=	973	กิโลกรัม/(เมตร) ³
ความดันเกจในถัง, P_0		=	196,000	นิวตัน/(เมตร) ²
สมมติว่า ความสูญเสีย, $h_{Loss(0-1)}$		=	2	เมตร

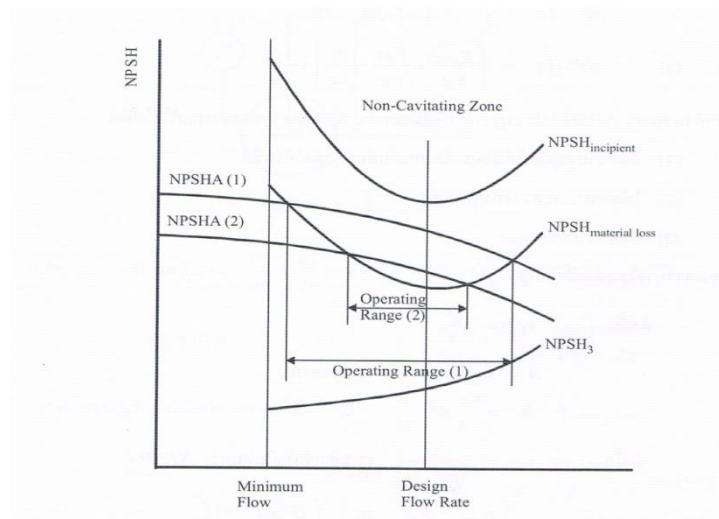
$$NPSHA = \frac{100,000 - 999 + 196,000}{973 \cdot 9.81} - 2 - 2$$

$$= 22.1 \text{ เมตร}$$

$NPSHA = K_1 + K_2 Q^2$ โดย K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่ เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง NPSHA กับ Q แสดงดังรูปที่ 6.4-5



รูปที่ 6.4-5 NPSHA กับ Q



รูปที่ 6.4-6 Margin ระหว่าง NPSHA กับ NPSHR

ตารางที่ 6.4-1 การเลือก NPSHA เพื่อการทำงานที่ปลอดภัย

วัตถุประสงค์: ตารางนี้เป็นการหา <i>NPSHA</i> เพื่อให้ทำงานของปั๊มปราศจากปัญหาโดยมีเกณฑ์ที่ใช้ตัดสินดังนี้				
● C1: ปั๊มเดินเครื่องได้ตลอดช่วงการทำงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราการไหลสูงสุด ● C2 : ขีดจำกัดควาวิเตชั่นที่จะก่อให้เกิดเสียงและการสั่น ● C3 : หลีกเลี่ยงควาวิเตชั่นไม่ให้มากเกินไปที่จะทำให้เกิดการผุกร่อน				
<i>u₁</i> เมตร/วินาที	ของไหล	เกณฑ์ในการตัดสิน	ค่าของ <i>NPSHA</i>	
< 10	ทุกชนิด	C1(C2)	$NPSHA \geq 1.25NPSH_3$ อย่างน้อยที่สุด : $NPSHA = NPSH_3 + 0.6$ เมตร	
< 20	สารไฮโดรคาร์บอน ยกเว้น น้ำมันก๊าด		ช่วงการทำงานที่ปลอดภัยที่ได้เพื่อความไม่แน่นอนแล้ว	
10 - 50	น้ำ	C2,C3	$\sigma_A \geq \sigma_3 + F_R F_F \left[0.05 + 2 \left(\frac{u_1}{u_{ref}} \right)^3 \right]$ <i>u_{ref}</i> = 100 เมตร/วินาที	
			แฟคเตอร์ของของไหล	<i>F_F</i>
			น้ำที่ <i>α</i> > 5 ppm; <i>t</i> < 200° ซ	1.0
			น้ำทะเลหรือสารกัดกร่อนอื่นๆ	≥ 1.15
20 - 60	สารไฮโดรคาร์บอน		สารไฮโดรคาร์บอน <i>ΔTu</i> > 5° ซ	0.75
			แฟคเตอร์เสียง	<i>F_R</i>
			การทำงานที่ 0.8 < <i>q*</i> < 1.1	1.0
			การทำงานที่ Part Load	1.2
			ความเร็วที่ไหลเข้าใบพัดไม่สม่ำเสมอ	≥ 1.1

ตารางที่ 6.4-1 การเลือก NPSHA เพื่อการทำงานที่ปลอดภัย (ต่อ)

u_1 เมตร/วินาที	ของไหล	เกณฑ์ในการตัดสินใจ	ค่าของ NPSHA
50 - 75	น้ำ ปั๊มทำจากวัสดุ Cr-Ni-Steel	C3 C1	ความยาวของ Cavity, เสี่ยงจากควิเตชันหรือการทำงานภายใต้สภาวะเดียวกันต้องมีการตรวจอายุของปั๊ม
> 60	ไฮโดรคาร์บอน ปั๊มทำจากวัสดุ Cr-Ni-Steel	C1 C3	ปริมาณของ Cavity ต้องไม่เกินขีดจำกัดเพื่อป้องกันการสั่น (Vibration), เสี่ยงและ Pulsations มากเกินไป
> 75	น้ำ $T < 200^\circ \text{C}$ Cr-Ni-Steel	C1 C3	$NPSHA > NPSH_i$ ในทางปฏิบัติการทำงานที่ปราศจากฟองเป็นสิ่งจำเป็นมิฉะนั้นจะเกิดความเสียหายในระยะเวลายาวนาน
10 - 25	น้ำที่มีการเติมอากาศ $\alpha < 5 \text{ ppm.}$ $T < 100^\circ \text{C}$	C2	$\sigma_A \geq \sigma_3 + F_R F_F \left\{ 0.05 + 2 \left(\frac{u_1}{u_{ref}} \right)^3 \right\}$ $u_{ref} = 100$ เมตร/วินาที
> 25	ปั๊มทำจาก Cr-Ni-Steel	C3	เกิดการผุกร่อนมาก, ปริมาณของ Cavity หรือ Cavitation Noise ต้องมีขีดจำกัด
อย่างน้อยที่สุด : $NPSHA \geq 1.25 NPSH_3$ หรือ $NPSHA = NPSH_3 + 0.6$ เมตร			
พิจารณาว่าค่าไหนมากกว่า			
แฟคเตอร์ที่เพื่อไว้สำหรับความปลอดภัยกำหนดเป็น			
$F_{NPSH} = \frac{NPSHA}{NPSH_3} = \frac{\sigma_A}{\sigma_3}$			

หมายเหตุ:

1. α = Gas Constant (PPM)
2. ΔT_u = ความแตกต่างของอุณหภูมิของฟองไอ (Bubble) และสภาวะแวดล้อม
3. u_1 = ความเร็วรอบขอบที่ทางเข้าของปั๊ม, $u_1 = \pi d_1 n / 60$
4. $q = \frac{Q}{Q_{opt}}$, Q_{opt} = อัตราการไหลที่ Best Efficiency Point, Q = อัตราการไหลใดๆ
5. $\sigma = \frac{2g(NPSH)}{u_1^2}$

6.4.2 แฟกเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อ NPSH

รูปร่างทางเข้าของใบพัด การลดความเร็วในแนวเมริเดียน, C_m สัมประสิทธิ์ k_1 และ k_2 เขียนได้ดังนี้

$$\text{NPSHR} = k_1 \frac{c_m^2}{2g} + k_2 \frac{w_1^2}{2g} \quad (6-21)$$

โดย w_1 คือความเร็วสัมผัสที่ทางเข้า

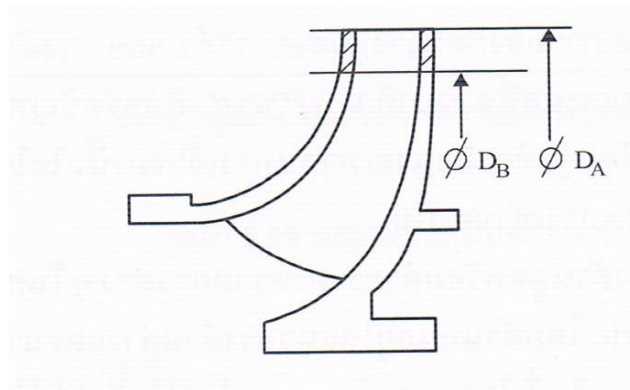
การตะใบขอบทางเข้าเป็นวิธีที่ง่ายในการลด NPSHR การออกแบบเพื่อลด NPSHR ผลก็คือทำให้ Eye Area ของใบพัดใหญ่ขึ้น เพราะต้องการค่า C_m น้อยลง ผลเสียที่ตามมาก็คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดที่ทางเข้าใหญ่ขึ้น (D_c มากขึ้น) ซึ่งมีผลต่อการทำงานของเครื่องสูบน้ำที่อัตราการไหลต่ำๆ (Partial Flow)

ความขรุขระของใบพัด ใบพัดที่มีผิวเรียบจะมีอุปสรรคต่อการไหลน้อยดังนั้นทำให้ NPSHR ลดลง

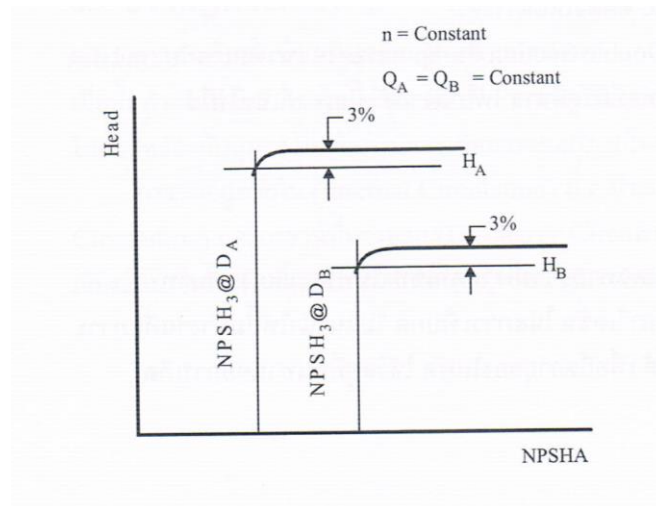
6.4.2.1 ผลของการขลิบหรือตัดใบพัด

จากรูปที่ 6.4-7 และ 6.4-8 แสดง NPSH₃ เปลี่ยนเมื่อใบพัดถูกขลิบ เสดของเครื่องสูบน้ำลดลงตามใบพัดที่ถูกขลิบหรือตัด 3% Head Drop ของใบพัดที่ถูกขลิบหรือตัดจะแสดงเป็น H_B

$$\text{NPSHR} = k_1 \frac{c_m^2}{2g} + k_2 \frac{w_1^2}{2g} \quad (6-22)$$



รูปที่ 6.4-7 การขลิบใบพัด



รูปที่ 6.4-8 ผลของการขลิบใบพัด

การลดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดโดยการขลิบ เมื่อ $n =$ คงที่ $Q =$ คงที่ ค่าของ $NPSH_3$ อาจเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับรูปร่างของใบพัด

6.4.3 ผลของของไหลที่สูบล้นต่อค่า NPSH

6.4.3.1 อัตราส่วนของแก๊สกับของเหลว

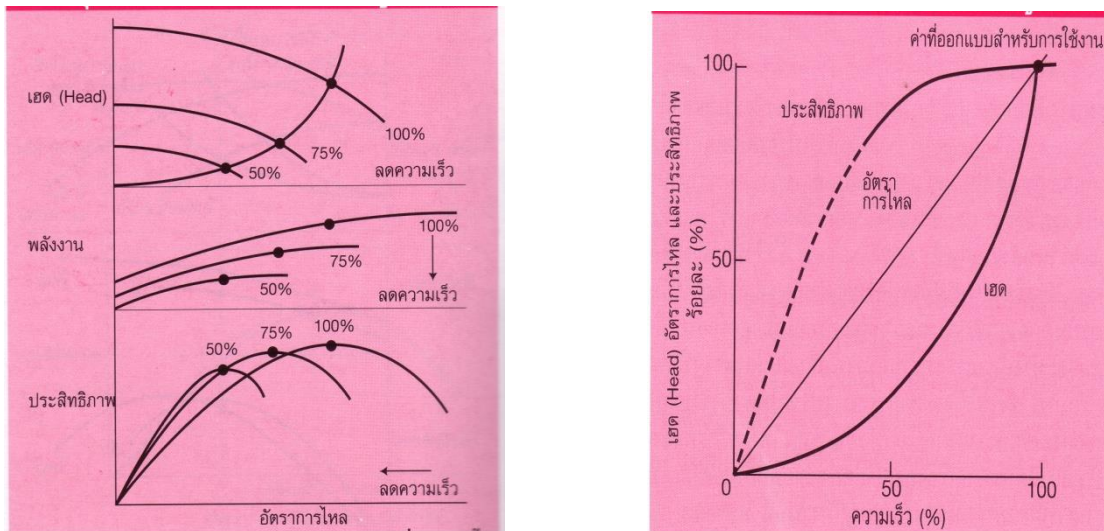
ค่า $NPSH_3$ ได้จากการทดลองโดยผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำโดยใช้ น้ำสะอาด ไม่มีอากาศ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ในการเกิดของไอเนื่องจากความเค้น พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของไอกับปริมาตรของเหลว, R ตัวอย่างค่าของ R สำหรับน้ำที่ 21 องศาเซลเซียส เท่ากับ 53,000 สำหรับไฮโดรคาร์บอน สำหรับน้ำร้อนค่าของ R จะใกล้เคียงกับสารไฮโดรคาร์บอน

6.4.3.2 ผลทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์

ผลทางเทอร์โมไดนามิกส์เนื่องจากการระเหยเป็นไอของของเหลวทำให้เฟสที่เป็นของเหลวเย็นลง ทำให้ความดันไอลดต่ำลง ดังนั้นการเกิดคาวิเทชันก็ลดลง การลดลงของ $NPSH$ ได้

6.5 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำ

ประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ นับตั้งแต่ ประเภทและคุณภาพของเครื่องสูบน้ำ การออกแบบและการติดตั้ง สภาพการใช้งาน ตลอดจนการบำรุงรักษา สภาพการใช้งานเครื่องสูบน้ำมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ โดยทางทฤษฎีแล้ว ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำจะขึ้นอยู่กับตัวแปรสำคัญได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราการไหล และ เฮด (Head) หรือ ระดับความสูงของการเครื่องสูบน้ำ ตัวอย่างลักษณะของความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 6.5-1



รูปที่ 6.5-1 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำกับความเร็รรอบ อัตราการไหล และ เฮด

6.5.1 เกณฑ์การออกแบบเครื่องสูบน้ำ

จากความต้องการ เช่น เครื่องสูบน้ำ , อัตราการสูบ , หัวพลังงานรวม และสภาพการติดตั้งการใช้งาน เราจะสามารถกำหนดเกณฑ์การออกแบบ เช่น ความเร็รรอบ และกำลังงานจากเครื่องต้นกำลังได้ สามารถคาดการณ์ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้ตามมา ขั้นตอนการออกแบบเครื่องสูบน้ำแบบผสม ติดตั้งเพลานในแนวดิ่ง

ขั้นตอนการออกแบบเครื่องสูบน้ำแบบผสม ติดตั้งเพลานในแนวดิ่ง	
1. สมมุติค่าความเร็วจำเพาะที่เหมาะสมจากสูตร	
$N = N_s H^{3/4} / \sqrt{Q}$ เมื่อ N = ความเร็รรอบ (rpm) Q = อัตราการสูบ (m^3 / min) H = หัวพลังงานรวม (m)	
2. หาความเร็รรอบจากสูตร (รอบ / นาที)	
$N = N_s H^{3/4} / \sqrt{Q}$	
3. หาค่า NPSH ที่ต้องการจากสูตร (เมตร)	
$h_{sv} = (N \sqrt{Q} / S)^{4/3}$ เมื่อ h_{sv} = ค่าหัวความดันรวมที่เครื่องสูบน้ำต้องการที่ท่อดูดเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Cavitation ซึ่ง เป็นไปตามค่าความดันที่ลดลงที่ทางเข้าใบจักร S = จะมีค่าระหว่าง 1200 – 1500 ณ จุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด	
4. เปรียบเทียบ NPSH ที่มีจากสูตร	
$H_{sv} = H_a + h_s - h_c - h_v$ เมื่อ H_{sv} = ค่าความดันรวมที่มีมากกว่าความดันไออิ่มตัวที่จุดทางเข้าใบจักรเครื่องสูบน้ำ H_a = ค่าความดันสัมบูรณ์ที่ผิวด้านที่ถูกดูด	

h_s = ค่ายกน้ำจากที่เก็บถึงระดับเครื่องสูบน้ำ (ถ้าต้องการดูชั้นมาจะเป็นลบ)

h_o = ค่าความดันที่สูญเสียไปเนื่องจากความฝืดในท่อดูด

h_v = ค่าความดันไออิ่มตัว

ตารางที่ 6.5-1 หัวความดันบรรยากาศกับระดับความสูง (H_a)

ระดับความสูง (เมตร)	0	200	400	800	1000
ความดันสัมบูรณ์ (เมตร) น้ำ	10.5	10.2	9.85	9.38	9.14

ตารางที่ 6.5-2 ความดันไออิ่มตัวของน้ำ

ระดับความสูง (เมตร)	0	20	40	50	60	100
ความดันสัมบูรณ์ (เมตร) น้ำ	0.06	0.24	0.75	20.3	4.83	10.03

5. กำลังที่ให้น้ำ (kW)

$$L_w = 0.163 \gamma QH$$

เมื่อ γ = น้ำหนักจำเพาะ (kg/m^3)

Q = อัตราการสูบ (m^3/min)

H = หัวพลังงานรวม (m)

6. กำลังที่เพลาชั้บ (kW)

$$L_p = L_w / e_p$$

เมื่อ L_w = กำลังที่ให้น้ำ (kW)

e_p = ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ

7. กำลังมอเตอร์ไฟฟ้า (kW)

$$L_m = L_w / e_m$$

เมื่อ L_p = กำลังที่เพลาชั้บ (kW)

e_m = เป็นค่าเผื่อไว้โดยประมาณ 0.1 ถึง 0.2

C_t = ค่าสัมประสิทธิ์การเร่งกำลังของเครื่อง

8. ขนาดท่อ (เมตร)

$$D = 0.1 \sqrt{Q}$$

เมื่อ Q = อัตราการสูบ (m^3/min)

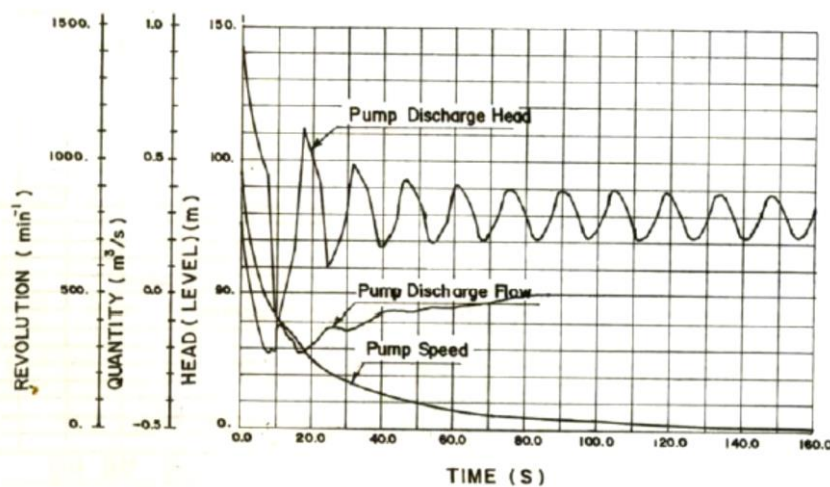
วัสดุที่ใช้สร้างชิ้นส่วนสำหรับการใช้งานในสภาพต่างๆ จะเลือกค่าจากกำลังวัสดุที่ต้องใช้ และความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและ/หรือผุกร่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการไหลที่ต้องการ และขนาดของชิ้นส่วนที่ใช้งานต้องให้เหมาะสม ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังตารางการเลือกวัสดุที่จะมาทำอุปกรณ์ในระบบสูบน้ำ

6.5.2 การเกิดค้อนน้ำในระบบท่อส่งน้ำ

ปรากฏการณ์อันตรายแตกของน้ำหรือค้อนน้ำ (Waterhammer) เกิดขึ้นได้เมื่อความเร็วในเส้นท่อเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ความดันในเส้นท่อเปลี่ยนแปลงตลอดเส้นท่อ ในการสูบน้ำปรากฏการณ์ค้อนน้ำจะเกิดได้เมื่อ

- ก. เริ่มเดินเครื่องหรือหยุดเครื่อง
- ข. ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำและดันกำลังเปลี่ยน
- ค. ปิดเปิดประตูน้ำควบคุมการไหลในท่อ

ขนาดของความดันในท่อที่เปลี่ยนแปลงไปจะขึ้นอยู่กับความยาวของท่อซึ่งต่อกันถึงปากทางออก และอัตราการเปลี่ยนความเร็วของของไหลในท่อ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การปิดเดินเครื่องหรือหยุดเครื่อง อัตราการเปลี่ยนของความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำและดันกำลัง และระยะเวลาในการปิด/เปิดประตูน้ำ นอกจากนี้ผลของการเกิดค้อนน้ำยังขึ้นอยู่กับระดับท่อที่วางไว้เทียบกับผิวดินคุณลักษณะ การปฏิบัติการของเครื่องสูบน้ำ ชนิดของดันกำลัง ฯลฯ แต่ที่พบบ่อยที่สุดจะเป็นอาการค้อนน้ำที่เกิดจากการหยุดเครื่องทันทีทันใดเนื่องจากกระแสไฟฟ้าขัดข้อง รูปที่ 6.5-2 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงความดันในท่อ อัตราการไหลของของไหลและความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 6.5-2 การเปลี่ยนหัวความดันอัตราการไหลในท่อและความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำที่เปลี่ยนไป

ถ้าอาการค้อนน้ำที่เกิดขึ้นรุนแรง จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับ

- ก. ท่อน้ำและอุปกรณ์ ถ้าความดันเปลี่ยนแปลงมากอาจแตกได้
- ข. ท่อน้ำอาจยุบตัวในช่วงความดันลดลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ
- ค. ของไหลแยกตัวเป็นไอ เนื่องจากความดันลดลงเกิดโพรงไอและเมื่อต้องอัดกันใหม่จะเกิดการยุบตัวของโพรงไอและเกิดคลื่นความดันสูง
- ง. การไหลย้อนกลับทาง อันจะทำให้เครื่องหมุนกลับทาง

6.6 การตรวจสอบการทำงานและประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องสูบน้ำ

การใช้เครื่องสูบน้ำภายหลังการออกแบบและติดตั้ง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องเป็นประจำเพื่อให้เครื่องสูบน้ำทำงานอย่างปกติและมีประสิทธิภาพ

