



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

..... วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิง
คำนวณ

A Simulation of Water Flow through Vertical Axis Water Turbine Using CFD Program

نامผู้วิจัย นายวรยศ รัตนมาศ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(..... รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(..... อาจารย์กรรมมนต์ ชูประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประพจน์ ขุนทอง, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(..... รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

A Simulation of Water Flow through Vertical Axis Water Turbine Using CFD Program

โดย

นายวรยศ รัตนมาศ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรยศ รัตนมาศ 2557: การวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งโดยใช้
โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. 113 หน้า

พลังงานน้ำเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานของธรรมชาติซึ่งได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่สมัยบรรพ
บุรุษของมนุษย์ ปัจจุบันเมื่อพลังงานไฟฟ้าได้ถูกคิดค้น พลังงานน้ำจึงได้ถูกนำมาประยุกต์มาใช้ในการ
การผลิตกระแสไฟฟ้า ในช่วง 4 ทศวรรษที่ผ่านมากังหันน้ำชนิด Water Current Turbine ได้ถูก
พัฒนามาอย่างต่อเนื่องโดยมีหลักการการทำงานแบบเดียวกับกังหันลม จากการค้นคว้าข้อมูล
แหล่งน้ำภายในประเทศไทยพบว่ามีแม่น้ำอยู่หลายสายที่มีศักยภาพเพียงพอในการผลิต
กระแสไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความ
ยาวใบพัด 3 เมตร มาประยุกต์ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากไหลของกระแสน้ำและทำการลด
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงเหลือ 1.5 เมตร และความยาวใบพัด 1.5 เมตร เพื่อให้สอดคล้องกับการ
ติดตั้งและระดับน้ำในแม่น้ำน่านตลอดทั้งสาย

การวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการสร้าง
แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และทำการวิเคราะห์การไหลในแบบ 2 มิติ แบบจำลองปั่นป่วน
RNG k-epsilon ได้ถูกเลือกใช้ในการจำลองนี้ และได้ทำการสอบเทียบผลกับผลการทดลองจริง
ของ Rawling (2008) ผลจากการสอบเทียบผลของแบบจำลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับผลการ
ทดลองจริงซึ่งเป็นที่น่าพอใจ

จากการจำลองกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ความยาวใบพัด 1.5
เมตรที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที พบว่าที่ความเร็วกระแสน้ำทั้งสาม ค่า
ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ Tip Speed Ratio (TSR) 2.0 และค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
มีความใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว
กระแสน้ำ และการเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์ส์ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพ
เชิงพลังงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้การควบคุมกังหันน้ำแนวตั้งให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
เป็นไปได้ง่าย

Vorayos Ratanamart 2014: A Simulation of Water Flow through Vertical Axis Water Turbine Using CFD Program. Master of Engineering (Mechanical Engineering),
Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering.
Thesis Advisor: Associate Professor Chawalit Kittichaikarn, Ph.D. 113 pages.

Hydropower is one of the natural sources of energy which has been used since human ancestor. After electric power has been discovered, the hydropower has been applied to produce electricity. In the last 4 decades, the water turbine called Water Current Turbine has been developed incessantly following the same principle as wind turbine. It is also found that many rivers in Thailand have potential to produce electricity. Therefore this research work focuses on a study and application of vertical axis wind turbine 3 meter diameter and 3 meter blade length, to be used in water flow. However the turbine was decreased to size of 1.5 meter diameter and 1.5 meter blade length according to the level of water in Nan river.

Computational fluid dynamics (CFD) program was used in this research to simulate the flow over water turbine. The computer model was created and was analysed as 2 dimensional flows. Turbulent model RNG k-epsilon was selected in this research. The validation of this model was performed by comparing with the experimental data of Rawling (2008). The simulation results show good agreement and similar trend toward the experimental data.

The simulation of Vertical Axis Water Turbine (VAWT) with 1.5 meter diameter and 1.5 meter blade length at water speed of 0.5, 0.6 and 0.7 m/s were presented. All three water speeds have maximum power coefficient of 26.2 percent at Tip Speed Ratio (TSR) of 2.0. Therefore, when reducing VAWT diameter and blade length to 1.5 meter, the impact of changing flow speed and changing Reynolds number to power coefficient is insignificant. This makes controlling of Vertical Axis Water Turbine to achieve highest power coefficient much easier.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต กิตติชัยการ ประธานกรรมการที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและวางแผนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้
ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่ง
สอนและมอบความรู้อันประเสริฐยิ่งเพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ต่อไป และขอขอบคุณเพื่อน
ที่ น้องทุกท่าน ที่ได้มีส่วนในการให้คำแนะนำ กำลังใจ ในงานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องสาว ผู้เป็นแรงผลักดัน ให้กำลังใจ
และให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ด้วยดีเสมอมา

วรยศ รัตนมาศ

ธันวาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	47
อุปกรณ์	47
วิธีการ	47
ผลและวิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	97
สรุป	97
ข้อเสนอแนะ	98
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	100
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	103
ภาคผนวก ข ข้อมูลแม่น้ำ	107
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 สถานะการไหลของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 3 เมตร	56
2 การตั้งค่า time step size ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 1.5 เมตรที่ ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที	56
3 การตั้งค่าความเร็วของการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 1.5 เมตรที่ ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที	57
4 แสดงจำนวนของกริดและแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร	64
5 แสดงจำนวนของกริดและแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร	66
ตารางผนวกที่	
ก1 ค่า time step size ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที	106
ก2 ค่าแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที	106

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงการเปลี่ยนของความดันและความเร็วของกังหันลมในอุดมคติ	8
2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ interference factor b	14
3 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ที่ Reynolds	17
4 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแพนอากาศ NACA0012	18
5 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแพนอากาศ NACA0015	19
6 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแพนอากาศ NACA0018	19
7 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแพนอากาศ NACA0021	20
8 Mark 1 River Turbine	21
9 Generated Unit และ Darrieus Turbine	24
10 ภาพบนคือโมเดลของ Betz ภาพล่างคือ Model ของ GGS	25
11 การทดลอง Vertical Axis Turbine ใน Towing Tank	26
12 แบบจำลอง 2 มิติ	27
13 แบบจำลอง 2 มิติและการทดลองจริงของกังหันน้ำแนวตั้ง	28
14 แบบจำลอง 2 มิติและค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันลมแนวตั้ง	29
15 กังหันลมแนวตั้งต้นแบบและค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ความเร็วลม 12 และ 6 เมตรต่อวินาทีที่ TSR ต่างๆ	30
16 แบบจำลอง Helical Turbine 3 มิติ	31
17 แสดงทิศทางการไหลของความเร็วผ่านกังหันน้ำแนวตั้ง	33
18 แสดงภาพแรงที่กระทำต่อใบพัด	35
19 แสดงภาพ Single Stream Tube	38
20 แสดงภาพ Multiple Stream Tube	39
21 แสดงภาพ Double Multiple Stream Tube	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 แสดงภาพ Vortex Model	43
23 Cascade Model	45
24 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำงานในงานวิจัยนี้	48
25 แสดงภาพโดเมนทั้งหมดของแบบจำลองสองมิติ	50
26 แสดงภาพแบบจำลองสองมิติบริเวณใบพัดทั้งสามใบที่ใช้ในการวิเคราะห์	50
27 ขนาดของโดเมนที่ใช้ในการสร้าง	51
28 การแบ่งโซนของส่วนที่เคลื่อนที่ไม่ได้และส่วนที่เคลื่อนที่ได้	52
29 การกำหนดขอบเขตในแบบจำลองสองมิติ	53
30 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแส น้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของแม่น้ำน่าน	59
31 แสดงค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ในการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งทั้งหมดแปดรอบ	52
32 แสดงภาพการกระจายความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งเมื่อหมุนไปทั้งหมดแปดรอบ	63
33 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่จำนวนกริด 66,322 กริด 112,369 กริด และ 246,790 กริด	65
34 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ที่จำนวนกริด 79,242 กริด 158,435 กริด และ 337,664 กริด	66
35 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริง (EXP) และผลการจำลอง (CFD) ที่ความเร็วกระแส น้ำ 2 เมตรต่อวินาที ของข้อมูลชุดที่หนึ่ง	68
36 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริง (EXP) และผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD) ที่ความเร็วกระแส น้ำ 2 เมตรต่อวินาที ของข้อมูลชุดที่สอง	68
37 ตำแหน่งของใบพัดทั้งสามใบที่มุมอะซิมุท 0, 90, 180 และ 270	70
38 แสดงการกระจายของความเร็วบริเวณรอบๆ ใบพัดใบที่ 3 ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตรที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแส น้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	72
39 แสดงการกระจายของแรงดันบริเวณรอบๆ ใบพัดใบที่ 3 ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตรที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแส น้ำ 0.62 เมตรต่อ วินาที	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
40 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆของใบพัดใบที่ 3 ที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ตามภาพ a), b) และ c) ตามลำดับ	74
41 แสดงแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆของใบพัดใบที่ 3 ที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ตามภาพ a), b) และ c) ตามลำดับ	75
42 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	76
43 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 ที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	76
44 แสดงค่าแรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	77
45 การกระจายแรงดันของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 1.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	78
46 การกระจายแรงดันของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	79
47 การกระจายแรงดันของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	79
48 การกระจายความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 1.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	80
49 การกระจายความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	80
50 การกระจายของความเร็วรอบๆกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที	81

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
51 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที	82
52 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 3.9 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที	82
53 แสดงค่าแรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที	83
54 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที	85
55 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 2.0, 2.5 และ 2.75 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที	85
56 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ความยาวใบ 1.5 เมตร	86
57 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตร	86
58 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ความเร็วน้ำ 0.6 เมตรต่อวินาที	88
59 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 2.0, 2.5 และ 2.75 ที่ความเร็วน้ำ 0.6 เมตรต่อวินาที	88
60 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ความเร็วน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที	89
61 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 2.0, 2.5 และ 2.75 ที่ความเร็วน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที	90
62 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในแต่ละ TSR ที่สภาวะความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที และ 0.62 เมตรต่อวินาที	92
63 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในแต่ละ TSR ที่สภาวะความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที 0.6 เมตรต่อวินาที และ 0.7 เมตรต่อวินาที	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
64 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในแต่ละ TSR ของกังหันน้ำ แนวตั้งขนาด 3 เมตรและ 1.5 เมตร ที่สภาวะความเร็วน้ำ 0.5 และ 0.62 เมตรต่อวินาทีและที่สภาวะความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ	96
ภาพผนวกที่	
ข1 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ ลุ่มน้ำปิง-วัง	108
ข2 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ ลุ่มน้ำแม่กลอง	109
ข3 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ ลุ่มน้ำชี	110
ข4 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ ลุ่มน้ำมูล	111
ข5 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ ลุ่มน้ำตาปี	112

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าปะทะของกังหันน้ำแนวตั้ง
b	=	interference factor
C, c	=	ค่าความยาวคอรัค
C_{DD}, C_d	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงจุด
C_m	=	ค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์
C_μ	=	constant in linear eddy viscosity models
C_n	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉาก
C_l	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก
C_p	=	ค่าสัมประสิทธิ์เชิงพลังงาน
C_t	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงในแนวเส้นสัมผัส
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$	=	ค่าคงที่ของ source and sink terms ของสมการ ε
D	=	แรงจุด
dx, dy, dz	=	อนุพันธ์ในแนวแกน X, Y และ Z
E	=	พลังงานจลน์
F	=	แรง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

F_D = แรงจุด

F_n = แรงในแนวตั้งฉาก

F_t = แรงในแนวเส้นสัมผัส

G_k = พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากความเร็วเฉลี่ย

G_b = พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการลอยตัว

H = ความสูงของกังหันลมแนวตั้ง

k = พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

L = แรงยก

L = รัศมีของกังหันน้ำแนวตั้งของสมการ C_m

m = มวล

$\dot{m}$ = อัตราการไหลของมวล

N = จำนวนใบพัดของกังหัน

u_d = interference factors

u_u = interference factors

P = กำลังของกังหันลม

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P' = power flux

P_{wind} = กำลังที่มีอยู่ในกระแสลม

R = รัศมีของกังหันน้ำแนวตั้ง

T_{avg} = แรงบิดเฉลี่ย

T_{net} = ผลรวมทอร์กที่เกิดขึ้นจากใบพัดทุกใบ

V = ความเร็วกระแสน้ำ

V_a = ความเร็วเหนี่ยวนำ (induced velocity)

V_n = ความเร็วในแนวตั้งฉาก (normal velocity)

V_c = ความเร็วเส้นสัมผัสผิว (tangential velocity)

V_∞ = ความเร็วลมที่ทางเข้า

W = ความเร็วสัมพัทธ์

Greek symbols

ε = การกระจายพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน

α = มุมปะทะ

λ = Tip Speed Ratio

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

θ	=	มุมองศาอะซิมุท
ω	=	ความเร็วรอบการหมุน
μ	=	ค่าความหนืดของของไหล
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล
คำย่อ		
CFD	=	Computational Fluid Dynamics
DNS	=	Direct Numerical Solution
LES	=	Large Eddy Simulation
RANS	=	Reynolds-Average Navire-Stokes
Re	=	Reynolds number
RNG	=	Renormalization Group
TSR	=	Tip Speed Ratio
VAWT	=	Vertical Axis Water Turbine

การวิเคราะห์การไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิง คำนวณ

A Simulation of Water Flow through Vertical Axis Water Turbine Using CFD

Program

คำนำ

แหล่งพลังงานในยุคปัจจุบัน เป็นสิ่งที่มวลมนุษยชาติขาดไม่ได้ เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีผลักดันให้ต้องพึ่งแหล่งพลังงานในการดำรงอยู่ ศึกษา และพัฒนา โดยมีแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลัก ในทุกวันนี้ทั่วโลกได้ตระหนักถึงการหมดไปของพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล พลังงานทดแทนจึงเป็นทางเลือกสำคัญในการหาแหล่งพลังงานแหล่งใหม่ เพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นในประเทศทั่วโลกได้ผลักดันนโยบายด้านพลังงานทดแทนออกมาเพื่อสร้างแหล่งพลังงานหลักใหม่ แหล่งพลังงานทดแทนนี้สามารถหาได้จากธรรมชาติและสามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้สามารถหาได้ตามธรรมชาติ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และหนึ่งในนั้นคือพลังงานน้ำ

พลังงานน้ำเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มาจากธรรมชาติ สะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด มนุษย์ได้พึ่งแหล่งน้ำในการดำเนินชีวิตมาตั้งแต่อดีตกาล และได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีมาตลอดเพื่อใช้พลังงานน้ำในการสร้างประโยชน์ด้านต่างๆ เช่น เพื่อการเกษตรกรรม เพื่อการชลประทาน รวมไปถึงเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ในประเทศต่างๆมีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ และประเทศไทยเองก็มีศักยภาพเพียงพอในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ ส่วนใหญ่การผลิตกระแสไฟฟ้าในประเทศไทยนั้นมาจากเขื่อน ซึ่งการสร้างเขื่อนจะต้องใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่มีการก่อสร้างเขื่อนจะได้รับผลกระทบ และถูกทำลาย ในยุคปัจจุบันมนุษย์ได้ตระหนักถึงระบบนิเวศน์และสภาพแวดล้อมมากขึ้น จากสถานะโลกร้อนที่ส่งผลกระทบไปทั่วโลก ดังนั้นในยุคสมัยใหม่จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมควบคู่ไปด้วย ในประเทศต่างๆมีเทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยไม่ต้องพึ่งเขื่อนขนาดใหญ่หรือการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงถ่านหินหรือเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง รวมไปถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกระแสน้ำไหลผ่านกังหันน้ำในแม่น้ำหรือในแหล่งน้ำขนาดเล็ก ซึ่งกังหัน

น้ำชนิดนี้ไม่ต้องการพื้นที่ขนาดใหญ่เหมือนเขื่อน และด้วยความที่ไม่ต้องการความเร็วรอบสูงจึงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแม่น้ำ ประเทศไทยเองก็มีแม่น้ำลำคลองขนาดเล็ก ขนาดใหญ่อยู่มากมายหลายสายทั่วประเทศ ทำให้ประเทศไทยมีทางเลือกเพิ่มขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

ในการใช้พลังงานน้ำจากกระแสน้ำไหลในแม่น้ำ อุปกรณ์สำคัญในการดึงพลังงานน้ำออกมาใช้คือ กังหันน้ำ โดยลักษณะการทำงานของกังหันน้ำใช้หลักการเดียวกันกับกังหันลม ซึ่งกังหันลมมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากกระแสนลมที่วิ่งผ่านตัวกังหันลมเป็นพลังงานกล กังหันน้ำก็เช่นเดียวกัน แต่เปลี่ยนจากกระแสนลมเป็นกระแสน้ำ กังหันน้ำลักษณะนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ตามแนวแกนหมุนของกังหันน้ำ ได้แก่ กังหันน้ำแนวตั้ง (VAWT) และกังหันน้ำแนวนอน (HAWT) กังหันน้ำแนวนอนโดยปกติแล้วจะมีประสิทธิภาพมากกว่ากังหันน้ำแนวตั้ง แต่ด้วยคุณสมบัติที่ดีของกังหันน้ำแนวตั้ง ได้แก่ สามารถรับกระแสน้ำได้ทุกทิศทาง สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ด้วยความเร็วน้ำต่ำ ไม่ต้องการขนาดใหญ่ การติดตั้งที่ซับซ้อนและต้นทุนที่น้อยกว่า กังหันน้ำแนวนอน ทำให้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ทุรกันดาร หรือพื้นที่ที่กระแสไฟฟ้าหลักเข้าไม่ถึง แต่อยู่ติดกับแม่น้ำสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้

การพัฒนาในด้านพลังงานน้ำมีการเติบโตมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้กังหันน้ำแนวตั้งขนาดเล็กได้รับความนิยมมากขึ้นไปด้วย และจากหลักการทำงานที่เหมือนกับกังหันลมแนวตั้ง จึงมีแนวคิดในการนำกังหันน้ำแนวตั้งมาวิเคราะห์และพัฒนาเพื่อที่ว่าในอนาคตจะสามารถติดตั้งจริงในประเทศไทยได้ ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษา วิเคราะห์ การไหลของกระแสน้ำผ่านกังหันน้ำขนาดเล็กเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้ยังเป็นการเพิ่มความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกังหันน้ำแนวตั้งเพื่อการเผยแพร่องค์ความรู้ให้กับผู้ที่สนใจในด้านนี้อีกด้วย

พฤติกรรมของกังหันน้ำแนวตั้งมีความละเอียดอ่อนและมีความซับซ้อน เพราะว่าการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้ง ในแต่ละตำแหน่งที่หมุนจะมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา พฤติกรรมเหล่านี้ นักวิจัยหลายท่านได้พยายามทำการศึกษา วิเคราะห์ เพื่อหาคำตอบมาหลายทศวรรษ และในระยะเวลาสองทศวรรษที่ผ่านมาการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้าอย่างมาก คอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทในการช่วยคำนวณและแสดงผลของพฤติกรรม การไหลของกระแสน้ำไหลผ่านและบริเวณโดยรอบและใบกังหันน้ำ จึงทำให้การค้นคว้า วิจัยเกี่ยวกับกังหันน้ำแนวตั้งมีความชัดเจนมากขึ้นและมีองค์ความรู้เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก

ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณ (CFD) มาใช้การศึกษา ค้นคว้า ออกแบบ และพัฒนากังหันน้ำแนวตั้งขนาดเล็ก โดยจะจำลองการไหลของกระแสน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้ง ในสภาวะต่างๆ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองจะสามารถนำไปใช้ออกแบบและพัฒนากังหันน้ำแนวตั้งต่อไป



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของกังหันลมแนวตั้งเบื้องต้น เพื่อนำไปประยุกต์และพัฒนาเพื่อใช้เป็นกังหันน้ำแนวตั้ง
2. วิเคราะห์การทำงานของกังหันน้ำแนวตั้ง สภาวะต่างๆของกังหันน้ำแนวตั้ง และในการทำงานของกังหันที่สภาวะน้ำต่างๆ เพื่อหาช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การวิเคราะห์ดังกล่าวจะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการสร้างแบบจำลองแบบ 2 มิติ (2D) และโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) เข้ามาช่วยในวิเคราะห์ตลอดกระบวนการ
3. วิเคราะห์ ศึกษา พัฒนา และออกแบบกังหันน้ำแนวตั้งเพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ในการนำพลังงานน้ำซึ่งเป็นพลังงานที่หาได้จากธรรมชาติและยังเป็นพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

การตรวจเอกสาร

พลังงานน้ำ

แหล่งน้ำเป็นที่พึ่งในการดำรงชีวิตของมนุษย์มาตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์ได้ใช้แหล่งน้ำเพื่อประโยชน์ต่างๆ เช่น การเพาะปลูก การชลประทานในเขตเมือง การเลี้ยงสัตว์ และการเกษตรกรรม ต่อมาเมื่อกำเนิดเทคโนโลยีพลังงานไฟฟ้า วิถีชีวิตมนุษย์ได้เปลี่ยนไป พลังงานไฟฟ้ากลายเป็นพลังงานหลักในการดำรงชีวิตและการผลักดันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในด้านต่างๆ

พลังงานน้ำเป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า และมีประสิทธิภาพสูง โดยส่วนใหญ่ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานน้ำจะอาศัยการปล่อยน้ำจากเขื่อนไปปั่นเจเนอเรเตอร์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า วิธีการนี้ต้องอาศัยพื้นที่บริเวณกว้างมาก สิ่งแวดล้อมจึงถูกรบกวนและถูกทำลาย กังหันน้ำขนาดเล็กเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจึงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากความต้องการพื้นที่ในการติดตั้งน้อย และที่สำคัญการรบกวนต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำมีน้อยมาก

กังหันน้ำ

กังหันน้ำที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นกังหันน้ำที่ประยุกต์มาจากกังหันลม Hwang *et al.* (2008) ได้กล่าวไว้ว่ากังหันน้ำประเภทนี้มีลักษณะเหมือนกังหันลมได้นำ แตกต่างกันเพียงความหนาแน่นของน้ำมีมากกว่าประมาณ 800 เท่าของอากาศ ดังนั้นแนวคิด ทฤษฎี หลักการทำงาน หลักการคำนวณจึงใช้ร่วมกับกังหันลม Güney and Kaygusuz (2010) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่ากังหันน้ำดึงพลังงานจากน้ำโดยการลดความเร็วของการไหลน้ำ เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนและอธิบายผิดไปจากเดิมการอธิบายทฤษฎีส่วนใหญ่จะใช้คำศัพท์เป็นกังหันลม

Betz's Law

Magdi *et al.* (2011) ได้อธิบายทฤษฎีของ Albert Betz วิศวกรชาวเยอรมัน เป็นผู้ริเริ่มคิดค้นทฤษฎี สมการ และหลักการในการนำพลังงานจากกระแสลมมาประยุกต์ใช้ในปี 1919 การออกแบบและการทำงานของกังหันลม มีหลักการพื้นฐานอยู่บนการใช้กฎอนุรักษ์มวล (conservation of mass) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) กับการไหลของกระแสลม

สมการของ Betz มีความคล้ายคลึงกับสมการ carnot cycle efficiency ใน thermodynamics ในส่วนที่ heat engine ไม่สามารถดึงพลังงานออกมาจากจุดกำเนิดพลังงานได้ทั้งหมด บางส่วนต้องสูญเสียคืนให้กับสิ่งแวดล้อม จากกฎข้อที่สองของ thermodynamics การเกิดขึ้นของ entropy ในกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ จาก Carnot's theorem ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดขึ้นได้เมื่อไม่มี entropy เกิดขึ้นในวัฏจักร ดังนั้นวัฏจักรของ Carnot สามารถเขียนสมการ carnot cycle efficiency ได้ดังนี้

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

โดยที่ T_1 คือ heat input และ T_2 คือ heat rejection ทั้งสองตัวแปรนี้มีหน่วยเป็น Kelvin

สมการของ Betz จะเกี่ยวข้องกับความเร็วของกระแสลมในช่วงต้นลม (upstream) V_1 และในช่วงท้ายลม (downstream) V_2

ข้อจำกัดในประสิทธิภาพของ heat engine คือการที่พลังงานบางส่วนต้องถูกปล่อยกลับคืนสู่ธรรมชาติ ถ้าเป็นกังหันลมข้อจำกัดคือการทำให้กระแสลมวิ่งช้าลงจากช่วงต้นลม V_1 ไปสู่ช่วงท้ายลม V_2 ในขณะที่ระบบการไหลของกระแสลมสามารถดำเนินต่อไปได้ การสูญเสียในเรื่องประสิทธิภาพไม่ได้มีแค่การสูญเสียให้สิ่งแวดล้อมเพียงเท่านั้น ยังมีการสูญเสียในส่วนอื่นๆอีกจากปัจจัยต่างๆ เช่น เกิดจากแรงจลน์จากระบบส่งกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

Betz ได้พัฒนาทฤษฎีและสร้างเป็นกฎเรียกว่า Betz's law เพื่อให้สามารถนำพลังงานลมมาใช้ได้อย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบันนี้ ทฤษฎีคือสร้างกังหันลมในอุดมคติขึ้นมา โดยสมมุติว่า

1. กังหันลมตัวนี้ไม่มีจุดศูนย์กลาง (Hub)
2. กังหันลมตัวนี้มีจำนวนใบพัดเป็นอนันต์ ซึ่งไม่มีผลต่อแรงจลน์ที่ก่อให้เกิดความต้านทานต่อกระแสลมที่วิ่งผ่านใบพัด

กังหันลมในอุดมคตินี้สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานกลได้สูงสุดที่ 59.3 เปอร์เซ็นต์

ในส่วนที่เป็นการคำนวณของ Betz จะอธิบายพอสังเขปเท่านั้นเพื่อให้เข้าใจในพื้นฐานของ Betz's law ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นกระแสลมไหลเข้าในช่วงต้นลมมีความเร็วเป็น V_1 ในขณะที่ไหลผ่านตัวกังหันมีความเร็วเป็น V และเป็น V_2 ในช่วงท้ายลมที่ระยะหนึ่งห่างจากตัวกังหันลม การดึงพลังงานจากกระแสลมมาเป็นพลังงานกลเกิดขึ้นเมื่อมีการลดลงของพลังงานจลน์ของกระแสลมจากช่วงต้นลมมาสู่ช่วงท้ายลม หรืออธิบายอย่างง่ายว่าเสมือนการเหยียบเบรคของกระแสลมโดยใช้กังหันลม จึงทำให้

$$V_2 < V_1$$

และส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของกระแสลมในช่วงต้นลมค่อยๆเพิ่มมากขึ้นจนไปถึงในช่วงท้ายลม

$$S_2 > S_1$$

S_1 คือพื้นที่หน้าตัดในช่วงต้นลม S_2 คือพื้นที่หน้าตัดในช่วงท้ายลม

กระแสลมของ Betz พิจารณาเป็น incompressible flow คือเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว และจากกฎอนุรักษ์มวล มวลที่ไหลเข้าเท่ากับมวลที่ไหลออก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{m} = \rho S_1 V_1 = \rho S V = \rho S_2 V_2 \quad (2)$$

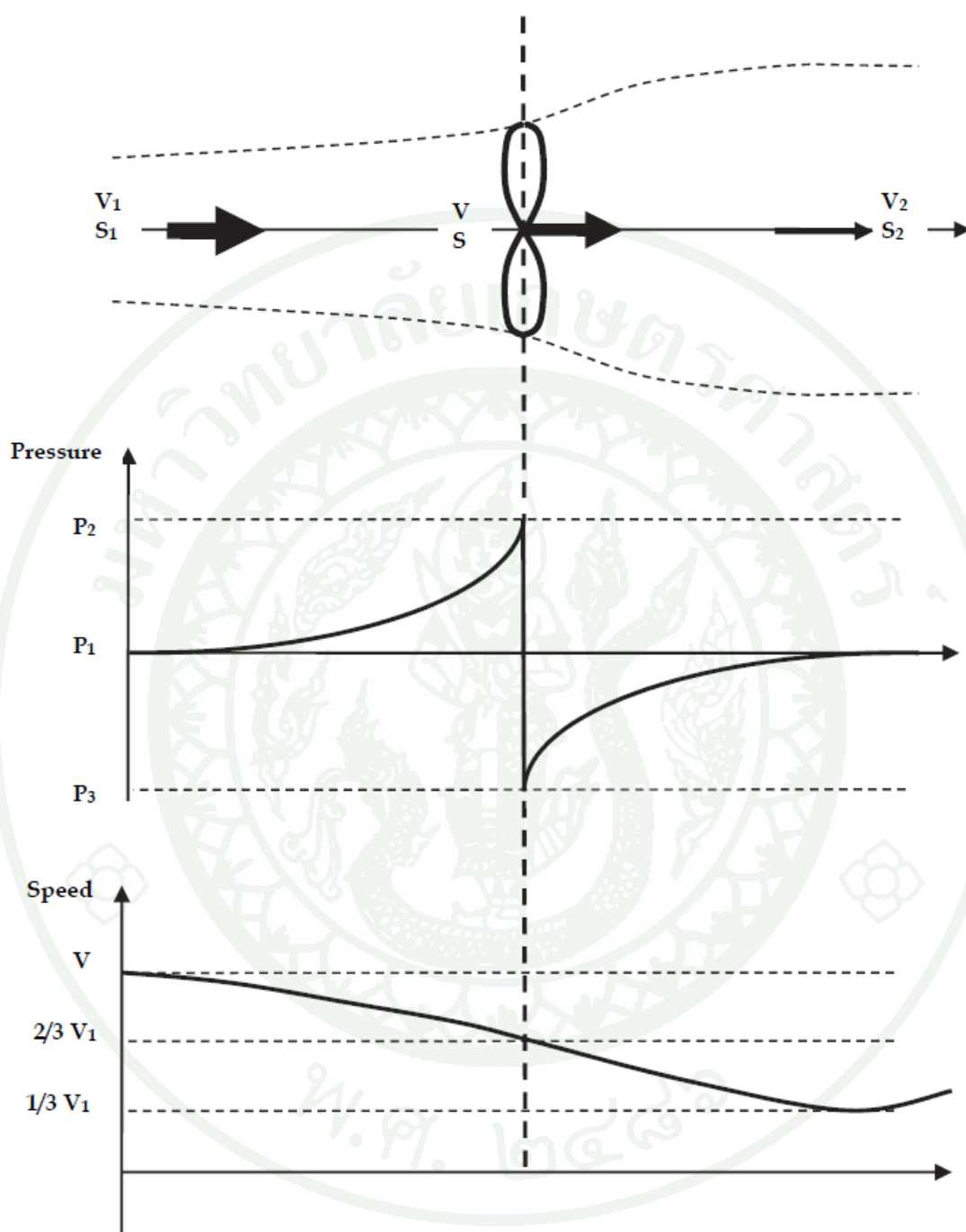
จากสมการด้านบนทำให้ทราบว่ามวลมีค่าคงที่ตลอดการไหลของกระแสลม จาก Euler's Theorem แรงที่มาจากกระแสลมกระทำต่อกังหันดังนี้

$$F = ma$$

$$F = m \frac{dV}{dt}$$

$$F = \dot{m} \Delta V$$

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (3)$$



ภาพที่ 1 แสดงการเปลี่ยนของความดันและความเร็วของก้างหันลมในอุดมคติ

ที่มา: Magdi *et al.* (2011)

พลังงานที่ได้จากกระแสลมคำนวณจากสมการด้านล่างนี้

$$dE = Fdx \quad (4)$$

และกำลังที่มีอยู่ในกระแสลมคำนวณโดย

$$P = \frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = FV \quad (5)$$

จากสมการที่ (3) นำแรง F ไปแทนในสมการที่ (5) จะสามารถคำนวณกำลังงานที่สามารถดึงมาจากกระแสลมได้ดังนี้

$$P = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (6)$$

กำลังที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์จากช่วงต้นลมไปสู่ช่วงท้ายลมอธิบายดังสมการข้างล่างนี้

$$\begin{aligned} P &\approx \frac{\Delta E}{\Delta t} \\ P &\approx \frac{\frac{1}{2} m V_1^2 - \frac{1}{2} m V_2^2}{\Delta t} \\ P &= \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_2^2) \end{aligned} \quad (7)$$

จากสมการที่ (2) นำ $\dot{m}$ มาแทนในสมการที่ (7) จะได้

$$P = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (8)$$

จับสมการที่ (6) และสมการที่ (8) มาเท่ากันจะได้ความสัมพันธ์ของ V , V_1 และ V_2

$$P = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) = \rho S V^2 (V_1 - V_2)$$

$$\frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) = V (V_1 - V_2)$$

โดยที่ V , S และ $\rho \neq 0$

หรือเขียนได้ในอีกรูปหนึ่งคือ

$$\frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} (V_1 - V_2) (V_1 + V_2) = V (V_1 - V_2)$$

จะได้

$$V = \frac{1}{2} (V_1 + V_2) \quad (9)$$

โดยที่ $(V_1 - V_2) \neq 0$ หรือ $V_1 \neq V_2$

จากสมการจะเห็นได้ว่าความเร็วลมที่กักกันอาจถือว่าเป็นความเร็วลมเฉลี่ยของช่วงต้นลมและท้ายลม และบ่งบอกอีกว่าตัวกักกันต้องทำตัวเสมือนเป็นเบรคที่ลดความเร็วของลมจาก V_1 ให้เป็น V_2 แต่ไม่ลดทั้งหมดจนเหลือ $V = 0$ ซึ่งจะทำให้สมการไม่เป็นจริง การที่ดึงพลังจากการไหลของกระแสลม การไหลของกระแสลมจะต้องถูกรักษาไว้และไม่หยุดนิ่งสนิท

จากความสัมพันธ์ของ V ทำให้สามารถเขียนสมการแรง F และกำลัง P ในรูปของความเร็วต้นลมและท้ายลมได้ใหม่ดังนี้

จากสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} F &= \rho S V (V_1 - V_2) \\ F &= \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \end{aligned} \quad (10)$$

จากสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} P &= \rho S V^2 (V_1 - V_2) \\ P &= \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2)^2 (V_1 - V_2) \\ P &= \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \end{aligned} \quad (11)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 และ V_2 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสัดส่วน “downstream velocity factor” หรือว่า “interference factor” b

$$b = \frac{V_2}{V_1} \quad (12)$$

ดังนั้นสมการที่ (10) แรง F จะมีความสัมพันธ์เป็น

$$F = \frac{1}{2} \rho S V_1^2 (1 - b^2) \quad (13)$$

กำลังที่สามารถดึงมาใช้จากกระแสลมเมื่อเขียนอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ของสัดส่วน b จะมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \\ P &= \frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1 - b^2) (1 + b) \end{aligned} \quad (14)$$

ข้อมูลที่สำคัญที่สุดของการสร้างพลังงานจากกระแสลมคือความสามารถในการดึงพลังงานจากลมในสัดส่วนที่เป็นลูกบาศก์เมตรของความเร็วในช่วงต้นลม V_1^3 และเป็นฟังก์ชันของ interference factor b

Power flux หรืออัตราการไหลของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือเรียกอีกแบบหนึ่งว่า Power density อธิบายโดย

$$\begin{aligned} P' &= \frac{P}{S} \\ P' &= \frac{\frac{1}{2} \rho S V^3}{S} \\ P' &= \frac{1}{2} \rho V^3 \end{aligned} \quad (15)$$

มีหน่วยเป็น $\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ หรือ $\frac{\text{Watts}}{\text{m}^2}$

พลังงานจลน์ที่อยู่ในกระแสลมในช่วงต้นลมและยังไม่ถูกรบกวนจากระบบใดๆ มีความเร็วเป็น $V = V_1$ ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด S มีสมการเป็น

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (16)$$

มีหน่วยเป็น $\frac{\text{Joules}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \text{m}^2$ หรือ Watts

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานเป็นสัดส่วนของตัวแปร ไร้มิติของพลังงานที่สามารถดึงออกมาจากกระแสลมได้ P และพลังงานจลน์ที่มีให้ของกระแสลมที่ยังไม่ถูกรบกวนจากระบบใดๆ P_{wind}

$$C_p = \frac{P}{P_{\text{wind}}} \quad (17)$$

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานจะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของกังหันลมในการดึงพลังงานที่มีอยู่ในกระแสลม เมื่อเขียนอยู่ในรูปของสมการ สมการที่ (14) และสมการที่ (16) จะได้

$$C_p = \frac{P}{P_{wind}}$$

$$C_p = \frac{\frac{1}{4} \rho S V_1^3 (1-b^2)(1+b)}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3}$$

$$C_p = \frac{1}{2} (1-b^2)(1+b) \quad (18)$$

ภาพที่ 2 คือกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงาน C_p และ interference factor b จากสมการที่ (12) เมื่อ $b=1$, $V_1=V_2$ หมายความว่ากระแสลมไม่ถูกดึงพลังงานไปเลย ทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานเป็นศูนย์ เมื่อ $b=0$, $V=0$ กังหันลมหยุดการไหลของกระแสได้ทั้งหมด ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีค่าเท่ากับ 0.5 จากกราฟจะสามารถเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีค่าสูงสุดอยู่ที่ $b = \frac{1}{3}$ ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดสามารถหาได้จากสมการ (18) โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับ interference factor b โดยใช้กฎของ Chain rule ของการหาอนุพันธ์ และตั้งค่าการอนุพันธ์เท่ากับศูนย์ ดังการคำนวณในสมการที่ (19)

$$\frac{d}{dx}(uv) = u \frac{dv}{dx} + v \frac{du}{dx}$$

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} \frac{d}{db} [(1-b^2)(1+b)]$$

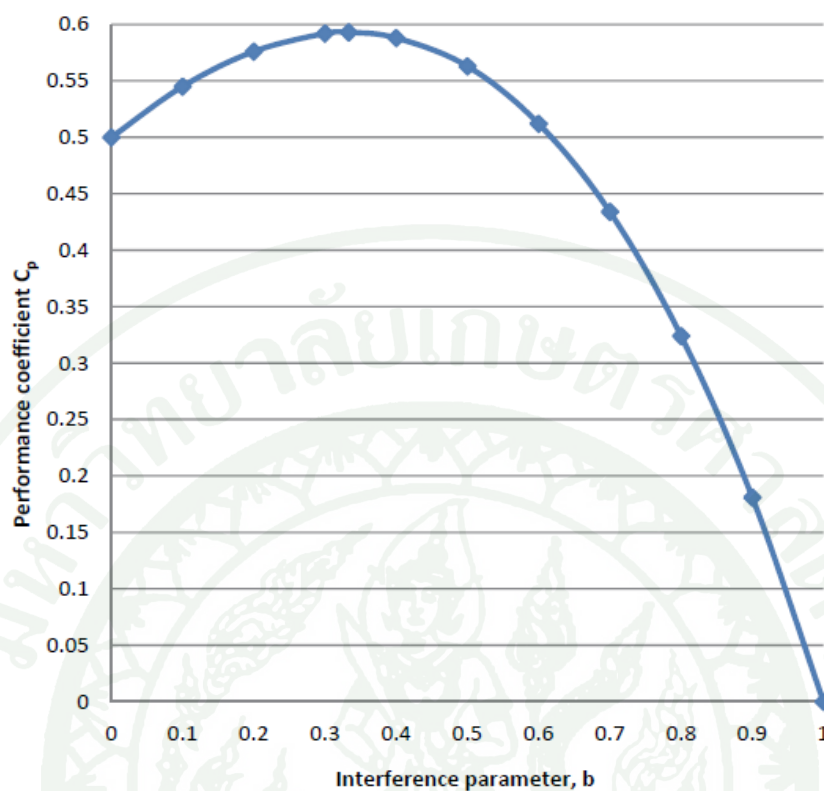
$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} [(1-b^2) - 2b(1+b)]$$

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} (1-b^2 - 2b - 2b^2)$$

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} (1-3b^2 - 2b)$$

$$\frac{dC_p}{db} = \frac{1}{2} (1-3b)(1+b)$$

$$\frac{dC_p}{db} = 0 \quad (19)$$



b	0.0	0.1	0.2	0.3	1/3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
C_p	0.500	0.545	0.576	0.592	0.593	0.588	0.563	0.512	0.434	0.324	0.181	0.00

ภาพที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ interference factor b

ที่มา: Magdi *et al.* (2011)

จากการคำนวณในสมการที่ (19) จะได้ผลเฉลยออกมาสองผลเฉลย ผลเฉลยที่หนึ่งเป็นผลเฉลยที่ไม่เป็นจริง

$$(1+b)=0$$

จาก

$$b = \frac{V_2}{V_1}$$

$$-1 = \frac{V_2}{V_1}$$

ดังนั้น

$$V_2 = -V_1$$

ผลเฉลยที่สองเป็นผลเฉลยที่เป็นจริง

$$(1-3b)=0$$

จาก

$$b = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\frac{1}{3} = \frac{V_2}{V_1}$$

ดังนั้น

$$V_2 = \frac{1}{3}V_1 \quad (20)$$

จากสมการที่ (20) สามารถบอกได้ว่าจุดที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ ความเร็วในช่วงท้ายลม V_2 มีค่าเท่ากับหนึ่งในสามของความเร็วในช่วงต้นลม V_1 เมื่อนำไปแทนลงในสมการที่ (21) จะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดออกมา

$$\begin{aligned}
 C_{p,\max} &= \frac{1}{2}(1-b^2)(1+b) \\
 C_{p,\max} &= \frac{1}{2}\left[\left(1-\left(\frac{1}{3}\right)^2\right)\left(1+\frac{1}{3}\right)\right] \\
 C_{p,\max} &= \frac{16}{27} \\
 C_{p,\max} &= 0.59259 \\
 C_{p,\max} &= 59.26 \text{ percent}
 \end{aligned} \tag{21}$$

ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดค่านี้ ได้ถูกใช้เป็นเกณฑ์และเป็นขีดจำกัดสูงที่เรียกว่า Betz Limit ซึ่ง Albert Betz ได้สร้างไว้ตั้งแต่คริสต์ศักราช 1919 เป็นการคำนวณการดึงพลังงานออกมาจากกระแสลมในเชิงทฤษฎีและเป็นอุดมคติที่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกกังหันลมทั้งหมดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

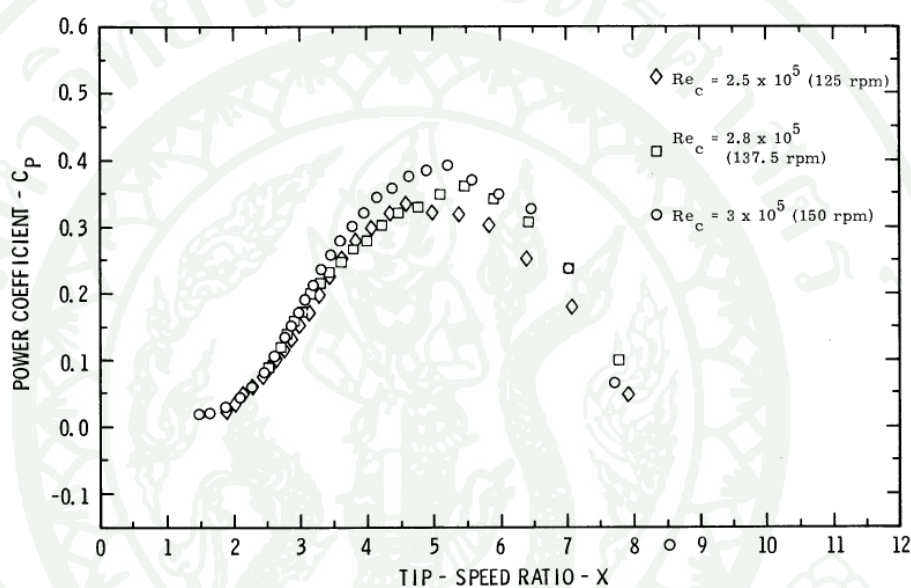
Reynolds Number

ค่าของ Reynolds Number เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันลม Reynolds Number เป็นตัวแปรไร้มิติเขียนสมการได้ดังนี้

$$Re = \frac{\rho V_\infty D}{\mu} \tag{22}$$

โดยที่	ρ	= ความหนาแน่นของของไหล
	V_∞	= ความเร็วของ free stream
	D	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลม
	μ	= ค่าความหนืดของของไหล

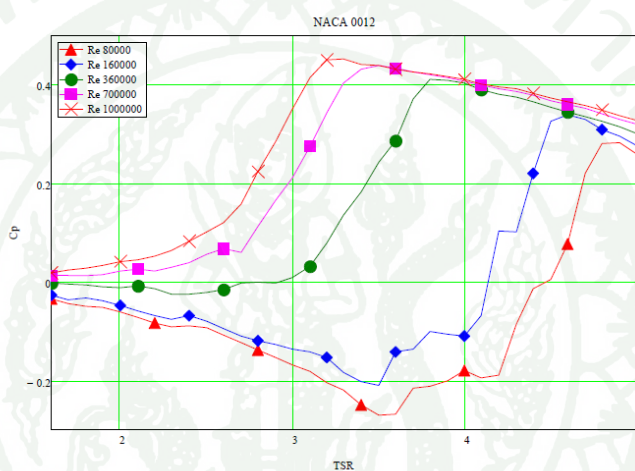
Sheldabl *et al.* (1980) ได้ทำการทดลองกังหันลมแนวตั้งแบบคาเรียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร โดยที่ใบพัดกังหันลมใช้แผ่นอากาศรหัส NACA0015 การทดลองนี้เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของกังหันลมแนวตั้งแบบคาเรียส โดยทำการทดลองที่ค่าเลขเรย์โนลด์สแตกต่างกันคือ $Re = 2.5 \times 10^5$, $Re = 2.8 \times 10^5$ และ $Re = 3 \times 10^5$ จากภาพที่ 3 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Reynolds Number เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ที่ Reynolds Number แตกต่างกัน

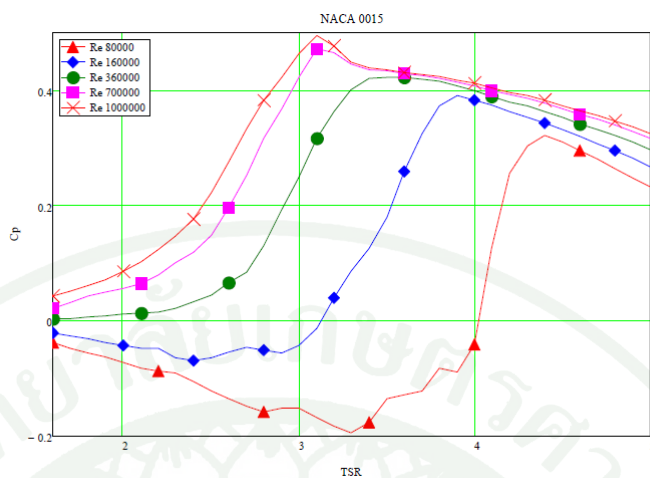
ที่มา: Sheldabl *et al.* (1980)

อีกงานวิจัยหนึ่งของ Bogateanu *et al.* (2014) ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากค่าของ Reynolds Number ต่างๆต่อประสิทธิภาพของกังหันลมแนวตั้งขนาดเล็ก โดยใช้แบบจำลอง Vortex ในงานวิจัยนี้ได้จำลองกังหันลมแนวตั้งโดยใช้ใบพัดที่มีรหัสแผนอากาศที่แตกต่างกัน NACA0012, NACA0015, NACA0018 และ NACA0021 และค่าของ Reynolds Number มีทั้งหมดห้าค่าด้วยกันคือ $Re = 8 \times 10^4$, $Re = 1.6 \times 10^5$, $Re = 3.6 \times 10^5$, $Re = 7 \times 10^5$ และ $Re = 10^6$ ภาพที่ 4 ถึงภาพที่ 7 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio จะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Reynolds Number เพิ่มขึ้น



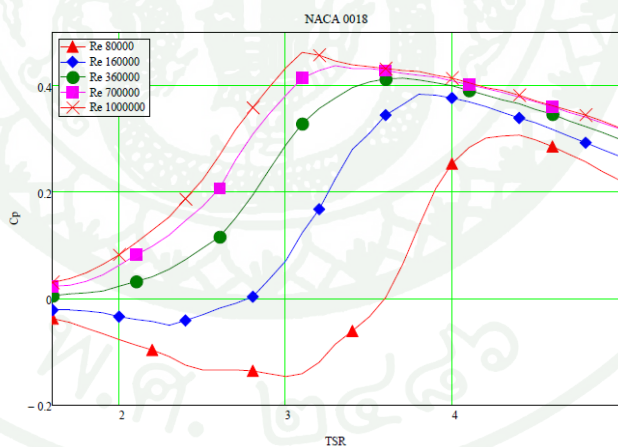
ภาพที่ 4 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแผนอากาศ NACA0012

ที่มา: Bogateanu *et al.* (2014)



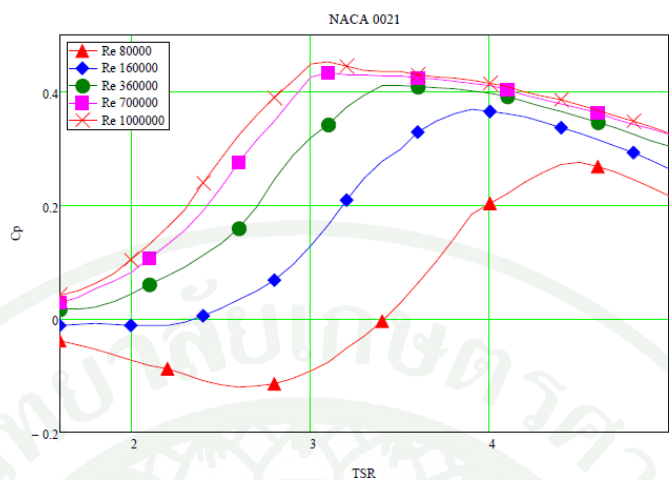
ภาพที่ 5 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแผ่นอากาศ NACA0015

ที่มา: Bogateanu *et al.* (2014)



ภาพที่ 6 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแผ่นอากาศ NACA0018

ที่มา: Bogateanu *et al.* (2014)



ภาพที่ 7 แสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานและ Tip Speed Ratio ของรหัสแพนอากาศ NACA0021

ที่มา: Bogateanu *et al.* (2014)

จากงานวิจัยของ Sheldabl *et al.* (1980) และ Bogateanu *et al.* (2014) สามารถสรุปได้ว่าค่าของ Reynolds Number ที่เปลี่ยนไปมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันลม

Tip Speed Ratio

Magdi *et al.* (2011) ได้อธิบายตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ Tip Speed Ratio หรือ TSR หรือว่า ความเร็วปลายใบพัด เป็นตัวแปรไร้หน่วยที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งซึ่งค่า TSR นี้จะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ค่า TSR คือว่าความเร็วของกังหันลมที่ปลายใบพัดที่เป็นสัดส่วนกับกระแสลมที่ไหลผ่าน ถ้ากังหันลมหมุนช้าเกินไปจะทำให้กระแสลมไหลผ่านตัวกังหันลมมากเกินไป โดยกังหันลมไม่สามารถดึงพลังงานออกมาได้มากเท่าที่ควร แต่ในอีกกรณีหนึ่งถ้าหากกังหันลมหมุนเร็วเกินไป จะทำให้กังหันลมมีสภาพเหมือนเป็นของแข็ง (Solidity) ถ้าเป็นกังหันลมแนวนอนจะมีลักษณะเป็นแผ่นจานขนาดใหญ่ซึ่งกระแสลมจะไหลผ่านไม่ได้ ถ้าหากเป็นกังหันลมแนวตั้งจะมีสภาพเหมือนทรงกระบอกแข็งซึ่งกระแสลมไหลผ่านไม่ได้เช่นกัน ค่าที่เหมาะสมของ TSR แต่ละกังหันจะไม่เหมือนกัน ซึ่งค่า TSR นั้นจะขึ้นอยู่กับ โครงสร้างของ air foil (ใบพัด) ที่ใช้ จำนวนใบพัดที่ใช้ และชนิดของกังหันลมที่ใช้ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับการออกแบบกังหันลมชนิด 3 ใบ โดยทั่วไปแล้ว จะมีค่า TSR ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 6 และ 8 และการออกแบบกังหันลมมักจะพยายามออกแบบให้สามารถทำงานที่ค่า TSR สูงๆ เพราะว่ายิ่งกังหันลมหมุนเร็วมากความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมากตามไปด้วย แต่ในการพยายามออกแบบในช่วง TSR สูงๆนั้นจะมีข้อเสียตามมาคือ กังหันลมจะถูกกัดกร่อนจากเศษทราย เศษฝุ่น ทำให้ต้องพัฒนาตัวใบพัดให้ทนทานต่อสภาวะนี้ เกิดเสียงที่ดังมากเป็นลสิ่งรบกวน มีการสั่นสะเทือนมากเมื่อหมุนเร็วมาก และต้องมีระบบควบคุมเพื่อป้องกันไม่ให้กังหันลมหมุนเร็วเกินไปจนเกินค่าที่ออกแบบไว้ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวใบพัดอีก Tip Speed Ratio เป็นตัวแปรไร้หน่วยมีสมการดังนี้

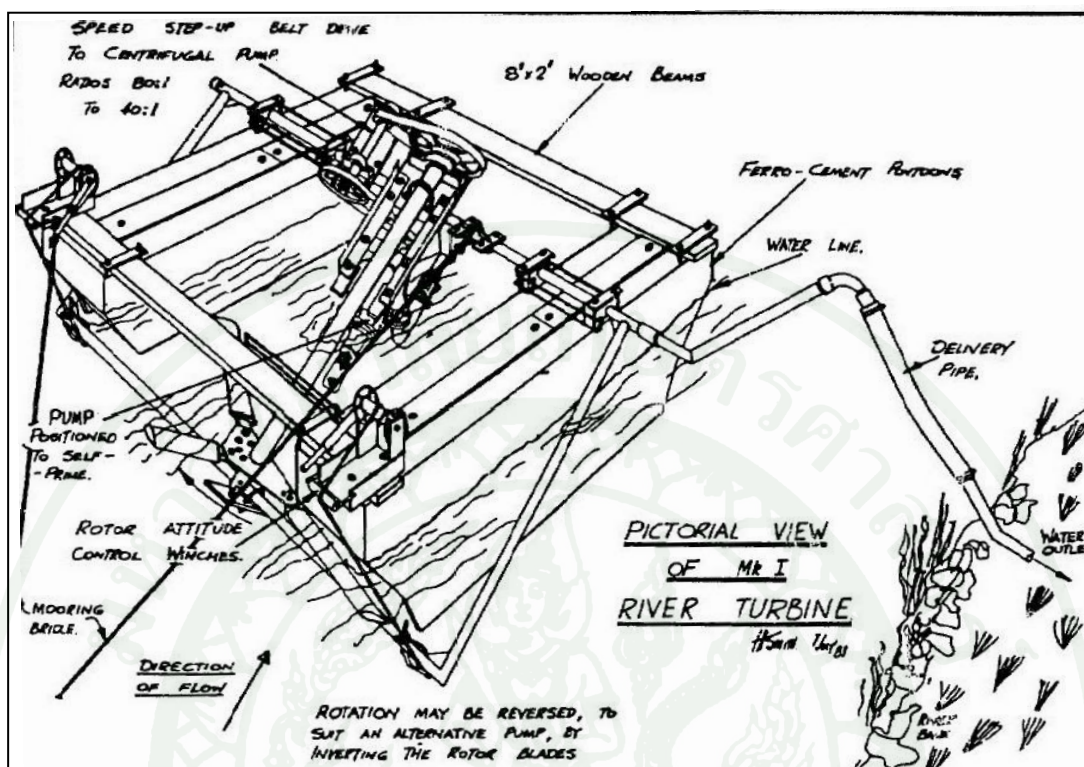
$$TSR = \lambda = \frac{\text{speed of rotor tip}}{\text{wind speed}} = \frac{v}{V_\infty} = \frac{\omega r}{V_\infty} \quad (23)$$

โดยที่	V_∞	= ความเร็วลม มีหน่วยเป็น m/sec
	$v = \omega r$	= ความเร็วที่ปลายใบพัด m/sec
	$\omega = 2\pi f$	= ความเร็วเชิงมุม rad/sec
	f	= ความถี่ของการหมุน Hz , sec ⁻¹

เทคโนโลยีกังหันน้ำแนวตั้งและแนวคิดทางทฤษฎี

ในช่วงเวลาเกือบ 4 ทศวรรษที่ผ่านมา กังหันน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าหรือ Water Current Turbine (WCT) ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลก จากปัญหาการสร้างเขื่อนขนาดใหญ่ที่ต้องลงทุนสูง และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศน์ในน้ำ กังหันน้ำสำหรับการใช้งานในแม่น้ำจึงได้รับการวิจัย ศึกษา ออกแบบ และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

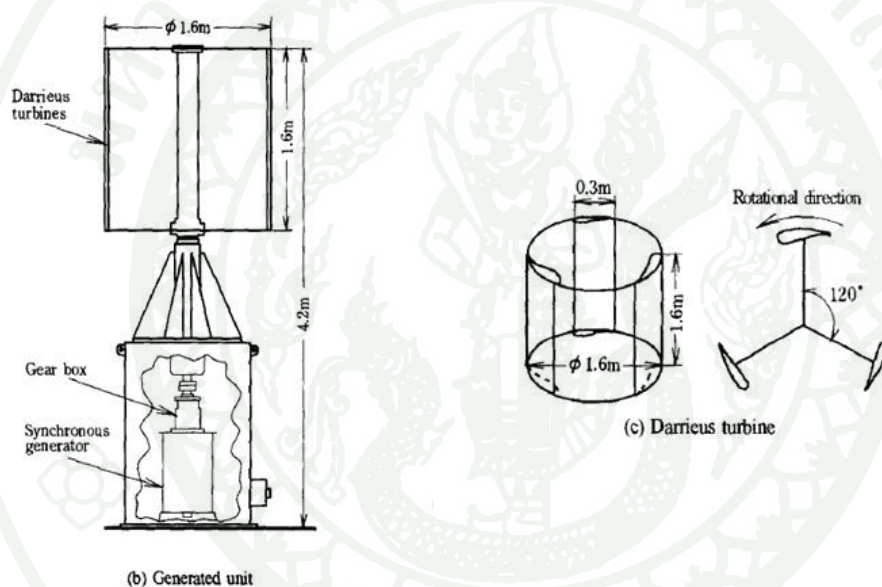
จากการตรวจเอกสาร Khan *et al* (2009) ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับระบบการแปลงพลังงานและการประเมินผลของกังหันน้ำชนิดแนวอนและกังหันน้ำชนิดแนวตั้งสำหรับการใช้งานในแม่น้ำและน้ำขึ้นน้ำลง พบว่า Garman (1986) ได้ริเริ่มการสร้างกังหันน้ำสำหรับใช้ในแม่น้ำ ที่แม่น้ำไวท์ไนล์ เมืองจูบา ประเทศซูดาน ดังในภาพที่ 8 โดยมีจุดประสงค์หลักคือ ใช้เพื่อสำหรับสูบน้ำ และการชลประทานในพื้นที่ทุรกันดารและประเทศที่ยากจน สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นผู้วิจัยได้กล่าวไว้ว่าอาจมีความเป็นไปได้ที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากศักยภาพของกังหันน้ำต้นแบบ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สร้างกังหันน้ำต้นแบบไว้ถึง 9 ชนิด เพื่อทดสอบเปรียบเทียบหากังหันน้ำที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และคุ่มค่าที่สุดที่การทำงานทั้งหมด 15,500 ชั่วโมง ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบกังหันน้ำแนวตั้ง (Darreius) และกังหันน้ำใบพัดแกนลาดเอียงชื่อว่า “Mark 1” (Inclined Axis Propeller) ซึ่งภายหลังเรียกว่า Garman Turbine มีหลักการทำงานโดยใช้แรงยกเหมือนกันทั้งคู่ กังหันน้ำทั้ง 2 ชนิด ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.25 ที่ Tip Speed Ratio (TSR) มีค่าเท่ากับ 3 จากการเปรียบเทียบจากการทดลองพบว่า กังหันน้ำแนวตั้ง (Darreius) เหมาะสมกับการทำงานที่มีขนาดมากกว่า 1 kW ส่วน Garman Turbine เหมาะสมกับการทำงานที่ขนาดไม่เกิน 1 kW และผู้วิจัยสรุปไว้ว่า โดยทั่วไปควรเลือกใบพัดที่ทำความเร็วสูงได้มากเท่าที่จะมากได้ เพราะว่าเมื่อใบพัดยิ่งหมุนเร็วขนาดของระบบส่งกำลังก็จะเล็กลงไปด้วย การลดจำนวนใบลงหรือลดความยาวของแกนใบพัด (Chord Length) จะทำให้ความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งขนาดของการส่งกำลังเล็กลง จำนวนใบพัดลดลง ความยาวของแกนใบพัดสั้นลง นั้นหมายความว่าต้นทุนลดลง อย่างไรก็ตามการทำงานที่ราบรื่นและความแข็งแรงของโครงสร้างต้องเป็นสิ่งที่นำมาพิจารณาด้วยเสมอ



ภาพที่ 8 Mark 1 River Turbine

ที่มา: Garman (1986)

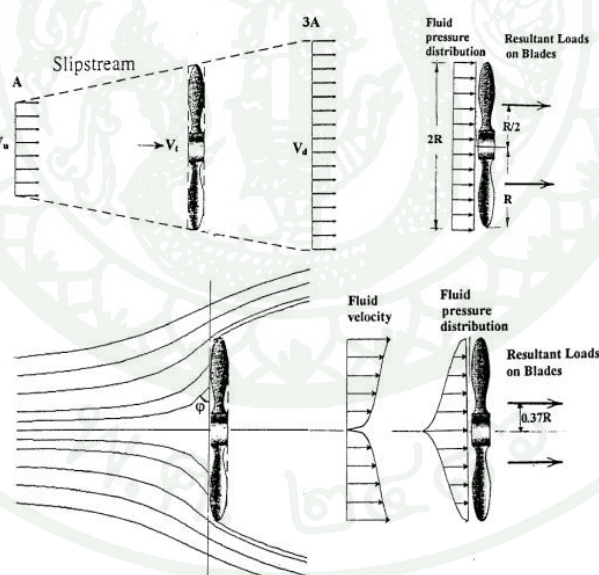
Kino *et al.* (1996) ได้ทดสอบกังหันน้ำชนิดแนวตั้ง (Darrieus) ดังแสดงในภาพที่ 9 สำหรับใช้ในการแปลงพลังงานน้ำขึ้นน้ำลงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ช่องแคบ Kurushima ในบริเวณนี้ความเร็วของกระแสน้ำอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 เมตรต่อวินาที และในบางครั้งมีความเร็วสูงถึง 5 เมตรต่อวินาที จากการทดสอบพบว่ากังหันน้ำสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ความเร็วของกระแสน้ำมีค่า 1 เมตรต่อวินาที ขึ้นไป ประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันน้ำแนวตั้งนี้สามารถทำได้อยู่ที่ 56 เปอร์เซ็นต์ ที่ Tip Speed Ratio (TSR) มีค่าเท่ากับ 2.1 ที่ความเร็วกระแสน้ำมากกว่า 1.1 เมตรต่อวินาที นอกจากนี้คณะวิจัยได้กล่าวถึงปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกังหันน้ำแนวตั้งไว้ด้วย คือ สภาพแวดล้อมของทะเลในบริเวณนั้น การสัญจรไปมาของเรือ และฝูงปลา



ภาพที่ 9 Generated Unit และ Darrieus Turbine

ที่มา: Kino *et al.* (1996)

Gorban *et al.* (2001) ได้นำเสนอโมเดลทางคณิตศาสตร์ใหม่ เพื่อใช้ในการประมาณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันที่มีการใช้งานกับของไหลไม่อัดตัว โมเดลทางคณิตศาสตร์นี้มีชื่อว่า GGS จากเดิมโมเดลทางคณิตศาสตร์ของ Betz (1919) ของไหลจะไหลผ่านกังหันมีลักษณะเป็นเส้นตรงและยังคงรูปเดิมเมื่อกระจายความดันเข้าสู่กังหันแล้ว คณะวิจัยจึงกล่าวว่าโมเดลของ Betz จะทำให้การประเมินค่าประสิทธิภาพของกังหันสูงเกินไป คณะวิจัยได้นำเสนอโมเดล GGS โดยอธิบายว่าของไหลที่จะไหลผ่านกังหันจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งก่อนกระจายความดันเข้าสู่กังหัน จากการเปรียบเทียบทั้ง 2 โมเดล บน 2 มิติ พบว่าโมเดล GGS คำนวณค่าประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันได้อยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่างกับโมเดลของ Betz ที่คำนวณได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ แสดงในภาพที่ 10 จากผลที่ได้คณะวิจัยสรุปได้ว่าโมเดลของ Betz ประเมินค่าประสิทธิภาพสูงเกินไป เนื่องจากละเลยการเลี้ยวโค้งของของไหล นอกจากนี้ Herlical Turbine แบบ 3 มิติ มีประสิทธิภาพมากกว่าใบพัด 2 มิติ ในการใช้งานในน้ำ และจากการทดสอบเก็บข้อมูลของ Herlical Turbine มีประสิทธิภาพถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ทำให้กังหันน้ำชนิดนี้มีความเด่นมากกว่ากังหันอื่นๆ ในการนำไปใช้ใน free-water currents



ภาพที่ 10 ภาพบนคือโมเดลของ Betz ภาพล่างคือ Model ของ GGS

ที่มา: Gorban *et al.* (2001)

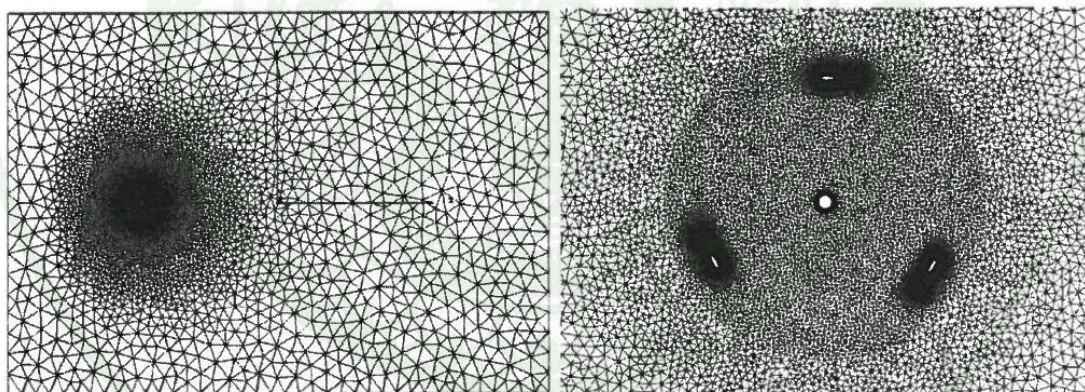
Rawling (2008) ได้สร้างกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเล็กแสดงในภาพที่ 11 เพื่อทำการทดลองหาค่ากำลังและค่าแรงบิดเพื่อมาเป็นค่าพื้นฐาน จาก free-stream และ ducted vertical axis current turbine ในการสอบเทียบผล (Validation) กับโมเดลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะถูกพัฒนาโดยผู้วิจัยอีกคนหนึ่ง ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานจาก free-stream และ ducted vertical axis current turbine เก็บข้อมูลของค่าความผันผวนของแรงบิดที่เกิดจากการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้ง วิเคราะห์ห้อธิพลของ TSR มุมของใบพัด ชนิดของใบพัดหลังเต่า (cambered blade) และองค์ประกอบต่างๆที่จะส่งผลให้เกิดความผันผวนของแรงบิด และประสิทธิภาพของกังหันน้ำแนวตั้ง ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากเพลาลมุน รวมไปถึงแขนยึดใบพัด วิเคราะห์ห้ขนาดของแรงที่มาจาก free-stream ที่จะไหลผ่านกังหันน้ำเพื่อการออกแบบในอนาคตต่อไป ในการทดลองนี้ทดลองที่ความเร็วน้ำ 1 – 2 เมตรต่อวินาที TSR มีค่าเท่ากับ 1.25 – 3.5 ที่มุมปะทะ (angle of attack หรือ AoA) -5, -3, 0, 3, 5 พบว่า ค่า AoA ที่ 3 องศา และ 5 องศา เพิ่มค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมากกว่า 21 เปอร์เซ็นต์ จาก AoA 0 องศา ตั้งแต่ AoA -3 องศาลงไปให้ผลได้ไม่ดี และค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่เกิดจาก free-stream จากการทดลองคือ 0.272 ที่ความเร็วน้ำเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.70 AoA 0 องศา



ภาพที่ 11 การทดลอง Vertical Axis Turbine ใน Towing Tank

ที่มา: Rawling (2008)

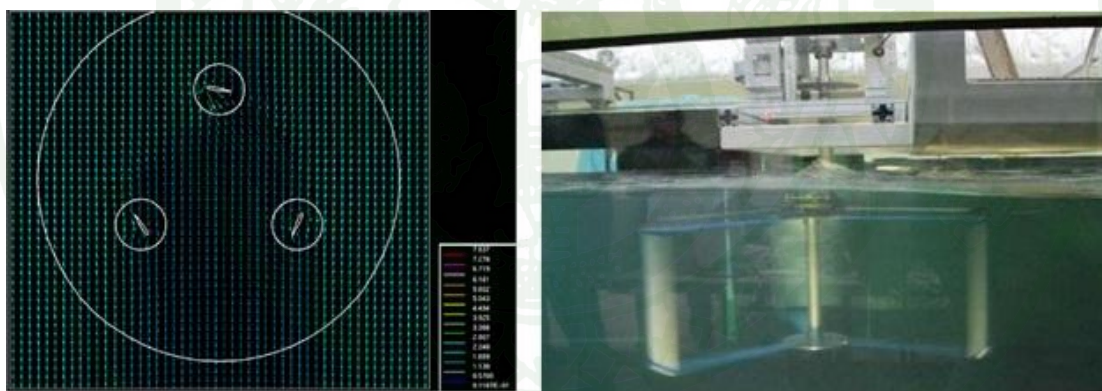
Nabavi (2008) ได้สร้างโมเดลจำลองคอมพิวเตอร์ของกังหันน้ำแนวตั้ง และทำการจำลองการไหลของกระแสน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic หรือ CFD) ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยได้ใช้แบบกังหันน้ำต้นแบบของ Rawling (2008) แสดงในภาพที่ 12 ในการสร้างแบบจำลองขึ้นมา เป้าหมายของงานวิจัยนี้คือ จำลองการไหลของกระแสน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งในสถานะต่างๆ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันน้ำแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรม Fluent การจำลองเป็นแบบ 2 มิติ การไหลมีลักษณะไม่คงที่ (Unsteady State หรือ Transient) แบบจำลองแบบปั่นป่วนที่ใช้คือ Sparlart – Allmaras ในการจำลองเพราะว่าเหมาะสมกับทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ในขณะนั้น จากการจำลองและการสอบเทียบผลพบว่า Sparlart – Allmaras ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ซึ่งทำให้โมเดลนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปทำการจำลองต่อไปได้ การจำลองได้นำไปที่ ducted vertical axis current turbine และพบว่ายังไม่พบสถานะที่จะทำให้ประสิทธิภาพมีเพิ่มมากขึ้น ผู้วิจัยได้แนะนำไว้ว่าแบบจำลองปั่นป่วนยังมีความไม่แม่นยำในเรื่องของการแยกตัวของการไหลอยู่



ภาพที่ 12 แบบจำลอง 2 มิติ

ที่มา: Nabavi (2008)

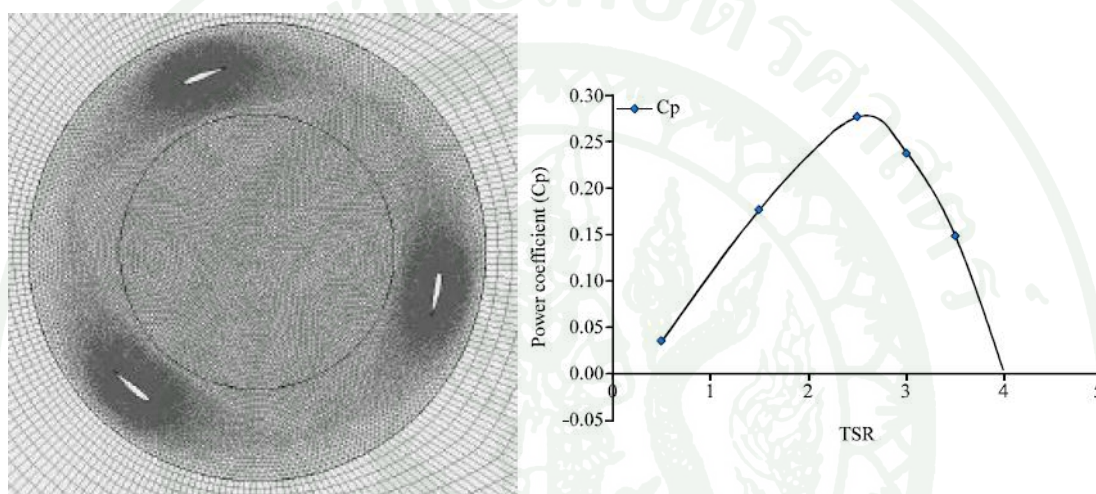
Hwang *et al.* (2008) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกังหันน้ำชนิดแนวตั้งเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตจากพลังงานน้ำ ด้วยการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมใบพัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันน้ำ คณะวิจัยได้ทำการศึกษาผ่านการจำลองก่อนโดยใช้โปรแกรม STAR CD ซึ่งเป็นโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ค้นคว้าเพื่อทำให้กังหันน้ำสามารถหมุนเองได้และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากตั้งแต่ความเร็วของกระแสน้ำต่ำหรือการไหลที่มีสถานะซับซ้อน ได้วิเคราะห์ถึงลักษณะเฉพาะตัวของใบพัดคือ ความยาวแกนระยะต่างๆ สภาพในแต่ละ TSR รูปร่างต่างๆของใบพัด การเปลี่ยนแปลงของ มุม pitch มุม phase รวมไปถึงจำนวนของใบพัด ดังแสดงในภาพที่ 13 จากการจำลองพบว่าประสิทธิภาพของกังหันน้ำที่ใช้ระบบควบคุมใบพัดมีมากกว่าถึงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพของกังหันน้ำที่ไม่ใช้ระบบควบคุมใบพัดหรือใบพัดที่ไม่มีการปรับมุมจากการทดลองจริงพบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับการจำลองทาง CFD และการจำลองทาง CFD เพิ่มเติมในการเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นไปอีก จากการควบคุมใบพัดแต่ละใบแยกส่วนกัน ในสถานะต่างๆ ผลจากการจำลองได้แสดงให้เห็นว่ากังหันน้ำชนิดแนวตั้งมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกังหันปกติโดยไม่มีการปรับมุมของใบพัด



ภาพที่ 13 แบบจำลอง 2 มิติและการทดลองจริงของกังหันน้ำแนวตั้ง

ที่มา: Hwang *et al.* (2008)

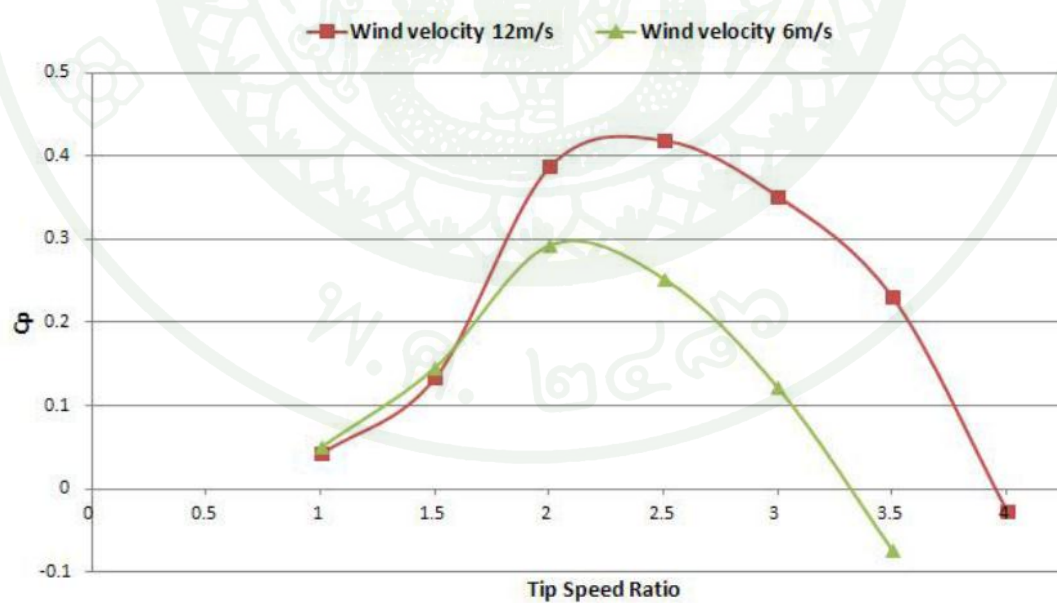
Beri and Yao (2011) ได้ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในการจำลองเพื่อ ทำการศึกษากังหันลมแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เมตร โดยใบพัดมีรหัสแพนอากาศ NACA2415 ซึ่งในการจำลองจะเป็นแบบ 2 มิติ แบบจำลองคอมพิวเตอร์ได้ถูกสร้างจากโปรแกรม GAMBIT และนำไปใช้ต่อในโปรแกรม Fluent เพื่อทำการจำลองและในการจำลองได้ใช้ แบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\epsilon$ และจากการจำลองพบว่ากังหันลมแนวตั้งนี้ ที่ความเร็วลม 4 เมตร ต่อวินาทีที่ TSR 2.5 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 27 เปอร์เซ็นต์ ดังในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แบบจำลอง 2 มิติและค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันลมแนวตั้ง

ที่มา: Beri and Yao (2011)

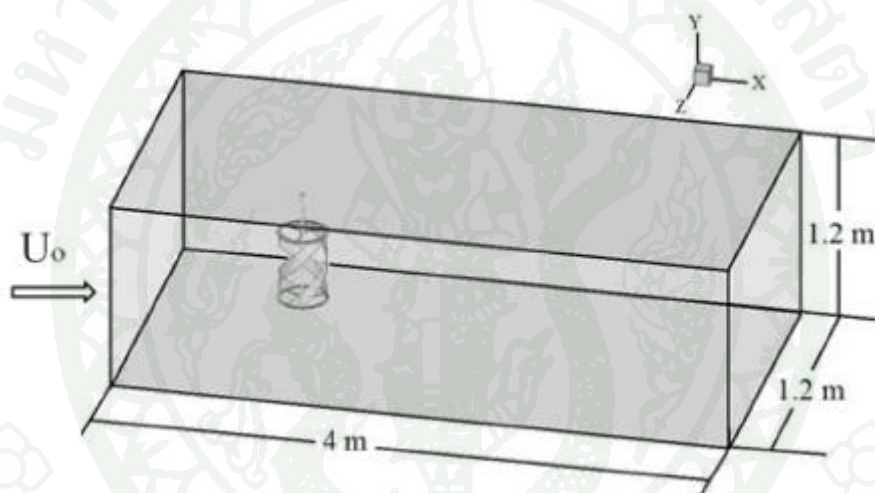
ณัฐพล (2555) ได้ใช้วิศวกรรมย้อนรอย เพื่อสร้างกังหันลมแนวตั้งต้นแบบขนาด 2 กิโลวัตต์ขึ้นมา แสดงในภาพที่ 15 เพื่อทำการศึกษาและวิจัย โดยกังหันลมแนวตั้งต้นแบบมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตร และมีขนาดความหนาของแพนอากาศ 0.06 เมตร ความยาวแพนอากาศ 0.4 เมตร และได้ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด พบว่าที่ความเร็วลม 12 เมตรต่อวินาทีที่ TSR 2.5 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังสูงสุดอยู่ที่ 41 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.0 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 30.1 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 15 กังหันลมแนวตั้งต้นแบบและค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ความเร็วลม 12 และ 6 เมตร ต่อวินาทีที่ TSR ต่างๆ

ที่มา: ญัฐพล (2555)

Zaidi *et al.* (2013) ได้ทำการจำลองการไหลของกระแสน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งชนิด Helical Blade Cross-flow (Gorlov Turbine) ดังภาพที่ 16 ที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาขนาดของใบพัดที่เหมาะสมที่สุดและกำลังสูงสุดที่ได้จากการไหลผ่านของกระแสน้ำ ใบพัดที่ใช้ในการจำลองคือ NACA 0012 ซึ่งมีอยู่ 3 ขนาดด้วยกันคือ 0.0660 เมตร 0.0983 เมตร และ 0.0988 เมตร สร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม GAMBIT และ จำลองการไหลโดยใช้พหุนิพันธ์โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของ ANSYS Inc. Fluent จำลองการไหลโดยใช้แบบจำลองปั่นป่วน Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ จากการจำลองพบว่าใบพัด NACA 0012 ขนาด 0.0983 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ TSR 2.25



ภาพที่ 16 แบบจำลอง Helical Turbine 3 มิติ

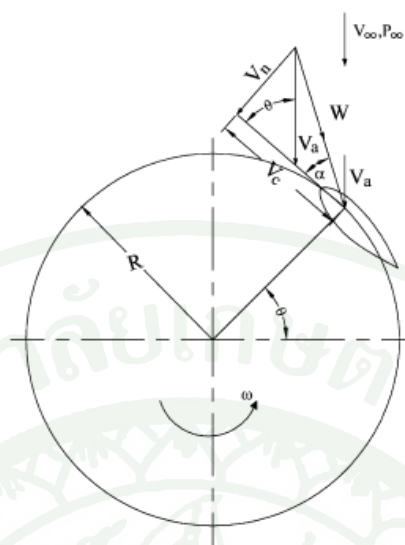
ที่มา: Zaidi *et al.* (2013)

แบบจำลองพื้นฐานในการศึกษาพฤติกรรมกั้นน้ำแนวตั้ง

ในการสร้างการทดลองหรือตัวต้นแบบมีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องของทุนและระยะเวลา การมีแบบจำลองทำให้สามารถประหยัดต้นทุนและเวลาได้เป็นอย่างดี แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพยิ่งทำให้การทำงานลุล่วงไปได้อย่างรวดเร็วและมีผลที่น่าพอใจ ในส่วนนี้จะอธิบายการริเริ่มและการพัฒนาของแบบจำลองต่างๆพอสังเขปเท่านั้น ส่วนใหญ่แล้วจะอธิบายอยู่ในลักษณะของกั้นน้ำล้มเนื่องจากเดิมทีแบบจำลองเหล่านี้ได้พัฒนาเพื่อไปใช้ในการวิเคราะห์กั้นน้ำล้ม แต่เนื่องด้วยกั้นน้ำนั้นได้พัฒนาขึ้นมาโดยใช้หลักการของกั้นน้ำล้มเป็นพื้นฐาน ดังนั้นการประยุกต์ใช้แบบจำลองต่างๆของกั้นน้ำนี้มีหลักการร่วมกันกับกั้นน้ำล้ม Navabi (2008) ได้อธิบายทฤษฎีและแบบจำลองต่างๆไว้ดังนี้

แบบจำลอง Potential Flow

จากรูปภาพที่ 17 แสดงถึงการไหลของกระแสน้ำผ่านกั้นน้ำแนวตั้ง กระแสน้ำไหลจากด้านบนด้วยความเร็ว V_∞ โดยจะมีค่าที่ไม่คงที่เข้าปะทะกับกั้นน้ำที่มีรัศมี R ที่หมุนด้วยความเร็วรอบ ω กั้นน้ำโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็นสองช่วงการทำงานหลักๆคือ ช่วงต้นน้ำหรือว่า Upstream ซึ่งจะเป็นส่วนครึ่งบนของกั้นน้ำ และช่วงท้ายน้ำหรือว่า Downstream จะเป็นส่วนครึ่งล่างของกั้นน้ำ ดังภาพที่ 17 จะพิจารณาได้ว่าเมื่อกระแสน้ำไหลถึงใบพัดจะมีความเร็วตามแนวแกนหมุนหรือเรียกว่าความเร็วเหนี่ยวนำ (Induced Velocity) V_d W คือความสัมผัสที่คำนวณจากความเร็วในแนวตั้งฉาก (Normal Velocity) V_n กับความเร็วเส้นสัมผัสผิว (Tangential Velocity) V_t ตัวแปรดังที่กล่าวมานั้นสามารถคำนวณจากสมการดังนี้



ภาพที่ 17 แสดงทิศทางการไหลของความเร็วผ่านกึ่งหันน้ำแนวตั้ง

ที่มา: Mazharul *et al.* (2006)

ความเร็วในแนวตั้งฉาก (Normal Velocity)

$$V_n = R\omega + V_a \cos \theta \quad (24)$$

ความเร็วในแนวเส้นสัมผัสวง (Tangential Velocity)

$$V_c = V_a \sin \theta \quad (25)$$

ความเร็วสัมพัทธ์ (Relative Velocity)

$$W = \sqrt{V_c^2 + V_n^2} \quad (26)$$

ในส่วนของมุมปะทะ (Angle of Attack) α ซึ่งเกิดจากการกระทำระหว่างความเร็วสัมพัทธ์และความเร็วในแนวเส้นสัมผัสผิวมีสมการดังนี้

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_n}{V_c} \right) \quad (27)$$

ช่วงการหมุนในแต่ละช่วงของกังหันน้ำ จะกำหนดเป็นมุมอะซิมุท (Azimuth) จากสมการที่ (27) แสดงให้เห็นว่าค่าของมุมปะทะจะขึ้นอยู่กับความเร็วแนวตั้งฉากและความเร็วในแนวเส้นสัมผัสผิวและค่าความเร็วทั้งสองชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมอะซิมุทที่เกิดขึ้น จึงส่งผลให้ค่าของมุมปะทะเปลี่ยนแปลงตามมุมอะซิมุทที่เปลี่ยนไปด้วย

ทิศทางของแรงยก (L) และแรงดูด (D) แรงในแนวตั้งฉาก (F_n) และแรงในแนวเส้นสัมผัสผิว (F_t) แสดงให้เห็นในภาพที่ 18 จะเห็นได้ว่าแรงในแนวเส้นสัมผัสผิวเกิดจากการแตกแรงของแรงยกและแรงดูด เข้าสู่แนวเส้นแรงของแรงในแนวเส้นสัมผัสผิวโดยมีความสัมพันธ์กับมุมปะทะ α เช่นเดียวกับแรงในแนวตั้งฉากซึ่งเกิดจากการแตกแรงของแรงยกและแรงดูดเข้าสู่แนวเส้นแรงของแรงในแนวตั้งฉาก สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงยก แรงดูด แรงในแนวตั้งฉาก และแรงในแนวเส้นสัมผัสผิวจะเขียนอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์แรงยก (C_l) สัมประสิทธิ์แรงดูด (C_d) สัมประสิทธิ์แรงในแนวตั้งฉาก (C_n) และสัมประสิทธิ์แรงในแนวเส้นสัมผัสผิว (C_t) ซึ่งจะสามารไปคำนวณหาแรงในแนวตั้งฉากและแรงในแนวเส้นสัมผัสผิวต่อได้ดังนี้

$$C_n = C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha \quad (28)$$

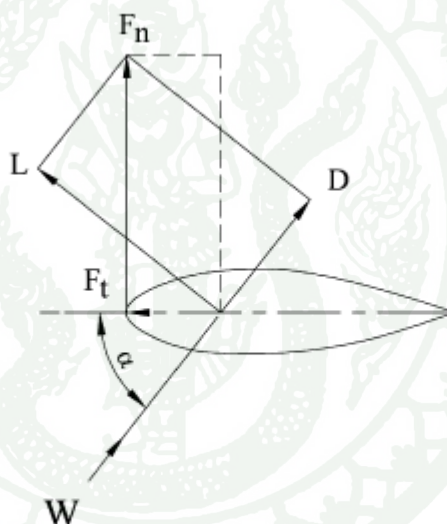
$$C_t = C_l \sin \alpha - C_d \cos \alpha \quad (29)$$

แรงในแนวตั้งฉากและแรงในแนวเส้นสัมผัสแสงคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$F_n = C_n \frac{1}{2} \rho C H W^2 \quad (30)$$

$$F_t = C_t \frac{1}{2} \rho C H W^2 \quad (31)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของน้ำ C คือความยาวของคอร์ด และ H คือความสูงของใบพัด



ภาพที่ 18 แสดงภาพแรงที่กระทำต่อใบพัด

ที่มา: Mazharul *et al.* (2006)

จากสมการที่ (28) และ (29) คือแรงในแนวตั้งฉากและแรงในแนวเส้นสัมผัสที่เกิดขึ้นที่มุมอะซิมุทใดๆ ดังนั้นสามารถพิจารณาเป็นฟังก์ชันของมุมอะซิมุท θ ค่าของแรงในแนวเส้นสัมผัสโดยเฉลี่ย (F_{ta}) ต่อใบพัดหนึ่งใบจึงสามารถหาได้จาก

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (32)$$

จากแรง F_{ta} ที่หาได้จากสมการสามารถนำไปคำนวณหาทอร์กที่เกิดขึ้นได้ในแต่ละใบโดย

$$T_{sb} = F_{ta} R \quad (33)$$

โดย R คือรัศมีของกังหันน้ำ

ผลรวมของทอร์กที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถคำนวณได้จาก

$$T_{net} = T_{sb} N \quad (34)$$

โดย T_{net} คือผลรวมทอร์กที่เกิดขึ้นจากใบพัดทุกใบ และ N คือจำนวนใบพัดทั้งหมด

กำลังที่ได้จากผลรวมของทอร์กมีสมการดังนี้

$$P = T_{net} \omega \quad (35)$$

แบบจำลอง Momentum

แบบจำลอง Momentum ต่างๆ มีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎี Glauert's actuator disc และ ทฤษฎี Blade element แนวคิดของแบบจำลองนี้คือ การเปลี่ยนแปลงของ momentum ทั้งหมด ในแนวแกน ผ่าน actuator disc มีค่าเท่ากับแรงของอากาศที่กระทำต่อใบพัดในแนวแกน และแรงดังกล่าวมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของความดันตลอดตัวกังหัน สมการ Bernulli ได้ถูกนำมาใช้กับ stream tube แต่ละ stream tube เพื่อหาค่าความเร็วของลมหมุนวน (wake velocity) แบบจำลอง momentum หลักๆ ที่ได้ถูกพัฒนาเพิ่มเติมมีอยู่ 3 แบบจำลองคือ แบบจำลอง single stream tube แบบจำลอง multiple stream tube และ Double multiple stream tube

Single Stream Tube

Templin (1974) ได้นำเสนอแบบจำลอง Single Stream Tube ดังภาพที่ 19 แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ง่ายที่สุดในการคำนวณและคาดคะเนประสิทธิภาพของกังหันแนวตั้ง แบบจำลองนี้จะสมมุติว่ากังหันจะถูกปิดล้อมด้วย single stream tube และสมมุติให้ค่าความเร็วที่ไหลผ่าน disc มีค่าคงที่ และยังสมมุติเพิ่มเติมในแบบจำลองนี้อีกคือ มีใบพัดอยู่หนึ่งใบและความยาวของคอร์ดของใบพัดนี้คือมีค่าเท่ากับผลรวมของความยาวคอร์ดทั้งหมดของกังหันของจริง จากทฤษฎี Glauert's actuator disc จะสามารถคำนวณความเร็วที่ไหลมาอย่างสม่ำเสมอผ่านตัวกังหันได้ดังนี้

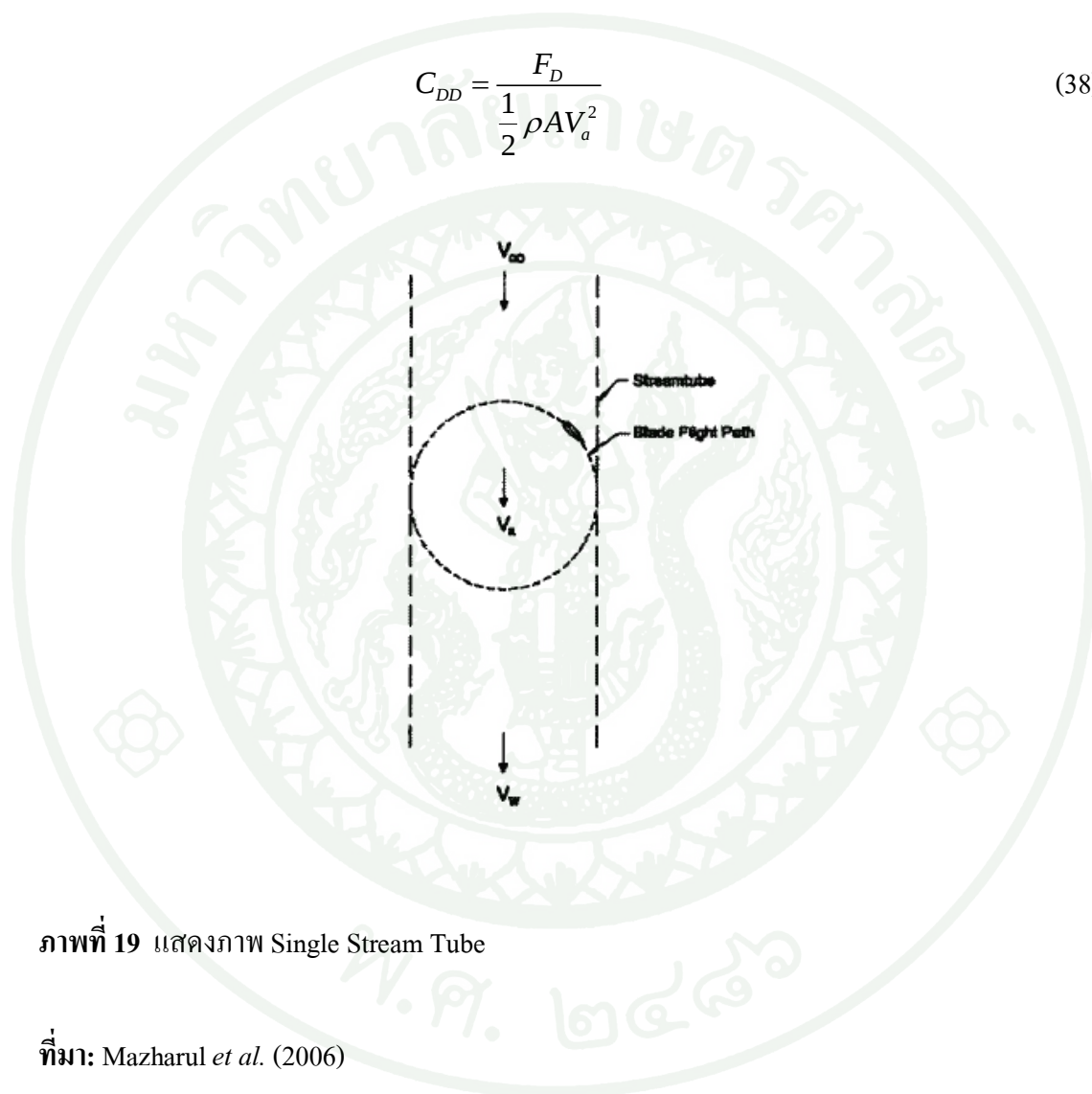
$$V_a = \left(\frac{V_\infty + V_w}{2} \right) \quad (36)$$

ค่าของความเร็วที่ไหลผ่านกังหันมีความเกี่ยวข้องกับแรงดูด โดยการเท่ากันระหว่าง แรงดูด (F_D) และการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในแนวแกน เมื่อการเท่ากันของสมการจะสามารถเขียนเทอมตัวแปรไร้มิติที่เป็นฟังก์ชันของค่าสัมประสิทธิ์แรงดูดของกังหันได้ดังนี้

$$\frac{V_a}{V_\infty} = \left(\frac{1}{1 + \frac{C_{DD}}{4}} \right) \quad (37)$$

C_{DD} คือค่าสัมประสิทธิ์แรงดุดของกังหันสามารถคำนวณได้จากสมการ (38) ส่วนแรงดุดของกังหัน คำนวณได้โดยอินทิเกรตแรงในแนวแกน โดยใช้ค่าการทดลองของอากาศพลศาสตร์ของใบพัด และ V_a ที่ได้จากสมการที่ (35) ยังสามารถนำไปคำนวณหาความเร็วสัมพัทธ์ ค่ามุมปะทะในแต่ละอะซิมุท และค่ากำลังเฉลี่ย

$$C_{DD} = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A V_a^2} \quad (38)$$



ภาพที่ 19 แสดงภาพ Single Stream Tube

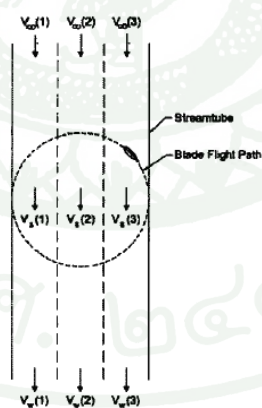
ที่มา: Mazharul *et al.* (2006)

Multiple Stream Tube

Wilson and Lissaman (1974) ได้พัฒนาแบบจำลองนี้ขึ้นมา โดยเปลี่ยนจาก single stream tube เป็น multiple stream tube ซึ่งในแต่ละ Tube จะมีอากาศพลศาสตร์แตกต่างกันและเป็นอิสระต่อกัน momentum theory และ blade element theory ได้ถูกนำมาใช้เช่นเดียวกับ single stream tube ดังที่กล่าวไปอากาศพลศาสตร์ในแต่ละ tube จะแตกต่างกัน ดังนั้น V_a ที่ได้มาจึงแตกต่างกันด้วย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (39) นี้ โดยที่ K คือตัวแปรที่ได้จากการคำนวณซ้ำๆ

$$\frac{V_a}{V_\infty} = 1 - \left(\frac{K}{2} \cdot \frac{NC}{R} \cdot \frac{R\omega}{V_\infty} \cdot \sin(\theta) \right) \quad (39)$$

ถัดมา Strickland (1975) ได้พัฒนา multiple stream tube ดังแสดงในภาพที่ 20 ให้มีความซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งในส่วนที่เพิ่มขึ้นมาคือเพิ่มการคำนวณผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงแรงดูดและโมเมนต์ตลอด stream tube ในแต่ละ stream tube ซึ่งทำให้แบบจำลองของ Strickland มีความแม่นยำมากกว่า Wilson แต่แบบจำลองของ Wilson มีข้อคืออยู่ตรงที่ว่า เนื่องจากความเรียบง่ายทางด้านฟิสิกส์ของแบบจำลองทำให้ผลเฉลยลู่อู่เข้า (convergence) ได้รวดเร็วกว่าของ Strickland



ภาพที่ 20 แสดงภาพ Multiple Stream Tube

ที่มา: Mazharul *et al.* (2006)

Double Multiple Stream Tube

ในภาพที่ 21 คือ Double Multiple Stream Tube ได้ถูกพัฒนาโดย Paraschivoiu (1981) เดิมทีแบบจำลองนี้ Tube Lapin (1975) เป็นคนนำเสนอเป็นคนแรก Paraschivoiu ได้พัฒนาในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลมดาเรียส การปรับปรุงแบบจำลองนี้คือ เพิ่มความเร็วเหนี่ยวนำในช่วงต้นลม (Upstream) และท้ายลม (Downstream) ด้านหน้าและด้านหลังตามลำดับ ความเร็วเหนี่ยวนำในช่วงต้นลมและท้ายลมสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$V_e = V_\infty \left(\frac{2V_{au}}{V_{\infty i}} - 1 \right) = V_{\infty i} (2u_u - 1) \quad (40)$$

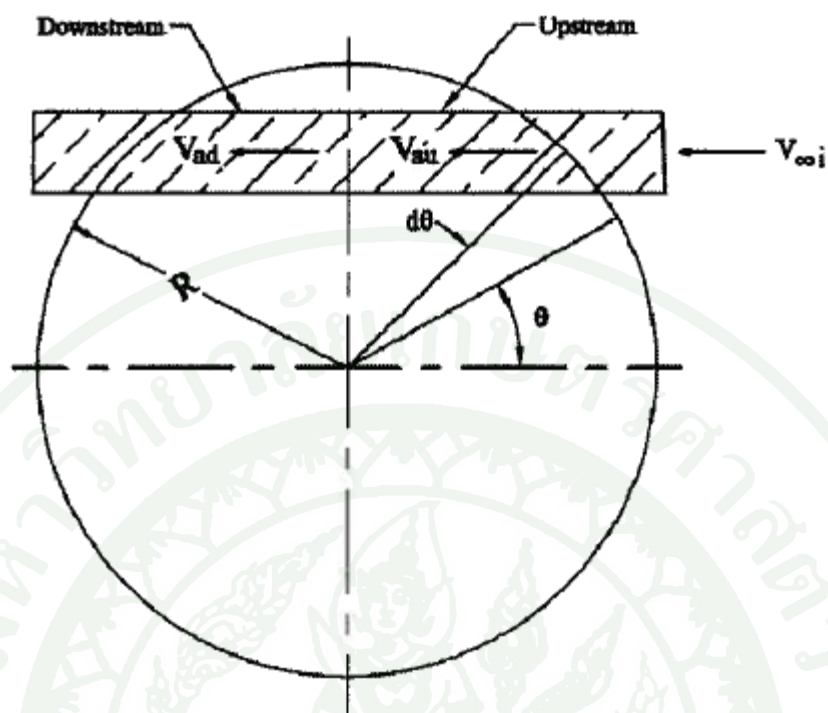
$$V_{ad} = u_d V_e = u_d (2u_u - 1) V_{\infty i} \quad (41)$$

โดย u_u และ u_d คือ interference factors สำหรับช่วงต้นลมและท้ายลมตามลำดับและสามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่างนี้

$$u_u = \left(\frac{V_{au}}{V_{\infty i}} \right) \quad (42)$$

$$u_d = \left(\frac{V_{ad}}{V_e} \right) \quad (43)$$

โดยที่ V_{au} และ V_{ad} คือ ความเร็วเหนี่ยวนำที่ช่วงต้นลมและท้ายลมตามลำดับและ $V_{\infty i}$ คือความเร็วในช่วงต้นลมซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความสูงเพื่อให้ครอบคลุมถึงผลกระทบของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากลมบนใบกังหันลม แบบจำลองนี้สามารถคาดคะเนการผลิตกำลังได้แม่นยำกว่า single และ multiple stream tube แต่อาจมีข้อด้อยที่เกิดจากการคาดคะเนเกินความเป็นจริงได้อยู่ เมื่อกังหันลมมีสภาพเป็น High Solidity (สภาวะเมื่อกังหันลมหมุนเร็วมากจนอากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ มีสภาพเหมือนเป็นของแข็ง) และมีปัญหาเรื่องการ convergence ที่ผิดพลาดของค่าซึ่งเกิดขึ้นในบางกรณี



ภาพที่ 21 แสดงภาพ Double Multiple Stream Tube

ที่มา: Mazharul *et al.* (2006)

Vortex Models

Larsen (1975) เป็นบุคคลแรกที่นำเสนอแบบจำลอง Vortex เพื่อใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลมในรูปแบบ 2 มิติ Fanuci and Walters (1976) ได้ประยุกต์แบบจำลองเพื่อใช้กับกังหันลมแนวตั้งแบบใบตรง ถัดมา Strickland (1979) ได้พัฒนาเพิ่มเป็นแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้ Vortex Method ร่วมกับ Aerodynamic Stall ผลที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองนี้เมื่อนำไปเทียบกับผลการทดลองโดยเฉพาะเมื่อเทียบกับช่วง TSR สูงๆ แบบจำลอง Vortex ได้รับการยอมรับว่ามีความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลอง stream tube แต่ต้องการทรัพยากรในการคำนวณสูงกว่า ถึงอย่างไรก็ตามการพัฒนาของทรัพยากรด้านการคำนวณ ทำให้ Vortex Model เหมาะสมทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

แบบจำลอง Vortex จะได้รับผลเฉลยจากการคำนวณผลกระทบที่เกิดขึ้นจากลมหมุนวน (Vorticity) ที่ไหลออกมาจากใบพัด ในขอบเขตการไหลนั้นๆ แบบจำลอง Vortex สามารถแบ่งย่อยออกมาได้ 2 แบบคือ Fixed Vortex และ Free Vortex

Fixed Vortex Method

ตัวใบพัดในแต่ละใบพัดจะถูกแทนที่ด้วย vortex filament หรือว่า lifting line ดังภาพที่ 22 ความต้านทานของ vortex filament สามารถคำนวณได้โดยใช้ Kutta-Joukowski law และค่าจากการทดลองของแรงยกต่อหนึ่งระยะห่าง (span) ดังสมการด้านล่างนี้

$$L = \rho V_\infty \Gamma \quad (44)$$

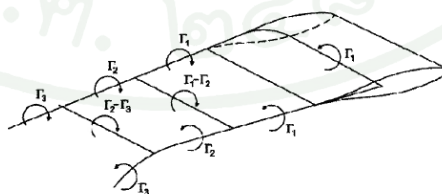
ค่าของลมหมุนวนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีของ Helmholtz และ Kelvin ความเร็วเหนียวที่เกิดขึ้นบน vortex filament ที่บนตำแหน่งใดๆ ในขอบเขตของการไหลคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์กันระหว่างค่าของความต้านทานของแผ่น vortex และแรงยก การเปลี่ยนแปลงของการไหลบนแนวแกนใช้ความสัมพันธ์แบบเดียวกัน ความเร็วในขอบเขตของการไหลหาได้จากการวางซ้อนกันของความเร็วจนช่วงต้นลบลบกับความเร็วนำที่เกิดขึ้นจากใบพัด ค่าของความเร็วที่ตำแหน่งใดๆ และค่ามุมปะทะที่เกิดขึ้นบนใบพัดสามารถหาได้จากแบบจำลองนี้ ข้อมูลจากการทดลองของใบพัดสามารถนำไปใช้คำนวณร่วมกับแบบจำลองเพื่อหาค่าทอร์คและกำลังได้

Free Vortex Method

จากการที่ Fixed Vortex Method มีจุดอ่อนอยู่ที่แผ่น vortex ถูกตรึงให้อยู่กับที่และไม่แปรผันตามเวลา จึงทำให้ความสามารถในการคำนวณส่วนประกอบของความเร็วในแนวตั้งฉากกับ free-stream คำนวณได้ไม่ดี Strickland (1979) ได้เสนอ Free Vortex Method ใ้ใช้แทนที่ด้วยแผ่น vortex ซึ่งเหมือนกับ Fixed Vortex Method ค่าความต้านทานของแผ่น vortex คำนวณจาก Kutta-Joukowski law ซึ่งใช้เพื่อหาค่าของแรงยก และได้เพิ่มการคำนวณในส่วนประกอบของความเร็วในแนวตั้งฉากและทิศทางทวนไถลโดยใช้ Biot-Savart law การเปลี่ยนแปลงของใบพัดที่เคลื่อนไหวยังอิสระจะเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลมหมุนวนที่ไหลออกจากใบพัดซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\Gamma_{sv} = -(\Gamma_B^n - \Gamma_B^{n-1}) \quad (45)$$

Free Vortex Method ได้แสดงถึงความสามารถในการคำนวณที่แม่นยำมากขึ้นในเรื่องของการคำนวณการเปลี่ยนแปลงทิศทางเวกเตอร์ความเร็วในช่วงต้นลมและท้ายลมของใบพัด และการคำนวณมุมปะทะที่เกิดขึ้น ถึงอย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้ยังมีข้อด้อยอยู่ในเรื่องของ การที่ไม่สามารถคำนวณแรงดูดที่เกิดขึ้นได้ เช่น ลมหมุนวนที่ไหลออกมาจากแกนกลางของกังหัน และยังบกพร่องในการจำลอง dynamic stall ซึ่งจะมีความสำคัญมากสำหรับช่วงการทำงานที่ Tip Speed Ratio ต่ำ และในการจำลองยังต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองของใบพัดในแต่ละโครงสร้าง ซึ่งบางโครงสร้างอาจไม่มีข้อมูลให้ใช้



ภาพที่ 22 แสดงภาพ Vortex Model

ที่มา: Nabavi (2008)

Cascade Model

แบบจำลอง Cascade โดยส่วนใหญ่จะใช้ในการวิเคราะห์ Turbomachinery โดยที่ Hirsh and Mandal (1987) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่น่าแบบจำลอง Cascade มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมแนวตั้ง แนวคิดของการใช้แบบจำลองนี้คือ คุณลักษณะของอากาศพลศาสตร์ของแต่ละใบพัดจะคำนวณแยกออกจากกัน ใบพัดในช่วงต้นลม และใบพัดในช่วงท้ายลม ซึ่งจะมีความคล้ายคลึงกับ Double Multiple Stream Tube ในการจำลองแบบจำลองนี้ได้นำผลกระทบที่เกิดจากมุมปะทะในแต่ละจุด และ Reynolds Numbers เข้ามาร่วมใช้ด้วย หลังจากคำนวณมุมปะทะและความเร็วในแต่ละจุดแล้วใบพัดจะถูกนำมาวางอยู่ในแนวเส้นตรงดังภาพที่ 23 จากแผนผังของแบบจำลอง Cascade จะสมมติให้ ใบพัดทำมุมตั้งฉากกับแนวแกนหมุนของกังหัน การคำนวณค่าความเร็วเหนี่ยวนำในช่วงต้นลมและท้ายลมคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_{au}}{V_\infty} = \left(\frac{V_e}{V_\infty} \right)^{k_i} \quad (46)$$

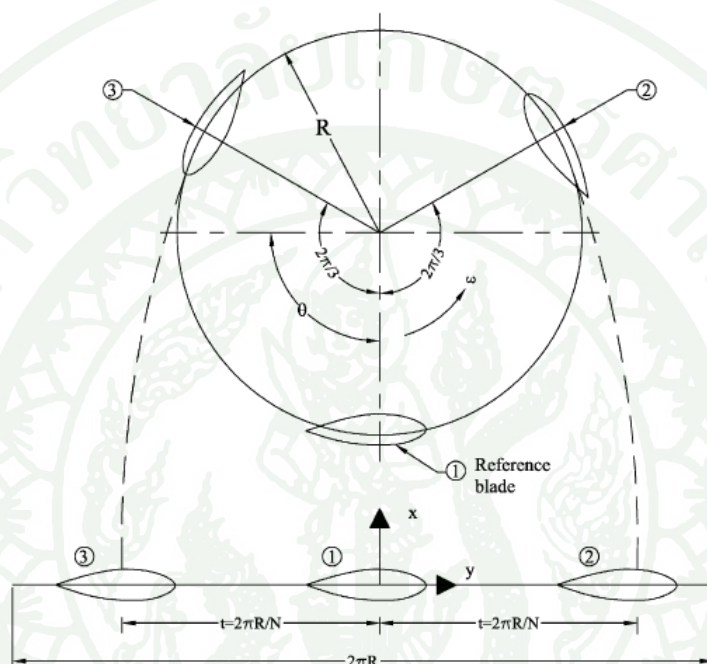
$$\frac{V_{ad}}{V_e} = \left(\frac{V_w}{V_e} \right)^{k_i} \quad (47)$$

โดยที่ V_e คือความเร็วของลมหมุนวนในด้านช่วงต้นลม และ V_w คือความเร็วของลมหมุนวนในช่วงด้านท้ายลม ค่าของ k_i จะเป็นค่าความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการทดลอง ซึ่ง Hirsh และ Mandal ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณค่า k_i ซึ่งอยู่ในรูปของ Exponent ดังสมการนี้

$$k_i = (0.425 + 0.332\sigma) \quad (48)$$

โดยที่ σ คือค่า Solidity Ratio

แบบจำลอง Cascade มีความแม่นยำในการคำนวณสูงกว่าแบบจำลอง stream tube แต่ก็ไม่แม่นยำเท่ากับแบบจำลอง Vortex การใช้แบบจำลองนี้จะเหมาะสมกับการจำลองที่มี Tip Speed Ratio สูงๆ และในช่วงที่เป็น High Solidity ความต้องการด้านทรัพยากรคอมพิวเตอร์ของแบบจำลองนี้มีความต้องการไม่สูง และไม่พบปัญหาในเรื่องของการ Convergence



ภาพที่ 23 Cascade Model

ที่มา: Mazharul *et al.* (2006)

RANS Model

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาคอมพิวเตอร์ได้ถูกปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง CPU ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการคำนวณของคอมพิวเตอร์ได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว จากแบบจำลอง Vortex ที่มีปัญหาใหญ่ในเรื่องของทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่มีความต้องการสูงในอดีต ปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์สมัยใหม่การจำลองแบบจำลอง Vortex ใช้เวลาเพียงน้อยนิดเท่านั้น ด้วยความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในยุคสมัยใหม่การจำลองแบบจำลอง RANS (Reynolds-Average Navier-Stokes) มีความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ในภาคอุตสาหกรรม ภาคการวิจัย และภาคการศึกษาในการจำลอง RANS สามารถแสดงให้เห็นถึงภายในขอบเขตของการไหลได้ง่ายขึ้น ทำให้กระบวนการวิเคราะห์ การตัดสินใจในการศึกษานั้นๆทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งการจำลอง RANS ไม่มีความต้องการในการใช้ข้อมูลจากภายนอกมาช่วยในการจำลองด้วย เช่น ข้อมูลแรงจุดและแรงยกที่ได้มาจากการทดลอง RANS เป็นแบบจำลองที่มีศักยภาพสูงที่สามารถจำลองแบบจำลองโครงสร้างที่มีความซับซ้อนได้ ในขณะที่แบบจำลอง Vortex ไม่สามารถทำได้ Dynamic Stall เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่แบบจำลอง Vortex ไม่สามารถทำได้แต่ RANS สามารถทำได้ ถึงแม้ว่า RANS จะเป็นแบบจำลองที่มีศักยภาพสูง แต่มีข้อจำกัดอยู่ในเรื่องของทรัพยากรคอมพิวเตอร์เช่นกัน การจำลองกังหันน้ำที่มีความซับซ้อนค่อนข้างสูงเป็นลักษณะเด่นในตัวอยู่แล้ว การจำลองในลักษณะที่เป็นสองมิติคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะธรรมดาทั่วไปยังสามารถทำได้อยู่ แต่ถ้าหากเป็นการจำลองที่เป็นสามมิติซึ่งจะมีความละเอียดเพิ่มขึ้นอย่างมาก และต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นอย่างทวีคูณ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะธรรมดาอาจไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมกับระยะเวลาที่จำกัด ดังนั้นความจำเป็นที่จะต้องขยับไปใช้คอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพเหนือกว่าที่เป็นขนาด Work Station ที่มีทรัพยากรในเรื่องของ CPU Processing และมีหน่วยความจำสูงหรือต้องใช้ Super Computer ที่มีทรัพยากรสูงขึ้นไปอีก และอีกปัญหาหนึ่งของ RANS คือการเลือกใช้ Turbulence Models (แบบจำลองปั่นป่วน) ให้เหมาะสมกับงานและทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่มี เพราะว่าแบบจำลองปั่นป่วนที่มีความละเอียดสูง จะมีความต้องการด้านทรัพยากรคอมพิวเตอร์สูงตามไปด้วยเพื่อให้เหมาะสมกับระยะเวลาที่ถูกจำกัด

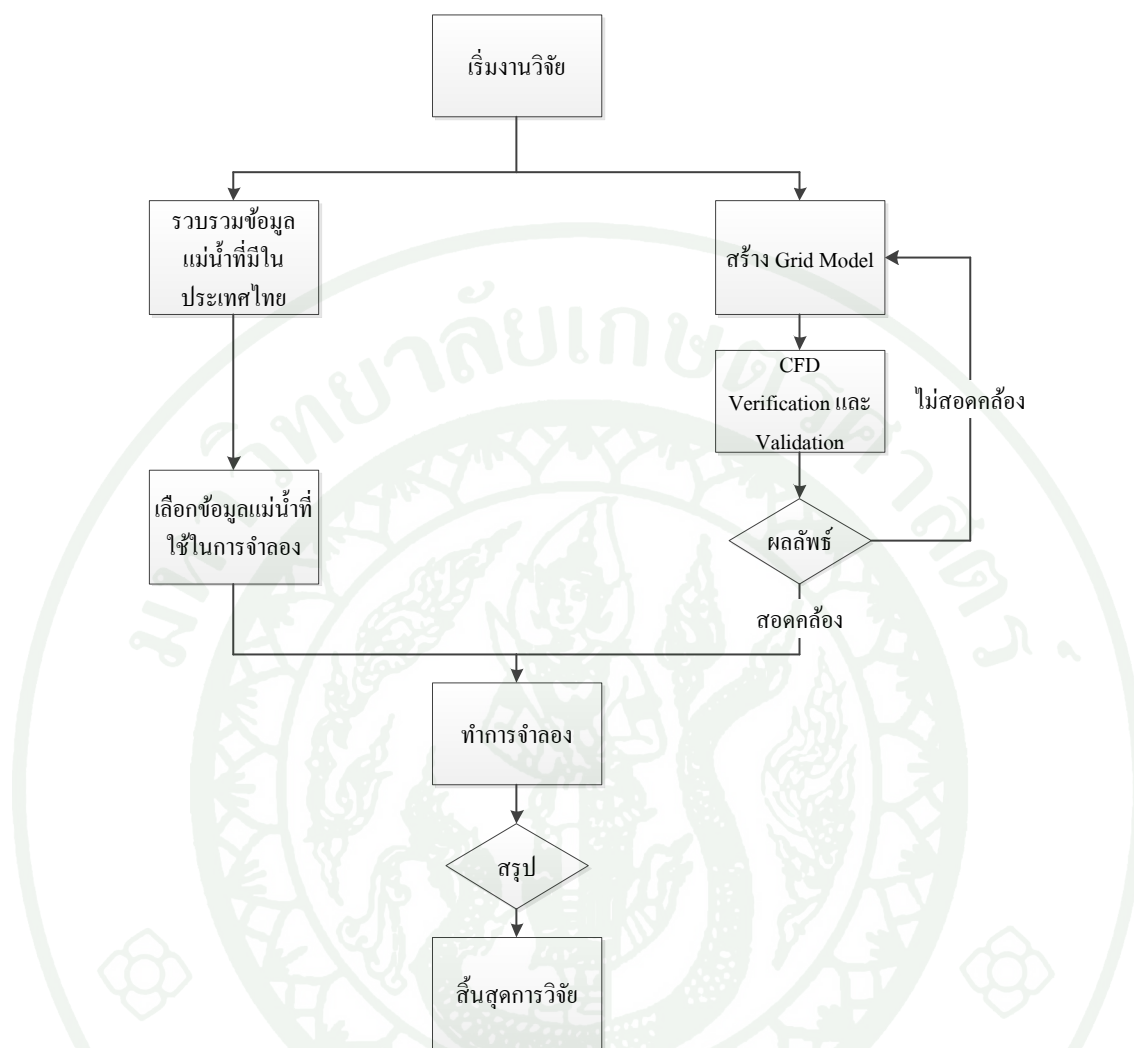
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะทั่วไป
2. โปรแกรมจำลองการไหลเพื่อวิเคราะห์การไหลของน้ำ Ansys Fluent 14.5 และโปรแกรม GAMBIT เพื่อใช้ในการสร้างกริด

วิธีการ

จากภาพที่ 24 ในงานวิจัยนี้การทำงานได้แบ่งออกเป็นสองส่วนคู่ขนานกันคือ ส่วนรวบรวมข้อมูลแม่น้ำที่มีในประเทศไทย และส่วนที่เป็นการจำลองโดยใช้ CFD ในส่วนของ CFD สามารถแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนใหญ่ๆในกระบวนการคือ ขั้นตอนแรกการเตรียมประมวลผล (Pre-Processing) ขั้นตอนที่สอง ขั้นตอนการประมวลผล (Processing) และขั้นตอนที่สามขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing)



ภาพที่ 24 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการทำงานในงานวิจัยนี้

การเตรียมประมวลผล (Pre-Processing)

ในขั้นตอนการเตรียมประมวลผลของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถแบ่งย่อยได้อีกสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก การสร้างโดเมนและกำหนดขอบเขตเพื่อนำไปใช้ในการจำลองการไหล โดยโปรแกรม GAMBIT ในการสร้างกริดโมเดลแบบสองมิติ ขั้นตอนที่สอง คือการกำหนดสภาวะการไหลของน้ำในโปรแกรม Ansys Fluent 14.5 เพื่อจำลองการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งที่สภาวะต่างๆ โดยใช้กริดโมเดลที่สร้างมาจากขั้นตอนแรก

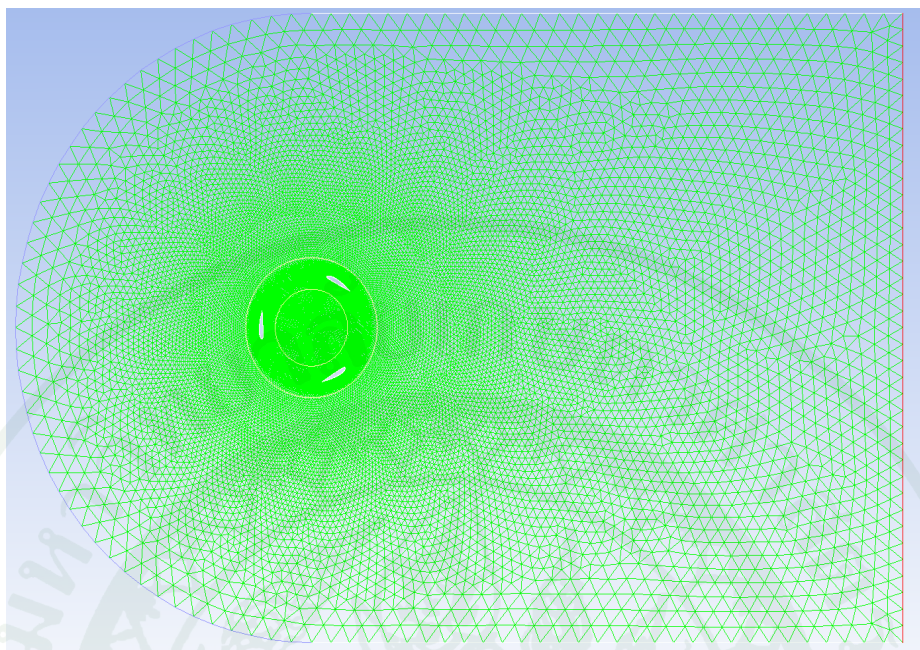
การสร้างโดเมน

ในขั้นตอนนี้เนื่องจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้ง การเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ เช่น แรงยก แรงกด ความเร็วที่เข้าปะทะกับใบพัด และมุมปะทะ เป็นต้น เกิดขึ้นตลอดทุกช่วงการหมุน ดังนั้นกังหันน้ำแนวตั้งต้องใช้การคำนวณแบบ Unsteady คือการคำนวณจะขึ้นอยู่กับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป จึงต้องนำเทคนิค Sliding Mesh มาใช้ในกระบวนการคำนวณเพื่อให้สามารถคำนวณค่าต่างๆที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงการหมุนได้

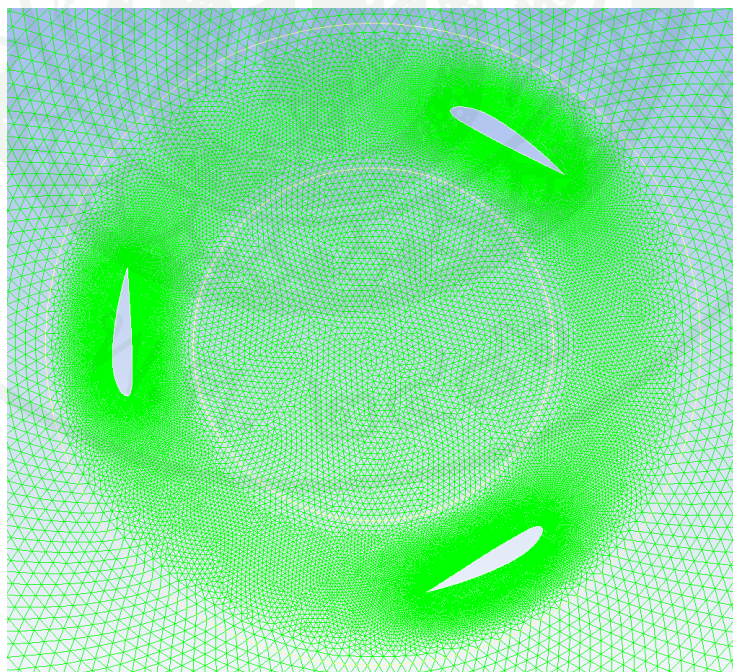
ในการใช้เทคนิค Sliding Mesh จะต้องสร้างโดเมนขึ้นมาโดยแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยใช้โปรแกรม GAMBIT คือ

1. ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary Zone) ส่วนนี้เป็นส่วนที่แทนสถานะแวดล้อมจริงโดยรอบของกังหันน้ำแนวตั้ง การสร้างโดเมนส่วนนี้ต้องสร้างให้มีขนาดใหญ่พอเหมาะเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการคำนวณในส่วนที่เคลื่อนที่ได้
2. ส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Moving Zone) ส่วนนี้จะแทนการหมุนของใบพัดกังหันน้ำและเป็นหัวใจของการคำนวณทั้งหมด ดังนั้นจำนวนปริมาตรของกริดในบริเวณนี้จะหนาแน่นกว่าส่วนอื่นมากเพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำ ความเร็วของการหมุนในส่วนนี้จะถูกกำหนดในโปรแกรม Ansys Fluent 14.5

งานวิจัยนี้เลือกใช้กริดแบบไม่มีโครงสร้าง เพื่อประหยัดเวลาในการสร้างกริด การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เน้นการวิเคราะห์ไปที่ใบพัดกังหันน้ำเท่านั้น เพราะตัวใบพัดเป็นส่วนที่ถูกเหนี่ยวนำให้กังหันน้ำหมุนด้วยความเร็วของกระแส น้ำ ส่วนนี้จึงเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ดังนั้นจึงได้ตัดส่วนของผลที่เกิดขึ้นจากเสากังหันน้ำและก้านยึดใบพัดออก การสร้างกริดที่บริเวณโดยรอบของใบพัดจึงมีความละเอียดและมีปริมาณที่หนาแน่นเพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องแม่นยำ ปริมาณกริดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การคำนวณมีความแม่นยำและถูกต้องขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อปริมาณของกริดเพิ่มขึ้นถึงจุดๆหนึ่ง ปริมาณของกริดจะไม่ส่งผลต่อค่าที่ได้จากการคำนวณแล้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการตรวจสอบวิธี Grid Independence เข้ามาด้วย ภาพที่ 25 และ ภาพที่ 26 แสดงภาพกริดที่ใช้ในการจำลองแบบสองมิติ

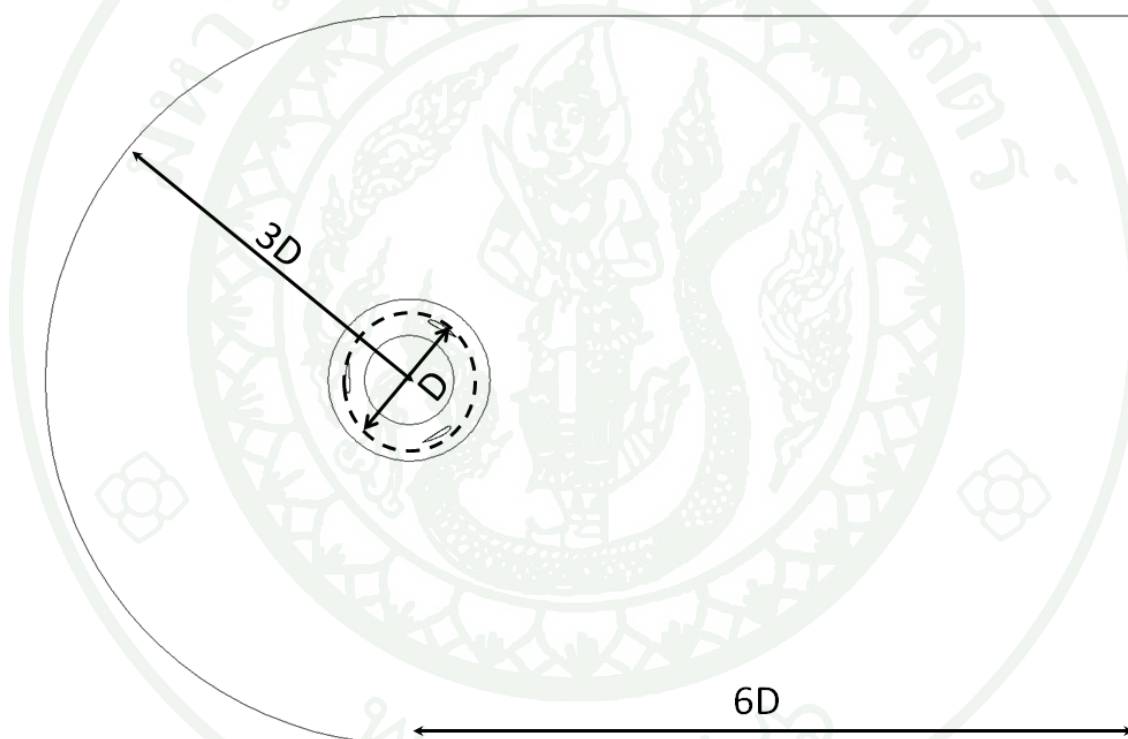


ภาพที่ 25 แสดงภาพโดเมนทั้งหมดของแบบจำลองสองมิติ



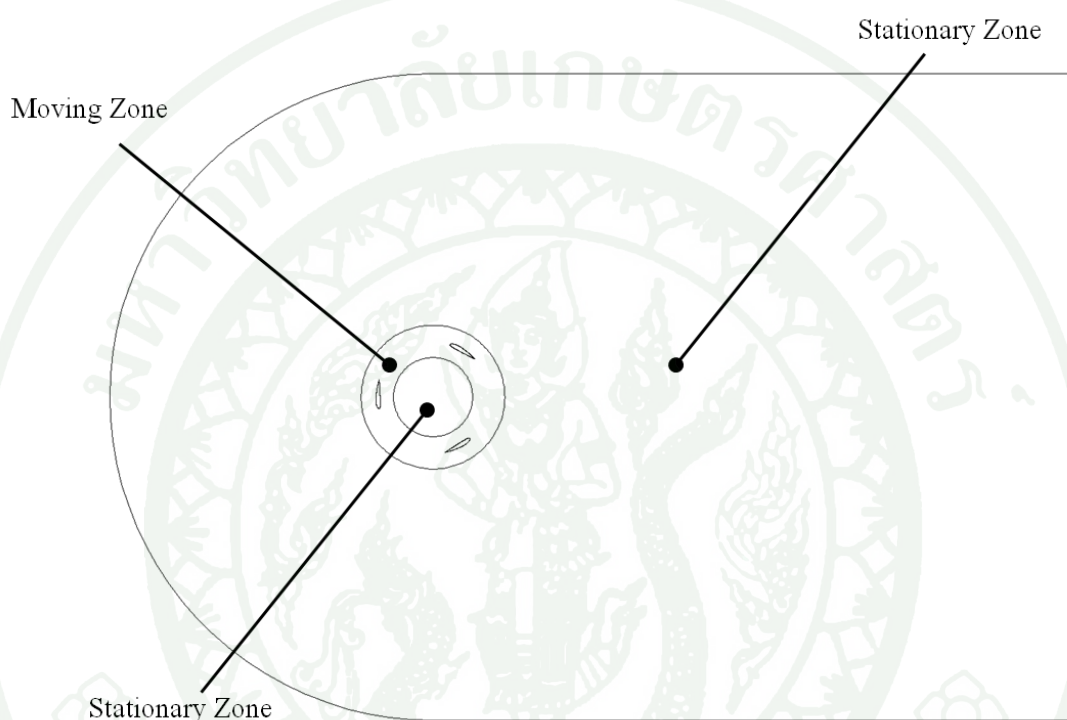
ภาพที่ 26 แสดงภาพแบบจำลองสองมิติบริเวณใบพัดทั้งสามใบที่ใช้ในการวิเคราะห์

ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการจำลองคือขนาดของโดเมน โดเมนที่แทนสภาวะโดยรอบของกังหันน้ำ ถ้าหากมีขนาดเล็กเกินไปจะส่งผลไปยังโดเมนส่วนของใบพัด อาจทำให้การคำนวณไม่ถูกต้อง ดังนั้นการสร้างโดเมนให้มีขนาดใหญ่เหมาะสมจึงมีความสำคัญ จากการตรวจสอบเอกสารของ Beri and Yao (2011) แนะนำว่าส่วนหน้าของโดเมนมีขนาดเป็นสามเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันน้ำแนวตั้ง และด้านข้างยาวไปถึงด้านหลังมีขนาดเป็นหกเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันน้ำแนวตั้ง ทั้งสองระยะวัดจากจุดอ้างอิงเดียวกันคือ จุดกึ่งกลางของกังหันน้ำแนวตั้ง ดังภาพที่ 27 และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมีความยาวเป็นสองเท่าของรัศมีที่วัดจากจุดกึ่งกลางของกังหันน้ำแนวตั้งไปจนถึงฟิวส์ด้านนอกสุดของใบพัด



ภาพที่ 27 ขนาดของโดเมนที่ใช้ในการสร้าง

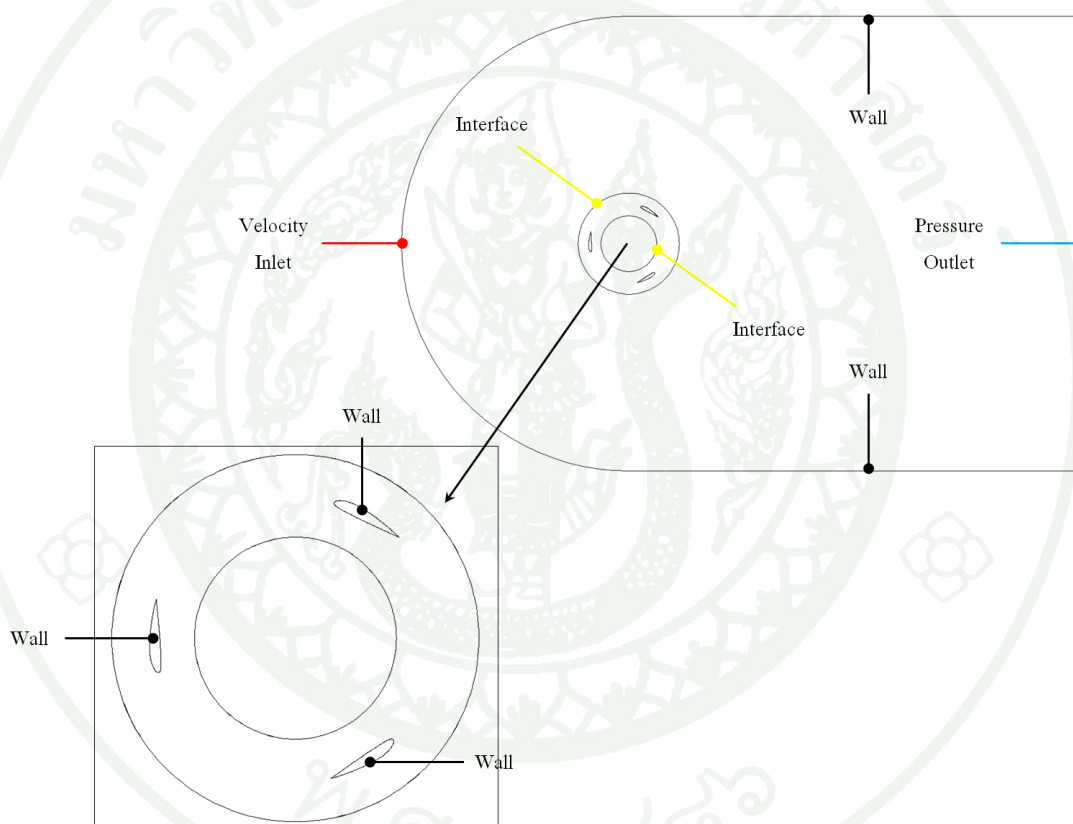
ขั้นตอนถัดไปหลังจากสร้างกริดเรียบร้อยแล้ว คือการกำหนดขอบเขต หรือ Boundary Condition และการกำหนดโซน ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Stationary Zone) และส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (Moving Zone) การกำหนดทั้งสองอย่างนี้สามารถทำได้ในโปรแกรม GAMBIT ภาพที่ 28 แสดงการกำหนดโซนในแบบจำลอง



ภาพที่ 28 การแบ่งโซนของส่วนที่เคลื่อนที่ไม่ได้และส่วนที่เคลื่อนที่ได้

จะเห็นว่าส่วนที่ไม่เคลื่อนที่มีอยู่สองส่วนคือ ส่วนที่แทนสภาวะแวดล้อมจริงโดยรอบ และส่วนที่เป็นวงกลมตรงกลางของกังหัน ดังที่กล่าวไปเบื้องต้น การวิเคราะห์ได้เน้นไปที่จุดที่มีการหมุนเกิดขึ้นจริงๆคือบริเวณที่เป็นใบพัดกังหันน้ำเท่านั้น ดังนั้นบริเวณวงกลมตรงกลางของกังหันน้ำจึงกำหนดให้เป็นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ด้วย บริเวณที่เป็นวงแหวนและมีใบพัดทั้งสามใบอยู่ข้างใน กำหนดให้เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้และเป็นบริเวณที่ทำการวิเคราะห์

ถัดมาคือการกำหนดขอบเขต (Boundary Condition) ภาพที่ 29 แสดงการกำหนดขอบเขตต่างๆของแบบจำลองนี้ โดยที่ส่วนหน้าคือ Flow Inlet กำหนดให้เป็น Velocity Inlet แทนความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลเข้ามา ด้านข้างทั้งสองข้างกำหนดให้เป็น Wall แทนขอบด้านข้างของแม่น้ำ ส่วนด้านหลังกำหนดให้เป็น Pressure Outlet ถัดมาส่วนที่เป็นวงแหวนวงกลมด้านนอกและด้านใน กำหนดให้เป็น Interface และสุดท้ายใบพัดกังหันน้ำทั้งสามใบกำหนดให้เป็น Wall เมื่อการสร้างกริด การกำหนดโซน และการกำหนดขอบเขตจากโปรแกรม GAMBIT เสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว ไฟล์ข้อมูลจะถูกนำไปใช้ในโปรแกรม Ansys Fluent 14.5 เพื่อกำหนดค่าต่างๆในการจำลองต่อไป



ภาพที่ 29 การกำหนดขอบเขตในแบบจำลองสองมิติ

การประมวลผล (Processing)

การจำลองกังหันน้ำแนวตั้งในโปรแกรม Ansys Fluent 14.5 กำหนดการคำนวณการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งเป็น Transient (Unsteady) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา และการไหลของน้ำเป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองปั่นป่วนแบบ two equation (สองสมการ) ที่อยู่บนสมมติฐานของ Boussineq โดยมีพื้นฐานจากสมการ Navier-Stokes คือแบบจำลอง RNG $k - \epsilon$ นอกจากแบบจำลองปั่นป่วนที่ต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมแล้ว อีกแบบจำลองหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญด้วยคือแบบจำลองที่คำนวณบริเวณชั้นขีดผิว (Wall Region) เรียกว่า Wall Functions จากการที่ค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณกระแสไหลผ่านใบพัด ฟังก์ชัน no slip ที่บริเวณใบพัดได้ถูกเปิดใช้ ทำให้ค่าต่างๆ เช่น ความดัน ความเร็ว เป็นต้น จะเกิดขึ้นที่บริเวณใบพัด ดังนั้นการคำนวณที่บริเวณนี้จึงมีความสำคัญมาก การคำนวณบริเวณชั้นขีดผิวจะแบ่งเป็นสามส่วนคือ viscous sublayer, buffer layer หรือ blending layer และ fully turbulent region หรือ log law region

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Standard Wall Function เนื่องจากเงื่อนไขที่น้อยกว่า near-wall modeling เพราะจะไม่คำนวณช่วง inner region คือช่วง viscous sublayer และ buffer layer แต่จะใช้วิธี “Bridge” หรือว่า “Link” ซึ่งจะใช้เป็นค่าประมาณระหว่างชั้นขีดผิวกับ fully turbulent region โดยข้ามช่วง inner region ไป ทำให้มีคำนวณที่รวดเร็วกว่า และใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่น้อยกว่า และค่า y^+ ของงานวิจัยนี้อยู่ที่ประมาณ 15 ถึง 100 เพื่อให้ครอบคลุมปัญหาและเป็นไปตามเงื่อนไขของโปรแกรม

สำหรับ Pressure-Velocity coupling อัลกอริทึม PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) ได้นำมาใช้ในกระบวนการจำลอง จาก Ansys Fluent User's Guide (2012) PISO เหมาะสมกับปัญหาที่เป็น Unsteady ซึ่งเข้าข่ายกับงานวิจัยนี้

ในส่วนของ Spatial Discretization Green-Gauss Cell Based ได้ถูกเลือกเนื่องจากมีความแม่นยำในการคำนวณและรวดเร็ว ถัดมาคือ Pressure ตั้งค่าเป็น Standard ตาม default ของโปรแกรม Momentum, Turbulent Kinetic Energy, Turbulent Dissipation Rate และ Energy ได้เลือกใช้ First Order Upwind ทั้งหมด เนื่องจากทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่มีเหมาะกับตัวเลือกดังกล่าวมาในด้านความแม่นยำ และความรวดเร็วในการจำลอง

เมื่อการจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบ Unsteady State คือการหมุนของกังหันน้ำค่าต่างๆที่เกิดขึ้นมาการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ว่าโปรแกรมไม่สามารถกำหนดการหมุนที่อยู่ในค่าของมุมอะซิมุทได้ จึงต้องทำการแปลงค่ามุมอะซิมุทให้อยู่ในหน่วยเวลาเรียกว่า Time Step Size ตามสมการด้านล่างนี้ (Ansys Fluent User's Guide (2012))

$$T_{TSS} = \frac{\theta}{\omega} \quad (49)$$

แปลงหน่วยของ θ จากองศาอะซิมุทเป็นมุมเรเดียนได้สมการใหม่ดังนี้

$$T_{TSS} = \frac{(\theta)\pi}{180(\omega)} \quad (50)$$

โดยที่

T_{TSS}	= Time Step Size
θ	= มุมองศาอะซิมุท
ω	= ความเร็วเชิงมุม

ถัดมาคือการกำหนดค่า Time Step ค่า Time Step จะเสมือนเป็นตัวแทนของจำนวนรอบการหมุนที่ต้องการ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่า θ ที่กำหนด ยกตัวอย่างเช่น กำหนด $\theta = 2$ หมายความว่า กังหันน้ำแนวตั้งจะหมุนทีละ 2 องศาอะซิมุท ดังนั้นถ้าต้องการให้กังหันหมุนครบหนึ่งรอบต้องกำหนด Time Step ให้มีค่าเท่ากับ 180 องศาอะซิมุท ดังนั้นถ้าต้องการให้กังหันหมุนครบหนึ่งรอบซึ่งเท่ากับ 360 องศาอะซิมุทพอดี ขั้นตอนถัดไปคือการกำหนดค่า Iteration (การทำซ้ำ) กำหนดไว้ที่ 120 ต่อ 1 time step และกำหนดเงื่อนไขของการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) ไว้ที่ 10^{-6} ตารางที่ 1 ตารางที่ 2 และตารางที่ 3 แสดงสภาวะการไหลที่กำหนดลงไปโปรแกรมของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรและ 1.5 เมตร

ตารางที่ 1 สภาวะการไหลของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 3 เมตร

	ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที		ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที	
TSR	ความเร็วการหมุน เรเดียนต่อวินาที	Time step size วินาที	ความเร็วการหมุน เรเดียนต่อวินาที	Time step size วินาที
1.0	0.413	0.08451957637	0.333	0.1048245797
1.5	0.62	0.05630094361	0.5	0.06981317008
2.0	0.827	0.04220868808	0.667	0.0523337107
2.5	1.033	0.03379146664	0.833	0.04190466391
3.0	1.24	0.02815047181	1	0.03490658504
3.5	1.447	0.02412341744	1.167	0.02991138392
3.9	-	-	1.3	0.02685121926
4.0	1.653	0.02111711134	-	-

ตารางที่ 2 การตั้งค่า time step size ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 1.5 เมตรที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที

	0.5 เมตรต่อวินาที	0.6 เมตรต่อวินาที	0.7 เมตรต่อวินาที
TSR	Time step size วินาที	Time step size วินาที	Time step size วินาที
0.5	0.1048245797	0.0872664626	0.07474643477
1.0	0.0523337107	0.0436332313	0.03741327443
1.5	0.03490658504	0.02908882087	0.02493327503
2.0	0.0261864854	0.02181661565	0.01869661759
2.5	0.02093976307	0.01745329252	0.01496210246
2.75	0.01745329252	0.01586662956	0.0135982022

ตารางที่ 3 การตั้งค่าความเร็วของการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 1.5 เมตรที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที

TSR	0.5 เมตรต่อวินาที	0.6 เมตรต่อวินาที	0.7 เมตรต่อวินาที
	ความเร็วการหมุน เรเดียนต่อวินาที	ความเร็วการหมุน เรเดียนต่อวินาที	ความเร็วการหมุน เรเดียนต่อวินาที
0.5	0.333	0.4	0.467
1.0	0.667	0.8	0.933
1.5	1	1.2	1.4
2.0	1.333	1.6	1.867
2.5	1.667	2	2.333
2.75	1.833	2.2	2.567

ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post-Processing)

ในขั้นตอนนี้คือการนำข้อมูลดิบที่ได้จากการจำลอง มาวิเคราะห์ วินิจฉัย ข้อมูลดิบเหล่านี้ โปรแกรม Ansys Fluent 14.5 สามารถแสดงออกในลักษณะต่างๆได้ เช่น ตัวเลข, กราฟ, แอปลี (Contour) และเวกเตอร์ (Vector) เป็นต้น การสอบเทียบค่า (Verification) และการสอบเทียบผล (Validation) ต้องอาศัยกระบวนการนี้ด้วยเพื่อให้การจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำ

ข้อมูลแม่น้ำในประเทศไทย

แม่น้ำตามธรรมชาติในประเทศไทยนั้นมีอยู่มากมายหลายสาย จากข้อมูลที่รวบรวมมาจาก โทรมาตร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ผ่านเว็บไซต์ watertele.egat.co.th พบว่าข้อมูลแม่น้ำต่างๆตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 ถึง พ.ศ. 2556 ทำให้ทราบว่าศักยภาพของแม่น้ำในประเทศไทยมี ประสิทธิภาพมากพอที่จะใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกังหันน้ำแนวตั้งได้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือก ข้อมูลที่รวบรวมมาของแม่น้ำนำมาใช้ในการจำลอง เนื่องจากความลึกของระดับน้ำที่ลึกมากพอ ความเร็วของกระแสน้ำที่มีมากพอเฉลี่ยตลอดปี และสถานีวัดที่กระจายตัวอยู่ตลอดเส้นแม่น้ำมีมากพอที่จะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพโดยรวมของแม่น้ำสายนี้ ดังภาพที่ 30 แสดงข้อมูลของแม่น้ำ ส่วนข้อมูลแม่น้ำอื่นๆที่รวบรวมมาด้วยสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข

ตำแหน่ง	เขื่อนสิริกิติ์ สุ่มน้ำน่าน										หน่วย	
	สถานีวัด											
	TU02	TU03	TU04	TU07	ID01	TD02	TD03	TD04				
	แม่น้ำน่าน อ.ท่าวังผา	แม่น้ำน่าน อ.เมืองน่าน	แม่น้ำน่าน อ.เวียงสา น้ำน่าน	วัด น้ำว้า จ.น่าน	แม่น้ำน่าน ท้ายเขื่อนสิริกิติ์	แม่น้ำน่าน การประปา ผาสูง จ.อุตรดิตถ์	กระซังปลาบ้าน วังกระพี จ.อุตรดิตถ์	แม่น้ำน่าน อ.ตรอน จ.อุตรดิตถ์				
ระยะ	กว้าง	160	100	100	140	200	160	300	300	ม.		
	ระดับท้องน้ำ	208.81	189.3	172.96	181.1	68.94	53.66	49.74	47.46	ม.รทก.		
	ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	215.30	191.20	179.39	184.99	72.46	57.03	52.17	50.80	ม.รทก.		
	ระดับตลิ่งซ้าย	223.36	197.18	185.49	194.67	81.61	67.28	58.96	56.39	ม.รทก.		
	ระดับตลิ่งขวา	227.01	198.91	184.83	197.68	84.64	67.56	55.6	57.31	ม.รทก.		
	อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	205.46	119.11	292.73	75.19	270.69	223.09	393.22	345.28	ลบ.ม./วินาที		
	ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	14.55	7.88	12.53	13.57	12.67	13.62	9.22	8.93	ม.		
	ความลึกเทียบตลิ่งขวา	18.2	9.61	11.87	16.58	15.7	13.9	5.86	9.85	ม.		
ระยะ	ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	6.49	1.90	6.43	3.89	3.52	3.37	2.43	3.34	ม.		
	ความกว้างเทียบระดับน้ำ	60.00	74.00	74.00	44.00	110.00	94.00	84.00	156.00	ม.		
	พื้นที่	389.15	140.44	475.64	170.96	387.21	317.04	204.29	521.78	ม. ²		
	ความเร็วเฉลี่ย	0.53	0.85	0.62	0.44	0.70	0.70	1.92	0.66	ม./วินาที		
	ตำแหน่ง	เขื่อนสิริกิติ์ สุ่มน้ำน่าน										หน่วย
		สถานีวัด										
		TD06	TD08	TD09	TD10	ID11						
		ปาด อ.น้ำปาด	ตรอน วัดวังปารกฏ	แควน้อย บ้านหนองบอน	คลองสิงห์ คลองสิงห์	น้ำริด วัดน้ำริดใต้						
ระยะ	กว้าง	100	70	130	16	60				ม.		
	ระดับท้องน้ำ	78.09	59.05	46.75	-0.847	0.216				ม.รทก.		
	ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	80.89	62.00	51.54	0.93	0.72				ม.รทก.		
	ระดับตลิ่งซ้าย	89.8	68.88	61.87	0.439	4.187				ม.รทก.		
	ระดับตลิ่งขวา	90.25	69.24	62.3	2.041	4.093				ม.รทก.		
	อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	19.09	7.75	121.80	-	-				ลบ.ม./วินาที		
	ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	11.71	9.83	15.12	1.286	3.971				ม.		
	ความลึกเทียบตลิ่งขวา	12.16	10.19	15.55	2.888	3.877				ม.		
ระยะ	ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	2.80	2.95	4.79	1.78	0.50				ม.		
	ความกว้างเทียบระดับน้ำ	37.00	23.00	42.00	16.00	18.00				ม.		
	พื้นที่	103.68	67.94	201.30	28.44	9.06				ม. ²		
	ความเร็วเฉลี่ย	0.18	0.11	0.61	-	-				ม./วินาที		
หมายเหตุ	ม.รทก. = ระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) [สถานีวัดน้ำ เกาะหลัก จ.ประจวบคีรีขันธ์]											

ภาพที่ 30 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของแม่น้ำน่าน

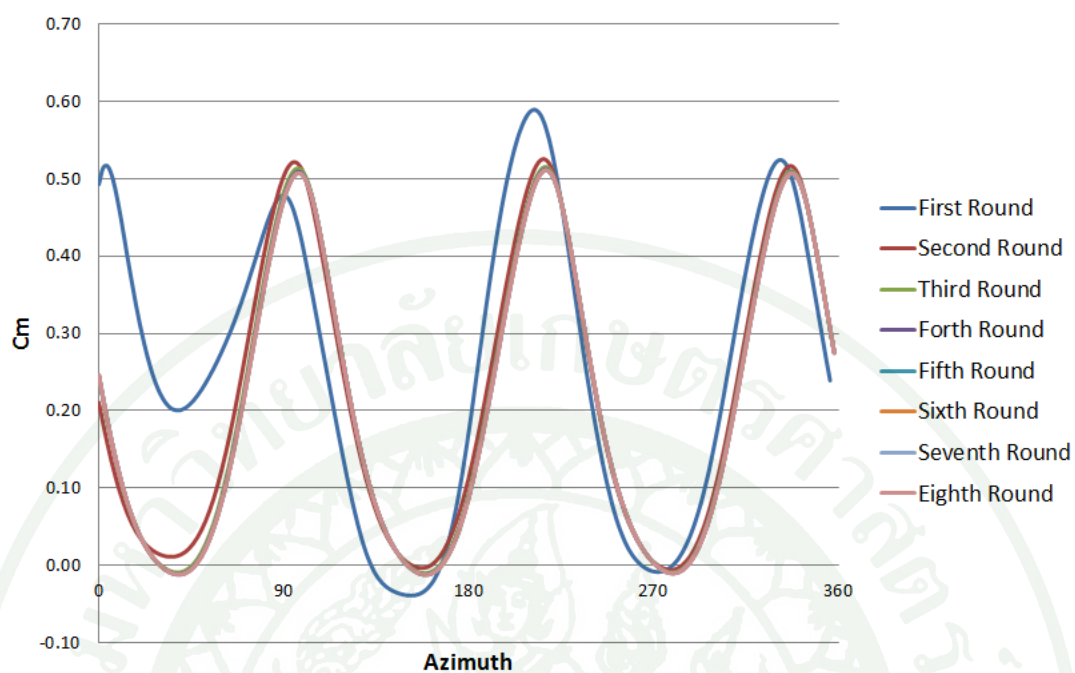
ผลและวิจารณ์

การจำลองกังหันน้ำแนวตั้งในงานวิจัยนี้ รูปร่างและขนาดของใบพัดมาจากการสร้างกังหันลมแนวตั้งโดยใช้หลักการวิศวกรรมย้อนรอยของ ฌีรูล (2555) ใบพัดกังหันลมต้นแบบมีทั้งหมดสามใบ แต่ละใบมีระยะห่างระหว่างกัน 120 องศา โดยใบพัดมีขนาดความยาวของเพนอากาศ 0.4 เมตร และมีความหนา 0.06 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันลมมีขนาด 3 เมตร และความยาวของใบพัดทั้งสามใบมีขนาด 3 เมตร ในงานวิจัยจะทำการจำลองการไหลของกระแสน้ำไหลผ่านกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเดิม และจะทำการจำลองกังหันน้ำแนวตั้งที่ลดขนาดลงด้วย โดยจะลดขนาดลงจากเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ลดลงเหลือ 1.5 เมตร และขนาดของใบพัดจากเดิมยาว 3 เมตร จะถูกลดเหลือ 1.5 เมตรเช่นกัน การจำลองในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลของแม่น้ำน่านในการจำลองเนื่องจากข้อมูลที่ได้รวบรวมมาทั้งหมดของแม่น้ำแต่ละสายพบว่าที่แม่น้ำน่านสถานีวัดข้อมูลน้ำมีการกระจายตัวอยู่ตามเส้นแม่น้ำมากที่สุด และการที่ทำการลดขนาดของกังหันน้ำแนวตั้งลงมานั้นเพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลของแม่น้ำน่านทุกๆสถานีวัด เนื่องจากบางสถานีวัดมีระดับความลึกของน้ำต่ำเกินไปสำหรับความสูงของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเดิม

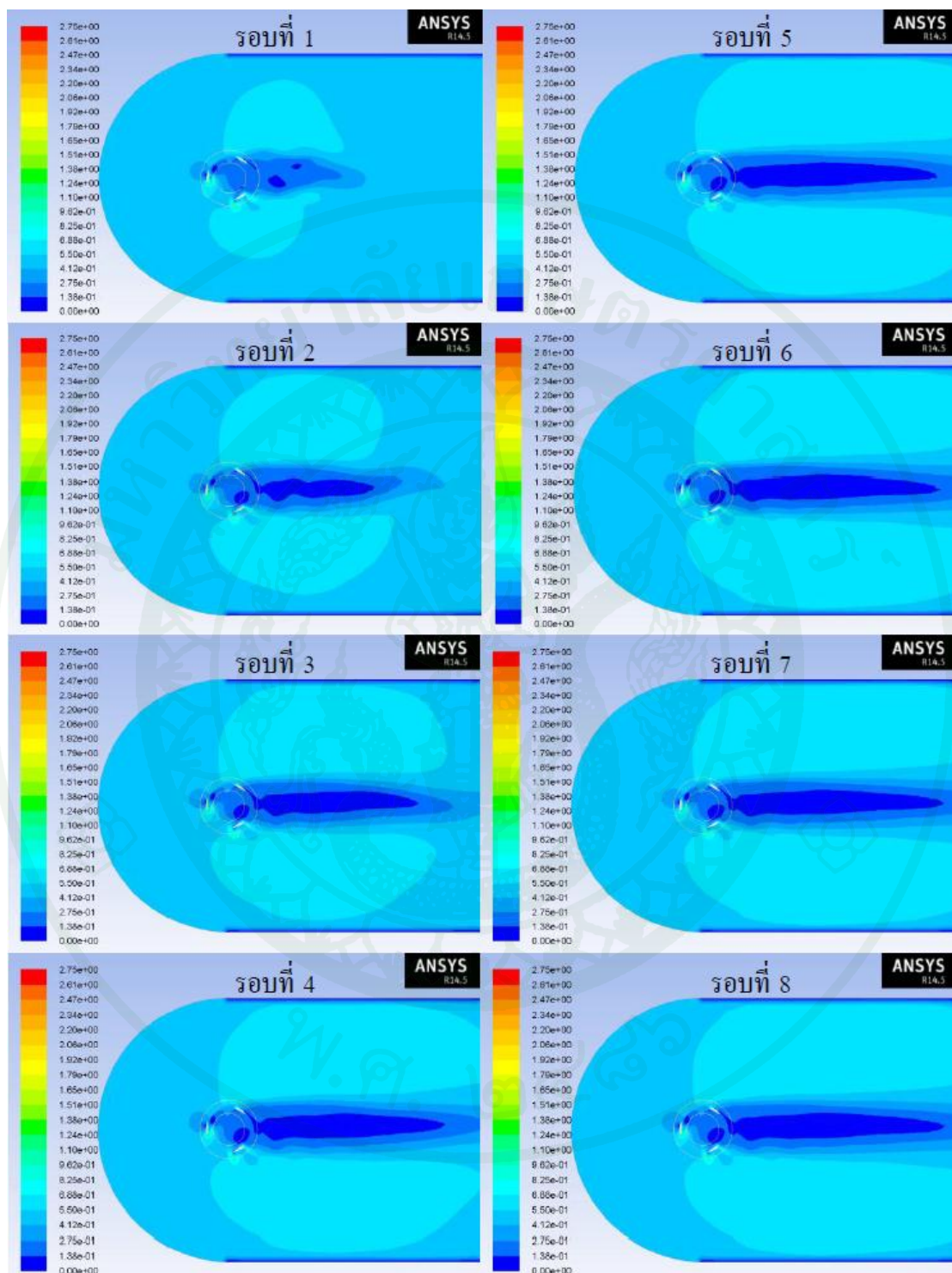
การจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือ CFD ความถูกต้องแม่นยำของการจำลองจะมาจากการตรวจสอบสองประการคือ การสอบเทียบค่า (Verification) เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของโปรแกรมว่า ไม่มีความคลาดเคลื่อน สามารถนำไปใช้คำนวณในกระบวนการถัดไปได้ เช่น การตรวจสอบ Grid Independence ซึ่งจะแสดงผลในบทนี้ และการสอบเทียบผล (Validation) เป็นการสอบเทียบผลของการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (Experimental Data) เพื่อตรวจสอบว่าค่าที่มาจากการจำลองมีความสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงมากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

การสอบเทียบค่า Verification

การนำค่าที่ได้จากการจำลองมาใช้ในการวิเคราะห์นั้น ค่าเหล่านั้นต้องมีความถูกต้องแม่นยำโดยผ่านกระบวนการสอบเทียบค่ามาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากสมมติฐานของ Betz (1919) ที่ว่าการไหลของอากาศ เป็นการไหลแบบไม่อัดตัว (Incompressible Flow) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของน้ำไหล และจากการอธิบายของ Hwang *et. al.* (2008) กังหันน้ำประเภทนี้มีลักษณะเหมือนกังหันลมใต้น้ำ การกำหนดค่าต่างๆในการวิเคราะห์ทาง CFD ของงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Beri and Yao (2011) โดยการเคลื่อนที่ของใบพัดกังหันน้ำแนวตั้งจะหมุนครั้งละ 2 องศาต่อชั่วโมง เงื่อนไขค่าที่สุดของการลู่เข้าของผลเฉลย (Convergence) กำหนดอยู่ที่ 10^{-6} และจำนวนการทำซ้ำ (Iteration) กำหนดอยู่ที่ 120 ต่อ 1 time step เมื่อกังหันน้ำแนวตั้งหมุนครั้งละ 2 องศาต่อชั่วโมง และคำนวณซ้ำจนครบ 120 Iteration จะนับเป็น 1 time step ดังนั้นการหมุนหนึ่งรอบ จะมีทั้งหมด 180 time step ซึ่งจะเท่ากับ 360 องศาต่อชั่วโมง โดยค่าที่ต้องการจากโปรแกรม CFD คือค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์หรือ C_m (Moment Coefficient) ซึ่งจะนำไปแปลงค่าอีกครั้งหนึ่งให้เป็นแรงบิด ในการสอบเทียบค่าเพื่อหาค่า C_m ที่มีความเสถียรและแม่นยำแล้วนั้น ในการจำลองได้ปล่อยให้กังหันน้ำแนวตั้งหมุนไปทั้งหมด 8 รอบ จากกราฟในภาพที่ 31 คือค่า C_m ที่ได้จากการหมุนในแต่ละรอบ จะเห็นได้ว่ากราฟในรอบที่ 4 ไปจนถึงรอบที่ 8 เส้นกราฟทับกันพอดีแสดงว่าค่า C_m ตั้งแต่รอบที่ 4 เป็นต้นไปมีความเสถียรแล้ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ในภาพที่ 32 คือภาพการกระจายความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งที่มีการหมุนตั้งแต่รอบที่ 1 ไปจนถึงรอบที่ 8 จะเห็นได้ว่าการกระจายความเร็วในการหมุนแต่ละรอบจะค่อยๆปรับตัวจนเข้าสู่ภาวะเสถียร ซึ่งจะค่อยๆปรับตัวตั้งแต่รอบที่ 1 ไปจนถึงรอบที่ 4 และหลังจากนั้นในรอบที่ 5, 6, 7 และ 8 จะเห็นได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการกระจายความเร็วอีกแล้ว แสดงว่าตั้งแต่รอบที่ 4 เป็นต้นไปการกระจายความเร็วมีสถานะที่เสถียรแล้ว จึงทำให้ค่า C_m ตั้งแต่รอบที่ 4 ขึ้นไปมีความเสถียรไปด้วย ดังนั้นในการจำลองจึงต้องปล่อยให้กังหันน้ำแนวตั้งหมุนไปอย่างน้อย 4 รอบ จึงจะสามารถนำค่า C_m มาใช้ได้



ภาพที่ 31 แสดงค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์ในการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งทั้งหมดแปดรอบ



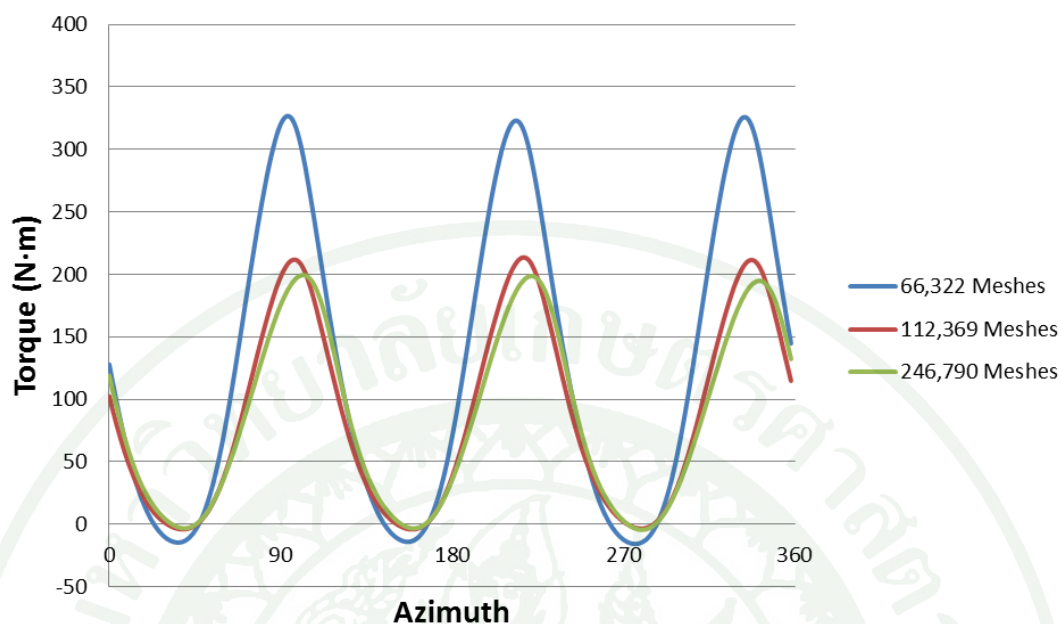
ภาพที่ 32 แสดงภาพการกระจายความเร็วของก้นน้ำแนวตั้งเมื่อหมุนไปทั้งหมดแปดรอบ

การตรวจสอบ Grid Independent

ในการจำลองโดยใช้ CFD กริดจะถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการจำลอง ดังนั้นการจำลองจะจำลองจากกริดที่ถูกสร้างขึ้นมา เพื่อทดสอบว่าจำนวนของกริดที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่าที่ได้จากการจำลองแล้ว จึงต้องทำ Grid Independent เพื่อให้ทราบถึงจุดที่จำนวนกริดที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่าที่ได้จากการจำลองแล้ว และเนื่องจากการจำลองในงานวิจัยนี้มีกังหันน้ำแนวตั้งอยู่สองขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรและ 3 เมตร โดเมนที่สร้างขึ้นมามีขนาดแตกต่างกัน ทำให้ต้องทำ Grid Independent ของโดเมนทั้งสองขนาด โดยจะใช้ค่าแรงบิดเฉลี่ยจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งที่ได้จากการจำลองในการวิเคราะห์ Grid Independent เพราะว่าค่าแรงบิดเฉลี่ยนี้เป็นค่าที่ต้องการจากการจำลองเพื่อนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ดังนั้นค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ได้มาจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงแล้วเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนกริด เนื่องจากการจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบ Unsteady ดังนั้นในการตรวจสอบ Grid Independent จึงสุ่มกำหนดสภาวะการทำงานของกังหันน้ำแนวตั้งมาสภาวะใดสภาวะหนึ่งตามที่ต้องการ ในการตรวจสอบโดเมนของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ได้สุ่มสภาวะการทำงานที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 1.0 ในการตรวจสอบ จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดเฉลี่ยของจำนวนกริดที่ 112,369 และ 246,790 กริด มีค่าแรงบิดเฉลี่ยออกมาใกล้เคียงกันมาก แตกต่างกันเพียง 1.2 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และจากภาพที่ 33 แสดงกราฟของแรงบิดจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ให้เห็นอย่างชัดเจนอีกกว่ากราฟของจำนวนกริด 66,322 กริดแตกต่างจากกราฟของจำนวนกริด 112,369 และ 246,790 กริดมาก ในขณะที่จำนวนกริด 112,369 และ 246,790 กริดกราฟมีความใกล้เคียงกันมาก จึงสรุปว่าตั้งแต่การใช้จำนวนกริด 112,369 กริด สามารถให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำได้แล้วและยังประหยัดเวลาอีกด้วย

ตารางที่ 4 แสดงจำนวนของกริดและแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร

จำนวนกริด	แรงบิดเฉลี่ย (N·m)
66,322	125.8
112,369	85.4
246,790	84.4

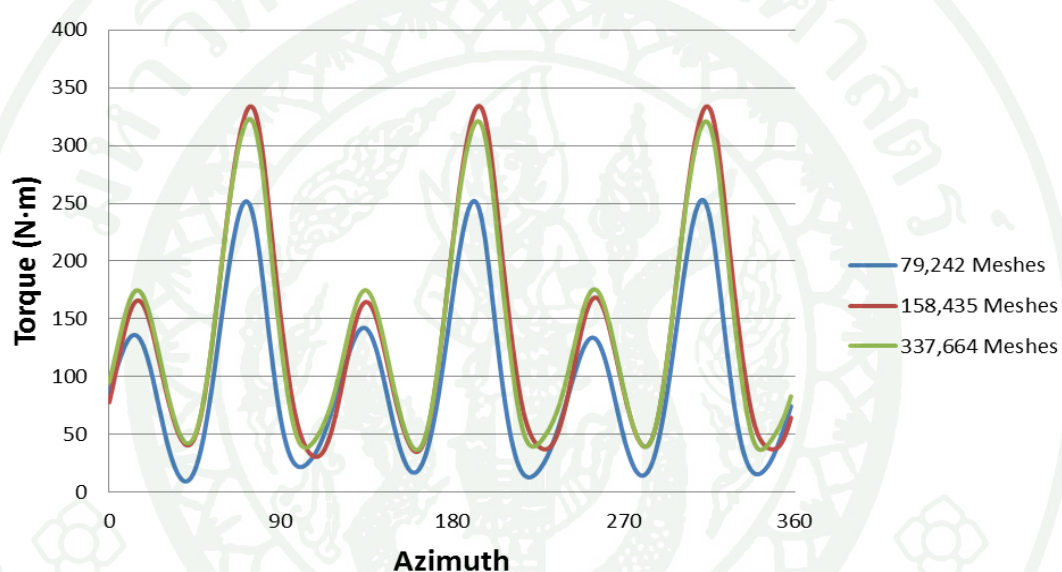


ภาพที่ 33 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่จำนวนกริด 66,322 กริด 112,369 กริด และ 246,790 กริด

สำหรับโดเมนของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ได้สุ่มสภาวะการทำงานที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 1.0 ในการตรวจสอบ Grid Independent ตารางที่ 5 แสดงจำนวนกริดที่ใช้ในการตรวจสอบและค่าแรงบิดเฉลี่ยที่ได้จากการจำลอง ซึ่งเห็นได้ว่าที่จำนวนกริด 79,242 กริด มีค่าแรงบิดเฉลี่ยแตกต่างจากจำนวนกริด 158,435 และ 337,664 กริดอย่างมาก ในขณะที่จำนวนกริด 158,435 และ 337,664 กริดมีความแตกต่างกันน้อยมาก ๆ เพียง 0.14 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น และจากภาพที่ 34 แสดงกราฟจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ของปริมาณกริดทั้ง 3 จำนวน จากกราฟจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าจำนวนกริดที่ 158,435 กริดและ 337,664 กริด มีความใกล้เคียงกันมากทั้งแนวโน้มและค่าที่ได้จากการจำลอง ในขณะที่กราฟของจำนวนกริด 79,242 กริด มีความแตกต่างจากจำนวนกริดสองจำนวนแรกอยู่พอสมควร ดังนั้นจึงสรุปว่าตั้งแต่จำนวนกริดที่ 158,435 กริด สามารถให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำได้แล้วและยังประหยัดเวลาอีกด้วย

ตารางที่ 5 แสดงจำนวนของกริดและแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร

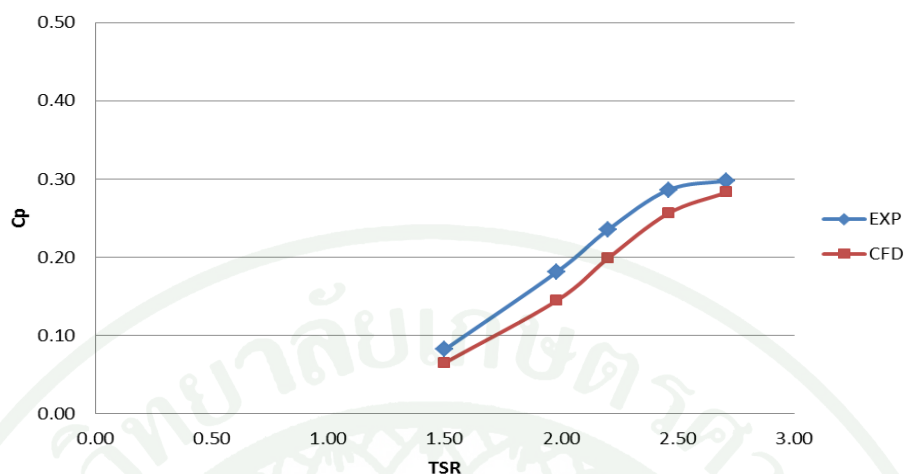
จำนวนกริด	แรงบิดเฉลี่ย (N·m)
79,242	97.4
158,435	138.1
337,664	137.9



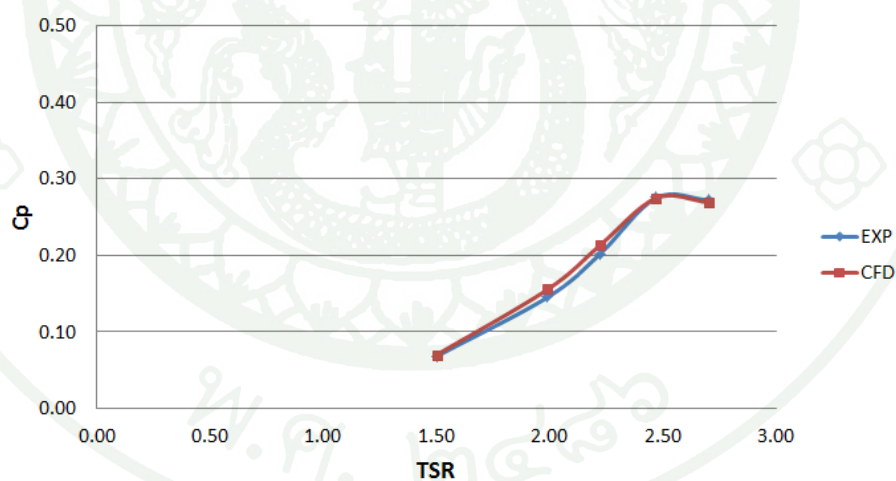
ภาพที่ 34 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ที่จำนวนกริด 79,242 กริด 158,435 กริด และ 337,664 กริด

การสอบเทียบผล

เมื่อทราบจุดที่สามารถนำค่าที่ได้จากการจำลองไปใช้ในกระบวนการคำนวณต่างๆจากการสอบเทียบค่าแล้ว ถัดมาคือการสอบเทียบผล (Validation) เพื่อรับรองความน่าเชื่อถือของแบบจำลองปั่นป่วนว่ามีความถูกต้องแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ จากการตรวจสอบเอกสารของ Beri and Yao (2011) ได้ยืนยันแล้วว่าแบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ เป็นแบบจำลองปั่นป่วนที่มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือ แต่เพื่อความถูกต้องในกระบวนการวิจัยจึงได้นำแบบจำลองปั่นป่วนดังกล่าวไปทำการจำลองเทียบกับผลการทดลองจริงของ Rawling (2008) ซึ่งนักวิจัยท่านนี้ได้ออกแบบกังหันน้ำแนวตั้งเพื่อทำการทดลอง โดยกังหันน้ำแนวตั้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.91 เมตร ใช้ใบพัดรหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-421 และ 63₍₄₎-021 และมีความยาวใบพัดเท่ากับ 0.686 เมตร การจำลองได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองของนักวิจัยดังกล่าวในการสอบเทียบผล โดยที่รหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-421 ทำการทดลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 2 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 1.50, 1.98, 2.20, 2.46 และ 2.71 และรหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-021 ทำการทดลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 2 เมตรต่อวินาที TSR 1.50, 1.99, 2.22, 2.47 และ 2.70 จากการสอบเทียบผลของข้อมูลทั้งสองชุดพบว่าผลจากการจำลองของ CFD มีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับผลการทดลองจริง ดังแสดงในภาพที่ 35 เป็นกราฟแสดงผลของการเปรียบเทียบการจำลองและผลการทดลองของกังหันน้ำแนวตั้งโดยใช้ใบพัดรหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-421 และภาพที่ 36 เป็นกราฟแสดงผลของการเปรียบเทียบการจำลองและผลการทดลองของกังหันน้ำแนวตั้งโดยใช้ใบพัดรหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-021 ภาพทั้งสองภาพแสดงกราฟระหว่างประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ TSR ต่างๆของผลการทดลอง (EXP) และผลการจำลอง (CFD) โดยที่ค่าที่ได้จากการจำลองมีความแตกต่างกับผลการทดลองอยู่ประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์โดยเฉลี่ยของข้อมูลของรหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-421 ส่วนข้อมูลของรหัสแพนอากาศ 63₍₄₎-021 ค่าจากการจำลองมีความแตกต่างกับผลการทดลองกันอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ย



ภาพที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริง (EXP) และผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD) ที่ความเร็วกระแสน้ำ 2 เมตรต่อวินาที ของรหัสแผนอากาศ 63₍₄₎-421

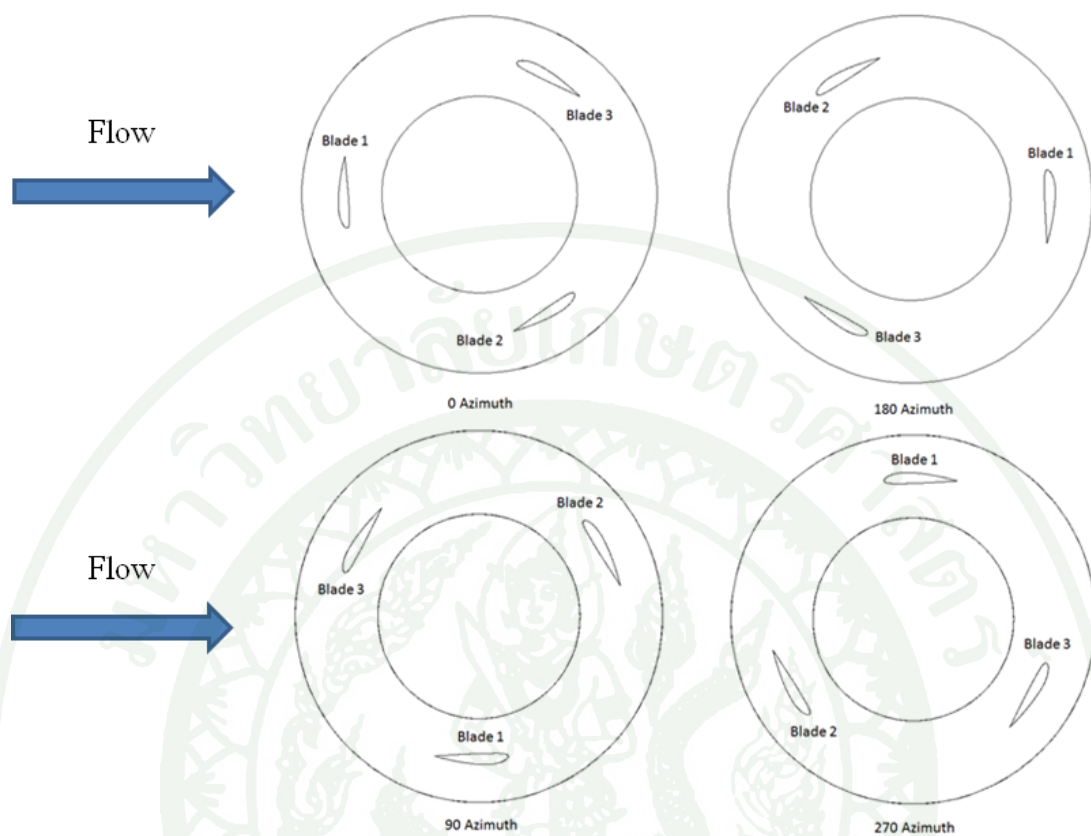


ภาพที่ 36 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริง (EXP) และผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (CFD) ที่ความเร็วกระแสน้ำ 2 เมตรต่อวินาที ของรหัสแผนอากาศ 63₍₄₎-021

ผลงานวิจัย

การจำลองการไหลของกระแสน้ำไหลผ่านกังหันน้ำแนวตั้งจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ตามขนาดของกังหันน้ำคือ ส่วนที่หนึ่งจำลองการไหลที่กังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร และความยาวใบพัดขนาด 3 เมตร ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที และที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาทีซึ่งเป็นความเร็วที่เกิดขึ้นตามข้อมูลของแม่น้ำน่าน ส่วนที่สองจะจำลองการไหลของกระแสน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร และความยาวใบพัด 1.5 เมตร ที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาทีเพื่อให้ครอบคลุมถึงข้อมูลกระแสน้ำของแม่น้ำน่าน โดยที่การจำลองทั้งสองส่วนนั้นใช้ความยาวและความหนาของเพนอากาศขนาดเดียวกันคือ 0.4 เมตร และ 0.06 เมตรตามลำดับ

ในการจำลอง ค่าที่ต้องการจากการจำลองและมีความสำคัญคือค่าของแรงบิดหรือว่าค่าทอร์กที่เกิดขึ้นจากการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้ง โปรแกรม Fluent จะแสดงผลข้อมูลดิบออกมาอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์โมเมนต์หรือค่า C_m (Moment Coefficient) โปรแกรมจะแสดงผลค่า C_m ของใบพัดแต่ละใบออกมาทีละ 2 องศาซิมุต ซึ่งจะต้องกำหนดในโปรแกรมเป็นค่าของ time step size การแปลงหน่วยขององศาซิมุตให้อยู่ในรูปของ time step size เป็นตามสมการที่ (50) ภาพที่ 37 แสดงตำแหน่งของใบพัดทั้งสามใบและการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งที่ตำแหน่งมุมองศาซิมุตต่างๆ ในการจำลอง 2 มิติ



ภาพที่ 37 ตำแหน่งของใบพัดทั้งสามใบที่มุมอะซิมุท 0, 90, 180 และ 270

ค่า C_m ของใบพัดทั้งสามใบที่ได้จากการจำลองจะนำมารวมกัน และนำไปแปลงค่าอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้เป็นค่าแรงบิด ตามสมการที่ (51) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่อไป

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A L V^2} \quad (51)$$

โดยที่

C_m = สัมประสิทธิ์โมเมนต์

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

A = พื้นที่หน้าตัด

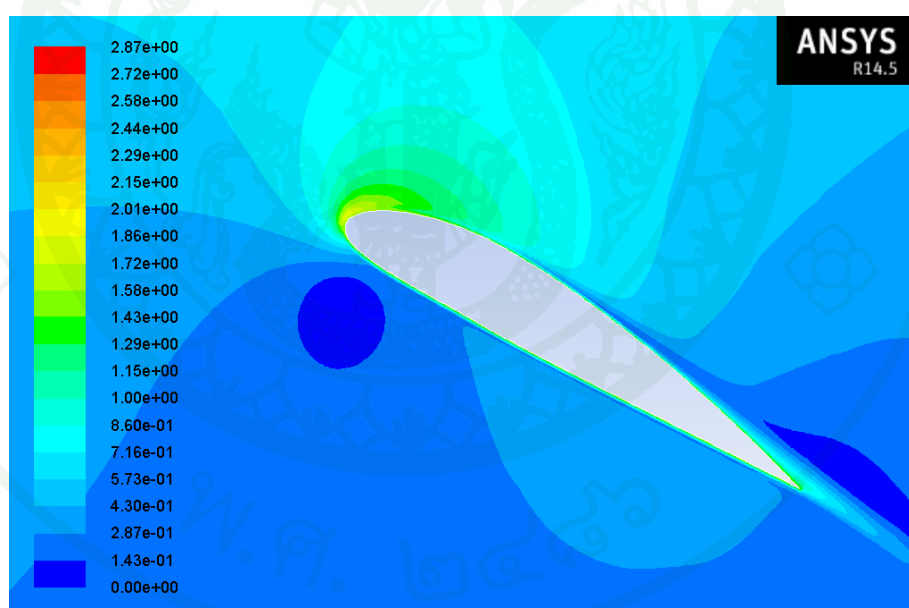
L = รัศมีของกังหันน้ำแนวตั้ง

V = ความเร็วของกระแส

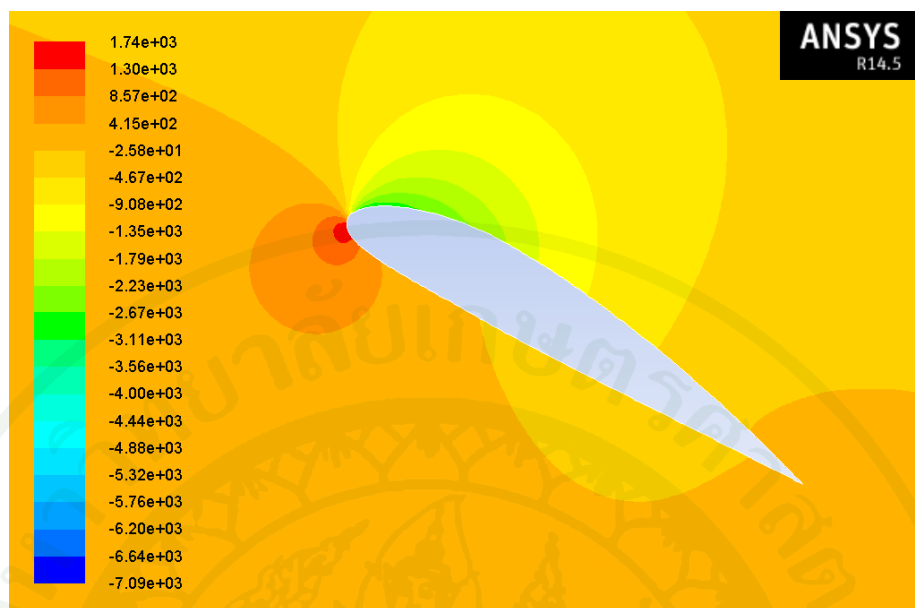
T = แรงบิดหรือทอร์ก

การสังเกตการไหลของกระแสน้ำและผลจากการจำลองกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตร

ภาพที่ 38 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณใบพัดใบที่ 3 ที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.5 ซึ่งแสดงให้เห็นในลักษณะของแถบสี (Contour) โดยแถบสีจะไล่จากแถบสีโทนร้อนที่บ่งบอกถึงความเร็วที่มีค่ามาก ไล่ลงไปยังแถบสีโทนเย็นที่แสดงถึงความเร็วที่มีค่าน้อย โทนของแถบสีที่กระจายตัวอยู่รอบๆ ใบพัดแสดงให้เห็นว่าความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลผ่านบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของแพนอากาศมีความแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างของความเร็วบริเวณส่วนบนและส่วนล่างนี้ส่งผลให้แรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆ ของแพนอากาศแตกต่างกันด้วย บริเวณส่วนบนของแพนอากาศที่มีความเร็วมากกว่าจะมีแรงดันน้อยกว่าบริเวณส่วนล่างที่ความเร็วน้อยกว่าแต่มีแรงดันมากกว่า ดังภาพที่ 39 ซึ่งค่าของแรงดัน มีการไล่แถบสีในลักษณะเดียวกันกับค่าของความเร็ว

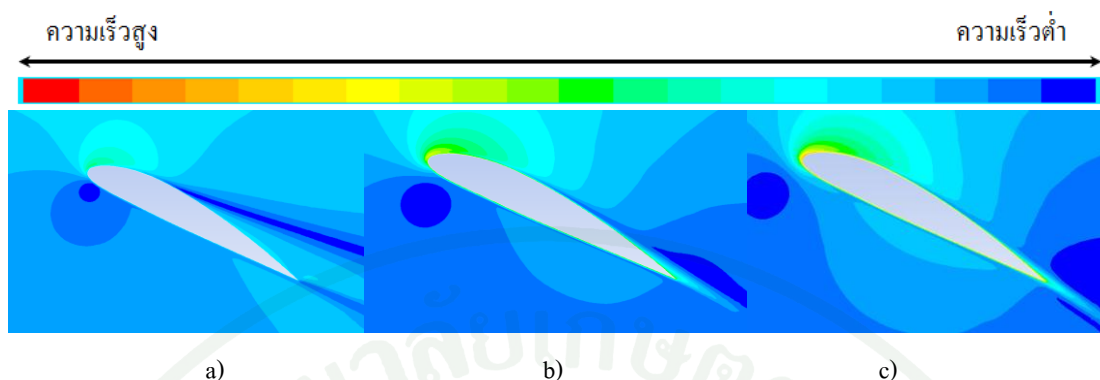


ภาพที่ 38 แสดงการกระจายของความเร็วบริเวณรอบๆ ใบพัดใบที่ 3 ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตร ที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที



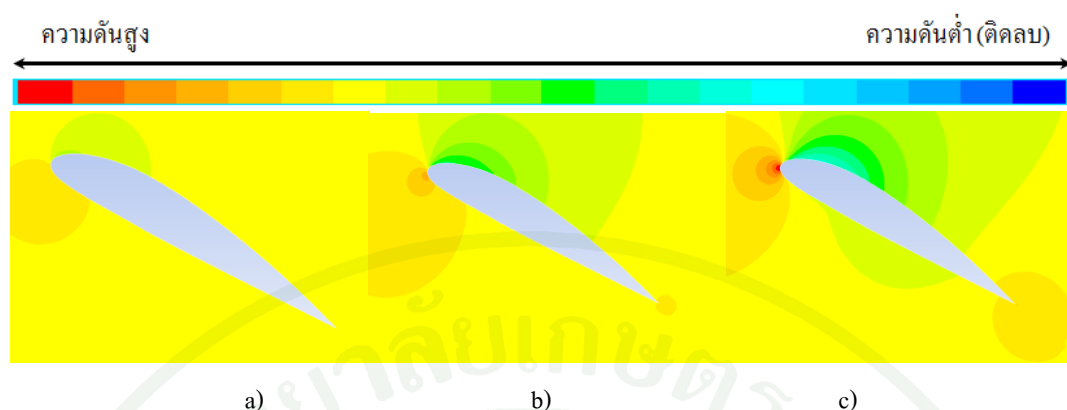
ภาพที่ 39 แสดงการกระจายของแรงดันบริเวณรอบๆใบพัดใบที่ 3 ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตร ที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อ วินาที

จากที่กล่าวมาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าความเร็วของกระแสที่กระจายอยู่บริเวณรอบๆใบพัดมีผลต่อแรงดันที่เกิดขึ้นต่อใบพัด ดังนั้นเมื่อความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันควรจะมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ภาพที่ 40 แสดงการกระจายความเร็วที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0



ภาพที่ 40 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆของใบพัดใบที่ 3 ที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ตามภาพ a), b) และ c) ตามลำดับ

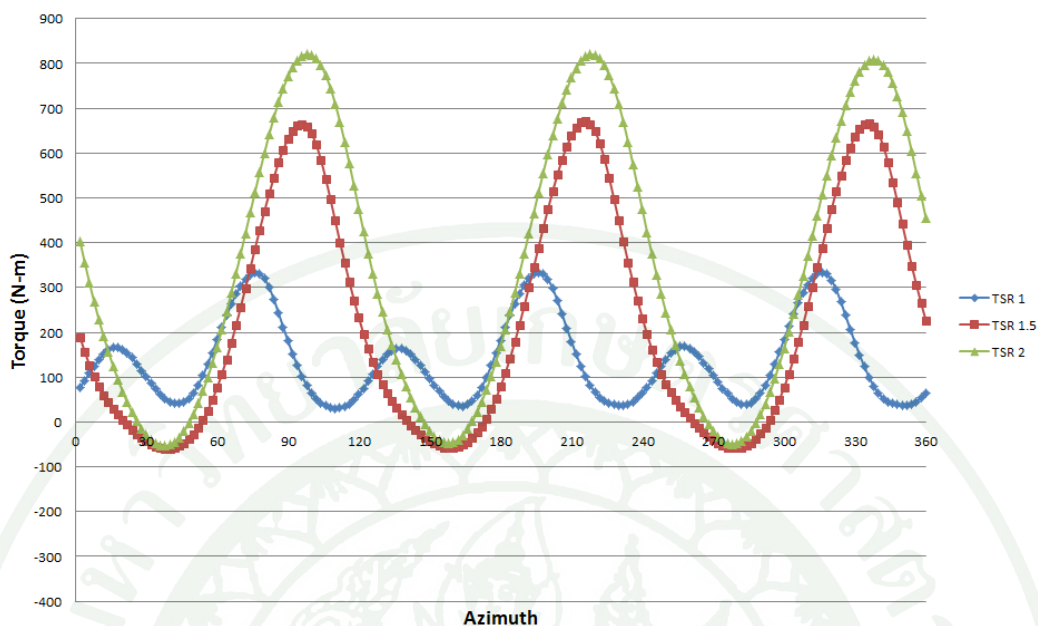
ภาพดังกล่าวบ่งบอกว่าค่า TSR ที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้ลักษณะการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆใบพัดแตกต่างกัน และช่วงของค่าของการกระจายความเร็วในแต่ละ TSR มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เนื่องจากความเร็วในการหมุนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 มีช่วงของความเร็วอยู่ที่ 0 – 1.58 เมตรต่อวินาที 0 – 2.87 เมตรต่อวินาที และ 0 – 2.98 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ภาพถัดมาภาพที่ 41 แสดงถึงแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆใบพัด ของ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วบริเวณรอบๆใบพัดทำให้แรงดันมีความแตกต่างกันในแต่ละ TSR



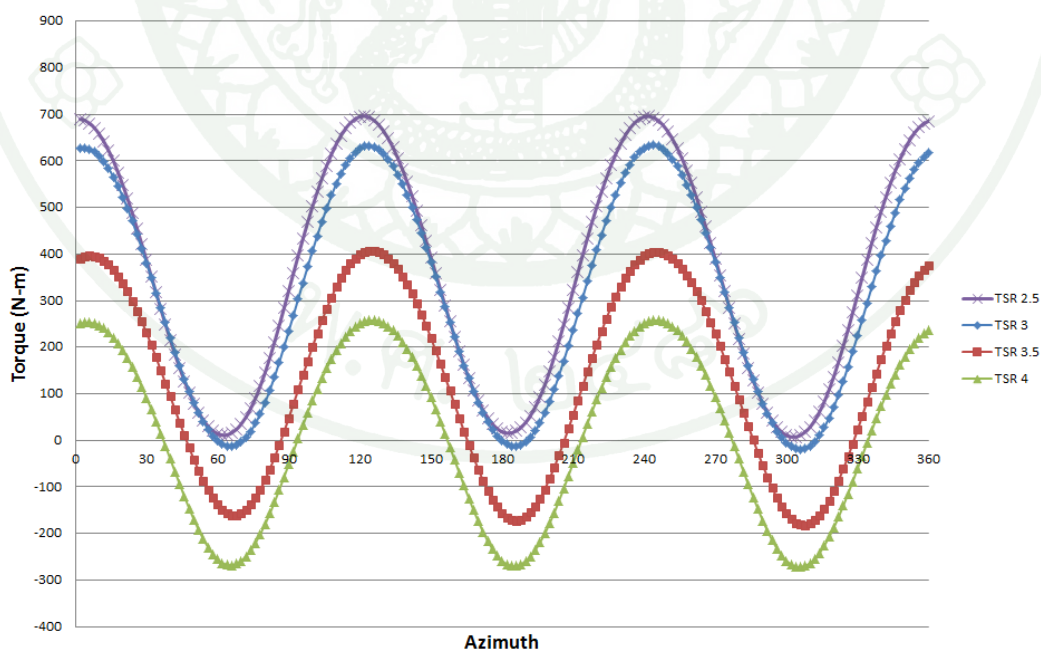
ภาพที่ 41 แสดงแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆของใบพัดใบที่ 3 ที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ตามภาพ a), b) และ c) ตามลำดับ

นอกเหนือจากนั้นความเร็วของการหมุนที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ช่วงสูงสุดและต่ำสุดของแรงดันที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR เปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0 มีช่วงของแรงดันอยู่ที่ -1,330 ถึง 583 ปาสคาล -7,090 ถึง 1,740 ปาสคาล และ -7,960 ถึง 3,670 ปาสคาล ตามลำดับ ค่าแรงดันที่ได้จากการจำลองนี้จะโปรแกรม CFD จะคำนวณออกมาเป็นแรงยก แรงจุด และแรงบิด ดังนั้นจากการหมุนของกันหันน้ำแนวตั้งในแต่ละองศาอะซิมุทจะมีแรงยก แรงจุด และแรงบิดเกิดขึ้นมา ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันไปในแต่ละองศาอะซิมุท เนื่องจากมุมปะทะของกระแสน้ำที่ทำกับตัวใบพัดมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆองศาอะซิมุท

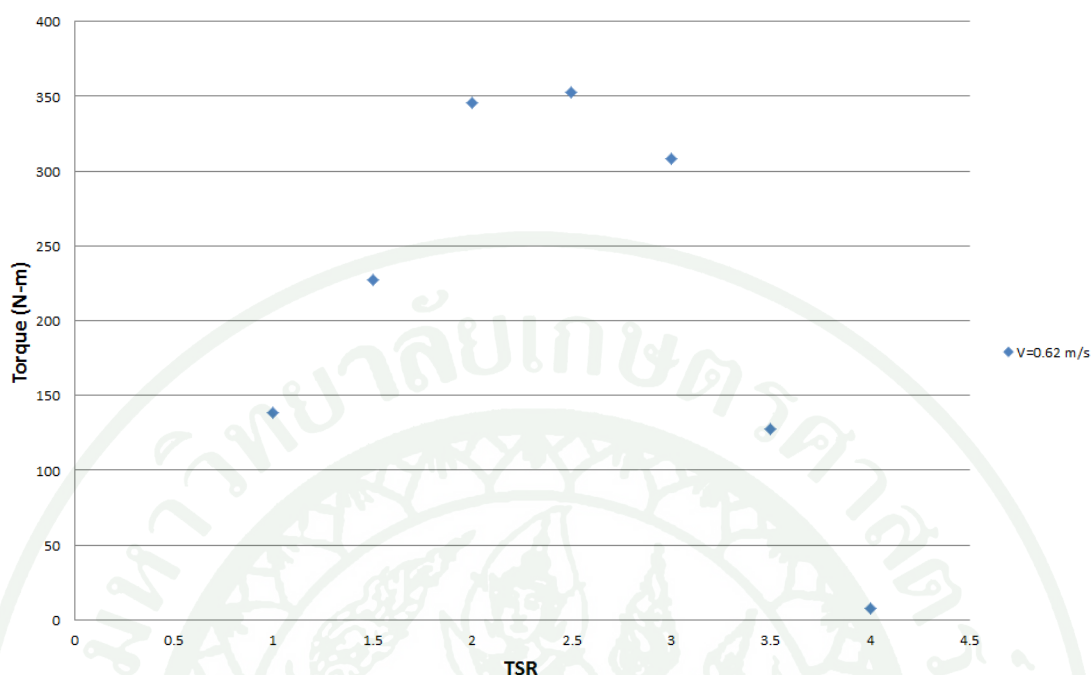
จากการจำลองการไหลของกระแสน้ำที่ความเร็ว 0.62 เมตรต่อวินาที ผลของแรงบิดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการหมุน เริ่มที่ 0 องศาอะซิมุท จนถึง 360 องศาอะซิมุท ในแต่ละ TSR ในภาพที่ 42 และภาพที่ 43 จะเห็นได้ว่าค่าของแรงบิดค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วง TSR 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 ตามลำดับ และที่ TSR 3.0, 3.5 และ 4.0 ค่าของแรงบิดค่อยๆลดลงตามลำดับ โดยที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ TSR 2.5 และมีค่าแรงบิดเฉลี่ยต่ำสุดมีค่าใกล้เคียงศูนย์อยู่ที่ TSR 4.0 ดังแสดงในภาพที่ 44



ภาพที่ 42 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 43 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 4.0 ที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที

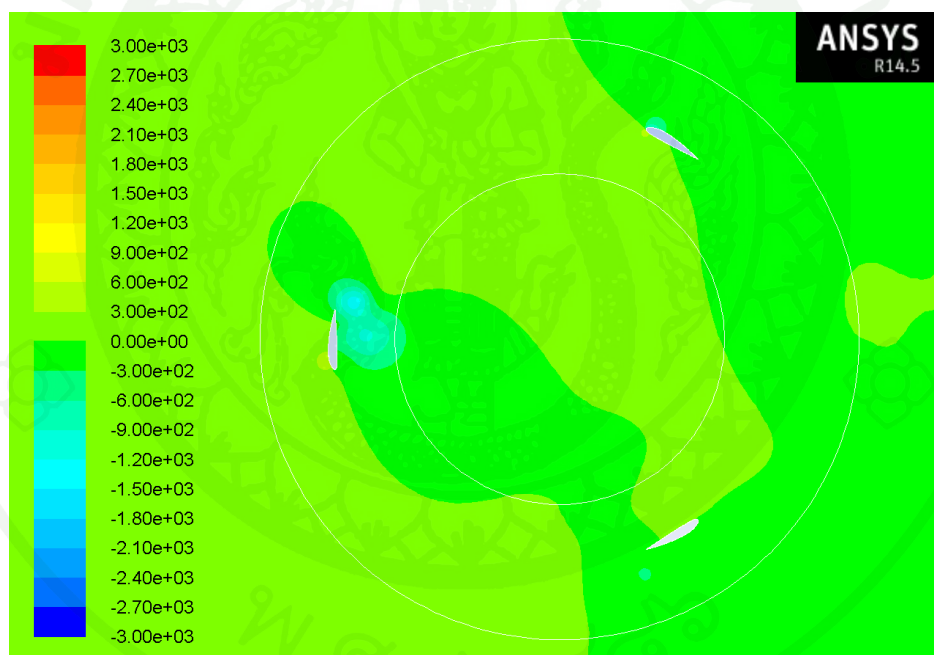


ภาพที่ 44 แสดงค่าแรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที

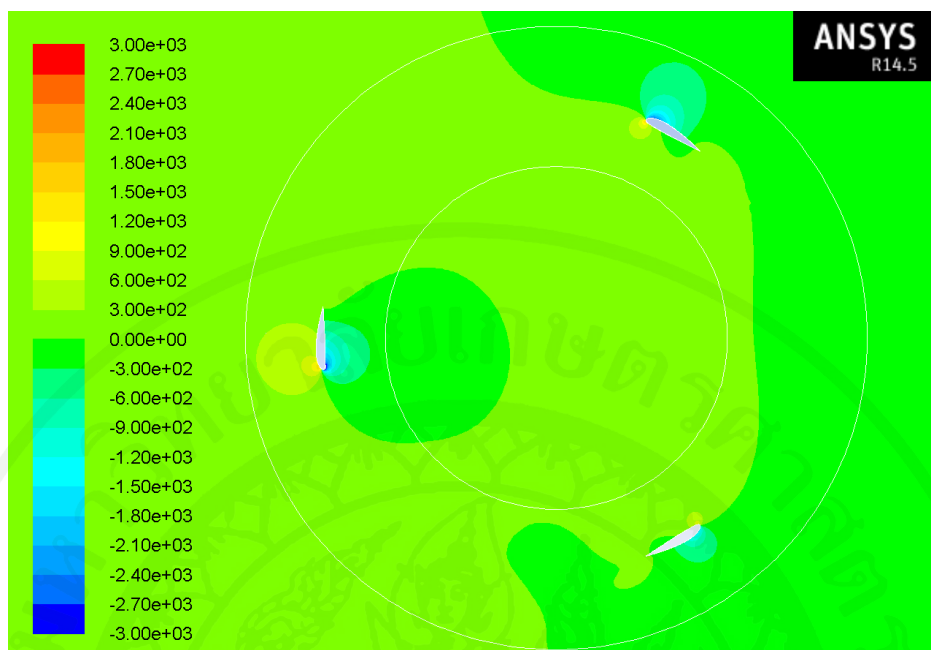
จากการจำลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 1.0 ถึง TSR 4.0 ดังนั้นที่ TSR 1.0 จะมีความเร็วรอบการหมุนต่ำที่สุด ซึ่งที่ TSR 1.0 กังหันน้ำจะหมุนช้าทำให้มีพื้นที่ให้กระแสน้ำไหลผ่านเข้าไปสร้างแรงดันให้กับใบพัดได้ เมื่อกังหันน้ำหมุนเร็วขึ้นจาก TSR 1.0 มาที่ TSR 1.5, 2.0 และ TSR 2.5 พื้นที่ที่จะให้กระแสน้ำผ่านได้จะค่อยๆลดลงแต่ทำให้แรงดันที่ใบพัดค่อยๆเพิ่มขึ้นจึงทำให้แรงบิดค่อยๆเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อกังหันน้ำหมุนเร็วขึ้นไปอีกจาก TSR 2.5 มาที่ TSR 3.0, 3.5 และ TSR 4.0 พื้นที่ที่จะให้กระแสน้ำไหลผ่านจะค่อยๆลดลงไปอีก ซึ่งเมื่อพื้นที่ลดลงเรื่อยๆจึงทำให้กระแสน้ำไม่สามารถไหลผ่านเข้าไปสร้างแรงดันให้กับใบพัดได้ จึงเป็นสาเหตุให้แรงบิดค่อยๆลดลงในช่วง TSR 3.0, 3.5 และ 4.0 และการที่กระแสน้ำไหลผ่านกังหันน้ำได้น้อยนั้น สภาวะลักษณะนี้ตามทฤษฎีของ Betz ได้กล่าวไว้ว่าเป็นสภาวะ Solidity ซึ่งกังหันน้ำแนวตั้งเริ่มมีสภาพคล้ายของแข็งทำให้กระแสน้ำไหลผ่านไม่ได้ ยกตัวอย่างในภาพที่ 45 ภาพที่ 46 และ ภาพที่ 47 แสดงการกระจายแรงดันรอบๆใบพัดทั้งสามใบ และในภาพที่ 48 ภาพที่ 49 และภาพที่ 50 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณของกังหันน้ำแนวตั้งที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 วินาที ที่ TSR 1.0, TSR 2.5 และ TSR 4.0

ภาพที่ 48 คือภาพการกระจายความเร็วที่สภาวะความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 1.0 กังหันน้ำจะหมุนด้วยความเร็วที่ต่ำที่สุดจากการจำลองทั้งหมดตั้งแต่ TSR 1.0 ถึง 4.0 จะ

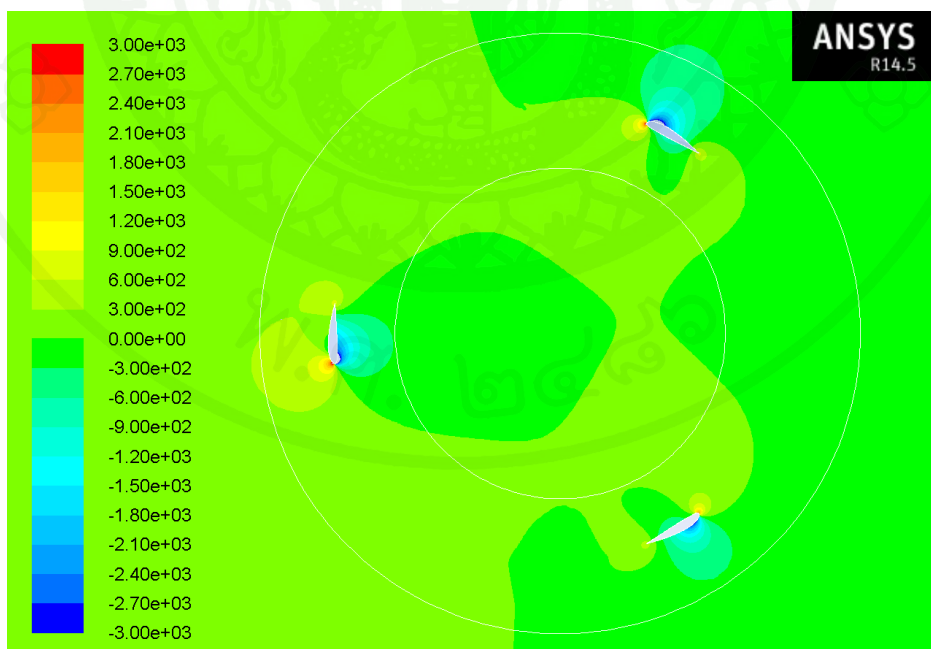
เห็นได้ว่าเมื่อกระแสไหลผ่านกังหันน้ำจะเกิดกระแสน้ำหมุนวนหรือว่า Vortex ที่ส่วนท้ายน้ำของกังหันน้ำซึ่งจะมีความเร็วที่ต่ำกว่าช่วงต้นน้ำเมื่อดูจากโทนสีเปรียบเทียบกันระหว่างโทนสีในช่วงต้นน้ำและท้ายน้ำ ถัดมาในภาพที่ 49 เมื่อกังหันน้ำหมุนเร็วขึ้นมาที่ TSR 2.5 Vortex ที่ช่วงท้ายน้ำมีโทนสีเข้มที่เพิ่มขึ้นแสดงว่ามีความเร็วลดลงอีก แสดงว่าพื้นที่ที่จะให้กระแสไหลผ่านได้นั้นลดลง ทำให้กระแสไหลผ่านได้น้อยลง ถัดมาในภาพที่ 50 กังหันน้ำหมุนเร็วขึ้นอีกที่ TSR 4.0 ซึ่งกังหันน้ำแนวตั้งจะหมุนเร็วที่สุดในการจำลองที่สภาวะความเร็วกระแส 0.62 เมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่า Vortex ที่ช่วงท้ายน้ำมีขนาดสั้นลงและขยับเข้ามาติดกับกังหันน้ำแนวตั้ง และโทนสีน้ำเงินเข้มซึ่งมีค่าความเร็วที่ต่ำสุดขยายใหญ่ขึ้น แสดงว่าเมื่อกังหันน้ำหมุนเร็วขึ้นจาก TSR 2.5 มาที่ TSR 4.0 พื้นที่ที่จะให้กระแสไหลผ่านได้นั้นลดลงไปอีก กระแสจึงผ่านได้น้อยมากๆ จึงทำให้ Vortex ขยับเข้ามาติดกับตัวกังหันน้ำแนวตั้งมากขึ้น



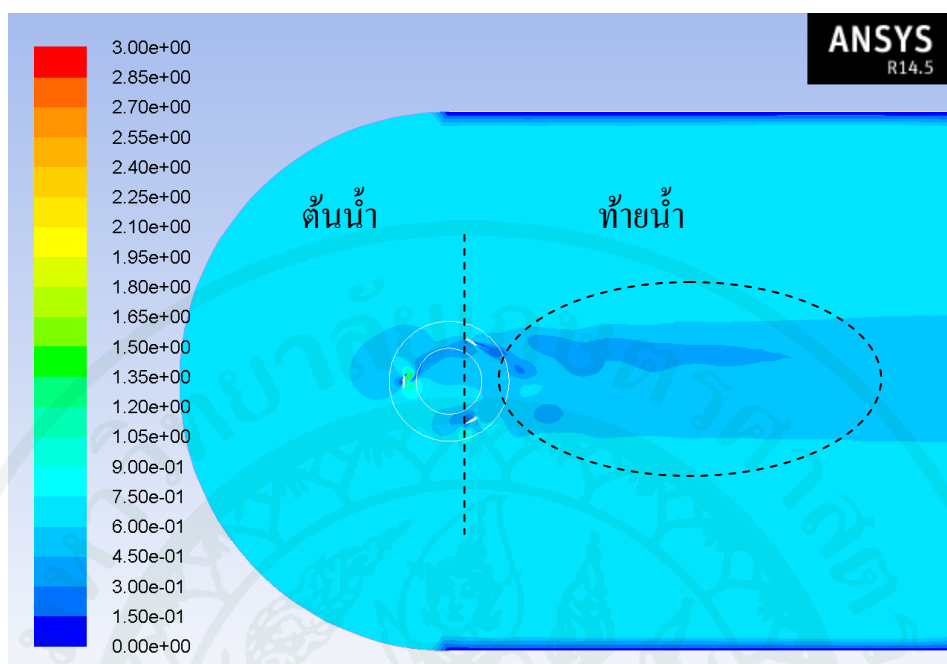
ภาพที่ 45 การกระจายแรงดันของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 1.0 ความเร็วกระแส 0.62 เมตรต่อวินาที



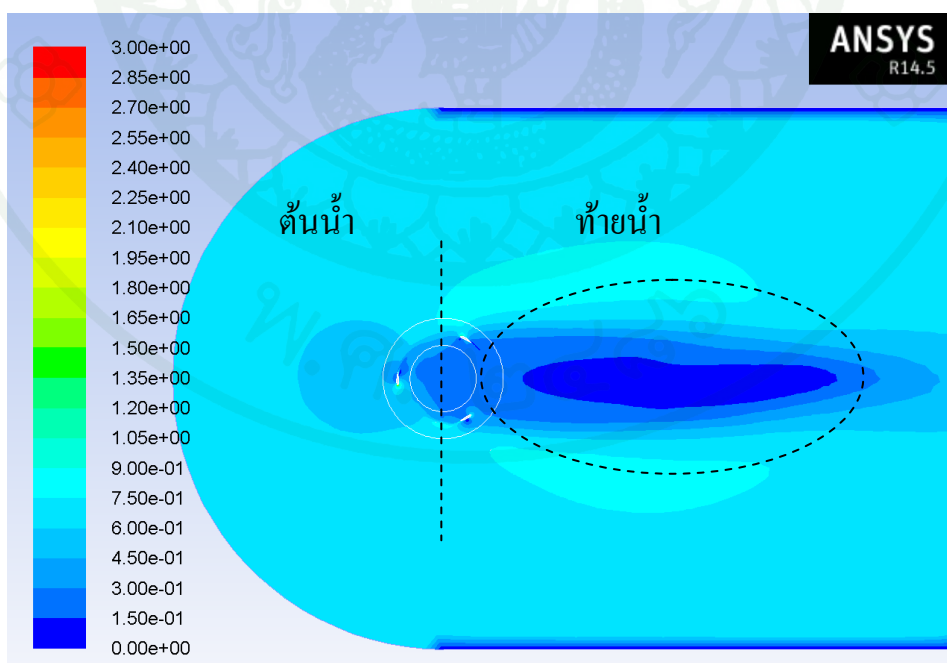
ภาพที่ 46 การกระจายแรงดันของกั้งหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
ความยาวใบ 3 เมตร ที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที



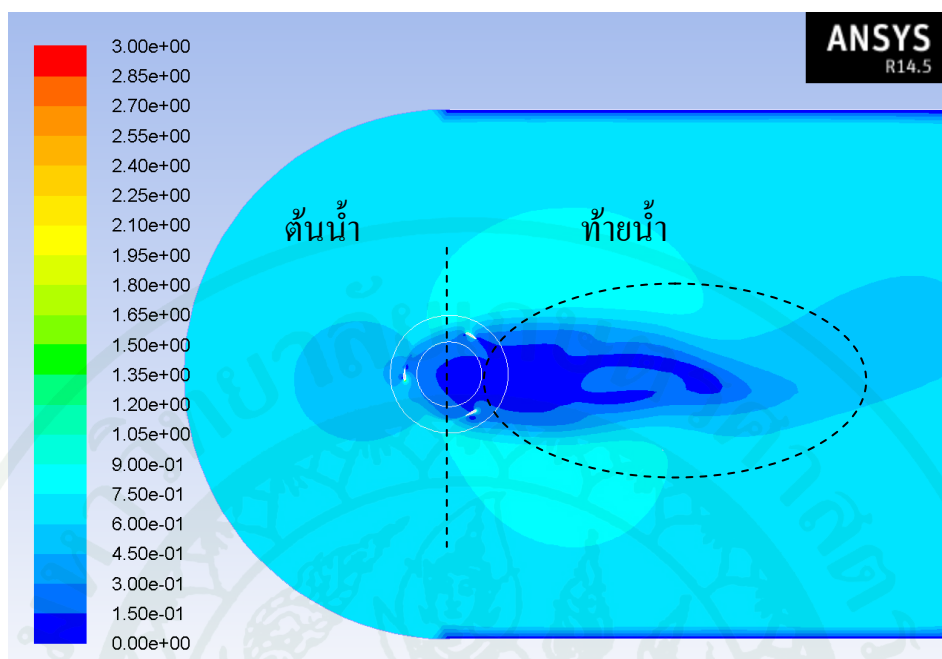
ภาพที่ 47 การกระจายแรงดันของกั้งหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
ความยาวใบ 3 เมตร ที่ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 48 การกระจายความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 1.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที

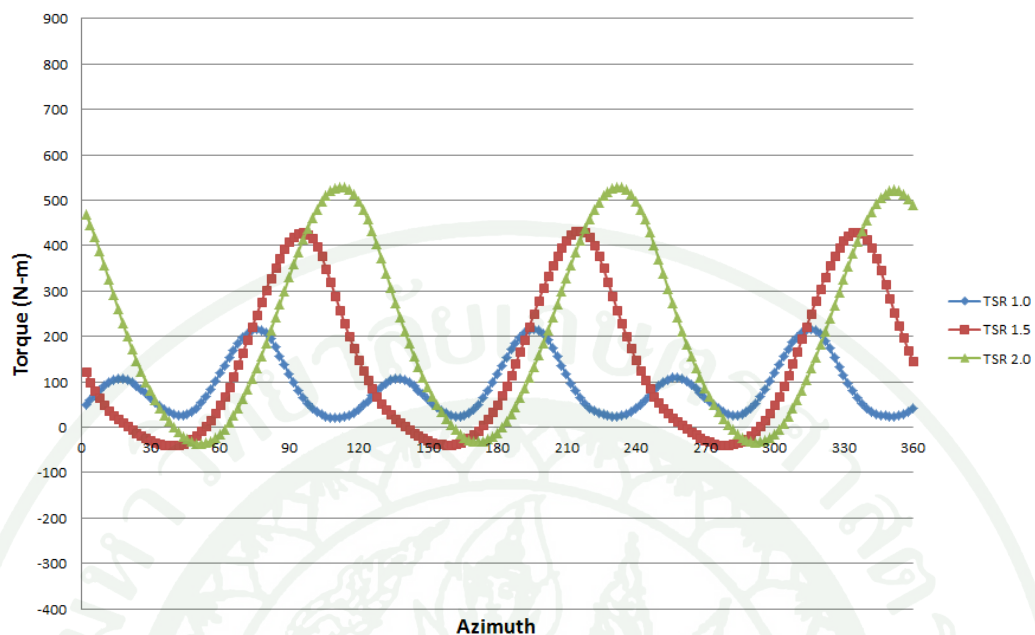


ภาพที่ 49 การกระจายความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
ความยาวใบ 3 เมตรที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที

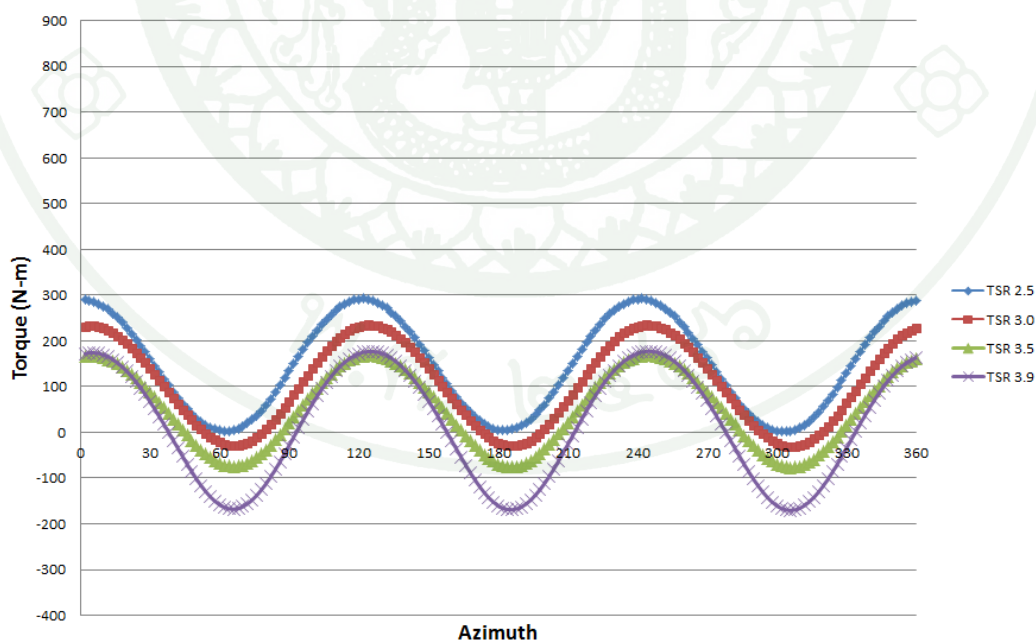


ภาพที่ 50 การกระจายของความเร็วของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร
ความยาวใบ 3 เมตร ที่ TSR 4.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที

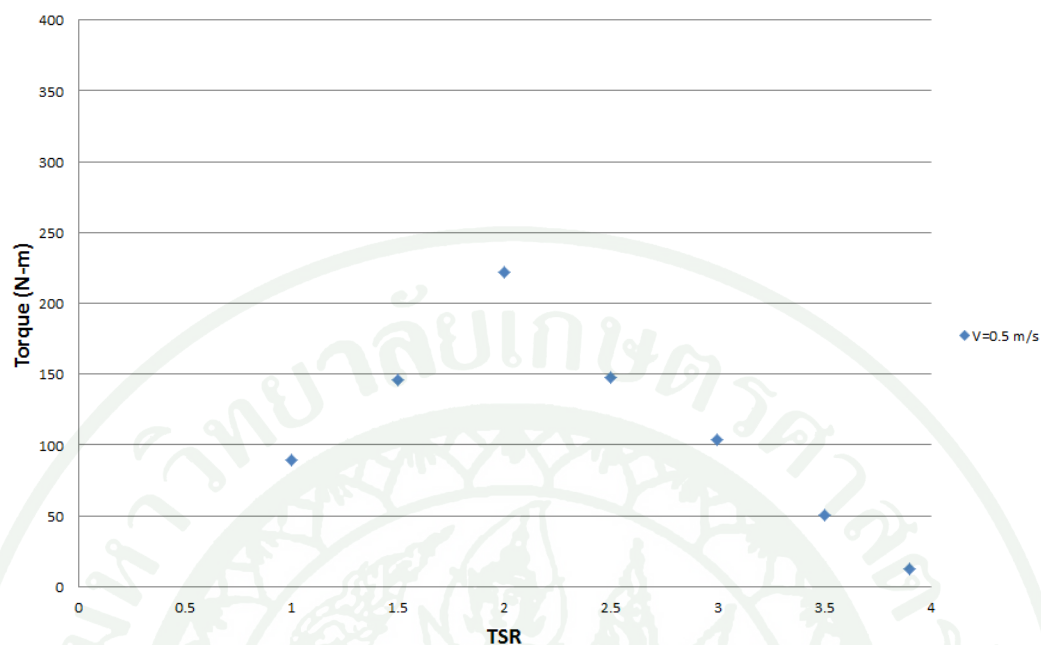
การจำลองที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาทีผลของแรงบิดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการหมุนตั้งแต่ 0 องศาซิมูตถึง 360 องศาซิมูตในแต่ละ TSR แสดงในภาพที่ 51 ภาพที่ 52 และภาพที่ 53 จะเห็นว่าเมื่อลดความเร็วของกระแสน้ำลงมาเหลือ 0.5 เมตรต่อวินาที จุดสูงสุดของกราฟแรงบิดในแต่ละ TSR ลดลงจากความเร็วเดิมคือ 0.62 เมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นว่าความเร็วที่ลดลงส่งผลต่อแรงบิดทำให้ลดลงตามไปด้วย แต่พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงบิดจากการเปลี่ยนแปลง TSR มีความคล้ายคลึงกับความเร็ว 0.62 เมตรต่อวินาทีคือ ช่วง TSR 1.0, 1.5 และ TSR 2.0 แรงบิดเพิ่มขึ้นเพราะเมื่อความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น พื้นที่ที่จะให้กระแสน้ำไหลผ่านนั้นลดลง แต่ไปทำให้แรงดันที่ใบพัดเพิ่มขึ้นทำให้แรงบิดเพิ่มขึ้น และหลังจากที่ TSR 2.0 เป็นต้นไปจนถึง TSR 3.9 จากการหมุนของกังหันน้ำที่เร็วขึ้นทำให้พื้นที่ที่ให้กระแสน้ำไหลผ่านได้ลดลงไปอีก ทำให้กระแสน้ำไม่สามารถไหลผ่านกังหันน้ำไปสร้างแรงดันให้กับใบพัดได้ จึงทำให้แรงบิดลดลง



ภาพที่ 51 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 52 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ TSR 2.5, 3.0, 3.5 และ 3.9 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 53 แสดงค่าแรงบิดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที

จากการจำลองที่ความเร็ว 0.62 เมตรต่อวินาทีและ 0.5 เมตรต่อวินาที ทำให้เห็นได้ว่านอกจากความเร็วของกระแสน้ำที่เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ส่งผลต่อแรงบิดแล้ว ความเร็วของการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าแรงบิดอีกด้วย

การสังเกตการไหลของกระแสน้ำและผลการจำลองกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ความยาวใบพัด 1.5 เมตร

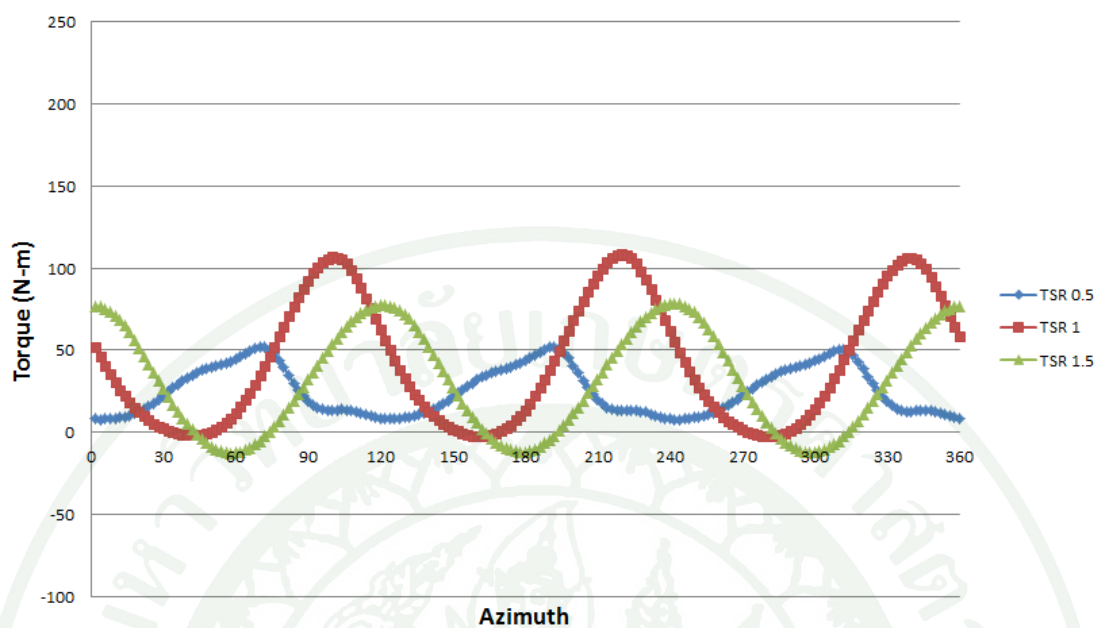
การจำลองในส่วนนี้จะจำลองที่ความเร็วของกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที เพื่อให้ครอบคลุมต่อข้อมูลความเร็วกระแสน้ำของแม่น้ำน่าน ภาพที่ 54 และภาพที่ 55 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในหนึ่งรอบการหมุนตั้งแต่ 0 องศาซิมุต ถึง 360 องศาซิมุต ที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที ของแต่ละ TSR หลังจากทำการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดความยาวของใบพัดให้เหลือ 1.5 เมตร โดยที่ยังคงขนาดของแพนอากาศเดิมไว้แล้ว พบว่าการจำลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที ค่าแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละ TSR มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับกังหันน้ำขนาดเดิมคือ 3 เมตร แต่พฤติกรรมการเกิด Solidity ยังคงเกิดขึ้นมาเช่นเดียวกัน ที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาทีเหมือนกัน เมื่อพิจารณาที่ค่าของเลขเรย์โนลส์แล้ว พบว่าการลดลงของค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นเป็นอิทธิพลที่มาจากการเปลี่ยนแปลงของเลขเรย์โนลส์ของกังหันน้ำคำนวณจากสมการที่ (52)

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \quad (52)$$

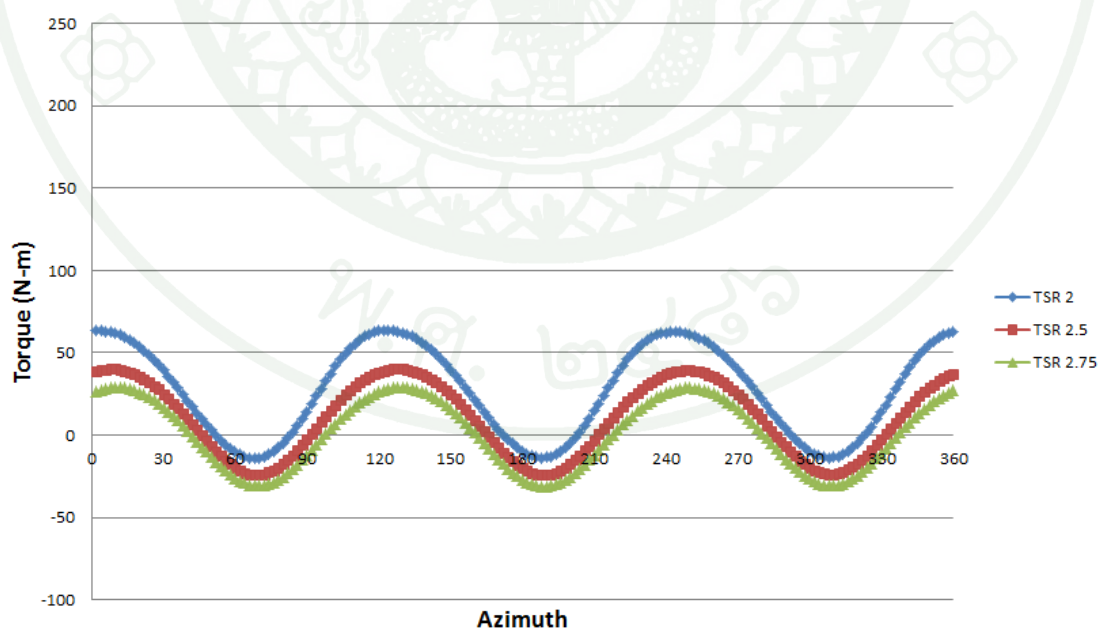
โดยที่

ρ	= ความหนาแน่นของน้ำ
V_{∞}	= ความเร็วของกระแสน้ำ
D	= ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันน้ำแนวตั้ง
μ	= ค่าความหนืดของน้ำ

จากการคำนวณพบว่าที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร มีค่าเลขเรย์โนลส์ประมาณ $Re = 1.37 \times 10^6$ และค่าเลขเรย์โนลส์ของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรมีค่าประมาณ $Re = 6.68 \times 10^5$ โดยที่ค่าความหนาแน่นของน้ำ และค่าความหนืดของน้ำมีค่ามีคงที่ ค่าความเร็วของกระแสน้ำที่ไหลเข้าสู่กังหันน้ำทั้งสองขนาดมีค่าเท่ากันที่ 0.5 เมตรต่อวินาที เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเลขเรย์โนลส์ที่เกิดขึ้นบนกังหันของทั้งสองขนาด สามารถบอกได้ว่าเมื่อทำการลดขนาดของกังหันน้ำลงมาทำให้ค่าเลขเรย์โนลส์ลดลงตามไปด้วย และการลดลงของเลขเรย์โนลส์นี้ยังส่งผลกระทบไปถึงการลดลงของค่าแรงบิดของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าแรงบิดของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร

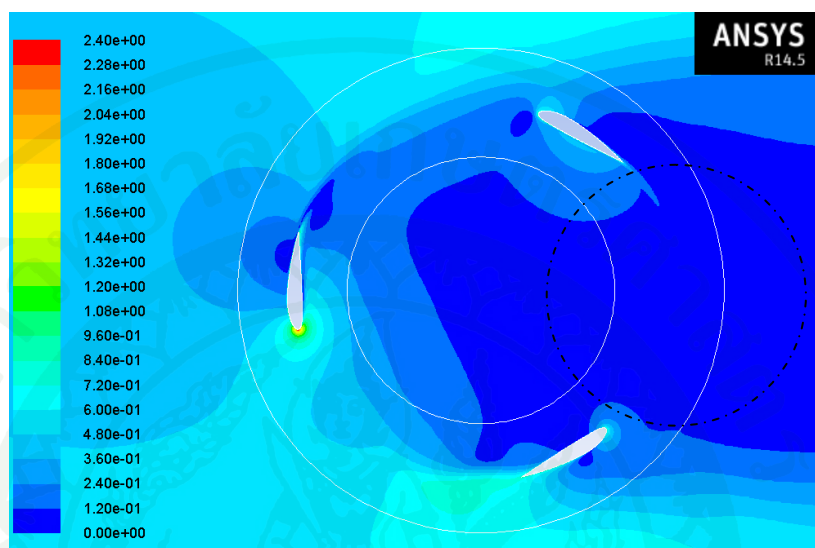


ภาพที่ 54 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที

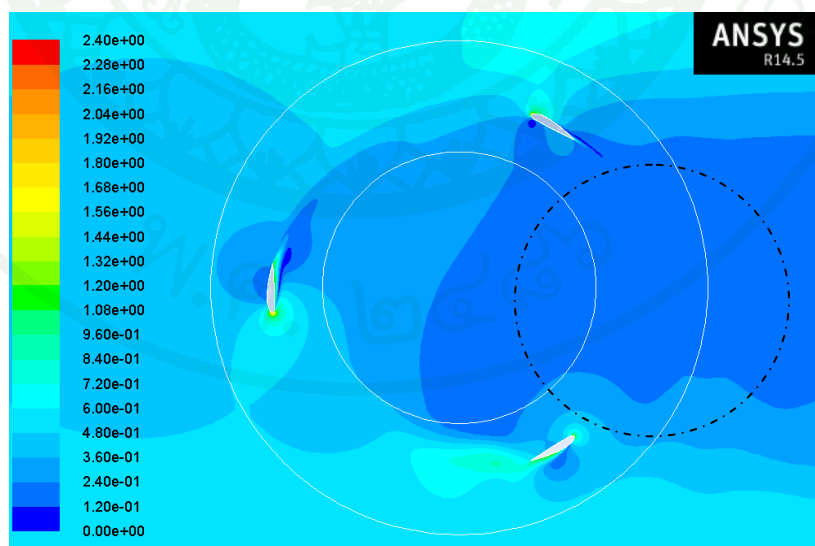


ภาพที่ 55 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 2.0, 2.5 และ 2.75 ที่ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที

นอกจากนี้การลดขนาดของกังหันน้ำยังส่งผลต่อการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆกังหันน้ำอีกด้วย ดังภาพที่ 56 และภาพที่ 57 แสดงการกระจายความเร็วที่ TSR 2.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาทีของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 และ 3 เมตร ตามลำดับ



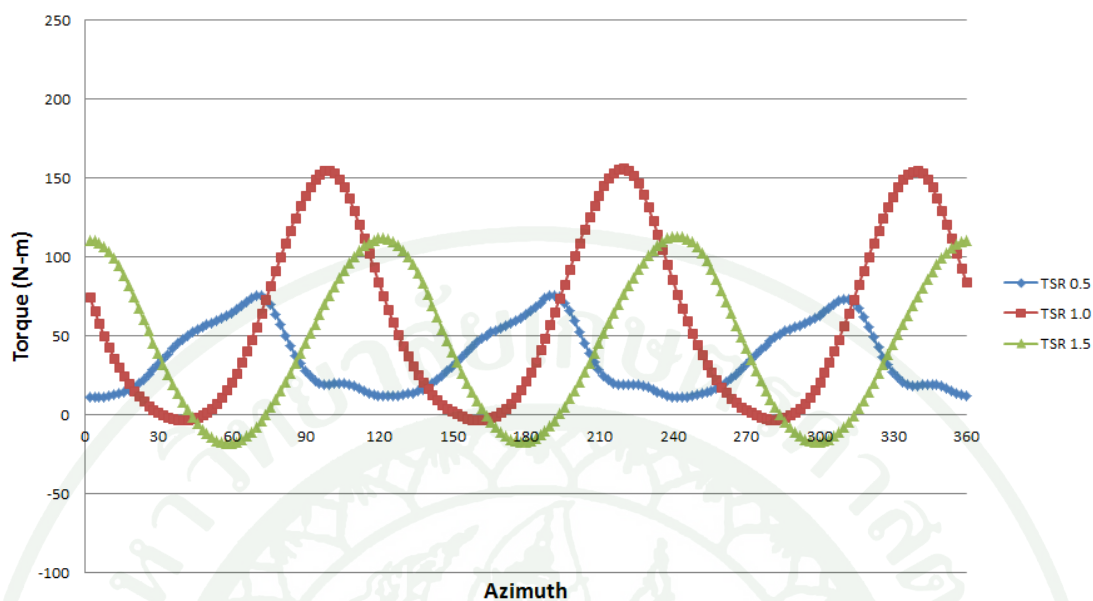
ภาพที่ 56 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ความยาวใบ 1.5 เมตร



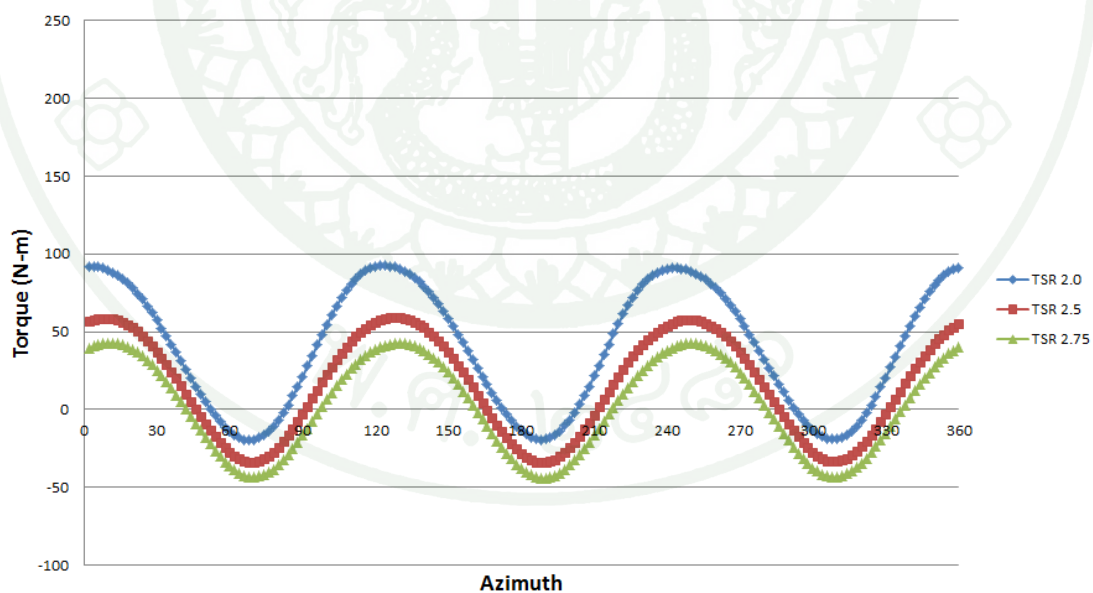
ภาพที่ 57 แสดงการกระจายความเร็วบริเวณรอบๆกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบ 3 เมตร

เมื่อสังเกตบริเวณช่วงท้ายน้ำ ตามวงกลมเส้นประของกังหันน้ำทั้งสองขนาด พบว่าที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ช่วงค่าของการกระจายความเร็วมีน้อยกว่าของขนาดกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร เมื่อดูที่แถบสีและค่าที่แสดงด้านซ้ายมือของภาพ ดังนั้นจึงพยากรณ์ได้ว่ากังหันน้ำขนาด 1.5 เมตรมีแนวโน้มของการเข้าสู่ภาวะ Solidity ได้เร็วกว่า กังหันน้ำขนาด 3 เมตร เนื่องจากเมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลงมาแล้วทำให้มีพื้นที่ให้กระแสน้ำไหลผ่านได้น้อยลง

เมื่อเพิ่มความเร็วกระแสน้ำเป็น 0.6 เมตรต่อวินาที ค่าแรงบิดที่ได้จากการจำลองแสดงในภาพที่ 58 และภาพที่ 59 การหมุนของกังหันน้ำแนวตั้งในหนึ่งรอบการหมุนตั้งแต่ 0 องศาซิมุต ถึง 360 องศาซิมุต พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของกระแสน้ำจาก 0.5 เมตรต่อวินาที เป็น 0.6 เมตรต่อวินาที ค่าของแรงบิดสูงสุดในแต่ละ TSR มีค่าเพิ่มขึ้นจากความเร็วเดิม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าเลขเรย์โนลส์โดยใช้สมการ (52) ที่เกิดขึ้นบนกังหันน้ำแนวตั้งที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 และ 0.6 เมตรต่อวินาทีโดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าความหนาแน่นของน้ำ ค่าความหนืดของน้ำมีค่าคงที่ ค่าเลขเรย์โนลส์ของความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาทีมีค่าประมาณ $Re = 6.68 \times 10^5$ และที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.6 เมตรต่อวินาทีมีค่าเลขเรย์โนลส์ประมาณ $Re = 8.02 \times 10^5$ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วกระแสน้ำทำให้ค่าของเลขเรย์โนลส์เพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของค่าเลขเรย์โนลส์ทำให้ค่าของแรงบิดเพิ่มขึ้นตามมาด้วย

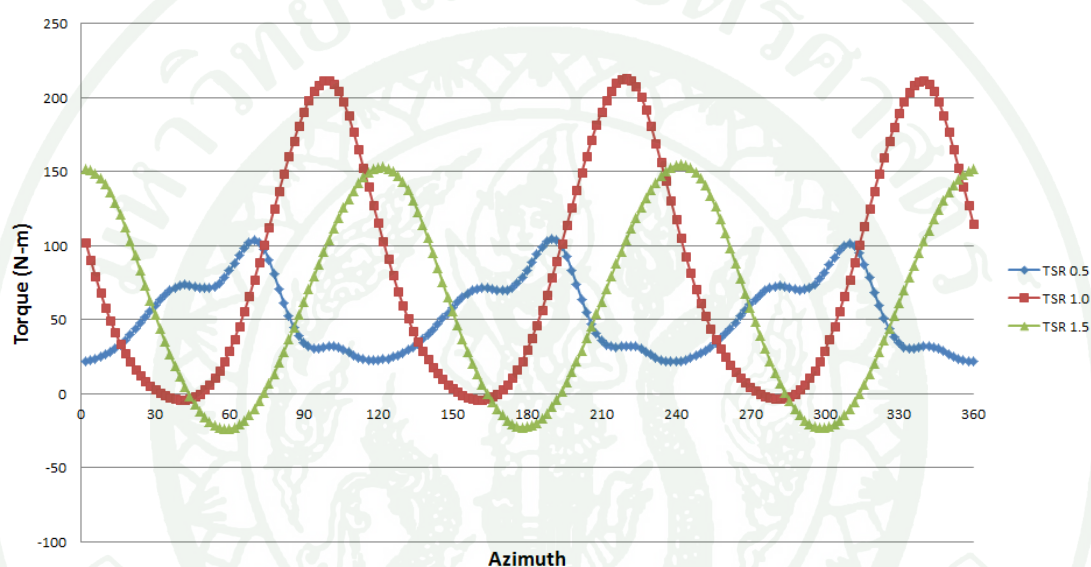


ภาพที่ 58 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ความเร็วน้ำ 0.6 เมตรต่อวินาที

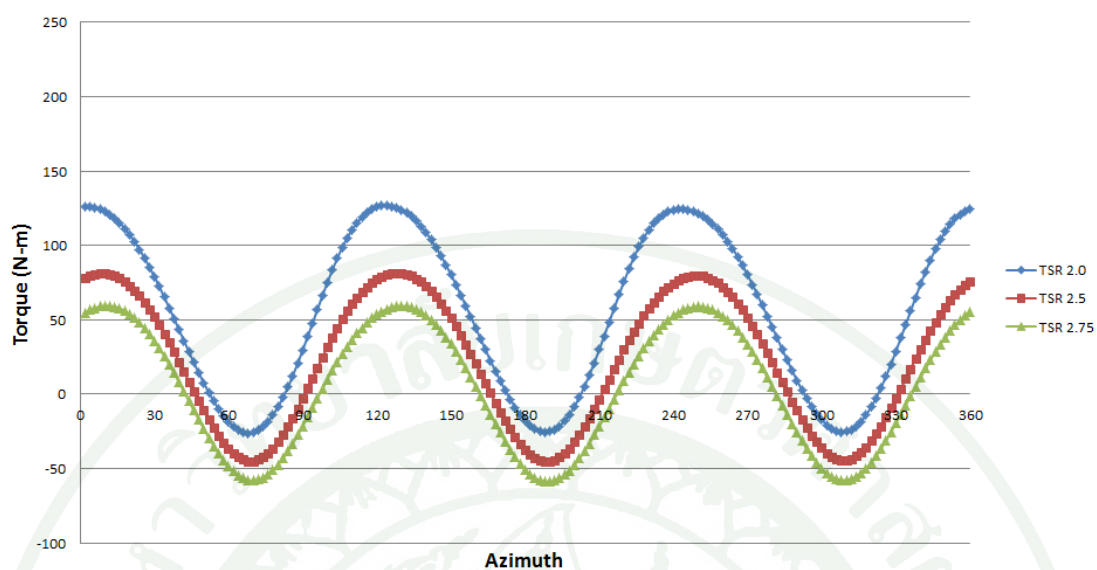


ภาพที่ 59 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 2.0, 2.5 และ 2.75 ที่ความเร็วน้ำ 0.6 เมตรต่อวินาที

ภาพที่ 60 และภาพที่ 61 แสดงค่าแรงบิดจากการจำลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่ TSR 0.5 ถึง 2.75 พบว่าหลังจากเพิ่มความเร็วกระแสน้ำจาก 0.6 เมตรต่อวินาทีมาเป็น 0.7 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าแรงบิดเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ค่าเลขเรย์โนลส์ที่สภาวะความเร็วกระแสน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที พบว่ามีค่าอยู่ประมาณ $Re = 9.35 \times 10^5$ ซึ่งมีค่ามากขึ้นอีก เมื่อเทียบกับค่าเลขเรย์โนลส์ที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 และ 0.6 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 60 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ที่ความเร็วน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 61 แสดงค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ TSR 2.0, 2.5 และ 2.75 ที่ความเร็วน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที

การคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

ค่าแรงบิดในละอองสาอะซิมาที่ไดจากการจำลองการหมุนหนึ่งรอบของกังหันน้ำแนวตั้ง จะนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อไปใช้ในการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานโดยคำนวณจากสมการที่ (54)

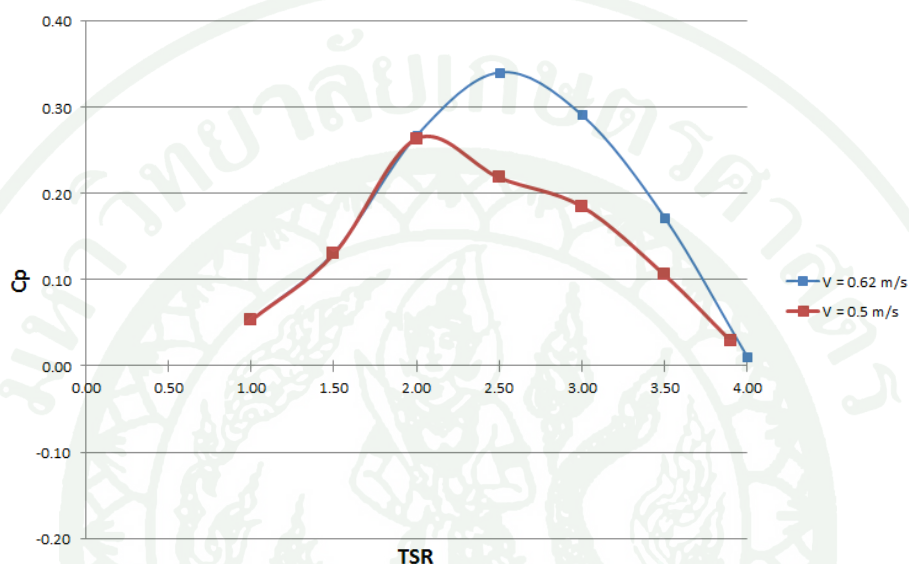
$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{water}} \quad (53)$$

$$C_p = \frac{T_{avg} \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (54)$$

โดยที่ C_p = ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
 T_{avg} = แรงบิดเฉลี่ยของใบพัดทั้ง 3 ใบรวมกัน
 ω = ความเร็วของการหมุน
 ρ = ความหนาแน่นของน้ำ
 V = ความเร็วกระแสน้ำ

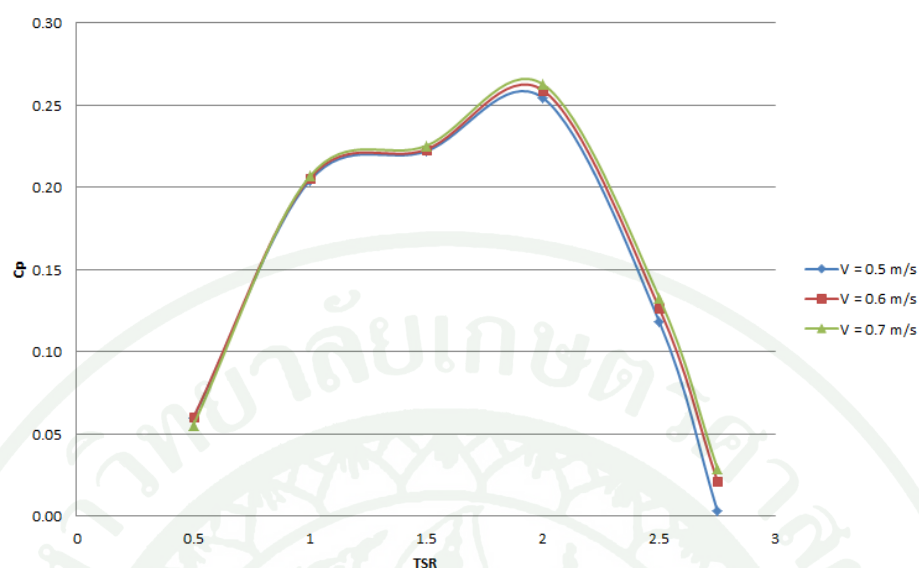
ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรและความยาวใบพัด 3 เมตร ทำการจำลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที และ 0.62 เมตรต่อวินาที ในแต่ละ TSR แสดงในภาพที่ 62 จากภาพจะเห็นได้ว่าที่สภาวะความเร็ว 0.5 และ 0.62 เมตรต่อวินาที ภาพรวมของค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีความแตกต่าง เนื่องจากค่าของเลขเรย์โนลส์ที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเร็วกระแสน้ำระหว่างความเร็วกระแสน้ำ 0.62 และ 0.5 เมตรต่อวินาทีที่มีค่าเลขเรย์โนลส์ $Re = 1.66 \times 10^6$ และ $Re = 1.37 \times 10^6$ ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นอีกว่า ในช่วง TSR 1.0, 1.5 และ 2.0 ที่สภาวะความเร็วน้ำ 0.5 และ 0.62 เมตรต่อวินาที ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีความใกล้เคียงกันมากเส้นกราฟทั้งสองเส้นเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน แสดงว่าในช่วงนี้ค่าของเลขเรย์โนลส์ยังไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน แต่จะส่งผลให้เห็นชัดเจนที่ TSR 2.5 ถึงแม้ว่าช่วงระยะ TSR 2.0 ถึง TSR 2.5 ของทั้งสองสภาวะความเร็วจะเป็นช่วงที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด เมื่อพิจารณาที่ TSR 2.5 ของทั้งสองความเร็วจะเห็นได้ว่าที่ความเร็วน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาทีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ TSR 2.0 แต่ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาทีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานลดลงเมื่อเทียบกับ TSR 2.0 ซึ่งที่จุดนี้ค่าของเลขเรย์โนลส์ส่งผลกระทบให้เห็นอย่างชัดเจน และหลังจาก TSR 2.5 เป็นต้นไปของทั้งสอง

ความเร็วค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานเริ่มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ TSR 3.9 และ TSR 4 ตามลำดับ และจากการจำลองการไหลที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 0.26 หรือประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การจำลองที่ความเร็ว 0.62 เมตรต่อวินาที ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 0.34 หรือประมาณ 34 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 62 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในแต่ละ TSR ที่สภาวะความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที และ 0.62 เมตรต่อวินาที

ภาพที่ 63 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรและขนาดความยาวใบพัด 1.5 เมตร จำลองการไหลที่สภาวะความเร็ว 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ ในแต่ละ TSR จากกราฟทั้งสามความเร็วพบว่าทั้งสามสภาวะความเร็วมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดและมีค่าใกล้เคียงกันทั้งหมดอีกด้วย เส้นกราฟในช่วง TSR 0.5, 1.0 และ 1.5 ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของทั้งสามความเร็วมีความใกล้เคียงกันมากจนเกือบจะเป็นเส้นเดียวกัน เนื่องจากอิทธิพลของค่าเลขเรย์โนลด์ส์มีน้อยมากจนไม่สามารถสร้างความแตกต่างได้ที่ TSR 2.0 เป็นจุดที่มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดของทั้งสามสภาวะความเร็ว และที่จุดนี้เริ่มมีความแตกต่างกันเล็กน้อยของกราฟทั้งสามเส้น เพราะอิทธิพลของเลขเรย์โนลด์ส์เริ่มมีผลให้เกิดความแตกต่างของค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานแล้ว แต่ไม่มากจนเห็นได้อย่างชัดเจนเหมือนกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ที่ TSR 2.5 กราฟทั้งสามเส้นแสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ลดลงเมื่อเทียบกับ TSR 2.0 และลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่ TSR 2.75 จากการจำลองการไหลทั้งสามสภาวะค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดของความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาทีอยู่ที่ 0.25 หรือประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาทีมีค่าพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 0.259 หรือประมาณ 25.9 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเร็ว 0.7 เมตรต่อวินาทีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 0.262 หรือประมาณ 26.2 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่ความเร็วกระแส 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที คำนวณจากสมการ (52) มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์อยู่ที่ $Re = 6.68 \times 10^5$, $Re = 8.02 \times 10^5$ และ $Re = 9.35 \times 10^5$ ตามลำดับ



ภาพที่ 63 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในแต่ละ TSR ที่สภาวะความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที 0.6 เมตรต่อวินาที และ 0.7 เมตรต่อวินาที

ในภาพที่ 64 แสดงกราฟเปรียบเทียบของค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันน้ำแนวตั้ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ความยาวใบพัด 3 เมตร และกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ความยาวใบพัด 1.5 เมตร ในแต่ละ TSR เมื่อพิจารณาในลักษณะของช่วงการทำงานและค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 เมตรสามารถสร้างประสิทธิภาพเชิงพลังงานในช่วง TSR ที่กว้างมากกว่ากังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร โดยที่กังหันน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 เมตร สามารถทำงานได้ตั้งแต่ TSR 1.0 ถึง 4.0 ในขณะที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรทำงานในช่วง TSR 0.5 ถึง 2.75 และที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร สามารถสร้างประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดได้ที่ TSR 2.5 ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที และมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานถึง 0.34 หรือ 34 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร สร้างประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ TSR 2.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที และมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานอยู่ที่ 0.262 หรือ 26.2 เปอร์เซ็นต์

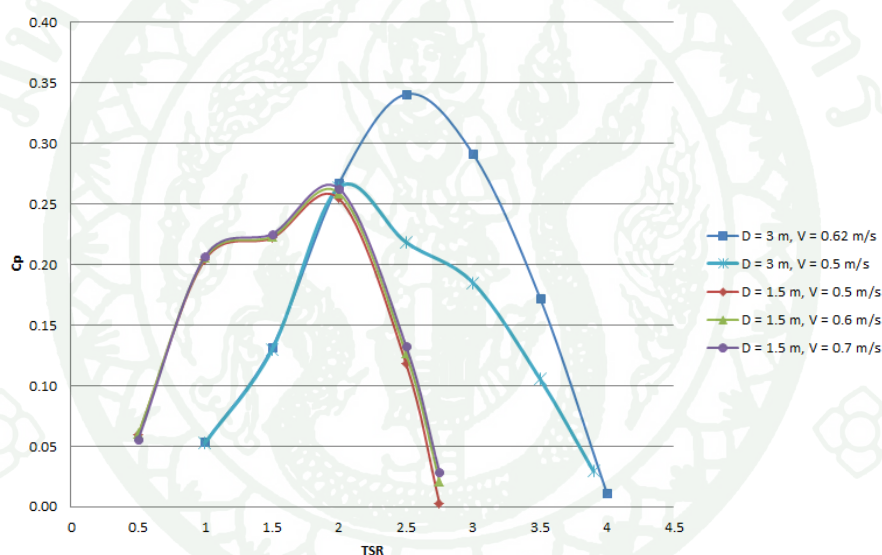
เมื่อพิจารณาที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาทีของกังหันน้ำทั้งสองขนาด พบว่า ในช่วง TSR 1.0 ถึง 1.5 มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนของค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน โดยที่ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร มีค่ามากกว่าค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 เมตรอยู่มาก และมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานใกล้เคียงกันมากที่สุดที่ TSR 2.0 และเริ่มมีค่าลดลงหลังจาก TSR 2.0 เป็นต้นไปของกังหันน้ำทั้งสองขนาด แสดงว่าหลังจาก TSR 2.0 ของกังหันน้ำทั้งสองขนาดเริ่มเข้าสู่สภาวะ Solidity เนื่องจากเกิดแรงต้านมากกว่าแรงยก ดังนั้นกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร จึงเหมาะสมมากกว่ากังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตรที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที เพราะสามารถสร้างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานได้สูงกว่าในช่วงที่มี TSR ต่ำหรือความเร็วการหมุนต่ำ

เมื่อดูจากกราฟที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาทีของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 1.5 เมตร แสดงถึงพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่เปลี่ยนไปน้อยมาก แสดงว่าการเพิ่มความเร็วกระแสน้ำเพียงอย่างเดียวหรือการเปลี่ยนแปลงค่าเลขเรย์โนลด์สเพียงเล็กน้อยนั้น ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจน แต่เมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวใบพัดกังหันน้ำเป็น 3 เมตร โดยใช้ความเร็วกระแสน้ำแค่ 0.62 เมตรต่อวินาที ส่งผลให้ช่วงการทำงานขยายกว้างขึ้นคือสามารถทำงานในช่วงที่ TSR สูงขึ้นได้ และมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดเท่ากับ 34 เปอร์เซ็นต์ที่ TSR 2.5

ถึงอย่างไรก็ตาม แม้ว่าที่ TSR 2.5 ของกังหันน้ำเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 เมตรจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูงที่สุดซึ่งมากกว่าที่ TSR 2.0 ของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร การควบคุมความเร็วรอบของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 เมตรทำได้ยากกว่ากังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร เนื่องจากค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร ที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาทีที่ TSR 2.5 มีค่าเท่ากับ 34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะเกิดขึ้นที่ความเร็วที่ความเร็วเดียวกันนั้น เพราะว่าเมื่อได้ลดความเร็วกระแสน้ำลงมาเหลือ 0.5 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.0 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งลดลงจากเดิม ส่วนค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 เมตร ที่ TSR 2.0 มีค่าอยู่ที่ 25, 25.2 และ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งสามเร็วคือ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่าที่กังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วกระแสน้ำยังสามารถรักษาค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดให้มีการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมาก ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่างกันเพียง 1 ถึง 1.2 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น ดังนั้นเงื่อนไขที่จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่สูงที่สุดได้ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร จะต้องมี

ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาทีไหลผ่านและต้องควบคุมความเร็วของการหมุนให้อยู่ที่ TSR 2.5 ถึงจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ 34 เปอร์เซ็นต์ได้ แต่กังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร มีการควบคุมให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดจะทำได้ง่ายกว่าเนื่องจากเมื่อมีความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที เพียงแค่ควบคุมความเร็วของการให้หมุนให้อยู่ที่ TSR 2.0 จะสามารถสร้างประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดได้แล้ว

จากข้อมูลทีกล่าวนำมาทำให้ทราบอย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวใบพัดโดยไม่เปลี่ยนใบพัดส่งผลต่อพฤติกรรมการสร้างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ค่าสูงสุดของค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และช่วงการทำงานของกังหันน้ำแนวตั้ง



ภาพที่ 64 แสดงกราฟระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานในแต่ละ TSR ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาด 3 เมตรและ 1.5 เมตร ที่สภาวะความเร็วกระแสน้ำ 0.5 และ 0.62 เมตรต่อวินาที และที่สภาวะความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการจำลองการไหลของน้ำผ่านกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร และ 1.5 เมตร ทำให้ทราบว่า การกระจายของความเร็วบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของใบพัดมีความแตกต่างกัน ส่งผลต่อแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนบนและส่วนล่างมีความแตกต่างกันไปด้วย ค่าแรงดันดังกล่าวจะนำไปใช้ในการคำนวณค่าแรงบิด ในการจำลองที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 และ 0.62 เมตรต่อวินาที ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร และที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.5 เมตร ที่ TSR ต่างๆ แสดงให้เห็นว่าค่าของแรงบิดมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อความเร็วกระแสน้ำ หรือความเร็วรอบของการหมุนมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส โดยมีปัจจัยของการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกังหันน้ำแนวตั้ง การเปลี่ยนแปลงของความเร็วกระแสน้ำ และการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบการหมุน พบว่าการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าเลขเรย์โนลด์ส โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยดังกล่าว ส่งผลให้ค่าของแรงบิดเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเหตุปัจจัยเหล่านั้น แสดงว่าอิทธิพลของค่าเลขเรย์โนลด์สที่มีการเปลี่ยนแปลง มีผลกระทบต่อค่าแรงบิดให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย

จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงาน พบว่ากังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.5 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานอยู่ที่ 34 เปอร์เซ็นต์ และที่กังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.7 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.0 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่ากังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดน้อยกว่ากังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร แต่มีข้อได้เปรียบที่ดีมากในเรื่องของการควบคุมช่วงการทำงานให้อยู่ในช่วงการทำงานที่ดีได้ เนื่องจากที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.0 มีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร อยู่ที่ 26.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าสูงที่สุด ในขณะที่กังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เมตร มีเงื่อนไขอยู่ว่า ต้องมีสภาวะความเร็วกระแสน้ำ 0.62 เมตรต่อวินาที ที่ TSR 2.5 เท่านั้น ถึงจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดอยู่ที่ 34 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการควบคุมช่วงการทำงานของกังหันน้ำ

แนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ให้อยู่ในจุดที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงสุดนั้น สามารถทำได้ง่ายกว่ามาก

ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงผลออกมาได้เป็นที่น่าพอใจ จากผลจากการสอบเทียบผล (Validation) ของข้อมูลจากผลการทดลองจริงจำนวนสองชุด จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของผลการทดลองและผลการจำลองมีค่าไปในทิศทางเดียวกัน และมีความใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันอยู่บ้างของการสอบเทียบผลในข้อมูลชุดที่หนึ่ง แต่แบบจำลองปั่นป่วน RNG $k-\varepsilon$ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในการจำลอง ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีของการใช้แบบจำลองปั่นป่วนนี้สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีทรัพยากรไม่มากนัก

แบบจำลองชั้นซิดผิวในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองชั้นซิดผิว Standard Wall Function ซึ่งการคำนวณมีความละเอียดน้อยกว่าแบบจำลองชั้นซิดผิว Enhance Wall Treatment ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่อาจส่งผลกระทบต่อความแตกต่างระหว่างค่าผลการจำลองและผลการทดลองในการสอบเทียบผล ซึ่งแบบจำลองชั้นซิดผิว Enhance Wall Treatment อาจแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดของทรัพยากรคอมพิวเตอร์จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองชั้นซิดผิว Standard Wall Function

การจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบสองมิติ สามารถให้รายละเอียดจากการจำลองได้มากพอในการศึกษา ค้นคว้า และสร้างความเข้าใจถึงพฤติกรรมการทำงานของกังหันน้ำแนวตั้งได้ในระดับที่ระดับหนึ่ง แต่ถ้าหากเพิ่มการจำลองขึ้นไปเป็นสามมิติ ข้อมูลที่ได้จะมีมากขึ้น การจำลองจะมีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้นไปอีก ทำให้สามารถเพิ่มมุมมองในการวิเคราะห์ขึ้นไปในระดับที่สูงขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากในการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบ และพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับกังหันน้ำแนวตั้งสืบต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาในส่วนของการลดขนาดลงของเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวใบพัด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะของแพนอากาศ ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและลักษณะของแพนอากาศด้วย อาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของกังหันน้ำแนวตั้งซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการศึกษา และค้นคว้าต่อไป

ข้อมูลที่ได้จากการจำลองกังหันน้ำแนวตั้งในงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่มีประสิทธิภาพของกังหันน้ำสำหรับการนำไปใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ยังมีส่วนที่สามารถเพิ่ม

ประสิทธิภาพให้กับกังหันน้ำแนวตั้งได้อีก เช่น การปรับมุมปะทะให้เหมาะสม การพัฒนาออกแบบ
 แพนอากาศสำหรับใบพัด และการควบคุมมุมปะทะของใบพัดทุกๆช่วงการหมุน และอื่นๆอีก
 มากมาย ดังนั้นการพัฒนาในส่วนนี้ยังต้องการการศึกษา ค้นคว้าต่อไปอีก



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ณัฐพล ลครชัย. 2555. การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแนวตั้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2550. ระบบโทรมาตร. แหล่งที่มา:
<http://watertele.egat.co.th/>, 19 กุมภาพันธ์ 2557.

Ansys. 2012. **Ansys Fluent Theory Guide**. (Computer Program). Technology Drive
 Canonburg, PA.

Ansys. 2012. **Ansys Fluent User's Guide**. (Computer Program). Technology Drive
 Canonburg, PA.

Beri, H. and Y. Yao. 2011. Effect of camber Airfoil on self starting of Vertical Axis wind
 Turbine. **Journal of Environment Science and Technology** 4 (3): 302 – 312.

Bojateau, R., A. Dumitrachu and H. Dumitrescu. 2014. Reynolds number effect on the
 Aerodynamic performance of small VAWTs. **U.P.B. Sci. Bull.** 76 (1): 25-26.

Garman, P. 1986. **Water Current Turbines: A Fieldworker's Guide**. Intermediate
 Technology Publications, London.

Gorban, A.N., A.M. Gorlov and V.M. Silantyev. 2011. Limits of the Turbine efficiency for free
 fluid flow. **Journal of Energy Resources Technology** 123: 311-312.

Güney, M.S. and K. Kaygusuz. 2010. Hydrokinetic energy conversion system: a technology
 status review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14: 2996-3004

Hwang, I.S., Y.H. Lee and S.J. Kim. 2009. Optimization of Cycloidal Turbine and the
 performance improvement by individual blade control. **Applied Energy** 86: 1532-1540.

- Islam, M., D.S.-K. Ting and A. Fertaj. 2008. Aerodynamic model for Darrieus-type straight-bladed Vertical Axis wind Turbine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 12: 1087-1109.
- Kino, S., M. Shiono and K. Suzuki. 1996. The power generation from tidal current by Darrieus Turbine. **WREC** 1242-1245
- Navabi, Y. 2008. **Numerical Study of the Duct Shape Effect on the Performance of a Ducted Vertical Axis Tidal Turbine**. M.E. Thesis, Amirkabir University of Technology.
- Rawling, G.W. 2008. **Parametric Characterization of an Experimental Vertical Axis Hydro Turbine**. M.E. Thesis, University of British Columbia.
- Ragheb, M. and A.M. Ragheb. 2011. **Wind Turbines Theory – The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio**. InTech, Croatia.
- Sheldahl, R. and B. Blackwell. 1977. Free – air performance tests of a 5 meters diameter darrieus turbine. **Technical Report SAND77 – 1063**. Sandia Laboratories.
- Templin, R.J. 1974. **Aerodynamic performance theory for NRC vertical – axis wind turbine**. National Aeronautical Establishment, Ottawa (Ontario).
- Zaidi, M., N. Uddin, A. Adeel and S. Ahmed. 2013. Numerical simulations of Hydrokinetic Turbine for power generation, pp. 52-56. *In* **Proceeding of International Conference on Energy and Sustainability**. NED University of Engineering & Technology, Karachi, Pakistan.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่า time step size เพื่อไปกำหนดในโปรแกรม Ansys Fluent สามารถคำนวณได้จากสมการ (66) ยกตัวอย่างเช่น กังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่ TSR 2.0 ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที ความเร็วการหมุนของกังหันน้ำมีค่าเท่ากับ 1.333 เรเดียนต่อวินาที และกำหนดให้ θ มีค่าเท่ากับ 2 องศาละติจูด

$$T_{TSS} = \frac{(\theta)\pi}{180(\omega)}$$

$$T_{TSS} = \frac{(2)\pi}{180(1.333)}$$

$$T_{TSS} = 0.0261864854$$

ดังนั้นค่า time step size ที่สภาวะการทำงานนี้มีค่าเท่ากับ 0.0261864854 ถ้าหากค่า θ หรือค่า ω ถ้าหากค่าใดค่าหนึ่งเปลี่ยนแปลงไปค่า time step size จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ตารางที่ 1 แสดงค่า time step size ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที

ค่าแรงบิดที่ได้จากการจำลองในละอองละติจูดจากโปรแกรม Ansys Fluent ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของ C_m จะมีทั้งหมด 180 ค่า ในแต่ละค่าสามารถคำนวณแปลงเป็นค่าแรงบิดได้จากสมการ (67) ดังนี้

$$C_m = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A L V^2} \quad (67)$$

ยกตัวอย่างเช่น คำนวณหาค่าแรงบิดของกังหันน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ที่ TSR 2.0 ความเร็วกระแส 0.5 เมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของน้ำ 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พื้นที่หน้าตัดของกังหันน้ำแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.25 ตารางเมตร รัศมีของกังหันน้ำแนวตั้งมีขนาด 0.75 เมตร และค่า C_m ที่ได้จากการจำลองที่มุมละติจูด 2 องศา มีค่าเท่ากับ 0.3005918

$$0.3005918 = \frac{T}{(0.5)(998.2)(2.25)(0.75)(0.5)^2}$$

$$T = 26.8$$

ดังนั้นค่าแรงบิดที่มุมอะซิมุท 2 องศา ที่ TSR 2.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที มีค่าเท่ากับ 63.3 นิวตันเมตร ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการหมุน 1 รอบทั้งหมด 180 ค่าจะถูกคำนวณและนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อจะนำไปใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงพลังงานต่อไป ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตรที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที

ค่าเฉลี่ยของแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการหมุนในหนึ่งรอบจะนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงพลังงานตาม สมการ (68) ดังนี้

$$C_p = \frac{T_{avg} \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (68)$$

ยกตัวอย่างการคำนวณที่ TSR 2.0 ความเร็วกระแสน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาที ความเร็วการหมุนของกังหันน้ำแนวตั้ง 1.333 เรเดียนต่อวินาที ความหนาแน่นของน้ำ 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พื้นที่หน้าตัดของกังหันน้ำแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 2.25 ตารางเมตร และค่าแรงบิดเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 26.79 นิวตันเมตร

$$C_p = \frac{(26.797)(1.333)}{(0.5)(998.2)(2.25)(0.5)^3}$$

$$C_p = 0.254$$

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพพลังงานที่ TSR 2.0 ความเร็วน้ำ 0.5 เมตรต่อวินาทีที่มีค่าเท่ากับ 0.254 หรือ 25.4 เปอร์เซ็นต์

ตารางผนวกที่ ก1 ค่า time step size ของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที

TSR	Time step size (ที่ 0.5 เมตรต่อวินาที)	Time step size (ที่ 0.6 เมตรต่อวินาที)	Time step size (ที่ 0.7 เมตรต่อวินาที)
0.5	0.1048245797	0.0872664626	0.07474643477
1.0	0.0523337107	0.0436332313	0.03741327443
1.5	0.03490658504	0.02908882087	0.02493327503
2.0	0.0261864854	0.02181661565	0.01869661759
2.5	0.02093976307	0.01745329252	0.01496210246
2.75	0.01745329252	0.01586662956	0.0135982022

ตารางผนวกที่ ก2 ค่าแรงบิดเฉลี่ยของกังหันน้ำแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เมตร ในแต่ละ TSR ที่ความเร็วน้ำ 0.5, 0.6 และ 0.7 เมตรต่อวินาที

TSR	แรงบิดเฉลี่ย N-m (ที่ 0.5 เมตรต่อวินาที)	แรงบิดเฉลี่ย N-m (ที่ 0.6 เมตรต่อวินาที)	แรงบิดเฉลี่ย N-m (ที่ 0.7 เมตรต่อวินาที)
0.5	25.159	36.409	53.376
1.0	42.984	62.367	85.397
1.5	31.173	45.104	62.006
2.0	26.797	39.282	54.219
2.5	9.966	15.34	21.946
2.75	0.886	2.327	4.310



ตำแหน่ง	เขื่อนภูมิพล ลุ่มน้ำปิง-วัง										หน่วย
	สถานีวัด										
	[PU01]	[PU02]	[PU04]	[PU06]	[PD02]	[PD03]	[PD04]	[PD06]			
	แม่น้ำปิง อ.ดอยหล่อ จ.เชียงใหม่	แม่น้ำปิง อ.ฮอด จ.เชียงใหม่	ห้วยแม่เติน อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่	แม่แจ่ม ท้ายฝายแม่แจ่ม จ.เชียงใหม่	แม่น้ำปิง บ้านดง จ.ตาก	ห้วยตาก บ้านจาก จ.ตาก	ห้วยแม่ท้อ อ.เมือง จ.ตาก	แม่น้ำปิง อ.คลองขลุง จ.กำแพงเพชร			
ระยะ	กว้าง	150	140	120	200	540	25	50	450	ม.	
	ระดับท้องน้ำ	270.89	256.07	419.71	266.5	117.67	119.27	127.01	49.85	ม.รทก.	
	ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	272.89	257.64	420.72	269.47	119.85	119.77	127.44	52.33	ม.รทก.	
	ระดับตลิ่งซ้าย	281.04	262.31	423.66	277.9	122.12	124.51	131.47	55.67	ม.รทก.	
	ระดับตลิ่งขวา	279.52	261.29	427.69	278	122.07	123.11	132.4	55.56	ม.รทก.	
	อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	64.46	156.75	18.39	272.97	392.60	2.85	3.71	365.51	ลบ.ม./วินาที	
	ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	10.15	6.24	3.95	11.4	4.45	5.24	4.46	5.82	ม.	
	ความลึกเทียบตลิ่งขวา	8.63	5.22	7.98	11.5	4.4	3.84	5.39	5.71	ม.	
ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	2.00	1.57	1.01	2.97	2.18	0.50	0.43	2.48	ม.		
ความกว้างเทียบระดับน้ำ	120.00	110.00	50.00	110.00	500.00	18.00	17.00	263.00	ม.		
พื้นที่	240.17	172.44	50.67	327.02	1089.21	8.95	7.31	653.29	ม. ²		
ความเร็วเฉลี่ย	0.27	0.91	0.36	0.83	0.36	0.32	0.51	0.56	ม./วินาที		
ตำแหน่ง	เขื่อนภูมิพล ลุ่มน้ำปิง-วัง										หน่วย
	สถานีวัด										
	[PD07]	[PD08]	[WD01]	[WD02]							
	การประปา เมืองตาก จ.ตาก	การประปา เมืองกำแพงเพชร อ.กำแพงเพชร	แม่น้ำวัง อ.เกิ จ.ลำปาง	แม่น้ำวัง อ.สามเงา จ.ตาก							
ระยะ	กว้าง	470	540	170	75	ม.					
	ระดับท้องน้ำ	105	70.7	159.74	135.69	ม.รทก.					
	ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	106.55	73.62	161.44	138.30	ม.รทก.					
	ระดับตลิ่งซ้าย	111.5	79	166.7	144.37	ม.รทก.					
	ระดับตลิ่งขวา	111.6	77.5	167.09	143.65	ม.รทก.					
	อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	182.43	341.57	56.30	86.36	ลบ.ม./วินาที					
	ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	6.5	8.3	6.96	8.68	ม.					
	ความลึกเทียบตลิ่งขวา	6.6	6.8	7.35	7.96	ม.					
ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	1.55	2.92	1.70	2.61	ม.						
ความกว้างเทียบระดับน้ำ	360.00	268.00	90.00	50.00	ม.						
พื้นที่	558.00	783.45	152.98	130.31	ม. ²						
ความเร็วเฉลี่ย	0.33	0.44	0.37	0.66	ม./วินาที						
หมายเหตุ	ม.รทก. = ระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) [สถานีวัดน้ำ เกษหลัก จ.ประจวบคีรีขันธ์]										

ภาพผนวกที่ ๒ ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ
ลุ่มน้ำปิง-วัง

ตำแหน่ง	เขื่อนอบลรัตน์ ลุ่มน้ำชี							หน่วย	
	สถานีวัด								
	TU01	TU02	TU03	TU07	TU09	TU10	TU11		
	ลำชีชัย ท้ายฝายน้ำชัย อ.บ้านแท่น จ.ชัยภูมิ	ลำน้ำพอง อ.สีชมพู จ.ขอนแก่น	ลำพะเนียง อ.เมือง จ.หนองบัวลำพู	ลำน้ำพอง บ้านผานาค จ.เลย	ลำน้ำพรม อ.เกษตรสมบูรณ์ จ.ชัยภูมิ	ลำชีชัยฝายโครงการ ชลประทานน้ำชัย อ.ชุมแพ จ.ขอนแก่น	น้ำพวย อ.ผาขาว จ.เลย		
ระยะ	กว้าง	80	70	30	140	65	50	40	ม.
	ระดับท้องน้ำ	192.089	190.355	203.2	225.475	221.824	211.912	227.756	ม.รทก.
	ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	194.63	193.29	207.24	226.97	223.51	215.00	230.38	ม.รทก.
	ระดับตลิ่งซ้าย	200.585	202.174	210.46	237.389	225.386	222.127	234.306	ม.รทก.
	ระดับตลิ่งขวา	200.576	201.42	210.14	237.454	226.548	221.169	234.079	ม.รทก.
	อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	15.95	30.89	12.47	25.13	3.59	19.50	7.92	ลบ.ม./วินาที
	ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	8.496	11.819	7.26	11.914	3.562	10.215	6.55	ม.
	ความลึกเทียบตลิ่งขวา	8.487	11.065	6.94	11.979	4.724	9.257	6.323	ม.
	ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	2.54	2.93	4.04	1.50	1.69	3.09	2.62	ม.
	ความกว้างเทียบระดับน้ำ	55.00	25.00	20.00	10.00	25.00	18.00	15.00	ม.
พื้นที่	139.94	73.31	80.87	14.97	42.13	55.66	39.29	ม. ²	
ความเร็วเฉลี่ย	0.11	0.42	0.15	1.68	0.09	0.35	0.20	ม./วินาที	
ตำแหน่ง	เขื่อนอบลรัตน์ ลุ่มน้ำชี							หน่วย	
	สถานีวัด								
	TD01	TD02	TD03	TD04	TD05				
	ลำน้ำพอง ท้ายฝายหนองวาย จ.ขอนแก่น	ลำน้ำพอง โรงเรียน ลำน้ำพอง จ.ขอนแก่น	แม่น้ำชี เหนือฝายมหาสารคาม	แม่น้ำชี อ.เมือง จ.มหาสารคาม	แม่น้ำชี บ้านหินกอง จ.ขอนแก่น				
ระยะ	กว้าง	160	80	120 [203]	110 [325]	90 [99]			ม.
	ระดับท้องน้ำ	160.076	144.363	139.967	132.94	142.972			ม.รทก.
	ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	163.06	148.28	146.53	136.21	147.47			ม.รทก.
	ระดับตลิ่งซ้าย	168.485	157.664	149.573	144.57	156.119			ม.รทก.
	ระดับตลิ่งขวา	168.537	156.411	151.121	143.91	155.243			ม.รทก.
	อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	-	37.79	-	110.50	262.78			ลบ.ม./วินาที
	ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	8.409	13.301	9.606	11.63	13.147			ม.
	ความลึกเทียบตลิ่งขวา	8.461	12.048	11.154	10.97	12.271			ม.
	ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	2.98	3.92	6.56	3.27	4.50			ม.
	ความกว้างเทียบระดับน้ำ	137.00	40.00	87.00	70.00	45.00			ม.
พื้นที่	408.35	156.71	571.05	228.90	202.45			ม. ²	
ความเร็วเฉลี่ย	-	0.24	-	0.48	1.30			ม./วินาที	
หมายเหตุ	ม.รทก. = ระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) สถานีวัดน้ำ เกษหลัก จ.ประจวบคีรีขันธ์								

ภาพผนวกที่ ๖3 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ
ลุ่มน้ำชี

ตำแหน่ง ระยะ	เขื่อนปากมูล ลุ่มน้ำมูล										หน่วย
	สถานีวัด										
	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS15	TS15	TS16	TS17	หมายเหตุ	
	แม่น้ำชี	แม่น้ำมูล อ.ราชีไศล	แม่น้ำมูล วัดท่ากอกเหนือ	แม่น้ำมูล วัดปากโคก	แม่น้ำมูล ท้ายแก่งสะเคือ	แม่น้ำมูล	แม่น้ำมูล	แม่น้ำมูล	หน้าเขื่อนปากมูล		
กว้าง	150	130	250	380	600	160	300	300	300	700	ม.
ระดับท้องน้ำ	111.7	108.9	103.3	100.46	93.42	94.31	98	101.79	101.79	89.6	ม.รทก.
ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	115.21	112.20	107.96	107.04	106.74	106.03	106.03	107.67	107.67	100.27	ม.รทก.
ระดับตลิ่งซ้าย	130.6	119.8	114.19	112.96	116.93	114.22	114.22	116.12	116.12	120.1	ม.รทก.
ระดับตลิ่งขวา	130.3	115.4	114.65	112.17	116.67	113.36	113.36	113.84	113.84	113.61	ม.รทก.
อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	180.35	266.90	578.80	-	680.54	0.00	0.00	431.15	-	ลบ.ม./วินาที	
ความลึกเทียบตลิ่งซ้าย	18.9	10.9	10.89	12.5	23.51	19.91	16.22	14.33	14.33	30.5	ม.
ความลึกเทียบตลิ่งขวา	18.6	6.5	11.35	11.71	23.25	19.05	15.36	12.05	12.05	24.01	ม.
ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	3.51	3.30	4.66	6.58	13.32	11.72	8.03	5.88	5.88	10.67	ม.
ความกว้างเทียบระดับน้ำ	124.00	67.00	239.00	290.00	471.00	115.00	267.00	216.00	216.00	370.00	ม.
พื้นที่	435.44	221.43	1114.34	1907.89	6271.45	1348.19	2144.92	1270.31	1270.31	3947.28	ม. ²
ความเร็วเฉลี่ย	0.41	1.21	0.52	-	0.11	0.00	0.00	0.34	-	ม./วินาที	
หมายเหตุ**	ม.รทก. = ระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) [สถานีวัดน้ำ เกษหลัก จ.ประจวบคีรีขันธ์]										

ภาพผนวกที่ ๒4 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ
ลุ่มน้ำมูล

ตำแหน่ง ระยะ	เขื่อนรัชชประภา ลุ่มน้ำตาปี									หน่วย		
	สถานีวัด											
	TD01	TD03	TD04	TD05	TD06	TD07	TD08	TD09				
	ท้ายเขื่อนรัชชประภา	ศก	พุมดวง	พุมดวง	ยัน	แม่น้ำตาปี	แม่น้ำตาปี	แม่น้ำตาปี				
	วัดปากเตล็ด	วัดปากเตล็ด	โรงสูบน้ำประปา	วัดปรการ	บ้านปากคุด	อ.พระแสง	จ.สุราษฎร์	จ.สุราษฎร์	อ.พนมทั้น	จ.สุราษฎร์	จ.สุราษฎร์	ม.รทก.
กว้าง	110 [297]	175 [301]	104 [217]	120 [200]	80 [180]	70 [159]	110 [172]	140 [225]				ม.
ระดับท้องน้ำ	7.84	9.12	3.21	0.58	7.05	2.248	-6.57	-8.81				ม.รทก.
ระดับน้ำเฉลี่ยรายปี	10.48	11.60	5.22	3.33	8.37	6.52	-0.43	0.49				ม.รทก.
ระดับตลิ่งซ้าย	22.22	16.16	14.37	10.91	13.2	10.428	1.25	2.44				ม.รทก.
ระดับตลิ่งขวา	28.03	26.326	14.74	10.67	12.02	10.13	3.99	4.04				ม.รทก.
อัตราไหลเฉลี่ยรายปี	44.55	55.73	68.68	108.01	30.25	-	-	-				ลบ.ม./วินาที
ความลึกกึ่งเขตรตลิ่งซ้าย	14.38	7.04	11.16	10.33	6.15	8.18	7.82	11.25				ม.
ความลึกกึ่งเขตรตลิ่งขวา	20.19	17.206	11.53	10.09	4.97	7.882	10.56	12.85				ม.
ระดับน้ำเทียบกับท้องน้ำ	2.64	2.48	2.01	2.75	1.32	4.27	6.14	9.30				ม.
ความกว้างเขตรตลิ่ง	40.00	40.00	63.00	83.00	48.00	60.00	95.00	130.00				ม.
พื้นที่	105.78	99.33	126.42	228.62	63.15	256.25	583.19	1209.29				ม. ²
ความเร็วเฉลี่ย	0.42	0.56	0.54	0.47	0.48	-	-	-				ม./วินาที
หมายเหตุ**	ม.รทก. = ระดับทะเลปานกลาง (Mean Sea Level) [สถานีวัดน้ำ เกษะหลัก จ.ประจวบคีรีขันธ์]											

ภาพผนวกที่ ข5 ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ความเร็วกระแสน้ำ และพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้ของ
ลุ่มน้ำตาปี

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายวรยศ รัตนมาศ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 มีนาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนส่วนตัว