ประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำของระบบเครื่องสูบน้ำ

Wire-to-Water Efficiency of Pumping Systems

By James B. Rishel, P.E.

แหล่งที่มา ASHRAE Journal, April 2001

แปลและเรียบเรียงโดย ธีรชัย ตันติมงคลสุข

ตรวจทานและแก้ไขโดย ดร. เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในอดีต ค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำ (Wire-to-water Efficiency : WWE) ของระบบเครื่องสูบน้ำ มักจะไม่ถูกนำมาพิจารณายกเว้นในระบบที่มีเครื่องสูบน้ำขนาดใหญ่มากๆ ซึ่งค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำของการต่อเครื่องสูบน้ำกับมอเตอร์มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบประกอบกับค่าไฟฟ้าที่สูงขึ้นรวมกับการมาของตัวขับแบบความเร็วแปรเปลี่ยน (Variable Speed Drive) และดิจิตัลอิเลคทรอนิกส์ จึงทำให้ไม่นิยมพิจารณาค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำในระบบที่มีขนาดเล็ก

WWE คืออะไร

WWE เป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับใช้พิจารณาประสิทธิภาพของระบบเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจะรวมไปถึงประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ มอเตอร์เครื่องสูบน้ำ ตัวขับแบบความเร็วแปรเปลี่ยนและในระบบที่มีเครื่องสูบน้ำหลายตัว ก็จะรวมไปถึงค่าความสูญเสียในข้อต่อข้องอของระบบท่อต่างๆ รอบ ๆ ตัวเครื่องสูบน้ำด้วย ซึ่งจะช่วยให้วิศวกรหรือผู้ปฏิบัติงานสามารถที่จะประเมินผลการติดตั้งระบบเครื่องสูบน้ำทั้งหมดได้ โดยทั่วไป *WWE* จะเป็นค่าพลังงานที่เพิ่มให้แก่น้ำต่อค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ทำงานในรูปของพลังงานไฟฟ้า หรือกล่าวโดยพื้นฐานได้ว่า ค่า *WWE* ก็คืออัตราส่วนระหว่างงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อค่าของงานที่ต้องใช้ทั้งหมด

สำหรับระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่เพียงแค่ตัวเดียว (Single Pump, Constant Speed Pumping System) จะได้ว่า

$$WWE = E_m E_p \, 100\% \qquad (1)$$

เมื่อ E_m = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ในรูปสัดส่วน

E_p = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำในรูปสัดส่วน

ทั้งนี้ค่า *WWE* อาจมีค่าแปรเปลี่ยนตั้งแต่ต่ำกว่า 20% สำหรับเครื่องสูบน้ำที่มีขนาดเล็กไปจนกระทั่งมีค่ามากกว่า 85% สำหรับเครื่องสูบน้ำและมอเตอร์ขนาดใหญ่ ดังนั้นจะมีประโยชน์มากในกรณีที่สามารถรวบรวมการทำงานที่ต้องใช้เครื่องสูบน้ำเข้ามารวมเป็นก้อนเดียวกันซึ่งจะช่วยให้มีความเป็นไปได้สูงในทางเศรษฐศาสตร์

สำหรับระบบที่มีเครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วคงที่หลายตัว (Multiple Pumps, Constant Speed Pumping System)

$$WWE = \frac{(H_s - H_{pf}) E_m E_p}{H_s} \quad (2)$$

เมื่อ H_s = ค่าความดันสูญเสียทั้งหมดของระบบ (Ft)

H_{pf} = ค่าความดันสูญเสียอันเกิดจากข้อต่อและข้องอ (Fittings), Strainers, Check Valves, Shut off Valves และ ค่าสูญเสียของ Header ที่นำการไหลเข้าและออกจากเครื่องสูบน้ำแต่ละตัว

สำหรับระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำชนิดความเร็วแปรเปลี่ยนเพียงหนึ่งตัว (Single Pump, Variable Speed Pumping System)

$$WWE = E_{ws} E_p \, 100\% \quad (3)$$

เมื่อ E_{ws} = ค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่เพลา (Wire-to-Shaft Efficiency) ของการต่อมอเตอร์ กับตัวขับแบบความเร็วแปรเปลี่ยนในรูปสัดส่วน

