

บทที่ 4

ผลของการวิจัย

ต่อไปนี้จะเป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ มาใช้วิเคราะห์หาผลการใช้พลังงานกับปั๊มที่ใช้ระบบ VSD เพื่อควบคุมอัตราการไหลเพื่อประเมินหาค่าการใช้พลังงาน โดยใช้ข้อมูลจากการทดสอบจริง แล้วใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นหาผลประหยัดเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการ Affinity Law ซึ่งผลการคำนวณจะแสดงให้เห็นค่าของพลังงานที่คำนวณด้วยสมการ Affinity Law มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงดังต่อไปนี้

ค่าตัวเลขที่ปรากฏในตารางที่ 1. เป็นข้อมูลผลการวัดค่าที่ได้จากการทดสอบปั๊มที่ศูนย์ฝึกอบรมปฏิบัติการอนุรักษ์พลังงาน (Mini Plant) ตั้งอยู่ที่อาคารอนุรักษ์พลังงานเฉลิมพระเกียรติ ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี เป็นปั๊มขนาด 22-24 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ขนาดใบปั๊มมีขนาด 159 มิลลิเมตร โดยปั๊มถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยการปรับความเร็วรอบด้วยระบบ VSD โดยการปรับค่าให้กระแสไฟฟ้ามีความถี่เท่ากับ 50, 45, 40, 35 และ 30 Hz ตามลำดับสำหรับเฮดของปั๊มในแถวตั้งที่ 6 ในตารางที่ 1 หาได้จากผลต่างของความดันที่ทางออกและเข้าปั๊มในที่นี้คือข้อมูลในแถวตั้งที่ 5 และแถวตั้งที่ 4 ตามลำดับมีหน่วยเป็นเมตรตัวอย่างเช่น ปั๊มทำงานที่ความถี่ 50 Hz ที่จุด $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ เฮดของปั๊มได้จาก $(P_d - P_s)/\gamma = (370 - 2.56)/9.81 = 37.5 \text{ m}$ เป็นต้น และสำหรับค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ได้จากการคำนวณค่าตามสมการ (13) ดังที่แสดงผลการคำนวณในแถวตั้งสุดท้ายของตารางที่ 1

ถ้านำปั๊มที่ทดสอบนี้ไปใช้กับระบบท่อที่มีสมการเฮดรวมของระบบท่อ (Total System Head) มีสมการดังต่อไปนี้

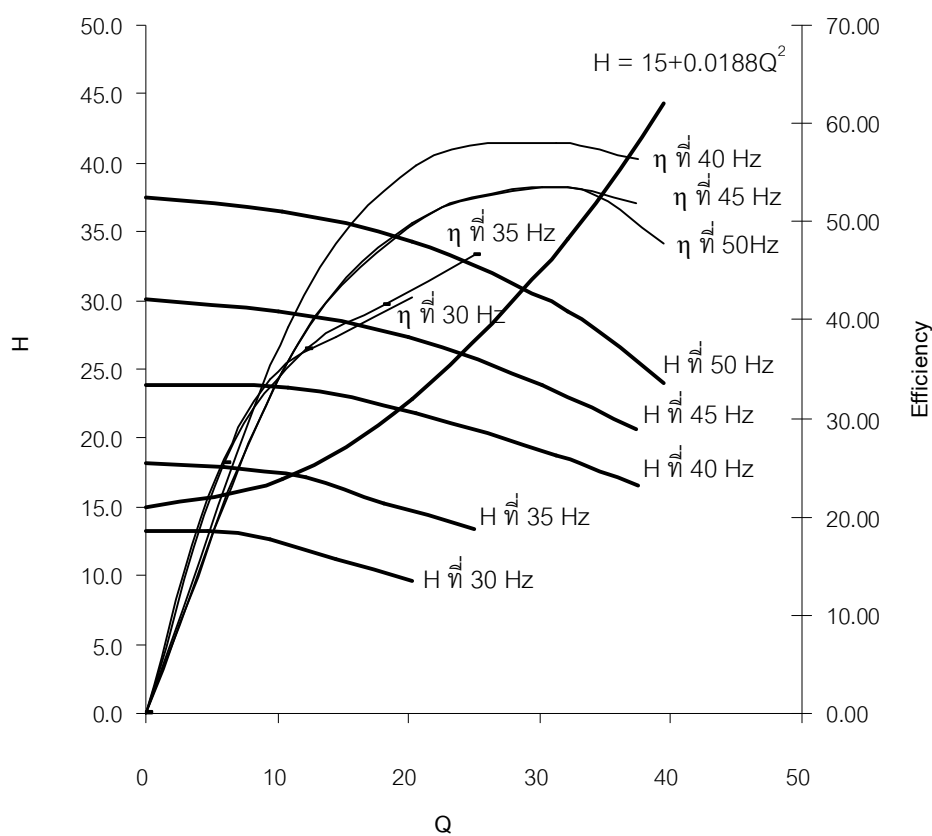
$$H_{\text{sys}} = 15 + 0.0188Q^2$$

ซึ่งจะนำไปใช้หาค่าที่จุดทำงานและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ Affinity Law และกับค่าที่คำนวณจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นดังนั้นจากข้อมูลในตารางที่ 1 และสมการระบบสามารถหาจุดทำงานที่แท้จริงของปั๊มได้จากการเขียนเส้นโค้งร่วมกันของข้อมูลทั้งสอง จุดตัดกันของเส้นโค้งเฮดของปั๊มและเส้นโค้งเฮดรวมของระบบคือจุดทำงานของปั๊ม ซึ่งแสดงในรูปที่ 9 และในตารางที่ 2

ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาจุดทำงานของปั๊มที่ความเร็วรอบต่างๆด้วยสมการ Affinity Law สมการ (10) และ (11) ดังนั้นจึงคำนวณค่าเฮดที่จุดทำงานอื่นๆได้ดังที่ปรากฏในตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของปั๊ม

Frequency	Paddle flow Q m ³ /h	Electric Power P kW	Suction Pressure P _s kPa	Discharge Pressure P _d kPa	Head Pump H m	Number of Revolution n rpm	Efficiency %
100% 50 Hz	0.0	2.26	2.56	370	37.5	2988	0.00
	10.4	2.97	2.10	360	36.5	2978	34.81
	20.3	3.81	0.41	337	34.3	2961	49.82
	32.2	4.77	-2.86	283	29.2	2933	53.60
	39.5	5.37	-5.44	229	23.9	2911	47.90
90% 45 Hz	0.0	1.8	2.78	298	30.1	2711	0.0
	10.0	2.35	2.19	289	29.3	2700	33.9
	20.0	3.01	0.55	268	27.3	2690	49.4
	30.2	3.65	-1.98	231	23.8	2664	53.5
	37.4	4.05	-4.63	198	20.7	2653	52.0
80% 40 Hz	0.0	1.27	2.87	237	23.9	2423	0.0
	10.8	1.77	2.07	234	23.6	2413	39.3
	20.6	2.2	0.50	215	21.9	2396	55.7
	31.2	2.75	-2.48	182	18.8	2390	58.1
	37.5	3.01	-4.82	158	16.6	2378	56.3
70% 35 Hz	0.0	0.92	2.89	181	18.2	2120	0.0
	6.0	1.15	2.50	178	17.9	2117	25.4
	12.2	1.54	2.03	170	17.1	2101	37.0
	18.2	1.82	0.6	150	15.2	2101	41.5
	25.0	1.96	-2.48	129	13.4	2088	46.6
60% 30 Hz	0.0	0.65	2.87	132	13.2	1820	0.0
	4.7	0.77	2.65	132	13.2	1818	21.9
	9.5	0.96	2.2	126	12.6	1816	34.0
	14.5	1.15	1.87	111	11.1	1811	38.2
	20.2	1.25	0.5	95	9.6	1805	42.4



รูปที่ 9 การหาจุดทำงานของระบบปั๊มด้วยการเขียนเส้นโค้งของปั๊มและเส้นโค้งของระบบ

ตารางที่ 2 จุดทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆ

Frequency Hz	Q m ³ /h	H m	Efficiency %	Power kW
50	28.5	31	53	4.54
45	24	26	52	3.27
40	20	22	56	2.14
35	11	17	37	1.38

ตารางที่ 3 ค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ Affinity Law

Frequency Hz	Q m ³ /h	H m	Efficiency %	Power kW
50	28.5	31	53	4.54
45	24	22.0	53	2.71
40	20	15.3	53	1.57
35	11	4.6	53	0.26

สำหรับความถี่ 50 Hz หรือคิดเป็น 100 %

ขั้นตอนต่อไปคำนวณหาจุดทำงานโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น
ดังต่อไปนี้ หาสมการแบบจำลองของปั๊มจากข้อมูลผลการทดสอบในตารางที่ 1 ร่วมกันกับสมการ
(14) (15) และ (19) หาสมการของปั๊مدังนี้

$$H_0 = 37.5 \text{ m}$$

$$Q_0 = 0 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_m = 23.9 \text{ m}$$

$$Q_m = 39.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\eta_{\max} = 53.6 \%$$

$$Q_p = 32.2$$

หาสมการเส้นโค้งของปั๊มที่ความความถี่ 50 Hz ดังนี้

จากสมการ (19) จะได้

$$a = -0.00872$$

ดังนั้นสมการคือ

$$H = -0.00872Q^2 + 37.5$$

สามารถหา $Q_{\max}$ ได้โดยแทน $H = 0$ จะได้

$$Q_{\max} = 65.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

และหาสมการประสิทธิภาพดังนี้

จากสมการ (24) (25) และ (26) จะได้

$$h = 3.386$$

$$g = -0.05525$$

$$f = 0.000055$$

ดังนั้นนำค่า f , g และ h ที่ได้แทนค่าในสมการ (20) จะได้สมการประสิทธิภาพคือ

$$\eta = 0.000055Q^3 - 0.05525Q^2 + 3.386Q$$

แทนค่า Q ตามตารางที่ 5 ผลลัพธ์ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 7