6.6.1 ข้อมูลที่สำคัญที่ควรตรวจวัด
สำหรับข้อมูลในระบบเครื่องสูบน้ำที่ต้องตรวจวัด จะประกอบด้วยข้อมูลเบื้องต้น และข้อมูลการใช้งานจริง โดยข้อมูลที่สำคัญ มีดังนี้ 1. สํารวจข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องสูบน้ำ 2. สํารวจระบบสูบน้ำและการเปิดใช้งานจริง 3. ตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า 4. ตรวจวัดค่าอัตราการไหล 5. ตรวจวัดค่าเสด
6.6.1.1 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องสูบน้ำ
ขั้นตอนแรกในการรวบรวมข้อมูล คือการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของเครื่องสูบน้ำ เพื่อให้ทราบถึง Spec ของเครื่องที่มีการใช้งาน และข้อมูลประสิทธิภาพจากผู้ผลิต ซึ่งควรมีรายละเอียดในเรื่องของ • ชนิดของเครื่องสูบน้ำที่ใช้งานว่าเป็นแบบ Centrifugal หรือ Rotary เป็นต้น พร้อมทั้งควรระบุจำนวนชั้น (Stage) หรือจำนวนลูกสูบด้วย • ขนาดของเครื่องสูบน้ำ เช่น พิกัดกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ พิกัดอัตราการไหลของน้ำที่พิกัดพิกัดกำลัง (เสด) ของเครื่องสูบน้ำ ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ • ลักษณะของตัวเครื่องสูบน้ำ ว่าเป็นแบบเปลตั่ง เพลานอน ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำใบพัดและเรือนเครื่องสูบน้ำ อุปกรณ์หรือส่วนประกอบต่างๆ รวมถึงสภาพการบำรุงรักษา • จำนวน และยี่ห้อของเครื่องสูบน้ำที่ใช้งาน
6.6.1.2 การสำรวจระบบสูบน้ำและการเปิดใช้งานจริง
เพื่อให้ทราบสภาพและลักษณะการใช้งาน และการเดินในแต่ละเครื่องเครื่องสูบน้ำควรมีรายละเอียดในเรื่องของ • แผนผังการจัดวางเครื่องสูบน้ำ และระยะเวลาการใช้งานแต่ละเครื่อง • เวลาการเปิด - ปิด เครื่องสูบน้ำ (ชั่วโมงการทำงาน/วัน) • ชนิดและคุณสมบัติของของเหลวที่เครื่องสูบน้ำทำการสูบน้ำ • อุณหภูมิที่ตัวเครื่อง
6.6.1.3 การตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า
เพื่อให้ทราบค่ากำลังไฟฟ้าที่เครื่องสูบน้ำใช้งาน ซึ่งควรมีรายละเอียดในเรื่องของ • แรงดันไฟฟ้า (Volt) • กระแสไฟฟ้า (Amps) • ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor, PF) • กำลังไฟฟ้า (kW)

6.6.1.4 การตรวจวัดค่าอัตราการไหล

เพื่อให้ทราบอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำ ควรมีรายละเอียดในเรื่องของ

- อัตราการไหล (m^3/s)

6.6.1.5 การตรวจวัดค่าเสด

เพื่อหาค่าเสดของเครื่องสูบน้ำที่จุดใช้งาน และเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบ ควรมีรายละเอียดในเรื่องของ

- ความดันก่อนและหลังเข้าเครื่องสูบน้ำ (bar)
- ความสูงของระดับน้ำที่ทางท่อดูดถึงเครื่องสูบน้ำ (m)

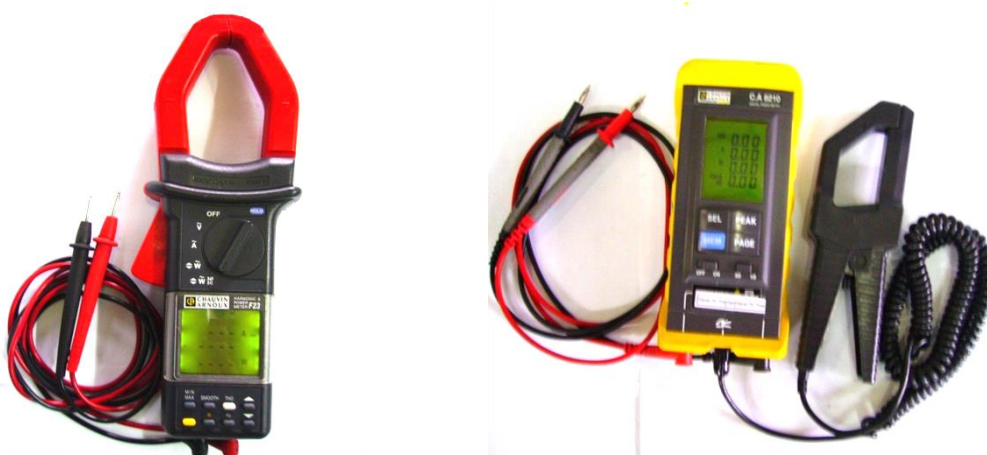
6.6.2 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจวัดเครื่องสูบน้ำ

การตรวจวัดเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานของอุปกรณ์ ดังนั้นการใช้เครื่องมือวัดอย่างถูกต้องและเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องรู้ รวมถึงข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ประเภท ชนิดของเครื่องมือวัดที่ใช้ หลักการทำงานของเครื่องมือวัดแต่ละประเภท หลักการเลือกเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ตลอดจนข้อระมัดระวังในการใช้งานเครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดที่จำเป็นสำหรับเครื่องสูบน้ำมีหลายชนิดดังนี้

6.6.2.1 เครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าหรือวัตต์มิเตอร์

ในการตรวจวัดค่ากำลังไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและตัวประกอบกำลังไฟฟ้านั้นเครื่องมือที่นิยมใช้ในปัจจุบันกันอย่างแพร่หลาย คือ เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า หรือที่เรียกกันว่า Clamp ON Power Meter ด้วยรูปร่างที่มีขนาดกะทัดรัด ใช้งานได้ง่าย ในอดีตจะวัดค่าได้เพียงแบบชั่วขณะ (Spot Check) เท่านั้น แต่ในปัจจุบันเครื่องมือชนิดนี้พัฒนาจนสามารถเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ จากการวัดในช่วงเวลาหนึ่งที่สนใจอย่างต่อเนื่องได้อีกด้วย



6.6.2.2 เครื่องมือวัดความดันแบบท่อบรรจุทอง (Bourdon-Tube Gauge)

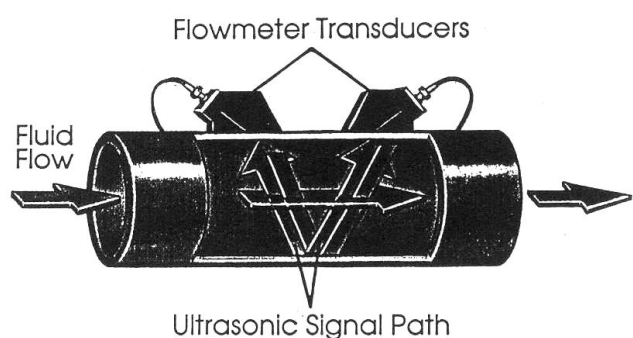
เครื่องมือวัดแบบท่อบรรจุทองมีลักษณะเป็นขดลวดโค้ง จะเห็นได้ว่าท่อโค้งรูปวงรีดังกล่าวจะต่อกับข้อต่อในลักษณะที่เป็นเกลียวเกล็ดและตัวข้อต่อดังกล่าวจะต่อผ่านจุดหมุนอันหนึ่งไปยังเข็มชี้ ซึ่งแสดงค่าความดัน

ทางหน้าปัด เมื่อความดันเพิ่มขึ้นท่อโค้งรูปวงรีก็จะมีแนวโน้มที่จะยืดตัวออกทุกทิศทางทำให้ Curvature เปลี่ยนไป ส่งผลให้กลไกหมุนเข็มให้หมุนรอบจุดหมุนและชี้แสดงค่าความดันที่ต้องการ เครื่องมือวัดแบบท่อปรุทองจะมีลักษณะเด่นที่มีความทนทานสูง เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมดขับเคลื่อนด้วยระบบเชิงกล เครื่องมือมีราคาถูก ง่าย และมีใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่จะมีข้อเสียตรงที่ความละเอียดจะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องมือวัดแบบอื่น



6.6.2.3 เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบอัลตราโซนิก (Ultrasonic Flow Meter)

เป็นมาตรวัดที่สะดวกต่อการใช้งานที่จะตรวจวัดในรูปแบบชั่วคราวหรือต้องการข้อมูลในช่วงเวลาหนึ่ง และสามารถย้ายไปติดตั้งวัดในจุดใหม่ตามที่ต้องการได้ ใช้หลักการสะท้อนของคลื่นเสียงที่ปล่อยออกไปกระทบกับผิวของผนังท่ออีกด้านหนึ่งแล้วสะท้อนกลับ ดังนั้นเวลาที่คลื่นเสียงวิ่งไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลและวิ่งกลับสวนทิศทางนั้นจะมีค่าแตกต่างกัน ถ้าเวลายิ่งต่างกันมากก็แสดงว่ามีอัตราการไหลสูง ซึ่งหลักการแบบนี้เรียกว่า “Transit Time” ซึ่งมีชื่อเรียกในการใช้งานเครื่องมือชนิดนี้โดยทั่วไปว่า “Ultrasonic Flow Meter”



รายละเอียดการดำเนินการสำรวจตรวจวัดค่าต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.6-1 สำหรับตารางที่ 6.6-2 เป็นตัวอย่างแสดงการบันทึกข้อมูลจากการตรวจวัดเครื่องเครื่องสูบน้ำ

ตารางที่ 6.6-1 สรุปข้อมูลที่ควรดำเนินการสำรวจ

ลำดับ	การตรวจวัด/ วิธีการตรวจวัด	จุดประสงค์การ ตรวจวัด	ค่าที่บันทึก	จุดตรวจวัด	เครื่องมือที่ใช้	ระยะเวลา การบันทึก
1	สำรวจ ชนิด ขนาด จำนวน ยี่ห้อและรุ่น	เพื่อทราบ Spec ของเครื่องที่มีการ ใช้งาน และข้อมูล ประสิทธิภาพจาก ผู้ผลิต	- พิกัดกำลังไฟฟ้า ของมอเตอร์เครื่อง สูบน้ำ - พิกัดอัตราการไหล ของน้ำที่พิกัด - พิกัดกำลัง (เฮด) ของเครื่องสูบน้ำ - ความเร็วรอบของ เครื่องสูบน้ำ - การบำรุงรักษา	- Name Plate - Performance Curve ของ เครื่องสูบน้ำ	-	-
2	สำรวจระบบสูบน้ำ จ่ายน้ำและการ เปิดใช้งานจริง	เพื่อทราบสภาพ และลักษณะการใช้ งาน และการเดิน ในแต่ละเครื่อง	- จัดทำแผนผังการ จัดวางเครื่องและ ระยะเวลาการใช้ งานแต่ละเครื่อง - เวลาการเปิด ปิด เครื่อง (ชั่วโมงการ ทำงาน/วัน)	บริเวณที่ติดตั้ง เครื่องสูบน้ำ และระบบท่อ ส่งจ่ายน้ำ	-	-
3	ตรวจวัดค่า กำลังไฟฟ้า	หาค่ากำลังไฟฟ้า	- แรงดันไฟฟ้า(Volt) - กระแสไฟฟ้า (Amps) - Power Factor - กำลังไฟฟ้า (kW)	ตู้ควบคุม	- Power Meter	บันทึก ต่อเนื่องอย่าง น้อย 1 วัน
4	ค่าอัตราการไหล	เพื่อทราบอัตราการ ไหลของเครื่องสูบน้ำ	- อัตราการไหล (m ³ /s)	- ท่อส่งทางออก	- Flow Meter	-
5	ตรวจวัดค่าเฮด	เพื่อหาค่าเฮดของ เครื่องสูบน้ำที่จุด ใช้งานและ เปรียบเทียบกับ ค่าที่ออกแบบ	- ความดันก่อนและ หลังเข้าเครื่องสูบน้ำ (bar) - ความสูงของระดับ น้ำที่ทางท่อดูดถึง เครื่องสูบน้ำ (m)	- อ่านจากค่าที่ เกจวัดความดัน - วัดความสูง	- เกจวัดความ ดันที่ติดตั้งที่ ทางดูด และ ทางส่ง - ตลับเมตร	บันทึก ชั่วขณะ

ตารางที่ 6.6-2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลจากการตรวจวัดเครื่องสูบน้ำ

รายการตรวจสอบ	การตรวจวัดครั้งที่		
	1	2	3
ข้อมูลสำรวจเบื้องต้น	เครื่องสูบน้ำ เครื่องที่ 1		
ปี พ.ศ.	2540		
รุ่น	Centrifugal TYPE 125-400		
หมายเลขเครื่อง	Pump 001		
อัตราการไหล (m ³ /hr)	84 - 330		
เฮด (m)	40 - 60		
ความเร็วรอบ (rpm)	1450		
พิกัดมอเตอร์			
ค่ากำลังไฟฟ้า (kW), Pm	55		
แรงดันไฟฟ้า (Volt)	380 – 416		
กระแสไฟฟ้า (Amps)	-		
Power Factor	0.9		
ข้อมูลตรวจวัด			
ค่ากำลังไฟฟ้า (kW)	50.9	51.2	50.5
แรงดันไฟฟ้า (Volt)	382.00	380	381
กระแสไฟฟ้า (Amps)	91.6	90.5	90
Power Factor	0.84	0.86	0.85
ความดัน			
ความดันด้านจ่าย (bar)	5.5	5.5	5.5
ความดันด้านดูด (bar)	-	-	-
ความสูงจากระดับน้ำในถังเก็บถึงเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องสูบน้ำ (m)	2.0	2.0	2.0
อัตราการไหล (m ³ /hr)	190		
หมายเหตุ	1. มีการหิ้ววาล์วเพื่อลดอัตราการไหล 2. มีการตรวจสอบและบำรุงรักษาดี		

หาค่าเฉลี่ย

นำค่าไปหาค่า
เฮดรวมของ
ระบบ

6.6.3 เทคนิคการตรวจวัดเครื่องสูบน้ำ

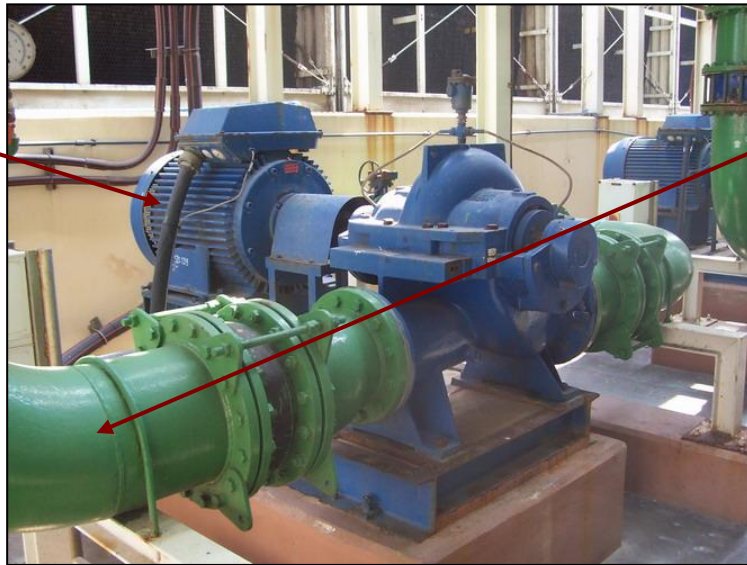
การตรวจวัดประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำอื่นๆ เช่น เครื่องสูบน้ำเย็น เครื่องสูบน้ำระบายความร้อนในระบบทำความเย็นและปรับอากาศ หรือเครื่องสูบน้ำที่ใช้ทั่วไป สามารถใช้วิธีเดียวกันนี้ในการดำเนินการตรวจวัด

เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด

1. เครื่องมือวัดพลังไฟฟ้า (Clamp On Power Meter)
2. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Ultrasonic Flow Meter)

1. วัดพลังไฟฟ้าของปั๊มน้ำ

.....kW



2. วัดอัตราการไหลให้น้ำระบาย

ความร้อนusGPM



6.7 การวิเคราะห์การใช้พลังงานระบบเครื่องสูบน้ำ

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบเครื่องสูบน้ำนั้น เป็นขั้นตอนสำคัญในการหาประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำเพื่อประเมินแนวทางในการเดินเครื่องจักรอุปกรณ์ รวมถึงการอนุรักษ์พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้

6.7.1 กำลังไฮดรอลิก

กำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power, P_H) หมายถึง กำลังที่เครื่องสูบน้ำจ่ายให้ของเหลวโดยผ่านใบพัดที่หมุน มีหน่วยเป็น kW ในหน่วยเมตริก สามารถคำนวณได้จากสมการข้างล่าง

$$P_H = \frac{\gamma \times Q \times TDH}{1000} \quad (6-23)$$

เมื่อ γ = น้ำหนักจำเพาะของเหลว (N/m^3) [$\gamma = \rho g$]

Q = อัตราการสูบของเครื่องสูบน้ำ (m^3/s)

TDH = เซตรวมของเครื่องสูบน้ำหรือ Total Dynamic Head (m)

เนื่องจากกำลังขนาด 1 แรงม้า มีค่าเทียบเท่ากับ 0.746 kW กำลังม้าไฮดรอลิก (Hydraulic Horsepower) ในหน่วยแรงม้า (HHP) จึงสามารถคำนวณได้จาก

$$HHP = \frac{P_H}{0.746} \quad (6-24)$$

ในหน่วยอังกฤษ กำลังม้าไฮดรอลิกสามารถคำนวณได้จาก

$$HHP = \frac{\gamma \times Q \times TDH}{550} \quad (6-25)$$

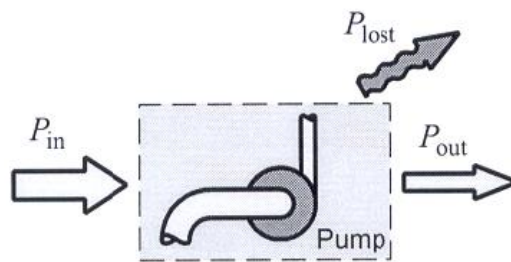
เมื่อ γ = น้ำหนักจำเพาะของเหลว (lb/ft³)
 Q = อัตราการสูบของเครื่องสูบ (ft³/s)
 TDH = เซดรวมของเครื่องสูบ (ft)

ในกรณีที่อัตราการสูบน้ำมีหน่วยเป็นอเมริกันแกลลอนต่อนาที (gpm) และ TDH มีหน่วยเป็นฟุต กำลังม้าไฮดรอลิกสามารถคำนวณได้จาก

$$HP = \frac{gpm \times TDH}{3960} \quad (6-26)$$

6.7.2 ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ หมายถึง ร้อยละของกำลังที่เครื่องสูบน้ำผลิตได้ ซึ่งหมายถึงกำลังไฮดรอลิก เทียบกับกำลังขับเครื่องสูบน้ำ ซึ่งเป็นกำลังที่เครื่องสูบน้ำรับมาจากต้นกำลังผ่านเพลาคับ



รูปที่ 6.7-1 การคำนวณหาค่า ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

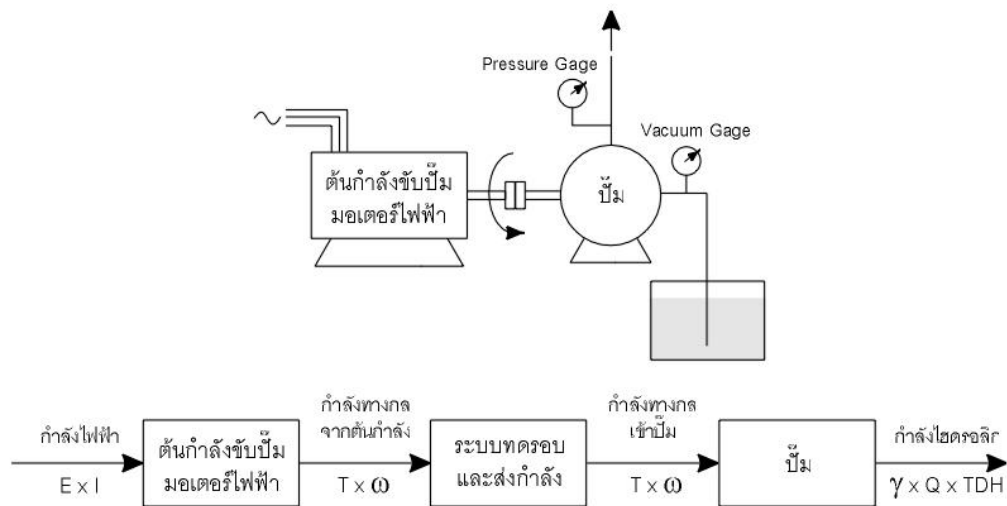
$$\eta_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (6-27)$$

เมื่อ P_{out} = กำลังที่เครื่องสูบน้ำผลิตได้ซึ่งหมายถึงกำลังไฮดรอลิก (kW หรือแรงม้า)
 P_{in} = กำลังขับที่เพลาคับของเครื่องสูบน้ำ (kW หรือแรงม้า)

โดยปกติผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำจะแสดงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำในกราฟสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ ดังแสดงตัวอย่างในหัวข้อถัดไป ในรูปที่ 6.7-3 และ 6.7-4 ดังนั้นในการออกแบบระบบเครื่องสูบน้ำ หากผู้ออกแบบเลือกขนาดของเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมกับงานและสามารถกำหนดจุดทำงานของเครื่องสูบน้ำให้ใกล้เคียงกับ ตำแหน่งที่เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพสูงสุด จะสามารถทำให้การใช้งานเครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพ ใช้พลังงานได้อย่างคุ้มค่า

6.7.3 การคำนวณขนาดต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ

การทำงานของระบบเครื่องสูบน้ำจริงๆแล้วเป็นการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานดังรูป 6.7-2 ในกรณีที่ต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าที่ต้นกำลังรับเข้ามาจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลเพื่อไปขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ และเครื่องสูบน้ำจะเปลี่ยนพลังงานทางกลที่รับเข้ามาให้เป็นกำลังไฮดรอลิก ในการคำนวณขนาดของต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำนั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของต้นกำลังด้วย



รูปที่ 6.7-2 การเปลี่ยนรูปของพลังงานของระบบเครื่องสูบน้ำ

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำคำนวณได้จาก

$$\eta_p = \frac{\text{กำลังไฮดรอลิก}}{\text{กำลังทางกลเข้าปั๊ม}} \quad (6-28)$$

ประสิทธิภาพของระบบทดรอบและส่งกำลังคำนวณได้จาก

$$\eta_T = \frac{\text{กำลังทางกลเข้าปั๊ม}}{\text{กำลังทางกลจากต้นกำลัง}} \quad (6-29)$$

1. ส่งกำลังโดยตรง (ขับเคลื่อน) มีค่า 100 %
2. ระบบส่งกำลังแบบเฟืองทดมีค่าประมาณ 98 % สำหรับการทดรอบแต่ละครั้ง

3. ระบบส่งกำลังด้วยสายพานแบบมีค่าประมาณ 97 %

4. ระบบส่งกำลังด้วยสายพานรูปตัว V มีค่าประมาณ 95 %

ประสิทธิภาพของต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำคำนวณได้จาก

$$\eta_{\text{ต้นกำลัง}} = \frac{\text{กำลังทางกลจากต้นกำลัง}}{\text{กำลังที่ต้องให้กับต้นกำลัง}} \quad (6-30)$$

นำสมการ (6-16) คูณกับสมการ (6-17) และ (6-18) เพื่อคำนวณหา กำลังที่ต้องให้กับต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ

$$\eta_P \times \eta_T \times \eta_{\text{ต้นกำลัง}} = \frac{\text{กำลังไฮดรอลิก}}{\text{กำลังที่ต้องให้กับต้นกำลัง}}$$

$$\text{กำลังที่ต้องให้กับต้นกำลัง} = \frac{\text{กำลังไฮดรอลิก}}{\eta_P \times \eta_T \times \eta_{\text{ต้นกำลัง}}} \quad (6-31)$$

