



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

ปริญญา

วิศวกรรมชลประทาน

วิศวกรรมชลประทาน

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

การวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพกังหันน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน

Research and Development on Efficiency of a Vertical Axis Water Turbine
with Friction Reduction

นามผู้วิจัย

นายณัฐวุฒิ จันทเลิศ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จระกานต์ ศิริวิษณุไมตรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิมิตร เจริญนันทพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพกังหันน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน

Research and Development on Efficiency of a Vertical Axis Water Turbine
with Friction Reduction

โดย

นายณัฐวุฒิ จันทเลิศ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐวุฒิ จันทเลิศ 2557: การวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพกักกั้นน้ำแกดตั้งแบบลดแรง
เสียดทาน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) สาขาวิศวกรรม
ชลประทาน, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์จระกานต์ ศิริวิชัยไมตรี, Ph.D. 103 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของกักกั้นน้ำแกดตั้งแบบลดแรง
เสียดทานให้เหมาะสมกับสภาพการไหลของน้ำในคลองชลประทานที่มีความเร็วการไหลต่ำ
โดยกักกั้นจะถูกออกแบบให้มีแกดตั้งเพื่อที่ใบพัดจะได้เปิดรับพลังงานการไหลของน้ำได้
เมื่ออยู่ในทิศทางการไหลของน้ำและใบพัดจะปิดลงเมื่อสวนการไหลของน้ำ

ทำการทดสอบกักกั้นน้ำในแบบจำลองคลองชลประทานคาคอนกรีต มีความกว้าง 1.80
เมตร มีความลึก 0.30 เมตร และมีความยาว 10 เมตร ในห้องปฏิบัติการวิจัยชลศาสตร์ ภาควิชา
วิศวกรรมชลประทาน ในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพของกักกั้นที่ความเร็ว
การไหล 0.28, 0.34, 0.37, 0.43, 0.44, 0.51, 0.52, 0.57, 0.60, 0.67 และ 0.73 เมตรต่อวินาที
ใบพัดจะมีสองลักษณะคือ ใบพัดตรง ความกว้าง 0.1 เมตร × ความยาว 0.3 เมตร และใบพัดโค้ง
มีความกว้าง 0.1 เมตร × ความยาว 0.3 เมตร และมีรัศมีความโค้งของใบพัด 0.015 เมตร

จากการทดลองพบว่า ใบพัดชนิดโค้งมีประสิทธิภาพสูงกว่าใบพัดชนิดตรง ประสิทธิภาพ
กักกั้นใบพัดชนิดโค้งได้สูงสุด 54 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหล 0.57 เมตรต่อวินาที
เมื่อเปรียบเทียบกับใบพัดชนิดตรงได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 38 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหล
0.73 เมตรต่อวินาที และได้มีการประเมินใบพัดทั้งสองชนิด คือ ใบพัดตรงและใบพัดโค้ง
โดยวิธีการประเมินโดยใช้ทฤษฎี เพื่อหาแรงที่กระทำกับใบพัด ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้วิธีการ
ประเมินการดึงพลังงานที่ได้จากกระแสน้ำที่เกิดจากขนาดของใบพัด ในการวิจัยครั้งนี้ได้มีการ
เปลี่ยนการประเมินเป็นทฤษฎี การประเมินแบบใหม่ทำให้สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์
ระหว่างพลังงานกับความเร็วมวล ซึ่งมีความใกล้เคียงมากกว่า

Natthawut Jantalert 2014: Research and Development on Efficiency of a Vertical Axis Water Turbine with Friction Reduction. Master of Engineering (Irrigation Engineering), Major Field: Irrigation Engineering, Department of Irrigation Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chirakarn Sirivitmitrie, Ph.D. 103 pages.

This research aims to develop the performance of a vertical axial with friction reduction. The water turbine was specially designed to suitable for irrigation canal. The turbine mechanism was improved to operate and start faster than the previous version by changing the shape of the blade. The operation of the turbine is defined as follow. A flip- able blade will automatically rise-up when in a direction of the flow and lower down when in reverse-flow direction.

The turbine was tested in irrigation canal model in side hydraulic laboratory. In the experiment, an efficiency of a curve blade with dimensions of 0.1 width x 0.3 length x 0.15 radius was determined. A straight blade was tested In order to compare the result. Tested at the flow velocity of 0.28, 0.34, 0.37, 0.43, 0.44, 0.51, 0.52,0.57, 0.60, 0.67, 0.73 meters/second consequently. From the experiment result, the curve blade shows higher efficiency than the straight blade with the maximum efficiency of 54 at velocity 0.57 m/s and 38 percent at velocity 0.73 m/s. The assessment of two – type turbines was done by using theory to determine load on turbine blades. Previous research assessed by energy from water velocity. The result shows that the new assessment by using theory give similar value to the experiment done in the hydraulic laboratory, which is still higher than the old assessment using energy from water velocity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.จิระกานต์ ศิริวิชัยโมตรี ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้า ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์ และอาจารย์พัชรศักดิ์ อาลัย
ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน
และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่
ประจำห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรม
ชลประทานทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่
ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดในทุกเรื่อง

ณัฐวุฒิ จันทเลิศ
มิถุนายน 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	54
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	62
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี	65
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณพลังงานโดยทฤษฎี	97
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตารางแสดงผลการทดสอบการดึงพลังงานของใบพัดตรง ที่ความเร็วการไหลต่างๆ	46
2	ตารางแสดงผลการทดสอบการดึงพลังงานของใบพัดโค้ง ที่ความเร็วการไหลต่างๆ	49
3	ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล พลังงานที่ได้ จากกังหันน้ำ จำนวนรอบ ของใบพัดตรง	56
4	ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล พลังงานที่ได้ จากกังหันน้ำ จำนวนรอบ ของใบพัดโค้ง	57
ตารางผนวกที่		
ก1	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.34 เมตรต่อวินาที	66
ก2	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.37 เมตรต่อวินาที	68
ก3	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.44 เมตรต่อวินาที	70
ก4	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.52 เมตรต่อวินาที	72
ก5	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.60 เมตรต่อวินาที	74
ก6	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.67 เมตรต่อวินาที	77
ก7	ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรง เสียดทานชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.73 เมตรต่อวินาที	80

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ก8	ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.28 เมตรต่อวินาที	83
ก9	ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.43 เมตรต่อวินาที	84
ก10	ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.51 เมตรต่อวินาที	86
ก11	ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.57 เมตรต่อวินาที	89
ก12	ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.67 เมตรต่อวินาที	91
ก13	ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.73 เมตรต่อวินาที	94

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	วัฏจักรของน้ำและการประยุกต์ใช้พลังงานน้ำ	5
2	แสดงตัวอย่างของกังหันน้ำเบงกิก	6
3	แสดงตัวอย่างของกังหันน้ำเพลตัน	7
4	แสดงตัวอย่างกังหันน้ำเทอร์โก	8
5	แสดงตัวอย่างกังหันฟรานซิส	9
6	แสดงตัวอย่างกังหันน้ำคาปลาน	9
7	แสดงตัวอย่างกังหันน้ำเคเรียว	10
8	การไหลแบบต่อเนื่อง	17
9	การหาสมการ โมเมนตัม	19
10	ของไหลไหลกระทบแผ่นผิวที่เคลื่อนที่ทิศทางเดียวกับการไหล	21
11	ของไหลไหลกระทบแผ่นผิวที่เคลื่อนที่ทิศทางตรงข้ามกับการไหล	22
12	ของไหลไหลกระทบแผ่นผิวโค้งที่เคลื่อนที่	23
13	Cycloidal Water Turbine	25
14	ใบพัดกังหันแบบโค้งขนาด 30×10×0.15 เซนติเมตร	28
15	ใบพัดกังหันแบบตรงขนาด 30×10 เซนติเมตร	29
16	สายพาน	29
17	พู่เล่ขนาดรัศมี 10 เซนติเมตร	30
18	การทดสอบกังหันที่ติดตั้งใบพัดโค้งขนาด 30×10×0.15 เซนติเมตร จำนวน 8 ใบ	30
19	การทดสอบกังหันที่ติดตั้งใบพัดตรงขนาด 30×10 เซนติเมตร จำนวน 8 ใบ	31
20	เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตั้ง	32
21	เครื่องวัดความเร็วรอบ	33
22	แบบจำลองคลองชลประทาน ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน	34
23	การติดตั้งกังหันน้ำและอุปกรณ์ต่างๆในคลองชลประทาน (มุมมองด้านบน)	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	การวัดความเร็วรอบของกังหันน้ำ	37
25	การติดตั้งตัวตะเปิด – ปิดใบพัดเพื่อทำให้มีความหมุนต่อเนื่องของกังหันน้ำ	37
26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับมุมการหมุนของใบพัด ที่ความเร็วการไหลของกระแสน้ำเท่ากับ 0.73 เมตรต่อวินาที จำนวน 10.5 รอบ	40
27	ภาพแสดงค่าเฟลคเตอร์ตัวช่วยการหมุนของกังหันน้ำ	41
28	ภาพแสดงค่าทิศทางการเคลื่อนที่ของใบพัดในแต่ละตำแหน่ง	42
29	ภาพแสดงค่าพื้นที่ของใบพัดแต่ละใบของกังหันน้ำ	43
30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับพลังงานของกังหันใบพัดตรง	51
31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับพลังงานของกังหันใบพัดโค้ง	53
32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานระหว่างใบพัดตรงและใบพัดโค้ง	59

การวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพกังหันน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน

Research and Development of Efficiency a Vertical Axis Water Turbine with Friction Reduction

คำนำ

พลังงานน้ำ เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มนุษย์ได้มีการหามาเพื่อทดแทนพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากน้ำมัน ถ่านหิน ปิโตรเลียม ซึ่งพลังงานน้ำนี้เป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมดสิ้น ไม่เหมือนกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากน้ำมัน ถ่านหิน หรือปิโตรเลียม จะเป็นพลังงานที่มีวันหมด การนำพลังงานน้ำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนนั้น จำเป็นต้องสร้างกังหันน้ำเพื่อนำพลังงานน้ำเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการสร้างกังหันน้ำมาหลายชนิด นิกอร์ และคณะ (2529) ทำการสร้างและทดสอบกังหันน้ำแบบดินตะขาบ และ เศรษฐา (2554) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพกังหันพลังงานน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน การวิจัยนี้มีการพัฒนาเพื่อที่จะได้สามารถดึงพลังงานน้ำให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยมีประสิทธิภาพมากที่สุด

ประเทศไทยมีการใช้ไฟฟ้าพลังน้ำ ซึ่งหน่วยงานเช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งต่างๆ เช่นพลังงานสะอาด พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ ฯลฯ รวมทั้งสิ้น 63 ล้านกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ซึ่งการผลิตส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานจากน้ำมัน ซึ่งทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการพัฒนาการผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำเพื่อที่จะได้เป็นการใช้พลังงานทดแทน

พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานน้ำเป็นเพียงแหล่งผลิตไฟฟ้าเสริมให้กับระบบไฟฟ้าของประเทศที่มีช่วงเวลากการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุด เพราะโรงงานไฟฟ้าพลังน้ำนั้นมีความสามารถในการเดินเครื่องได้อย่างรวดเร็วและหยุดเครื่องตามที่ต้องการได้ ซึ่งจะแตกต่างออกไปจากโรงงานไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ที่ต้องใช้เวลานานทั้งในการเดินเครื่องและการหยุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันนี้เกือบทั่วโลกได้มีการนำไฟฟ้าพลังงานน้ำมาใช้งาน ซึ่งนอกจากจะเป็นพลังงานที่ใช้ไม่มีวันหมดไม่เหมือนกับพลังงานชนิดอื่นๆ แล้ว พลังงานน้ำที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเขื่อนน้ำที่ถูกปล่อยเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้านั้นมีบางส่วนที่ถูกปล่อยไปเพื่อใช้ในการเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และ

มีบางส่วนที่ถูกสูบเก็บกักมาไว้ที่ตัวเขื่อนเพื่อที่จะใช้ในการผลิตไฟฟ้าในครั้งต่อไป และนอกจากการผลิตไฟฟ้าจากเขื่อนแล้วนั้น จะมีการผลิตไฟฟ้าจากการไหลในคลองชลประทานด้วยความเร็วการไหลที่ต่ำ เนื่องจากประเทศไทยนั้นมีพื้นที่ชลประทานจำนวนมาก ซึ่งเราสามารถติดตั้งกังหันน้ำผลิตไฟฟ้าด้วยความเร็วการไหลที่ต่ำได้ จะสามารถผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยน้ำที่ไหลในคลองชลประทานได้

กฎข้อที่ 3 ของนิวตันกล่าวไว้ว่า ทุกครั้งที่วัตถุทั้งสองชนิดมีแรงกระทำซึ่งกันและกัน แรงที่ได้จากวัตถุอันหนึ่งจะกระทำต่อวัตถุอีกอันหนึ่ง มีขนาดแรงเท่ากับแรงที่วัตถุที่สองกระทำกับวัตถุอันแรก ซึ่งจะสรุปได้ว่า เมื่อวัตถุมีแรงสองแรงมากระทำต่อกันซึ่งขนาดของแรงเท่ากันแต่เป็นทิศตรงกันข้าม จะทำให้วัตถุหยุดนิ่ง จากกฎดังกล่าวของนิวตัน จึงได้มีแนวคิดของกังหันน้ำแกนตั้ง และให้กังหันจมน้ำทั้งหมดเพื่อที่จะได้รับแรงมากขึ้น กังหันน้ำแกนตั้งนี้ได้ออกแบบมาให้แรงที่ต้านกับแรงของน้ำนั้นลดลง เพื่อที่จะทำให้กังหันน้ำนั้นหมุนได้อย่างต่อเนื่อง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของใบพดกัณฑ์ชนิดใบตรงและใบโค้ง
2. เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่วัดได้จากแบบจำลองทางกายภาพกับการประเมินโดยทฤษฎี



การตรวจเอกสาร

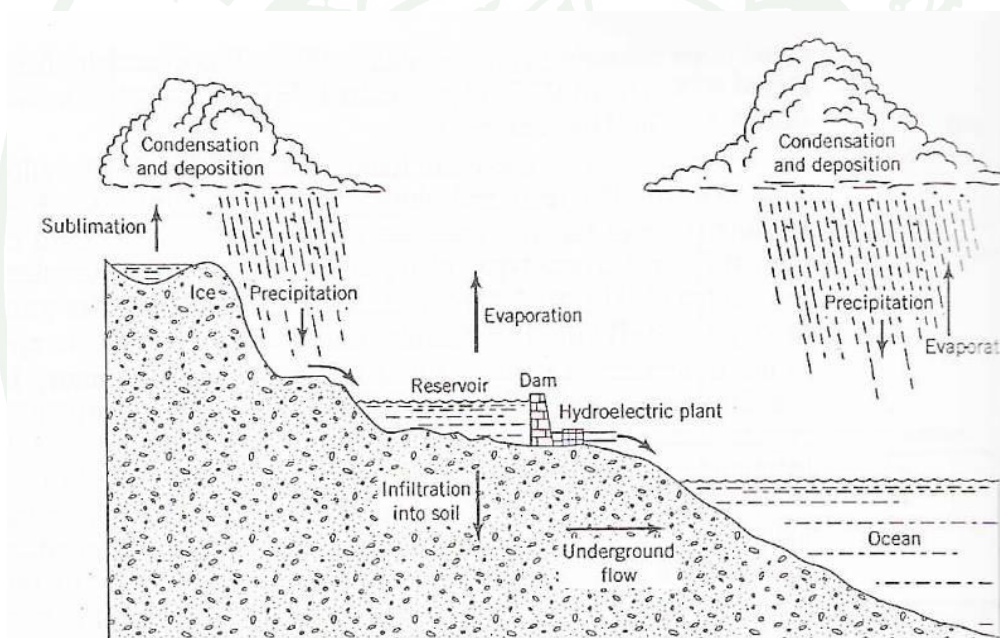
การศึกษาการประเมินสมรรถนะของกังหันน้ำขนาดเล็กเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า จำเป็นต้องมีพื้นฐานความเข้าใจทฤษฎีด้านต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกังหันน้ำขนาดเล็กรวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องของทฤษฎี หลักการ และเหตุผล มีดังต่อไปนี้

1. พลังงานน้ำ (Hydraulic Power)

พลังงานน้ำ เป็นรูปแบบหนึ่งของการสร้างกำลัง โดยการอาศัยพลังงานของน้ำที่เคลื่อนที่ ในปัจจุบันนี้พลังงานน้ำจะถูกใช้เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า พลังงานของมวลน้ำที่เคลื่อนที่ได้ถูกมนุษย์นำมาใช้มานานแล้ว โดยได้มีการสร้างกังหันน้ำ (Water Wheel) เพื่อใช้ในการงานต่างๆ ในอินเดีย และชาวโรมันก็ได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อใช้ในการ โม่แป้งจากเมล็ดพืชต่างๆ ส่วนผู้คนในจีนและ ตะวันออกกลางก็ได้มีการใช้พลังงานน้ำเพื่อสร้าง Pot Wheel เพื่อใช้ในวิดน้ำเพื่อการชลประทาน โดยในช่วงทศวรรษ 1830 ซึ่งเป็นยุคที่การสร้างคลองเฟื่องฟูถึงขีดสุด ก็ได้มีการประยุกต์เอาพลังงานน้ำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนเรือขึ้นและลงจากเขา โดยอาศัยรางรถไฟที่ลาดเอียง (Inclined Plane Railroad: Funicular) โดยตัวอย่างของการประยุกต์ใช้แบบนี้ อยู่ที่คลอง Tyrone ในไอร์แลนด์เหนือ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการประยุกต์ใช้พลังงานน้ำในยุคแรกนั้นเป็นการส่งต่อพลังงาน โดยตรง (Direct Mechanical Power Transmission) ทำให้การใช้พลังงานน้ำในยุคนั้นต้องอยู่ใกล้ แหล่งพลังงาน เช่น น้ำตก เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบัน พลังงานน้ำได้ถูกใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้า ทำให้สามารถส่งต่อพลังงานไปใช้ในที่ที่ห่างจากแหล่งน้ำได้ พลังงานน้ำเกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ให้ความร้อนแก่น้ำและทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำลอยตัวสูงขึ้น มวลน้ำที่อยู่สูงขึ้นไปจากจุดเดิม (พลังงานศักย์) เมื่อมวลไอน้ำกระทบความเย็นก็จะเปลี่ยนเป็นของเหลวอีกครั้ง และตกลงมาเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (พลังงานจลน์) การนำเอาพลังงานน้ำมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยการเปลี่ยน พลังงานจลน์ของน้ำที่ไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำให้เป็นกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนนี้คือ กังหันน้ำ (Turbines) น้ำที่มีความเร็วสูงจะผ่านเข้าท่อแล้วถ่ายทอดพลังงานจลน์เข้าสู่กังหันน้ำ ซึ่งจะไปหมุนขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกทอดหนึ่ง ในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำที่รู้จักกัน โดยทั่วไปคือ พลังงานน้ำตก พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น เป็นต้น

2. วัฏจักรของน้ำ (Water Cycle)

วัฏจักรของน้ำ คือ การเกิดและการหมุนเวียนของน้ำที่อยู่ในโลกนั่นเอง การหมุนเวียนของน้ำเป็นวัฏจักรอาจเริ่มนับได้จากมหาสมุทร เมื่อน้ำระเหยจากมหาสมุทรไปสู่บรรยากาศเป็นไอน้ำแล้ว ความแปรปรวนของลมฟ้าอากาศจะทำให้เกิดฝนตกลงสู่ผิวโลกรวมในทะเลบนผิวดิน น้ำฝนที่ตกบนดินก็จะเกิดการซึมลงดินซึมลงดินเสียเป็นส่วนใหญ่ และปัจจัยอีกหลายอย่าง เช่น การระเหยของน้ำที่ขังในที่ลุ่ม น้ำที่พืชดูดไปใช้ ส่วนที่เหลือก็จะไหลเป็นน้ำท่าและลงแม่น้ำลำธาร ออกสู่ทะเล ส่วนที่ซึมลงดินนั้นก็ค่อยๆ ซึมออกสู่ม่าน้ำลำธาร และไหลออกสู่ทะเลเช่นกัน น้ำจะระเหยกลายเป็นไอสู่ชั้นบรรยากาศ วัฏจักรของน้ำจึงไม่มีเริ่มต้นไม่มีที่สิ้นสุดหมุนเวียนอยู่เช่นนี้ตลอดเวลา ขั้นตอนต่างๆ ของวัฏจักรของน้ำได้ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วัฏจักรของน้ำและการประยุกต์ใช้พลังงานจากน้ำ

ที่มา: Ristinen and Kraushaar (1999)

3. กังหันน้ำ (Water Turbine)

กังหันน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาจากวงล้อที่เดิมที่ใช้ในการท่อน้ำและการโม่แป้ง ซึ่งต่อมาวิศวกรชาวฝรั่งเศสได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนากังหันน้ำให้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานน้ำเป็นพลังงานกล ซึ่งนับเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการพัฒนากังหันน้ำต่อไป กังหันน้ำเป็น

ส่วนประกอบของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ เพราะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานกล โดยที่ใบพัดกังหันน้ำเกิดการหมุนส่งให้แกนเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้หมุนตามแกนเพลลา ทำให้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ กังหันน้ำแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

3.1 กังหันน้ำประเภทหัวฉีด (Impulse Turbine)

กังหันน้ำประเภทหัวฉีด หรือกังหันน้ำแบบแรงกระแทกกังหันน้ำมักจะใช้กับเขื่อนหรืออ่างเก็บน้ำที่มีความต่างของระดับน้ำมาก เพราะจะอาศัยแรงกระแทกของน้ำที่ไหลมาจากท่อส่งน้ำที่ได้จากเขื่อน ซึ่งน้ำที่ตามท่อมาจากตัวเขื่อนนั้น ขนาดของท่อจะถูกลดขนาดก่อนที่จะมาถึงกังหันน้ำทำให้เกิดความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำพุ่งมากระแทกเข้ากับใบพัดของกังหันน้ำจะทำให้กังหันน้ำหมุน และการควบคุมการหมุนของกังหันน้ำสามารถทำได้โดยปรับขนาดของท่อที่ฉีดน้ำที่มากกระทบกังหันน้ำ กังหันประเภทนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

3.1.1 กังหันน้ำเบงกี (Banki Turbine) กังหันน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำต่ำ (Low Head) และต้องการกำลังการผลิตค่อนข้างน้อยดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างของกังหันน้ำเบงกี

ที่มา: Total Alternative Power (2008)

3.1.2 กังหันน้ำเพลตัน (Pelton Turbine) กังหันน้ำชนิดนี้ได้รับการพัฒนาโดย เลสเตอร์ เพลตัน ถูกออกแบบโดยใช้ถ้วยรับน้ำซึ่งติดกับวงล้อกังหันแบบถ้วย ซึ่งสามารถใช้กับ ลำน้ำที่ผ่านหัวฉีดมากกว่า 1 ช่อง ซึ่งจำนวนช่องที่ฉีดน้ำจะมีผลต่อกำลังที่เพิ่มขึ้นของกังหันซึ่งที่ไม่ได้เปลี่ยนขนาดของกังหันน้ำ กังหันน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งน้ำที่มีความต่างของระดับน้ำมาก ประสิทธิภาพของกังหันน้ำที่ดีที่สุดเมื่อความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว การหมุนของวงล้อเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วการไหลของลำน้ำที่ฉีดสู่กังหันน้ำ (Boyle, 1996) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างของกังหันน้ำเพลตัน

ที่มา: Total Alternative Power (2008)

3.1.3 กังหันน้ำเทอร์โก (Turgo Turbine) เป็นกังหันน้ำที่ถูกพัฒนาขึ้นจากกังหันน้ำแบบเพลตัน โดยภายในตัวกังหันน้ำจะมีถ้วยรับน้ำแบบเดี่ยวและต้นแทนถ้วยรับน้ำแบบคู่ของกังหันเพลตัน ซึ่งกังหันประเภทนี้เหมาะสำหรับแหล่งน้ำที่มีความต่างของระดับน้ำปานกลาง เพราะสามารถใช้กับลำน้ำที่ผ่านเข้ามาทางหัวฉีดที่ความเร็วไม่มากนัก และความสามารถในการรับปริมาณน้ำได้มากกว่ากังหันเพลตัน ประสิทธิภาพของกังหันน้ำเทอร์โกจะเป็นกรณีเดียวกับกังหันเพลตัน (Boyle, 1996) ดังแสดงในภาพที่ 4



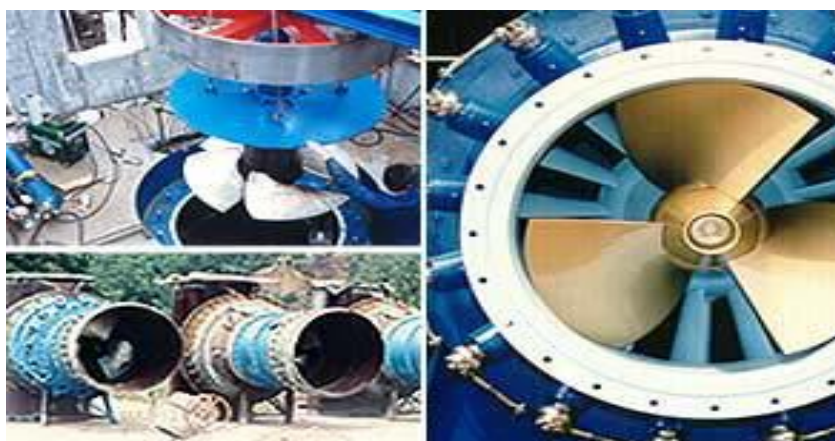
ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่างกังหันน้ำเทอร์โบ

ที่มา: Kansas wind power (2009)

3.2 กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยา (Reaction Turbine)

กังหันน้ำประเภทแรงปฏิกิริยา (Reaction Turbine) เป็นกังหันน้ำที่ต้องอาศัยแรงดันของน้ำ ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของระดับน้ำที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังของกังหันน้ำมาทำให้ใบพัดของกังหันเกิดการหมุน น้ำที่เข้าไปในตัวกังหันจะแทรกเข้าไปในช่องระหว่างใบพัดเต็มทุกช่องพร้อมกันทำให้ตัวกังหันน้ำทั้งหมดจะจมอยู่ในน้ำ กังหันน้ำประเภทนี้เหมาะสำหรับการใช้กับแหล่งน้ำที่มีหัวน้ำต่ำถึงปานกลาง โดยทั่วไปที่นิยมใช้จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

3.2.1 กังหันน้ำฟรานซิส (Francis Turbine) กังหันน้ำชนิดนี้เป็นกังหันน้ำที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพราะสามารถใช้กับแหล่งน้ำที่มีความต่างระดับของน้ำตั้งแต่ 2 เมตรขึ้นไป หลักการทำงานของกังหันน้ำชนิดนี้คือ น้ำจะถูกส่งเข้ามาจากท่อส่งน้ำไหลมาสู่กันหอยที่ประกอบอยู่รอบๆ กังหันน้ำ ท่อกันหอยจะมีขนาดของพื้นที่หน้าตัดเล็กลงตามความยาวของท่อ เพื่อให้แรงดันและความเร็วเพิ่มขึ้น น้ำที่ไหลในท่อกันหอยจะแทรกตัวผ่านลึนนำน้ำเข้าไปสู่ตัวกังหันน้ำ ทำให้วงล้อเกิดการหมุน ลึนนำน้ำเข้าสู่ใบพัดสามารถปรับเปลี่ยนมุมที่เปิดได้ตามต้องการ น้ำถูกถ่ายพลังงานจลน์ให้กับใบพัดกังหันน้ำและไหลลงสู่ท่อรับน้ำที่อยู่ด้านล่างต่อไป กังหันน้ำชนิดนี้มีแบบแกนตั้งและแกนนอน ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างกังหันน้ำฟรานซิส

ที่มา: Total Alternative Power (2008)

3.2.2 กังหันน้ำคาปลาน (Kaplan turbine) เป็นกังหันน้ำที่มีลักษณะเหมือนใบพัด ดังแสดงในภาพที่ 6 เหมาะกับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของหัวน้ำต่ำตั้งแต่ 1 ถึง 70 เมตร (วัฒนาถาวร, 2543) และมีหลักการทำงานโดยน้ำไหลผ่านใบพัดในทิศทางเดียวกับแกนของกังหันน้ำ โดยใบพัดของกังหันน้ำคาปลานสามารถปรับมุมเพื่อรับแรงอัดหรือแรงเฉิดของน้ำโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมความเร็วในการหมุนของกังหันน้ำได้



ภาพที่ 6 แสดงตัวอย่างกังหันน้ำคาปลาน

ที่มา: Total Alternative Power (2008)

3.2.3 กังหันน้ำเดเรียซ (Deriaz Turbine) กังหันน้ำชนิดนี้จะใช้แรงดันน้ำที่เกิดจากการไหลของน้ำในทิศทางทแยงมุมกับแกนของกังหันน้ำดังแสดงในภาพที่ 7 และการประยุกต์ใช้จะเหมาะกับแหล่งน้ำที่มีระดับความสูงของหัวน้ำสูงๆ เพราะต้องใช้แรงดันน้ำที่มีแรงดันสูง ลักษณะของกังหันน้ำแบบเดเรียซ



ภาพที่ 7 แสดงตัวอย่างกังหันน้ำเดเรียซ

ที่มา: The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living (2009)

4. ทฤษฎีเกี่ยวกับการคำนวณ

4.1 กำลังและพลังงานของน้ำ

การประยุกต์ใช้พลังงานจากน้ำที่อยู่ในแหล่งกักเก็บที่อยู่สูงอย่างเช่น น้ำตก หรือเขื่อน ซึ่งน้ำสะสมพลังงานอยู่ในรูปของพลังงานศักย์นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$E_p = mg\Delta H \quad (1)$$

เมื่อ E_p = พลังงานศักย์ของน้ำ (J)
 m = มวลของน้ำ (kg)

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (ค่าคงที่ $9.8 \text{ m}^2 / \text{s}$)

ΔH = ความสูงในแนวดิ่งของแหล่งน้ำเหนือระดับอ้างอิง (m)

จากสมการที่ (1) ถ้าเปลี่ยนค่าพลังงานให้อยู่ในรูปของกำลัง หรือค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะได้ว่ากำลังของน้ำขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีมวล 1,000 กิโลกรัม จะมีค่าเท่ากับ

$$P = \eta \rho Q g H \quad (2)$$

เมื่อ P = กำลัง (watt)
 ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)
 Q = อัตราการไหลของน้ำ (m^3 / s)
 η = ประสิทธิภาพกังหัน

$$E_p = E_k \quad (3)$$

$$mgH = \frac{1}{2} mv^2 \quad (4)$$

นั่นคือ ความเร็วของน้ำหาค่าได้จาก

$$E_p = E_k \quad (5)$$

พิจารณาการไหลของน้ำที่พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัด A ด้วยความเร็ว V จะได้ปริมาตรของการไหลของน้ำ

$$Q = AV \quad (6)$$

4.2 ทฤษฎีทางด้านกลศาสตร์ของไหล

ถ้าให้ ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)

A = พื้นที่หน้าตัดของใบพัด (m^2)

V_1 = อัตราเร็วของกระแส น้ำ (m / s)

V_2 = อัตราเร็วของใบพัด (m / s)

ดังนั้น มวลของน้ำที่ไหลผ่านใบพัดในหนึ่งวินาที ได้

$$m = \rho AV_1 \quad ; \text{ (kg/s)} \quad (7)$$

ในกรณีที่ V_1 และ m มีค่าคงที่ ดังนั้น กำลังงานของกระแสน้ำ P_1 ที่มีอัตราเร็ว V_1 คือ

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{1}{2} m V_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad ; \text{ (watt)} \end{aligned} \quad (8)$$

กำลังงานของกระแสน้ำให้แก่กังหันน้ำ P_{in} เมื่อมีอัตราเร็วใบพัด V_2 คือ

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{2} m V_1^2 - \frac{1}{2} m V_2^2 \quad ; \text{ (watt)} \\ &= \frac{1}{2} \rho A V_1 (V_1^2 - V_2^2) \\ &= \frac{1}{2} \rho A V_1 (V_1^2 - V_2^2) \quad ; \text{ (watt)} \end{aligned} \quad (9)$$

อัตราการไหลของน้ำ $Q = A V_1 \quad ; \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (10)$

$$P_{in} = \rho Q (V_1^2 - V_2^2) \quad ; \text{ (watt)} \quad (11)$$

4.3 การทำงานของกังหัน

4.3.1 พลังงานของน้ำเข้าสู่กังหัน

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (12)$$

เมื่อ	P	=	พลังงานที่ได้จากกระแสน้ำ (watt)
	ρ	=	หน่วยน้ำหนักของน้ำ (kg/m^3)
	A	=	พื้นที่ที่สัมผัสแรง (m^2)
	V	=	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ (m/s)

4.3.2 พลังของกังหันจากการดิ่งทดสอบ

$$P_0 = 2\pi nrF \quad (13)$$

$$P_0 = Frn \times 2 \times \frac{22}{7} \times \frac{9.81}{60} \quad (14)$$

$$P_0 = 1.0277Frn = FrnP_0 \quad (15)$$

เมื่อ	P_0	=	พลังงานที่ได้วัดได้ (watt)
	F	=	ผลต่างของน้ำหนักที่ใช้ดิ่งมู่เต้ (newton)
	n	=	จำนวนรอบของการหมุน (rpm)
	r	=	รัศมีมู่เต้ (m)

ในกรณีที่ค่าแรงหมุน $T = F \times r$ สามารถอ่านได้โดยตรงและมีหน่วยเป็นนิวตัน

- เมตร

จะได้สมการ

$$P_0 = T(N \cdot m) \times 2\pi n \times \frac{1}{60} = 2\pi nT \quad (16)$$

$$P_0 = 0.10476Tn \quad (17)$$

4.3.3 ประสิทธิภาพของกังหัน

จากสมการที่(12) และ (13)

$$C_p = \frac{P_0}{P} \quad (18)$$

C_p = ประสิทธิภาพของกังหัน

เครื่องกังหันแต่ละตัวจะออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับความเร็วกระแสน้ำและจำนวนรอบการหมุน เมื่อความเร็วกระแสน้ำหรือจำนวนรอบการหมุน เปลี่ยนแปลงไป C_p จะลดลง ในกรณีที่เครื่องกังหันใช้กังหันใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องคิดรวม

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปด้วย ซึ่งพลังจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (P_e) สามารถวัดได้จาก Wattmeter และประสิทธิภาพโดยรวม ($C_{p\text{-overall}}$) จะได้ดังสมการ

$$C_{p\text{-overall}} = \frac{P_e}{p} \quad (19)$$

$C_{p\text{-overall}}$ = ประสิทธิภาพรวม

P_e = พลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (watt)

4.4 แรงที่กระทำกับวัตถุในของไหล

วัตถุที่อยู่ในของไหลทั้งก่อนนั้นจะมีแรงที่เกิดจากความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุกับของไหลมากระทำสองแรงด้วยกันแรงดังกล่าวคือแรงยกตัวและแรงต้านการเคลื่อนที่แรงยกตัวจะอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ส่วนแรงต้านจะขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ในวิชากลศาสตร์ของไหลนั้นความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดจากวัตถุเคลื่อนที่ผ่านของไหลที่อยู่นิ่งกับที่กับความเร็วสัมพัทธ์ที่เกิดจากการที่ของไหลไหลผ่านวัตถุที่อยู่นิ่งกับที่นั้นไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถศึกษาพฤติกรรมของเครื่องบินที่บินอยู่ในอากาศได้จากหุ่นจำลองของเครื่องบินที่ทดสอบในอุโมงค์ลมและศึกษาพฤติกรรมของตอร์ปิโดที่เคลื่อนที่ไปในน้ำได้จากหุ่นจำลองของตอร์ปิโดที่ทดสอบในอุโมงค์น้ำ

ในช่วงแรกนี้จะพิจารณาถึงแรงต้านเนื่องจากไม่ต้องคำนึงถึงการเคลื่อนไหวของคลื่นที่อยู่บนผิวน้ำดังนั้นจึงไม่มีแรงดึงดูดของโลกเข้ามาเกี่ยวข้องกับแรงที่มาเกี่ยวข้องจึงมีแต่แรงที่เนื่องจากความเฉื่อยและแรงที่เนื่องจากความหนืดเท่านั้นแรงต้านที่กระทำกับวัตถุที่อยู่ในของไหลนี้แบ่งออกได้เป็นสองแรงย่อยด้วยกันคือ

- แรงต้าน F_p จากความดัน
- แรงต้าน F_f จากความเสียดทานหรือแรงต้านที่ผิววัตถุ

แรงต้านจากความดันนี้จะมีค่าเท่ากับผลบวกของแรงย่อยจากความดันที่อยู่ในทิศทางของการเคลื่อนที่หรือจะอยู่ในรูปของความดันย่อยที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของความดันตรงจุดที่มีความเร็วเป็นศูนย์ (stagnation pressure) กระทบกับพื้นที่บนภาพฉายที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่คูณกับสัมประสิทธิ์ C_p โดยค่า C_p นี้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุและสามารถหาได้จากการทดสอบ ดังนั้นเมื่อเขียนอยู่ในรูปของสมการคณิตศาสตร์แล้วก็จะได้ว่า

$$F_p = C_p \rho A \frac{V^2}{2} \quad (20)$$

เมื่อ

- F_p = แรงต้านที่เกิดจากความดัน (newton)
- C_p = สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากความเสียดทาน
- ρ = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (kg/m^3)
- V = ความเร็วการไหล (m/s)
- A = พื้นที่ผิวสัมผัสของไหล (m^2)

สำหรับแรงต้านที่เกิดจากความเสียดทานนั้นจะมีค่าเท่ากับผลบวกของความเค้นเฉือนตามผิว (boundary) ของวัตถุในทิศทางการเคลื่อนที่เพื่อความสะดวกจึงมักจะให้แรงต้านที่เกิดจากความเสียดทานนี้มีค่าอยู่ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (20) นั่นก็คือให้มีค่าเป็น

$$F_d = C_d \rho \frac{V^2}{2} BL \quad (21)$$

เมื่อ

- F_d = แรงต้านที่เกิดจากความเสียดทาน (newton)
- C_d = สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากความเสียดทาน
- ρ = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (kg/m^3)
- L = ความยาวของผิวที่ขนานกับทิศทางการไหล (m)
- B = ความกว้างในแนวตั้งฉากทิศทางการเคลื่อนที่ถ้าเป็นวัตถุที่มีรูปร่างไม่ใช่ทรงเรขาคณิตแล้วก็ให้หารพื้นที่ผิวทั้งหมดด้วย L (m)

ในกรณีของแผ่นวัตถุที่อยู่ในของไหลขึ้นนั้นก็ต้องคูณค่าทางด้านขวาของสมการ (21) ด้วย 2 ทั้งนี้เพราะค่า F_r ในสมการ (20) นั้นเป็นแรงดันที่เกิดจากความเสียดทานของผิวเพียงด้านเดียว