และสำหรับระบบที่ใช้เครื่องสูบชนิดความเร็วแปรเปลี่ยนหลายตัว (Multiple Pumps, Variable Speed Pumping System) จะได้ว่า

$$WWE = \frac{(H_s - H_{pf}) E_{ws} E_p}{H_s} \quad (4)$$

ในระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำหลายตัวจะเห็นได้ว่าเราต้องพิจารณาค่าความดันสูญเสียอันเนื่องมาจากข้อต่อต่าง ๆ, H_{pf}, ในการคำนวณหาค่า WWE ด้วย เนื่องจากว่าอัตราการไหลผ่านเครื่องสูบน้ำแต่ละตัวเป็นสัดส่วนของอัตราการไหลทั้งหมดในระบบ และเราไม่สามารถทำให้เครื่องสูบน้ำทำงานแบบปิด-เปิดโดยไม่เกิดความสูญเสีย (Loss) ที่ข้อต่อเหล่านั้นได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความดันสูญเสียที่ข้อต่อเหล่านั้นซึ่งแปรเปลี่ยนตามอัตราการไหลจะส่งผลกระทบต่อค่า WWE ด้วย แต่สำหรับระบบที่ใช้เครื่องสูบน้ำเพียงตัวเดียวนั้นจะพบว่าค่าอัตราการไหลทั้งหมดของระบบมีค่าเท่ากับอัตราการไหลผ่านเครื่องสูบน้ำอยู่แล้ว

แต่ทว่าตัวที่มีความสำคัญและซับซ้อนที่สุดสำหรับการพิจารณาค่า WWE ก็คือค่าประสิทธิภาพจากขดลวดสู่เพลาของมอเตอร์กับตัวขับแบบอัตราเร็วแปรเปลี่ยน มันไม่ได้มีความหมายเพียงว่าเป็นผลคูณระหว่างประสิทธิภาพของมอเตอร์กับประสิทธิภาพของตัวขับเท่านั้น เนื่องจากว่าค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์นั้นมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามภาระที่กระทำต่อตัวมอเตอร์ ซึ่งการหาค่าภาระที่ความเร็วลดลงจะต้องอาศัยเส้นกราฟของระบบ (System Head Curve) หรือจากพื้นที่เส้นกราฟของระบบ (System Head Area) ช่วยในการพิจารณาด้วย

ระบบสมการที่ใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำค่อนข้างจะตรงไปตรงมา ยกเว้นการหาค่า E_{ws} อย่างไรก็ตาม หากระบบนั้นได้รับการวิเคราะห์ที่ไม่เพียงพอ ก็อาจจะทำให้การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำของระบบที่ต้องการนั้นกระทำได้ลำบาก ดังจะแสดงให้ดูจากระบบน้ำเย็นแบบง่าย ดังต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างเฮด (ความดันสูญเสีย) ที่เกิดขึ้นภายในระบบกับอัตราการไหลของน้ำเย็นในระบบใด ๆ เป็นไปดังสมการ

$$H = H_d \left(\frac{Q}{Q_d}\right)^n + C_h \quad (5)$$

เมื่อ H = ค่าเฮดของระบบ (Ft)

H_d = ค่าเฮดที่ภาวะออกแบบ (Ft)

Q = อัตราการไหลของน้ำเย็นในระบบ (GPM)

Q_d = อัตราการไหลของน้ำเย็นที่ภาวะออกแบบ (GPM)

C_h = ค่าเฮดซึ่งมีค่าคงที่ เช่น ความสูงของหอผึ่งน้ำ (Ft)

n = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Coefficient) ของระบบ มักจะมีค่าเท่ากับ 2

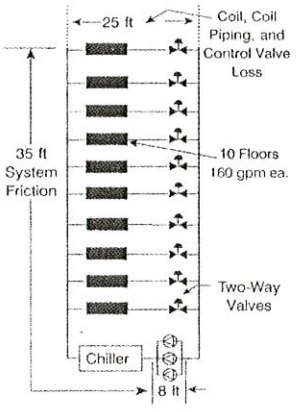
แต่ในความจริงแล้วน่าจะเป็นตัวแปรมากกว่าดังจะอธิบายต่อไป

