

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ความสำคัญของพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มสูงขึ้นได้นำไปสู่การใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle: ORC) อย่างแพร่หลาย เพื่อนำพลังงานหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำความร้อนระดับอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีจุดเด่นคือ ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำ ต้องการการซ่อมบำรุงน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Biswas et al., 2022)

นอกจากนี้ ยังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง (Tchanche et al., 2011) โดยจากการสำรวจในปี ค.ศ. 2016 มีการติดตั้งรวมกันมากกว่า 2,700 MW (Li et al., 2023) ทั้งนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีเหมาะสำหรับแหล่งความร้อนพลังงานหมุนเวียนระดับอุณหภูมิต่ำถึงต่ำ เช่น ไบโอแมส [(Colwell et al., 2023); (Roumpedakis et al., 2019); (Kalina et al., 2019)] พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Marrasso et al., 2016) และพลังงานแสงอาทิตย์ (Ahmed et al., 2007)

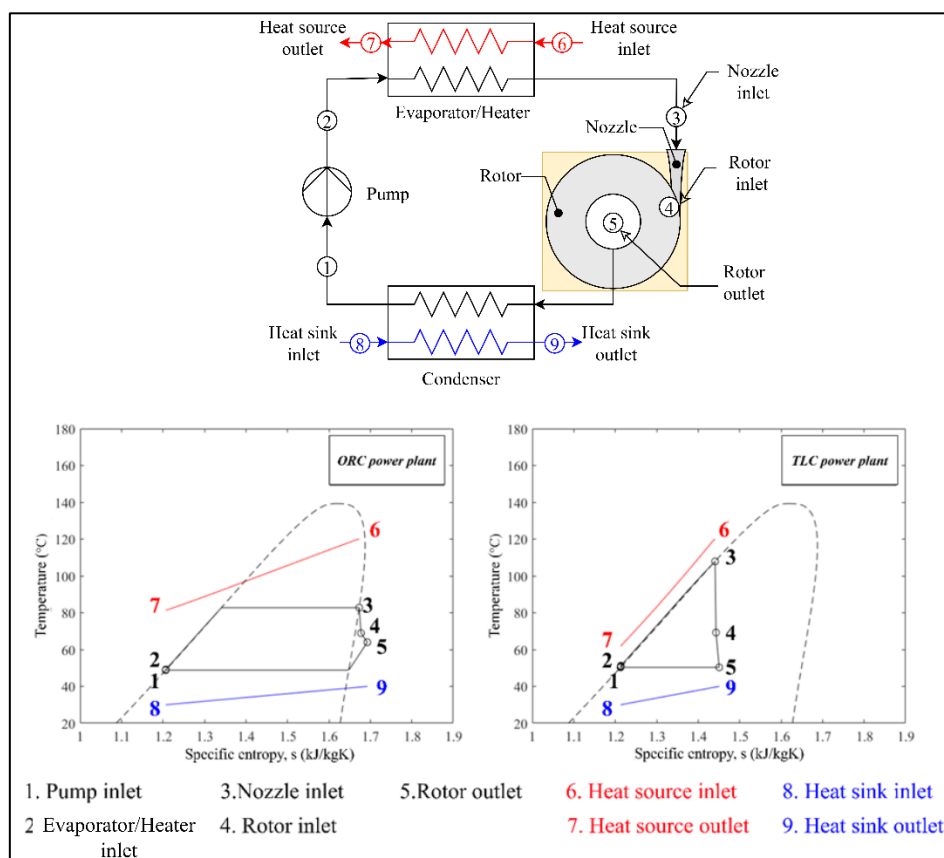
โรงไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นอีกชนิดที่น่าสนใจ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรทรีแอลซี (Trilateral Cycle–Organic Rankine Cycle: TLC) ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบทั้งสองอยู่ที่สถานะของสารทำงานก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ โดยในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี สารทำงานจะอยู่ในสถานะไออิ่มตัว (Saturated vapor) ขณะที่ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรทรีแอลซี สารทำงานจะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการทำงานได้จากผังอุณหภูมิต่อเอนโทรปีจำเพาะของทั้งสองระบบดังแสดงในรูปที่ 1.1

ความสำคัญของพลังงานหมุนเวียนที่เพิ่มสูงขึ้นได้นำไปสู่การใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle: ORC) อย่างแพร่หลาย เพื่อนำพลังงานหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้า โดยโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี เป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำความร้อนระดับอุณหภูมิต่ำกลับมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีจุดเด่นคือ ใช้เงินลงทุนเริ่มต้นต่ำ ต้องการการซ่อมบำรุงน้อย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Biswas et al., 2022)

นอกจากนี้ ยังได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง (Tchanche et al., 2011) โดยจากการสำรวจในปี ค.ศ. 2016 มีการติดตั้งรวมกันมากกว่า 2,700 MW (Li et al., 2023) ทั้งนี้ โรงไฟฟ้าวัฏจักรโอ

อาร์ชีเหมาะสำหรับแหล่งความร้อนพลังงานหมุนเวียนระดับอุณหภูมิปานกลางถึงต่ำ เช่น ไบโอบีโอมัส [(Colwell et al., 2023); (Roumpedakis et al., 2019); (Kalina et al., 2019)] พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Marrasso et al., 2016) และพลังงานแสงอาทิตย์ (Ahmed et al., 2007)

โรงไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งเป็นอีกชนิดที่น่าสนใจ คือโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซี (Trilateral Cycle–Organic Rankine Cycle: TLC) ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างระบบทั้งสองอยู่ที่สถานะของสารทำงานก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ โดยในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี สารทำงานจะอยู่ในสถานะไออิ่มตัว (Saturated vapor) ขณะที่ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซี สารทำงานจะเป็นของเหลวอิ่มตัว (Saturated liquid) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบลักษณะการทำงานได้จากผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของทั้งสองระบบดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ผังอุปกรณ์และสถานะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและทีแอลซี

โดยการศึกษาของ Fischer (2011) ได้ทำการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรทีแอลซีโดยใช้สารทำงานเป็นน้ำ และเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้สารทำงานเป็นไซโคลเพนเทน ภายใต้

เงื่อนไขแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 280 °C และกำหนดประสิทธิภาพไอโซโทรปิกของเทอร์โบและปั๊ม เท่ากับ 85% และ 65% ตามลำดับ โดยให้กำลังสุทธิของทั้งสองระบบเท่ากับ 1 MW ผลการจำลอง พบว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีให้ประสิทธิภาพสูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี 13% หมายความว่า โรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีสามารถเปลี่ยนพลังงานจากแหล่งความร้อนเป็นกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม การใช้สารทำงานในสถานะของเหลวก่อนเข้าเทอร์โบอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของ เทอร์โบ ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวยังไม่ได้กล่าวถึงชนิดของเทอร์โบที่ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่สามารถทนต่อความเป็นกรดได้