ตัวอย่างที่ 6-5 เครื่องสูบน้ำมีอัตราการไหล $Q=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ และเฮดรวม 26.73 เมตร จงหาขนาดกำลังของมอเตอร์ต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำที่ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำโดยตรง ถ้ากำหนดให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำและมอเตอร์ต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำมีค่าเท่ากับ 75% และ 78% ตามลำดับ จงหาขนาดกำลังของมอเตอร์ต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ

วิธีทำ กำลังไฮดรอลิกของเครื่องสูบน้ำคำนวณได้จากจาก

$$P_H = \frac{\gamma \times Q \times TDH}{1000}$$

แทนค่า $Q=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ $TDH=26.73 \text{ m}$ และน้ำหนักจำเพาะของน้ำ $\gamma=9810 \text{ N/m}^3$

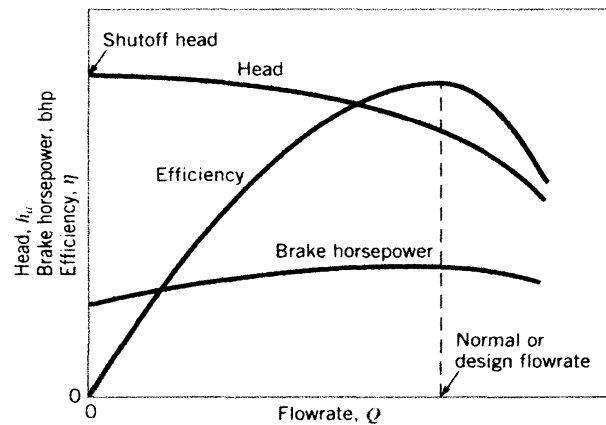
$$P_H = \frac{9810 \times 0.01 \times 26.73}{1000} = 2.62 \text{ kW}$$

ขนาดกำลังของมอเตอร์ต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำคำนวณได้จาก

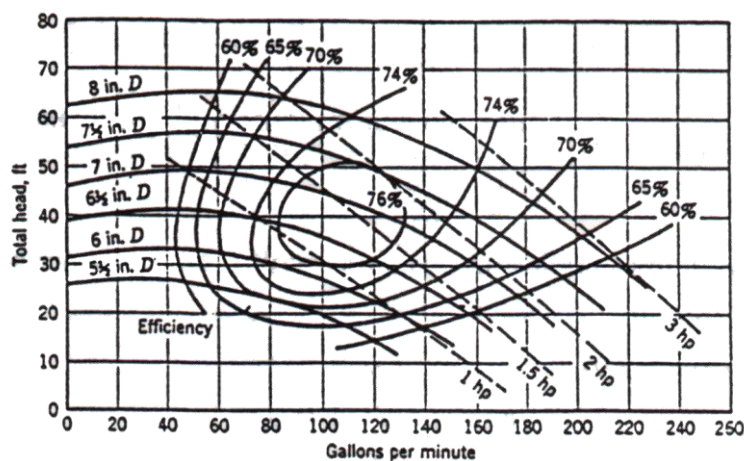
$$\begin{aligned} \text{กำลังของมอเตอร์ต้นกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ} &= \frac{\text{กำลังไฮดรอลิก}}{\eta_P \times \eta_{\text{ต้นกำลัง}}} \\ &= \frac{2.62}{0.75 \times 0.78} = 4.48 \text{ kW} \\ &= \frac{4.48}{0.746} = 6 \text{ แรงม้า} \end{aligned}$$

6.7.4 สมรรถนะการทำงานของเครื่องสูบน้ำ

บริษัทผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำจะทำการทดสอบสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่ผลิต แล้วเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสด ประสิทธิภาพ และกำลังขับเครื่องสูบน้ำ เทียบกับอัตราการไหล ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6.7-3 จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออัตราการไหลเริ่มจากศูนย์ประสิทธิภาพก็จะเริ่มจากศูนย์จนกระทั่งถึงค่าสูงสุดแล้วจะลดลง จุดที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเรียกว่า Best Efficiency Point (BEP) อัตราการไหล ณ จุดนี้เรียกว่าอัตราการไหลออกแบบ (Design flow rate) ในการเลือกเครื่องสูบน้ำมาใช้งานจะต้องเลือกที่อัตราไหลและประสิทธิภาพสูงสุดหรือใกล้เคียง สมรรถนะของเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดใบพัดต่างๆ กันแสดงได้ดังรูปที่ 6.7-4



รูปที่ 6.7-3 ตัวอย่างกราฟแสดงสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำ



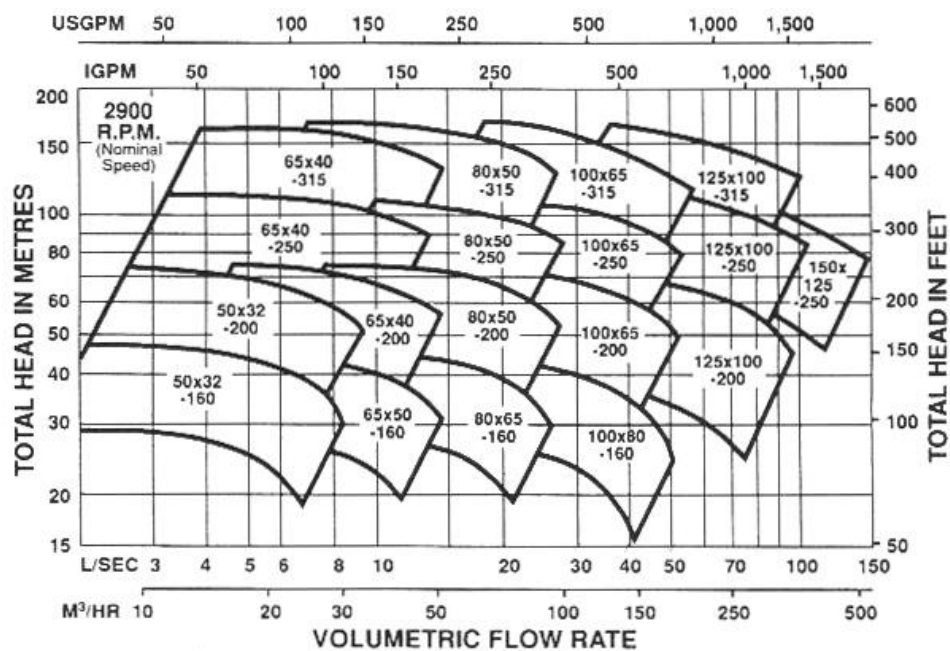
รูปที่ 6.7-4 ตัวอย่างสมรรถนะของเครื่องสูบบแบบหมุนเหวี่ยงใบพัดมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 ถึง 8 นิ้ว

เครื่องสูบน้ำในแต่ละรุ่นนั้นจะถูกผลิตออกมาหลายขนาด โดยปกติผู้ผลิตเครื่องสูบน้ำมักจะแสดงสมรรถนะประสิทธิภาพและขอบเขตการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องสูบน้ำแต่ละขนาดรวมกันในกราฟแผ่นเดียว กราฟแสดงสมรรถนะดังกล่าวนี้เรียกว่า Composite Rating Chart ดังแสดงในรูปที่ 6.7-5

ตัวอย่างที่ 6.6 ต้องการสูบน้ำด้วยอัตราไหล 40 ลิตรต่อวินาที ที่เฮด 80 เมตร จงเลือกโมเดลของปั๊มจาก Composite Rating Chart ซึ่งแสดงในรูป 6.7-5 และให้ออกรายละเอียดของเครื่องสูบน้ำที่เลือกจากชาร์ตที่ให้

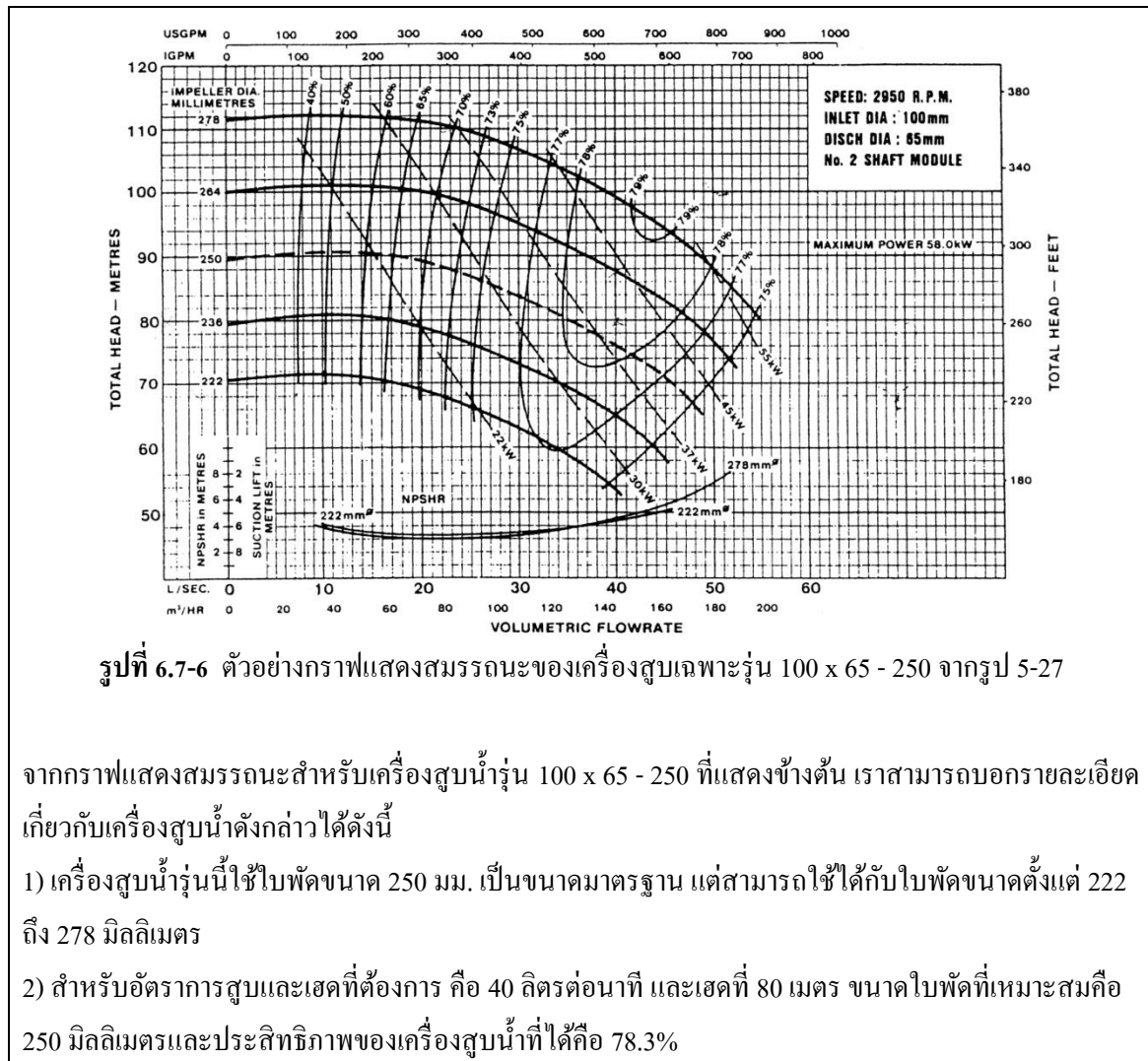
วิธีทำ รายละเอียดของปั๊มซึ่งได้จากการอ่านชาร์ตข้างบนสำหรับอัตราการสูบ 40 ลบ.เมตร/ชั่วโมง และเฮด 80 เมตร คือ

1. เครื่องสูบน้ำที่จะใช้นี้ได้อย่างเหมาะสมคือ โมเดล 100 x 65 - 250 ในที่นี้ 100 หมายถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อดูดเป็น มม. 65 หมายถึงขนาดหน้างานของท่อส่งเป็น มม. และ 250 เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดคือ 250 มม.



รูปที่ 6.7-5 กราฟสมรรถนะของเครื่องสูบบแบบหมุนเหวี่ยงหลายขนาดรวมกัน (Composite Rating Chart)

2. ความเร็วรอบของใบพัดที่ใช้ในชาร์ตดังแสดงไว้ในกรอบด้านบนซ้ายมือคือ 2900 รอบต่อนาทีเมื่อเลือกรุ่นของเครื่องสูบน้ำจากชาร์ตรวมได้แล้ว จะต้องไปดูรายละเอียดที่จำเป็นต้องใช้งานจาก Performance Curves ของเครื่องสูบน้ำรุ่นที่เลือก ดังแสดงในรูป 6.7-6



6.7.5 กฎความคล้ายของเครื่องสูบน้ำ

กฎความคล้ายของเครื่องสูบน้ำ (Affinity Laws) แสดงค่าอัตราการสูบน้ำ เฮดรวมของเครื่องสูบน้ำ และกำลังขับเครื่องสูบน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของรอบความเร็วใบพัด หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด ที่มีค่าเปลี่ยนไป การแก้ปัญหาเมื่อลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำแตกต่างไปจากกราฟ $H-Q$ ที่บริษัทผู้ผลิตทดลองไว้ ทำได้โดยใช้กฎเกณฑ์ที่เรียกว่ากฎความคล้ายของเครื่องสูบน้ำ

ก. รอบความเร็วของใบพัดเปลี่ยนไป

ข้อแตกต่างนี้เกิดขึ้นอยู่เสมอเมื่อใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลัง ทั้งนี้เพราะตลอดช่วงเวลาการทำงานของเครื่องยนต์นั้น รอบความเร็วอาจแตกต่างกันได้มาก การเปลี่ยนแปลงชนิดของมอเตอร์หรือการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ก็สามารถทำให้รอบความเร็วเปลี่ยนไปได้เช่นเดียวกัน

ข. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดเปลี่ยนไป

เนื่องจากช่วงการทำงานของเครื่องสูบน้ำแบบ Centrifugal นั้นกว้างขวางมาก บริษัทผู้ผลิตไม่สามารถผลิตใบพัดให้พอเหมาะกับความต้องการใช้งานทุกขนาดได้ ดังนั้นสำหรับเรือนเครื่องสูบน้ำ (Casing) ขนาดหนึ่ง ผู้ผลิตจะออกแบบให้ใช้ได้กับใบพัดหลายๆ ขนาด เช่น ใช้ได้กับใบพัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 ถึง 12 นิ้ว เป็นต้น และถ้าการทำงานของใบพัดที่มีไม่เหมาะกับความต้องการ เช่น ที่อัตราการสูบน้ำขนาดหนึ่ง ใบพัดขนาด 10 นิ้วจะให้เสดมากเกินไป แต่ถ้าใช้ใบพัดขนาด 9 นิ้ว ก็จะได้เสदन้อยเกินไป ในกรณีนี้ก็ต้องกำหนดหาขนาดที่เหมาะสมแล้วเจียร (Trim) ใบพัดขนาด 10 นิ้วลงมาให้พอดีกับความต้องการ เป็นต้น

6.7.5.1 เมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดมีค่าคงที่แต่มีการเปลี่ยนแปลงรอบความเร็ว

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6-32)$$

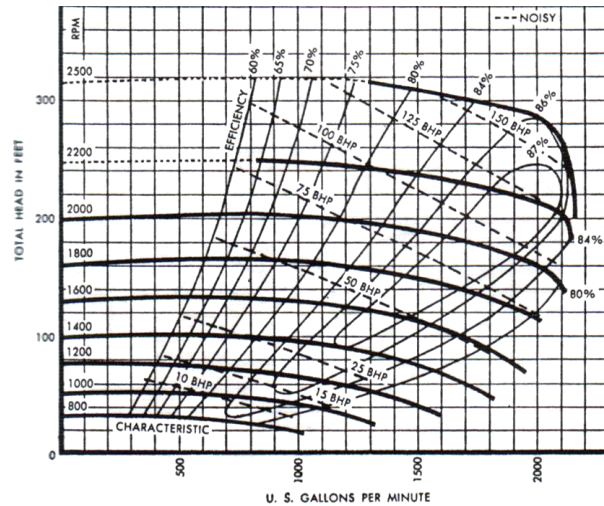
$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (6-33)$$

$$\frac{Bhp_1}{Bhp_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (6-34)$$

เมื่อ Q_1 , H_1 และ Bhp_1 เป็นอัตราการสูบน้ำ, เสด และกำลังขับที่เครื่องสูบน้ำต้องการ (Brake Horsepower) เมื่อใบพัดหมุนด้วยอัตราเร็ว N_1 ตามลำดับ และ Q_2 , H_2 และ Bhp_2 เป็นอัตราการสูบน้ำ, เสด และกำลังขับที่เครื่องสูบน้ำต้องการ เมื่อความเร็วการหมุนของใบพัดเปลี่ยนไปเป็น N_2

ความสัมพันธ์ทั้ง 3 สมการข้างบนนี้ ถือว่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสูบน้ำจะไม่เปลี่ยนไปตามรอบความเร็วที่เปลี่ยนไป ข้อสมมุติดังกล่าวนี้จะใกล้เคียงกับความเป็นจริงถ้าหากรอบความเร็วเปลี่ยนไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ของรอบความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ สมการทั้งสามข้างบนนี้ใช้ได้กับเครื่องสูบน้ำแบบ Centrifugal ทุกประเภท ไม่ว่าใบพัดจะเป็นแบบ Radial Flow, Mixed Flow, Axial Flow หรือ Regenerative Turbine

เมื่อรอบการหมุนของใบพัดเปลี่ยนแปลง กราฟ $H-Q$ จะยังคงรักษารูปร่างลักษณะของเส้นคงเดิมแต่เสดจะเลื่อนสูงขึ้นหรือเลื่อนต่ำลง ดังตัวอย่างที่แสดงดังรูปที่ 6.7-7 ในกรณีที่มีข้อมูลเช่นรูปนี้อยู่ การหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของใบพัดจะทำให้ถูกต้องดีกว่าการใช้สมการด้านบน



รูปที่ 6.7-7 ตัวอย่างสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำเมื่อความเร็วการหมุนของใบพัดเปลี่ยนไป

6.7.5.2 เมื่อความเร็วรอบมีค่าคงที่ แต่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดเปลี่ยนไป

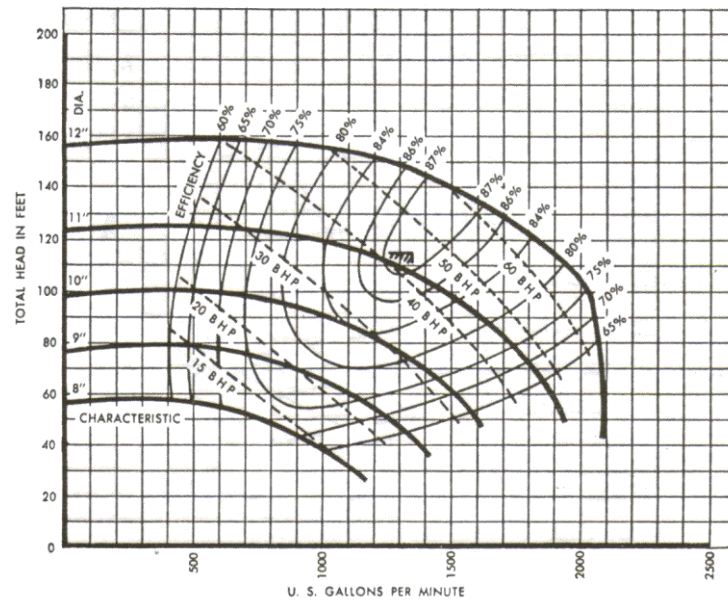
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (6-35)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad (6-36)$$

$$\frac{Bhp_1}{Bhp_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 \quad (6-37)$$

เมื่อ Q_1 , H_1 และ Bhp_1 เป็นอัตราการสูบ เฮด และกำลังขับที่เครื่องสูบน้ำต้องการ เมื่อใบพัดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D_1 ตามลำดับ และ Q_2 , H_2 และ Bhp_2 เป็นอัตราการสูบ เฮด และกำลังขับที่เครื่องสูบน้ำต้องการ เมื่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดเปลี่ยนไปเป็น D_2 ตามลำดับ สมการทั้ง 3 นี้ใช้ได้กับเครื่องสูบน้ำ Centrifugal ประเภท Radial Flow เท่านั้น

ลักษณะการทำงานของเครื่องสูบน้ำเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดก็เช่นเดียวกันกับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ตัวอย่างกราฟ $H-Q$ สำหรับเครื่องสูบน้ำซึ่งมีใบพัดเหมือนกันแต่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 8 นิ้ว ถึง 12 นิ้ว แสดงดังรูปที่ 6.7-8



รูปที่ 6.7-8 ตัวอย่างสมรรถนะของเครื่องสูบน้ำซึ่งหมุนด้วยอัตรา 1750 รอบต่อนาที ขนาดของใบพัด 8 - 12 นิ้ว

ตัวอย่างที่ 6.7 เครื่องสูบน้ำสูบน้ำได้ 1,700 แกลลอนต่อนาที ที่เฮด 180 ฟุต และกำลังขับที่เครื่องสูบน้ำต้องการ เท่ากับ 84 แรงม้า เมื่อใบพัดหมุนด้วยความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที จงหาอัตราการสูบ เฮด และกำลังขับที่เครื่องสูบน้ำต้องการ เมื่อรอบความเร็วเปลี่ยนไปเป็น 1,600 รอบต่อนาที

วิธีทำ	จากสมการ	$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$ $Q_1 = \frac{1,600}{2,000} \times 1,700$ $= 1,360 \text{ แกลลอนต่อนาที}$
	จากสมการ	$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$ $H_1 = \left(\frac{1,600}{2,000} \right)^2 \times 180$ $= 115.2 \text{ ฟุต}$
	จากสมการ	$\frac{Bhp_1}{Bhp_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3$ $Bhp_1 = \left(\frac{1,600}{2,000} \right)^3 \times 84$ $= 43 \text{ แรงม้า}$

6.8 แนวทางการอนุรักษ์พลังงานในระบบเครื่องสูบน้ำ

6.8.1 การปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ

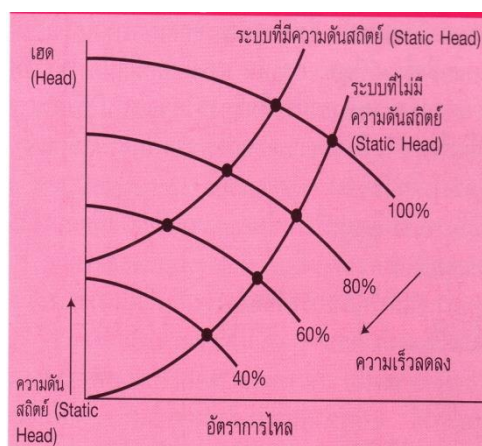
การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ จะมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำซึ่งจะยังคงสูงอยู่เมื่อมีอัตราการไหลระหว่าง 60-100 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลที่ออกแบบไว้ และเมื่ออัตราการไหลลดต่ำลงประสิทธิภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการลดลงนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องสูบน้ำ เมื่อเครื่องสูบน้ำมีขนาดใหญ่ขึ้นอัตราการไหลและประสิทธิภาพก็จะลดลงเช่นกัน

การเปลี่ยนแปลงการทำงานของเครื่องสูบน้ำเนื่องจากการปรับความเร็วรอบจะอธิบายได้โดยกฎของพัดลมและเครื่องสูบน้ำ (Affinity Laws) ซึ่งกล่าวไว้ดังนี้ :