การวิเคราะห์ระบบ

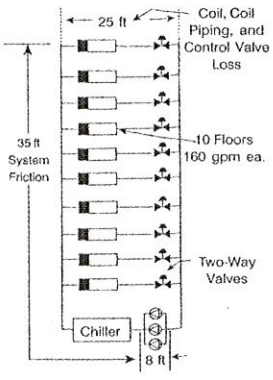
เป็นเวลานานมาแล้ว ที่มักจะสมมติให้เส้นกราฟของระบบมีค่าตัวเลขยกกำลัง, n, เท่ากับ 2 กล่าวคือเป็นการให้เฮดแปรผันกับกำลังสองของการไหล สมการความเสียดทานของ William-Hazen จะใช้ตัวเลขยกกำลังที่ 1.85 ในขณะที่สมการของ Dachy Wiesbach จะใช้ค่าตัวเลขยกกำลังที่ 1.90 ซึ่งที่กล่าวมานั้นเป็นตัวเลขที่ใช้ในกรณีที่ภาระของระบบสูบจ่ายน้ำมีค่าคงที่เท่านั้นซึ่งในความเป็นจริงแล้วมักจะเกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ตัวเลขระหว่าง 0.37 ถึง 3.7 น่าจะเป็นตัวเลขที่สะท้อนความเป็นจริงของความสัมพันธ์ระหว่างเฮดกับการไหลในทางปฏิบัติมากกว่า เมื่อภาระ

ของระบบสูบจ่ายน้ำมีการเปลี่ยนแปลงดังเช่นในระบบน้ำเย็นดังจะนำมาใช้ในกรณีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

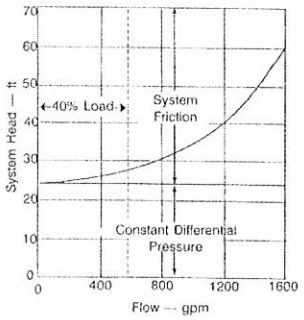
พิจารณาระบบในรูปที่ 1 สมมติว่าอาคารมีหน่วยทำความเย็น 10 ชั้น โดยแต่ละชั้นต้องการปริมาณน้ำเย็น 160 GPM (10 L/s) มีความดันตกคร่อมหน่วยทำความเย็น วาวล์ควบคุมและท่อที่ 25 ฟุต (75 kPa) และเกิดความดันลดตกครอมที่เฮดเดอร์เท่ากับ 35 Ft (105 kPa) ระบบมีเส้นกราฟของระบบ (ใช้ n = 2) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยสมมติว่าหน่วยทำความเย็นทั้ง 10 หน่วยมีการแปรผันของโหลดอย่างสม่ำเสมอเท่ากันทุกหน่วยดังแสดงในรูปที่ 3 ที่ 40% ส่วนรูปที่ 4 และ 5 แสดงภาระบางส่วนของระบบที่ 40% เช่นกันแต่ว่าการจ่ายน้ำเย็นจะไม่กระจายตัวแบบสม่ำเสมอเท่ากันทุกหน่วย จะพบว่าในกรณีของรูปที่ 4 นั้นความดันสูญเสียของระบบจะมีค่าลดลงจากระบบในรูปที่ 3 ส่วนในกรณีของรูปที่ 5 นั้นค่าความดันสูญเสียจะมีค่ามากกว่ากรณีในรูปที่ 3 โดยสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่เส้นกราฟของระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลง จากที่กล่าวมานี้จะพบว่าในความเป็นจริงซึ่งภาระการทำความเย็นไม่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอการวิเคราะห์ระบบจะมีความซับซ้อนมากขึ้นถึงแม้ว่าอาคารที่วิเคราะห์จะมีรูปแบบอาคารอย่างง่ายแล้วก็ตาม



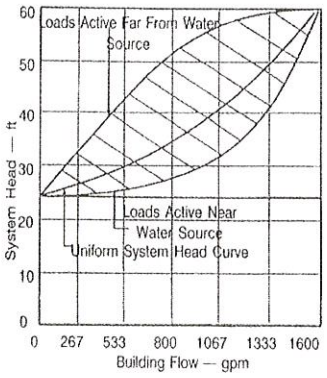
รูปที่ 1 ตัวอย่างที่ศึกษาที่เต็มภาระ



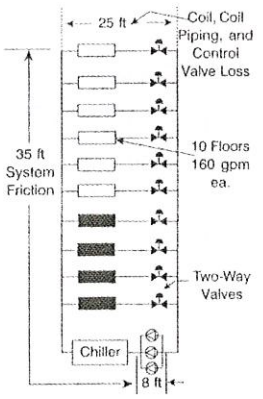
รูปที่ 2 ภาระของระบบแบบสม่ำเสมอที่ 40%



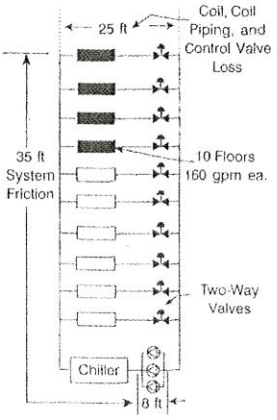
รูปที่ 3 เส้นระบบของอาคารแบบภาระสม่ำเสมอ



รูปที่ 4 กราฟพื้นที่ของระบบที่ภาระไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 5 ภาระของอาคารแบบไม่สม่ำเสมอ (วงจรสั้น)



รูปที่ 6 ภาระของอาคารแบบไม่สม่ำเสมอ (วงจรไกล)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำ

พิจารณาระบบดังแสดงในรูปที่ 1 สมมติว่าใช้เครื่องสูบน้ำเย็น 3 เครื่อง แต่ละเครื่องมีอัตราการไหล ที่ 50 % เท่ากับ 800 GPM (50 L/s) และมีเฮดของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 60 Ft (179 kPa) รวมกับความดันสูญเสียในข้อต่อทางด้านดูดและด้านจ่ายของเครื่องสูบน้ำ, Hpf , อีกตัวละ 8 Ft (24 kPa) คิดเป็นเฮดรวมเท่ากับ 68 Ft (203 kPa)

การคำนวณหาค่า WWE ของระบบจะพิจารณาที่ค่า n ของระบบเท่ากับ 0.37, 0.74, 1.11, 1.48, 1.85, 2.69 และ 3.7 ของการใช้เครื่องสูบน้ำ 1, 2 และ 3 เครื่องตามความต้องการภาระความเย็นของอาคารที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 โดยในตารางที่ 1 นั้นแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า WWE กับค่า n ของระบบ ส่วนในตารางที่ 2 แสดงถึงจำนวนเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมต่อภาวะการทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่า n ของระบบ

ตาราง 1 : แสดงค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำที่ค่าอัตราการไหลและค่า n ต่าง ๆ กัน

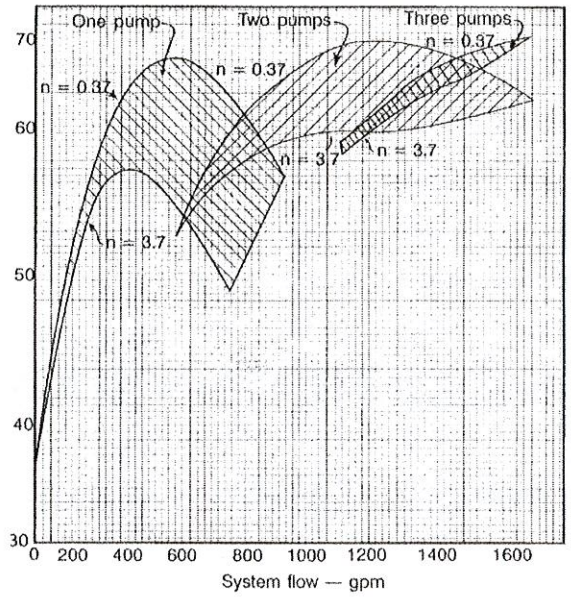
System Flow	System Head Coefficient						
(GPM)	n= 0.37	n= 0.74	n= 1.11	n= 1.48	n= 1.85	n= 2.59	n= 3.70
160	37.8	38.5	38.5	38.8	38.9	38.9	38.9
320	59.6	59.5	59.5	58.2	58.2	57.7	57.5
480	67.2	65.5	65.5	62.5	61.3	59.8	59.0
640	66.6	64.1	64.1	59.8	59.5	58.2	58.0
800	64.9	64.8	64.8	63.8	62.9	62.1	61.1
960	68.1	67.4	67.4	66.1	66.0	63.9	62.2
1,120	69.0	68.2	68.2	66.8	66.2	64.4	62.4
1,280	68.5	67.9	67.9	66.6	66.2	65.9	63.5
1,440	68.3	68.9	68.9	68.0	68.1	67.8	64.7
1,600	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	89.4	69.4

ตาราง 2 : แสดงจำนวนเครื่องสูบน้ำที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่ภาระต่าง ๆ