สำหรับที่ความถี่ 45 Hz หรือ 90%

หาสมการของปั๊มที่ความเร็วใดๆ ด้วยสมการ ที่ (27) (28) (30) (31) และ (32) ดังนี้
จากสมการ (30) และ (31) หาสมการของปั๊มจะได้

$$c' = 37.5(45/50)^2$$

$$c' = 30.375$$

จากสมการ (32) ดังนั้นสมการของปั๊มที่ความถี่ 45 Hz คือ

$$H' = -0.00872Q'^2 + 30.375$$

และเช่นเดียวกัน จากสมการ (30), (33), (34), (35) และ (36) หาสมการประสิทธิภาพที่ความถี่ 45 Hz ได้ดังนี้

$$h' = 3.386/(45/50) = 3.762$$

$$g' = -0.05525/(45/50)^2 = -0.0682$$

$$f' = 0.000055/(45/50)^3 = 0.0000754$$

แทนค่าในสมการ (36) จะได้

$$\eta' = 0.0000754Q'^3 - 0.0682Q'^2 + 3.762Q'$$

ดังนั้นด้วยวิธีการเดียวกันนี้สามารถหาสมการสำหรับที่ความถี่ 40 และ 35 Hz. ได้โดยสรุปดังนี้
ที่ความถี่ 40 Hz

$$H' = -0.00872Q'^2 + 24 \quad \text{และ} \quad \eta' = 0.000107Q'^3 - 0.0863Q'^2 + 4.2325Q'$$

สำหรับความถี่ 35 Hz

$$\text{จะได้ } H' = -0.00872Q'^2 + 18.4 \quad \text{และ} \quad \eta' = 0.00016Q'^3 - 0.1128Q'^2 + 4.8371Q'$$

นำแบบจำลองที่ได้ทั้งหมดไปแก้สมการร่วมกันกับสมการระบบ หรือใช้สมการ (43) ก็จะหาจุดทำงานที่ความเร็วรอบต่างๆได้ แต่ในขั้นตอนต่อไปนี้จะเป็นการตรวจสอบแบบจำลองว่ามีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดสอบจริงและจากสมการ Affinity Law มากน้อยแค่ไหน ดังนั้นแทนค่า Q ที่จุดทำงานตารางที่ 2 ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นทั้งหมด ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Frequency Hz	Q m ³ /h	H m	Efficiency %	Power kW
50	28.5	30.4	52.9	4.46
45	24	25.4	52	3.19
40	20	20.5	51	2.19
35	11	17.3	39.8	1.30

นำค่าในตารางที่ 2, 3 และ 4 มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบค่าพลังงานระหว่างค่าจริงกับค่าจาก Affinity Law และ ค่าที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Source of Data	Frequency Hz/%	Q m ³ /h	H m	Efficiency %	Power kW	Power Error %
Actual	50Hz/100%	28.5	31	53	4.54	0
Affinity		28.5	31	53	4.54	0
Model		28.5	30.4	52.9	4.46	-2
Actual	45Hz/90%	24	26	52	3.27	0
Affinity		24	22.0	53	2.71	-17
Model		24	25.4	52	3.19	-2
Actual	40Hz/80%	20	22	56	2.14	0
Affinity		20	15.3	53	1.57	-27
Model		20	20.5	51	2.19	2
Actual	35Hz/70%	11	17	37	1.38	0
Affinity		11	4.6	53	0.26	-81
Model		11	17.3	39.8	1.30	-5

ตารางที่ 5 จะพบว่าผลการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานที่จุดทำงานที่ได้จากการคำนวณด้วย Affinity Law มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงมากกว่าค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Power Error %) ในแถวตั้งสุดท้ายของตารางที่ 5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับค่าจริง (Actual) จะพบว่าผลการคำนวณค่าการใช้พลังงานจาก Affinity Law จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงกว่าค่าที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยความคลาดเคลื่อนนี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อการปรับลดความเร็วยิ่งต่ำลงสังเกตว่าที่ความถี่ 35 Hz จะมีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่คำนวณด้วยสมการ Affinity Law สูงถึง -81% ในขณะที่ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่จุดเดียวกันนี้เพียง -5%