- อัตราการไหลจะผันแปรตามความเร็ว ($\text{Flow} \propto \text{Speed}$)
- เฮดจะผันแปรตามความเร็วยกกำลังสอง ($\text{Head} \propto \text{Speed}^2$)
- กำลังขับเคลื่อนที่ใช้ผันแปรตามความเร็วยกกำลังสาม ($\text{Power Absorbed} \propto \text{Speed}^3$)

ดังนั้น ถ้าเครื่องสูบน้ำมีความเร็วรอบ 50 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เฮด (Head) เท่ากับ 25% และจะใช้กำลังขับเพียง 12.5% สำหรับระบบที่ไม่มีมีความดันสถิต (Static Head) ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ประเมินผลประหยัดจากการลดความเร็วรอบได้โดยตรง

อย่างไรก็ตามระบบจริงจะมีความดันสถิตรวมอยู่ด้วยเสมอ จึงต้องมีการปรับปรุงสูตรความสัมพันธ์ให้นำไปใช้คำนวณได้ถูกต้อง จากตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.8-1 ในระบบที่ไม่มีมีความดันสถิต ที่ความเร็วรอบ 40% อัตราการไหลมีค่า 40% แต่เมื่อระบบมีความดันสถิต อยู่ด้วยที่ความเร็วรอบ 40% อัตราการไหลลดลงเป็นศูนย์



รูปที่ 6.8-1 ผลของความดันสถิต ต่อเครื่องสูบน้ำที่ลดความเร็วลง

ประโยชน์ที่ได้รับจากการควบคุมความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำคือ
- ทำให้การใช้เครื่องสูบน้ำสอดคล้องกับอัตราการไหลที่ต้องการตลอดเวลา - สามารถควบคุมอัตราการไหลของเครื่องสูบน้ำอย่างได้ผล - ลดพลังงานสูญเสียจากการหิวข้าวของเครื่องสูบน้ำ - เริ่มเดินเครื่อง ได้อย่างนิ่มนวล
การใช้เครื่องสูบน้ำที่ปรับความเร็วรอบเพื่อให้เกิดการประหยัดมากที่สุด จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขดังต่อไปนี้
- ความต้องการใช้น้ำมีการเปลี่ยนแปลงและทำงานต่ำกว่าอัตราการไหลสูงสุดเป็นระยะเวลานาน - กรณีที่ความเสียดทานของระบบส่วนใหญ่เกิดจากความเสียดทานความดันสถิตที่ตามมาทำให้เครื่องสูบน้ำทำงานที่ระดับความเร็วต่ำลง ดังรูปที่ 6.8-1
ข้อควรพิจารณาในการใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมรอบเครื่องสูบน้ำ
1. อินเวอร์เตอร์แบบ PWM (Pulse Width Modulated) เป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบที่ใช้กับระบบเครื่องสูบน้ำที่พบมากที่สุด แม้จะมีอินเวอร์เตอร์แบบอื่นๆ ด้วย อินเวอร์เตอร์แบบ PWM มีประสิทธิภาพและกำลังสูญเสียในอุปกรณ์ต่ำ และกรณีที่เครื่องสูบน้ำขับเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ (กรณีนั้นอาจไม่จำเป็นต้องใช้อินเวอร์เตอร์) ศักยภาพของการประหยัดจากการใช้อินเวอร์เตอร์จะสูงเมื่อการขับเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มีประสิทธิภาพ 2. การควบคุม VSD อาจทำได้โดยปรับด้วยคนหรือแบบอัตโนมัติขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุม อุปกรณ์เครื่องวัดในระบบ เช่น อุปกรณ์วัดอัตราการไหล อุปกรณ์วัดความดัน และบางกรณีอาจจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Interfacing) ถ้าสัญญาณที่ส่งมาไม่ได้มาตรฐาน 3. ในระบบที่มีเครื่องสูบน้ำหลายเครื่องทำงานขนานกัน เครื่องสูบน้ำมักจะทำงาน ที่ความเร็วรอบ เท่ากัน เพื่อให้มีจุดทำงานเดียวกัน ในกรณีนี้สามารถใช้อินเวอร์เตอร์แยกสำหรับเครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่องและใช้สัญญาณควบคุมเดียวกันหรือใช้กับเครื่องสูบน้ำบางเครื่อง ในขณะที่เครื่องที่เหลือทำงานที่ความเร็วคงที่ แม้ว่าช่วงของการควบคุมความเร็วจะจำกัดก็ตาม (ขึ้นอยู่กับความต้านทานของระบบ) 4. VSD จะมีราคาค่อนข้างสูงแต่ก็มีการปรับราคาลดลงมาบ้างแล้ว ยิ่งไปกว่านั้นผลที่ได้จากการประหยัดค่าใช้จ่ายจะให้ผลตอบแทนกลับมาในระยะสั้น 5. ถ้าเครื่องสูบน้ำเดินเครื่องด้วยอัตราการไหลที่มากกว่าความต้องการและต้องการอัตราการไหลที่คงที่ แสดงว่าเครื่องสูบน้ำมีขนาดใหญ่เกินไป ดังนั้นการเลือกเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กลงหรือปรับแต่งใบพัดให้มีขนาดเล็กลงอาจจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าการใช้ VSD โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีความต้องการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

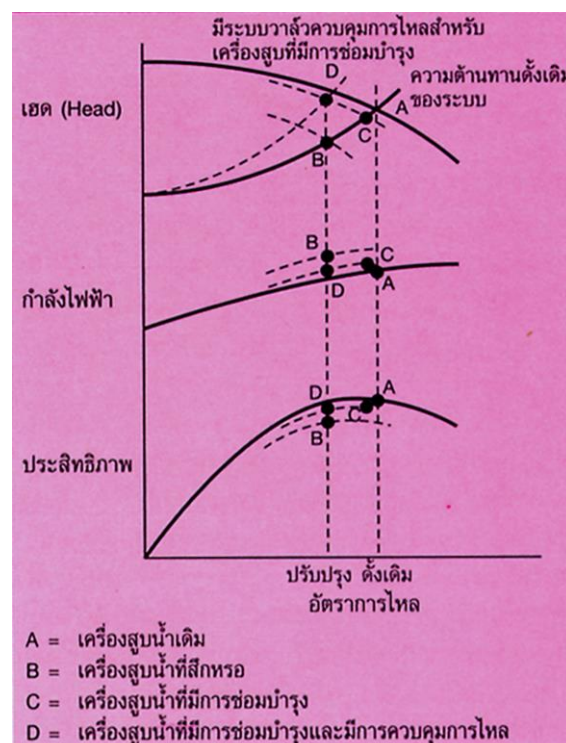
6.8.2 การบำรุงรักษา

การที่จะทำให้เครื่องสูบน้ำที่สึกหรอกลับมาสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับตอนเริ่มต้น อย่างน้อยที่สุดต้องซ่อมใหญ่ อาจรวมถึงการเปลี่ยนชิ้นส่วนหมุน (ใบพัดและแวน) แบร็ง และประเก็น อย่างไรก็ตาม ภายหลังการซ่อมใหญ่ระยะช่องว่างต่างๆ ภายในโครงสร้างของเครื่องสูบน้ำจะไม่เหมือนช่วงติดตั้งใหม่

ดังนั้น ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำจะลดลงจากช่วงที่ติดตั้งใหม่ ประโยชน์ที่ได้จากการซ่อมใหญ่ ควรพิจารณาเป็นกรณีๆ ไป ค่าใช้จ่ายของเครื่องสูบน้ำส่วนใหญ่แล้วเป็นค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องโดยรวมตลอดการใช้งาน ดังนั้นการที่ประสิทธิภาพสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ถือว่า ค่ำค่าในการปรับปรุง และมีข้อสังเกตว่า เครื่องสูบน้ำที่ สึกหรอ อัตราการไหลจะลดลง ถ้าทำการซ่อมบำรุงใหญ่ควรปรับอัตราการไหลให้ต่ำลงมาจากจุดทำงานเดิม เพื่อให้ได้ผลประหยัดมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 6.8-2

การบำรุงรักษาที่ช่วยส่งเสริมการประหยัด

- การทำความสะอาดตัวกรองที่บริเวณท่อทางเข้าของเครื่องสูบน้ำอย่างสม่ำเสมอ
- การตรวจสอบวาล์วกันการไหลย้อนกลับ (Check Valve) อย่างสม่ำเสมอ
- การซ่อมแซมรอยรั่วต่างๆ



รูปที่ 6.8-2 การซ่อมบำรุงที่มีผลต่อคุณลักษณะสมบัติ

6.8.3 การปรับปรุงอุปกรณ์

(1) การเคลือบผิวภายใน

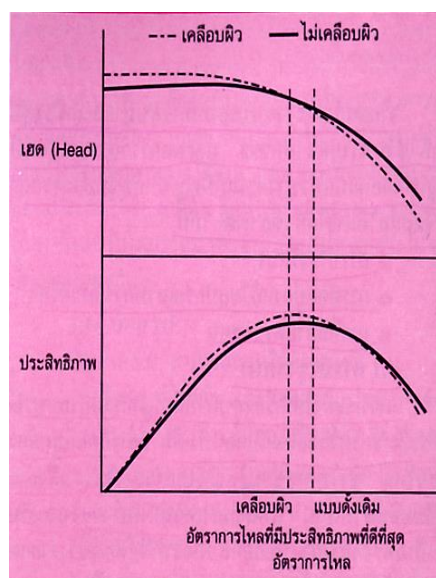
ได้มีการพัฒนากรรมวิธีที่ใช้สำหรับเคลือบผิวเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวของวัสดุเดิมเพื่อลดการกัดกร่อน/การกัดเซาะ วัสดุเคลือบผิวประเภทนี้เหมาะสำหรับเครื่องสูบน้ำที่เสียหายรุนแรงอันเนื่องมาจากการใช้งานกับของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อน วัสดุเคลือบผิวจะช่วยเคลือบป้องกันไม่ให้พื้นผิวถูกกัดกร่อนและไม่ทำให้ระยะช่องว่างต่างๆ ภายในเครื่องสูบน้ำเปลี่ยนแปลง

การเคลือบผิวเพื่อลดการเสียดทานแม้ว่าจะมี ประสิทธิภาพในการลดการกัดกร่อนไม่เท่าสารเคลือบผิวเพื่อลดการกัดกร่อนและการกัดเซาะ แต่ก็ยังเป็นวิธีที่สามารถนำมาใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้ดี จุดประสงค์หลักของวิธีนี้ก็เพื่อปรับพื้นผิวให้มีความเรียบมากที่สุด (เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิววัสดุเดิม) และเกิดการเสียดทานน้อยที่สุดขณะที่อัตราการไหลของน้ำสูง ซึ่งวิธีนี้จะทำให้เครื่องสูบน้ำมีความดันและอัตราการไหลสูงขึ้น ดังนั้นการเคลือบผิวด้วยวิธีนี้จะทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

การเคลือบผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำมักจะเคลือบเฉพาะ โครงเครื่องสูบน้ำและด้านนอกของใบพัดเพื่อลดความสูญเสียจากการเสียดทานหลัก ซึ่งก็คือ ความสูญเสียที่ผิวของโครงเครื่องสูบน้ำและความสูญเสียจากการเสียดทานที่ใบหมุน ดังรูปที่ 6.8-3

สรุปประโยชน์ที่ได้รับเพิ่มอย่างมีประสิทธิภาพจากการเคลือบผิว ได้แก่

- ปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำทำให้ต้นทุนของการเดินเครื่องลดลง
- มีความคงทนต่อการกัดกร่อนบนชิ้นส่วนที่ได้เคลือบพื้นผิวไว้
- ยืดอายุการทำงานให้มีประสิทธิภาพสูงและทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสูบน้ำที่ไม่ได้เคลือบพื้นผิว

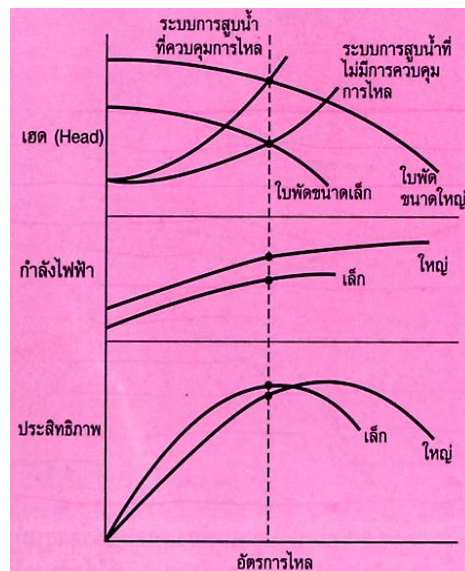


รูปที่ 6.8-3 การเคลือบผิวที่มีผลต่อคุณลักษณะสมบัติของปั๊มน้ำ

(2) การเปลี่ยนขนาดของใบพัด

เครื่องสูบน้ำที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในอุตสาหกรรมใช้กับใบพัดได้หลายขนาด โดยใบพัดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดจะทำให้การใช้งานมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 6.8-4

การเปลี่ยนขนาดของใบพัดจะช่วยประหยัดพลังงานจากการสูบน้ำได้ เช่น ถ้าเครื่องสูบน้ำหรีวแล้ว ควบคุมการไหลอยู่เสมอ จะทำให้ไม่สามารถทำงานได้ที่ประสิทธิภาพสูงสุด จึงอาจนำใบพัดขนาดเล็กมาใช้เพื่อทำให้มีอัตราการไหลเท่าเดิมในระดับของความดันต่ำ ทำให้มีการใช้พลังงานลดลง

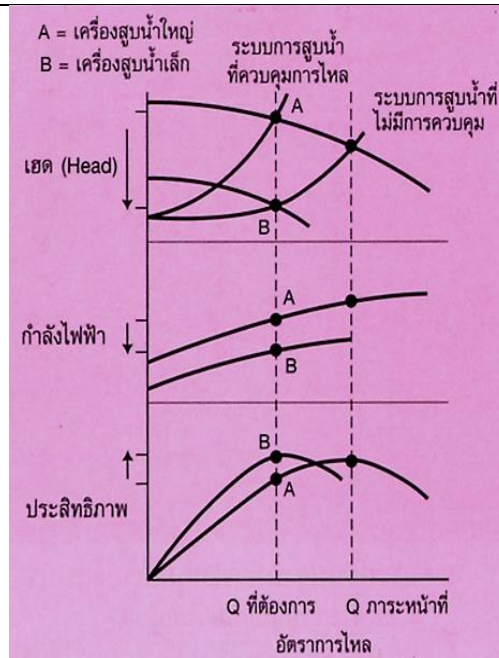


รูปที่ 6.8-4 ผลการลดขนาดของใบพัดต่อ คุณลักษณะสมบัติเครื่องสูบน้ำ

(3) การใช้เครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กลง

การใช้เครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กลงจะคุ้มค่า ถ้า

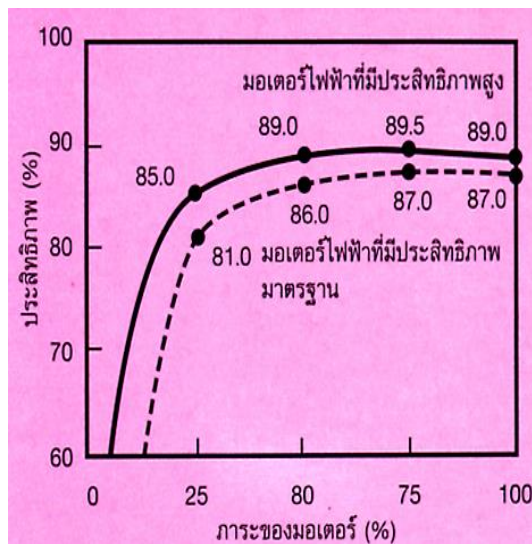
- เครื่องสูบน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าภาระสูงสุดของเครื่องสูบน้ำมาก
- เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพน้อยกว่า 80% ณ ระดับของภาระไหลสูงสุด
- มีการใช้พลังงานสูง นั่นคือ เมื่อเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่เดินเครื่องเป็นระยะเวลานาน เช่น ถ้าเครื่องสูบน้ำที่ติดตั้งแล้วควบคุมการไหลเพื่อควบคุมอัตราการไหลให้ได้ตามความต้องการ อาจใช้เครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กกว่าที่ออกแบบเพื่อให้ส่งจ่ายน้ำด้วยอัตราการไหลเท่าเดิมแต่ด้วยประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.8-5



รูปที่ 6.8-5 ผลจากการใช้เครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กลง

(4) มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง

ปกติการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องสูบน้ำที่มอเตอร์นั้นขับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง (Higher Efficiency Motor : HEMS) ซึ่ง HEMS จะมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ามาตรฐานทั่วไปประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงยังปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลัง (PF) ให้สูงขึ้น ดังรูปที่ 6.8-6



รูปที่ 6.8-6 การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของมอเตอร์มาตรฐานและมอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

6.8.4 การจัดการตรวจสอบ

- การตรวจวัดประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำเป็นเรื่องที่มีความยุ่งยากและข้อจำกัดมากมาย ทำให้โอกาสในการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำมีไม่มากนัก จึงมีการพัฒนาเทคนิคทางเทอร์โมไดนามิกส์มาคำนวณหาประสิทธิภาพได้โดยตรงเพียงวัดอุณหภูมิและความดันตกคร่อมเครื่องสูบน้ำ ผลที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับคุณสมบัติเครื่องสูบน้ำตามที่ผู้ผลิตให้รายละเอียดไว้
- การติดตามตรวจวัดการทำงานของเครื่องสูบน้ำ จะเป็นประโยชน์อย่างมากถ้าติดตั้งมาตรวัดความดันที่ท่อดูดและท่อส่งของเครื่องสูบน้ำทุกเครื่องและติดตั้งแอมป์มิเตอร์สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าท่อดูดไม่อุดตัน ความสามารถในการทำงานของเครื่องสูบน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับคุณลักษณะสมบัติของเครื่องสูบน้ำ การคำนวณค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องสูบน้ำ
- การติดตามตรวจวัดการทำงานของระบบสำหรับเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่จะมีความคุ้มค่าที่จะใช้ระบบติดตามบันทึกค่าการใช้งานด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความสามารถในการควบคุมการเดินเครื่องสูบน้ำได้อีกด้วย ทำให้เห็นศักยภาพในการ ปรับการเดินเครื่องสูบน้ำให้สอดคล้องกับความต้องการการใช้น้ำ การสูบน้ำเกินความต้องการ การรั่วของน้ำ

6.9 การตรวจวินิจฉัยเพื่อหาแนวทางการอนุรักษ์พลังงาน

สิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบเครื่องสูบน้ำนั้น เหตุของการสูญเสียพลังงาน ดังนั้นควรทำการตรวจวินิจฉัยเพื่อหาสิ่งผิดปกติ เพื่อทำการแก้ไขอย่างสม่ำเสมอดังตาราง

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
1. ตรวจสอบการทำความสะอาดกรอง (Strainer)	Strainer ตันส่งผลให้แรงดันด้านดูลดลงจากเดิมและอัตราการไหลของน้ำลดลง ทำให้ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำลดลง	ทำความสะอาดเป็นประจำโดยดูจากสภาพที่เกิดขึ้นจริง
2. ตรวจสอบเสียงการทำงานของเครื่องสูบน้ำ	บ้มีเสียงดังผิดปกติทำให้ประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำลดลง	- ใบพัดแตกหัก - ลูกปืนชำรุด - Strainer ตัน - ปริมาณน้ำด้านดูล้นเกินไป - มีอากาศในตัวเครื่องสูบน้ำ
3. ตรวจสอบการสั่นของเครื่องสูบน้ำ	เครื่องสูบน้ำสั่นผิดปกติ	- น๊อตยึดต่างๆ หลวมคลอน - ใบพัดเสียสมดุล - ลูกปืนชำรุด - ระบบส่งกำลังไม่ได้ศูนย์
4. ตรวจสอบผลต่างของความดันของน้ำทางเข้าและทางออกของเครื่องสูบน้ำ แต่ละชุด	เครื่องสูบน้ำที่มีผลต่างของความดันน้ำทางเข้าและออกสูงกว่าชุดอื่นจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า	แก้ไขเครื่องสูบน้ำชุดที่ผลต่างของความดันของน้ำทางเข้าและทางออกสูงกว่าชุดอื่นเพราะอัตราการไหลของน้ำน้อยกว่าชุดอื่น
5. ตรวจสอบความดันน้ำที่จุดใช้งานไกลสุด	จุดใช้งานไกลสุดควรมีความดันสูงกว่าความต้องการไม่เกิน 0.5 Barg	ลดความดันในการส่งน้ำของเครื่องสูบน้ำจะทำให้อัตราการส่งน้ำของเครื่องสูบน้ำเพิ่มขึ้น
6. ตรวจสอบมีการเดินเครื่องสูบน้ำแต่ละชุดสลับไปมาหรือไม่ (ตรวจวัดประสิทธิภาพแต่ละชุด)	เครื่องสูบน้ำแต่ละชุดมีประสิทธิภาพไม่เท่ากัน โดยตรวจวัดอัตราการไหลและพลังไฟฟ้าที่เครื่องสูบน้ำแต่ละชุดแล้วเปรียบเทียบค่า GPM/kW	- เลือกเดินเครื่องสูบน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นหลัก - แก้ไขข้อบกพร่องของเครื่องสูบน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ - แก้ไขความผิดปกติของเครื่องสูบน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
7. ตรวจสอบมีการเดินกลุ่มเครื่องสูบน้ำสลับกันไปมาหรือไม่	กลุ่มเครื่องสูบน้ำที่มีสัดส่วนระหว่างอัตราการไหลต่อพลังไฟฟ้าที่ใช้สูงสุดเป็นกลุ่มเครื่องสูบน้ำที่มีประสิทธิภาพรวมสูงสุด	• ตรวจวัดอัตราการไหลและพลังไฟฟ้ารวมของแต่ละกลุ่มเครื่องสูบน้ำเพื่อจัดทำแผนการเดินกลุ่มเครื่องสูบน้ำที่มี GPM/kW สูงสุดให้มากกว่ากลุ่มอื่น • แก้ไขการเชื่อมต่อท่อเข้าออกเครื่องสูบน้ำ จากตัวที่เป็น ตัววายและขยายขนาดท่อร่วม เพื่อให้ความดันตกของเครื่องสูบน้ำแต่ละชุดใกล้เคียงกัน • แก้ไขเครื่องสูบน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ
8. ตรวจสอบประวัติการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องสูบน้ำแต่ละชุด	เครื่องสูบน้ำที่ผ่านการซ่อมบำรุงใหม่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องสูบน้ำที่ไม่ผ่านการซ่อมบำรุง	• เลือกใช้งานเครื่องสูบน้ำชุดที่ผ่านการซ่อมบำรุงใหม่ให้มาก • ทำแผนการซ่อมบำรุงตามความเหมาะสม
9. ตรวจสอบว่ามีการหรีวแล้วทางเข้าหรือทางออกของเครื่องสูบน้ำหรือไม่	ไม่ควรใช้เครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่แล้วทำการหรีวแล้วเพราะประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำจะลดลง	• ลดขนาดใบพัดเครื่องสูบน้ำ • ลดความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำ • ลดขนาดเครื่องสูบน้ำและมอเตอร์
10. ตรวจสอบอุณหภูมิผิวมอเตอร์	มอเตอร์ที่มีอุณหภูมิผิวสูงกว่าชุดอื่นเป็นมอเตอร์ที่ใช้กระแสไฟฟ้ามากและประสิทธิภาพต่ำ	• ควรใช้งานเครื่องสูบน้ำชุดที่มอเตอร์มีอุณหภูมิผิวสูงให้น้อยลง และวิเคราะห์หาสาเหตุ • เปลี่ยนไปใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง
11. ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์เครื่องสูบน้ำแต่ละชุดใช้	มอเตอร์ชุดที่ใช้กระแสเป็นมอเตอร์ที่ใช้พลังงานมาก	• ควรใช้งานเครื่องสูบน้ำชุดที่มอเตอร์ใช้กระแสไฟฟ้าสูงให้น้อยลง • เปลี่ยนไปใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
12. ตรวจสอบประวัติการซ่อมมอเตอร์	มอเตอร์ชุดที่เคยใหม่จะมีประสิทธิภาพลดลงโดยการไหม้แต่ละครั้งประสิทธิภาพลดลงประมาณ 4%	• ควรใช้งานเครื่องสูบน้ำชุดที่มอเตอร์เคยไหม้ให้น้อยลง • เปลี่ยนไปใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง • นำมอเตอร์ชุดอื่นมาเปลี่ยน
13. ตรวจสอบพลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้เทียบกับฟักัด	มอเตอร์ใช้งานที่ภาระไม่ต่ำกว่า 80% ของฟักัด โดยภาระที่ต่ำกว่า 80% ในทุกๆ 10% ประสิทธิภาพของมอเตอร์จะลดลงประมาณ 1%	• ห้ามมอเตอร์ในโรงงานที่มีขนาดเหมาะสมมาเปลี่ยน • เปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ที่มีขนาดเหมาะสม
14. ตรวจสอบตำแหน่งติดตั้งเครื่องสูบน้ำ	ระบบท่อดูดและระบบท่อส่งควรสั้นที่สุด เพื่อลดการสูญเสียความดันในระบบและเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ	• ระบบท่อดูดและระบบท่อส่งควรสั้นที่สุด เพื่อลดการสูญเสียความดันในระบบและเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องสูบน้ำ
15. ตรวจสอบขนาดท่อและจำนวนข้อต่อข้องอ	ขนาดท่อเล็กและข้อต่อข้องอมาก การสูญเสียความดันในระบบสูง	• ปรับปรุงเพิ่มขนาดท่อและลดข้อต่อข้องอ • ติดตั้งท่อเพิ่มเติมจากเดิม
16. ตรวจสอบการเชื่อมต่อระบบท่อของเครื่องสูบน้ำ	การต่อเครื่องสูบน้ำแบบขนานกันควรเชื่อมต่อท่อเข้าที่ร่วม (Header) แบบตัววาย และท่อร่วมควรมีขนาดใหญ่เพียงพอ จะส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นในขณะที่เดินเครื่องสูบน้ำหลายชุดพร้อมกัน	• ปรับปรุงการเชื่อมต่อท่อแบบตัวที่เป็นตัววาย • เพิ่มขนาดท่อร่วม หรือเพิ่มจำนวนท่อร่วม
17. ตรวจสอบการใช้ความดันน้ำในโรงงาน	อุปกรณ์ส่วนใหญ่ใช้ความดันต่ำ การลดความดันที่ปั๊มลงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพปั๊มสูงขึ้นและการรั่วไหลในระบบลดลง	• ลดความดันปั๊มลงโดยทำการติดตั้งปั๊มเพิ่มความดันขนาดเล็ก (Booster Pump) ให้กับอุปกรณ์ส่วนน้อยที่ต้องการความดันน้ำสูง
18. ตรวจสอบการรั่วของน้ำในระบบ	เมื่อปิดอุปกรณ์ใช้น้ำทั้งหมดมิเตอร์น้ำจะต้องไม่หมุน	• ซ่อมจุดรั่วไหลของน้ำทั้งหมด
19. ตรวจสอบการเปิดน้ำทิ้งไว้	อุปกรณ์ใช้น้ำทั้งหมดจะต้องไม่มีการเปิดน้ำทิ้งไว้	• รมรงค้ให้ผู้ใช้ช่วยกันดูแล

รายการตรวจ	เกณฑ์พิจารณา	แนวทางปฏิบัติที่ดี
20. ตรวจสอบมีการใช้หัวฉีดประหยัดน้ำหรือไม่	หัวฉีดประหยัดน้ำจะลดการใช้น้ำประมาณ 50%	• ติดตั้งหัวฉีดประหยัดน้ำ
21. ตรวจสอบมีการใช้ก๊อกน้ำประหยัดน้ำหรือไม่	ก๊อกน้ำประหยัดน้ำจะลดการใช้น้ำประมาณ 60%	• ติดตั้งก๊อกน้ำประหยัดน้ำ

6.10 แบบตรวจสอบศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน

แบบตรวจสอบศักยภาพการอนุรักษ์พลังงานนี้มีประโยชน์ในการค้นหาแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานก่อนที่จะดำเนินการตรวจวิเคราะห์เชิงลึก เพื่อหาผลการอนุรักษ์พลังงานต่อไป

รายการศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน	ผลการตรวจสอบศักยภาพ		
	ดำเนินการแล้ว	พร้อมดำเนินการ	ไม่พร้อมดำเนินการ
1. การใช้เครื่องสูบน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นหลัก			เพราะ...
2. การใช้กลุ่มเครื่องสูบน้ำกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเป็นหลัก			เพราะ...
3. การลดการรั่วไหลของน้ำ			เพราะ...
4. การลดปริมาณการใช้น้ำโดยใช้อุปกรณ์ประหยัดน้ำ			เพราะ...
5. การใช้น้ำคุณภาพต่ำในกิจกรรมล้างพื้นหรืออื่นๆ			เพราะ...
6. การใช้เครื่องสูบน้ำแรงดันสูงเพื่อลดการใช้น้ำในการล้าง			เพราะ...
7. การลดการใช้มอเตอร์ที่เคยมีการไหม้ของขดลวด			เพราะ...
8. การลดอัตราการไหลของน้ำโดยห้รั่วาล้วน้ำ			เพราะ...
9. การลดอัตราการไหลของน้ำโดยการลดขนาดใบพัด			เพราะ...
10. การลดอัตราการไหลของน้ำโดยการลดรอบมอเตอร์			เพราะ...
11. การลดขนาดของเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับภาระ			เพราะ...
12. การลดขนาดของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระ			เพราะ...
13. การใช้มอเตอร์ประสิทธิภาพสูง			เพราะ...
14. การเพิ่มขนาดท่อและเปลี่ยนการต่อท่อจากแบบที่เป็นแบบวาย			เพราะ...
15. การลดแรงดันในการส่งน้ำ			เพราะ...
16. การใช้เครื่องสูบน้ำประสิทธิภาพสูง			เพราะ...
17. การเปลี่ยนเบร้ง หล่อลื่น บำรุงรักษาในระยะเวลาที่เหมาะสม			เพราะ...

รายการศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน	ผลการตรวจสอบศักยภาพ		
	ดำเนิน การแล้ว	พร้อม ดำเนินการ	ไม่พร้อม ดำเนินการ
18. การทำความสะอาดตัวกรอง (Strainer) สม่ำเสมอ			เพราะ...
19. การทำความสะอาดหรือเปลี่ยนใบพัดในระยะเวลาที่เหมาะสม			เพราะ...
20. การเลือกใช้เครื่องสูบน้ำชนิดที่เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน			เพราะ...
21. การใช้น้ำที่มีระดับคุณภาพที่เหมาะสมกับอุปกรณ์/การใช้งาน			เพราะ...
22. การปิดวาล์วน้ำเข้าเครื่องจักรที่ไม่ใช้งาน			เพราะ...
23. การปิดวาล์ว Bypars ของระบบน้ำทั้งหมด			เพราะ...
24. การลดขั้นตอนการส่งน้ำ			เพราะ...
25. การใช้ Booster Pump กับอุปกรณ์กลุ่มน้อยที่ต้องการความดันสูง			เพราะ...

6.11 โปรแกรมวิเคราะห์มาตรการอนุรักษ์พลังงาน

เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ผลการอนุรักษ์พลังงาน จึงทำเป็นโปรแกรม Microsoft Excel โดยผู้ใช้งานข้อมูลเบื้องต้น และข้อมูลตรวจวัดกรอกลงในช่องว่าง โปรแกรมจะคำนวณผลการอนุรักษ์พลังงานที่ถูกต้องได้ทันที

มาตรการที่ 1 การเปลี่ยนเครื่องสูบน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพต่ำ
1. หลักการและเหตุผล ปั๊มน้ำโดยทั่วไปจะมีอายุการใช้งานประมาณ 15 ปี ดังนั้นเมื่อเครื่องสูบน้ำมีอายุการใช้งานนาน จะมีประสิทธิภาพลดต่ำลง เนื่องจากการสึกหรอ นอกจากนั้นถ้ามอเตอร์ของเครื่องสูบน้ำเกิดการไหม้แล้วนำไปพันใหม่ประสิทธิภาพของระบบสูบน้ำจะยิ่งลดต่ำลง จึงมีแนวคิดที่จะทำการเปลี่ยน เครื่องสูบน้ำ No1 เพราะอายุการใช้งานประมาณ 16 ปี และประสิทธิภาพต่ำโดยมีค่า GPM/kW ประมาณ 53.33 GPM/kW เป็นเครื่องสูบน้ำใหม่ซึ่งมีค่า GPM/kW ประมาณ 66.67 GPM/kW  รูปเครื่องสูบน้ำชุดเดิมที่จะทำการเปลี่ยน  รูปเครื่องสูบน้ำใหม่ที่จะนำมาใช้

2. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์
2.1 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเทคนิค
2.1.1 ดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องสูบน้ำ (GPM/kW) $SEC = \text{อัตราการไหลของน้ำ (GPM)} / \text{พลังงานที่เครื่องสูบน้ำใช้ (kW)}$ 2.1.2 ร้อยละของดัชนีการใช้พลังงานที่ลดลง (%) $PT = (1 - (\text{ดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องสูบน้ำเดิม (GPM/kW)} / \text{ดัชนีการใช้พลังงานของเครื่องสูบน้ำชุดใหม่ (GPM/kW)})) \times 100$ 2.1.3 พลังงานไฟฟ้าลดลง (kWh/y) $E_s = \text{พลังงานที่เครื่องสูบน้ำชุดเดิมใช้ (kW)} \times (\text{ร้อยละดัชนีการใช้พลังงานที่ลดลง} / 100) \times \text{ชั่วโมงการใช้งานของเครื่องสูบน้ำ (h/y)}$
2.2 การวิเคราะห์การลงทุน
2.2.1 ระยะเวลาคืนทุน (y) $PB = \text{ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดและค่าเครื่องสูบน้ำ(฿)} / \text{ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง(฿/y)}$
3 การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้โปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยป้อนข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลตรวจวัดใส่ในช่องสีฟ้า

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
1. ข้อมูลเบื้องต้น				
1.1 ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย	E_C	B/kWh	3.00	จากใบแจ้งหนี้ค่าไฟฟ้า
1.2 ชั่วโมงการใช้งานต่อปี	h	h/y	3,000.00	จากการใช้งานจริง
1.3 อัตราการไหลของปั๊มน้ำใหม่	FL_N	GPM	1,000.00	จากคุณสมบัติของปั๊มน้ำชุดใหม่
1.4 พลังไฟฟ้าของปั๊มใหม่	EL_N	kW	15.00	จากคุณสมบัติของปั๊มน้ำชุดใหม่
1.5 ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดและค่าปั๊มน้ำ	C_I	B	25,000.00	
2. ข้อมูลตรวจวัด				
2.1 อัตราการไหลของปั๊มน้ำเดิม	FL_O	GPM	800.00	จากการตรวจวัดอัตราการไหลปั๊มน้ำเดิมใช้
2.2 พลังไฟฟ้าของปั๊มน้ำเดิม	EL_O	kW	15.00	จากการตรวจวัดพลังไฟฟ้าที่ปั๊มน้ำเดิมใช้
3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค				
3.1 ดัชนีการใช้พลังงานของปั๊มน้ำชุดเดิม $SEC = FL_O / EL_O$	SEC_O	GPM/kW	53.33	
3.2 ดัชนีการใช้พลังงานของปั๊มน้ำชุดใหม่ $SEC = FL_N / EL_N$	SEC_N	GPM/kW	66.67	
3.3 ร้อยละดัชนีการใช้พลังงานที่ลดลง $PT = (1 - (SEC_O / SEC_N)) \times 100$	PT	%	20.01	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
3.4 พลังงานไฟฟ้าลดลง $E_S = EL_O \times (PT / 100) \times h$	E_S	kWh/y	9,004.50	
3.5 ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง $S_C = E_S \times E_C$	S_C	฿/y	27,013.50	
4. การวิเคราะห์การลงทุน				
4.1 ระยะเวลาคืนทุน $PB = C_I / S_C$	PB	y	0.93	
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์				
5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง	E_S	kWh/y	9,004.50	
5.2 ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง	S_C	฿/y	27,013.50	
5.3 ระยะเวลาคืนทุน	PB	y	0.93	

มาตรการที่ 2 การลดขนาดใบพัด

1. หลักการและเหตุผล

โรงงานแห่งหนึ่งติดตั้งเครื่องสูบน้ำใช้ในการส่งจ่ายน้ำจำนวน 1 ตัว ขนาดพิกัด 20 HP (15 kW) เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเครื่องสูบน้ำ 10 นิ้ว ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ 1,750 rpm อัตราการไหล 1,200 แกลลอนต่อนาที เฮด 30 เมตรใช้งาน 10 ชั่วโมงต่อวัน 300 วันต่อปี อัตราค่าไฟฟ้า 3 บาทต่อหน่วย ทางโรงงานต้องการลดอัตรา การไหลลงเหลือ 1,000 แกลลอนต่อนาที



รูปเครื่องสูบน้ำที่จะลดขนาดใบพัด

2. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์	
2.1 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเทคนิค	
2.1.1 เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดที่ปรับลด	= $\text{เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดก่อนปรับลด} / (\text{อัตราการใช้ของของไหลก่อนปรับลด} / \text{อัตราการใช้ของของไหลหลังปรับ})^{1/2}$
2.1.2 กำลังของเครื่องสูบน้ำหลังลดขนาดใบพัด	= $\text{กำลังของปั๊มก่อนปรับปรุง} / (\text{เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดก่อนปรับลด} / \text{เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดหลังปรับลด})^4$
2.2 การวิเคราะห์การลงทุน	
2.2.1 ระยะเวลาคืนทุน (y)	$PB = \text{ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดและลงทุน (฿)} / \text{ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง (฿/y)}$
3 การวิเคราะห์ข้อมูล	
ใช้โปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยป้อนข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลตรวจวัดใส่ในช่องสีฟ้า	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
1. ข้อมูลเบื้องต้น				
1.1 ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย	E_C	บาท/kWh	3	จากใบแจ้งหนี้ค่าไฟ
1.2 ชั่วโมงการใช้งานต่อปี	h_r	hr/y	3,000	จากการใช้งานจริง
1.3 อัตราการไหลของของไหลหลังปรับปรุง	Q_2	GPM	1,000	การใช้งานจริง
1.4 เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดก่อนปรับปรุง	D_1	นิ้ว	10	ข้อมูลของปั๊ม
1.5 ความเร็วรอบของปั๊มก่อนปรับปรุง	N_1	rpm	1,750.00	ข้อมูลของปั๊ม
1.6 ความเร็วรอบของปั๊มหลังปรับปรุง	N_2	rpm	1,750.00	ข้อมูลของปั๊ม
1.7 เสดของปั๊มก่อนปรับปรุง	H_1	m	30.00	ข้อมูลของปั๊ม
1.8 ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง	C_1	บาท	10,000.00	จากการประเมิน
2. ข้อมูลตรวจวัด				
2.1 กำลังของปั๊มก่อนปรับปรุง	P_1	kW	15.00	จากการตรวจวัด
2.2 อัตราการไหลของของไหลก่อนปรับปรุง	Q_1	GPM	1,200.00	จากการตรวจวัด
3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค				
3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดที่ปรับลด $D_2 = D_1 / \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{1/2}$	D_2	นิ้ว	9.13	
3.2 เสดของปั๊มหลังลดขนาดใบพัด $H_2 = H_1 / \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$	H_2	m	25.01	
3.3 กำลังของปั๊มหลังลดขนาดใบพัด $P_2 = P_1 / \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4$	P_2	kW	10.42	
3.4 พลังงานไฟฟ้าลดลงต่อปี $E_S = (P_1 - P_2) \times \text{hr}$	E_S	kWh/y	13,740.00	
3.5 ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง $S_C = (E_S \times E_C)$	S_C	บาท/ปี	41,220.00	
4. การวิเคราะห์การลงทุน				
4.1 ระยะเวลาคืนทุน $PB = C_1 / S_C$	PB	y	0.24	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มาของข้อมูล
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์				
5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง	E_s	kWh/y	13,740.00	
5.2 ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง	S_c	บาท/ปี	41,220.00	
5.3 ระยะเวลาคืนทุน	PB	y	0.24	

มาตรการที่ 3 การปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ	
1. หลักการและเหตุผล	
โรงงานแห่งหนึ่งติดตั้งเครื่องสูบน้ำใช้ในการส่งจ่ายน้ำจำนวน 1 ตัว ขนาดพิกัด 20 HP (15 kW) ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ 1,750 rpm อัตราการไหล 1,200 แกลลอนต่อนาที เฮด 30 เมตรใช้งาน 10 ชั่วโมงต่อวัน 300 วันต่อปี อัตราค่าไฟฟ้า 3 บาทต่อหน่วย ทางโรงงานต้องการลดอัตรา การไหลลงเหลือ 1,000 แกลลอนต่อนาที โดยวิธีการการลดความเร็วรอบลง เพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงาน	
	
รูปเครื่องสูบน้ำที่ปรับความเร็วรอบ	รูปอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบ
2. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์	
2.1 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเทคนิค	
2.1.1 ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำที่ปรับลด = ความเร็วรอบก่อนปรับลด x (อัตราการไหลของของไหล หลังปรับลด / อัตราการไหลของของไหลก่อนปรับ) 2.1.2 กำลังของเครื่องสูบน้ำหลังลดรอบ = (ความเร็วรอบที่ปรับลด / ความเร็วรอบก่อนปรับลด)³ x กำลังของปั๊มก่อนปรับปรุง	
2.2 การวิเคราะห์การลงทุน	
2.2.1 ระยะเวลาคืนทุน (y) PB = ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดและการลงทุน (฿) / ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง (฿/y)	
3 การวิเคราะห์ข้อมูล	
ใช้โปรแกรม Excel ในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยป้อนข้อมูลเบื้องต้นและข้อมูลตรวจวัดใส่ในช่องสีฟ้า	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา
1. ข้อมูลเบื้องต้น				
1.1 ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อหน่วย	E_C	บาท/kWh	3.00	ใบแจ้งหนี้ค่าไฟ
1.2 ชั่วโมงการใช้งานต่อปี	h_r	hr/y	3,000.00	การใช้งานจริง
1.3 อัตราการไหลของของไหลหลังปรับปรุง	Q_2	GPM	1,000.00	การใช้งานจริง
1.5 ความเร็วรอบของปั๊มก่อนปรับปรุง	N_1	rpm	1,750.00	ข้อมูลของปั๊ม
1.6 เสดของปั๊มก่อนปรับปรุง	H_1	m	30.00	ข้อมูลของปั๊ม
1.7 ค่าใช้จ่ายในการปรับปรุง	C_1	บาท	50,000.00	
2. ข้อมูลตรวจวัด				
2.1 กำลังของปั๊มก่อนปรับปรุง	P_1	kW	15.00	จากการตรวจวัด
2.2 อัตราการไหลของของไหลก่อนปรับปรุง	Q_1	GPM	1,200.00	จากการตรวจวัด
3. การวิเคราะห์ทางเทคนิค				
3.1 ความเร็วรอบหลังปรับปรุง $N_2 = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \times N_1$	N_2	rpm	1,458.33	
3.2 เสดของปั๊มหลังลดความเร็วรอบ $H_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \times H_1$	H_2	m	20.83	
3.3 กำลังของปั๊มหลังลดความเร็วรอบ $P_2 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \times P_1$	P_2	kW	8.68	
3.4 พลังงานไฟฟ้าลดลงต่อปี $E_S = (P_1 - P_2) \times hr$	E_S	kWh/y	18,960.00	
3.5 ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง $S_C = (E_S \times E_C)$	S_C	บาท/ปี	56,880.00	
4. การวิเคราะห์การลงทุน				
4.1 ระยะเวลาคืนทุน $PB = C_1 / S_C$	PB	y	0.88	

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ข้อมูล	แหล่งที่มา
5. สรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์				
5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง	E_s	kWh/y	18,960.00	
5.2 ค่าพลังงานไฟฟ้าลดลง	S_C	บาท/ปี	56,880.00	
5.3 ระยะเวลาคืนทุน	PB	y	0.88	
หมายเหตุ : ค่ากำลังไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณในเบื้องต้นอาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงดังนั้น ในทางปฏิบัติควรนำค่าพลังไฟฟ้าจากการตรวจวัดมาคำนวณเพื่อหาผลประหยัดจริง				

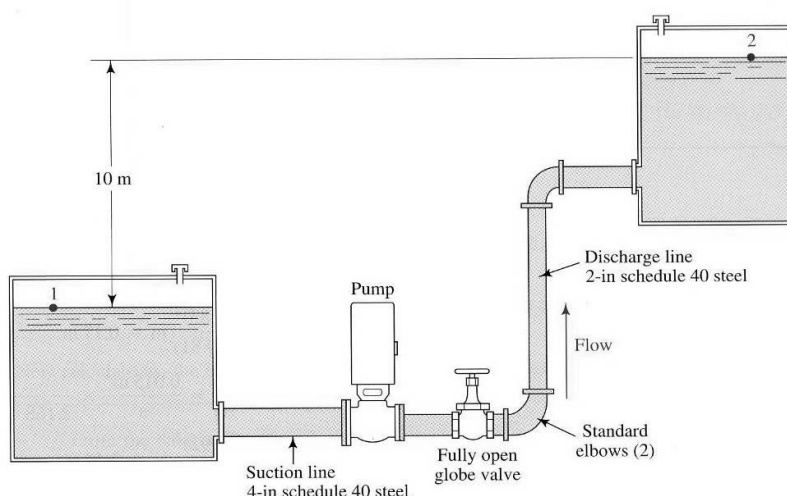
6.12 กรณีศึกษา

กรณีศึกษาถือเป็นต้นแบบของมาตรการอนุรักษ์พลังงานที่ประสบผลสำเร็จในการอนุรักษ์พลังงานที่โรงงานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดผลการอนุรักษ์พลังงานที่เป็นรูปธรรมต่อไป

กรณีศึกษาที่ 1 : การใช้งานเครื่องสูบน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

ระบบท่อส่งของไหลเมทิลแอลกอฮอล์ออกแบบมาดังรูปที่ 6.12-1 โดยอัตราการสูบของไหลในระบบมีค่า 54.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m^3/hr) เครื่องสูบน้ำมีประสิทธิภาพเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์ สถานประกอบการจะต้องใช้ต้นทุนกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำเท่าใด และสามารถปรับปรุงระบบอย่างไรเพื่อลดกำลังขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 6.12-1 ระบบท่อส่งของไหล เมทิลแอลกอฮอล์

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

การออกแบบท่อที่มีขนาดเล็กจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานมากและการเลือกใช้วาล์วชนิดที่มีการสูญเสียสูง ส่งผลให้ต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำมาก

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ทำการวิเคราะห์หาการสูญเสียในระบบและกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ แล้วทำการปรับปรุงขนาดท่อและวาล์วเพื่อลดกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน จะส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานในขณะใช้งานได้

4. สภาพก่อนปรับปรุง

กำหนดให้ จุดที่ 1 และ 2 ของไหลมีค่าความดันเท่ากับความดันบรรยากาศและความเร็วของของไหล (การลดระดับลงของน้ำที่จุด 1 และการเพิ่มระดับของน้ำที่จุด 2) มีค่าน้อยมากหรือประมาณเท่ากับศูนย์ ความยาวท่อดูรวมเท่ากับ 15 เมตร ขนาด 4 นิ้ว Schedule 40 steel pipe ส่วนความยาวท่อส่งรวมเท่ากับ 200 เมตร ขนาด 2 นิ้ว Schedule 40 steel pipe ค่าสัมประสิทธิ์ K ที่ช่องการไหลจากถัง 1 เข้าสู่ท่อดูมีค่าเท่ากับ 0.5 (เป็นแบบ a

squared-edged inlet) และค่าสัมประสิทธิ์ K ที่ช่องกรไหลจากท่อส่งเข้าสู่ถัง 2 มีค่าเท่ากับ 1.0 คุณสมบัติของของไหลมีดังนี้	
ค่าความหนาแน่นเท่ากับ	$\rho = 789 \text{ kg/m}^3$
ความหนืดไดนามิก (Dynamic viscosity)	$\mu = 5.6 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$
ค่าความโน้มถ่วง	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
จากผลการวิเคราะห์ทางเทคนิคพบว่าต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อนปั๊มประมาณ 33.2 กิโลวัตต์	
5.สภาพหลังปรับปรุง	
ทำการเปลี่ยนแปลงระบบใหม่เพื่อลดกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั๊ม โดยการลดความยาวท่อลดลงจาก 15 เมตรเป็น 1.5 เมตร เพิ่มเกตวาล์ว(Gate valve)แบบเปิดเต็มที่ ที่ท่อดูด เพิ่มขนาดของท่อส่งจาก 2 นิ้วไปเป็น 3 นิ้ว และเปลี่ยนโกลบวาล์วที่ท่อส่งไปเป็นเกตวาล์วแบบเปิดเต็มที่ จากผลการวิเคราะห์ทางเทคนิคพบว่าต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อนปั๊มประมาณ 5.8 กิโลวัตต์ หรือคิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับประมาณ 1 ใน 6 ของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ก่อนปรับปรุง	
6.การวิเคราะห์ทางเทคนิค	
วิธีการวิเคราะห์ ใช้สมการของเบอร์นูลลี จากจุด 1 ไปยังจุด 2 ได้	
$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + TDH - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1)$	
เมื่อ	
TDH = พลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของไหลที่ปั๊มต้องให้กับของไหล (หน่วยเป็นเมตร)	
H_L = พลังงานสูญเสีย (เฮด) จากความฝืดรวมต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของไหล (หน่วยเป็นเมตร) โดย	
$H_L = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 \quad (2)$	
H_1 = เฮดสูญเสียจากการไหลจากถัง 1 เข้าท่อดูด	
H_2 = เฮดความฝืดจากการไหลในท่อดูด	
H_3 = เฮดสูญเสียจากการไหลผ่านโกลบวาล์ว	
H_4 = เฮดสูญเสียจากการไหลผ่านข้องอ 90° สองตัวในระบบท่อ	
H_5 = เฮดความฝืดจากการไหลในท่อส่ง	
H_6 = เฮดสูญเสียจากการไหลจากท่อส่งเข้าสู่ถัง 2	
เนื่องจากระดับน้ำลดลงอย่างช้าๆ ดังนั้น $V_1 = V_2 \approx 0$	
จากอัตราการสูบที่กำหนดให้ $Q = 54.0 \text{ m}^3/\text{hr} = \frac{54.0 \text{ m}^3}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} = 0.015 \text{ m}^3/\text{s}$	

$$V_s = \frac{Q}{A_s} = \frac{0.015 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \times \left(\frac{0.1023}{2} \right)^2 \text{ m}^2} = 1.83 \text{ m/s (ความเร็วน้ำในท่อดูด)}$$

$$\frac{V_s^2}{2g} = \frac{(1.83)^2}{2 \times 9.81} = 0.17 \text{ m}$$

$$V_d = \frac{Q}{A_d} = \frac{0.015 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \times \left(\frac{0.0525}{2} \right)^2 \text{ m}^2} = 6.92 \text{ m/s (ความเร็วน้ำในท่อส่ง)}$$

$$\frac{V_d^2}{2g} = \frac{(6.92)^2}{2 \times 9.81} = 2.44 \text{ m}$$

จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความฝืดจาก Moody Diagram

สำหรับท่อดูด (ตัวห้อย s หมายถึงท่อดูด)

$$Re_s = \frac{V_s D \rho}{\mu} = \frac{(1.83)(0.1023)(789)}{5.60 \times 10^{-4}} = 2.64 \times 10^5$$

สำหรับท่อเหล็กกล้า (Steel), $\epsilon = 4.6 \times 10^{-5}$

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{0.1023}{4.6 \times 10^{-5}} = 2224$$

จากค่าทั้งสองข้างบนนำไปใช้หาค่า f_s จาก Moody Diagram ได้เท่ากับ 0.018

สำหรับท่อส่ง (ตัวห้อย d หมายถึงท่อส่ง)

$$Re_d = \frac{V_d D \rho}{\mu} = \frac{(6.92)(0.1023)(789)}{5.60 \times 10^{-4}} = 5.12 \times 10^5$$

สำหรับท่อเหล็กกล้า (Steel), $\epsilon = 4.6 \times 10^{-5}$

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{0.0525}{4.6 \times 10^{-5}} = 1141$$

จากค่าทั้งสองข้างบนนำไปใช้หาค่า f_d จาก Moody Diagram ได้เท่ากับ 0.019

ต่อไปเราจะทำการคำนวณเสดความฝืดในแต่ละค่าในสมการที่ (2)

$$H_1 = K \frac{V_s^2}{2g} = (0.5) (0.17 \text{ m}) = 0.09 \text{ m}$$

$$H_2 = f_s \times \frac{L}{D} \times \frac{V_s^2}{2g} = (0.018) \left(\frac{15}{0.1023} \right) (0.17 \text{ m}) = 0.45 \text{ m}$$

$$H_3 = f_d \times \frac{L_e}{D} \times \frac{V_d^2}{2g} = (0.019) (340) (2.44 \text{ m}) = 15.76 \text{ m}$$

โดยค่า $\frac{L_e}{D}$ ของโกลบวาล์วที่เปิดเต็มที่มีค่าเท่ากับ 340 ซึ่งค่า L_e คือค่าความยาวท่อเทียบเท่าของโกลบวาล์ว

$$H_4 = 2 f_d \times \frac{L_e}{D} \times \frac{V_d^2}{2g} = 2 (0.019) (30) (2.44 \text{ m}) = 2.78 \text{ m}$$

โดยค่า $\frac{L_e}{D}$ ของข้องอ 90° มีค่าเท่ากับ 30

$$H_5 = f_d \times \frac{L}{D} \times \frac{V_d^2}{2g} = (0.019) \left(\frac{200}{0.0525} \right) (2.44 \text{ m}) = 185.9 \text{ m}$$

$$H_6 = K \frac{V_d^2}{2g} = (1) (2.44 \text{ m}) = 2.44 \text{ m}$$

นำค่าเสดความฝืดไปแทนในสมการที่ 2 จะได้

$$\begin{aligned} H_L &= H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 + H_6 \\ &= 0.09 + 0.45 + 15.67 + 2.78 + 185.9 + 2.44 \\ &= 207.4 \text{ m} \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า H_L ไปแทนในสมการที่ 1 และจาก $P_1 = P_2 = 0$, $V_1 = V_2 = 0$, $Z_1 = 0$ และ $Z_2 = 10 \text{ m}$ จะได้

$$\text{TDH} = 10 + 207.4 = 217.4 \text{ m}$$

กำลังที่ใช้ในการปั๊ม, P_A

$$P_A = \frac{\text{TDH} \cdot \gamma Q}{\eta_{\text{pump}} \times 1000} = \frac{(217.4 \text{ m})(7.74 \times 10^3 \text{ N/m}^3)(0.015 \text{ m}^3/\text{s})}{0.76 \times 1000} = 33.2 \text{ kW}$$

ทำการวิเคราะห์ใหม่โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆดังนี้

1. ลดความยาวของท่อลดลงจาก 15 เมตรเป็น 1.5 เมตร โดยให้ถึงหมายเลข 1 อยู่เท่าเดิม ดังนั้น ท่อส่งจะยาวขึ้นเท่ากับ 213.5 เมตร
2. เพิ่มเกทวาล์ว(Gate valve)แบบเปิดเต็มที่ ที่ท่อจุด
3. เพิ่มขนาดของท่อส่งจาก 2 นิ้วไปเป็น 3 นิ้ว ดังนั้นจะทำให้เรากำนวนใหม่ได้ $V_d = 3.15 \text{ m/s}$ และเสด

$$\text{ความเร็ว} \frac{V_d^2}{2g} = 0.504 \text{ m (จากค่าเดิม 2.44 m)}$$

4. เปลี่ยนโกลบวาล์วที่ท่อส่งไปเป็นเกทวาล์วแบบเปิดเต็มที่

จากการวิเคราะห์ใหม่ พบว่าได้ค่า $\text{TDH} = 37.9$ เมตรหรือคิดเป็นกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนปั๊มใหม่ เป็น 5.8 kW

กรณีศึกษาที่ 2: การซ่อมแซมการรั่วไหลของน้ำหล่อเย็น

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการ ใช้เครื่องสูบน้ำระบายความร้อน (Cooling Water Pump) ขนาดพิกัด 37 kW จำนวน 4 ชุด โดยชุดที่ 1 มีพิกัดอัตราการไหล 340 m³/hr ชุดที่ 2,3 และ 4 มีพิกัดอัตราการไหล 420 m³/hr มีการเปิดใช้งาน 24 ชม./วัน และ 330 วัน/ปี

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

เครื่องสูบน้ำมีอายุการใช้งานเกินกว่าห้าปี มีสภาพค่อนข้างเก่าและซีดเครื่องสูบน้ำชำรุดเสื่อมสภาพ ทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำหล่อเย็น ที่เครื่องสูบน้ำ No.1, 3 และ No.4 ปริมาณ 1.538 m³/h หรือ 36.912 m³/วัน ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเครื่องสูบน้ำและค่าน้ำประปา

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ตรวจสอบอัตราการรั่วไหลของน้ำที่เครื่องสูบน้ำแต่ละตัว
2. ตรวจสอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเครื่องสูบน้ำแต่ละตัว
3. ทำการซ่อมเครื่องสูบน้ำหอยโข่ง โดยรื้อเครื่องสูบน้ำออกและ เปลี่ยนซีล เปลี่ยนลูกปืน และซ่อมสปีไหม

4. สภาพก่อนปรับปรุง

ทำการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเครื่องสูบน้ำและอัตราการรั่วไหลของน้ำที่เครื่องสูบน้ำ No.1, 3 และ No.4

เครื่องสูบน้ำ	พิกัด kW	พิกัดอัตราการไหล m ³ /hr	กำลังไฟฟ้าวัดได้ kW	อัตราการรั่วไหล m ³ /h	ค่ากำลังไฟฟ้าเฉพาะ kW/m ³ /hr
No.1	37	340	40.8	0.072	0.12
No.3	37	420	37.8	1.25	0.09
No.4	37	420	37.8	0.216	0.09
รวม	111	1180	116.4	1.538	0.094



รูปที่ 6.12-2 เครื่องสูบน้ำระบายความร้อนที่มีน้ำรั่ว

5.สภาพหลังปรับปรุง

ทำการซ่อมแซมเครื่องสูบน้ำทำให้สามารถลดการสูญเสียของน้ำหล่อเย็นและค่าน้ำประปาได้ 244,837 บาท/ปี และลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าได้ 1,112.96 kWh/ปี



รูปที่ 6.12-3 เครื่องสูบน้ำระบายความร้อนหลังปรับปรุง

6.การวิเคราะห์ทางเทคนิค

เครื่องสูบน้ำตัวที่ 1

- กำลังไฟฟ้า	=	40.8		kW.
- อัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำตัวนี้	=	340		m ³ /hr
- Specific power consumption	=	40.8 /340	=	0.12 kW/m ³ /hr
- อัตราการรั่วของน้ำ (Q _ร)	=	60 x 1.2 x 10 ⁻³	=	0.072 m ³ /hr
- กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากการรั่วไหล	=	0.072 x 0.12		
	=	8.64 x 10 ⁻³		kW
- พลังงานไฟฟ้าสูญเสียต่อปี	=	8.64 x 10 ⁻³ x 24 x 330	=	68 kWh/ปี
- ปริมาณน้ำรั่วตลอดทั้งปี	=	72 x 10 ⁻³ x 24 x 330	=	570.24 m ³ /ปี

เครื่องสูบน้ำตัวที่ 3

- กำลังไฟฟ้า	=	37.8		kW.
- อัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำตัวนี้	=	420		m ³ /hr
- Specific power consumption	=	37.8 /420	=	0.09 kW/m ³ /hr
- อัตราการรั่วของน้ำ (Q _ร)	=	30 m ³ / 24 hr	=	1.25 m ³ /hr
- กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากการรั่วไหล	=	1.25 x 0.09	=	0.1125 kW
- พลังงานไฟฟ้าสูญเสียต่อปี	=	0.1125 x 24 x 330	=	891 kWh/ปี
- ปริมาณน้ำรั่วตลอดทั้งปี	=	1.25 x 24x 330	=	9,900 m ³ /ปี

เครื่องสูบน้ำตัวที่ 4				
- กำลังไฟฟ้า	=	37.8		kW.
- อัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องสูบน้ำตัวนี้	=	420		m ³ /hr
- Specific power consumption	=	37.8 /420	= 0.09	kW/m ³ /hr
- อัตราการรั่วของน้ำ (Q _ร)	=	(900/15 x 60/1000 x 60)	= 0.216	m ³ /hr
- กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียเนื่องจากการรั่วไหล	=	0.216 x 0.09	= 0.01944	kW
- พลังงานไฟฟ้าสูญเสียต่อปี	=	0.01944 x 24 x 330	= 153.96	kWh/ปี
- ปริมาณน้ำรั่วตลอดทั้งปี	=	0.216 x 24 x 330	= 1710.72	m ³ /ปี
ดังนั้นหลังจากทำการซ่อมระบบปั้มน้ำทั้งหมดพร้อมรอยรั่วจะประหยัดได้พลังงานไฟฟ้าได้				
	=	68 + 891 + 153.96	= 1,112.96	kWh /ปี
ค่าไฟฟ้าประหยัดได้	=	1,112.96 x 3.10		
	=	3,450		บาท/ปี
ค่าน้ำประปาที่ประหยัดได้	=	570.24 + 9,900 + 1710.72 x 20.10		บาท/m ³
	=	244,837		บาท/ปี
ค่าน้ำประปาและค่าไฟฟ้าประหยัดรวม	=	3,450 + 244,837		บาท/ปี
	=	248,287		บาท/ปี
7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน				
เงินลงทุน	=	23,400.00		บาท
ประหยัดค่าใช้จ่าย	=	248,287.00		บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	23,400.00/248,287.00		
	=	0.09		ปี

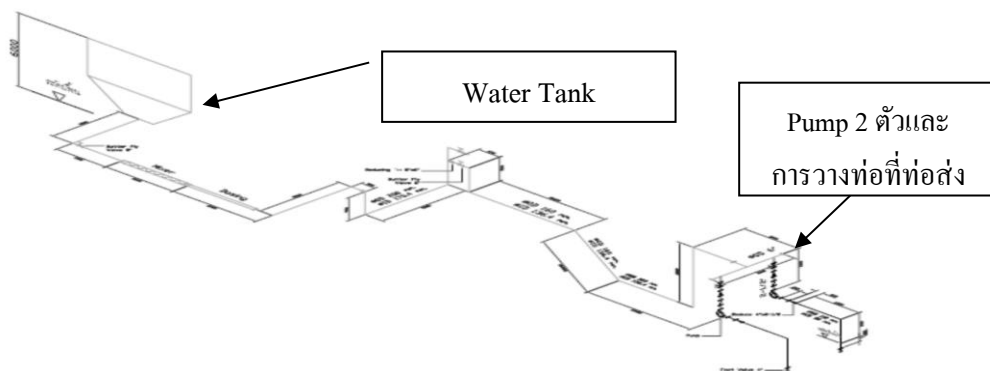
กรณีศึกษาที่ 3: การปรับปรุงระบบปั้มน้ำ	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
สถานประกอบการมีระบบกรองน้ำเพื่อจ่ายให้กับกระบวนการผลิตโดยใช้ระบบสูบน้ำดิบสูบน้ำจากแหล่งน้ำส่งไปยังระบบกรองน้ำ ซึ่งใช้เครื่องสูบน้ำขนาด 15 kW จำนวน 2 ตัว เพื่อจ่ายน้ำดิบ 130 ลูกบาศก์เมตร/ชม. โดยมีการใช้งาน 24 ชั่วโมง/วัน 336 วัน/ปี	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
ระบบสูบน้ำดังกล่าวมีขนาดท่อด้านดูด 4 นิ้ว ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานในท่อน้ำมากส่งผลให้เครื่องสูบน้ำต้องใช้กำลังในการขับเพิ่มขึ้น	

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

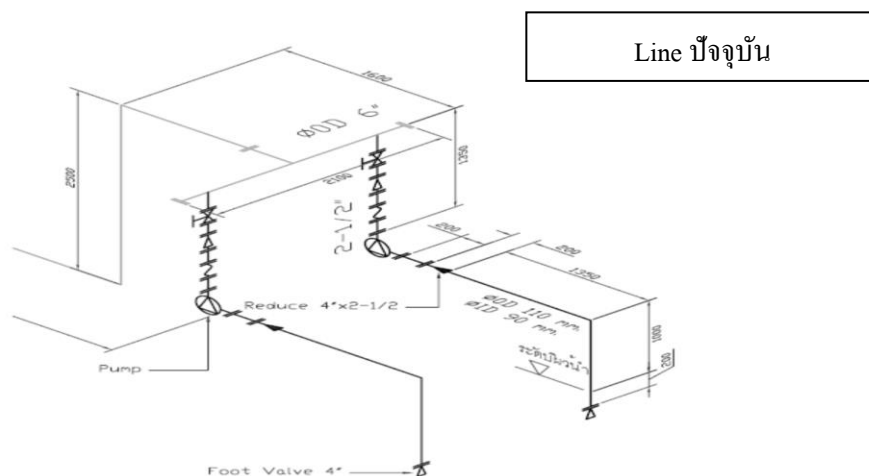
ทำการสำรวจการใช้งานระบบสูบน้ำเพื่อหาแนวทางลดการใช้พลังงาน จากการตรวจสอบพบว่าที่บ่อ 6 ซึ่งเป็นบ่อจ่ายน้ำดิบให้กับโรงกรองน้ำมีการใช้เครื่องสูบน้ำสองตัวในการสูบน้ำ ทางทีมงานอนุรักษ์เห็นว่าท่อที่ใช้ในทางคูมมีขนาด 4 นิ้ว และจากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Piping Fluid Flow System ทางทีมงานได้ทำการออกแบบระบบท่อใหม่ สามารถลดการใช้เครื่องสูบน้ำให้เหลือตัวเดียวได้และได้เพิ่มขนาดท่อด้านดูดให้ใหญ่ขึ้นเป็น 8 นิ้ว เพื่อลดการสูญเสียภายในท่อ โดยทำการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าก่อนและหลังการปรับปรุงเพื่อวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงาน

4. สภาพก่อนปรับปรุง

ทำการวิเคราะห์การสูญเสียในระบบท่อเดิมที่มีขนาด 4 นิ้ว โดยใช้โปรแกรม Piping Fluid Flow System



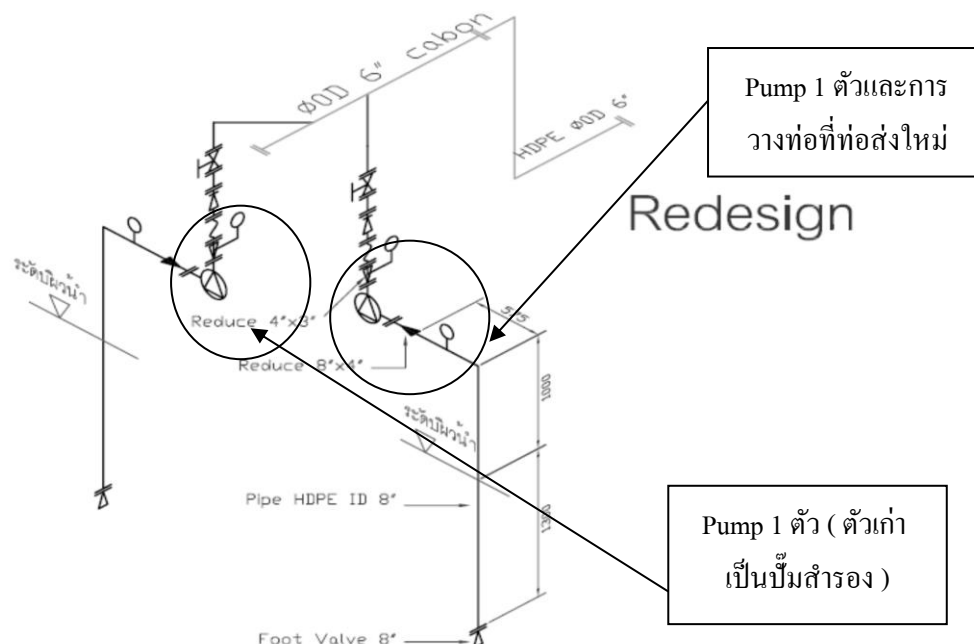
รูปที่ 6.12-4 แสดงรายละเอียดการวางท่อขนาด 4 นิ้วก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 6.12-5 แสดงรายละเอียดระบบสูบน้ำก่อนการปรับปรุง

5.สภาพหลังปรับปรุง

ทำการออกแบบระบบท่อใหม่โดยเพิ่มขนาดท่อด้านดูดเป็น 8 นิ้ว ส่งผลให้ลดกำลังไฟฟ้าในการขับเครื่องสูบน้ำลง 1.93 kW และพลังงานไฟฟ้า 15,583 kWh/ปี



รูปที่ 6.12-6 Single line diagram ของระบบท่อที่ออกแบบใหม่และใช้ในการคำนวณในโปรแกรม

6.การวิเคราะห์ทางเทคนิค

จากการออกแบบด้วยโปรแกรมพบว่าสามารถลดกำลังที่ใช้ในการสูบน้ำ 1.93 kW

ผลประหยัด (kWh/ปี)	=	กำลังไฟของเครื่องสูบน้ำลดลง x จำนวนชม.ที่ใช้ต่อวัน
		x จำนวนวันทำงานใน 1 ปี
	=	1.93 x 24 x 336
	=	15,583 kWh/ปี
ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย	=	3.10 บาท/kWh
คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้	=	15,583 x 3.10
	=	48,307 บาท/ปี