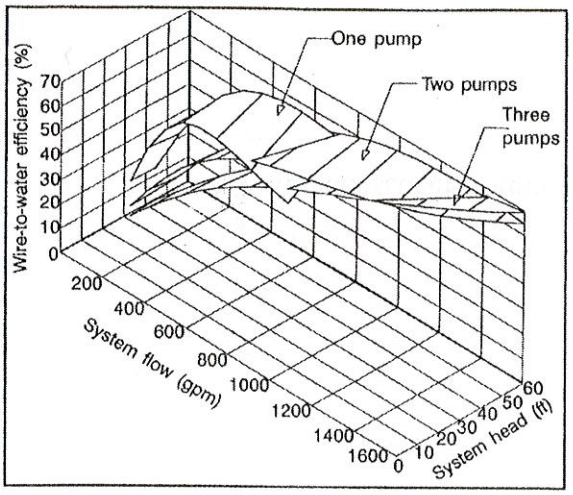
System Flow	System Head Coefficient						
(GPM)	n= 0.37	n= 0.74	n= 1.11	n= 1.48	n= 1.85	n= 2.59	n= 3.70
160	1	1	1	1	1	1	1
320	1	1	1	1	1	1	1
480	1	1	1	1	1	1	1
640	1	1	1	1	2	2	2
800	2	2	2	2	2	2	2
960	2	2	2	2	2	2	2
1,120	2	2	2	2	2	2	2
1,280	2	2	2	2	3	3	3
1,440	3	3	3	3	3	3	3
1,600	3	3	3	3	3	3	3

จากตารางที่ 2 พบว่าถึงแม้ว่าการให้เครื่องสูบน้ำทำงานเพียงแค่ 2 เครื่องก็เพียงพอที่จะให้อัตราการไหลของระบบที่ต้องการสูงสุดได้แล้ว แต่ทว่าการให้เครื่องสูบน้ำทำงาน 3 เครื่องจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้เครื่องสูบน้ำเพียงแค่ 2 เครื่องในช่วงที่มีความต้องการปริมาณน้ำเย็นตั้งแต่ 1,280 - 1,600 GPM ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของระบบ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า WWE กับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบสำหรับการใช้งานเครื่องสูบน้ำจำนวน 1, 2 และ 3 เครื่อง ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะ 2 มิติจากความสัมพันธ์แบบ 3 มิติดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล เฮด และค่า WWE ของระบบนั่นเอง



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง WWE กับปริมาณน้ำเย็นในระบบ



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์แบบ 3 มิติระหว่าง WWE ปริมาณน้ำเย็น และค่าเฮดของระบบ

บทสรุป

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ค่าประสิทธิภาพขดลวดสู่น้ำมาเป็นตัวควบคุมในการเดินเครื่องสูบน้ำในระบบจะช่วยให้วิศวกรผู้ปฏิบัติงานสามารถที่จะตัดสินใจเดินเครื่องสูบน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถึงกระนั้นก็ตาม สิ่งที่ยังเป็นอุปสรรคอยู่ก็คือระบบการคำนวณซึ่งแม้แต่ระบบอาคารแบบง่าย ๆ ดังแสดงในบทความนี้ ก็ยังมีความยุ่งยากอยู่พอสมควร ในกรณีที่เป็นระบบอาคารที่มีความซับซ้อน เช่น กลุ่มอาคารที่รับน้ำเย็นจากระบบทำความเย็นส่วนกลาง ระยะห่างของแต่ละอาคารจากสถานที่ตั้งระบบทำความเย็นส่วนกลางประกอบเข้ากับภาระการทำความเย็นที่แปรเปลี่ยนไปในแต่ละอาคารจะยิ่งทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น การนำเอาคอมพิวเตอร์มาช่วยเพื่อสร้างกราฟ 3 มิติดังแสดงในรูปที่ 8 จะช่วยให้วิศวกรสามารถหาจัดตัดของกราฟซึ่งจะเป็นจุดที่จะต้องเปลี่ยนการทำงานของเครื่องสูบน้ำจาก 1 เป็น 2 หรือจาก 2 เป็น 3 กระทำได้ง่ายขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีเครื่องสูบน้ำหลายตัว ทั้งนี้จะช่วยให้ไม่เกิดสภาวะอัตราการไหลที่สูงหรือต่ำมากเกินไปในเครื่องสูบน้ำแต่ละตัว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดเสียงดังน้อยลงและลดการสึกหรอในตัวเครื่องสูบน้ำ เครื่องสูบน้ำแต่ละตัวจะสามารถทำงาน ณ จุดที่ใกล้เคียงกับจุดการทำงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดของตัวเองได้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้กับเครื่องสูบน้ำที่สามารถแปรผันรอบการทำงานได้ โดยไม่เกิดผลกระทบเสียหายต่อโครงสร้างของตัวเครื่องสูบน้ำเลย