บทที่ 4
อิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบของเทสลาเทอร์ไบน์

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ โดยใช้โรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีที่มีสารทำงานเป็น R236ea ซึ่งอยู่ในสถานะไออิ่มตัวก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ และใช้แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 120 ℃ การจำลองดำเนินการตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.6.1 โดยผลกระทบของแต่ละตัวแปรจะนำเสนอและวิเคราะห์เป็นรายประเด็น ทั้งนี้เงื่อนไขการทำงานพื้นฐานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและเทสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

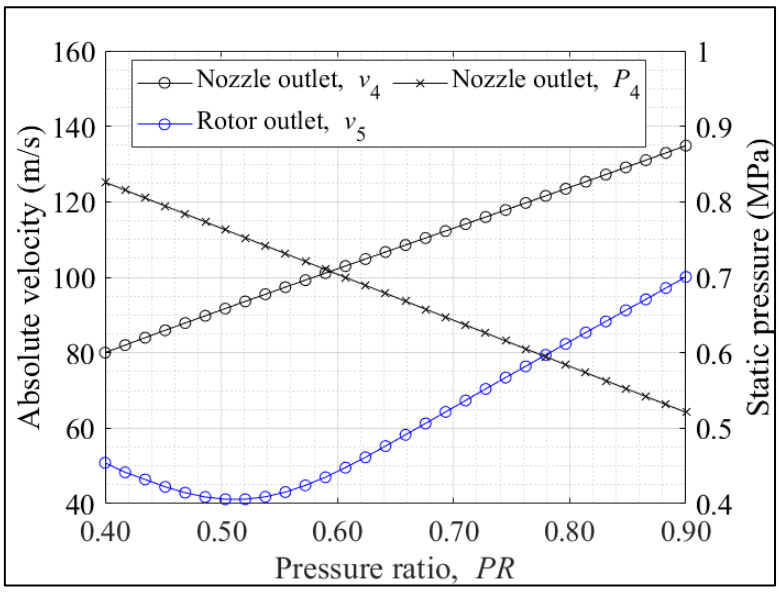
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทำงานพื้นฐานของโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซีและเทสลาเทอร์ไบน์ที่ใช้สำหรับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบ

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
P_3	218	MPa
P_5	40	MPa
สารทำงาน	R236ea	-
อัตราการไหลของสารทำงาน	1	kg/s
x_3	ไออิ่มตัว (1.0)	-
PR	*0.6	-
ω	*5,000	RPM
จำนวนแผ่นดิสก์ของโรเตอร์	*50	แผ่น
D_4	*400	mm
b	*1	mm

หมายเหตุ * ค่าพื้นฐานในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรออกแบบ

4.1 อัตราส่วนความดัน (PR)

ในการศึกษานี้ ได้วิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนความดัน (Pressure ratio: PR) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในขั้นตอนการลดความดันของสารทำงานผ่านนอซเซิล (Nozzle) โดยการลดความดันนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเร็วของสารทำงานก่อนเข้าสู่แผ่นดิสก์ในเทสลาเทอร์ไบน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนโมเมนตัม การศึกษานี้ได้ทำการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนความดันตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.9 เพื่อประเมินว่าการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน และคงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ โดยรูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลง PR ต่อความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล (v_4) ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากโรเตอร์ (v_5) และความดันของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิลหรือก่อนเข้าโรเตอร์ (P_5)



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความดันต่อความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากโรเตอร์ และความดันของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิล (v_4) เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความดันที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ความดันของสารทำงานลดลง อย่างไรก็ตาม พบพฤติกรรมที่น่าสนใจในช่วงอัตราส่วนความดันระหว่าง 0.4 ถึง 0.5 ซึ่งเป็นช่วงที่ความเร็วของสารทำงานหลังจากผ่านโรเตอร์ (v_5) กลับมีแนวโน้มลดลง และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่ออัตราส่วนความดันเกิน 0.5 ปรากฏการณ์นี้ แสดงให้เห็นว่า ในช่วงอัตราส่วนความดันช่วง 0.4–0.5 ความเร็วของสารทำงานยังอยู่

ในระดับที่โรเตอร์สามารถลดความเร็วได้ดี แต่เมื่ออัตราส่วนความดันสูงกว่า 0.5 ความเร็วของสารทำงานออกจากนอซเซิลเพิ่มขึ้นจนโรเตอร์ไม่สามารถถ่ายโอนโมเมนตัมได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานหลังโรเตอร์กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง โดยค่าความเร็วต่ำสุดหลังโรเตอร์อยู่ที่ 40 m/s ที่อัตราส่วนความดัน 0.5

นอกจากนี้ เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความดันที่ออกจากนอซเซิลมีค่าลดลง (P_5) ซึ่งอาจส่งผลให้เทสลาเทอร์ไบน์ดึงกำลังจากความดันของสารทำงานได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์ขึ้นอยู่กับสองอิทธิพล ได้แก่ กำลังจลน์ (Kinetic power: KE) และกำลังจากความดัน (Pressure power: PE) โดยการเพิ่มของอัตราส่วนความดันส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานออกจากนอซเซิลเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันก็ทำให้ความดันน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้เทสลาเทอร์ไบน์ให้กำลังและประสิทธิภาพออกมาสูง ดังนั้นต้องหาค่าอัตราส่วนความดันที่ทำให้เกิดสมดุลระหว่างกำลังจลน์และกำลังจากความดันที่เทสลาเทอร์ไบน์ผลิตได้

โดยสามารถคำนวณกำลังจลน์ของสารทำงานได้จากสมการที่ 4.1 และกำลังจากความดันได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งทั้งสองสมการใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ในการถ่ายโอนกำลังจากสารทำงานในแต่ละกรณี

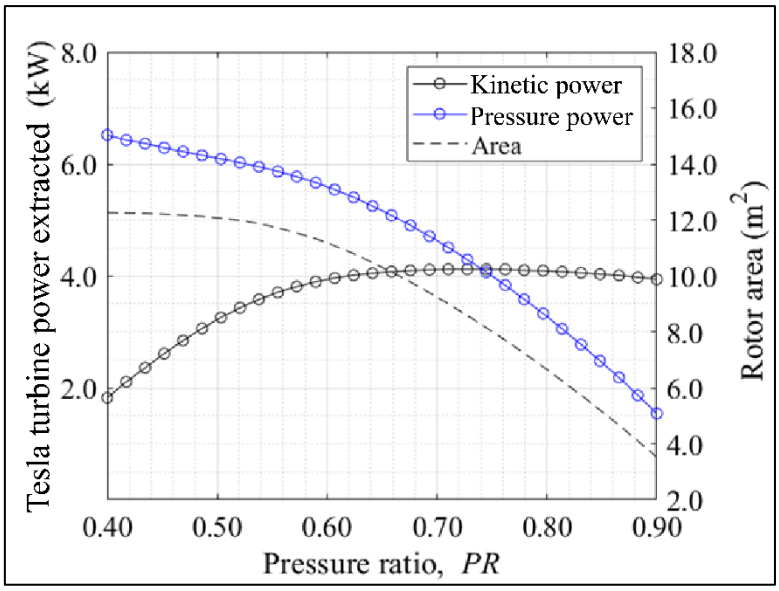
$$KE = 0.5\dot{m}_{wf}\left(v_4^2 - v_5^2\right) \tag{4.1}$$

$$PE = \dot{m}_{wf}\left(h_4 - h_5\right) \tag{4.2}$$

นอกจากนี้ การลดลงของความดันของสารทำงานอันเนื่องมาจากการเพิ่มอัตราส่วนความดันยังส่งผลให้พื้นที่ผิวที่สารทำงานสัมผัสกับโรเตอร์ด้วยเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนโมเมนตัม (Momentum transfer area: A_{rotor}) โดยสามารถคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนโมเมนตัมภายในโรเตอร์ได้จากสมการที่ 4.3

$$A_{rotor} = 0.5N_{disk}\left(D_4^2 - D_5^2\right) \tag{4.3}$$

โดยผลของกำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่แลกเปลี่ยนของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 4.2

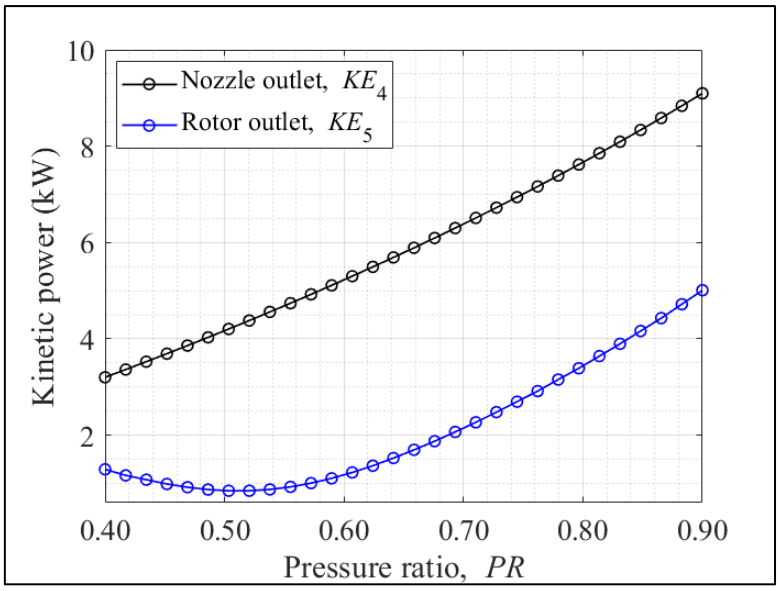


รูปที่ 4.2 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.2 สามารถสังเกตได้ว่า เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.4 ถึง 0.7 การดึงกำลังจลน์จากสารทำงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่ามากที่สุดที่อัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.7 ก่อนจะลดลงเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้นต่อไป

ทั้งนี้แนวโน้มดังกล่าวมีจุดสูงสุดที่ไม่สอดคล้องกับแนวโน้มในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความดันที่ทำให้สารทำงานลดความเร็วได้มากที่สุด คือที่อัตราส่วนความดัน 0.5 เนื่องจากกำลังจลน์ได้ดีจำเป็นต้องดูที่ ความแตกต่างของกำลังจลน์ของสารทำงานระหว่างทางออกของนอซเซิลและทางออกของโรเตอร์ ($0.5\left(v_4^2 - v_5^2\right)$) ว่ามีความแตกต่างมากที่สุด จึงเป็นตัวบอกว่าดึงพลังงานได้ดี

ดังนั้น เพื่อให้เห็นภาพรวมของกระบวนการถ่ายเทกำลังจลน์จากสารทำงานภายในโรเตอร์สามารถพิจารณาได้จากค่ากำลังจลน์ของสารทำงานก่อนและหลังผ่านโรเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กำลังจนล์ที่ออกจากนอซเซิลและออกจากโรงเตอร์เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป

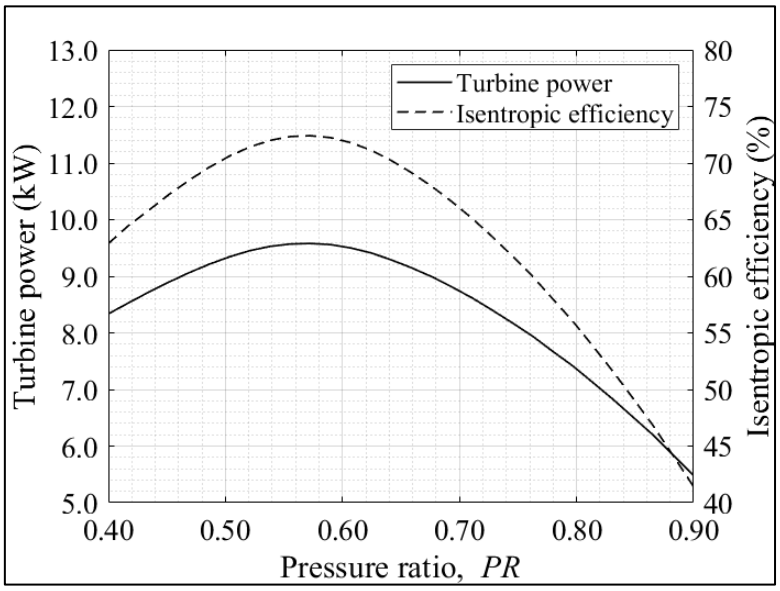
จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นแนวโน้มของกำลังที่ถูกดึงออกจากโรเตอร์ในรูปของกำลังจลน์ พบว่าอัตราส่วนความดันที่ทำให้โรเตอร์สามารถดึงกำลังจลน์ได้มากที่สุดคือที่อัตราส่วนความดันเท่ากับ 0.7 ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ในรูปที่ 4.1 ที่แสดงให้เห็นว่าความเร็วของสารทำงานหลังผ่านโรเตอร์มีแนวโน้มลดลงน้อยลงเมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงกำลังจลน์ในช่วงอัตราส่วนความดัน 0.7 มีค่ามากที่สุด

ทั้งนี้สังเกตุได้ว่า เมื่ออัตราส่วนความดังเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วของสารทำงานและกำลังจลน์เพิ่มสูงขึ้นดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ควรจะส่งผลให้ดึงกำลังจลน์ได้มากขึ้นตามไปด้วย แต่เพิ่มถึงค่า ๆ หนึ่งแล้วมีแนวโน้มลดลง โดยเหตุผลดังกล่าวเกิดจากกระบวนการออกแบบของขนาดโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์สำหรับโรงไฟฟ้าวัฏจักรโออาร์ซี ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

โดยในกระบวนการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ ได้หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์ (D_5) เพื่อให้ความดันที่คอนเดนเซอร์มีค่าเท่ากับเงื่อนไขที่ได้ออกแบบไว้สำหรับโรงไฟฟ้า ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อให้ได้กำลังสุทธิสูงที่สุด (รายละเอียดของการจำลองโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์สามารถดูได้ในหัวข้อ 3.2) โดยเมื่อค่าอัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความดันที่เข้าสู่โรเตอร์ลดลง ตัวอย่างเช่น เมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนจาก 0.4 เป็น 0.9 ความดันจะลดลงจาก 0.82 MPa เหลือ 0.52 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งทำให้สารทำงานไม่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ภายในโรเตอร์มากเพื่อลดความดันให้เท่ากับค่าที่ออกแบบไว้ส่งผลให้พื้นที่ภายในโรเตอร์ลดลงไปด้วย อาทิ พบว่าพื้นที่ลดลงจาก 12 m² เหลือเพียง 3.8 m² เมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มจาก 0.4 เป็น 0.9 เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของโรเตอร์มีค่ามากขึ้น ทำให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมลดลงตามไปด้วย ดัง

แสดงในรูปที่ 4.2 จากเหตุผลดังกล่าว แม้ว่าความเร็วของสารทำงานที่ออกจากนอซเซิลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนความดันเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้หมายความว่าการดึงกำลังในรูปของกำลังจลน์จะเพิ่มขึ้นตามเสมอไป

เทสลาเทอร์ไบน์ยังดึงกำลังในรูปของความดันอีกด้วยดังนั้นจากผลในรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่ออัตราส่วนความดันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความดันลดลงและทำให้โรงเตอร์ดึงกำลังในรูปของความดันลดลงตามไปด้วย ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมเพื่อให้เทสลาเทอร์ไบน์ให้กำลังออกมาสูงที่สุดจึงต้องทำให้เกิดสมดุลทั้งการดึงกำลังในรูปกำลังจลน์และกำลังจากความดัน โดยสามารถแสดงออกมาในรูปของกำลังจากเทสลาเทอร์ไบน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์และประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเมื่ออัตราส่วนความดันเปลี่ยนแปลงไป

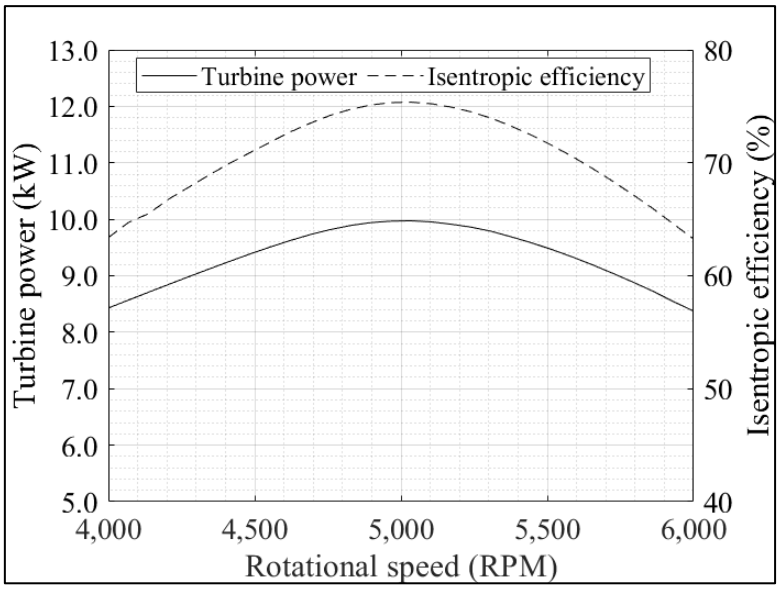
จากรูปที่ 4.4 พบว่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมในการทำงานของเทสลาเทอร์ไบน์คือ 0.57 ซึ่งเป็นจุดที่โรเตอร์สามารถดึงกำลังจากสารทำงานได้มากที่สุด ทั้งในรูปของกำลังจลน์และกำลังจากความดัน ส่งผลให้ได้กำลังจากเทอร์ไบน์สูงสุดเท่ากับ 11.5 kW และมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกอยู่ที่ 73%

อย่างไรก็ตาม ค่าของอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ เงื่อนไขการทำงานของระบบ ชนิดของสารทำงาน และสภาวะของสารทำงานก่อนเข้าสู่เทอร์ไบน์ ดังนั้น

การศึกษาผลในบทที่ 5 6 และ 7 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์ภายใต้เงื่อนไขการทำงานของโรงไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ ได้ถูกใช้เพื่อหาค่าอัตราส่วนความดันที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถทำให้เทสลาเทอร์ไบน์ผลิตกำลังได้สูงสุดภายใต้แต่ละเงื่อนไขที่กำหนด

4.2 ความเร็วรอบของการทำงาน (ω)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบของเทสลาเทอร์ไบน์ ซึ่งจากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรม [Song et al., 2017; Talluri et al., 2018] พบว่า ความเร็วรอบเป็นอีกหนึ่งตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยมีค่าที่เหมาะสมซึ่งสามารถทำให้เทอร์ไบน์ผลิตกำลังได้สูงที่สุด ดังนั้นจะได้เปลี่ยนความเร็วรอบของโรเตอร์ในเทสลาเทอร์ไบน์จาก 4,000 RPM ถึง 6,000 RPM และคงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ โดยผลของกำลังและประสิทธิภายไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วรอบของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังรูปที่ 4.5



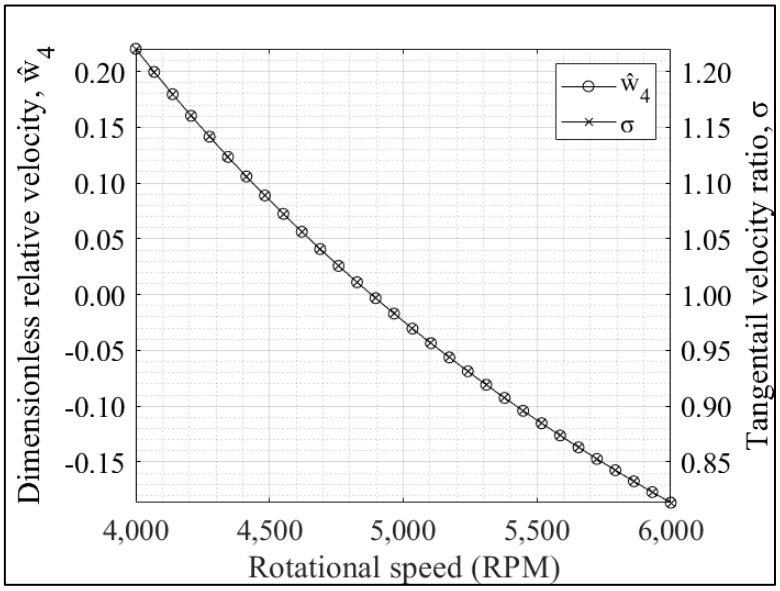
รูปที่ 4.5 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบ 5,000 RPM เป็นจุดที่ทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยตัวแปรที่ใช้ในการประเมินความเร็วรอบที่ใช้ได้แก่ ตัวแปรไรมิติของสัดส่วนความเร็วที่ตำแหน่งขอบของโรเตอร์ (Dimensionless velocity ratio: $\hat{W}_4$) (Song et al. 2017) ดังสมการที่ 4.4 และ อัตราส่วนของความเร็วในแนวสัมผัส (Tangential velocity ratio: σ) (Talluri et al., 2018) ดังสมการที่ 4.5

$$\hat{W}_4 = \frac{\left(v_{\theta 4} - U_{\theta 4}\right)}{U_{\theta 4}} = \frac{\left(v_{\theta 4} - \omega r_4\right)}{\omega r_4} \tag{4.4}$$

$$\sigma = v_{\theta 4} / U_4 = v_{\theta 4} / \omega r_4 \tag{4.5}$$

ทั้งสองอัตราส่วนนี้เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงระดับความใกล้เคียงระหว่างความเร็วของโรเตอร์ที่ตำแหน่งทางเข้า (U_4) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วรอบ (ω) และรัศมีของโรเตอร์ภายนอก (r_4) กับความเร็วของสารทำงานในแนวสัมผัส ($v_{\theta 4}$) โดยอัตราส่วน $\hat{W}_4$ จะมีค่าใกล้ศูนย์เมื่อความเร็วของโรเตอร์และความเร็วของสารทำงานมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่ σ จะมีค่าใกล้ 1 ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน โดยผลของ $\hat{W}_4$ และ $v_{\theta 4}$ เมื่ออัตราการไหลของสารทำงานเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 4.6

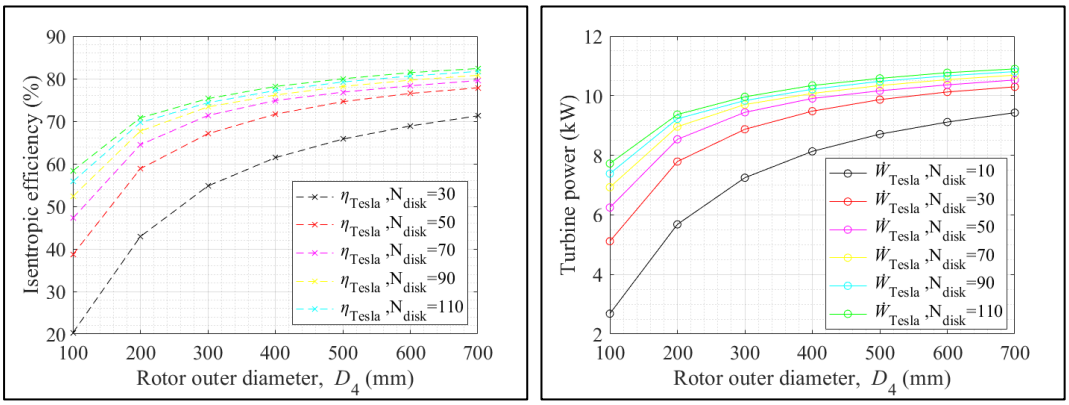


รูปที่ 4.6 Dimensionless velocity ratio และ Tangential velocity ratio ของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อความเร็วรอบของเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ที่ 5,000 เป็นจุดที่มีค่า $\hat{W}_4$ และ $v_{\theta 4}$ เท่ากับ -0.03 และ 0.97 ตามลำดับ กล่าวคือความเร็วของโรเตอร์ช้ากว่าสารทำงานเล็กน้อย ส่งผลทำให้ได้ค่ากำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูง ดังนั้นในการศึกษาผลในบทที่ 5 6 และ 7 ได้ทำการหาความเร็วรอบสำหรับเทสลาเทอร์ไบน์ในแต่ละเงื่อนไขเพื่อให้ได้กำลังจากเทอร์ไบน์สูงที่สุด

4.3 เส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์ (D_4) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk})

ในหัวข้อนี้เป็นผลการศึกษาอิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์ (D_4) และจำนวนแผ่นของโรเตอร์ (N_{disk}) ส่งผลอย่างไรกับกำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยคงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ได้กำลังสูงที่สุดของโรเตอร์แต่ละขนาดดังแสดงในหัวข้อนี้ได้หาอัตราส่วนความดันและความเร็วรอบที่เหมาะของโรเตอร์แต่ละขนาดดังในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 เพื่อเปรียบเทียบในสภาวะที่ได้กำลังทางเทอร์ไบน์สูงที่สุด โดยผลเป็นดังรูปที่ 4.7



(ก) (ข)

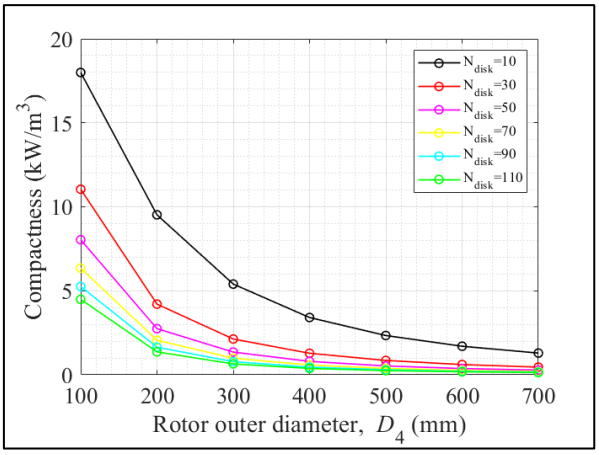
รูปที่ 4.7 ผลกระทบเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป: (ก) กำลังของเทสลาเทอร์ไบน์; (ข) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกโรเตอร์และจำนวนดิสก์เพิ่มมากขึ้นทำให้กำลังและประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก เมื่อผ่านศูนย์กลางของภายนอกโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมมากขึ้น จึงส่งผลให้ได้กำลังมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อจำนวนแผ่นดิสก์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้สารทำงานที่ไหลต่อช่องน้อยลง ส่งผลให้สารทำงานค่อย ๆ แลกเปลี่ยนโมเมนตัมส่งผลให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและจำนวนแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่ง การเพิ่มขึ้นของกำลังและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกจะเริ่มมีอัตราการเพิ่มลดลง ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการที่สารทำงานเข้าสู่เทสลาเทอร์ไบน์ได้ใช้กำลังจนเกือบเต็มศักยภาพแล้ว จึงไม่สามารถดึงกำลังเพิ่มเติมออกมาได้อีก

นอกจากนี้ ในการศึกษาของ Dumont et al. (2019) ได้เสนอใช้ “ความกะทัดรัด” (Compactness) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพเฉพาะเชิงปริมาตรของเทอร์ไบน์ โดยนิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังสุทธิและปริมาตรของเครื่องจักร เมื่อค่าความกะทัดรัดสูงขึ้น จะสะท้อนว่าเทอร์ไบน์สามารถผลิตกำลังได้มากขึ้นต่อหน่วยปริมาตรที่เล็กลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำ compactness มาใช้เป็นหนึ่งในตัวแปรประกอบการพิจารณาเลือกขนาดโรเตอร์ โดยคำนวณตามสมการที่ 4.6 และผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.8

$$Compactness = \frac{4\dot{W}_{Tesla}}{\pi D_4^2 \left(bN_{disk} + \delta_{disk} \left(N_{disk} - 1 \right) \right)} \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.8 ความกะทัดรัดเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์เปลี่ยนแปลงไป

จากผลการวิเคราะห์ พบว่าการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์และจำนวนดิสก์อย่างต่อเนื่อง แม้จะช่วยเพิ่มกำลังของเทอร์ไบน์ แต่ไม่สามารถเพิ่มกำลังของเทอร์ไบน์ต่อปริมาตรของโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ ส่งผลให้ค่าวัดความกระทัดรัด (Compactness) ลดลงตามไปด้วย

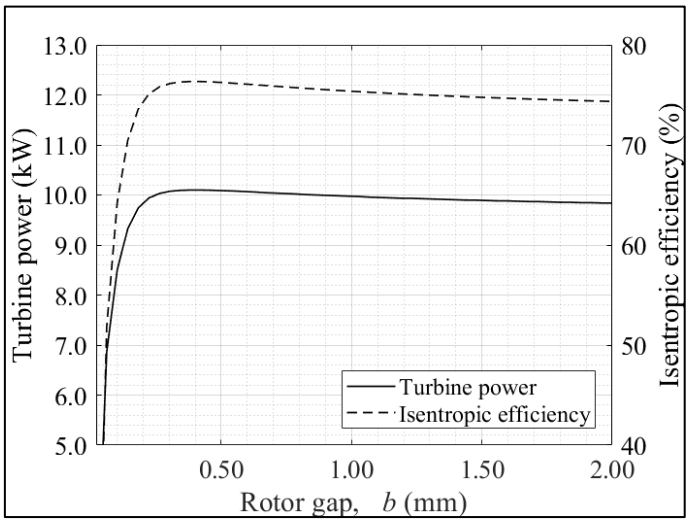
ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงกำหนดขนาดโรเตอร์ที่เหมาะสมไว้ที่

1) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์: 400 mm
2) จำนวนแผ่นดิสก์: 50 แผ่น

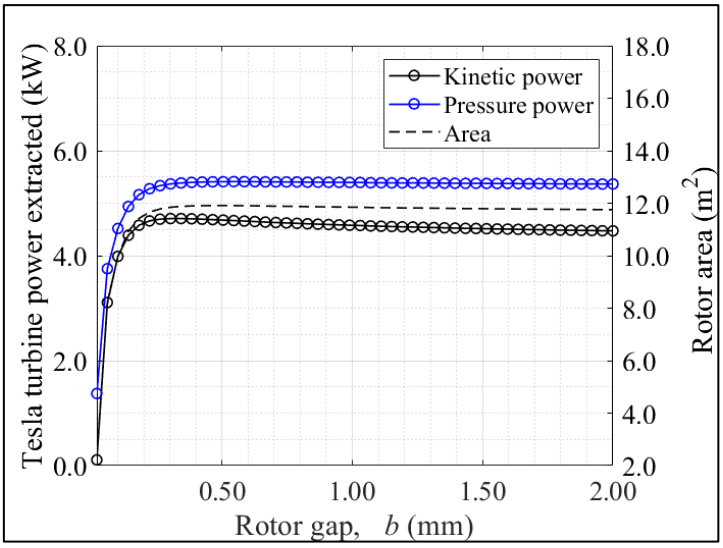
เนื่องจากเมื่อขยายขนาดเหนือกว่านี้แล้ว พบว่าการเพิ่มกำลังขับและประสิทธิภาพเชิงไอโซนโทรปิกมีอัตราการเพิ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ความกระทัดรัดไม่เปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่าขนาดดังกล่าวเป็นจุดสมดุลที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโรเตอร์ของเทสลาเทอร์ไบน์ในบทที่ 5 6 และ 7

4.4 ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ (b)

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ภายนอกของโรเตอร์ (b) โดย ต่อกำลังและประสิทธิภาพของเทสลาเทอร์ไบน์ โดยจากการทำปริทัศน์วรรณกรรม พบว่าค่า b เป็นอีกค่าถ้าเลือกให้เหมาะสมจะทำให้ได้กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกออกมาสูง (Manfrida et al., 2019) โดยในหัวข้อนี้กำหนดให้คงที่ค่าพื้นฐานอื่น ๆ โดยจะเปลี่ยนค่า b ในช่วง 0.1 ถึง 2 mm เพื่อศึกษาอิทธิพลดังกล่าวโดยผลเป็นดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 กำลังและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของเทสลาเทอร์ไบน์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.10 กำลังจลน์ กำลังจากความดัน และพื้นที่ของโรเตอร์เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ลดลงต่ำกว่า 0.4 mm ค่ากำลังขับและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่ระยะห่าง 0.4 mm โดยให้กำลังขับสูงสุดเท่ากับ 10.09 kW และประสิทธิภาพไอโซนโทรปิก 76.33% หลังจากนั้น เมื่อระยะห่างแผ่นดิสก์มากกว่า 0.4 mm ค่ากำลังขับและประสิทธิภาพจะลดลงเล็กน้อย พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการดึงกำลังจลน์ การดึงกำลังจากความดัน ของสารทำงานภายในโรเตอร์และพื้นที่ภายในโรเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.10

จากรูปที่ 4.10 พบว่า กำลังที่ถูกถ่ายโอนภายในโรเตอร์ทั้งในรูปของกำลังจลน์และกำลังจากความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ลดลงจนถึงค่า 0.4 mm ซึ่งส่งผลให้ได้กำลังขับและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกสูงสุดตามที่ปรากฏในรูปที่ 4.9

โดยที่ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ยิ่งมีค่าน้อยส่งผลให้สามารถลดความดันของสารทำงานได้มากส่งผลให้ไม่จำเป็นต้องให้สารทำงานอยู่ภายในโรเตอร์มากนักความดันก็ถึงค่าที่ได้ออกแบบไว้ โดยปรากฏการดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จาก พื้นที่ของโรเตอร์ ซึ่งค่าของพื้นที่โรเตอร์มีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบกับการดึงกำลังในรูปกำลังจลน์ทำให้พื้นที่ในการลดความเร็วของสารทำงานลดลงตามไปด้วยทำให้การดึงกำลังในรูปของกำลังจลน์ลดลง

นอกจากนี้ การดึงกำลังในรูปของกำลังจากความดันก็ลดลงเช่นเดียวกันเมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เล็กลง ถึงแม้ว่าความดันทางเข้าและทางออกของโรเตอร์จะถูกกำหนดให้เท่ากัน (อัตราส่วนความดันคงที่) การลดลงของพื้นที่แลกเปลี่ยนโมเมนตัมอย่างรวดเร็วในพื้นที่น้อยทำให้เกิดเอนโทรปีจำเพาะเกิดขึ้นในกระบวนการสูงตามไปด้วย (Entropy generation) ส่งผลให้ประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกลดลงตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ถึงแม้ว่า ในงานจำลองจะพบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ 0.4 mm ให้กำลังสุทธิและประสิทธิภาพไอโซนโทรปิกสูงสุด แต่ค่าดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมในการผลิตจริง เนื่องจากระยะห่างที่แคบมากจะทำให้กระบวนการผลิตโรเตอร์ซับซ้อน งานวิจัยในวรรณกรรมก็รายงานผลที่แตกต่างกัน เช่น Manfrida et al. (2019) พบว่าจุดสมดุลอยู่ที่ระยะห่าง 0.7 mm เพื่อความเป็นไปในการนำผลการออกแบบไปผลิตจริง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์ที่ 1 mm ซึ่งค่าเท่ากับ 1 mm ได้เคยถูกสร้างออกมาเป็นชุดทดสอบจริงแล้วจากงานวิจัยของ Talluri et al. (2020) ดังนั้นค่าระยะห่างระหว่างแผ่นดิสก์เท่ากับ 1 mm เป็นค่าสำหรับการออกแบบในบทที่ 5 6 และ 7

โดยจากผลในบทที่ 4 เป็นเพียงการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเทสลาเทอร์ไบน์เท่านั้น ทั้งนี้ผลของขนาดและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเทสลาเทอร์ไบน์ เช่น อัตราส่วนความดันและความเร็วรอบโรเตอร์ จะขึ้นอยู่กับประเภทของโรงไฟฟ้าวัฏจักรและสารทำงาน อย่างไรก็ตาม สำหรับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของโรเตอร์และจำนวนแผ่นดิสก์ของโรเตอร์ได้ถูกกำหนดให้คงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 400 mm และ 50 แผ่น ตามลำดับ