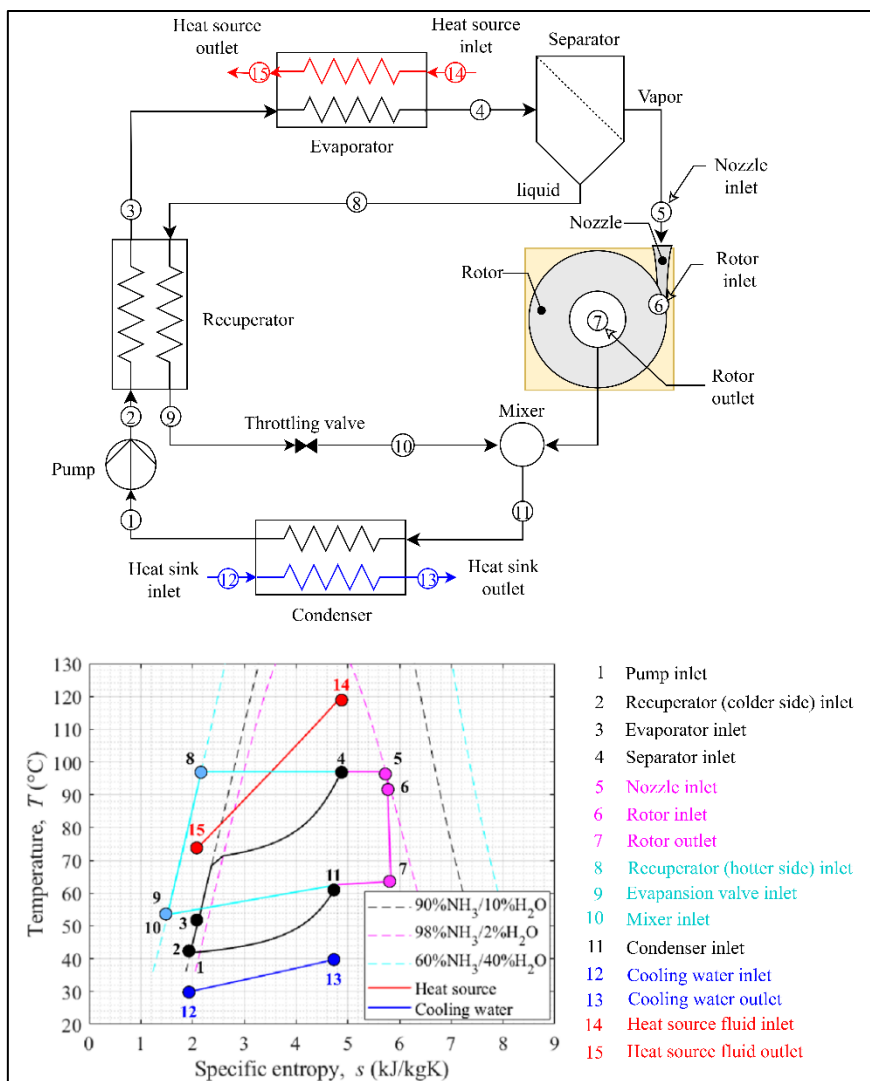
นอกจากนี้ White (2021) สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่ใช้ Radial inflow โดยใช้แหล่ง ความร้อนจากไอเสียที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้ประสิทธิภาพของเทอร์โบและปั๊มที่ 80% และ 70% ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้สารทำงานชนิด Siloxanes ที่สถานะของเหลวอิ่มตัว สามารถเพิ่มกำลังงาน สุทธิได้ถึง 15% เมื่อเทียบกับการใช้สารทำงานในสถานะไออิ่มตัว อย่างไรก็ตาม การใช้สารทำงานใน สถานะของเหลวทำให้ต้องเพิ่มขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ต้นทุนการลงทุน เริ่มต้นอาจสูงขึ้น และบทความนี้ไม่ได้ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกรณีดังกล่าว นอกจากนี้ เทอร์โบชนิด Radial inflow ยังมีรูปทรงซับซ้อน ซึ่งอาจทำให้ต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น

จากการทำปรีทัศน์วรรณกรรม พบว่าอีกหนึ่งวัฏจักรสำหรับโรงไฟฟ้าที่น่าสนใจ คือวัฏจักรคาลินา โดยอุปกรณ์และผังของดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยจุดเด่นคือมีการเพิ่มเซพาราเตอร์ (Separator) เพื่อแยกเฉพาะสารทำงานที่เป็นไอเข้าเทอร์โบเพื่อลดการสึกหรอของเทอร์โบ โดยจากการศึกษา ของ Kalina (1984) พบว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงดันที่ใช้ Bottoming cycle โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามี ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด 52% ในขณะที่ใช้โรงไฟฟ้าแรงดันวัฏจักรโออาร์ซีให้ประสิทธิภาพเชิง ความร้อนเท่ากับ 39% ซึ่งน้อยกว่าอยู่ 20% ทำให้วัฏจักรคาลินาเป็นวัฏจักรที่น่าสนใจ เนื่องจากมี ศักยภาพในการเปลี่ยนความร้อนเป็นไฟฟ้าได้สูง อย่างไรก็ตาม จุดด้อยสำคัญของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาคือมีอุปกรณ์ที่ซับซ้อนอาจส่งผลให้ต้นทุนสูงได้