7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

เงินลงทุนค่าเครื่องสูบน้ำและการติดตั้ง	=	153,000 บาท
ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า	=	48,307 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	153,000/48,307
	=	3.20 ปี

กรณีศึกษาที่ 4: มาตรการเปลี่ยนท่อเหล็กของเครื่องสูบน้ำ	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
สถานประกอบการติดตั้งเครื่องสูบน้ำดิบขนาดพิกัด 30 kW จำนวน 4 ชุด เดินใช้งาน 24 ชั่วโมงต่อวัน 150 วันต่อปี จากการสำรวจพบว่าท่อเหล็กมีสภาพชำรุด ซึ่งจากการสอบถามทางโรงงานพบว่ามักมีการชำรุดอยู่เสมอ ทั้งนี้การติดตั้งตำแหน่งของท่อเหล็กไม่เหมาะสมจึงทำให้ชำรุดเร็วกว่าปกติ เมื่อชำรุดแล้วจะทำให้ น้ำที่ท่อทางดูดถูกดูดเข้าได้ไม่เต็มที่ จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานโดยใช่เหตุ	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
ท่อเหล็กของเครื่องสูบน้ำหนึ่งตัวมีการชำรุดเนื่องจากการติดตั้งตำแหน่งของท่อเหล็กไม่เหมาะสมทำให้ท่อยุบตัวลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ดูดได้ลดลง โดยสังเกตได้จากเสียงน้ำที่ดูดดังมาก	
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน	
ทำการเปลี่ยนท่อเหล็กและปรับระดับท่อให้อยู่ในระดับเดียวกัน และตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำ	
4. สภาพก่อนปรับปรุง	
ท่อเหล็กที่ยุบและเสียรูป ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่เครื่องสูบลดลงประมาณ 5 % ตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำได้ประมาณ 26.7 kW	
	
รูปที่ 6.12-7 แสดงท่อเหล็กที่เสียรูปก่อนปรับปรุง	
5. สภาพหลังปรับปรุง	
ทำการเปลี่ยนท่อเหล็กใหม่ ส่งผลประหยัดพลังงานไฟฟ้าประมาณ 4,806 kWh/ปี	
	
รูปที่ 6.12-8 แสดงท่อเหล็กที่เปลี่ยนแล้ว	

6.การวิเคราะห์ทางเทคนิค			
เครื่องสูบน้ำใช้กำลังไฟฟ้า = 26.7 kW จากการที่ท่อเหล็กตีบลง น้ำที่สามารถดูดได้ลดลง 5 % ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนเหล็กใหม่จะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้น้อย 5 %			
กำลังไฟฟ้าลดได้	=	$26.7 \times 0.05 = 1.335$	kW
พลังงานไฟฟ้าลดลง	=	$1.335 \times 24 \times 150$	
	=	4,806	kWh/ปี
คิดเป็นค่าไฟฟ้า	=	$4,806 \times 2.79$	
	=	13,408.7	บาท/ปี
7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน			
เงินลงทุน	=	2,000	บาท
ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า	=	13,408.7	บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	$2,000/13,408.7$	
	=	0.12	ปี

กรณีศึกษาที่ 5: การติดตั้งอินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ปั๊ม	
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน	
สถานประกอบการใช้เครื่องสูบน้ำกากมันสำปะหลังขนาดพิกัด 11 kW จำนวน 7 ชุดเพื่อส่งไปยังเครื่องสะบัดน้ำแป้งและ เครื่องสูบน้ำเสียขนาดพิกัด 55 kW จำนวน 1 ชุด เพื่อส่งน้ำเสียจากขบวนการผลิตไปสู่บ่อบำบัดน้ำเสียโดยมีการใช้งาน 22 ชั่วโมงต่อวัน 300 วันต่อปี	
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง	
เครื่องสูบน้ำดังกล่าวมีการหรีวาล์วเพื่อลดอัตราการไหล ส่งผลทำให้ลดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำได้ไม่มากนัก เนื่องจากเป็นวิธีการเพิ่มความดันให้กับเครื่องสูบน้ำ	
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน	
การลดอัตราการไหลของน้ำโดยวิธีการลดรอบมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำจะส่งผลให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้เป็นกำลังสามของรอบที่ลดลง (สำหรับเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงเท่านั้น) โดยทำการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่เครื่องสูบน้ำใช้ และอัตราการไหลที่ต้องการเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานและอัตราผลตอบแทนการลงทุนหลังจากติดตั้ง VSD เพื่อลดรอบมอเตอร์	
4. สภาพก่อนปรับปรุง	
จากการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำกากพบว่าใช้กำลังไฟฟ้า 7.37 kW และเครื่องสูบน้ำเสียใช้กำลังไฟฟ้า 41.86 kW ที่ 1,460 รอบต่อนาที มีการหรีวาล์วลดอัตราการไหลของน้ำที่ 60 %	
	
รูปที่ 6.12-9 การหรีวาล์วเครื่องสูบน้ำก่อนปรับปรุง	
5. สภาพหลังปรับปรุง	
ทำการติดตั้งอุปกรณ์ลดรอบมอเตอร์ จาก 1,460 รอบต่อนาที เป็น 876 รอบต่อนาที ส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องสูบน้ำกากลดลงเป็น 1.59 kW ต่อชุด และเครื่องสูบน้ำเสียลดลงเป็น 9.04 kW ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานประมาณ 483,648 kWh/ปี	



รูปที่ 6.12-10 การติดตั้งอุปกรณ์ลดรอบมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำหลังปรับปรุง

6.การวิเคราะห์ทางเทคนิค

จากสมการ

$$\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^3 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 = \left(\frac{kW_2}{kW_1} \right)$$

Q_1 คือ อัตราสูบก่อนปรับปรุง (100%)

Q_2 คือ อัตราสูบหลังปรับปรุง (60%)

N_1 คือ ความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำก่อนปรับปรุง (1460 รอบต่อนาที)

kW_1 คือ กำลังไฟฟ้าก่อนปรับปรุง (7.37 กิโลวัตต์)

สำหรับมอเตอร์เครื่องสูบน้ำ No.1-7

ความเร็วรอบหลังปรับปรุง (N_2)	=	(60 / 100) x 1460	รอบต่อนาที
	=	876	รอบต่อนาที
กำลังไฟฟ้าหลังปรับปรุง (kW_2)	=	7.37 x (60 / 100) ³	กิโลวัตต์
	=	1.59	กิโลวัตต์
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้	=	(7.37-1.59) x 22 ชม./วัน x 300วัน/ปี	
	=	38,148	kWh/ปี

สำหรับมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเสีย

ความเร็วรอบหลังปรับปรุง (N_2)	=	(60 / 100) x 1460	รอบต่อนาที
	=	876	รอบต่อนาที
กำลังไฟฟ้าหลังปรับปรุง (kW_2)	=	41.86 x (60 / 100) ³	กิโลวัตต์
	=	9.04	กิโลวัตต์
พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้	=	(41.86 - 9.04) x 22 ชม./วัน x 300 วัน/ปี	
	=	216,612	kWh/ปี

ตารางที่ 6.12-1 ผลการปรับปรุงติดตั้งอินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์

ชื่ออุปกรณ์ มอเตอร์	กำลังไฟฟ้า (kW)			การใช้งาน(%)		การใช้งาน (ชม./ปี)	กำลังไฟฟ้า ลดลง (kW)
	ฟลักซ์	หรีวาล์ว	ใช้ VSD	เปิดวาล์ว	หรีวาล์ว		
1.สูบกาก No.1	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
2.สูบกาก No.2	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
3.สูบกาก No.3	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
4.สูบกาก No.4	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
5.สูบกาก No.5	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
6.สูบกาก No.6	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
7.สูบกาก No.7	11	7.37	1.59	100	60	6,600	5.78
8.สูบน้ำเสีย	55	41.86	9.04	100	60	6,600	32.82
รวม	132	93.46	20.19	-	-	-	73.27

พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้รวม = $(38,148 \times 7) + 216,612$
 = **483,648** kWh/ปี
 คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ = $483,648 \times 2.70$
 = **1,305,850** บาท/ปี

7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

เงินลงทุน = **699,880** บาท
 ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า = **1,305,850** บาท/ปี
 ระยะเวลาคืนทุน = $699,880 / 1,305,850$
 = **0.54** ปี

กรณีศึกษาที่ 6: การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดเครื่องสูบน้ำ
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน
สถานประกอบการติดตั้งเครื่องสูบน้ำระบายความร้อนให้หอกลั่นสุราโดยสูบน้ำจากหอผึ่งน้ำส่งไปยังหอกลั่นสุราแล้วไหลเวียนกลับมาระบายความร้อนด้วยอากาศที่หอผึ่งน้ำ เครื่องสูบน้ำที่ใช้เป็นแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขนาดพิกัด 55 kW พิกัดอัตราการไหล 300 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ที่เสด 40 เมตรน้ำ และรอบมอเตอร์ 2,900 รอบต่อนาที ใช้งาน 24 ชั่วโมงต่อวัน 365 วันต่อปี โดยเครื่องสูบน้ำมีอัตราการไหลที่มากเกินไปเกินความต้องการจึงทำการลดอัตราการไหลด้วยการหริ่วาล์ว
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง
การหริ่วาล์วเพื่อลดอัตราการไหลนั้นส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ไ้ลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการเพิ่มความดันให้กับเครื่องสูบน้ำ
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน
การลดขนาดใบพัดเครื่องสูบน้ำเป็นการลดอัตราการไหลของน้ำวิธีหนึ่งที่ส่งผลให้ลดกำลังไฟฟ้าได้มากแต่ควรตรวจสอบความดันในการสูบส่งน้ำให้แน่ใจว่าไม่ต่ำกว่าที่ต้องการและต้องแน่ใจว่าจะไม่มีการปรับเพิ่มอัตราการไหลของน้ำ โดยทำการตรวจวัด กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ก่อนและหลังการลดขนาดใบพัด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาพลังงานไฟฟ้าที่ลดลง รวมทั้งทำการตรวจสอบคุณลักษณะของเครื่องสูบน้ำจากผู้ผลิตเพื่อดูว่าควรลดขนาดลงเท่าใดถึงจะได้อัตราการไหลและความดันตามต้องการ
4. สภาพก่อนปรับปรุง
เครื่องสูบน้ำใช้กระแสไฟฟ้า 80 Amp แรงดัน ไฟฟ้า 380 Volts และตัวประกอบกำลัง (PF) 0.85 คิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ 44.8 kW ใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ) 19.8 ซม รูปที่ 6.12-11 แสดงใบพัดเครื่องสูบน้ำขนาด 19.8 ซม ก่อนปรับปรุง
5.สภาพหลังปรับปรุง
เครื่องสูบน้ำใช้กระแสไฟฟ้า 66 Amp แรงดันไฟฟ้า 380 Volts และตัวประกอบกำลัง (PF) 0.85 คิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ 36.9 kW ใบพัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ) 18.5 ซม



รูปที่ 6.12-12 แสดงใบพัดเครื่องสูบน้ำขนาด 18.5 ซม หลังปรับปรุง

6.การวิเคราะห์ทางเทคนิค

I_{p1} คือ กระแสไฟฟ้ามอเตอร์เครื่องสูบน้ำเทอร์ไบน์ ก่อนปรับปรุง = 80.0 Amp.

I_{p2} คือ กระแสไฟฟ้ามอเตอร์เครื่องสูบน้ำเทอร์ไบน์ หลังปรับปรุง = 66.0 Amp.

V คือ แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเทอร์ไบน์ ที่ใช้งาน = 380 Volts.

PF คือ เพาเวอร์แฟกเตอร์ของมอเตอร์เครื่องสูบน้ำเทอร์ไบน์ ที่ใช้งาน = 0.85

h คือ จำนวนชั่วโมงทำงาน = 24 ชั่วโมงต่อวัน

d คือ จำนวนวันทำงานต่อปี = 365 วันต่อปี

พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง = (กำลังไฟฟ้าก่อนปรับปรุง – กำลังไฟฟ้าหลังปรับปรุง) x h x d

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าก่อนปรับปรุง} &= \frac{\sqrt{3} \times V \times I_{p1} \times PF}{1000} \\ &= \frac{\sqrt{3} \times 380 \times 80 \times 0.85}{1000} \\ &= 44.8 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าหลังปรับปรุง} &= \frac{\sqrt{3} \times V \times I_{p2} \times PF}{1000} \\ &= \frac{\sqrt{3} \times 380 \times 60 \times 0.85}{1000} \\ &= 36.9 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง} &= (44.8 - 36.9) \times 24 \times 365 \\ &= 49,204 \quad \text{kWh/ปี} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้} &= 49,204 \times 2.77 \\ &= 191,695 \quad \text{บาท/ปี} \end{aligned}$$

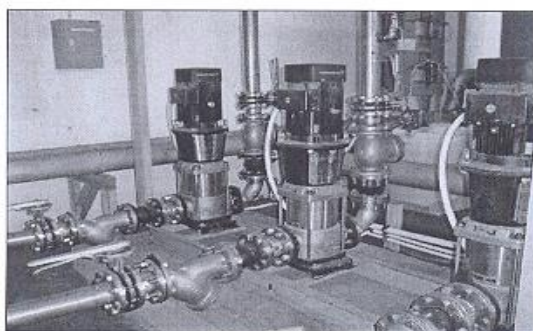
7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

เงินลงทุน	=	ดำเนินการเอง	บาท
ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า	=	191,695	บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	-	ปี

กรณีศึกษาที่ 7: การติดตั้งระบบ VSD ให้เครื่องสูบน้ำร้อนและเครื่องสูบน้ำ RO

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการติดตั้งเครื่องสูบน้ำร้อนขนาดพิกัด 7.5 kW จำนวน 3 ตัว โดยเปิดใช้งานพร้อมกันทั้ง 3 ตัว ทำงาน 24 ชม./วัน 300 วัน/ปี น้ำร้อนที่ได้นำไปผสมกับน้ำนม และใช้ในกระบวนการล้างทำความสะอาดเครื่องผสม ซึ่งมีความต้องการใช้น้ำร้อนไม่คงที่ และติดตั้งเครื่องสูบน้ำ RO ขนาดพิกัด 5.5 kW จำนวน 2 ตัว โดยเปิดใช้งานพร้อมกันทั้ง 2 ตัว ทำงาน 24 ชม./วัน 300 วัน/ปี น้ำ RO ที่ได้นำไปผสมกับน้ำนม ซึ่งมีความต้องการใช้น้ำ RO ไม่คงที่



รูปที่ 6.12-13 แสดงเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการส่งจ่ายระบบน้ำร้อนให้กับเครื่องจักรในกระบวนการผลิต



รูปที่ 6.12-14 แสดงเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการส่งจ่ายระบบน้ำ RO ให้กับเครื่องจักรในกระบวนการผลิต

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

กระบวนการผลิตมีความต้องการใช้น้ำร้อนและน้ำ RO ในปริมาณที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งเดิมทำการควบคุมโดยการเปิด-ปิด เมื่อความดันได้ตามต้องการ

3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ในกรณีที่อัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในการใช้ VSD ลมรอบมอเตอร์ในขณะที่ต้องการอัตราการไหลต่ำจะส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องสูบน้ำได้ โดยทำการตรวจวัดและบันทึกพลังงานไฟฟ้าที่ใช้และอัตราการไหลของน้ำ ก่อนและหลังการติดตั้ง VSD เป็นเวลา 7 วัน เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงาน

4. สภาพก่อนปรับปรุง

ตรวจวัดและบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าและอัตราการไหลเป็นเวลา 7 วัน สรุปได้ดังนี้ เครื่องสูบน้ำอ่อนใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 680.14 kWh/day อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ย 2,165.86 m³/day มีดัชนีการใช้พลังงาน 0.314 kWh/m³ และเครื่องสูบน้ำ RO ใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 82.00 kWh/day อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ย 160.78 m³/day มีดัชนีการใช้พลังงาน 0.51 kWh/m³

ตารางที่ 6.12-2 รายละเอียดผลการบันทึกการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าและมิเตอร์ปั้มน้ำอ่อน

Date	ไฟฟ้าที่ใช้ kWh/day	ปริมาณน้ำอ่อน m ³ /day	kWh/m ³
24/4/2006	650	2,177	0.299
25/4/2006	668	2,261	0.295
26/4/2006	717	2,416	0.297
27/4/2006	714	2,135	0.334
28/4/2006	774	2,219	0.349
29/4/2006	553	2,151	0.257
30/4/2006	685	1,802	0.380
ค่าเฉลี่ย	680.14	2,165.86	0.314

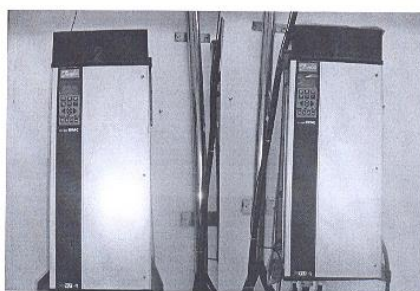
ตารางที่ 6.12-3 แสดงรายละเอียดผลการบันทึกการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าและมิเตอร์เครื่องสูบน้ำ RO

Date	ไฟฟ้าที่ใช้ kWh/day	ปริมาณน้ำอ่อน m ³ /day	kWh/m ³
24/4/2006	82	169	0.485
25/4/2006	83	164	0.508
26/4/2006	90	199	0.452
27/4/2006	78	151	0.516
28/4/2006	81	205	0.395
29/4/2006	79	102	0.775
30/4/2006	81	136	0.696
ค่าเฉลี่ย	82.00	160.78	0.510

5.สภาพหลังปรับปรุง

ระบบน้ำอ่อนทำการติดตั้ง VSD 1 ชุด ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำ 2 ตัว โดยมี Pressure Transmitter ตรวจจับแรงดันน้ำ และส่งสัญญาณ 4-20 mA มาที่ VSD เพื่อให้มีการควบคุมเครื่องสูบน้ำได้ตามความต้องการของโหลด ส่วนเครื่องสูบน้ำอีกตัวจะเปิดใช้งานเต็มพิกัดของเครื่องสูบน้ำ ทำการตรวจวัดและบันทึกค่าได้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 188.29 kWh/day อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ย 2,026.46 m³/day มีดัชนีการใช้พลังงาน 0.093 kWh/m³

ระบบน้ำ RO ปรับปรุงโดยติดตั้ง VSD 1 ตัว ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำ 2 ตัว โดยมี Pressure Transmitter ตรวจจับแรงดันน้ำ และส่งสัญญาณ 4-20 mA มาที่ VSD เพื่อให้มีการควบคุมเครื่องสูบน้ำให้จ่ายน้ำได้ตามความต้องการของโหลด ทำการตรวจวัดและบันทึกค่าได้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 30.28 kWh/day อัตราการไหลของน้ำเฉลี่ย 181.26 m³/day มีดัชนีการใช้พลังงาน 0.167 kWh/m³



รูปที่ 6.12-15 แสดงการติดตั้ง VSD ควบคุมระบบเครื่องสูบน้ำอ่อนและเครื่องสูบน้ำ RO

ตารางที่ 6.12-4 แสดงรายละเอียดผลการบันทึกการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าและมิเตอร์เครื่องสูบน้ำอ่อน

Date	ไฟฟ้าที่ใช้ kWh/day	ปริมาณน้ำอ่อน m ³ /day	kWh/m ³
28/8/2006	152	2,110	0.072
29/8/2006	192	2,251	0.085
30/8/2006	271	2,277	0.119
31/8/2006	150	2,163	0.069
1/8/2006	210	2,292	0.092
2/8/2006	181	2,109	0.086
3/8/2006	162	984	0.165
ค่าเฉลี่ย	188.29	2,026.46	0.093

ตารางที่ 6.12-5 แสดงรายละเอียดผลการบันทึกการใช้พลังงานจากมิเตอร์ไฟฟ้าและมิเตอร์เครื่องสูบน้ำ RO

Date	ไฟฟ้าที่ใช้ kWh/day	ปริมาณน้ำอ่อน m ³ /day	kWh/m ³
14/8/2006	30	116	0.259
15/8/2006	31	160	0.194
16/8/2006	31	234	0.132
17/8/2006	30	203	0.148
18/8/2006	33	226	0.146
19/8/2006	28	192	0.146
20/8/2006	29	138	0.210
ค่าเฉลี่ย	30.28	181.26	0.167

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

มาตรการติดตั้งระบบ VSD ให้เครื่องสูบน้ำอ่อน

ปริมาณน้ำที่ใช้เฉลี่ยก่อนการปรับปรุง 1,955 m³/วัน ระบบทำงาน 300 วันต่อปี

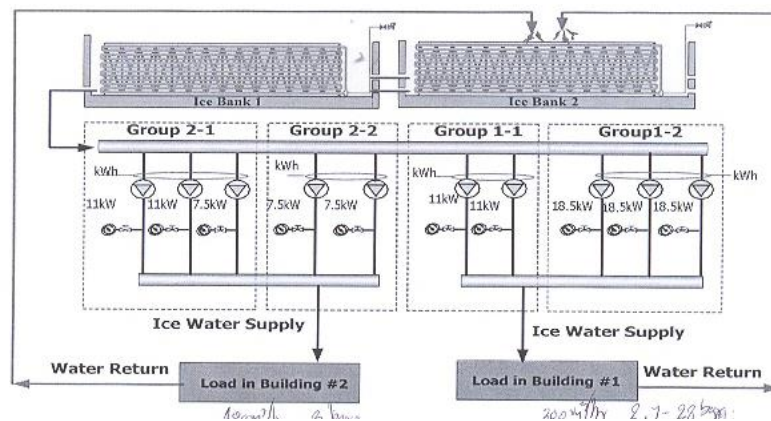
ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า = (kWh/m³_{PRE} - kWh/m³_{POST}) x ปริมาณน้ำเฉลี่ยต่อวัน x
วันทำงานทั้งปี

= (0.314 - 0.093) x 1,955 x 300

= 129,684.34 kWh/ปี

เงินที่ประหยัดได้	=	ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า x ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย
	=	129,684.34 x 2.74
	=	355,335.10 บาท/ปี
มาตรการติดตั้งระบบ VSD ให้เครื่องสูบน้ำ RO		
ปริมาณน้ำที่ใช้เฉลี่ยก่อนการปรับปรุง 158 m ³ /วัน ระบบทำงาน 300 วันต่อปี		
ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า	=	(kWh/m ³ _{PRE} - kWh/m ³ _{POST}) x ปริมาณน้ำเฉลี่ยต่อวัน x วันทำงานทั้งปี
	=	(0.510 - 0.167) x 158 x 300
	=	16,240.98 kWh/ปี
เงินที่ประหยัดได้	=	ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า x ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย
	=	16,240.98 x 2.74
	=	44,500.30 บาท/ปี
7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน		
มาตรการติดตั้งระบบ VSD ให้เครื่องสูบน้ำอ่อน		
เงินลงทุน	=	69,051 บาท
ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า	=	355,335.10 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	69,051/355,335.10
	=	0.19 ปี
มาตรการติดตั้งระบบ VSD ให้เครื่องสูบน้ำ RO		
เงินลงทุน	=	62,559 บาท
ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า	=	44,500.30 บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน	=	62,559/44,500.30
	=	1.41 ปี

กรณีศึกษาที่ 8: การติดตั้งระบบ Step Control ควบคุมเครื่องสูบน้ำเย็นที่ส่งให้เครื่องจักรในกระบวนการผลิต														
1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน														
สถานประกอบการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเย็นเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต 2 วงจร โดยวงจรที่ 1 ใช้ในกระบวนการผลิตสำหรับอาคาร 1 มีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเย็นจำนวน 5 ชุด ขนาดพิกัด 11 kW จำนวน 2 ชุดและขนาดพิกัด 7.5 kW จำนวน 3 ชุด ส่วนวงจรที่ 2 ใช้ในการปรับอากาศและกระบวนการผลิต สำหรับอาคาร 2 มีการติดตั้งเครื่องสูบน้ำเย็นจำนวน 5 ชุด ขนาดพิกัด 11 kW จำนวน 2 ชุดและขนาดพิกัด 18.5 kW จำนวน 3 ชุด โดยเครื่องสูบน้ำทั้งสองวงจรมีการควบคุมการเปิดใช้งานในจำนวนที่เหมาะสมกับปริมาณการใช้น้ำที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาโดยเจ้าหน้าที่														
2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง														
การควบคุมการเปิด/ปิด เครื่องสูบน้ำในจำนวนที่เหมาะสมกับการใช้งานที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาโดยใช้คนนั้นมีความเที่ยงตรงต่ำ ซึ่งในบางครั้งมีการเดินเครื่องสูบน้ำทั้งหมดเพื่อรองรับโหลดไว้ตลอดเวลาทำให้ต้องสูญเสียพลังงานไฟฟ้า														
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน														
เพื่อให้เกิดความเที่ยงตรงในการเดินจำนวนเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมกับความต้องการใช้น้ำเย็นของกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาจึงทำการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการเปิด/ปิด เครื่องสูบน้ำอัตโนมัติ Step Control โดยใช้สัญญาณความดันน้ำที่ส่งไปใช้งานมาควบคุมจำนวนการเดินเครื่องสูบน้ำให้เหมาะสมตลอดเวลา โดยทำการบันทึกข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า ก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานและอัตราผลตอบแทนการลงทุน														
4. สภาพก่อนปรับปรุง														
ก่อนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการเปิด/ปิด เครื่องสูบน้ำเย็นมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 1,318.13 kWh/วัน และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 54.92 kW ตารางที่ 6.12-6 ผลการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้หมดของเครื่องสูบน้ำเย็นก่อนปรับปรุง <table border="1"> <thead> <tr> <th>วัน/เดือน/ปี</th><th>พลังงานไฟฟ้า (kWh/day)</th><th>กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (kW)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10/2/2006</td><td>1,613.57</td><td>67.23</td></tr> <tr> <td>11/2/2006</td><td>1,022.68</td><td>42.61</td></tr> <tr> <td>เฉลี่ย</td><td>1,318.13</td><td>54.92</td></tr> </tbody> </table>			วัน/เดือน/ปี	พลังงานไฟฟ้า (kWh/day)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (kW)	10/2/2006	1,613.57	67.23	11/2/2006	1,022.68	42.61	เฉลี่ย	1,318.13	54.92
วัน/เดือน/ปี	พลังงานไฟฟ้า (kWh/day)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (kW)												
10/2/2006	1,613.57	67.23												
11/2/2006	1,022.68	42.61												
เฉลี่ย	1,318.13	54.92												



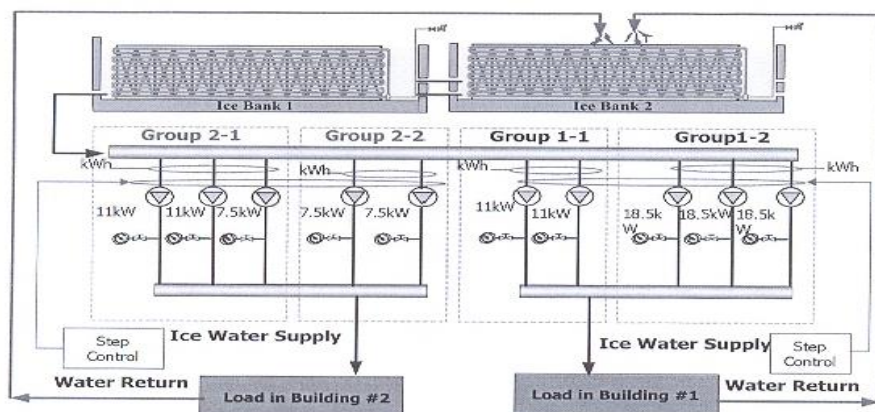
รูปที่ 6.12-16 การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าก่อนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

5.สภาพหลังปรับปรุง

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการเปิด/ปิดเครื่องสูบน้ำเย็นอัตโนมัติ Step Control เครื่องสูบน้ำเย็น มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 1,234.18 kWh/วัน และกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 51.42 kW

ตารางที่ 6.12-7 ผลการตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้หมดของเครื่องสูบน้ำเย็นก่อนปรับปรุง

วัน/เดือน/ปี	พลังงานไฟฟ้า (kWh/day)	กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย (kW)
4/3/2006	1,456.51	60.69
5/3/2006	1,011.85	42.16
เฉลี่ย	1,234.18	51.42



รูปที่ 6.12-17 แสดงการตรวจวัดหลังการปรับปรุงเครื่องจ่ายน้ำให้กับเครื่องจักรในกระบวนการผลิต

6. การวิเคราะห์ทางเทคนิค				
ระบบทำงาน 300 วันต่อปี				
ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า	=	$(\text{kWh/day}_{\text{PRE}} - \text{kWh/day}_{\text{POST}}) \times \text{วันทำงานทั้งปี}$		
	=	$(1,318.13 - 1,234.18) \times 300$		
	=	25,184.39	kWh/ปี	
เงินที่ประหยัดได้	=	ผลประหยัดพลังงานไฟฟ้า x ค่าไฟฟ้าเฉลี่ย		
	=	$25,184.39 \times 2.74$		
	=	69,005.24	บาท/ปี	
7. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน				
เงินลงทุน	=	400,000	บาท	
ประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้า	=	69,005.24	บาท/ปี	
ระยะเวลาคืนทุน	=	$400,000 / 69,005.24$		
	=	5.80	ปี	

กรณีศึกษาที่ 9 : การปิดหორะบายความร้อนและเครื่องสูบน้ำที่ใช้ระบายความร้อนเครื่องจักรช่วงพักกลางวัน

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ท่อไอเสียรถยนต์ ในช่วงเวลาพัก (ดังตาราง) พนักงานไม่ได้ทำงาน และเครื่องจักรหยุดทำงาน แต่มอเตอร์หอรบายความร้อนขนาด 55 kW จำนวน 1 ตัว ซึ่งระบายความร้อนให้กับเครื่องจักรในไลน์ Assembly และมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในหอรบายความร้อนขนาด 11 kW จำนวน 4 ตัว ยังทำงานอยู่

ลำดับ	เวลาพัก	จำนวนชั่วโมง
1	24:00 - 01:00	1
2	12:00 - 13:00	1
3	17:00 - 17:30	0.5
4	19:00 - 20:00	1
รวม		3.5

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

เนื่องจากเครื่องจักรไม่ได้มีการทำงานในช่วงพักเวลากลางวันและกลางคืน จึงไม่จำเป็นต้องเปิดมอเตอร์หอรบายความร้อน และมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในหอรบายความร้อน เพื่อระบายความร้อนให้กับน้ำหล่อเย็นเครื่องจักร



รูปที่ 6.11-18 มอเตอร์หอรบายความร้อน



รูปที่ 6.11-19 มอเตอร์เครื่องสูบน้ำ

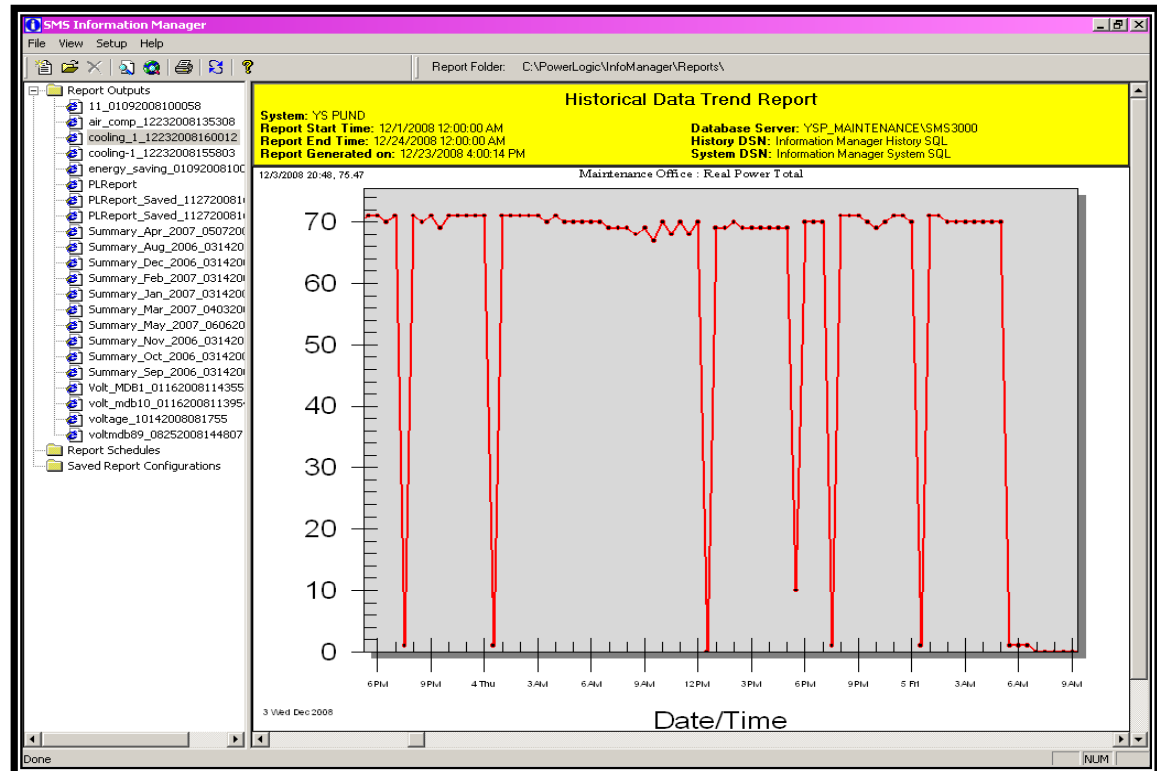
3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

ให้โรงงานอ่านค่าพลังไฟฟ้าในช่วงเวลาพักจากเครื่องบันทึกการใช้พลังงานที่โรงงานมีอยู่ จากนั้นให้โรงงานกำหนดเวลาการเปิด-ปิดมอเตอร์หอผึ่งเย็น และมอเตอร์เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในหอผึ่งเย็น แล้วติดประกาศให้พนักงานที่เกี่ยวข้องรับทราบ

4. สภาพหลังปรับปรุง

พนักงานได้ปิดมอเตอร์หอฟั้เย็นและเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในหอฟั้เย็น จะทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 70.5 kW

หมายเหตุ โรงงานมีการบันทึกค่าพลังงานของมอเตอร์หอฟั้เย็น และเครื่องสูบน้ำที่ใช้ในหอฟั้เย็นแบบต่อเนื่อง (Real Time) แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 6.11-20 หลังปรับปรุง

5. การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัด	=	พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ x ชั่วโมงการปิดต่อวัน x วันทำงานต่อปี
	=	70.5 x 3.5 x 250 kWh/ปี
	=	61,687.50 kWh/ปี
จำนวนเงินที่ประหยัด	=	61,687.50 x 2.88 บาท/ปี
	=	177,660 บาท/ปี

กรณีศึกษาที่ 10 : การเลือกเดินปั้มน้ำชุดที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นหลัก

1. ความเป็นมาและลักษณะการใช้งาน

สถานประกอบการมีการติดตั้งใช้งานปั้มน้ำและมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าในบ่อเติมอากาศ จำนวน 11 ชุด และปั้มน้ำปรับ PH น้ำ จำนวน 3 ชุด มีการเดินใช้งานเฉลี่ยประมาณ 20 ชั่วโมงต่อวัน 300 วันต่อปี ปกติจะมีการสลับการเดินใช้งาน

2. ปัญหาของอุปกรณ์/ระบบก่อนปรับปรุง

จากการตรวจวัดมอเตอร์ไฟฟ้าในบ่อเติมอากาศและปั้มน้ำปรับ pH พบว่าพลังไฟฟ้าที่ใช้ของมอเตอร์แต่ละชุดที่มีขนาดติดตั้งเท่ากันเมื่อวัดพลังไฟฟ้าที่ใช้งานจริงมีความแตกต่างกัน ซึ่งโดยปกติมอเตอร์ไฟฟ้ามีการสลับการเดินใช้งานเพื่อลดภาระการทำงาน และบางส่วนมีการปิดการใช้งานในบางช่วงเวลา และการใช้พลังไฟฟ้าในมอเตอร์และปั้มน้ำมีรายละเอียดดังนี้

บ่อเติมอากาศ

เลขเครื่อง	พิกัด (kW)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	PF	พลังไฟฟ้า (kW)
No.4	15	372	22.6	0.87	12.67
No.5	15	379	21.9	0.86	12.36
No.6	7.46	378	16.4	0.86	9.23
No.7	7.46	378	14.2	0.88	8.18
No.8	7.46	381	14.7	0.86	8.34
No.9	7.46	384	14.4	0.85	8.14
No.10	7.46	383	14.9	0.85	8.40
No.11	3.73	381	7.3	0.86	4.14
No.12	3.73	378	8.47	0.86	4.77
No.13	3.73	376	8.54	0.87	4.84
No.14	3.73	383	7.08	0.84	3.95

ปรับ pH

No.1	-	378	13.3	0.76	6.62
No.2	-	379	11.6	0.67	5.10
No.3	-	379	13.9	0.64	5.84



3. แนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงาน

เลือกเดินชุดที่ใช้พลังไฟฟ้าต่ำสุดเป็นหลัก แทนการเดินสลับไปมา

4. การวิเคราะห์ทางเทคนิค

ปั้มน้ำและมอเตอร์บ่อบำบัดเดินใช้งานคิดเป็น	=	20	hour/day
จำนวนวันใช้งานใน 1 ปี	=	350	day/year
	=	20x 350	
	=	7,000	hour/year
ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย	=	3.28	Baht/kWh
พลังไฟฟ้าปั้มน้ำและมอเตอร์บ่อบำบัดก่อนจัดการเดินเฉลี่ย	=	8.46 + 4.42 + 5.85	
	=	18.73	kW
พลังไฟฟ้าปั้มน้ำและมอเตอร์บ่อบำบัดหลังจัดการเดินเฉลี่ย	=	8.27 + 4.04 + 5.10	
	=	17.41	kW
พลังไฟฟ้าของระบบที่ลดลง	=	18.73 - 17.41	
	=	1.32	kW
พลังงานไฟฟ้าลดลงหลังปรับปรุง	=	1.32 x 7,000	
	=	9,240.00	kWh/year
ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ลดลง	=	9,240.00 x 3.28	
	=	30,307.20	Baht/year

สรุปเนื้อหาวิชา

1. ประเภทของปั๊ม (ตามลักษณะการขับเคลื่อนของเหลวในปั๊ม) 1.1 ปั๊มแบบปริมาตรแทนที่เชิงบวก (Positive Displacement) เป็นปั๊มที่ต้องการความดันสูง อัตราการไหลไม่มากนัก ได้แก่ ปั๊มแบบลูกสูบ และ ปั๊มแบบโรตารี 1.2 ปั๊มแบบไคเนติกส์ (Kinetic or Non- Positive Displacement) เป็นปั๊มที่ต้องการอัตราการไหลสูง แต่ความดันไม่มากนัก ● ปั๊มแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal Pump) อาศัยการหมุนของใบพัดให้เกิดแรงเหวี่ยงของน้ำผ่านใบพัดส่งออกไปทางท่อจ่าย โดยน้ำจะไหลเข้าในแนวตั้งฉากกับใบพัดของปั๊ม และน้ำไหลออกจากใบพัดตามแนวรัศมีของใบพัด ● ปั๊มแบบไหลตามแนวแกน (Axial Flow Pump) ปั๊มน้ำแบบนี้ของไหลจะไหลในแนวแกนของเพลาชับ สามารถใช้ได้กับของไหลที่มีสารแขวนลอยปะปนมาด้วย ส่วนใหญ่แล้วจะใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งต้องการเสถียรความดันต่ำ ๆ แต่มีอัตราการไหลสูง ● ปั๊มแบบไหลผสม (Mixed Flow Pump) ปั๊มน้ำแบบนี้จะทำให้ของไหลมีการไหล ทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมีของใบพัด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงในแนวรัศมีและแรงในแนวแกนขึ้น ซึ่งจะช่วยในการขับเคลื่อนของไหล นิยมใช้กับงาน ซึ่งต้องการเสถียรความดันต่ำ ๆ แต่มีอัตราการไหลสูง 1.3 ปั๊มแบบพิเศษ (Special Pump) เป็นปั๊มที่มีการออกแบบใช้งานในลักษณะพิเศษต่างๆ
2. เสถียรสูญเสียของน้ำในท่อ (Head Loss) แบ่งได้ออกเป็น 2 ส่วน ● การเสถียรเสถียรความเสถียร (Major Loss, H_L) ● การเสถียรเสถียรเนื่องจากของไหลผ่านอุปกรณ์ (Minor Loss, H_{Le})
3. เสถียรของระบบ (System Head Curve) เสถียรของระบบ (TDH) = เสถียรความดัน + เสถียรเสถียร + เสถียรการเสถียรเสถียร
4. กำลังไฮดรอลิก $P_H = \frac{\gamma \times Q \times TDH}{1000}$ γ = น้ำหนักจำเพาะของเหลว (N/m^3) [$\gamma = \rho \times g$] Q = อัตราการสูบของปั๊ม (m^3/s) TDH = เสถียรรวมของปั๊มหรือ Total Dynamic Head (m)
5. ประสิทธิภาพของระบบปั๊มหรือพัดลม $\eta_{system} = \frac{P_{out}}{E \times I} \times 100\% = \eta_{\text{ต้น}} \times \eta_{\text{ส่ง}} \times \eta_{\text{pump/fan}}$

6. กฎความคล้ายของปั๊มหรือพัดลม (เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดมีขนาดคงที่)
$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{rpm_1}{rpm_2} \qquad \frac{TDH_1}{TDH_2} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2} \right)^2 \qquad \frac{bhp_1}{bhp_2} = \left(\frac{rpm_1}{rpm_2} \right)^3$ สมการทั้งสาม ใช้ได้กับปั๊มแบบ Centrifugal ทุกประเภท และใช้ได้กับพัดลมทุกประเภท
7. แนวทางการอนุรักษ์พลังงานในระบบปั๊ม
- การลดอัตราการไหล - อัตราการไหลคงที่ - เปลี่ยนขนาดใบพัด - อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง - หริวาล์ว - ปรับความเร็วรอบของปั๊ม - การบำรุงรักษา - การดัดแปลงอุปกรณ์
8. เงื่อนไขการใช้ปั๊มน้ำที่ปรับความเร็วรอบเพื่อให้เกิดการประหยัดมากที่สุด
- ถ้าปั๊มน้ำเดินเครื่องด้วยอัตราการไหลที่น้อยกว่า 100% อยู่เสมอ แสดงว่าปั๊มน้ำมีขนาดใหญ่เกินไป - ดังนั้น การเลือกเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กลงหรือปรับแต่งใบพัดให้มีขนาดเล็กลงอาจจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าการใช้ VSD โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีความต้องการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก
9. การบำรุงรักษาที่ช่วยส่งเสริมการประหยัด
- การทำความสะอาดตัวกรองที่บริเวณท่อทางเข้าของปั๊มอย่างสม่ำเสมอ - การตรวจสอบวาล์วกันการไหลย้อนกลับ (Check Valve) อย่างสม่ำเสมอ - การซ่อมแซมรอยรั่วต่างๆ
10. การดัดแปลงแก้ไขอุปกรณ์หรือการเดินเครื่อง
- การเคลือบผิวภายใน - การเปลี่ยนขนาดของใบพัด - การใช้ปั๊มน้ำที่มีขนาดเล็กลง - การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง
11. การใช้ปั๊มน้ำที่มีขนาดเล็กลงจะคุ้มค่า ถ้า
- ปั๊มน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าภาระสูงสุดของปั๊มน้ำมาก - ปั๊มน้ำมีประสิทธิภาพน้อยกว่า 80% ณ ระดับของภาระโหลดสูงสุด - มีการใช้พลังงานสูง นั่นคือ เมื่อปั๊มน้ำขนาดใหญ่เดินเครื่องเป็นระยะเวลานาน

เอกสารอ้างอิง
[1] Michael Volk, P.E., “Pump Characteristics and Applications”, Taylor & Francis Group, 2nd edition, New York, 2005.
[2] Paul N. Garay, “Pump Application Desk Book”, Fairmont Press, 3rd edition, 1996.
[3] Frank P. Bleier, “Fan handbook : selection, application, and design”,
[4] Hydraulic Institute, www.pumps.org
[5] Food and Agriculture Organization of the United Nations, www.fao.org
[6] Lifewater Canada, www.lifewater.ca
[7] Metzger & Willard, Inc., www.metzgerwillard.com
[8] http://www.engineeringtoolbox.com (April, 2015), http://acn-industry.com (Feb, 2016)
[9] เอกสารเผยแพร่ชุด ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เรื่อง เครื่องปั้มน้ำ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เผยแพร่ โดย สำนักกำกับและอนุรักษ์พลังงาน, กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน
[10] คู่มือการเดินเครื่องจักร การตรวจวัด และการบำรุงรักษาระบบอากาศอัด, กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน
[11] ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผขพ) เล่ม 2, PREs อาวุโส ด้านไฟฟ้า, กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงาน ทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน
[12] อ.มโน สุวรรณคำ, วิศวกรรมการแปรสภาพผลผลิตเกษตร, คณะวิศวกรรมเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[13] พงศ์ศักดิ์ ชลชนสวัสดิ์, “อุปกรณ์การให้น้ำพืชสมัยใหม่” ภาควิชาเกษตรกลวิธาน, คณะเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
[14] โคคิจ โอนิชิ, “คู่มือการใช้งานปั้มนชนิดทนทานต่อการกัดกร่อน”, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), 2542.
[15] รศ.ดร.วินุช บุญยธโรกุล, “ปั้มและระบบสูบน้ำ”
[16] คู่มือฝึกอบรมการอนุรักษ์พลังงานภาคปฏิบัติด้านไฟฟ้า (Mini Plant), โครงการทดลองจัดระบบการสอบและการพัฒนา หลักสูตรฝึกอบรม PRE, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
[17] คู่มือการตรวจสอบและวิเคราะห์การใช้พลังงาน, กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน
[18] รศ.กิริติ ลีจันกุล, วิศวกรรมศาสตร์, สำนักพิมพ์ SPEC, กรุงเทพฯ, 2537
[19] ผศ.ดร.สุธรรม นิยมวาส และบัญญัติ นิยมวาส, เครื่องจักรกลของไหล, สำนักพิมพ์ วิทยพัฒน์ จำกัด, กรุงเทพฯ, 2549
[20] ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, การออกแบบระบบท่ออาคารและสิ่งแวดล้อมอาคาร, มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2537
[21] ศุภชัย ปัญญาวิวัฒน์และจตุพร สถากุลเจริญ, การลดต้นทุนการผลิตด้านพลังงาน, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ, 2549
[22] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2554), ตำราฝึกอบรมหลักสูตรการตรวจวิเคราะห์การอนุรักษ์ พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารธุรกิจ