บทที่ 5
การออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน

5.1 องค์ประกอบของการออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน

การออปติไมซ์เป็นกระบวนการคิด และตัดสินใจทางวิทยาศาสตร์เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา กระบวนการออปติไมเซชั่นเกิดเนื่องจากแรงจูงใจหลายด้าน ทั้งด้านเศรษฐกิจ และด้านเทคโนโลยี โดยมีจุดประสงค์เพื่อใช้ทรัพยากรเหล่านี้ให้ได้ผลสูงสุด

- เวลา
- วัตถุดิบ
- พลังงาน
- แรงงาน
- เงินลงทุน

ทรัพยากรเหล่านี้ล้วนเป็นต้นทุนในทางเศรษฐศาสตร์ ถ้าสามารถใช้ให้ได้ประโยชน์สูงสุดก็จะสามารถแข่งขันกับผู้อื่นทางเศรษฐศาสตร์ได้ สำหรับการทำออปติไมเซชั่นในระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน ประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญดังนี้

5.1.1 แบบจำลองกระบวนการ (Process Model)

แบบจำลองกระบวนการ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในการเลียนแบบ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมทั้งของแบบจำลอง และกระบวนการ การที่มีความเข้าใจในแบบจำลองกระบวนการ ทำให้สามารถสร้างฟังก์ชันจุดประสงค์ และกำหนดขอบเขตของข้อจำกัดได้ แบบจำลองกระบวนการจะเปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ (ตัวแปรปรับ) ของกระบวนการซึ่งใช้เป็นเซ็ตพอยท์ (Setpoint) ในตัวควบคุม ตัวเลียนแบบการส่วนใหญ่เป็นแบบกับสภาวะคงตัว (Steady State) มากกว่าแบบพลวัต (Dynamic) และมักมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Darby และ White, 1988) สำหรับในงานวิจัยนี้ จะใช้แบบจำลองที่ได้หลังจากการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล (กำหนดให้เรียกว่ากรณีอ้างอิง, Base Case) ในการออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีนต่อไป

5.1.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function)

ฟังก์ชันจุดประสงค์ หมายถึงสมการหรือกลุ่มของสมการ (Equations หรือModel) ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้คำนวณ เพื่อหาค่าต่ำสุด หรือเพื่อหาค่าสูงสุด ฟังก์ชันจุดประสงค์ มีหลายรูปแบบด้วยกันตามวัตถุประสงค์ของงาน สำหรับกระบวนการทำความเย็นด้วยเอทิลีนนั้น เพื่อลดการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ (R-600) ให้น้อยที่สุด

5.1.3 เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

ในแต่ละกระบวนการจะมีข้อจำกัด และขอบเขตของกระบวนการอยู่ ข้อจำกัดเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตของการดำเนินกระบวนการ (Feasible path) ขอบเขตของกระบวนการยังแบ่งได้เป็น เงื่อนไขบังคับแบบเท่ากัน (Equality Constraints) เป็นสมการแสดงข้อจำกัดของแบบจำลองกระบวนการ และผลิตภัณฑ์ และเงื่อนไขบังคับแบบไม่เท่ากัน (Inequality Constraints) เป็นสมการแสดงข้อจำกัดของการออกแบบ และข้อจำกัดต่างๆ

5.1.4 ขั้นตอนวิธีการออปติไมซ์ (Optimization Algorithm)

ขั้นตอนวิธีที่ใช้สำหรับการออปติไมซ์ในกระบวนการทำความเย็นด้วยเอทิลีน จะใช้แบบจำลองของกระบวนการ และฟังก์ชันจุดประสงค์ในการหาเซ็ตพอยท์ที่เหมาะสมของกระบวนการสามารถเขียนได้ดังนี้

มินิไมซ์ พลังงานที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์ R-600

$$P=\sum_{i=1}^{\hat{}} Pi\,, \qquad Pi = \text{พลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์แต่ละขั้น} \qquad (5.1)$$

เงื่อนไข

เพื่อรักษาให้ระบบสามารถทำงานอย่างมีเสถียรภาพ มีความเป็นไปได้ และมีผลกระทบต่อสายกระบวนการ และมีความเสี่ยงต่อการเสียหายของอุปกรณ์ต่าง ๆน้อยที่สุด โดยมีเงื่อนไขดังนี้

1) อัตราการไหลของไอเอทิลีนโดยปริมาตร ที่เข้าคอมเพรสเซอร์แต่ละขั้นมากกว่า 5 % ของอัตราการไหลของไอเอทิลีน โดยปริมาตรต่ำสุด (% Above Surge) ที่คอมเพรสเซอร์แต่ละขั้นจะรับได้ ถ้าต่ำกว่านั้นถือว่า ระบบควบคุมป้องการเซอรจ์เริ่มทำงาน (ที่มา: Operating Manaul for Olefins Plant Project: " ระบบควบคุมป้องกันการเซอร์จของคอมเพรสเซอร์ จะตั้งให้คอมเพรสเซอร์ทำงานเหนือจุดเซอรจ์ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 5% ถึง 10 % เหนือจุดเซอรจ์ ")

2) อัตราการไหลของไอเอทิลีนโดยปริมาตร ที่เข้าคอมเพรสเซอร์แต่ละขั้นน้อยกว่า 5 % ของอัตราการไหลของไอเอทิลีน โดยปริมาตรสูงสุด (% Below Stonewall) ที่คอมเพรสเซอร์แต่ละขั้นจะรับได้ เพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องจักร
3) อุณหภูมิ และความดัน อยู่ในขอบเขตที่แต่ละอุปกรณ์ สามารถทนได้
4) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ (Duty) ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับกับสายกระบวนการคงเดิม เพื่อไม่ให้มีผลกระทบกับสายกระบวนการข้างนอก (Process Streams)
5) ความสามารถสูงสุดที่ทำได้ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ ที่เอทิลีนมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันเอง ได้แก่ อุปกรณ์ T-480A T-480B และT-481
6) ขอบเขตอัตราการไหลของเอทิลีน รีฟลักซ์กลับไปยังหอแยก C2 พิจารณาจากโหลด (Load) สูงสุด และต่ำสุดของหอแยก C2 ที่ยอมรับได้
7) อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เอทิลีนที่จะส่งไปลูกค้า (สาย T-473) คงเดิม
8) เพื่อความปลอดภัย และป้องการการปนเปื้อน ความดันต่ำสุดที่ยอมรับได้ในระบบทำความเย็น จะรักษาไว้ให้มากกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย เพื่อป้องกันอากาศเข้าหากเกิดการรั่ว (Air Inleakage Risks)

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) หรือตัวแปรปรับ

คือ ตัวแปรที่มีผลต่อพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ ได้แก่ ความเร็วรอบ ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 และอัตราการไหลของเอทิลีนที่เข้าคอมเพรสเซอร์แต่ละขั้น โดยการปรับการเปิดวาล์วที่จุดต่างๆ ดังนี้

1) ความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ R-600
2) ความดันเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 โดยการปรับการเปิดวาล์ว LV6103 วาลว์ TV4201 และวาลว์ LV4070
3) อัตราการไหลของไอเอทิลีน จากคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 ไปยังคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 4 (สาย D379A) โดยปรับการเปิดวาลว์ PDV6008
4) อัตราการไหลของเอทิลีนเหลว จากถัง M-640 ไปยัง T-472 (สาย 6430) โดยปรับการเปิดวาล์ว FV4721
5) อัตราการไหลของเอทิลีนเหลว จาก T-412 ไปยัง T-481 (สาย 6461) โดยปรับการเปิดวาล์ว FV4810

5.2 ผลการออปติไมซ์ และวิจารณ์

ผลการเลียนแบบกระบวนการทำความเย็น ก่อน และหลังการออปติไมซ์แสดงดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ส่วนตารางที่ 5.1 ตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3 เป็นการเปรียบเทียบผลก่อน และหลังการออปติไมซ์ และรูปที่ 5.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำความดันสูงที่ใช้ของเครื่องจักรไอน้ำ กับความเร็วรอบของคอมเพรสเซอร์ R-600 จากข้อมูลในโรงงาน ซึ่งสามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$Hps = 0.002*Rpm + 10.743 \qquad (5.2)$$

เมื่อ Hps = ปริมาณไอน้ำความดันสูง (ตัน/ชั่วโมง)

Rpm = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

เมื่อพิจารณาผลการทดลองตารางที่ 5.3 สามารถคำนวณหาพลังงานที่คอมเพรสเซอร์ใช้ลดลง ได้ ดังนี้

- พลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ ลดลงต่อปี (อ้างอิง 1 ปี = 8760 ชั่วโมง) คิดเป็น

= 4641.236 – 4571.626(กิโลวัตต์)

= 69.61 (กิโลวัตต์) * 3412.14 (บีทียู/ชั่วโมง/กิโลวัตต์)

= 237519.1 (บีทียู/ชั่วโมง) = 2080.67 (ล้านบีทียู/ปี)

- พลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ลดลง คิดเป็น

$$\frac{(4641.236 - 4571.626)}{4641.236} * 100 = 1.5\%$$

และสามารถคำนวณปริมาณไอน้ำความดันสูงที่ใช้ลดลง (ดูผลการทดลองตารางที่ 5.1) จากผลต่างของสมการที่ 5.2 ได้ว่า เมื่อคอมเพรสเซอร์ใช้ความเร็วรอบต่ำลง, ΔRpm = (7086 – 7000) = 86 (รอบ/นาที)

- ปริมาณไอน้ำความดันสูงที่ใช้ลดลงต่อปี คิดเป็น

$\Delta Hps = 0.002*\Delta Rpm = 0.002* 86 = 0.172$ ตัน/ชั่วโมง = 1506.72 ตัน/ปี

- ปริมาณไอน้ำความดันสูงที่ใช้ลดลงต่อปี คิดเป็นมูลค่า

อ้างอิง ราคาไอน้ำความดันสูง 430 บาทต่อตัน (ที่มา: ส่วนวิจัย และพัฒนา ฝ่ายเทคนิค บริษัทไทยโอเลฟินส์)

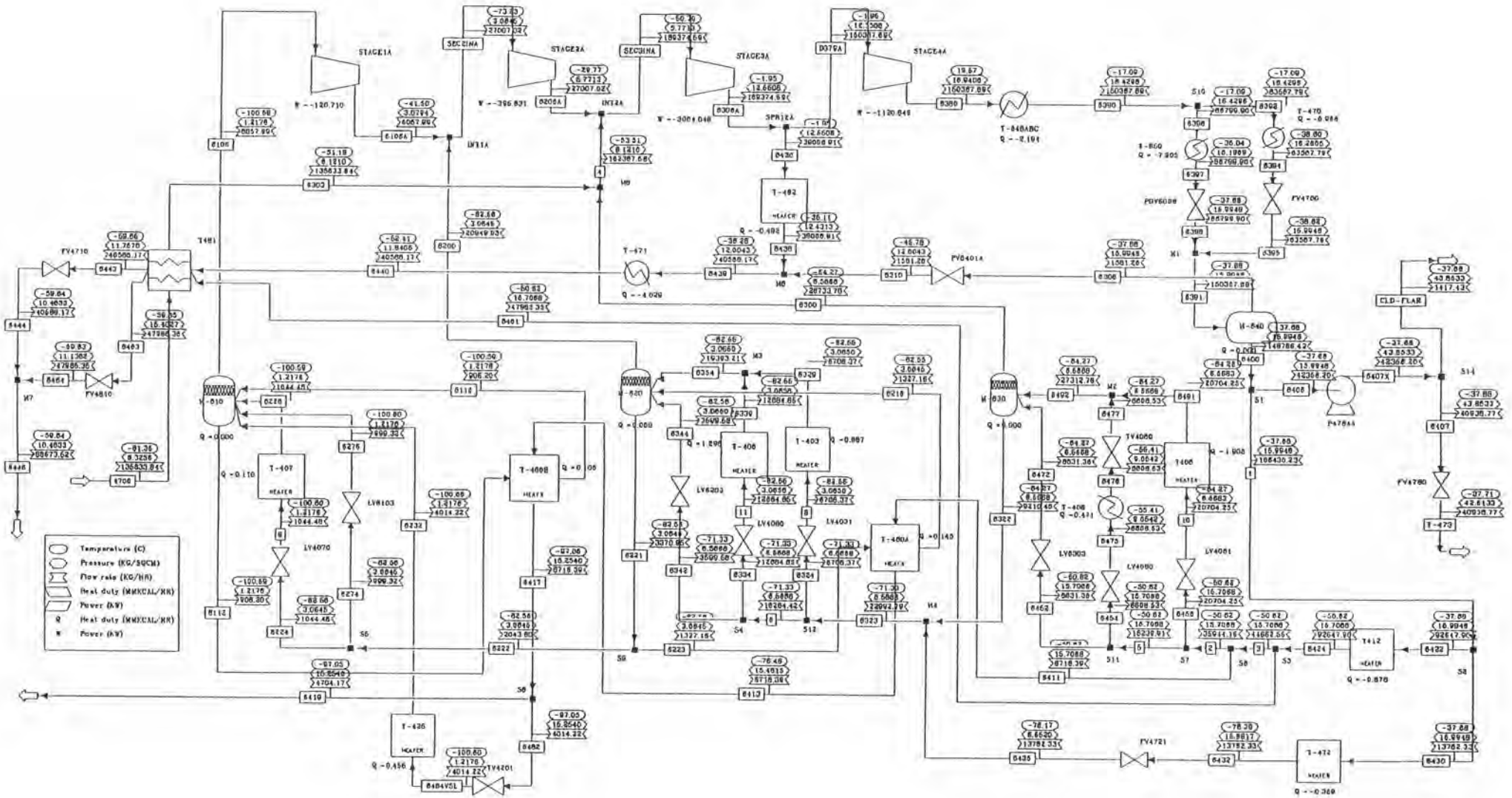
ค่าใช้จ่ายไอน้ำความดันสูงลดลง = ราคาไอน้ำความดันสูง (บาท/ตัน) * ΔHps (ตัน/ปี)

= 430 * 1506.72 = 647,890 บาท/ปี

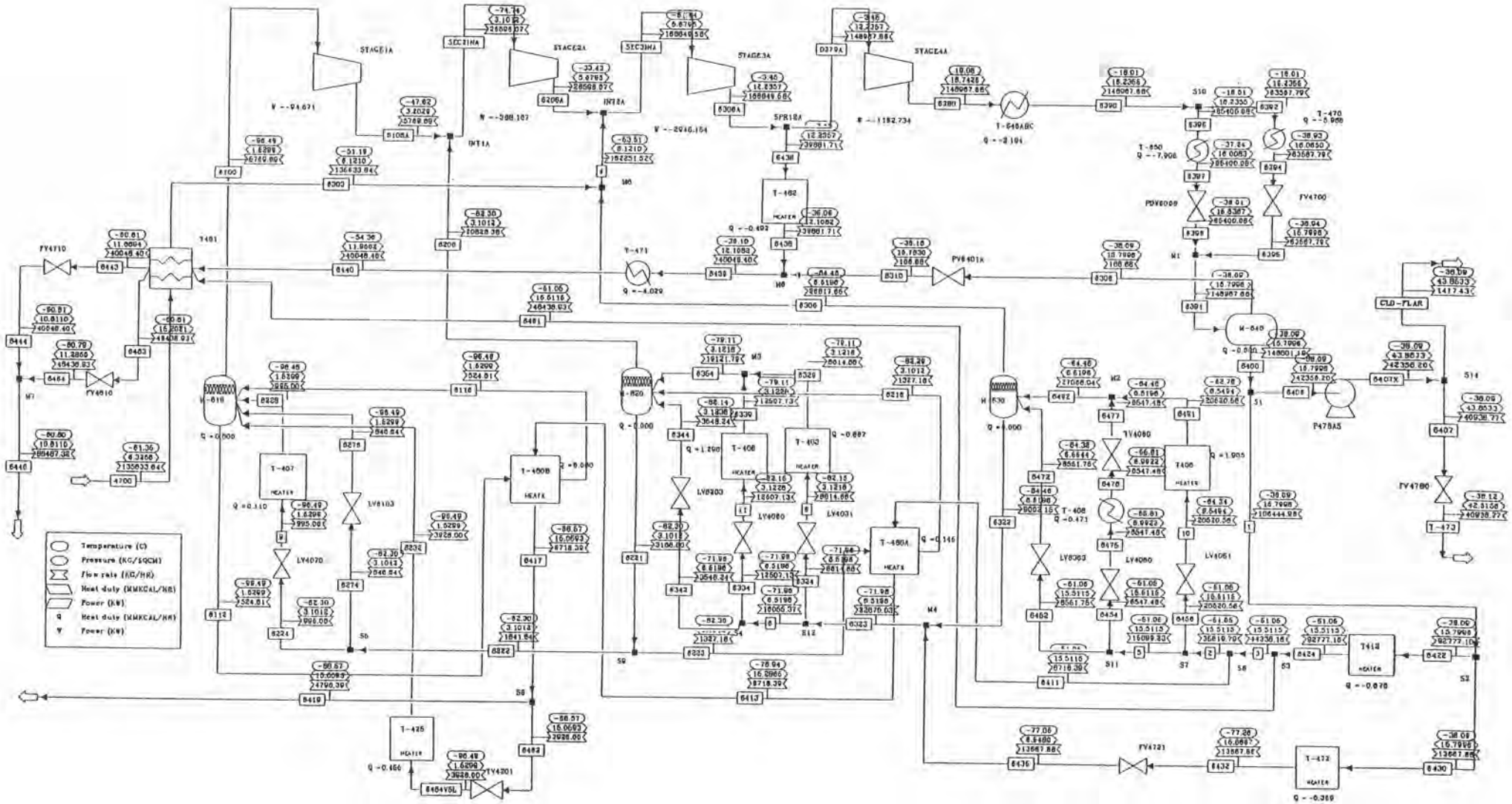
เมื่อทำการออปติไมซ์ พบว่า อัตราการไหลของเอทิลีนเข้าคอมเพรสเซอร์ เปลี่ยนแปลงไปในทางที่ลดลง การลดอัตราการไหลนั้น สามารถทำได้โดยลดเปอร์เซ็นต์การเปิดวาลว์ลง ส่วน

อัตราการไหล และความดันตกคร่อมวาล์วที่เกิดขึ้น จะลดลงมาก หรือ ลดลงน้อยนั้น ยังขึ้นอยู่กับชนิด และขนาดของวาลว์ ในทางตรงข้ามการเปิดวาลว์มากขึ้น ก็ทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้การที่อุณหภูมิการทำความเย็นในระดับที่หนึ่ง (ดูผลการทดลองตารางที่ 5.2) สูงขึ้นจาก –100.6 C° เป็น -96.5 C° นั้น เป็นผลมาจากการปรับความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้ ไม่ส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิ (Temperature Approach) ระหว่างสายร้อนซึ่งเป็นสายกระบวนการ กับสายเย็นซึ่งเป็นเอทิลีนที่ไหลผ่านอุปกรณ์ T-425 และ T-407 ต่ำเกินไป เนื่องจากสายร้อนมีอุณหภูมิสูงพอ คือ มีอุณหภูมิขาเข้าอุปกรณ์ T-425 และ T-407 เท่ากับ –91 C° และ–79 C° ตามลำดับ (ข้อมูลจากอุปกรณ์วัด TI4200 และ TI4060 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะเกิดการถ่ายเทความร้อน จากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำได้ (Sufficient Temperature Gradient) ส่วนการที่ความดันเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 สูงขึ้น ไม่ส่งผลให้ความดันโดยรวมของทั้งระบบสูงไปด้วย เนื่องจากคอมเพรสเซอร์หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำลง จึงทำให้ความดันที่ออกจากคอมเพรสเซอร์ไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก



รูปที่ 5.1 กรณีอ้างอิง (Base Case)



รูปที่ 5.2 ผลจากการออปติไมซ์ (After Optimization)

ตารางที่ 5.1 ผลก่อน และหลังการออปติไมซ์

ตัวแปรตัดสินใจ	ก่อน (Base Case)	หลัง (After)	อิมพลิเคชั่น (Implication)
1) ความเร็วรอบ (RPM)	7086	7000	ปรับเซ็ตพอยท์ ในระบบควบคุม
2) ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 (kg/cm^2a)	1.2176	1.5299	
- (% เปิด) วาล์ว LV6103	31.95	28.20	เซ็ตพอยท์
อัตราการไหลของเอทิลีนผ่านวาลว์ (kg/h)	999.32	846.64	
- (% เปิด) วาล์ว TV4201	77.10	76.60	เซ็ตพอยท์
อัตราการไหลของเอทิลีนผ่านวาลว์ (kg/h)	4014.22	3928.00	
- (% เปิด) วาล์ว LV4070	73.50	70.00	เซ็ตพอยท์
อัตราการไหลของเอทิลีนผ่านวาลว์ (kg/h)	1044.48	995.00	
3) อัตราการไหลของเอทิลีนจากคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 ไปคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 4 สาย D379A (kg/h)	150367.69	148967.88	
- (% เปิด) วาลว์ PDV6008	59.67	57.20	เซ็ตพอยท์
4) อัตราการไหลของเอทิลีนเหลวจากถัง M-640 ไปยัง T-472 สาย 6430 (kg/h)	13782.33	13667.88	
- (% เปิด) วาล์ว FV4721	62.92	62.80	เซ็ตพอยท์
5) อัตราการไหลของเอทิลีนจาก T-412 ไปยัง T-481 สาย 6461 (kg/h)	47985.35	48438.93	
- (%เปิด) วาล์ว FV4810	79.97	81.64	เซ็ตพอยท์
พลังงานที่ให้กับคอมเพรสเซอร์ (kw)	4711.16	4545.61	
พลังงานที่ประหยัดได้ ต่อปี (MBtu)	2,081		
ปริมาณไอน้ำความดันสูงที่ประหยัดได้ ต่อปี (ton)	1506.3		
ลดค่าใช้จ่ายได้ ต่อปี * (บาท)	647,890		

* อ้างอิงราคาไอน้ำความดันสูง 430 บาท/ตัน

ตารางที่ 5.2 ระดับอุณหภูมิการทำความเย็น และผู้ใช้ (Users) ก่อน และหลังการทำออปติไมซ์

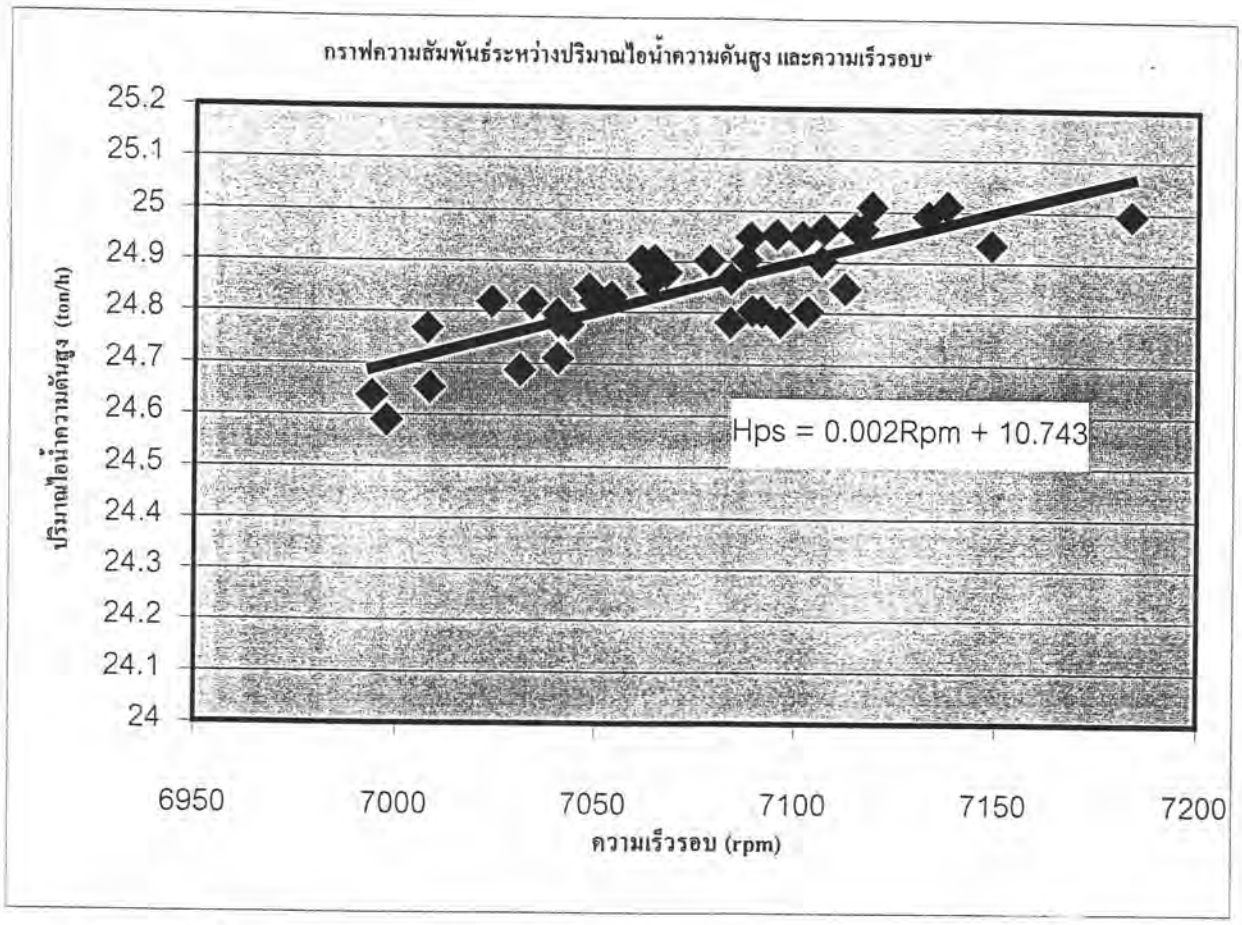
ระดับ	หนึ่ง		สอง		สาม	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
อุณหภูมิ (C°)	-100.6	-96.5	-82.6	-82.2	-64.3	-64.3
ผู้ใช้ (Users)	- Demethanizer Condenser (T-425) - Dephlegmator No.2 (T-407)		- Demethanizer Feed Chiller (T-403) - Dephlegmator No.1 (T-406)		- Dephlegmator No.1 (T-406) - Demethanizer Prefractionator Condenser (T-408)	

ตารางที่ 5.3 ผลการทำงานของคอมเพรสเซอร์ก่อน และหลังการออปติไมซ์

ขั้นที่	ก่อน			หลัง		
	% เหนือ* Surge	% ต่ำกว่า** Stonewall	พลังงานที่ใช้ (kw)	% เหนือ Surge	% ต่ำกว่า Stone wall	พลังงานที่ใช้ (kw)
1	19.0	24.7	120.710	5.0	36.9	94.571
2	25.6	35.9	395.831	30.0	33.2	368.167
3	52.0	25.9	3004.046	70.7	19.2	2946.154
4	76.6	23.4	1120.649	91.4	16.9	1162.734
		รวม	4641.236		รวม	4571.626

* % เหนือ Surge คือ การเทียบอัตราการไหลโดยปริมาตรขาเข้า กับอัตราการไหลโดยปริมาตรขาเข้าต่ำสุดที่เกิดการ Surge

** % ต่ำกว่า Stonewall คือ การเทียบอัตราการไหลโดยปริมาตรขาเข้า กับอัตราการไหลโดยปริมาตรขาเข้าสูงสุดที่เกิด Stonewall



* ระยะเวลา 9 เดือน

รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำความดันสูง และความเร็วรอบ