อีกทั้ง การศึกษาของ Yari et al. (2015) ได้จำลองเปรียบเทียบโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 และโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่แหล่งความร้อน 120 °C โดย กำหนดประสิทธิภาพของเทอร์โบเท่ากับ 85% ผลการเปรียบเทียบพบว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีซึ่ง ใช้สารทำงานที่มีความเป็นกรดต่ำก่อนเข้าเทอร์โบให้กำลังงานสุทธิสูงสุด โดยสูงกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักร โออาร์ซีและโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 ถึง 67% และ 74% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการ ยอมให้สารทำงานอยู่ในสถานะของเหลวก่อนเข้าเทอร์โบสามารถเพิ่มพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้อย่างมี นัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม ในการจำลองโรงไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมกำหนดค่าประสิทธิภาพของเทอร์โบคงที่ ไม่ว่าความเป็นกรดสารทำงาน รวมถึงชนิดของสารทำงานเปลี่ยนแปลงที่เปลี่ยนแปลง ทำให้ไม่สามารถ

ประเมินผลกระทบของความเป็นไอของสารทำงานและคุณสมบัติของสารทำงานที่กระทบต่อประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์ได้อย่างชัดเจน

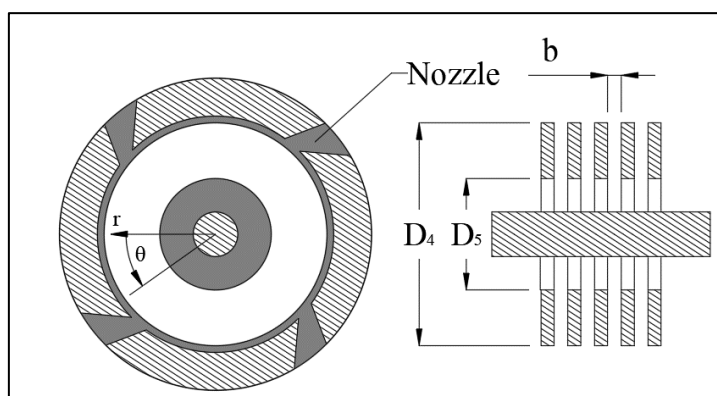


รูปที่ 1.2 ผังอุปกรณ์และสภาวะของสารทำงานแต่ละตำแหน่งของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11

จากการศึกษาของ ธงชัย เทียมทัด และ อาทิตย์ คุณศรีสุข (2565) พบว่า สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 120 และ 150 °C โดยทำการศึกษาเพื่อหาโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาสามลักษณะที่เหมาะสมได้แก่ KCS-34 KCS-11 และ KSG-1 ทั้งนี้ โดยผลการจำลองพบว่า KCS-34 ให้กำลังงานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 12.84 kW รองลงมาเป็น KCS-11 คือ 9.46 kW ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120 °C นอกจากนี้ ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยรวมของ KSG-1 นั้น

มีค่ามากกว่า 8.87% และ 8.15% ของ KSG-34 และ KCS-11 ตามลำดับ ดังนั้นจึงนำโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินามาเป็นอีกหนึ่งตัวเปรียบเทียบ โดยที่สนใจศึกษา KCS-11 เนื่องจาก มีขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยและได้กำลังสุทธิใกล้เคียงกับแบบ KCS-34 โดยผังอุณหภูมิและเอนโทรปีจำเพาะของโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเป็นดังรูปที่ 1.2

ทั้งนี้ ข้อจำกัดของการใช้สารทำงานในสถานะของเหลวอิมตัวคือการสึกหรอของเทอร์ไบน์ ซึ่งต้องใช้ เทอร์ไบน์เป็นพิเศษภายใต้ความเป็นไอต่ำ ปัจจุบันมีการศึกษาเทอร์ไบน์ชนิดหนึ่งซึ่งมีศักยภาพในการใช้งานกับสารทำงานในสถานะของเหลวได้ดี โดยที่ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกยังคงสูงคือ เทสลาเทอร์ไบน์ (Kachawong and Koonsrisuk, 2025) ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือสามารถทำงานกับสารที่มีความเป็นไอต่ำและมีต้นทุนต่ำ เนื่องจากมีรูปทรงที่ไม่ซับซ้อน อีกทั้ง จากรายงานของ Palagi et al. (2019) พบว่า ต้นทุนของเทอร์ไบน์คิดเป็นสัดส่วนราว 25% – 45% ของงบลงทุนทั้งหมดในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ดังนั้น หากใช้เทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งสามารถใช้งานได้กับสารทำงานในสถานะของเหลว และมีต้นทุนต่ำ จะช่วยเพิ่มสมรรถนะด้านอุณหพลศาสตร์และเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าได้



รูปที่ 1.3 ลักษณะภายในของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์

โดยเทสลาเทอร์ไบน์ซึ่งถูกพัฒนาโดย Nikola Tesla (1913) ซึ่งกำลังได้รับความสนใจเนื่องจากสามารถทำงานร่วมกับสารทำงานที่มีความเป็นไอของสารทำงานต่ำได้ อีกทั้งยังมีโครงสร้างที่เรียบง่ายซึ่งไม่ใช่ใบพัด (Bladeless turbine) โดยภายในโรเตอร์ประกอบด้วยดิสก์หลายแผ่นวางซ้อนกัน ดังรูปที่ 1.3 มีช่องว่างให้สารทำงานไหลผ่านเพื่อถ่ายเทพลังงาน โดยการไหลของสารทำงานจะเริ่มจากบริเวณขอบจานเข้าสู่ศูนย์กลางของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ การถ่ายเทพลังงานในเทสลาเทอร์ไบน์อาศัยอิทธิพลของการไหลแบบหนืด (Viscous flow effect) เพื่อส่งต่อโมเมนตัมจากของไหลไปยังโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งสามารถแปลงเป็นพลังงานกลได้ (Rusin et al., 2021)

ความพิเศษของเทสลาเทอร์ไบน์คือได้ออกแบบให้ใช้งานกับของไหลทั้งน้ำและอากาศ ซึ่งน่าสนใจว่าน้ำเป็นของเหลว จึงมีความเป็นไปได้ที่สามารถใช้กับโรงไฟฟ้าที่มีความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์ไบน์ต่ำได้ ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ตรงกับสถานการณ์ในระบบโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีหรือที่แอลซีเมื่อใช้กับแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิแหล่งความร้อนไม่แน่นอน ดังนั้น การนำเทสลาเทอร์ไบน์มาประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตพลังงานไฟฟ้า

นอกจากนี้ อีกหนึ่งในจุดแข็งของเทสลาเทอร์ไบน์คือโครงสร้างที่เรียบง่ายและต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าชนิดอื่น เช่น Scroll Screw Roots และ Piston expander เนื่องจากเทสลาเทอร์ไบน์ประกอบด้วยแผ่นดิสก์ที่เรียงซ้อนกัน จึงสามารถผลิตได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำ โดยจากการศึกษาของ Dumont et al. (2019) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบเทอร์ไบน์ชนิดดังกล่าวกับเทสลาเทอร์ไบน์ ที่ใช้ในโรงไฟฟ้าโออาร์ซี พบว่า เทสลาเทอร์ไบน์ มีต้นทุนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเทอร์ไบน์ชนิดอื่น และทำงานได้ภายใต้สภาวะที่หลากหลาย นอกจากนี้ งานวิจัยของ Talluri et al. (2020) ที่ทดลองโรงไฟฟ้าโออาร์ซีใช้สารทำงาน R1233zd(E) โดยใช้เทสลาเทอร์ไบน์ในการดึงกำลังจากสารทำงาน พบว่า กำลังที่ได้จากเทอร์ไบน์สูงถึง 371 W และมีประสิทธิภาพ 9.62% ที่ความเร็วรอบ 4,000 RPM

จากการทำศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าเทสลาเทอร์ไบน์เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจเพื่อนำไปใช้ในสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซี เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้ความเป็นไอต่ำได้ อีกทั้งยังมีรูปร่างไม่ซับซ้อน ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนทั้งในการสร้างเทอร์ไบน์ที่และโรงไฟฟ้าต่ำลง นอกจากนี้ เทสลาเทอร์ไบน์ยังได้มีการนำไปสร้างและทดสอบจริงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการออกแบบ สร้าง และเทคโนโลยีไปใช้เพื่อเพิ่มโอกาสการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้มากขึ้น

นอกจากนี้ พบว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีภายใต้สภาวะที่สารทำงานมีค่าความเป็นไอและสารทำงานที่แตกต่างกันก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ ส่วนใหญ่เพียงใช้ค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกแบบคงที่ ซึ่งอาจไม่สะท้อนความเป็นจริง เพราะประสิทธิภาพของเทอร์ไบน์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามสภาวะของสารทำงาน หากสามารถจำลองให้เห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้ ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้น รวมถึงแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์อีกด้วย

เป็นที่น่าสนใจว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซีที่มีข้อจำกัดเรื่องหาเทอร์ไบน์ที่ใช้งานได้ยาก เนื่องจากความเป็นไอของสารทำงานต่ำแม้จะได้กำลังสุทธิที่สูง ทำให้เป็นข้อจำกัดในการเลือกเทอร์ไบน์ รวมถึง โรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาเองที่จำเป็นต้องมีเซพาเรเตอร์เพื่อแยกเฉพาะสารที่เป็นไวก่อนเข้าเทอร์ไบน์เพื่อลดการเสียหายของเทอร์ไบน์ส่งผลให้อัตราการไหลของสารทำงานลดลงและระบบซับซ้อน แสดงให้เห็นว่า การเลือกเทอร์ไบน์มีความสำคัญ อย่างไรก็ตาม เทสลาเทอร์ไบน์แสดงให้เห็นถึงข้อเด่นเพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าวได้ ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงต้องการใช้เทสลาเทอร์ไบน์

เพื่อจำลองภายใต้สภาวะการทำงานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรและสารทำงานที่แตกต่างกันไปเพื่อให้นักศึกษา
พฤติกรรมของการทำงานของโรงไฟฟ้าและเตสลาเทอร์ไบน์

อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเตสลาเทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าอยู่บ้าง อาทิ การศึกษาของ
Song et al. (2017) ซึ่งใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 °C และสารทำงาน 7 ชนิด ได้แก่ R123,
R600, R600a, R236ea, R236fa, R245ca และ R245fa พบว่า R245ca ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดที่
38.7% และให้กำลังสุทธิ 1.25 kW ส่วนงานของ Zhang et al. (2023) ที่ใช้แหล่งความร้อน 100 °C
และเปรียบเทียบสารทำงาน R22, R417a, R134a, R152a และ R290 พบว่า R417a ให้กำลังจาก
เทอร์ไบน์สูงสุดที่ 1.2 kW และประสิทธิภาพ 36%

จากปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าสมบัติของสารทำงาน เช่น ความหนืดพลวัต
(Dynamic Viscosity) และ สัดส่วนการขยายตัว (Expansion ratio) มีบทบาทสำคัญในการเลือกสาร
สำหรับเตสลาเทอร์ไบน์ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบสารทำงานในระบบที่ใช้เตสลา
เทอร์ไบน์กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งหาเกณฑ์ในการเลือกสารทำงานที่
เหมาะสมในโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี โดยใช้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสารทำงาน รวมถึงความหนืดพลวัต
เป็นตัวแปรสำคัญ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาเป็นเพียงการศึกษาโดยใช้วัฏจักรของโรงไฟฟ้าแบบ
เดี่ยวซึ่งอาจจะยังไม่ครอบคลุม อีกทั้ง การเลือกสารทำงานโดยพิจารณาเพียงกำลังจากเทอร์ไบน์อาจ
ไม่เพียงพอ เพราะในโรงไฟฟ้าหากปั๊มใช้กำลังมาก อาจส่งผลให้กำลังสุทธิของระบบลดลงได้ ดังนั้น
งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงพิจารณาทั้งกำลังของเทอร์ไบน์และกำลังสุทธิของระบบร่วมกันในการในการ
พิจารณาสมรรถนะของโรงไฟฟ้า

นอกจากนี้ ในการเลือกสารทำงาน พบว่า R245fa เป็นสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับ
โรงไฟฟ้าโออาร์ซีที่ใช้อุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง [(Raksa-In et al., 2020); (Thematat et al., 2020);
(Phueksaphanrat et al., 2020)] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของสารนี้คือมีค่า Global Warming
Potential (GWP) สูงถึง 1,030 ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [(Tchanche et al., 2008);
(Tchanche et al., 2015)] โดยเฉพาะในบริบทปัจจุบันที่หลายประเทศเริ่มออกข้อบังคับควบคุมค่า
GWP เช่น สหภาพยุโรปที่กำหนดให้สารทำงานต้องมีค่า GWP ไม่เกิน 150 (European Parliament
and the Council, 2024) โดย ในปัจจุบันได้มีการนำสารทำงานทางเลือกมาใช้แทน R245fa ใน
ระบบทำความเย็น ซึ่งมีค่า GWP ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่น R1233zd(E) (GWP = 4.5) [(Eyerer
et al., 2016); (Dawo et al., 2021)], R1336mzz(Z) (GWP = 2) [(Dawo et al., 2021); (Yang et
al., 2019)], และ R1234ze(E) (GWP < 1) [(Yang et al., 2019); (Ziviani et al., 2019)]

นอกจากนี้การศึกษาของ Raksa-in et al. (2025) พบว่า การใช้สารทำงานเป็น ประเภทซีโอ
โทรปิก (Zeotropic mixtures) ช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้กับโรงไฟฟ้า ดังนั้น
วิทยานิพนธ์นี้ได้ขยายการศึกษาด้วยการผสมสารทำงานเป็นคู่เพื่อให้เกิดสารประเภทซีโอโทรปิก เพื่อ

เพิ่มศักยภาพในการเพิ่มกำลังสุทธิของระบบ จากการเพิ่มการดูดซับพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น [(Blondel et al., 2022); (Lu et al., 2024); (Wang et al., 2022)]

จากปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้น พบว่ายังไม่มีการศึกษาใดที่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าในการเลือกสรรทำงานควรให้ความสำคัญกับการเลือกเพื่อให้เหมาะสมกับเทอร์โบหรือโรงไฟฟ้ามากกว่ากัน ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ศึกษาทั้งการทำงานของระบบโรงไฟฟ้าโดยรวมและการทำงานของเตาเทอร์โบ เพื่อกำหนดเกณฑ์ในการเลือกสรรทำงานที่เหมาะสม

อีกประเด็นหนึ่งที่ยังขาดในการศึกษาคือการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้เตาเทอร์โบในโรงไฟฟ้าไออาร์ซีและโรงไฟฟ้าคาลินา ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจลงทุน โดยตัวชี้วัดทางเศรษฐศาสตร์ที่นิยมใช้ได้แก่ Discounted payback period (d-PbP), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) และ Levelized Cost of Electricity (LCOE) ซึ่งสามารถวัดทั้งระยะเวลาคืนทุน ผลตอบแทนตลอดอายุโครงการ และต้นทุนต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ [(Roumpedakis et al., 2020); (Mohammadi et al., 2020); (Quoilin et al., 2011)]

นอกจากนี้ ราคาของอุปกรณ์ภายในโรงไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จึงมีการใช้ดัชนีปรับราคาที่เกี่ยวข้องว่า Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI) ตามการแนะนำของ Vataavuk et al. (2002) โดยดัชนีราคานี้นิยมใช้ในการปรับราคาของโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี [(Boyaghchi et al., 2015); (Lemmens et al., 2016)] วิทยานิพนธ์นี้จึงเปรียบเทียบราคาของโรงไฟฟ้าวัฏจักรไออาร์ซี ที่คำนวณจาก correlation กับราคาจริงที่ใช้ในประเทศไทย เพื่อประเมินความเหมาะสมของวิธีการดังกล่าว

สำหรับการออกแบบเตาเทอร์โบให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุดนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความสำคัญ โดยงานของ Rice (1965) ได้เสนอแบบจำลองของโรเตอร์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย รวมถึงงานของ Cary (2010) ที่ใช้แบบจำลองนี้ในการออกแบบเทอร์โบสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซี อีกทั้ง Niknam et al. (2021) ยังได้เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองนี้กับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) พบว่าผลใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษา

แหล่งความร้อนที่ใช้ในการศึกษานี้คือแหล่งความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) ซึ่งมีความต่อเนื่องและเสถียร โดยจากข้อมูลของ Yongprawat (2022) พบว่าแหล่งความร้อนใต้พิภพในประเทศไทยมีอุณหภูมิระหว่าง 130 °C ถึง 160 °C โดยการเลือกให้น้อยกว่าช่วงแหล่งอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเนื่องจากเพื่อให้มั่นใจได้ว่าโรงไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถทำงานได้ นอกจากนี้ เมื่อนำพลังงานความร้อนมาใช้ อุณหภูมิที่ปรับความร้อนมาจะมีอุณหภูมิต่ำลง ดังนั้น จึงเลือกอุณหภูมิ 120 °C เพื่อใช้เป็นตัวแทนแหล่งความร้อนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของโรงไฟฟ้าโดยใช้วัฏจักรไออาร์ซีที่ใช้เตาเทอร์โบ โดยแบ่งออกเป็นทั้งสิ้น 4 การศึกษาได้แก่ การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการ

ออกแบบเตสลาเทอร์โบเพื่อให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด การศึกษาความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเตสลาเทอร์โบเพื่อให้เห็นซึ่งกำหนดค่าความเป็นไอของสารทำงานก่อนเข้าเทอร์โบเท่ากับ 0.00 (เรียกว่าโรงไฟฟ้าวัฏจักรที่แอลซี), 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.00 ว่าส่งผลอย่างไรกับการทำงานของเตสลาเทอร์โบและโรงไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาอิทธิพลของการใช้สารซีไอโทรปิกกับโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์โบ รวมถึงการจำลองโรงไฟฟ้าวัฏจักรคาลินาแบบ KCS-11 โดยทั้งสองระบบใช้เตสลาเทอร์โบและแหล่งความร้อนจากพลังงานความร้อนใต้พิภพที่อุณหภูมิ 120 °C จากนั้นจึงวิเคราะห์กำลังและประสิทธิภาพของเทอร์โบ พร้อมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วยเกณฑ์ Discounted Payback Period, Net Present Value, Internal Rate of Return และ Levelized Cost of Electricity เพื่อหาโรงไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานร่วมกับเตสลาเทอร์โบ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

โดยการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเตสลาเทอร์โบไปใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบเตสลาเทอร์โบที่ใช้ในโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุด
2. เพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเตสลาเทอร์โบ
3. เพื่อประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้าที่ใช้เตสลาเทอร์โบ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ใช้การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม MATLAB และ NIST REFPROP
2. ทดลองภายใต้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 °C และแหล่งทิ้งความร้อนอุณหภูมิ 30 °C
3. ใช้กำลังงานสุทธิของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและประสิทธิภาพของเตสลาเทอร์โบเป็นตัวแปรที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถหาขนาดของเตสลาเทอร์โบที่เหมาะสมและที่ใช้กับโรงไฟฟ้าวัฏจักรต่าง ๆ เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุดได้