บทที่ 7
สรุปผลงานวิจัย

7.1 การสร้างแบบจำลองของระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน

การสร้างแบบจำลองระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน โดยโปรแกรมแอสเพ็นพลัส เปรียบเทียบกับข้อมูลออกแบบ หรือ กรณีออกแบบนั้น สามารถเลียนแบบกระบวนที่ให้ผลใกล้เคียงกับข้อมูลออกแบบได้ดี โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างโดยรวมในแต่ละสายน้อยกว่า 1% น่าพอใจ เมื่อนำแบบจำลองมาทดสอบความถูกต้องกับข้อมูลจริง พบว่า ผลการเลียนแบบมีความแตกต่างกับข้อมูลจริงอยู่มาก (ดูหัวข้อ 4.4) ซึ่งอาจมีสาเหตุจาก ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดมีความคลาดเคลื่อนอยู่ จึงปรับแบบจำลองให้สอดคล้องกับข้อมูลที่วัดได้ โดยการใช้เทคนิคการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น โดยปรับตัวแปรวัดได้ที่เป็นอินพุตของแบบจำลองอุปกรณ์ และตัวแปรไม่ทราบค่า เพื่อให้เป็นไปตามหลักสมดุลมวลสาร และพลังงาน และเพื่อลดความคลาดเคลื่อนระหว่างตัวแปรวัด กับค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองยกกำลังสองถ่วงน้ำหนักให้มีค่าน้อยที่สุด แต่เนื่องจากเป็นปัญหาที่มีคำตอบได้มากมาย จึงทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และความเป็นไปได้ของตัวแปรไม่ทราบค่ากับข้อมูลที่ต่างกันอีกชุดหนึ่ง (ข้อมูลชุดที่สอง) แพ็คเกจการเลียนแบบกระบวนการที่สภาวะคงตัวที่ประกอบด้วยโมดูลการแก้ปัญหาการออปติไมซ์ ได้แก่ แอสเพ็นพลัส ถูกนำมาสร้างแบบจำลองที่สภาวะคงตัว ของระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน และแก้ปัญหาการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล โดยการออปติไมซ์ความคลาดเคลื่อนกำลังสองหรือฟังก์ชันจุดประสงค์ให้น้อยที่สุด หลังจากการใช้เทคนิคทำการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลแล้ว เห็นชัดเจนว่า ค่าจากการประมาณจากแบบจำลอง สอดคล้องกับค่าจากการวัดค่อนข้างดี ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์ลดลงจากเดิมมาก และเมื่อทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลอีกชุดหนึ่ง ก็ให้ผลการเลียนแบบที่สอดคล้องกับค่าจากการวัดค่อนข้างดีเช่นกัน

เมื่อได้แบบจำลองระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน ที่ความใกล้เคียงกับข้อมูลจริงแล้ว จึงทำการออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีนต่อไป

7.2 การออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน

ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีนใช้คอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่เพิ่มความดันให้กับระบบ ซึ่งต้องใช้พลังงานในการอัดปริมาตรไอเอทิลีนจากขาดูด (Suction line) ก่อนจะจ่ายออกไป หากปริมาตร

ไอที่ไหลผ่านคอมเพรสเซอร์ลดลง หรือความดันที่ไหลเข้าคอมเพรสเซอร์สูงขึ้น และหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ ย่อมส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ลดลงด้วย แต่ต้องคำนึงด้วยว่า ปริมาตรไอที่ไหลผ่านจะต้องไม่น้อยเกินไป จนเป็นสาเหตุของการขาดเสถียรภาพในการดำเนินงาน และอาจทำให้ระบบไม่สามารถทำหน้าที่ได้ตามต้องการ จึงต้องหาสมดุลระหว่าง สองความต้องการที่สวนทางกัน (Trade Off) คือ การลดความเสี่ยงจากการเซอร์จ (Surge) ให้น้อยที่สุด โดยปฏิบัติการเหนือจุดเซอร์จ และการลดพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ลงให้น้อยที่สุด การกระจาย (Distribution) ปริมาณการไหลของไอ ความดัน หรือ อุณหภูมิที่เข้าคอมเพรสเซอร์ และความเร็วรอบที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานลงได้

การออปติไมซ์ด้วยโปรแกรมแอสเพ็นพลัส ถูกนำมาใช้หาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไข และขอบเขตที่กำหนด โดย 1) การเพิ่มความดันที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 สูงขึ้น มีผลต่อการใช้พลังงานของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 โดยตรง และต่อเนื่องไปยังขั้นถัดๆ ไป 2) การหมุนคอมเพรสเซอร์ด้วยความเร็วต่ำลง ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ทุกขั้นต่ำลง 3) การลดอัตราการไหลของเอทิลีน จากคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 ไปยังคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 4 (สาย D379A) เป็นการลดปริมาณเอทิลีนที่หมุนเวียนภายในระบบโดยการป้อนกลับ เพื่อลดโหลดของคอมเพรสเซอร์ 4) การลดอัตราการไหลของเอทิลีนเหลวจาก ถัง M-640 ไปยัง T-472 (สาย 6430) มีผลต่อการลดโหลดของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2 และต่อเนื่องไปยังคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 และ 5) การเพิ่มอัตราการไหลของเอทิลีนจาก T-412 ไปยัง T-481 ให้มากขึ้น (สาย 6461) เป็นการลดปริมาณเอทิลีนที่หมุนเวียนภายในระบบลงโดยการป้อนกลับ เพื่อลดโหลดของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 ขั้นที่ 4 และผลต่อเนื่องไปยังขั้นที่ 1 และขั้นที่ 2 โดยปรับการเปิดวาลว์ต่างๆ (ดูแต่ละข้อในผลการทดลองตารางที่ 5.1) ดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด เป็นการกระจายอัตราการไหลไปในทางที่จะลดอัตราการไหลของเอทิลีนโดยรวมที่เข้าคอมเพรสเซอร์ลง เพื่อลดพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์ (ดูรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2) หลังจากทำออปติไมซ์แล้ว ระดับอุณหภูมิการทำความเย็นของก่อน และหลังไม่ต่างกันนัก (ดูตารางที่ 5.2) เว้นแต่ในระดับที่หนึ่ง มีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น –96.5 C° เนื่องมาจากการปรับให้ความดันขาเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 สูงขึ้น ความดันที่สูงขึ้นนี้ไม่ส่งผลให้ความดันโดยรวมของทั้งระบบสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากคอมเพรสเซอร์หมุนด้วยความเร็วรอบต่ำลง ความดันที่ออกจากคอมเพรสเซอร์จึงไม่ต่างไปจากเดิมไม่มากนัก สุดท้ายตำแหน่งจุดที่เหมาะสม (Optimum) อยู่บนขอบของเงื่อนไขปริมาตรไอต่ำสุดที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 (Active Constraint) ดังผลการทดลองตารางที่ 5.3 ซึ่งเป็นการแสดงถึงความพยายามที่จะลดปริมาณของไอที่เข้ามาในคอมเพรสเซอร์ให้น้อยที่สุด ในขณะเดียวกันต้องปลอดภัยไม่เกิดการเซอร์จด้วย

ผลการประหยัดพลังงานลง 1.5 % หรือประมาณ 70 กิโลวัตต์ จากการออปติไมซ์ระบบทำความเย็นด้วยเอทิลีน จะเป็นผลการประหยัดพลังงานได้อย่างมาก ในช่วงเวลานานขึ้น คือ ประหยัดพลังงานได้ถึง 2.1 พันล้านบีทียูต่อปี และผลจากการใช้ความเร็วรอบต่ำลง ทำให้ปริมาณการใช้ไอน้ำความดันสูงลดลง 1,507 ตัน คิดเป็นประหยัดค่าใช้จ่ายลง 647,890 บาทต่อปี

7.3 การหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่แต่ละระดับ

เมื่อผู้ใช้ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับต่างๆ ต้องการการทำความเย็นมากขึ้น จึงเพิ่มปริมาณเอทิลีนในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการปรับอัตราการไหลในจุดที่เหมาะสม ต่อการเพิ่มสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับนั้นๆ ถึงแม้เอทิลีนส่วนที่เพิ่มนี้จะทำให้คอมเพรสเซอร์โหลดมากขึ้น ซึ่งนั้นหมายต้นทุนสูงขึ้นด้วยก็ตาม แต่ด้วยการหมุนที่ความเร็วรอบเดิม และสมการความสัมพันธ์ที่พอจะโยงไปสู่ตัวเงินนั้น คำนวณได้จากผลต่างของความเร็วรอบ จึงไม่สามารถคำนวณต้นทุน หรือ ราคาเอทิลีนได้โดยตรง ดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองคอมเพรสเซอร์ขึ้นอีกอันหนึ่ง (กรณีสมมูล) ที่สามารถถ่ายโอนพลังงานที่เพิ่มขึ้นของคอมเพรสเซอร์เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารทำความเย็นเอทิลีน ในการทำความเย็นที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับต่างๆ ไปเป็นการหมุนคอมเพรสเซอร์ด้วยรอบที่สูงขึ้นแทน (อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.2) และเมื่อทราบผลต่างความเร็วรอบของแบบจำลองคอมเพรสเซอร์สมมูล เทียบกับคอมเพรสเซอร์ในแบบจำลองอ้างอิง จึงสามารถนำไปคำนวณหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับต่างๆ ได้

ราคาสารทำความเย็นเอทิลีนที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับต่างๆ อ้างอิง: ปริมาณสารทำความเย็นเอทิลีนเพิ่มขึ้น 1 ตัน แสดงดังนี้

- ราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่หนึ่ง (-101 C^{o})

  มีค่า 142,467.91 บาท/ตัน/ปี

- ราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่สอง (-83 C^{o})

  มีค่า 59,598.31 บาท/ตัน/ปี

- ราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิระดับที่สาม (-65 C^{o})

  มีค่า 29,463.91 บาท/ตัน/ปี

สรุปได้ว่า ราคาสารทำความเย็นเอทิลีนที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่งแพงที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิระดับถัดไป ก็จะลดลงตามลำดับ ด้วยสัดส่วนราคา 4.8 : 2.0 : 1 อธิบายได้ว่า ประการแรก การที่เอทิลีนเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มปริมาณสารทำความเย็นที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่งนั้น เป็นการเพิ่มโหลดคอมเพรสเซอร์ขั้นถัดไปด้วยทุกขั้น

ทำให้พลังงานที่ใช้แต่ละขั้นสูงขึ้น และมีพลังงานรวมทั้งหมดที่คอมเพรสเซอร์ใช้สูงที่สุด คือ 4836.409 kw (ดูตารางที่ 6.2) ขณะที่การเพิ่มขึ้นของเอทิลีน ที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2 อันเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณสารทำความเย็นที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สองนั้น เป็นการเพิ่มโหลดต่อเนื่องไปอีก 2 ขั้น คือ ขั้นที่ 3 และขั้นที่ 4 จึงใช้พลังงานรวมน้อยลง คือ 4689.823 kw (ดูตารางที่ 6.5) ส่วนเอทิลีนที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณสารทำความเย็น ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่สามนั้น เป็นการเพิ่มโหลดที่คอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 และต่อเนื่องไปขั้นที่ 4 จึงใช้พลังงานรวมน้อยที่สุดคือ 4654.462 kw (ดูตารางที่ 6.8) ประการที่สอง เป็นผลที่ต่อเนื่องมาจากประการที่หนึ่ง คือ การเพิ่มเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่ง ทำให้คอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 รับโหลดมากขึ้น และขณะที่คอมเพรสเซอร์หมุนอยู่ที่ความเร็วรอบเดิม คอมเพรสเซอร์ขั้นนี้จึงอัดเอทิลีนได้น้อยลง ซึ่งหมายถึงความดันที่จ่ายออกมาจากขั้นที่ 1 นี้ต่ำลง และต่ำลงมากเมื่อเทียบกับความดันที่ต่ำลง ของการเพิ่มโหลดที่คอมเพรสเซอร์ขั้นอื่นๆ ประกอบกับคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 รับปริมาณเอทิลีนได้น้อยกว่าขั้นอื่นๆ (คือ อัตราการไหลของเอทิลีน ที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นนี้ อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับขั้นอื่นๆ ดูได้จากภาคผนวก ค แสดงเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของคอมเพรสเซอร์ R-600 จะเห็นว่า ขั้นที่ 1 รับโหลดในช่วง 1400 m^3/h ถึง 3300 m^3/h แต่ขั้นที่ 2 รับโหลดในช่วง 3200 m^3/h ถึง 8000 m^3/h ส่วนขั้นที่ 3 รับโหลดในช่วง 10000 m^3/h ถึง 28000 m^3/h และขั้นที่ 4 รับโหลดในช่วง 4000 m^3/h ถึง 11500 m^3/h ตามลำดับ) การเพิ่มโหลดที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 จึงมีผลกระทบต่อความดันที่อัดได้ หรือจ่ายออกไป มากกว่าการเพิ่มโหลดที่คอมเพรสเซอร์ขั้นอื่นๆ เห็นได้จากผลการทดลอง เมื่อเพิ่มโหลดคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 (รูปที่ 6.3) มีผลต่อความดันที่อัดได้ของคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 1 มากที่สุด (สาย 6106A) เมื่อเทียบกับการเพิ่มโหลดที่ขั้นอื่นๆ ดังนี้ คือ ความดันลดลงจากกรณีอ้างอิง 3.0794 kg/cm^2a เป็น 2.7642 kg/cm^2a (ลดลง 10.24%) ส่วนการเพิ่มโหลดที่เข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2 (รูปที่ 6.5) ความดันที่อัดได้จากคอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 2 (สาย 6206A) ลดลงจากกรณีอ้างอิง 5.7713 kg/cm^2a เป็น 5.7312 kg/cm^2a (ลดลง 0.69%) และสำหรับการเพิ่มโหลดที่คอมเพรสเซอร์ขั้นที่ 3 (รูปที่ 6.7) ความดันที่อัดได้ (สาย 6306A) ลดลงจากกรณีอ้างอิง 12.5508 kg/cm^2a เป็น 12.5360 kg/cm^2a (ลดลง 0.12%) การที่ความดันที่คอมเพรสเซอร์อัดได้ หรือจ่ายออกมาต่ำนั้น หมายถึงเอทิลีนที่ส่งไปยังคอมเพรสเซอร์ขั้นถัดไป มีอัตราการไหลโดยปริมาตรเพิ่มขึ้นไปด้วย (ปริมาตรแปรผกผันกับความดัน) ซึ่งหมายถึงว่า คอมเพรสเซอร์ขั้นถัดไปต้องใช้พลังงานมากขึ้น ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ทำให้ราคาสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่งสูงที่สุด และที่ระดับอื่นๆ มีราคาลดลงมาตามลำดับ

เนื่องจากการแข่งขันด้านการค้า ต้นทุนในการผลิต และการดำเนินงานเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องคำนึงถึงด้วย สำหรับระบบการทำความเย็นด้วยเอทิลีนนั้น ถึงแม้จะเป็นกระบวนการส่วนที่ทำหน้าที่เป็นสาธารณูปโภคให้กับฝั่งกระบวนการ (Process Streams) แต่ก็มีส่วนทำให้เกิดต้นทุนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เห็นได้จากการทำกรณีศึกษาที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับต่างๆ (ดูหัวข้อ 6.1) ในการดำเนินงาน ผู้ปฏิบัติการจึงควรสังเกตอุณหภูมิสายกระบวนการของผู้ใช้ ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับแต่ละระดับ ไม่ให้สูงเกินค่าจากการออกแบบเกินไป และ รักษาอัตราการไหลของสายกระบวนการไม่ให้เกิดการแกว่ง หรือ เปลี่ยนแปลงมากจนเกินไป ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อต้นทุน ในการที่จะผลิตสารทำความเย็นเอทิลีนเพื่อมาแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตสารทำความเย็นเอทิลีน ที่อุณหภูมิการทำความเย็นระดับที่หนึ่ง (-101 C°) มีต้นทุน (หรือ ที่เรียกว่า ราคาสารทำความเย็นเอทิลีน) สูงที่สุด และ ที่ระดับการทำความเย็น ระดับที่สอง และระดับที่สามลดลงตามลำดับ วัตถุประสงค์ของการหาราคาสารทำความเย็นเอทิลีนแต่ละระดับนั้น เพื่อช่วยวิศวกรในการตัดสินใจ และคำนวณเกี่ยวกับต้นทุนด้วย เช่น ในกรณีที่ต้องการเพิ่มอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบ วิศวกรต้องพิจารณาว่า ควรใช้สารทำความเย็นเอทิลีนที่ระดับใด ถ้าใช้สารทำความเย็นเอทิลีนที่ระดับที่หนึ่ง ก็จะใช้สารทำความเย็นปริมาณน้อยกว่าการใช้สารทำความเย็นที่ระดับที่สาม เพราะที่ระดับที่หนึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า แต่การใช้สารทำความเย็นเอทิลีนที่ระดับที่หนึ่งนั้น จะมีต้นทุนสูง แต่หากใช้สารทำความเย็นเอทิลีนที่ระดับที่สามซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่าก็จริง แต่ก็ต้องใช้สารทำความเย็นในการแลกเปลี่ยนความร้อนในปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อต้นทุนที่เนื่องมาจากต้องซื้ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังที่กล่าวไป การที่ทราบราคาสารทำความเย็นเอทิลีนแต่ละระดับ ช่วยให้สามารถคำนวณต้นทุน (Qauntitative) จากการเลือกใช้สารทำความเย็นแต่ละระดับนั้นๆ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรในการพิจารณาและการตัดสินใจต่อไป

7.4 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากไม่ทราบเส้นโค้งลักษณะเฉพาะของเครื่องจักรไอน้ำ หากทำการทดลองหาเส้นโค้งลักษณะเฉพาะ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองเครื่องจักรไอน้ำ ก็จะสามารถคำนวณปริมาณไอน้ำความดันสูงที่ใช้ได้โดยตรง ตลอดจนยังสามารถใช้แบบจำลองดังกล่าว ในการศึกษาหาประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานให้กับคอมเพรสเซอร์ด้วย

2. อาจมีการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม เช่น การกระจายอัตราไหลเอทิลีนเข้าคอมเพรสเซอร์ขั้นต่างๆ หรือ ความเร็วรอบที่เหมาะสม ในกรณีที่สมมุติเหตุการณ์ว่า โหลดเข้าคอมเพรสเซอร์ต่ำมาก จนเกิดการเซอร์จขึ้น