

บทที่ 4

การทดสอบและพัฒนาแบบจำลองโหลด

บทนี้มีเป้าหมายเพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของแบบจำลองโหลดไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจะเน้นเฉพาะโหลดแสงสว่างและโหลดมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นโหลดหลักที่มีการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะได้กล่าวถึงผลการทดสอบโหลดจริงเพื่อสร้างความเข้าใจในเบื้องต้น และตอนท้ายจะได้กล่าวถึงแบบจำลองโหลดที่แปรผันกับแรงดันไฟฟ้าโดยใช้สมการโพลีโนเมียลดีกรีสองที่จะใช้ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในโรงงาน โดยเนื้อหาในแต่ละส่วนมีดังนี้

4.1 การทดสอบโหลดแสงสว่าง

โหลดแสงสว่างที่นำมาทดสอบในงานวิจัยนี้ ได้แก่ หลอดไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์ การทดสอบจะดำเนินการห้องปฏิบัติการในเวลากลางคืนเพื่อลดผลกระทบจากแสงสว่างภายนอกในเวลากลางวัน และปริมาณแสงขาออกจะวัดโดยใช้ค่าความสว่างในหน่วยลักซ์ (Lux) แทนการวัดในหน่วยลูเมน (Lumen) เนื่องจากสามารถทำได้สะดวกและเหมาะสมกับสภาพการนำไปใช้จริง โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ผลในเชิงพลังงานได้โดยตรง โดยมีขั้นตอนการทดสอบและผลที่ได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 การทดสอบหลอดไส้

หลอดไส้ที่ใช้ทดสอบมีขนาด 200 W จำนวน 4 หลอดที่ยี่ห้อแตกต่างกัน

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- ต่อหม้อแปลงปรับแรงดัน ชนิดหนึ่งเฟส เข้ากับชุดหลอดไส้ยี่ห้อ A พร้อมเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าได้
- ปรับแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกของหม้อแปลงปรับแรงดัน ไปที่ค่าตามตารางที่กำหนดไว้
- บันทึกผลการวัดค่าความสว่าง กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ณ ระยะห่างในทิศทางตั้งฉากกับหลอด 0.4 m
- เปลี่ยนยี่ห้อหลอดแล้วทดลองอีกครั้ง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

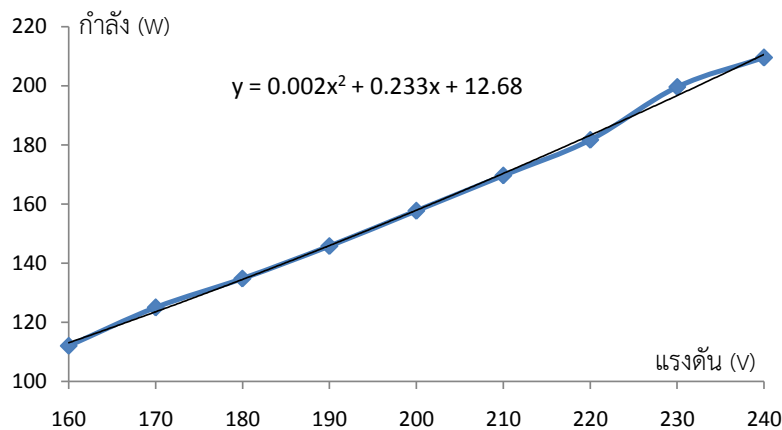
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบโหลดหลอดไส้

ยี่ห้อ	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)	ความสว่าง (Lux)	Lux/W
A	160	0.69	112.1	650	5.80
	170	0.73	125	750	6.00
	180	0.74	134.8	900	6.68
	190	0.76	145.8	1080	7.41
	200	0.79	157.7	1250	7.93
	210	0.81	169.7	1500	8.84

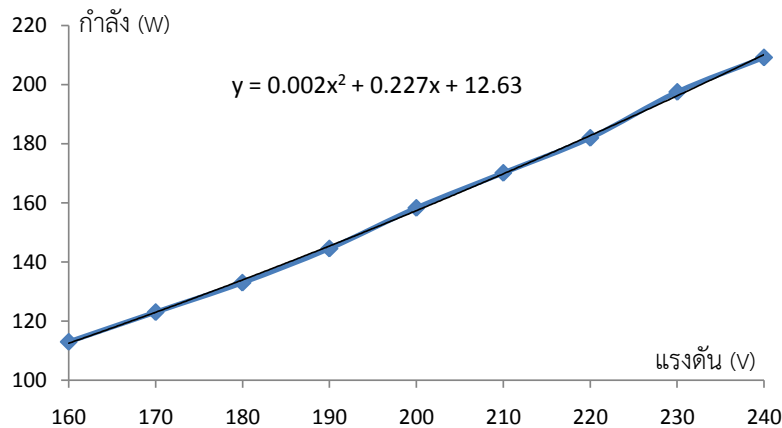
ยี่ห้อ	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)	ความสว่าง (Lux)	Lux/W
	220	0.83	181.7	1750	9.63
	230	0.85	199.6	2050	10.27
	240	0.87	209.5	2500	11.93
B	160	0.69	113	675	5.97
	170	0.72	123.1	855	6.95
	180	0.75	133	1013	7.61
	190	0.76	144.6	1215	8.40
	200	0.78	158.3	1463	9.24
	210	0.805	170.15	1755	10.31
	220	0.83	182	2070	11.37
	230	0.85	197.5	2385	12.08
	240	0.86	209.2	2756	13.18
C	160	0.69	111.7	640	5.73
	170	0.72	121.6	800	6.58
	180	0.74	134.6	980	7.28
	190	0.76	146	1200	8.22
	200	0.78	158.9	1440	9.06
	210	0.8	170.45	1720	10.09
	220	0.82	182	2000	10.99
	230	0.84	195	2340	12.00
	240	0.86	209.1	2800	13.39
D	160	0.69	111.8	625	5.59
	170	0.72	122.4	781	6.38
	180	0.74	134.6	969	7.20
	190	0.76	146.8	1156	7.88
	200	0.78	156.8	1375	8.77
	210	0.8	169.8	1625	9.57
	220	0.82	182.8	1938	10.60
	230	0.84	194.6	2313	11.88
	240	0.86	207.1	2813	13.58

สำหรับหลอดไส้พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหลอดจะใช้กำลังไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้น ความสว่างเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของค่าความสว่างต่อกำลังไฟฟ้าขาเข้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าประสิทธิภาพด้านความสว่างของหลอดจะดีขึ้น อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นหลักในด้านความคุ้มค่าของการใช้พลังงานคือวัฏจักรประสิทธิภาพการใช้งานหลอดชนิดนี้ว่าประสิทธิภาพหรือความสว่างที่เพิ่มขึ้นนั้น สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างแท้จริงเพียงใด

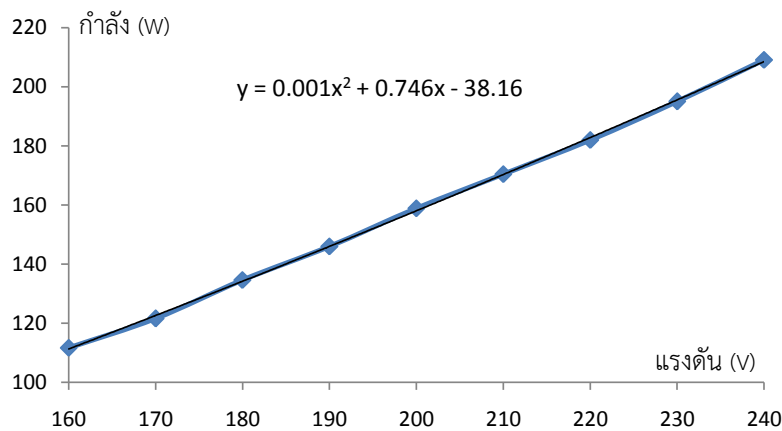
กราฟของแรงดันกับค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดยี่ห้อ A, B, C และ D แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 – รูปที่ 4.4 ตามลำดับ



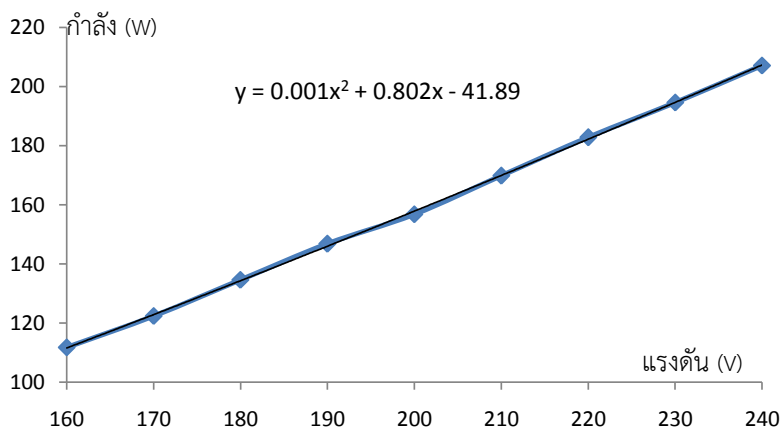
รูปที่ 4.1 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดไส้ยี่ห้อ A



รูปที่ 4.2 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดไส้ยี่ห้อ B



รูปที่ 4.3 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดไส้ยี่ห้อ C



รูปที่ 4.4 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดไส้ยี่ห้อ D

4.1.2 การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์แกนเหล็ก

หลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติ ดังนี้ แรงดัน 220 V 50 Hz จำนวน 5 ยี่ห้อ ขั้นตอนการทดสอบ มีดังนี้

- ต่อหม้อแปลงปรับแรงดัน ชนิดหนึ่งเฟส เข้ากับชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ E ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็กพร้อมเครื่องมือวัดที่สามารถวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าได้
- ปรับหม้อแปลงปรับแรงดัน ไปที่ค่าตามตารางที่กำหนดไว้
- บันทึกผลการวัดค่าความสว่าง กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ณ ระยะห่างในทิศทางตั้งฉากกับหลอด 0.5 m
- เปลี่ยนยี่ห้อหลอดแล้วทดลองอีกครั้ง ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

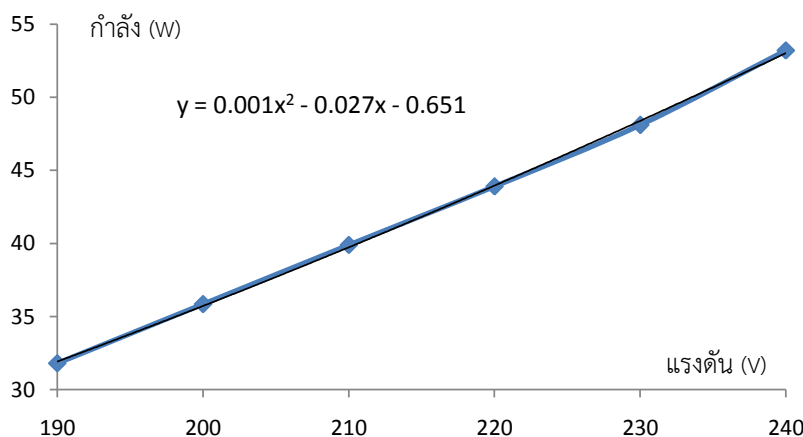
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แกนเหล็ก

ยี่ห้อ	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)	ความสว่าง (Lux)	Lux/W
E	190	0.29	31.8	850	26.7
	200	0.33	35.85	955	26.6
	210	0.37	39.9	1060	26.6
	220	0.4	43.9	1150	26.2
	230	0.45	48.1	1200	24.9
	240	0.5	53.2	1300	24.4
F	190	0.29	31.9	865	27.1
	200	0.33	35.65	957.5	26.9
	210	0.37	39.4	1050	26.6
	220	0.41	43.1	1175	27.3
	230	0.45	48.3	1240	25.7
	240	0.5	54.3	1350	24.9

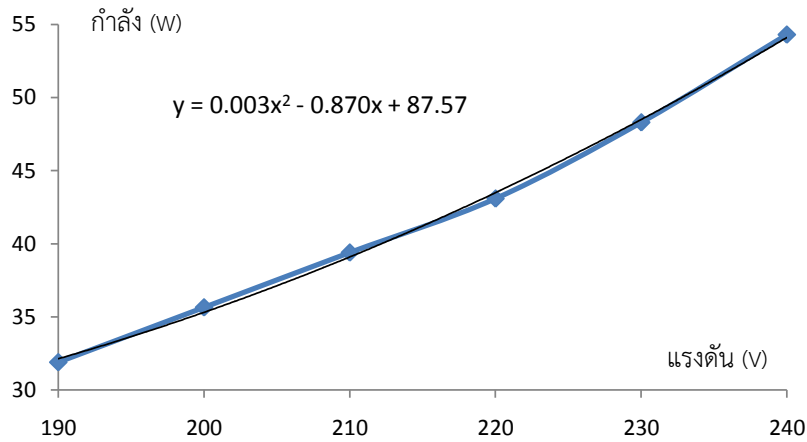
ยี่ห้อ	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)	ความสว่าง (Lux)	Lux/W
G	190	0.29	31.8	840	26.4
	200	0.33	35.1	930	26.5
	210	0.37	38.4	1020	26.6
	220	0.42	42.5	1120	26.4
	230	0.45	47.6	1200	25.2
	240	0.5	53.4	1280	24.0
H	190	0.29	31.1	820	26.4
	200	0.33	34.3	915	26.7
	210	0.37	37.5	1010	26.9
	220	0.41	42	1110	26.4
	230	0.45	47	1200	25.5
	240	0.51	54.5	1320	24.2
I	190	0.29	32	845	26.4
	200	0.33	35.9	952.5	26.5
	210	0.37	39.8	1060	26.6
	220	0.42	44.1	1130	25.6
	230	0.46	49	1220	24.9
	240	0.51	54.1	1290	23.8

สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็กพบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หลอดจะให้ความสว่างเพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้กำลังไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้น อัตราส่วนของค่าความสว่างต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเล็กน้อย แต่สิ่งที่ต้องคำนึงเป็นหลัก คือความสว่างที่เพิ่มขึ้นนั้นเกินความจำเป็นปกติจากการออกแบบความสว่างโดยพื้นฐานหรือไม่และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างแท้จริงเพียงใด

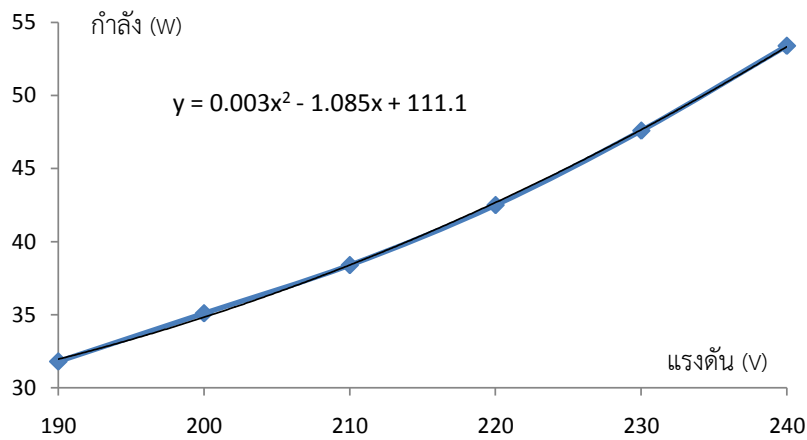
กราฟแรงดันกับค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดทั้ง 5 ยี่ห้อ แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 – รูปที่ 4.9 ตามลำดับ



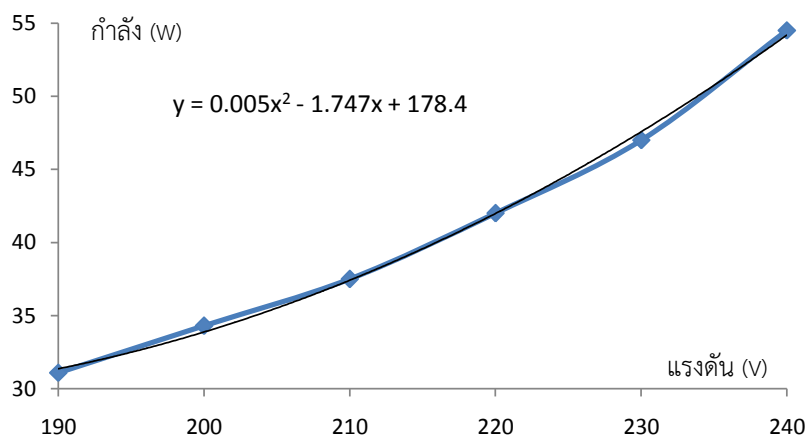
รูปที่ 4.5 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ E



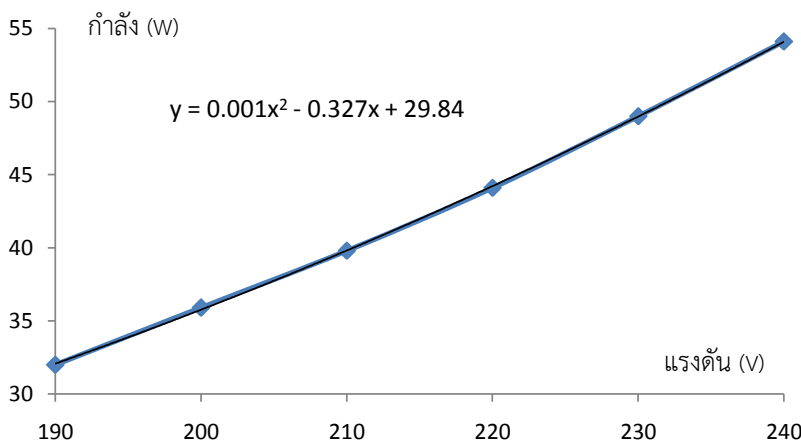
รูปที่ 4.6 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ F



รูปที่ 4.7 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ G



รูปที่ 4.8 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ H



รูปที่ 4.9 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ

4.1.3 การทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้งานร่วมกับบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

การทดสอบในตอนนี้จะมีขั้นตอนคล้ายกับการทดสอบในหัวข้อที่ 4.1.2 เพียงแต่ผลการวัดค่า ความสว่าง กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า จะดำเนินการเฉพาะ ณ ระยะห่างในทิศทางตั้งฉากกับหลอด 0.5 m ดังแสดงตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

ยี่ห้อ	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (W)	ความสว่าง (Lux)	Lux/W
E	110	0.51	70.00	2200	31.42
	130	0.56	71.80	2400	33.43
	150	0.49	73.50	2550	34.69
	170	0.43	72.80	2650	36.40
	190	0.38	72.40	2700	37.29
	210	0.34	72.20	2750	38.09
	220	0.33	72.00	2800	38.89
	230	0.31	71.80	2900	40.39
	240	0.30	71.80	2950	41.08

สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ใช้บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น หลอดจะกินกระแสไฟฟ้าลดลงโดยที่ กำลังไฟฟ้าขาเข้าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ความสว่างที่ได้จะเพิ่มขึ้นและเมื่อเทียบกับบัลลาสต์แกนเหล็กความสว่างที่ได้จะสูงกว่ามาก และมีความสม่ำเสมอมากกว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลการควบคุมกระแสของวงจรภายในบัลลาสต์ อัตราส่วนของค่าความสว่างต่อ กำลังไฟฟ้าที่ใช้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

4.2 การทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำหนึ่งเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟสที่ใช้ทดสอบมีคุณสมบัติ ดังนี้ แรงดัน 220 V พิกัดกำลัง 0.26 kW พิกัด กระแส 3.47 A ความถี่ 50 Hz เป็นการทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพ ณ ค่าแรงดันต่างๆ คุณสมบัติของ

มอเตอร์นั้นนอกจากจะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าแล้วยังขึ้นกับรูปแบบการทำงาน และรูปแบบการควบคุมอีกด้วย ดังนั้นในตอนนี้จะทำการทดสอบมอเตอร์ ในสองโหมดการทำงาน ได้แก่โหมดที่ไม่มีการควบคุมทอร์คซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการทำงานของมอเตอร์ทั่วไปในโรงงาน และในโหมดที่มีการควบคุมทอร์คซึ่งเป็นคุณสมบัติร่วมขณะที่มอเตอร์ใช้งานกับอินเวอร์เตอร์ การทดสอบจะทำการขึ้นในห้องปฏิบัติการ ที่มีอุปกรณ์ครบถ้วนโดยขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

- ต่อมอเตอร์เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงบิดตามที่กำหนดให้เป็นโหลดทางกล
- ต่อแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วมอเตอร์โดยใช้หม้อแปลงปรับแรงดัน
- ต่อเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่สามารถวัดค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าได้
- ทำการปรับหม้อแปลงแรงดัน ไปที่แรงดันกำหนด
- ปรับค่าแรงบิดด้านของโหลดไปที่ค่าต่างๆ ตามที่กำหนด แล้วบันทึกค่า กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ณ ระดับแรงดันค่านั้น
- ทำการปรับแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง ไปค่าใหม่ตามที่กำหนดในตารางแล้วทำการทดลองตามกระบวนการเดิมอีกครั้ง จนครบทุกระดับแรงดัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบโหลดมอเตอร์หนึ่งเฟสในโหมดไม่ควบคุมทอร์ค

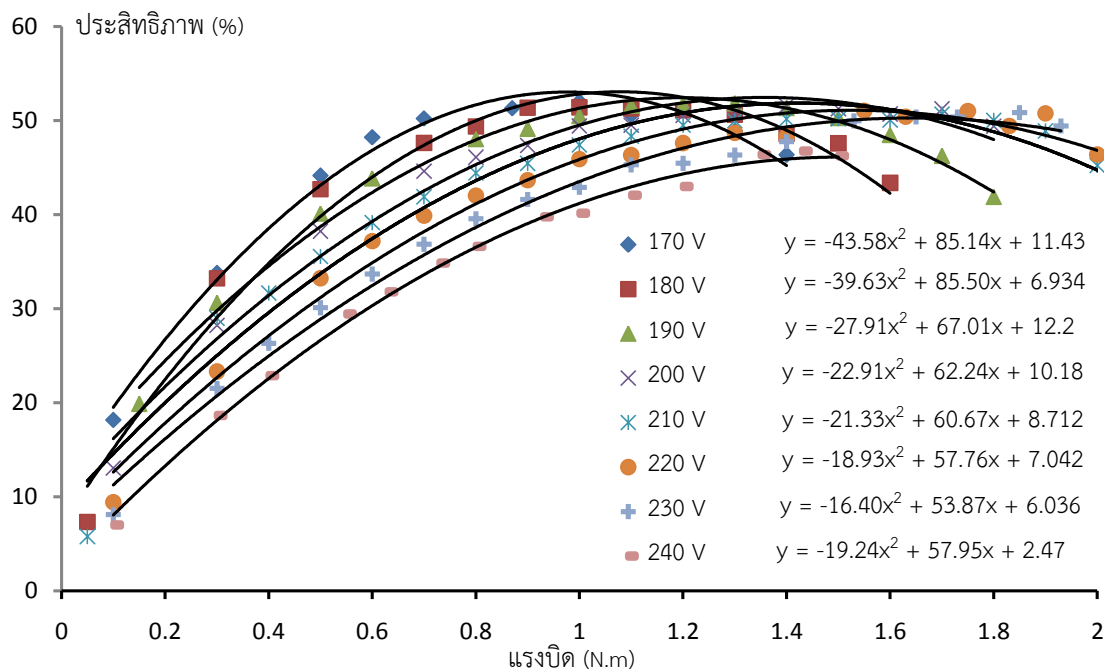
แรงดัน (V)	กระแส (A)	P_{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P_{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
170	1.89	85.50	0.10	1485	15.55	18.18
	1.95	136.60	0.30	1470	46.18	33.80
	2.03	173.10	0.50	1460	76.44	44.16
	2.06	188.60	0.60	1448	90.98	48.23
	2.18	210.60	0.70	1443	105.73	50.22
	2.37	253.20	0.87	1426	129.91	51.31
	2.49	283.40	1.00	1408	147.44	52.02
	2.71	318.60	1.10	1399	161.15	50.58
	3.09	380.00	1.30	1365	185.82	48.90
	3.33	421.30	1.40	1332	195.28	46.35
180	2.01	106.10	0.05	1486	7.78	7.33
	2.05	139.30	0.30	1473	46.27	33.22
	2.13	178.90	0.50	1459	76.39	42.70
	2.27	222.70	0.70	1447	106.07	47.62
	2.34	244.10	0.80	1439	120.55	49.38
	2.42	262.17	0.90	1429	134.68	51.37
	2.54	289.20	1.00	1420	148.70	51.41

แรงดัน (V)	กระแส (A)	P _{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P _{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
	2.66	316.20	1.10	1408	162.18	51.29
	2.80	344.00	1.20	1399	175.80	51.10
	2.95	372.00	1.30	1384	188.41	50.64
	3.17	411.00	1.40	1362	199.67	48.58
	3.37	444.00	1.50	1345	211.27	47.58
	3.79	504.00	1.60	1305	218.65	43.38
190	2.16	117.20	0.15	1484	23.31	19.88
	2.20	151.20	0.30	1475	46.33	30.64
	2.27	191.20	0.50	1465	76.70	40.11
	2.00	208.90	0.60	1458	91.60	43.85
	2.42	251.30	0.80	1441	120.72	48.03
	2.50	275.30	0.90	1435	135.24	49.12
	2.58	296.60	1.00	1430	149.74	50.48
	2.67	317.60	1.10	1422	163.80	51.57
	2.78	342.60	1.20	1411	177.31	51.75
	2.89	368.00	1.30	1401	190.72	51.82
	3.03	397.00	1.40	1390	203.78	51.33
	3.20	429.00	1.50	1373	215.67	50.27
	3.39	468.00	1.60	1354	226.86	48.47
	3.67	512.00	1.70	1330	236.77	46.24
	4.00	580.00	1.80	1289	242.97	41.89
200	2.33	119.30	0.10	1489	15.59	13.07
	2.35	164.30	0.30	1476	46.36	28.22
	2.41	200.70	0.50	1466	76.75	38.24
	2.48	239.00	0.70	1455	106.65	44.62
	2.53	262.50	0.80	1445	121.05	46.11
	2.60	286.40	0.90	1439	135.62	47.35
	2.66	304.20	1.00	1436	150.37	49.43
	2.75	331.60	1.10	1425	164.14	49.50
	2.83	353.00	1.20	1420	178.44	50.55
	2.94	378.00	1.30	1410	191.95	50.78
	3.02	398.00	1.40	1400	205.25	51.57
	3.14	426.00	1.50	1390	218.34	51.25
	3.28	456.00	1.60	1380	231.22	50.70
	3.45	477.00	1.70	1373	244.42	51.24

แรงดัน (V)	กระแส (A)	P _{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P _{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
	3.58	517.00	1.80	1355	255.41	49.40
210	2.54	134.20	0.05	1486	7.78	5.79
	2.53	160.40	0.30	1480	46.49	28.98
	2.55	194.40	0.40	1470	61.57	31.67
	2.59	216.20	0.50	1468	76.86	35.55
	2.62	235.20	0.60	1466	92.11	39.16
	2.65	254.70	0.70	1456	106.73	41.90
	2.68	274.00	0.80	1453	121.72	44.42
	2.74	299.60	0.90	1445	136.18	45.45
	2.79	318.10	1.00	1440	150.79	47.40
	2.86	342.00	1.10	1435	165.30	48.33
	2.93	363.00	1.20	1430	179.69	49.50
	3.0	387.00	1.30	1421	193.44	49.98
	3.09	412.00	1.40	1410	206.71	50.17
	3.19	438.00	1.50	1400	219.91	50.20
	3.31	468.00	1.60	1398	234.23	50.05
	3.41	488.00	1.70	1389	247.27	50.67
	3.53	519.00	1.80	1377	259.55	50.01
	3.70	555.00	1.90	1364	271.39	48.89
	4.03	615.00	2.00	1328	278.13	45.22
220	2.09	165.00	0.10	1487	15.57	9.43
	2.77	199.30	0.30	1480	46.49	23.32
	2.79	231.70	0.50	1472	77.07	33.24
	2.80	248.00	0.60	1468	92.23	37.19
	2.85	269.00	0.70	1464	107.31	39.89
	2.88	290.00	0.80	1455	121.89	42.03
	2.91	313.00	0.90	1450	136.65	43.66
	2.95	330.00	1.00	1447	151.52	45.91
	3.02	358.00	1.10	1440	165.87	46.33
	3.06	379.00	1.20	1436	180.45	47.61
	3.12	399.00	1.30	1427	194.26	48.68
	3.21	429.00	1.40	1414	207.30	48.32
	3.26	448.00	1.55	1409	228.70	51.04
	3.35	474.00	1.63	1400	238.97	50.41
	3.45	501.00	1.75	1395	255.64	51.02

แรงดัน (V)	กระแส (A)	P _{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P _{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
	3.59	537.00	1.83	1385	265.41	49.42
	3.72	540.00	1.90	1378	274.17	50.77
	3.91	614.00	2.00	1360	284.83	46.39
230	3.00	193.00	0.10	1496	15.66	8.11
	3.04	216.00	0.30	1480	46.49	21.52
	3.05	235.00	0.40	1477	61.86	26.32
	3.06	256.00	0.50	1472	77.07	30.10
	3.06	274.00	0.60	1469	92.29	33.68
	3.08	291.00	0.70	1463	107.24	36.85
	3.09	309.00	0.80	1459	122.22	39.55
	3.12	329.00	0.90	1453	136.94	41.62
	3.15	354.00	1.00	1450	151.84	42.89
	3.17	368.00	1.10	1447	166.68	45.29
	3.23	397.00	1.20	1436	180.45	45.45
	3.28	421.00	1.30	1433	195.08	46.33
	3.33	438.00	1.40	1427	209.20	47.76
	3.37	456.00	1.53	1422	227.83	49.96
	3.45	487.00	1.65	1420	245.35	50.38
	3.51	507.00	1.73	1410	255.44	50.38
	3.60	535.00	1.85	1404	271.99	50.84
	3.71	568.00	1.93	1389	280.72	49.42
240	3.30	222.00	0.10	1490	15.60	7.02
	3.34	250.00	0.30	1485	46.65	18.66
	3.35	270.00	0.40	1476	61.82	22.89
	3.35	288.00	0.55	1472	84.78	29.44
	3.35	304.00	0.63	1465	96.65	31.79
	3.36	321.00	0.73	1463	111.83	34.84
	3.38	334.00	0.8	1460	122.31	36.62
	3.39	357.00	0.93	1458	141.99	39.77
	3.34	378.00	1.00	1449	151.73	40.14
	3.44	396.00	1.1	1446	166.56	42.06
	3.48	421.00	1.2	1440	180.95	42.98
	3.50	438.00	1.35	1437	203.15	46.38
	3.54	458.00	1.43	1430	214.14	46.76
	3.59	484.00	1.50	1425	223.83	46.25

จากตารางที่ 4.4 เขียนกราฟความสัมพันธ์ของทอร์กกับประสิทธิภาพ ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กำลังกับแรงดันไฟฟ้าของหลอดฟลูออเรสเซนต์ยี่ห้อ

4.3 การทดสอบโหลดมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่ใช้ทดสอบมีพิกัดกำลัง 1 kW ความถี่ 50 Hz ต่อแบบวาย การทดสอบคล้ายดังกรณีโหลดมอเตอร์เฟสเดียว ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบโหลดมอเตอร์ 3 เฟส

แรงดัน (V)	กระแส (A)	P_{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P_{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
140	0.40	52	0.10	1481	15.50	29.82
	0.45	68	0.20	1470	30.78	45.27
	0.47	84	0.30	1459	45.83	54.56
	0.50	100	0.40	1449	60.69	60.69
	0.60	162	0.70	1407	103.13	63.66
	0.63	184	0.80	1391	116.53	63.33
	0.70	200	0.90	1375	129.59	64.79
	0.75	224	1.00	1356	141.99	63.39
	0.90	292	1.30	1287	175.20	60.00
	1.50	452	1.70	1042	185.50	41.03
180	0.60	64	0.05	1489	7.79	12.18

แรงดัน (V)	กระแส (A)	P _{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P _{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
	0.62	80	0.20	1482	31.03	38.79
	0.65	116	0.40	1469	61.53	53.04
	0.68	184	0.80	1441	120.72	65.61
	0.70	224	1.00	1424	149.12	66.57
	0.78	268	1.20	1406	176.68	65.93
	0.89	328	1.50	1379	216.61	66.04
	0.98	372	1.70	1358	241.75	64.99
	1.10	440	2.00	1319	276.25	62.78
200	0.63	72	0.05	1490	7.80	10.84
	0.65	92	0.20	1485	31.10	33.81
	0.69	140	0.50	1470	76.96	54.98
	0.70	176	0.70	1458	106.87	60.73
	0.75	232	1.00	1441	150.90	65.04
	0.80	268	1.20	1427	179.32	66.91
	0.87	328	1.50	1405	220.69	67.29
	0.9	368	1.70	1391	247.63	67.29
	1.00	408	1.90	1375	273.58	67.05
	1.10	432	2.10	1356	298.19	69.03
220	0.75	84	0.05	1491	7.80	9.29
	0.78	104	0.20	1487	31.14	29.95
	0.79	152	0.50	1474	77.17	50.78
	0.80	204	0.80	1460	122.31	59.96
	0.82	224	0.90	1455	137.13	61.22
	0.83	240	1.00	1450	151.84	63.27
	0.85	276	1.20	1439	180.82	65.52
	0.9	312	1.40	1430	209.64	67.20
	0.93	360	1.60	1418	237.58	65.99
	1.00	432	2.00	1396	292.37	67.68
	1.10	472	2.20	1383	318.62	67.50
230	0.80	96	0.05	1494	7.82	8.15
	0.81	124	0.32	1487	49.82	40.19
	0.83	160	0.52	1479	80.53	50.34
	0.85	170	0.60	1475	92.29	54.29
	0.87	228	0.90	1461	137.69	60.39
	0.90	288	1.20	1447	181.83	63.14
	0.92	324	1.40	1437	210.67	65.02

แรงดัน (V)	กระแส (A)	P_{in} (W)	τ (Nm)	ความเร็วรอบ (rpm)	P_{out} (W)	ประสิทธิภาพ (%)
	0.97	380	1.70	1423	253.32	66.67
	1.03	436	2.00	1408	294.89	67.64
	1.09	480	2.20	1395	321.38	66.96
240	0.87	104	0.05	1494	7.82	7.52
	0.89	136	0.30	1486	46.68	34.33
	0.895	172	0.50	1479	77.44	45.02
	0.898	204	0.70	1471	107.82	52.86
	0.90	256	1.00	1460	152.89	59.72
	0.93	312	1.30	1448	197.12	63.18
	0.98	348	1.50	1439	226.03	64.95
	1.00	384	1.70	1430	254.57	66.29
	1.05	436	2.00	1416	296.56	68.02
	1.10	476	2.20	1406	323.92	68.05

4.4 แบบจำลองโหลดที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า

ดังได้เห็นแล้วว่าโหลดในทางไฟฟ้ามีพฤติกรรมการทำงานและคุณลักษณะขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีการควบคุมตั้งแต่ระบบผลิต ส่ง และจำหน่ายไฟฟ้า ให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ (Soft Constraint) ซึ่งมีค่าเกินหรือตกจากแรงดันปกติประมาณ 5 % ทำให้ในช่วงนี้อาจประมาณค่าโหลดให้แปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า นอกจากนั้นโหลดยังขึ้นกับความถี่ของระบบไฟฟ้าด้วย แต่เนื่องจากความถี่ไฟฟ้าเป็นเงื่อนไขหลักในการควบคุมระบบ (Hard Constraint) ที่มีเป้าหมายให้กำลังการผลิตไฟฟ้ารวมสมดุลกับโหลดและกำลังสูญเสียในระบบที่ค่าความถี่ระบบ (Power Frequency) ตลอดเวลา ทำให้ความถี่ระบบมีการแปรผันเพียงเล็กน้อย จะมีก็แต่ระบบไฟฟ้าที่แยกตัวแบบไมโครกริด (Microgrid) ที่การควบคุมความถี่ระบบมีเสถียรภาพน้อยกว่า ความถี่จึงอาจมีค่าแปรผันในขอบเขตที่กว้างมากกว่า

ในงานวิจัยนี้จะได้เสนอแบบจำลองโหลดที่กำลังไฟฟ้าปรากฏ มีความสัมพันธ์แบบโพลิโนเมียลดีกรีสองของค่าแรงดัน ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

4.4.1 แบบจำลองโหลด YIP

แบบจำลองโหลดที่ขึ้นกับแรงดัน ที่เรียกว่า YIP Model นั้นเทอม Y, I และ P หมายถึงค่าคงที่ขององค์ประกอบของโหลดแบบ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) กระแสไฟฟ้า (Current) และ กำลังไฟฟ้าปรากฏคงที่ (Constant Apparent Power) แบบจำลองโหลดนี้สามารถเขียนความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและจินตภาพเป็นโพลิโนเมียลดีกรีสอง ของค่าแรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$P(V) = A_p V^2 + B_p V + C_p \quad (4.1)$$

$$Q(V) = A_Q V^2 + B_Q V + C_Q \quad (4.2)$$

โดยที่

A_p, A_Q คือ องค์ประกอบแอดมิตแตนซ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและจินตภาพของโหลด

B_p, B_Q คือ องค์ประกอบกระแสของกำลังไฟฟ้าจริงและจินตภาพของโหลด

C_p, C_Q คือ องค์ประกอบกำลังไฟฟ้าจริงและจินตภาพของโหลดแบบค่าคงที่

แบบจำลองโหลดนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ดังอธิบายใน

4.4.2 แบบจำลองโหลดที่แปรผันกับค่าแรงดันไฟฟ้าส่วนต่าง

แบบจำลองโหลดนี้จะเขียนความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและจินตภาพเป็นโพลีโนเมียลดีกรีสอง ของค่าส่วนต่างแรงดันไฟฟ้ากับแรงดันอ้างอิง ทำให้สัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียลดีกรีสอง มีค่าต่างจากในแบบจำลองแบบ YIP ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4)

$$P(V) = a_p (\Delta V)^2 + b_p (\Delta V) + c_p \quad (4.3)$$

$$Q(V) = a_Q (\Delta V)^2 + b_Q (\Delta V) + c_Q \quad (4.4)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการโพลีโนเมียล (4.3) และ (4.4) ไม่สามารถกล่าวเทียบว่าเป็นค่าแอดมิตแตนซ์กระแสไฟฟ้า และ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ได้ดังในแบบจำลอง YIP แต่ก็มีความสัมพันธ์กันดังจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

4.4.3 การแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโหลด

ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโหลด YIP กับแบบจำลองโหลดที่แปรผันกับค่าแรงดันไฟฟ้าส่วนต่างในสมการที่ (4.1) และ (4.3) มีความสัมพันธ์กันเนื่องจากแรงดันไฟฟ้ากับค่าส่วนต่างของแรงดันไฟฟ้าสัมพันธ์กันดังสมการที่ (4.5)

$$\Delta V = V - 1 \quad (4.5)$$

โดยเลขหนึ่งในสมการนี้หมายถึงแรงดันปกติของระบบเมื่อเทียบในระบบต่อหน่วย (Per Unit System) ในการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้านั้นแรงดันที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นค่าในระบบต่อหน่วย ดังนั้นในการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโหลด YIP เป็นแบบจำลองโหลดที่ขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้าทำได้โดยการแทนสมการ (4.5) ลงในสมการ (4.3) จะได้

$$P(V) = a_p (V - 1)^2 + b_p (V - 1) + c_p \quad (4.6)$$

จัดรูปสมการที่ (4.3) ใหม่จะได้

$$P(V) = a_p V^2 + (b_p - 2a_p)V + (a_p + b_p + c_p) \quad (4.7)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (4.7) กับ (4.1) จะได้ว่า $A_p = a_p$, $B_p = b_p - 2a_p$ และ $C_p = a_p + c_p - b_p$ ทำนองเดียวกันเมื่อต้องการแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโหลดที่ขึ้นกับแรงดันให้เป็นแบบจำลองโหลด YIP ทำได้โดยการแทนสมการ (4.5) ลงในสมการ (4.1) จะได้

$$P(V) = A_p (1 + \Delta V)^2 + B_p (1 + \Delta V) + C_p \quad (4.8)$$

จัดรูปสมการที่ (4.3) ใหม่จะได้

$$P(V) = A_p (\Delta V)^2 + (2A_p + B_p) \Delta V + (A_p + B_p + C_p) \quad (4.9)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (4.9) กับ (4.1) จะได้ว่า $a_p = A_p$, $b_p = 2A_p + B_p$ และ $c_p = A_p + B_p + C_p$

4.4.4 ฐานข้อมูลของแบบจำลองโหลด

ฐานข้อมูลของแบบจำลองโหลดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีต้นแบบสมการอยู่ในรูปโพลีโนเมียลดีกรีสองของแรงดันผลต่าง ทำให้ต้องมีการแปลงให้อยู่ในรูปแบบ YIP เพื่อให้สอดคล้องกับซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานการคำนวณการไหลของกำลังไฟฟ้าในโรงงาน ที่โดยทั่วไปใช้แบบจำลองโหลดแบบกำลังไฟฟ้าปรากฏคงที่ เพื่อความสะดวกข้อมูลโหลดที่ขึ้นกับแรงดันผลต่างจะแสดงในตารางที่ 4.7 และข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในรูปแบบจำลองโหลด YIP แล้ว สามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 แบบจำลองโหลดที่เป็นสมการโพลีโนเมียลดีกรีสองของแรงดันผลต่าง

ลำดับ	โหลด	a_p	b_p	c_p	a_Q	b_Q	c_Q
1	เครื่องปรับอากาศส่วนกลาง 1 เฟส	2.07	0.4311	1	0.543	0.6636	0.3152
2	เครื่องปรับอากาศส่วนกลาง 3 เฟส	1.005	0.2683	1	5.81	2.3717	0.6957
3	เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน 1 เฟส	2.021	0.5953	1	8.604	2.4456	0.4968
4	ปั๊มความร้อน 3 เฟส (โหมดความร้อน)	1.314	0.4539	1	7.46	3.013	0.9399
5	ปั๊มความร้อน 3 เฟส (โหมดความเย็น)	1.362	2.333	1	6.896	2.3404	0.8456
6	ปั๊มความร้อน 1 เฟส (โหมดความร้อน)	1.679	0.3953	1	6.458	1.9522	0.3472
7	ปั๊มความร้อน 1 เฟส (โหมดความเย็น)	2.101	0.363	1	10.055	1.687	0.3605
8	หลอดไส้	0.223	1.5209	1	0	0	0
9	หลอดฟลูออเรสเซนต์	-1.65	0.6534	1	2.734	-0.0403	-0.01535
10	หลอดไอปรอท	0.504	0.1309	1	7.811	2.3329	-0.2524
11	หลอดโซเดียม	-2.389	0.3409	1	7.63	2.2173	0.06
12	เตาอบ	5.876	2.1018	1	0	0	0
13	เตาไมโครเวฟ	2.071	0.0974	1	8.738	1.313	0.2039
14	กระติกต้มน้ำ	2.003	0.3769	1	0	0	0
15	เตาให้ความร้อนแบบความต้านทาน	1	0.3769	1	0	0	0
16	มอเตอร์ 1 เฟส (แรงบิดคงที่)	3.721	0.5178	1	0.97	2.7796	0.9853
17	มอเตอร์ 3 เฟส (1-10 HP`แรงบิดคงที่)	0.97	0.225	1	-5.951	2.3532	0.781
18	มอเตอร์ 3 เฟส (>10 HP`แรงบิดคงที่)	0.341	0.0188	1	4.097	1.2078	0.6577
19	มอเตอร์ 1 เฟส (แรงบิดไม่คงที่)	2.13	0.7101	1	6.432	2.7621	0.9727

ลำดับ	โหลด	a_P	b_P	c_P	a_Q	b_Q	c_Q
20	มอเตอร์ 3 เฟส (1-10 HP'แรงบิดไม่คงที่)	0.489	3.122	1	5.706	2.3648	0.7785
21	มอเตอร์ 3 เฟส (>10 HP'แรงบิดไม่คงที่)	0.099	0.1628	1	3.685	1.2467	0.6569
22	ตู้เย็น	9.881	1.3958	1	23.801	4.387	1.2507
23	ตู้แช่	12.616	1.3286	1	27.276	4.6702	1.381
24	เครื่องซักผ้า	3.099	1.2786	1	12.948	4.5733	1.6388
25	เครื่องอบผ้า	-3.6372	-0.1968	1	0.363	0.518	0.209
26	โทรทัศน์	0.562	1.2471	1	1.647	0.983	0.2431

ตารางที่ 4.8 แบบจำลองโหลดที่เป็นสมการโพลีโนเมียลดีกรีสองของแรงดัน

ลำดับ	โหลด	A_P	B_P	C_P	A_Q	B_Q	C_Q
1	เครื่องปรับอากาศส่วนกลาง 1 เฟส	2.07	-3.7089	2.6389	0.543	-0.4224	0.1946
2	เครื่องปรับอากาศส่วนกลาง 3 เฟส	1.005	-1.7417	1.7367	5.81	-9.2483	4.134
3	เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน 1 เฟส	2.021	-3.4467	2.4257	8.604	-14.7624	6.6552
4	ปั๊มความร้อน 3 เฟส (โหมดความร้อน)	1.314	-2.1741	1.8601	7.46	-11.907	5.3869
5	ปั๊มความร้อน 3 เฟส (โหมดความเย็น)	1.362	-0.391	0.029	6.896	-11.4516	5.4012
6	ปั๊มความร้อน 1 เฟส (โหมดความร้อน)	1.679	-2.9627	2.2837	6.458	-10.9638	4.853
7	ปั๊มความร้อน 1 เฟส (โหมดความเย็น)	2.101	-3.839	2.738	10.055	-18.423	8.7285
8	หลอดไส้	0.223	1.0749	-0.2979	0	0	0
9	หลอดฟลูออเรสเซนต์	-1.65	3.9534	-1.3034	2.734	-5.5083	2.75895
10	หลอดไอปรอท	0.504	-0.8771	1.3731	7.811	-13.2891	5.2257
11	หลอดโซเดียม	-2.389	5.1189	-1.7299	7.63	-13.0427	5.4727
12	เตาอบ	5.876	-9.6502	4.7742	0	0	0
13	เตาไมโครเวฟ	2.071	-4.0446	2.9736	8.738	-16.163	7.6289
14	กระดิกต้มน้ำ	2.003	-3.6291	2.6261	0	0	0
15	เตาให้ความร้อนแบบความต้านทาน	1	-1.6231	1.6231	0	0	0
16	มอเตอร์ 1 เฟส (แรงบิดคงที่)	3.721	-6.9242	4.2032	0.97	0.8396	-0.8243
17	มอเตอร์ 3 เฟส (1-10 HP'แรงบิดคงที่)	0.97	-1.715	1.745	-5.951	14.2552	-7.5232
18	มอเตอร์ 3 เฟส (>10 HP'แรงบิดคงที่)	0.341	-0.6632	1.3222	4.097	-6.9862	3.5469
19	มอเตอร์ 1 เฟส (แรงบิดไม่คงที่)	2.13	-3.5499	2.4199	6.432	-10.1019	4.6426
20	มอเตอร์ 3 เฟส (1-10 HP'แรงบิดไม่คงที่)	0.489	2.144	-1.633	5.706	-9.0472	4.1197
21	มอเตอร์ 3 เฟส (>10 HP'แรงบิดไม่คงที่)	0.099	-0.0352	0.9362	3.685	-6.1233	3.0952

ลำดับ	โหนด	A_p	B_p	C_p	A_Q	B_Q	C_Q
22	ตู้เย็น	9.881	-	9.4852	23.801	-43.215	20.6647
23	ตู้แช่	12.616	-	12.2874	27.276	-49.8818	23.9868
24	เครื่องซักผ้า	3.099	-4.9194	2.8204	12.948	-21.3227	10.0135
25	เครื่องอบผ้า	-3.6372	7.0776	-2.4404	0.363	-0.208	0.054
26	โทรทัศน์	0.562	0.1231	0.3149	1.647	-2.311	0.9071