4.5 กำลังไฟฟ้า (Electrical Power)

เมื่อกังหันน้ำมีการหมุน จะมีชุดส่งถ่ายกำลังไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เกิดการหมุน ทำให้ได้พลังงานออกมา สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกๆ ไปนั้น เมื่อใช้งานกำลังๆไฟฟ้าที่ได้นอกจากจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ถ้ามีกระแสไฟฟ้า I แอมแปร์และความต่างศักย์ไฟฟ้า V โวลต์ จะได้กำลังไฟฟ้า

$$P = IV \quad ; \text{ (watt)} \quad (22)$$

ดังนั้นค่าพลังงานไฟฟ้าที่มากที่สุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้ออกมาที่ความเร็วรอบใดๆ

$$P_{\text{out}} = I_{\text{op}} V_{\text{op}} \quad ; \text{ (watt)} \quad (23)$$

โดยที่

I_{op} = กระแสที่ให้พลังงานไฟฟ้าออกมามากที่สุด (I optimum)

V_{op} = ความต่างศักย์ที่ให้พลังงานไฟฟ้าออกมามากที่สุด (V optimum)

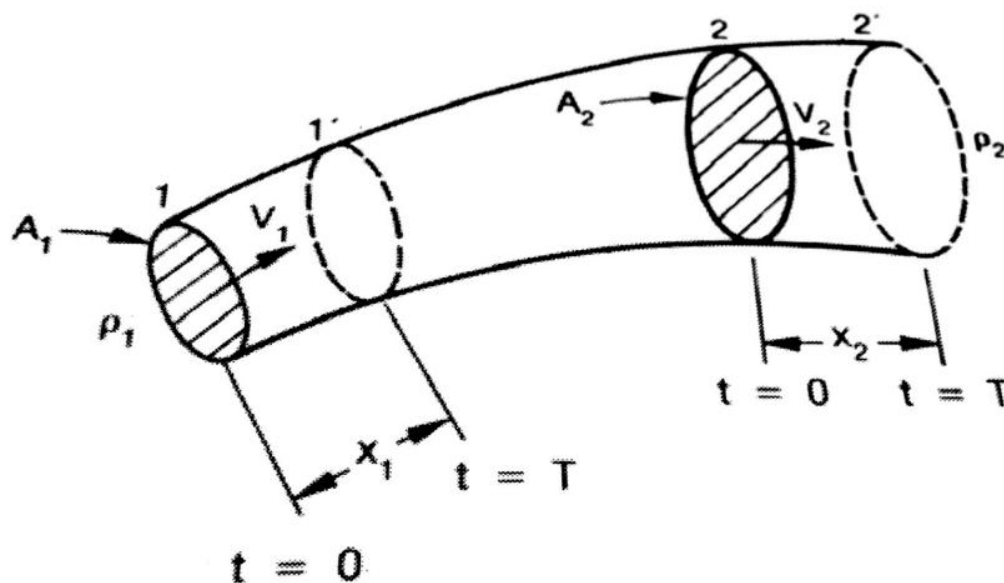
ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบ (η) คือพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับพลังงานที่ใส่เข้าไป ซึ่งสามารถหาได้ดังแสดงในสมการที่ (24) และ (25)

$$\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} \quad (24)$$

$$= I_{\text{op}} V_{\text{op}} / \left[\frac{1}{2} \rho Q (V_1^2 - V_2^2) \right] \quad (25)$$

4.6 สมการพื้นฐานสำหรับการไหล

4.6.1 สมการการไหลต่อเนื่อง (continuity equation) เป็นสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความเร็วและพื้นที่หน้าตัดของการไหล การวิเคราะห์สมการการไหลแบบต่อเนื่องจะใช้หลักการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) หลักการคือ มวลไม่มีการสูญหายหรือเพิ่มขึ้น แต่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้



ภาพที่ 8 การไหลแบบต่อเนื่อง

ที่มา: กิริติ (2552)

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 8 เมื่อให้

A_1, A_2 = พื้นที่หน้าตัดการไหลหน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2

V_1, V_2 = ความเร็วการไหลของของไหลที่หน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2

ρ_1, ρ_2 = ความหนาแน่นของของไหลที่หน้าตัดที่ 1 และหน้าตัดที่ 2

ที่เวลา $t=0$ ของไหลอยู่ที่ตำแหน่ง 1-2 มีมวล (1-2) และที่เวลา $t=T$ ของไหลเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่ง 1'-2' มีมวล (1'-2')

หลักอนุรักษ์มวล (conservation of mass) กล่าวว่ามวลของของไหลไม่มีการสูญหายหรือเพิ่มขึ้น

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น} \quad \text{มวลของไหล (1-2)} &= \text{มวลของไหล (1' - 2')} \\
 m_1 &= m_2 \\
 \rho_1 V_1 &= \rho_2 V_2 \\
 \rho_1 A_1 x_1 &= \rho_2 A_2 x_2 \quad (26)
 \end{aligned}$$

หาสมการที่ 26 ด้วยเวลา T ทั้ง 2 ข้าง

$$\begin{aligned}
 \rho_1 A_1 \frac{x_1}{T} &= \rho_2 A_2 \frac{x_2}{T} \\
 \rho_1 A_1 V_1 &= \rho_2 A_2 V_2 \quad (27)
 \end{aligned}$$

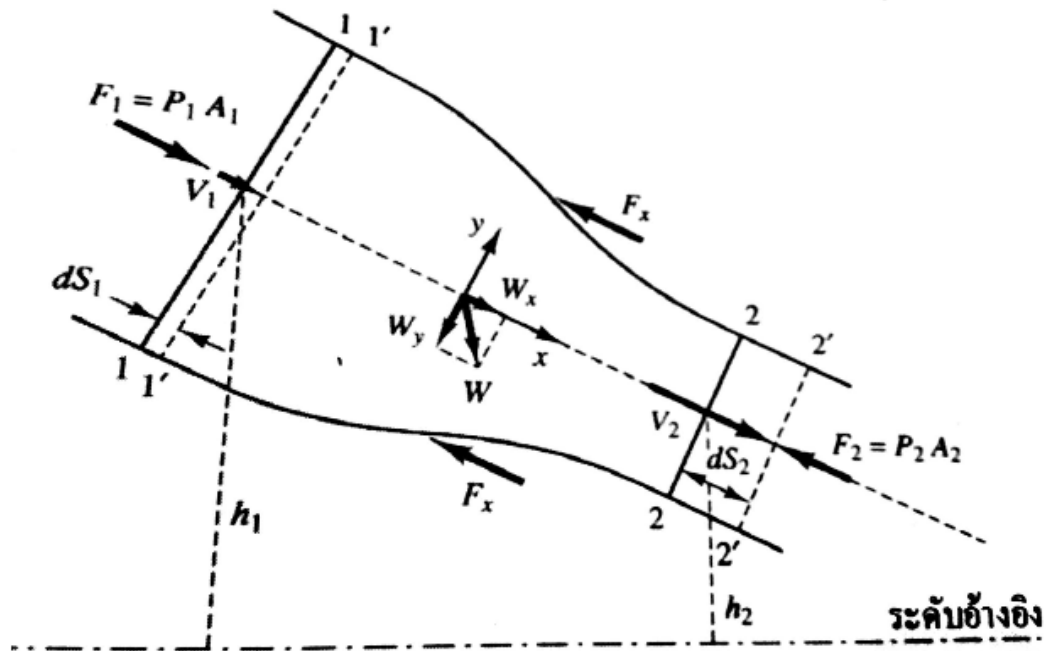
จากสมการที่ 27 คือสมการการไหลต่อเนื่องที่มีความหนาแน่นของของไหลทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากัน เช่น อุณหภูมิทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากัน จะทำให้ความหนาแน่นไม่เท่ากัน หรือการไหลของน้ำในแม่น้ำออกสู่ทะเล ความหนาแน่นของน้ำในแม่น้ำและความหนาแน่นของน้ำในทะเลจะไม่เท่ากัน

การไหลแบบไม่อัดตัว และมีอุณหภูมิคงที่ ทำให้มีความหนาแน่นเท่ากัน จากสมการ 27 จะได้สมการการไหลใหม่คือ

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad (28)$$

4.6.2 สมการโมเมนตัม (momentum equation) คือปริมาณที่บอกสภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งพยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของทิศทางของความเร็ว เป็นปริมาณเวกเตอร์ มีทิศทางตามทิศทางและความเร็ว โมเมนตัมเกิดขึ้นเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ โมเมนตัมเชิงเส้น และ โมเมนตัมเชิงมุม เป็นปริมาณเวกเตอร์มีทิศทางเดียวกับความเร็วของวัตถุ หาได้จากผลคูณระหว่างมวลกับความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุ

พิจารณาการไหลของของไหลในปริมาตรควบคุม (control volume) ที่เวลาเริ่มต้นของการไหลอยู่ระหว่างหน้าตัด 1-1 กับ 2-2 เมื่อเวลาผ่านไป dt ของไหลเคลื่อนที่ไปอยู่ระหว่างหน้าตัด 1'-1' กับ 2'-2'



ภาพที่ 9 การหาสมการโมเมนตัม

ที่มา: กิริติ (2552)

กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน เมื่อมวลของไหลเคลื่อนที่ในปริมาตรควบคุมจะมี

$$\begin{aligned}
 \sum \vec{F} &= m\vec{a} \\
 &= m \frac{d\vec{V}}{dt} \\
 &= \frac{m\vec{V}_2 - m\vec{V}_1}{\Delta t} \\
 &= \frac{m(\vec{V}_2 - \vec{V}_1)}{\Delta t} \quad (29)
 \end{aligned}$$

แรง \vec{F} และความเร็ว \vec{V} เป็นปริมาณเวกเตอร์ เนื่องจาก

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{\forall} \\ \text{หรือ} \quad m &= \rho \forall \end{aligned} \quad (30)$$

เมื่อแทนค่า m จากสมการที่ 30 ในสมการที่ 29 จะได้

$$\Sigma \vec{F} = \frac{\rho \forall (\vec{V}_2 - \vec{V}_1)}{\Delta t} \quad (31)$$

เมื่อ $\frac{\forall}{\Delta t}$ คือ ปริมาตรของไหลที่มีการไหลใน 1 หน่วยเวลา หมายถึงอัตราการไหล หรือ Q

แทนค่า $\frac{\forall}{\Delta t} = Q$ ในสมการที่ 31

$$\Sigma \vec{F} = \rho Q (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) \quad (32)$$

$$\text{แนวแกน } x \quad \Sigma \vec{F}_x = \rho Q (\vec{V}_{2x} - \vec{V}_{1x}) \quad (33)$$

$$\text{แนวแกน } y \quad \Sigma \vec{F}_y = \rho Q (\vec{V}_{2y} - \vec{V}_{1y}) \quad (34)$$

$$\text{แนวแกน } z \quad \Sigma \vec{F}_z = \rho Q (\vec{V}_{2z} - \vec{V}_{1z}) \quad (35)$$

แรงภายนอก (external forces) ที่กระทำกับปริมาตรควบคุมตามแกน x ได้จาก

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= F_1 - F_2 - F_x + W_x \\ \Sigma F_x &= P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_x + W_x \end{aligned} \quad (36)$$

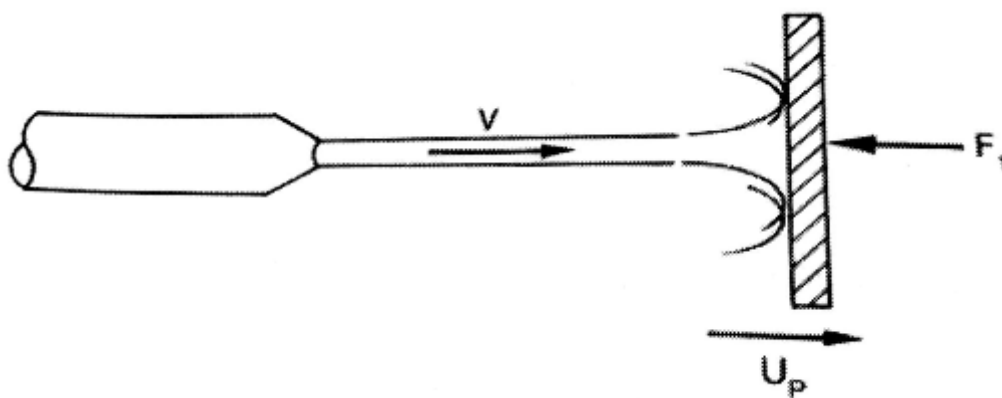
- โดยที่ F_1, F_2 คือ แรงดันของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2
 P_1, P_2 คือ ความดันของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2
 A_1, A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2
 V_1, V_2 คือ ความเร็วของของไหลที่หน้าตัด 1 และหน้าตัด 2

F_x คือ แรงต้านการไหล
 W_x คือ น้ำหนักของไหลตามแนวแกน x

4.7 การประยุกต์ใช้สมการโมเมนตัม

4.7.1 แรงกระทำต่อแผ่นผิวเรียบที่เคลื่อนที่มี 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 แผ่นผิวเรียบที่เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับการไหลดังภาพที่ 11



ภาพที่ 10 ของไหลไหลกระทบแผ่นผิวที่เคลื่อนที่ทิศทางเดียวกับการไหล

ที่มา: กิริติ (2552)

เมื่อแผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U_p ในทิศทางเดียวกับการไหลที่มีความเร็ว V ดังนั้น $U_1 = V$ และ $U_2 = U_p$

สมการโมเมนตัม

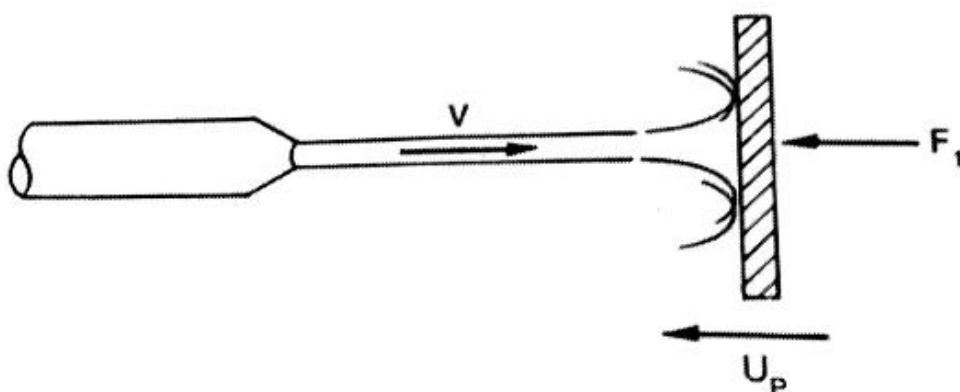
$$\Sigma F_x = \rho Q(\bar{U}_2 - \bar{U}_1)$$

$$-F_1 = \rho Q(U_p - V)$$

$$F_1 = \rho Q(V - U_p) \quad (39)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลที่กระทบแผ่นผิวเรียบ หาได้จาก A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและแผ่นผิวเรียบ $V - U_p$

กรณีที่ 2 แผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่สวนทางกับของไหลดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ของไหลไหลกระทบแผ่นผิวที่เคลื่อนที่ทิศทางตรงข้ามกับการไหล

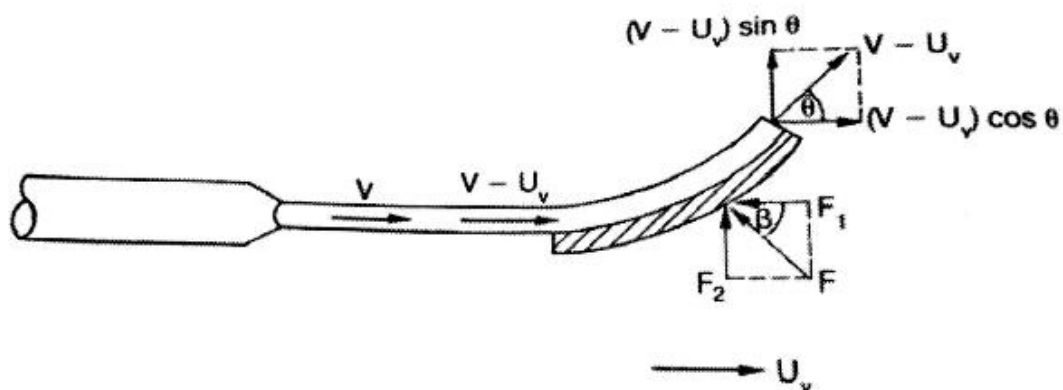
ที่มา: กิริติ (2552)

เมื่อแผ่นผิวเรียบเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U_p ในทิศทางเดียวกับการไหลที่มีความเร็ว V ดังนั้น $U_1 = V$ และ $U_2 = U_p$

$$\begin{aligned} \text{สมการโมเมนตัม} \quad \Sigma F_x &= \rho Q(\bar{U}_2 - \bar{U}_1) \\ -F_1 &= \rho Q(-U_p - V) \\ F_1 &= \rho Q(V + U_p) \end{aligned} \quad (40)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลที่กระทบแผ่นผิวเรียบ หาได้จาก A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล กับความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและแผ่นผิวเรียบ $V + U_p$

4.7.2 แรงกระทำต่อแผ่นผิวโค้งที่กำลังเคลื่อนที่ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ของไหลไหลกระทบแผ่นผิวโค้งที่กำลังเคลื่อนที่

ที่มา: กิริติ (2552)

เมื่อของไหลมีความเร็ว V กระทบแผ่นผิวโค้งที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U_p ในทิศทางเดียวกับการไหล ทำให้เกิดความเร็วมัธยสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของของไหล V และความเร็วของแผ่นผิวโค้ง $U_v = V - U_p$ ซึ่งมีขนาดของแรง F และมุม β สามารถหาขนาดของแรง F_1, F_2 ดังนี้

การหาแรงในแนวแกน x (F_1)

$$\Sigma F_x = \rho Q(\bar{U}_2 - \bar{U}_1)$$

เมื่อความเร็ว $U_2 = (V - U_v) \cos \theta$ และ $U_1 = (V - U_v)$

$$-F_1 = \rho Q[(V - U_v) \cos \theta - (V - U_v)]$$

$$F_1 = \rho Q(V - U_v)(1 - \cos \theta) \quad (43)$$

การหาแรงในแนวแกน y (F_2)

$$\Sigma F_y = \rho Q(V_2 - V_1)$$

เมื่อความเร็ว $V_2 = V \sin \theta$ และ $V_1 = 0$

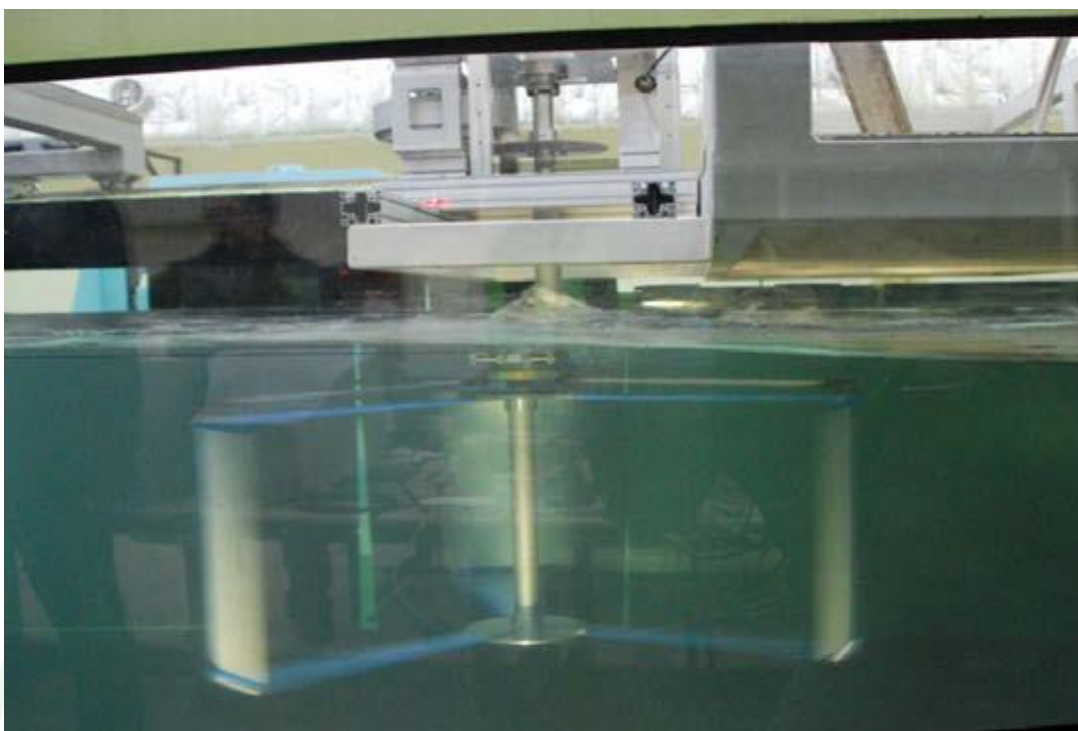
$$\begin{aligned} F_2 &= \rho Q[(V - U_v) \sin \theta - 0] \\ F_2 &= \rho Q(V - U_v) \sin \theta \end{aligned} \quad (44)$$

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นรินทร์ (2532) การออกแบบสร้างและศึกษากังหันน้ำแบบดินตะขาบ พบว่ากังหันน้ำแบบดินตะขาบเป็นกังหันรูปแบบหนึ่ง สามารถนำพลังงานจากกระแสน้ำมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งสามารถใช้ได้ในบริเวณน้ำตื้นและน้ำลึก ประสิทธิภาพที่ได้จะสูงกว่ากังหันแบบอื่น อุปกรณ์ที่ใช้สร้างไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน ประสิทธิภาพเฉลี่ย 21% ที่อัตราการไหลเฉลี่ย 1 เมตรต่อวินาที นำไปเปรียบเทียบกับกังหันน้ำแบบทุ่นลอยของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 11.7% ที่อัตราการไหล 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งกังหันดินตะขาบจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า

Hwang *et al.* (2008) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากังหันน้ำแกนตั้งผลิตไฟฟ้า ใบพัดจะเป็นใบพัดตรง ดังภาพที่ 13 มีการทดสอบด้วยแบบจำลองในห้องปฏิบัติการและได้ทำการวิเคราะห์ทฤษฎี ค่าตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาคือ จำนวนใบพัด ความยาวของแกน ความเร็วการไหล รูปร่างของใบพัด และมุมของใบพัดที่กระทำกับน้ำ ผลที่ได้กังหันสามารถทำงานได้ดีและมีประสิทธิภาพ 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับการคาดการณ์ตามทฤษฎี ซึ่งผลจากการทดลองนั้นมีแรงจลนลาภซึ่งทำให้เสียกำลังที่จะได้จากน้ำ ดังนั้นควรที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันด้วยการควบคุมการหมุนของใบพัด และมุมของใบพัดที่ต่างกัน

Hearn *et al.* (1992) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทดลองการสร้างระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก ซึ่งกังหันน้ำ Francis เป็นตัวทดสอบ ซึ่งจำนวนใบพัดมีจำนวน 11 ใบพัด ขนาดรัศมีกังหันเท่ากับ 0.1 เมตร ผลที่ได้จากการทดสอบคือ กระแสไฟฟ้าที่ได้จะขึ้นอยู่กับความต่างของระดับน้ำด้านเหนือและท้ายน้ำ อัตราการไหลเข้ากังหัน และประสิทธิภาพสูงสุดของกังหัน อัตราการไหลเข้าของน้ำเท่ากับ 55 ลิตรต่อวินาที ที่ความต่างระดับ 23 เมตร ซึ่งปัญหาที่พบในการศึกษาคั้งนี้คือ การประกอบและติดตั้งกังหันน้ำ ทำให้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้น้อย



ภาพที่ 13 Cycloidal Water Turbine

ที่มา: Hwang *et al.*(2008)

เศรษฐา (2554) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพกังหันพลังน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพกังหันน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทานซึ่งออกแบบให้เหมาะสมสำหรับสภาพการไหลของน้ำในคลองชลประทานที่มีความเร็วการไหลช้า โดยกังหันน้ำมีแกนในแนวตั้งมีคุณสมบัติสามารถตั้งใบพัดขึ้นเพื่อรับพลังงานการไหลเมื่ออยู่ในทิศทางการไหลของกระแสน้ำและพับใบลงเมื่อหมุนไปอยู่ในทิศทางทวนกระแสน้ำ กังหันได้ถูกทดสอบในแบบจำลองคลองชลประทานดาดคอนกรีตที่มีความกว้างของคลอง 1.8 เมตร และมีความลึกประมาณ 0.3 เมตรในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของกังหันน้ำที่มีใบพัดรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.3×0.1 เมตร และ 0.3×0.2 เมตร ทดสอบโดยทำการเปลี่ยนจำนวนใบพัดเป็น 4 6 และ 8 ใบตามลำดับ ทดสอบประสิทธิภาพกังหันที่ความเร็วกระแสน้ำ 0.93, 1.10, 1.25 และ 1.79 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่ากังหันที่ประกอบด้วยใบพัดจำนวน 8 ใบ ซึ่งมีขนาด 0.3×0.1 เมตร จะมีประสิทธิภาพมากที่สุด และค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่คำนวณได้ คือ 59 % ได้พลังงาน 17.39 วัตต์ จากพลังงานทั้งหมด 29.30 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 10.6 รอบต่อวินาที เมื่อมีความเร็วการไหล 1.25 เมตรต่อวินาที พลังงานการไหลส่วนใหญ่จะสูญเสียไปกับ

แรงจลลาค แรงเสียดทาน และความร้อน ส่งผลให้กังหันน้ำได้พลังงานออกมาบางส่วน กังหันน้ำชนิดนี้เหมาะสำหรับการไหลที่มีความเร็วต่ำ สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนประเภทพลังงานจากการไหลของกระแสน้ำในคลองชลประทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ยอดชาย และคณะ (2549) ได้ทำการศึกษาการออกแบบชุดกังหันน้ำขนาดเล็กให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ของการไหลกับรูปทรง ทางน้ำเข้า ใบพัด และช่องทางไหลภายในกังหันน้ำ ซึ่งในการออกแบบเริ่มจากการกำหนดทรงเบื้องต้นของช่องทางน้ำไหลภายในใบพัด แล้วจึงออกแบบใบพัด จากนั้นใช้ระเบียบวิธีการคำนวณพลศาสตร์ของไหลช่วยในการจำลอง วิเคราะห์ความเร็ว การกระจายตัวของแรงดัน ประสิทธิภาพเชิงกลศาสตร์ การไหลของกังหันน้ำ ซึ่งได้ใช้แบบจำลองการปั่นป่วนแบบ $k - \epsilon$ ภายใต้เงื่อนไขการทำงานสภาวะจริงของระบบส่งน้ำในโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลมาเปรียบเทียบกับค่าจริง ผลที่ได้คือใบพัดที่ได้ออกแบบเหมาะสมกับสภาวะจริงมากที่สุด

Nilsson *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาการจำลองกังหันน้ำแกนตั้งใต้น้ำในการกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้แม่เหล็กในการสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในการทดลองทำการเปลี่ยนขนาดของกังหันและจำนวนของแม่เหล็กให้สัมพันธ์กับความเร็วของการหมุนและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในความเร็วการไหลของกระแสน้ำต่างๆกัน ผลจากการทดสอบการคำนวณสนามแม่เหล็กแสดงให้เห็นการเปลี่ยนพลังงานไม่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่จำกัด ซึ่งเมื่อออกแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการไหลของกระแสน้ำพบว่า มุมที่แรงกระทำต่อใบพัดอยู่ในช่วง 7.6 -8.1 องศา การสูญเสียทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าประมาณ 0.3 กิโลวัตต์ คิดเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานทั้งหมดที่สร้างได้

อนุรัตน์ (2550) ได้ทำการศึกษา ออกแบบ และได้ทำการสร้างกังหันน้ำผลิตไฟฟ้า ใบพัดกังหันน้ำทำด้วยเหล็กมีลักษณะเป็นใบโค้ง จำนวน 8 ใบพัด ความสูง 0.4 เมตร ความกว้าง 2.4 เมตร ใบพัดที่ได้รับกระแสน้ำจะเปลี่ยนพลังงานกลสู่ชุดเพลลา โซ่ทดรอบ เฟืองทด และสายพาน ซึ่งกังหันจะวางอยู่บนท่อนลอยจำนวน 4 ถึง และต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากการทดสอบได้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 112 วัตต์ ที่ความเร็วการไหล 0.41 เมตรต่อวินาที และจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วกระแสน้ำที่เพิ่มขึ้น

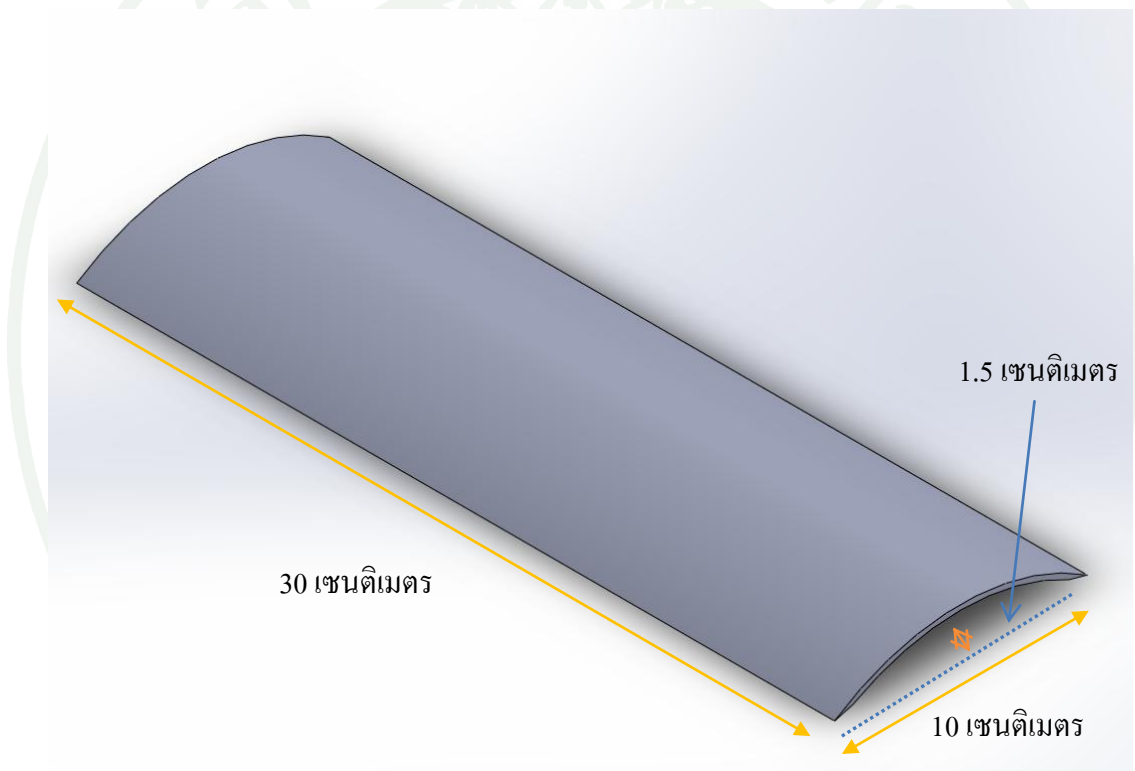
ชัยวัฒน์ (2551) ได้ออกแบบชุดกังหันพลังน้ำต้นแบบที่สอดคล้องกับการบริหารจัดการ ประตุคลองลัดโพธิ์ มีประสิทธิภาพสูง สะดวกต่อการปฏิบัติงานและซ่อมบำรุง มีราคาประหยัด 2 แบบ คือ แบบหมุนตามแนวแกน (Axial Flow) และแบบหมุนขวางการไหล (Cross Flow) โดย ใบพัดต้นแบบที่วิเคราะห์และผลิตขึ้นแบบหมุนตามแนวแกนมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.00 เมตร และ แบบหมุนขวางการไหลมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.00 เมตร ยาว 2.50 เมตร ที่ความเร็วน้ำออกแบบ 2.0 เมตร/วินาที (Design Velocity) จะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 5 kW. ซึ่งชุดกังหันพลังน้ำต้นแบบทั้ง 2 จะประกอบและติดตั้งกับโครงเหล็กที่ปรับขึ้น ลงได้ที่ท้ายประตุคลองลัดโพธิ์ ใช้กังหันพลังน้ำ เป็น ต้น กำลังที่เชื่อมต่อกับเกียร์ทดรอบไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรที่บรรจุอยู่ใน ก่อ่งที่จมน้ำได้ โดยโครงเหล็กจะอยู่ในช่องใส่บานซ่อมบำรุง (Bulkhead) ที่ต่อม่อท้ายประตุคลอง ลัดโพธิ์ เมื่อเดินชุดกังหันน้ำต้นแบบจะได้พลังงานไฟฟ้าเป็นแบบกระแสสลับ แล้วใช้ Rectifier เปลี่ยนเป็นกระแสตรงแล้วเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์แปลงและควบคุมกระแสไฟฟ้า (Inverter & Controller) ซึ่งจะปรับแรงดันและความถี่เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง โดย ได้ทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าไป เมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2551 ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 5.74 kW

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์

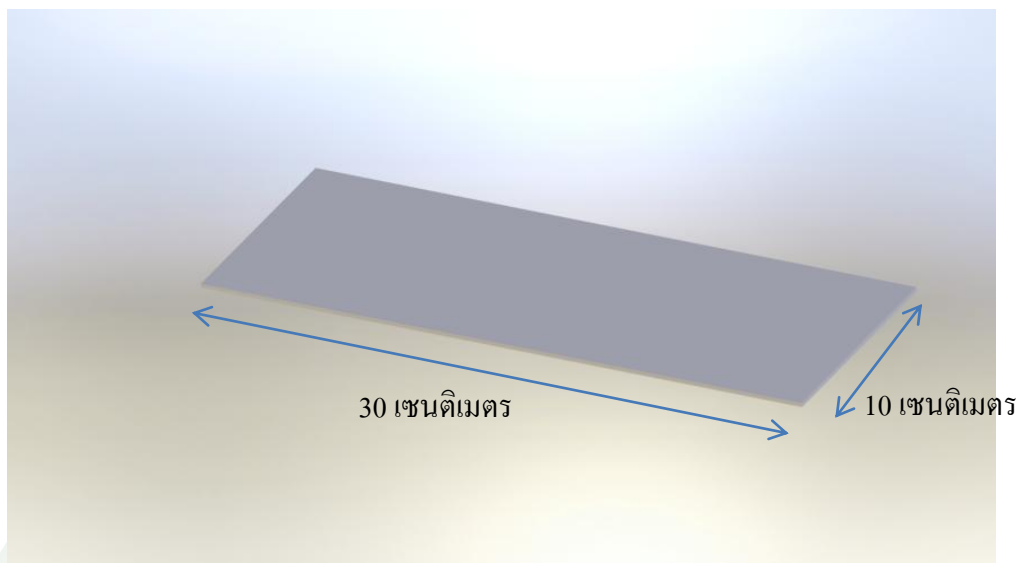
1. อุปกรณ์ที่ใช้ประดิษฐ์ก้นน้ำ

1 ใบพัดโค้งที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์หนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร รัศมีความโค้ง 15 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ใบพัดก้นน้ำแบบโค้งขนาด 30×10 เซนติเมตร

1.1.2 ใบพัดตรงที่ทำจากแผ่นเหล็ก หนา 2 มิลลิเมตร กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ใบบัดกึ่งหั่นแบบตรงขนาด 30×10 เซนติเมตร



ภาพที่ 16 สายพานความยาวประมาณ 80 เซนติเมตร



ภาพที่ 17 พู่เล่ขนาดรัศมี 10 เซนติเมตร

1.2 ชุดประกอบกั้นน้ำ ซึ่งใช้เหล็กเป็นวัสดุในการประกอบ ประกอบด้วย พู่เล่ และเพลาลูกจะทำการติดตั้งกับใบพัดดังภาพที่ 18 และภาพที่ 19



ภาพที่ 18 การทดสอบกั้นน้ำที่ติดตั้งใบพัดโค้งขนาด 30×10×1.5 เซนติเมตร จำนวน 8 ใบ



ภาพที่ 19 การทดสอบก้านที่ติดตั้งใบพัดตรงขนาด $30 \times 10 \times 0.2$ เซนติเมตร จำนวน 8 ใบ

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 2.1 กล้องบันทึกวิดีโอ ใช้สำหรับบันทึกภาพความเร็วสูง
- 2.2 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล สามารถชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 45 กิโลกรัม และจะใช้วิธีการชั่งน้ำหนักโดยการเกี่ยวตะขอดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบตั้ง

2.2 เครื่องวัดความเร็วรอบจะใช้หลักการการจับแสงที่สะท้อนและจับเวลาช่วงที่สะท้อน และคำนวณออกมาเป็นความเร็วรอบ ซึ่งแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขดิจิทัลคงภาพ



ภาพที่ 21 เครื่องวัดความเร็วรอบ

3. สถานที่ที่ใช้ทำการทดสอบ

ในการทดสอบกั้นน้ำนั้นได้ใช้แบบจำลองคลองชลประทาน ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ซึ่งคลองชลประทานที่เป็นแบบจำลองนั้นเป็นคลองตาดคอนกรีต มีความยาว 10 เมตร หน้าตัดคลองเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ท้องคลองมีความกว้าง 1.20 เมตร ปากคลองมีความกว้าง 1.80 เมตร Slope 1:1000 ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 แบบจำลองคลองชลประทาน ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

วิธีการ

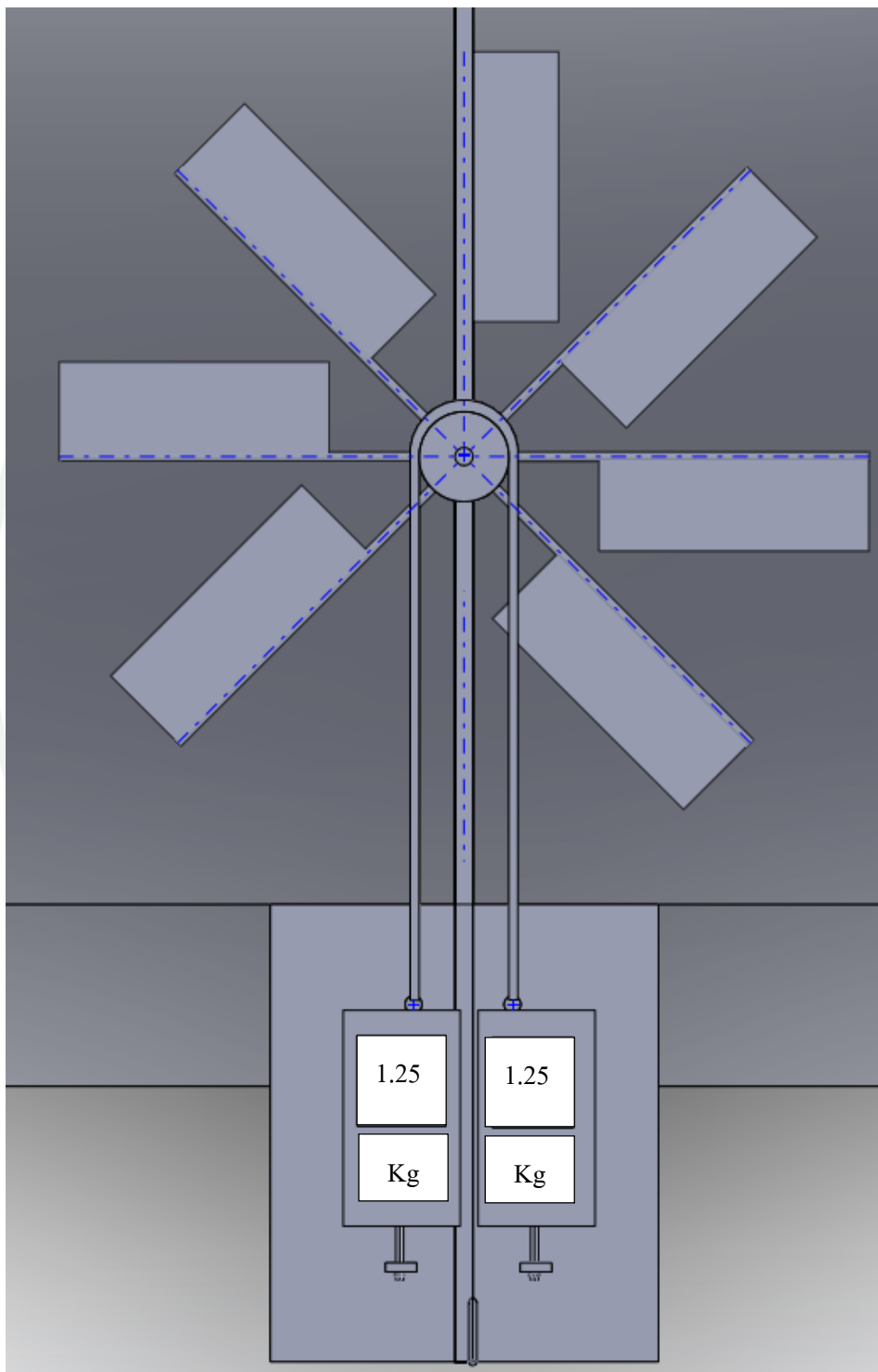
ทดสอบกักหน้ำชนิดใบพัดตรงที่ประกอบด้วย ใบพัดขนาด $30 \times 10 \times 0.2$ เซนติเมตร
โดยการ

1. ติดตั้งกักหน้ำในรางทดสอบ
2. เริ่มทำการปล่อยกระแสหน้ำให้ความเร็วเฉลี่ย 0.34 เมตรต่อวินาทีผ่านกักหน้ำโดย
ยังไม่มีเครื่องตึงต้าง
3. ทำการวัดรอบการหมุนของกักหน้ำและบันทึกค่า
4. ทำการตึงต้างเพื่อเพิ่มค่าน้ำหนักทีละ 0.3 - 0.5 กิโลกรัม และทำซ้ำข้อ 2 และข้อ 3
เพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ จนกว่ากักหน้ำจะหยุดหมุน
5. เปลี่ยนความเร็วเฉลี่ยการไหลเป็น 0.37, 0.44, 0.52, 0.60, 0.67 และ 0.73 เมตรต่อวินาที
ทำซ้ำข้อ 2 ถึง ข้อ 4

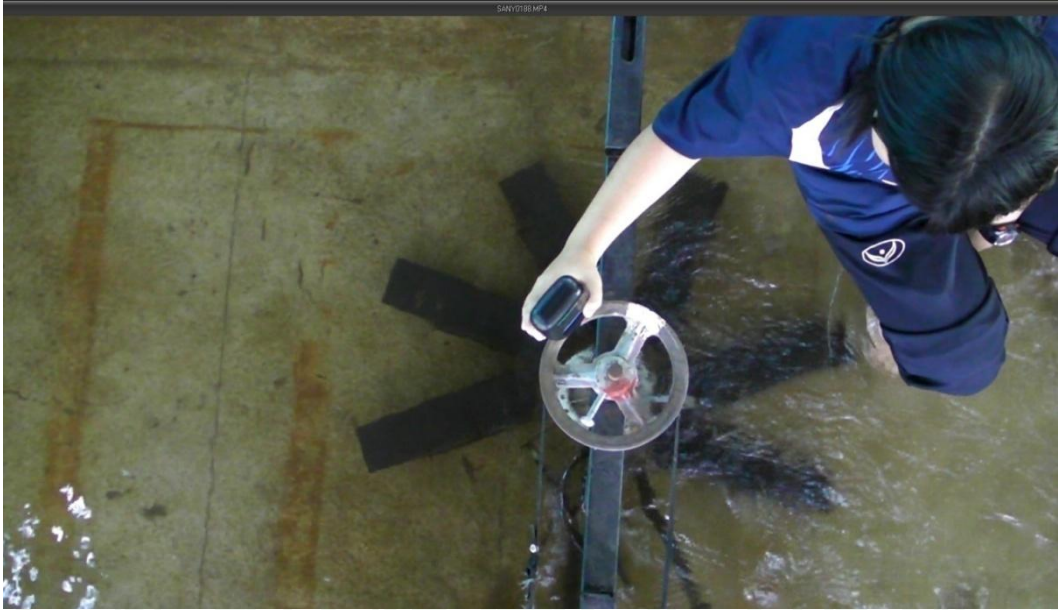
ทดสอบกักหน้ำชนิดใบพัดโค้งที่ประกอบด้วย ใบพัดขนาด $30 \times 10 \times 1.5$ เซนติเมตร
โดยการ

1. ติดตั้งกักหน้ำในรางทดสอบ
2. เริ่มทำการปล่อยกระแสหน้ำให้ความเร็วเฉลี่ย 0.28 เมตรต่อวินาทีผ่านกักหน้ำโดย
ยังไม่มีเครื่องตึงต้าง
3. ทำการวัดรอบการหมุนของกักหน้ำและบันทึกค่า
4. ทำการตึงต้างเพื่อเพิ่มค่าน้ำหนักทีละ 0.3 - 0.5 กิโลกรัม และทำซ้ำข้อ 2 และข้อ 3
เพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ จนกว่ากักหน้ำจะหยุดหมุน

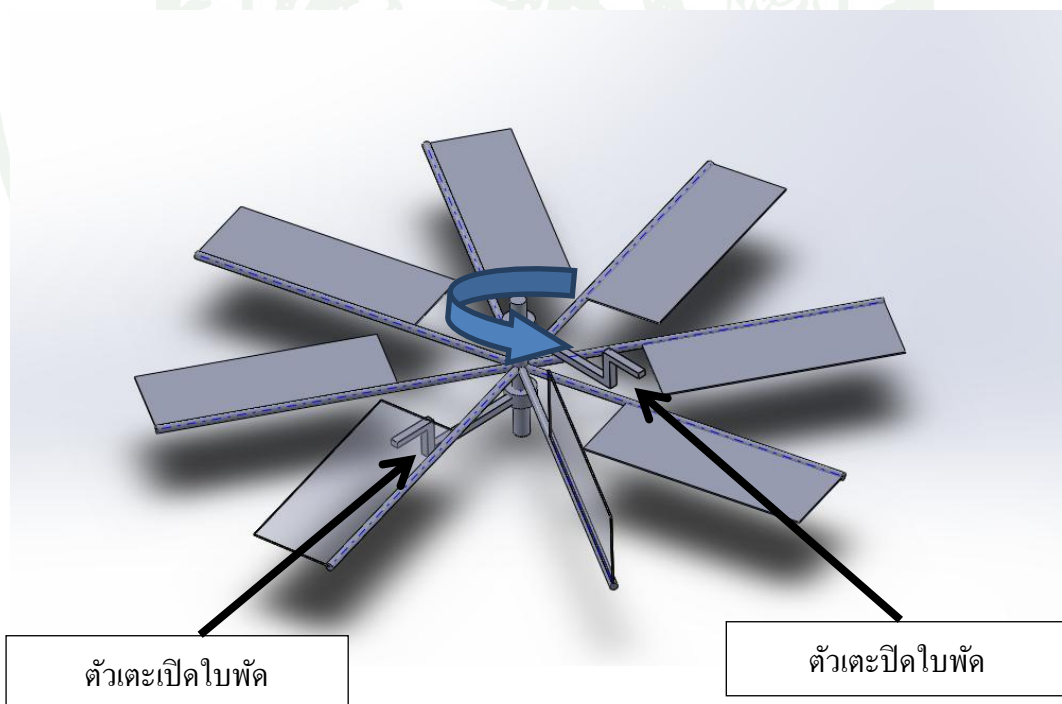
5. เปลี่ยนความเร็วเฉลี่ยการไหลเป็น 0.43, 0.51 และ 0.57 เมตรต่อวินาที ทำซ้ำข้อ 2 ถึง ข้อ 4



ภาพที่ 23 การติดตั้งกั้นน้ำและอุปกรณ์ต่างๆในคลองชลประทาน (มุมมองด้านบน)



ภาพที่ 24 การวัดความเร็วรอบของกังหันน้ำ



ภาพที่ 25 การติดตั้งตัวตะเปิด - ปิดใบพัดเพื่อทำให้มีความหมุนต่อเนื่องของกังหันน้ำ

การทดสอบจะใช้กังหันน้ำที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้วดึงถ่วงน้ำหนัก และวัดความเร็วรอบที่น้ำหนักต่างๆกันและคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยสามารถคำนวณพลังงานที่ได้จากแรงที่กระทำกับใบกังหันน้ำจากสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (12)$$

เมื่อ P = พลังงานที่ได้จากกระแส น้ำ (watt)
 ρ = หน่วยน้ำหนักของน้ำ (kg/m^3)
 A = พื้นที่ที่สัมผัสแรง (m^2)
 V = ความเร็วการไหลของกระแส น้ำ (m/s)

เมื่อได้พลังงานจากแรงที่กระทำกับใบกังหันน้ำแล้ว การจะหาค่าประสิทธิภาพจะต้องนำค่าที่มีหน่วยเดียวกันมาเปรียบเทียบซึ่งจากการทดสอบดังข้างต้นจะสอดคล้องกับสมการ

$$P_0 = 2\pi n r F$$

$$P_0 = F r n \times 2 \times \frac{22}{7} \times \frac{9.81}{60}$$

$$P_0 = 1.0277 F r n = F r n P_0$$

เมื่อ P_0 = พลังงานที่ได้วัดได้ (watt)
 F = ผลต่างของน้ำหนักที่ใช้ดึงมู่เต้ (newton)
 n = จำนวนรอบของการหมุน (rpm)
 r = รัศมีมู่เต้ (m)

จากสมการที่กล่าวมาค่า P_0 คือ พลังงานกลที่กังหันผลิตได้ ซึ่งค่าของตัวแปรต่างๆ ในสมการจะได้ออกจากการทดสอบกังหัน และเมื่อได้ค่าพลังงานทั้งสองค่าจะสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพได้โดยสมการ

$$C_p = \frac{P_0}{P}$$

ตัวอย่างการคำนวณการประเมิน โดยการดึงพลังงานที่ได้จากน้ำ

ทดสอบกังหันน้ำที่ความเร็ว 0.28 เมตร/วินาที ขนาดใบพัด 30×10 เซนติเมตร จำนวน 8 ใบ จากการทดสอบได้ผลต่างการดึงของน้ำหนักที่มู่เล่ 0.12 กิโลกรัม ความเร็วรอบ 5 รอบ/นาที รัศมีมู่เล่ 10 เซนติเมตร

จากสมการที่ (12)

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P = \frac{1}{2} \times 1000 \times (0.3 \times 0.1) \times 0.28^3$$

$$P = 0.33 \quad \text{watt}$$

จากสมการที่ (13)

$$P_0 = 2\pi m F$$

$$P_0 = 2 \times 3.142 \times 0.1 \times \frac{5}{60} \times (0.12 \times 9.81)$$

$$P_0 = 0.06 \quad \text{watt}$$

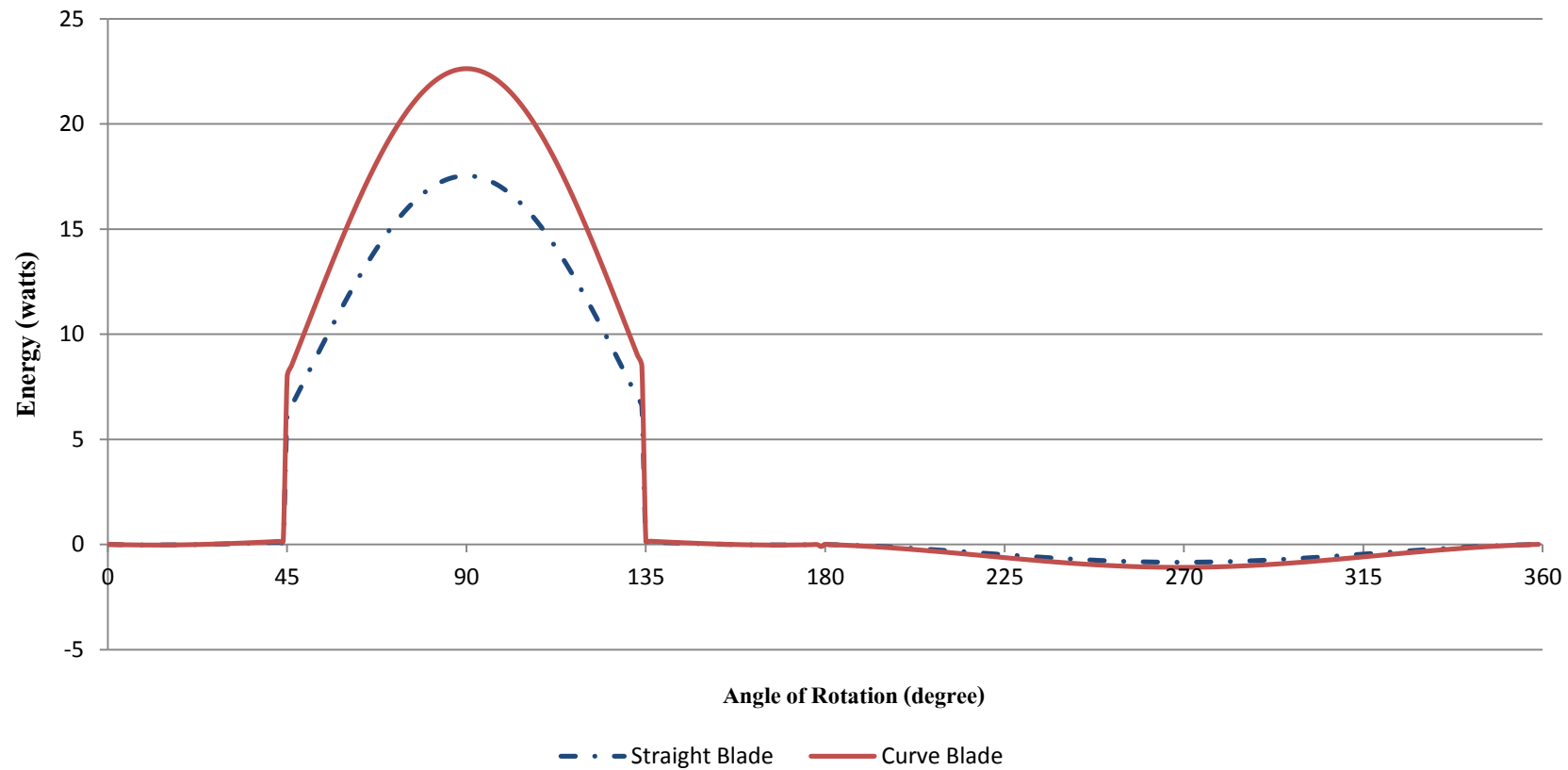
จากสมการที่ (18)

$$C_p = \frac{P_0}{P}$$

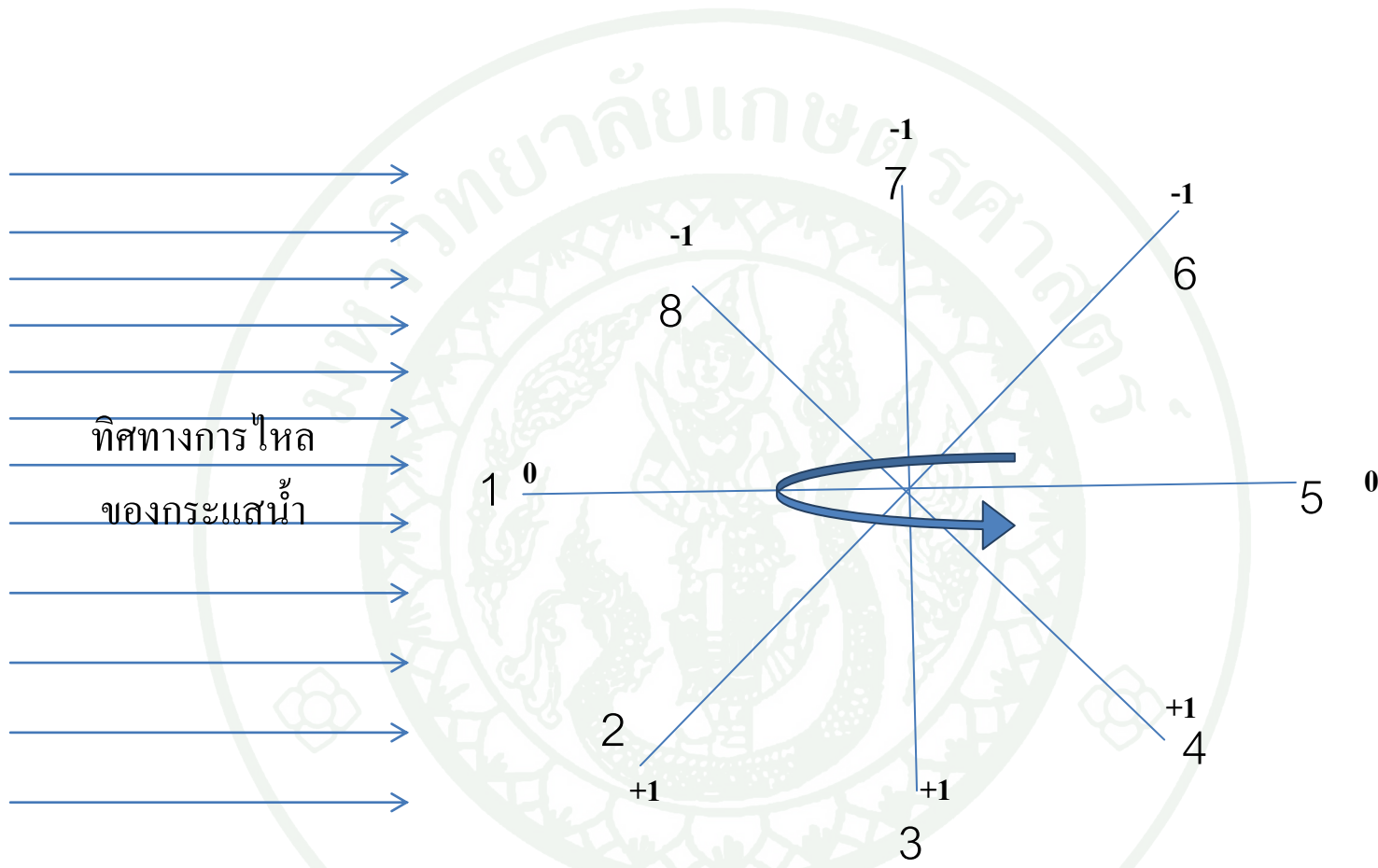
$$C_p = \frac{0.06}{0.33}$$

$$C_p = 0.2$$

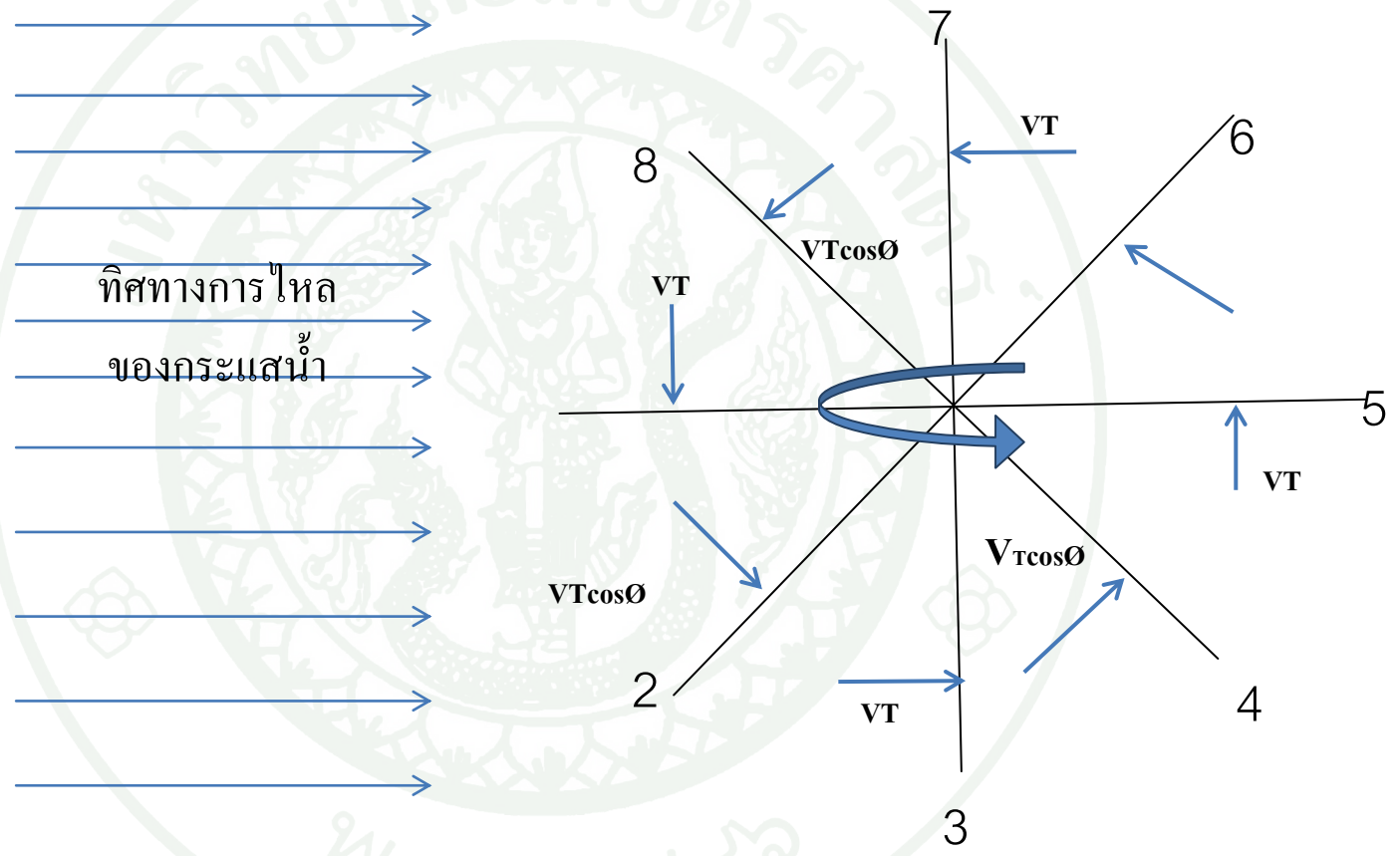
หลักการคำนวณโดยทฤษฎีของกังหันน้ำในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากกังหันน้ำชนิดใบพัดตรงและใบพัดโค้ง ดังภาพที่ 26 จากภาพจะแสดงให้เห็นว่ากังหันน้ำชนิดใบพัดโค้งสามารถดึงพลังงานออกมาได้มากกว่ากังหันชนิดใบพัดตรง ซึ่งในภาพดังกล่าว ลักษณะกราฟ มุม 45 ถึง 135 จะมีค่าเป็นค่าบวก เนื่องจากเป็นช่วงที่กังหันได้ทำการเปิดหน้าตัดรับน้ำ ส่วนในตำแหน่งที่เหลือ หน้าตัดใบพัดนั้นจะถูกปิดเพื่อลดแรงเสียดทาน และในภาพที่ 27 เป็นการแสดงค่าแฟคเตอร์ที่ช่วยในการหมุน กล่าวคือ ถ้าตำแหน่งของใบพัดอยู่ในทิศทางการหมุนที่สวนทางกลับทิศทางไหลของกระแสน้ำ ค่าแฟคเตอร์ก็จะมีค่าเท่ากับ -1 และถ้าตำแหน่งใบพัดอยู่ในทิศทางการหมุนที่หมุนไปทางเดียวกับทิศทางไหลของกระแสน้ำ ค่าแฟคเตอร์จะมีค่าเท่ากับ +1 และค่าแฟคเตอร์ 0 คือตำแหน่งใบพัดที่มุม 0 และ 180 องศา จะเป็นตำแหน่งที่ใบพัดอยู่ในแนวแกนการหมุนจึงไม่ช่วยเรื่องการหมุน และภาพที่ 28 เป็นการแสดงทิศทางของความเร็วที่กระทบใบพัด ส่วนในภาพที่ 29 นั้นจะแสดงพื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำของแต่ละตำแหน่งใบพัด



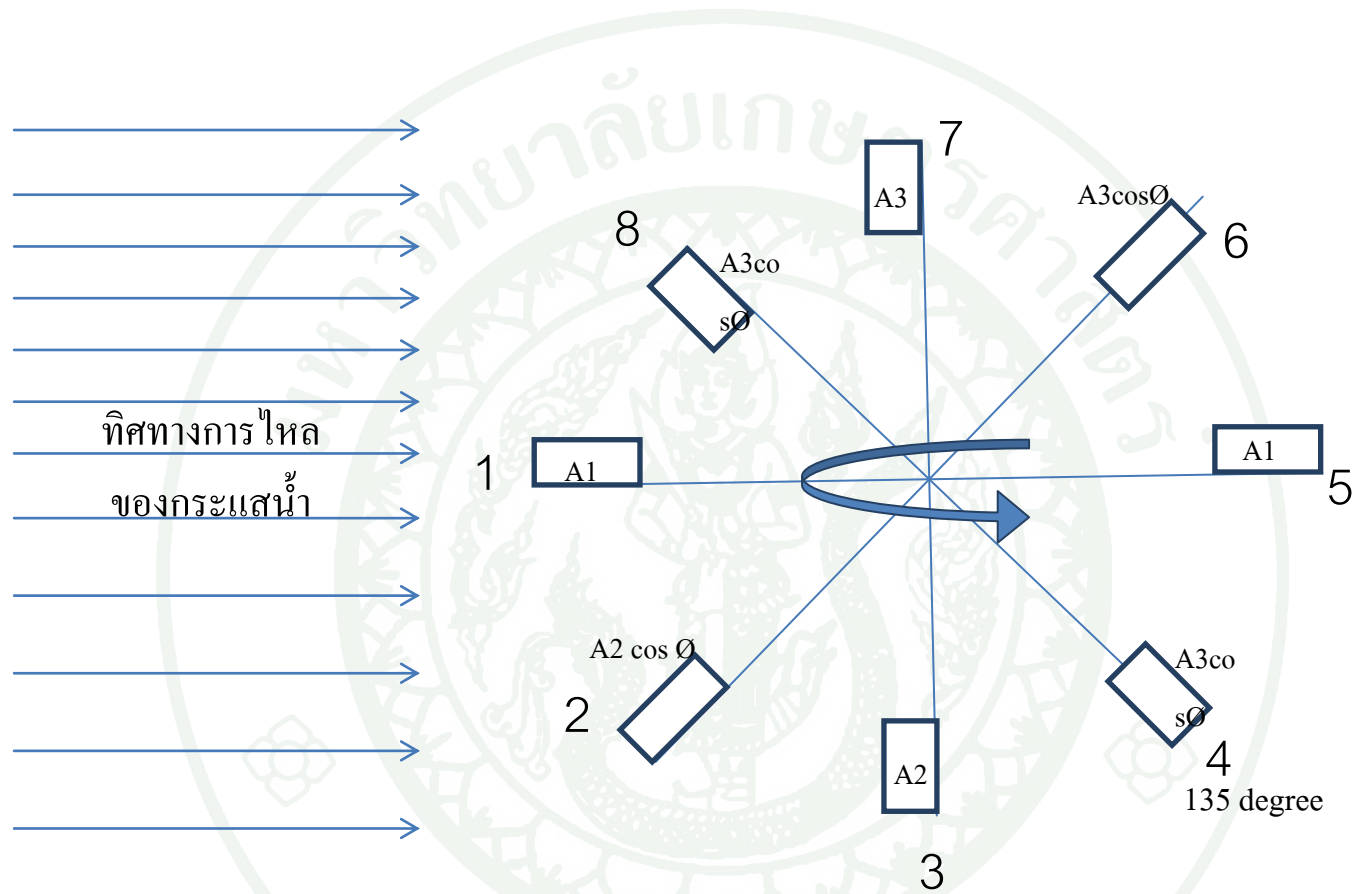
ภาพที่ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับมุมการหมุนของกังหันน้ำ ในความเร็วการไหลของกระแสน้ำเท่ากับ 0.73 เมตรต่อวินาที จำนวนรอบ 10.5 รอบ



ภาพที่ 27 ภาพแสดงค่าแฟกเตอร์ตัวช่วยการหมุนของกึ่งหันน้ำ



ภาพที่ 28 ภาพแสดงค่าทิศทางเคลื่อนที่ของใบพัดในแต่ละตำแหน่ง



ภาพที่ 29 ภาพแสดงค่าพื้นที่ของใบพัดแต่ละใบของกังหันน้ำ

- หมายเหตุ: ค่า -1 คือ ค่าแฟคเตอร์ของใบพัดที่อยู่ในทิศทางการหมุนสวนทางกับทิศทางการไหล
 ค่า +1 คือ ค่าแฟคเตอร์ของใบพัดที่อยู่ในทิศทางการหมุนตามกับทิศทางการไหล
 ค่า 0 คือ ค่าแฟคเตอร์ของใบพัดที่อยู่ในแนวแกนกับทิศทางการไหล
 ค่า 0 มีค่าเท่ากับ 45 องศา
- A1 คือ พื้นที่ในตำแหน่งที่ 0 และ 180 องศา ใบพัดอยู่ในตำแหน่งที่ไม่ช่วยการหมุนและยังไม่เปิดรับน้ำ
- A2 คือ พื้นที่ในตำแหน่งที่ 45 และ 90 องศา ใบพัดอยู่ในตำแหน่งที่ช่วยการหมุนและเปิดรับน้ำ
- A3 คือ พื้นที่ในตำแหน่งที่ 135 , 225 , 270 และ 315 องศา ใบพัดอยู่ในตำแหน่งต้านการหมุนและปิดใบพัดลงเพื่อลดแรงเสียดทานเมื่อหมุนในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของกระแสน้ำ

ผลและวิจารณ์

ผล

การทดสอบประสิทธิภาพของกังหันพลังน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

ความเร็วในการไหลของกระแสน้ำของกังหันน้ำชนิดใบพัดตรง คือ 0.34, 0.37, 0.44, 0.52, 0.60, 0.67, 0.73 เมตรต่อวินาที

ความเร็วในการไหลของกระแสน้ำของกังหันน้ำชนิดใบพัดโค้ง คือ 0.28, 0.43, 0.51, 0.57 เมตรต่อวินาที

การทดสอบนี้มีการทดสอบใบพัดกังหัน 2 ชนิด คือ ใบพัดที่ทำจากเหล็ก ที่มีขนาดความกว้าง 0.1 เมตร × ความยาว 0.3 เมตร และใบพัดที่ทำจากคาร์บอนไฟเบอร์ มีขนาดความกว้าง 0.1 เมตร × ความยาว 0.3 เมตร และมีรัศมีความโค้งของใบพัด 0.015 เมตร

การแสดงผลการทดสอบ โดยแยกความเร็วการไหลของน้ำและชนิดของใบพัด ตามลำดับตารางที่ 1 เป็นผลการทดสอบกังหันน้ำชนิดใบพัดตรง ซึ่งในแต่ละความเร็วการไหลของกระแสน้ำต่างๆ จะทำการทดสอบหลายความเร็วรอบการหมุน เพื่อที่จะหาค่าพลังงานสูงสุดของแต่ละความเร็วการไหลของกระแสน้ำ ซึ่งผลที่ได้คือ เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นนั้นค่าพลังงานสูงสุดที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามด้วย ส่วนตารางที่ 2 จะเป็นการแสดงผลการทดสอบกังหันน้ำชนิดใบพัดโค้ง ค่าพลังงานสูงสุดที่ได้จะไปในทิศทางเดียวกับกังหันน้ำชนิดใบพัดตรง คือ เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นค่าพลังงานสูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามเช่นกัน ซึ่งในภาพที่ 30 นั้นจะเป็นภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับพลังงานที่ได้ของแต่ละความเร็วการไหลของกระแสน้ำ ซึ่งเปรียบเทียบกันระหว่างผลในห้องปฏิบัติการกับการคำนวณโดยทฤษฎี ผลที่ได้คือ ผลการคำนวณนั้นมีค่ามากกว่าผลที่ได้ในห้องปฏิบัติการ ส่วนค่าพลังงานสูงสุดที่ได้ของทฤษฎีและผลจากห้องปฏิบัติการนั้นส่วนมากจะมีค่าที่จำนวนรอบใกล้เคียงกัน จะมีที่ความเร็วการไหล 0.60 ที่ค่าพลังงานสูงสุดของทฤษฎีกับผลในห้องปฏิบัติการนั้นมีค่าต่างกัน สาเหตุอาจเกิดจากการวัดที่คลาดเคลื่อนทำให้ผลที่ได้ออกมาเป็นเช่นนี้ ส่วนภาพที่ 31 เป็นภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับพลังงานที่ได้ของแต่ละความเร็วการไหลของใบพัดโค้ง ซึ่งผลการคำนวณกับผลในห้องปฏิบัติการนั้น ความเร็วรอบที่ให้ค่าพลังงานสูงสุดของแต่ละความเร็วการไหลนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันทุกความเร็วการไหล

ตารางที่ 1 ตารางแสดงผลการทดสอบการดึงพลังงานของใบพัดตรงที่ความเร็วการไหลของกระแสน้ำต่างๆ

Water Velocity (m/s)	Number of Tests	Force (kg)	Revolution (rpm)	Available Energy(watts)	Energy (watts)	Efficiency
0.34	1	0.048	8	0.59	0.04	0.067
0.34	2	0.12	7	0.59	0.09	0.146
0.34	3	0.23	5	0.59	0.118	0.200
0.34	4	0.30	4	0.59	0.123	0.209
0.34	5	0.36	3	0.59	0.11	0.188
0.37	1	0.06	9	0.76	0.055	0.073
0.37	2	0.15	7	0.76	0.108	0.142
0.37	3	0.21	6	0.76	0.129	0.170
0.37	4	0.38	5	0.76	0.195	0.257
0.37	5	0.57	3	0.76	0.176	0.231
0.44	1	0.17	11	1.28	0.192	0.150
0.44	2	0.30	8	1.28	0.247	0.193
0.44	3	0.54	6	1.28	0.333	0.261
0.44	4	0.63	5	1.28	0.324	0.253
0.44	5	0.9	3	1.28	0.277	0.217

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Water Velocity (m/s)	Number of Tests	Force (kg)	Revolution (rpm)	Available Energy(watts)	Energy (watts)	Efficiency
0.52	1	0.27	9	2.11	0.250	0.118
0.52	2	0.42	8	2.11	0.345	0.164
0.52	3	0.72	7	2.11	0.518	0.246
0.52	4	1	6	2.11	0.616	0.292
0.52	5	1.14	3	2.11	0.351	0.167
0.52	6	1.26	2	2.11	0.259	0.123
0.60	1	0.2	13	3.24	0.267	0.082
0.60	2	0.57	11	3.24	0.644	0.199
0.60	3	0.86	10	3.24	0.884	0.273
0.60	4	1.07	9	3.24	0.989	0.305
0.60	5	1.36	7	3.24	0.978	0.302

ตารางที่ 1 (ต่อ)

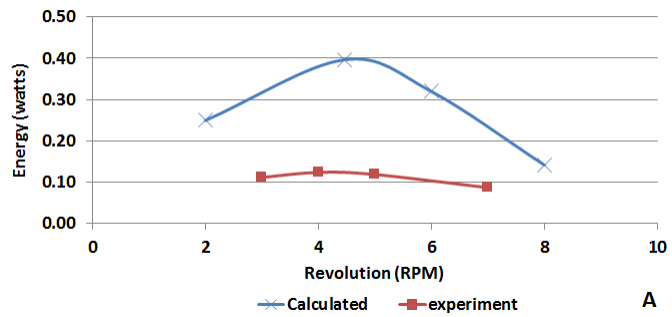
Water Velocity (m/s)	Number of Tests	Force (kg)	Revolution (rpm)	Available Energy(watts)	Energy (watts)	Efficiency
0.67	1	0.5	14	4.51	0.719	0.159
0.67	2	0.92	12	4.51	1.134	0.251
0.67	3	1.27	11	4.51	1.435	0.318
0.67	4	1.46	8	4.51	1.200	0.266
0.67	5	1.84	5	4.51	0.945	0.210
0.67	6	2.2	3	4.51	0.678	0.150
0.73	1	0.4	15	5.84	0.616	0.106
0.73	2	0.84	14	5.84	1.208	0.207
0.73	3	1.23	12	5.84	1.516	0.260
0.73	4	1.52	11	5.84	1.718	0.294
0.73	5	2	10	5.84	2.055	0.352
0.73	6	2.4	9	5.84	2.219	0.380
0.73	7	2.74	4	5.84	1.126	0.193

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการทดสอบการดึงพลังงานของใบพัดโคงที่ความเร็วการไหลของกระแสน้ำต่างๆ

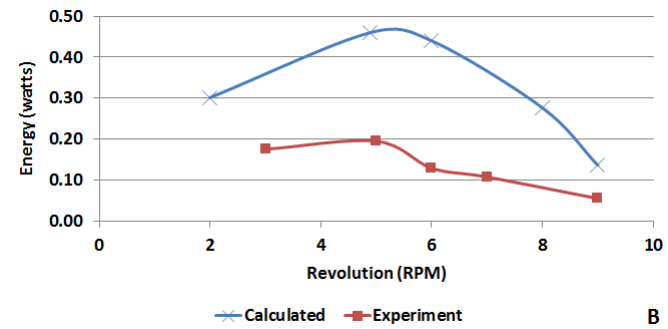
Water Velocity (m/s)	Number of Tests	Force (kg)	Revolution (rpm)	Available Energy(watts)	Energy (watts)	Efficiency
0.28	1	0.126	5	0.33	0.065	0.197
0.28	2	0.3	4	0.33	0.123	0.374
0.28	3	0.36	2	0.33	0.074	0.225
0.43	1	0.27	9	1.19	0.250	0.209
0.43	2	0.48	8	1.19	0.395	0.331
0.43	3	0.75	7	1.19	0.539	0.452
0.43	4	1	6	1.19	0.616	0.517
0.43	5	1.3	4	1.19	0.534	0.448

ตารางที่ 2 (ต่อ)

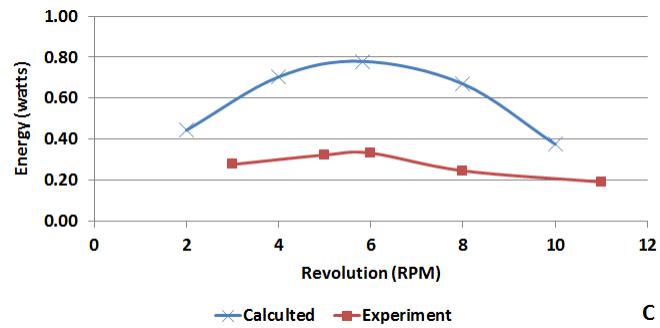
Water Velocity (m/s)	Number of Tests	Force (kg)	Revolution (rpm)	Available Energy(watts)	Energy (watts)	Efficiency
0.51	1	0.3	12	1.99	0.370	0.186
0.51	2	0.45	11	1.99	0.509	0.256
0.51	3	0.72	10	1.99	0.740	0.372
0.51	4	1.05	9	1.99	0.971	0.488
0.51	5	1.3	8	1.99	1.069	0.537
0.51	6	1.8	5	1.99	0.925	0.465
0.57	1	0.9	11	2.78	1.017	0.366
0.57	2	1.5	9	2.78	1.387	0.499
0.57	3	2.1	7	2.78	1.510	0.544
0.57	4	2.4	6	2.78	1.480	0.533
0.57	5	2.84	5	2.78	1.459	0.525
0.57	6	3.2	3	2.78	0.986	0.355



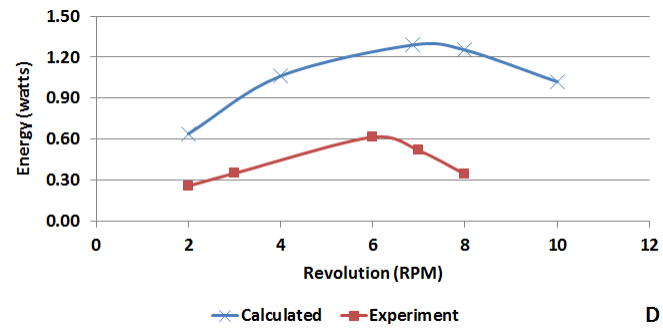
A



B

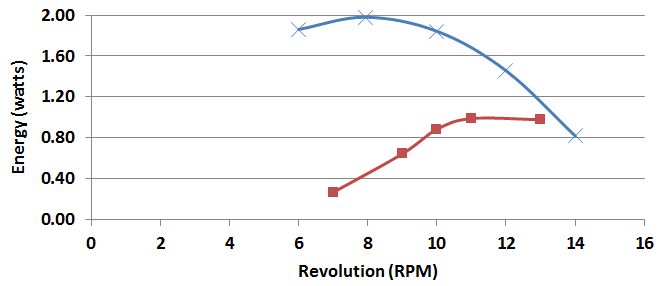


C



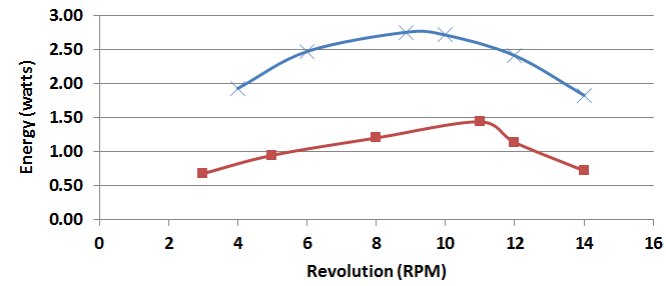
D

ภาพที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับพลังงานของกังหัน ใบพัดตรง



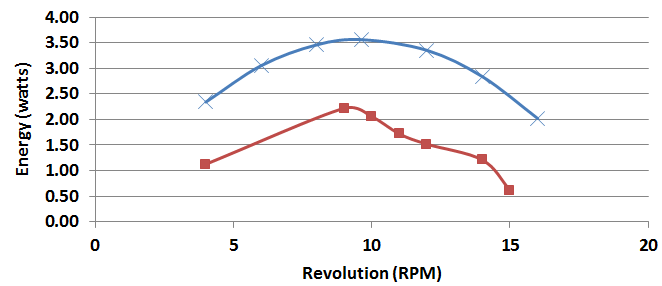
Calculated Experiment

E



Calculated Experiment

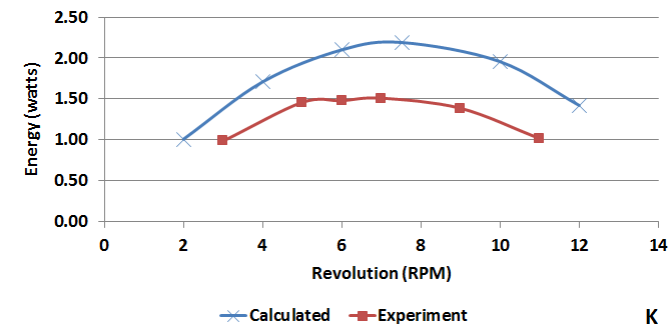
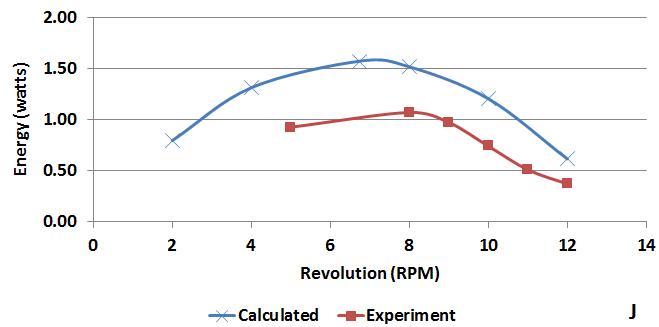
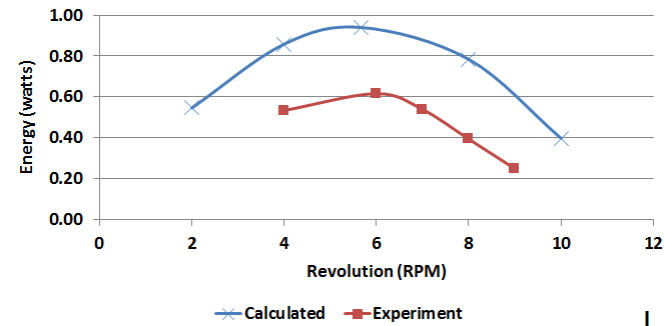
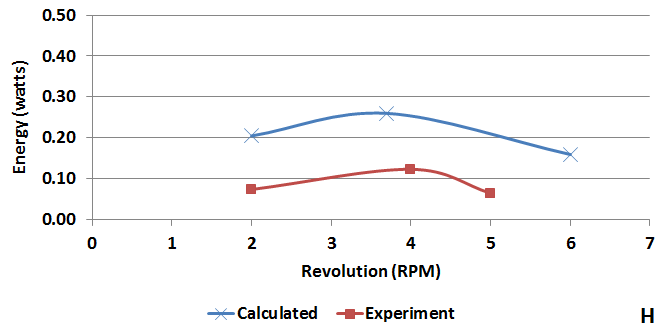
F



Calculated Experiment

G

ภาพที่ 30 (ต่อ)



ภาพที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับพลังงานของกังหันใบพัดโค้ง

หมายเหตุ: A	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.34 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
B	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.37 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
C	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.44 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
D	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.52 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
E	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.60 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
F	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.67 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
G	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.73 เมตรต่อวินาที	ใบพัดตรง
H	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.28 เมตรต่อวินาที	ใบพัดโค้ง
I	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.43 เมตรต่อวินาที	ใบพัดโค้ง
J	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.51 เมตรต่อวินาที	ใบพัดโค้ง
K	หมายถึง	ความเร็วการไหลของกระแสน้ำ	0.57 เมตรต่อวินาที	ใบพัดโค้ง

วิจารณ์

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกังหันแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน เราสามารถหาค่าพลังงานที่ได้จากการไหลของกระแสน้ำในความเร็วต่างๆ ซึ่งกังหันที่ใช้จะมีจำนวนใบพัด 8 ใบพัด มาเปรียบเทียบของกังหันน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทานใบพัดตรงและใบพัดโค้ง ในครั้งนี้จะเลือกความเร็วการไหลของกระแสน้ำที่ 0.34, 0.37, 0.41, 0.44, 0.52, 0.54, 0.60, 0.67, 0.73 เมตรต่อวินาที ของใบพัดตรง และ ความเร็วการไหลของกระแสน้ำที่ 0.28, 0.43, 0.51, 0.57 เมตรต่อวินาที ของใบพัดโค้งจากภาพที่ 39 เส้นประสีเขียวคือการประเมินพลังงานที่ได้จากกระแสน้ำ เส้นสีแดงทึบคือค่าผลการทดลองของกังหันน้ำชนิดใบตรง เส้นสีน้ำเงินทึบคือ ค่าผลการทดลองของกังหันน้ำชนิดใบพัดโค้ง เส้นสีแดงประ คือ การประเมินโดยทฤษฎีนิวตันเพื่อหาแรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหันน้ำชนิดใบพัดตรง และเส้นสีน้ำเงินประ คือการประเมินโดยทฤษฎีนิวตันเพื่อหาแรงที่กระทำต่อใบพัดของกังหันน้ำชนิดใบพัดโค้ง เมื่อเปรียบเทียบกับการวิจัยที่ผ่านมาของนรินทร์ สุขกรี (2532) ได้ประสิทธิภาพกังหันน้ำ 21 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหล 1 เมตรต่อวินาที Hwang *et al.* (2008) ได้ประสิทธิภาพกังหันน้ำ 70 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหล 2 เมตรต่อวินาที เศรษฐา (2554) ได้ประสิทธิภาพกังหันน้ำ 59 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหล 1.25 เมตรต่อวินาที ส่วนงานวิจัยนี้ได้ประสิทธิภาพ 54 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วการไหล 0.57 เมตรต่อวินาที เส้นจุดสีน้ำเงินจะเป็นเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วการไหลของใบพัดโค้ง และเส้นจุดสีแดงจะเป็นเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับความเร็วการไหลของใบพัดตรง ทั้งสอง

ใบพัดจะแปรผันตรงคือเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบจะเพิ่มมากขึ้นด้วย จากตารางที่ 3 และ 4 นั้น จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหลกับพลังงาน ของใบพัดตรง และใบพัดโค้ง ตามลำดับ ค่าพลังงานสูงสุดที่ได้ นั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเร็วการไหลของกระแสน้ำ นั้นเพิ่มขึ้น และจำนวนรอบที่ทำให้ได้ค่าพลังงานสูงสุดนั้นจะมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงกับความเร็วการไหล กล่าวคือ ความเร็วการไหลเพิ่มขึ้น จำนวนรอบนั้นจะเพิ่มขึ้นด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จะมีตัวแปรคือ ชนิดของใบพัด ขนาดของใบพัด มุมความโค้งของใบพัด ซึ่งในตัวแปรชนิดของใบพัดนั้น การวิจัยนี้จะมีใบพัดชนิดใบพัดตรง กับชนิดใบพัดโค้ง และขนาดของใบพัดนั้นจะมีผลต่อค่าพลังงานที่ได้จากการไหลของกระแสน้ำของแต่ละหน้าตัดใบพัด และมุมความโค้งของใบพัดชนิดใบ โค้งนั้นจะสามารถคำนวณพลังงานที่ได้

ตารางที่ 3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล พลังงานที่ได้จากกังหันน้ำ จำนวนรอบ ของใบพัดตรง

Water Velocity	Available Energy	Energy (Calculate)	Revolution(Calculate)	Energy (Lab)	Revolution(Lab)
m/s	watts	watts	rpm	watts	rpm
0.34	0.59	0.36	4.49	0.12	4
0.37	0.76	0.46	4.89	0.2	5
0.44	1.28	0.78	5.82	0.33	6
0.52	2.11	1.29	6.87	0.62	6
0.6	3.24	1.98	7.93	0.99	9
0.67	4.51	2.75	8.86	1.44	11
0.73	5.84	3.56	9.65	2.22	9

หมายเหตุ: ค่า Available Energy สามารถคำนวณด้วยสมการที่ 12

ค่า Energy สามารถคำนวณตามตัวอย่างในภาคผนวก ข

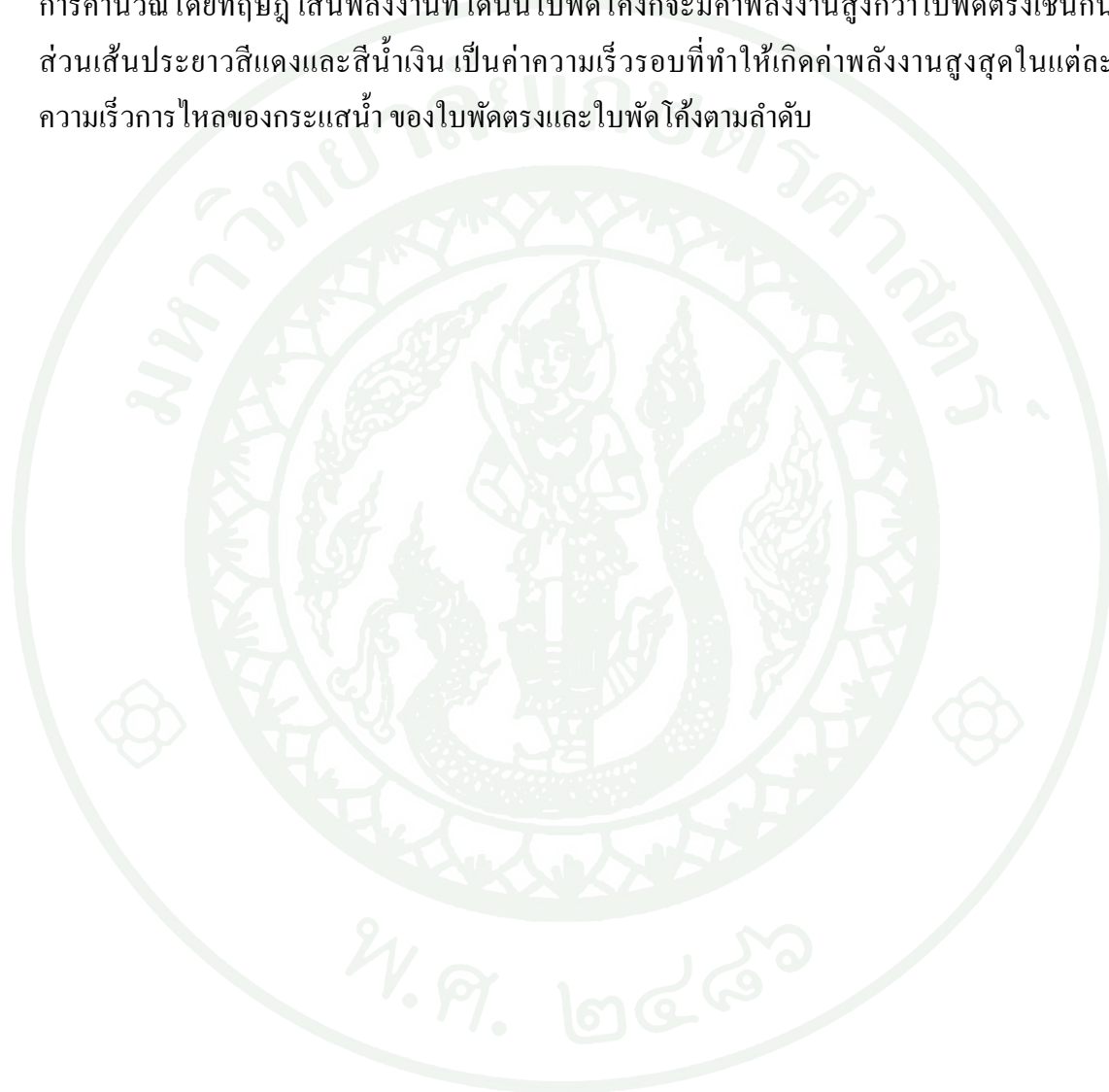
ตารางที่ 4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วการไหล พลังงานที่ได้จากกังหันน้ำ จำนวนรอบ ของใบพัดโค้ง

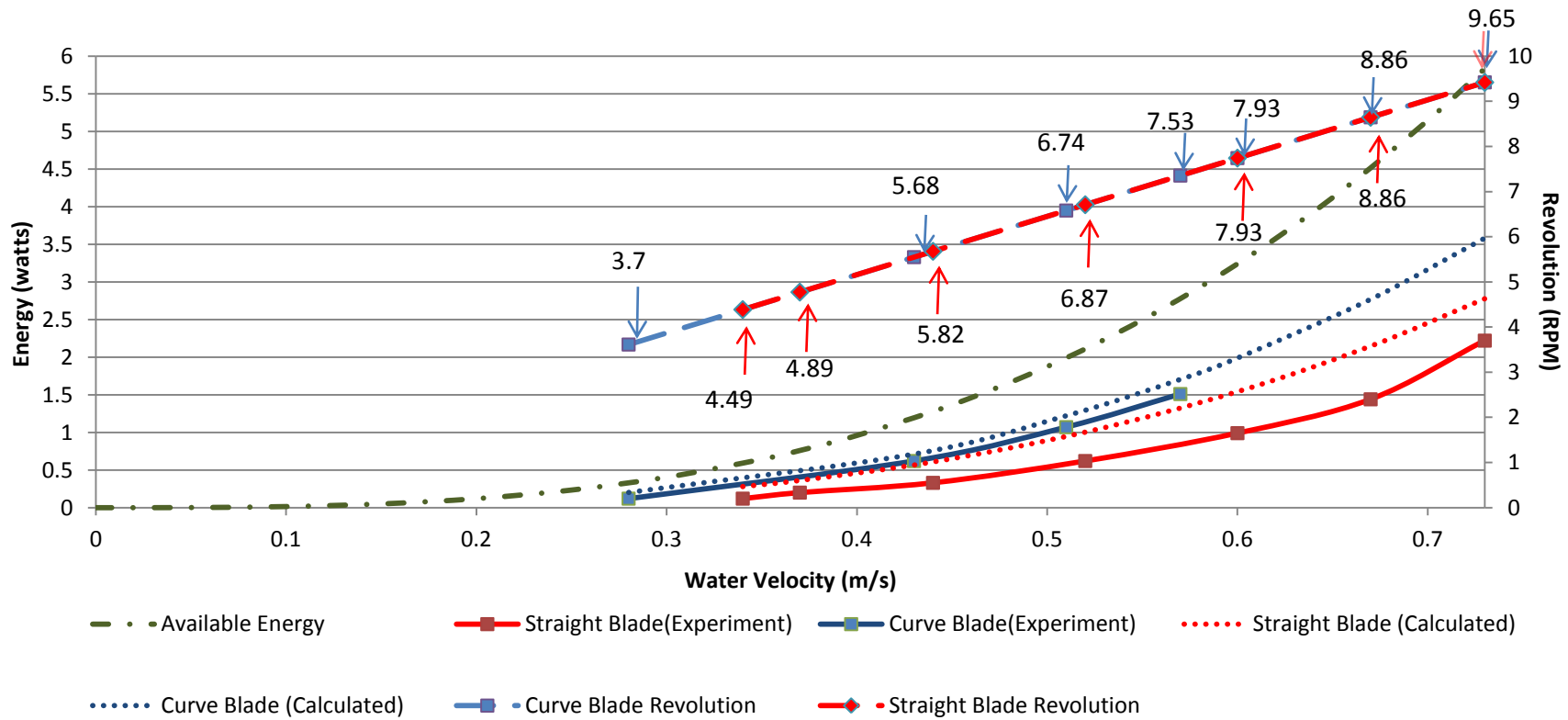
Water Velocity	Available Energy	Energy (Calculate)	Revolution(Calculate)	Energy (Lab)	Revolution(Lab)
m/s	watts	watts	rpm	watts	rpm
0.28	0.33	0.26	3.70	0.12	4
0.43	1.19	0.94	5.68	0.62	6
0.51	1.99	1.57	6.74	1.07	8
0.57	2.78	2.19	7.53	1.51	7
0.6	3.24	2.55	7.93		
0.67	4.51	3.55	8.86		
0.73	5.84	4.60	9.65		

หมายเหตุ: ค่า Available Energy สามารถคำนวณด้วยสมการที่ 12

ค่า Energy สามารถคำนวณตามตัวอย่างในภาคผนวก ข

จากภาพที่ 32 นั้นค่า Available Energy นั้นจะเป็นค่าพลังงานที่ได้จากการไหลของ กระแสไฟฟ้าที่หน้าตัดใบพัดมีขนาดเท่ากับ 0.3×0.1 เมตร และเส้นทึบสีแดงและสีน้ำเงิน นั้นเป็นผล ที่ได้จากห้องปฏิบัติการของใบพัดชนิดใบตรงและใบโค้ง ตามลำดับ จากภาพแสดงให้เห็นว่า ใบพัดโค้งนั้นสามารถดึงพลังงานได้มากกว่าใบพัดตรง และเส้นจุดสีแดงและสีน้ำเงิน เป็นผล การคำนวณโดยทฤษฎี เส้นพลังงานที่ได้นั้นใบพัดโค้งก็จะมีค่าพลังงานสูงกว่าใบพัดตรงเช่นกัน ส่วนเส้นประยาวสีแดงและสีน้ำเงิน เป็นค่าความเร็วรอบที่ทำให้เกิดค่าพลังงานสูงสุดในแต่ละ ความเร็วการไหลของกระแสไฟฟ้า ของใบพัดตรงและใบพัดโค้งตามลำดับ





ภาพที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์พลังงานระหว่างใบพัดตรงกับใบพัดโค้ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองกักกั้นน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน ซึ่งมีกักกั้นที่ได้ทดสอบ 2 ชนิด คือ กักกั้นน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดตรง และกักกั้นน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทานชนิดใบพัดโค้ง ประสิทธิภาพในการดึงพลังงานการไหลจากกระแสน้ำนั้น กักกั้นน้ำชนิดใบโค้ง จะมีความสามารถในการดึงพลังงานได้มากกว่ากักกั้นน้ำชนิดใบตรง และอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ กักกั้นน้ำชนิดใบโค้งสามารถดึงพลังงานออกมาได้มากกว่ากักกั้นน้ำชนิดใบตรงคือ วัสดุที่ใช้ทำ ใบพัดกักกั้น กักกั้นน้ำชนิดใบพัดตรง วัสดุที่ใช้ทำคือเหล็ก ส่วนกักกั้นน้ำชนิดใบโค้ง วัสดุที่ใช้ทำคือ คาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งแรง ทนทาน แต่น้ำหนักน้อยกว่าเหล็กมาก ทำให้ ความต่อเนื่องในการหมุนของกักกั้นที่มีผลของการเปิด - ปิด ใบพัดนั้นมีความต่อเนื่อง ทำให้กักกั้น สามารถดึงพลังงานออกมาได้มากกว่า ใบพัดโค้งสามารถให้พลังงานมากกว่าใบพัดตรงเนื่องจาก โมเมนต์ที่กระทำต่อตัวใบพัดกักกั้นนั้น ใบพัดโค้งจะมีค่าโมเมนต์ที่มากกว่าใบพัดตรง ดังนั้น พลังงานที่ได้จึงมากกว่าใบพัดตรง

การงานวิจัยนี้ตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาคือ ชนิดของใบพัด คือใบพัดตรงและใบพัดโค้งนั้น ผลที่ได้ก็คือใบพัดโค้งจะสามารถดึงพลังงานที่ได้จากการไหลของกระแสน้ำได้มากกว่าใบพัดตรง ค่าประสิทธิภาพของใบพัดตรงกับใบพัดโค้ง ใบพัดตรงจะมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 20 - 38 เปอร์เซ็นต์ และใบพัดโค้งมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 37 - 54 เปอร์เซ็นต์ และตัวแปรที่ยังไม่ได้ ทำการศึกษานั้นจะมี ขนาดใบพัด รัศมีความโค้งใบพัด ตำแหน่งที่ติดตั้งตัวช่วยเปิดใบพัด

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากกักกั้นน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทานยังไม่สามารถดึงพลังงานออกจากการไหลของกระแสน้ำได้เต็มที่ ดังนั้นจะต้องมีการปรับปรุงกักกั้นน้ำเพื่อที่จะ ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมดังนี้

1. ควรทำแบบจำลอง CFD เพื่อหาความเร็วที่กระทบใบพัด

2. ทำการจำลองแบบจำลอง CFD หาจำนวนรอบการหมุนของกังหันน้ำที่ก่อให้เกิดค่าพลังงานสูงสุดของแต่ละความเร็วการไหล

3. ทดลองใส่เซนเซอร์วัดความดันไว้ที่หน้าตัดใบพัดเพื่อที่จะได้วัดแรงที่กระทำกับใบพัดได้โดยตรง

4. ศึกษาرسیความโค้งของใบพัดที่ทำให้สามารถดึงพลังงานได้มากกว่าเดิม

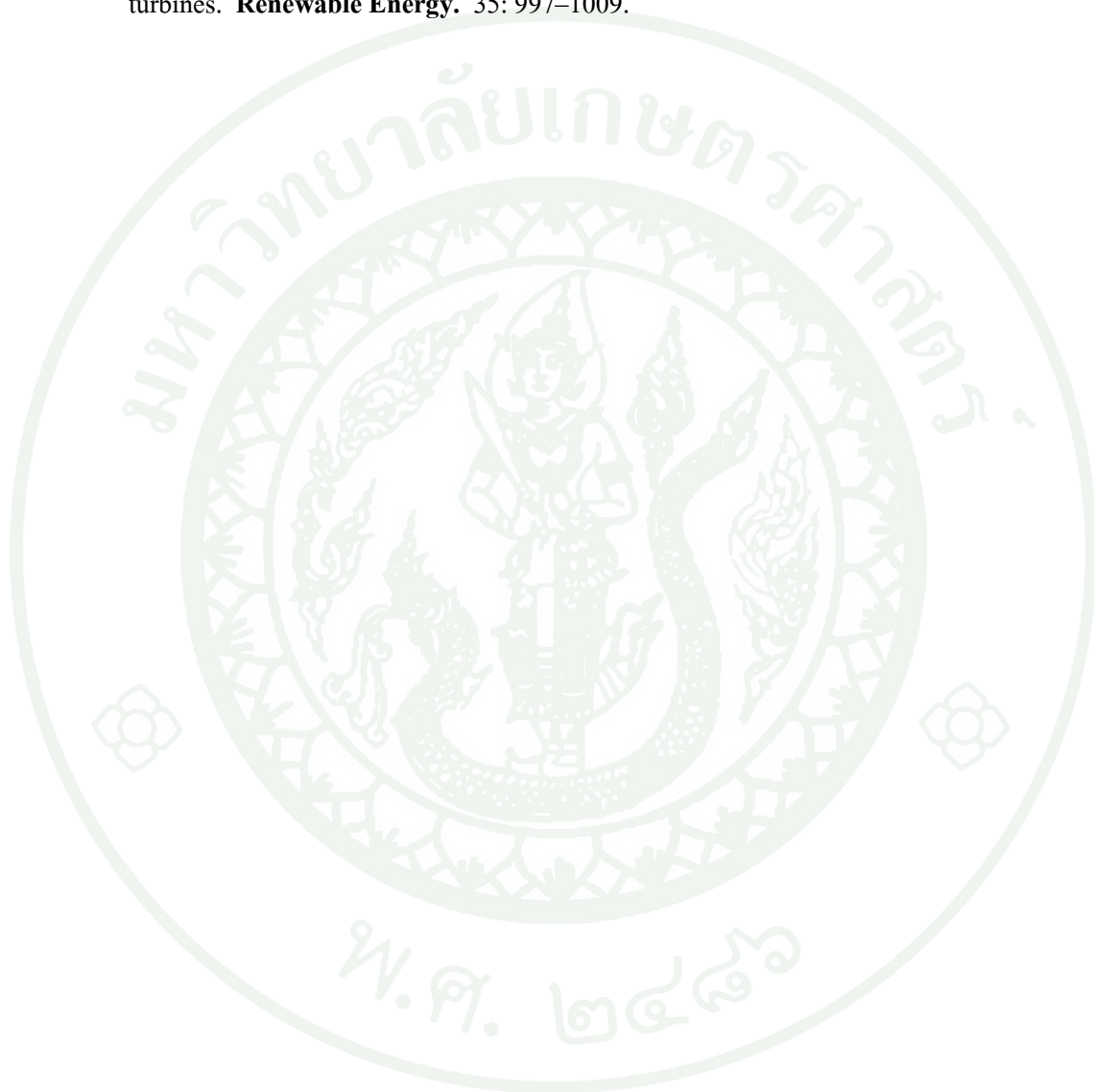
5. ศึกษาตำแหน่งที่ติดตั้งตัวช่วยเปิดใบพัดเพื่อที่จะทำให้งังหันสามารถดึงพลังงานได้มากกว่าเดิม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กชกร ธานีวัฒน์. 2547. จับตาพลังงานหมุนเวียนปี 47 ไทยขึ้นแท่นผู้นำอาเซียน.
รักษ์พลังงาน. 2(6): 7-8.
- ชัยวัฒน์ ขยันการนาวิ. 2551. โครงการทดสอบติดตั้งกังหันพลังน้ำคลองลาดโพธิ์.
งานวิจัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชาติชาย ยมะคุปต์. 2550. กังหันผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบส่องสว่าง. งานวิจัย,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นรินทร์ สุขกรี. 2532. การออกแบบสร้างและศึกษากังหันน้ำแบบดินตะขาบ. งานวิจัย,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พงศธร โสภานันธุ์. 2550. กังหัน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เศรษฐา สมจิตต์ชอบ. 2554. การทดสอบประสิทธิภาพกังหันพลังน้ำแกนตั้งแบบลดแรงเสียดทาน.
ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Boyle, G. 1996. **Renewable Energy Power for a Sustainable Future**. Oxford University
Press, New York.
- In, S.H., H.L. Yun and J. K. Seung. 2009. Optimization of cycloidal water turbine and the
performance improvement by individual blade control. **Applied Energy**.
86: 1532–1540.
- Joseph, B.F. and E. F. John. 1997. **Fluid Mechanics with Engineering applications**.
The Universities Press, New York.

Ristinen, R.A. and J. J. Kraushaar. 1999. **Energy and the Environment**. John Wiley & Sons, New York.

Zanette, J., D. Imbault and A. Tourabi. 2010. A design methodology for cross flow water turbines. **Renewable Energy**. 35: 997–1009.





ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.34 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.34	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.34	2	2	0.063	0.178	1.280	
0.34	2	3	0.063	0.277	2.827	
0.34	2	4	0.063	0.178	0.026	
0.34	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.34	2	6	0.063	0.303	-0.044	
0.34	2	7	0.063	0.403	-0.082	
0.34	2	8	0.063	0.303	-0.044	3.963
0.34	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.34	4	2	0.126	0.115	0.827	
0.34	4	3	0.126	0.214	2.186	
0.34	4	4	0.126	0.115	0.017	
0.34	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.34	4	6	0.126	0.366	-0.053	
0.34	4	7	0.126	0.466	-0.095	
0.34	4	8	0.126	0.366	-0.053	2.829
0.34	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.34	6	2	0.189	0.052	0.374	
0.34	6	3	0.189	0.151	1.545	
0.34	6	4	0.189	0.052	0.007	
0.34	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.34	6	6	0.189	0.429	-0.062	

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.34	6	7	0.189	0.529	-0.108	
0.34	6	8	0.189	0.429	-0.062	1.695
0.34	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.34	8	2	0.251	-0.011	-0.079	
0.34	8	3	0.251	0.089	0.904	
0.34	8	4	0.251	-0.011	-0.002	
0.34	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.34	8	6	0.251	0.492	-0.071	
0.34	8	7	0.251	0.591	-0.121	
0.34	8	8	0.251	0.492	-0.071	0.561

ตารางผนวกที่ ก2 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทาน
ชนิดใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.37 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.37	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.37	2	2	0.063	0.199	1.560	
0.37	2	3	0.063	0.307	3.409	
0.37	2	4	0.063	0.199	0.031	
0.37	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.37	2	6	0.063	0.324	-0.051	
0.37	2	7	0.063	0.433	-0.096	
0.37	2	8	0.063	0.324	-0.051	4.802
0.37	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.37	4	2	0.126	0.136	1.067	
0.37	4	3	0.126	0.244	2.712	
0.37	4	4	0.126	0.136	0.021	
0.37	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.37	4	6	0.126	0.387	-0.061	
0.37	4	7	0.126	0.496	-0.110	
0.37	4	8	0.126	0.387	-0.061	3.568
0.37	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.37	6	2	0.189	0.073	0.573	
0.37	6	3	0.189	0.181	2.014	
0.37	6	4	0.189	0.073	0.011	
0.37	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.37	6	6	0.189	0.450	-0.071	

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.37	6	7	0.189	0.559	-0.124	
0.37	6	8	0.189	0.450	-0.071	2.334
0.37	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.37	8	2	0.251	0.010	0.080	
0.37	8	3	0.251	0.119	1.317	
0.37	8	4	0.251	0.010	0.002	
0.37	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.37	8	6	0.251	0.513	-0.081	
0.37	8	7	0.251	0.621	-0.138	
0.37	8	8	0.251	0.513	-0.081	1.100
0.37	9	1	0.283	0.283	0.000	
0.37	9	2	0.283	-0.021	-0.166	
0.37	9	3	0.283	0.087	0.968	
0.37	9	4	0.283	-0.021	-0.003	
0.37	9	5	0.283	0.283	0.000	
0.37	9	6	0.283	0.544	-0.085	
0.37	9	7	0.283	0.653	-0.145	
0.37	9	8	0.283	0.544	-0.085	0.483

ตารางผนวกที่ ก3 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.44 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.44	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.44	2	2	0.063	0.248	2.317	
0.44	2	3	0.063	0.377	4.979	
0.44	2	4	0.063	0.248	0.046	
0.44	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.44	2	6	0.063	0.374	-0.070	
0.44	2	7	0.063	0.503	-0.133	
0.44	2	8	0.063	0.374	-0.070	7.069
0.44	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.44	4	2	0.126	0.185	1.730	
0.44	4	3	0.126	0.314	4.149	
0.44	4	4	0.126	0.185	0.035	
0.44	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.44	4	6	0.126	0.437	-0.082	
0.44	4	7	0.126	0.566	-0.149	
0.44	4	8	0.126	0.437	-0.082	5.601
0.44	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.44	6	2	0.189	0.123	1.144	
0.44	6	3	0.189	0.251	3.320	
0.44	6	4	0.189	0.123	0.023	
0.44	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.44	6	6	0.189	0.500	-0.093	

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.44	6	7	0.189	0.629	-0.166	
0.44	6	8	0.189	0.500	-0.093	4.134
0.44	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.44	8	2	0.251	0.060	0.557	
0.44	8	3	0.251	0.189	2.490	
0.44	8	4	0.251	0.060	0.011	
0.44	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.44	8	6	0.251	0.562	-0.105	
0.44	8	7	0.251	0.691	-0.183	
0.44	8	8	0.251	0.562	-0.105	2.666
0.44	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.44	10	2	0.314	-0.003	-0.029	
0.44	10	3	0.314	0.126	1.661	
0.44	10	4	0.314	-0.003	-0.001	
0.44	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.44	10	6	0.314	0.625	-0.117	
0.44	10	7	0.314	0.754	-0.199	
0.44	10	8	0.314	0.625	-0.117	1.198

ตารางผนวกที่ ก4 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.52 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.52	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.52	2	2	0.063	0.305	3.362	
0.52	2	3	0.063	0.457	7.132	
0.52	2	4	0.063	0.305	0.067	
0.52	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.52	2	6	0.063	0.430	-0.095	
0.52	2	7	0.063	0.583	-0.182	
0.52	2	8	0.063	0.430	-0.095	10.189
0.52	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.52	4	2	0.126	0.242	2.669	
0.52	4	3	0.126	0.394	6.151	
0.52	4	4	0.126	0.242	0.053	
0.52	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.52	4	6	0.126	0.493	-0.109	
0.52	4	7	0.126	0.646	-0.201	
0.52	4	8	0.126	0.493	-0.109	8.454
0.52	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.52	6	2	0.189	0.179	1.976	
0.52	6	3	0.189	0.331	5.171	
0.52	6	4	0.189	0.179	0.040	
0.52	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.52	6	6	0.189	0.556	-0.123	

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.52	6	7	0.189	0.709	-0.221	
0.52	6	8	0.189	0.556	-0.123	6.720
0.52	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.52	8	2	0.251	0.116	1.282	
0.52	8	3	0.251	0.269	4.191	
0.52	8	4	0.251	0.116	0.026	
0.52	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.52	8	6	0.251	0.619	-0.137	
0.52	8	7	0.251	0.771	-0.241	
0.52	8	8	0.251	0.619	-0.137	4.985
0.52	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.52	10	2	0.314	0.053	0.589	
0.52	10	3	0.314	0.206	3.210	
0.52	10	4	0.314	0.053	0.012	
0.52	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.52	10	6	0.314	0.682	-0.150	
0.52	10	7	0.314	0.834	-0.260	
0.52	10	8	0.314	0.682	-0.150	3.251

ตารางผนวกที่ ก5 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.60 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.6	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.6	2	2	0.063	0.361	4.599	
0.6	2	3	0.063	0.537	9.669	
0.6	2	4	0.063	0.361	0.092	
0.6	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.6	2	6	0.063	0.487	-0.124	
0.6	2	7	0.063	0.663	-0.239	
0.6	2	8	0.063	0.487	-0.124	13.873
0.6	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.6	4	2	0.126	0.299	3.799	
0.6	4	3	0.126	0.474	8.538	
0.6	4	4	0.126	0.299	0.076	
0.6	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.6	4	6	0.126	0.550	-0.140	
0.6	4	7	0.126	0.726	-0.261	
0.6	4	8	0.126	0.550	-0.140	11.872
0.6	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.6	6	2	0.189	0.236	2.999	
0.6	6	3	0.189	0.411	7.407	
0.6	6	4	0.189	0.236	0.060	
0.6	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.6	6	6	0.189	0.613	-0.156	

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.6	6	7	0.189	0.789	-0.284	
0.6	6	8	0.189	0.613	-0.156	9.870
0.6	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.6	8	2	0.251	0.173	2.200	
0.6	8	3	0.251	0.349	6.276	
0.6	8	4	0.251	0.173	0.044	
0.6	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.6	8	6	0.251	0.676	-0.172	
0.6	8	7	0.251	0.851	-0.306	
0.6	8	8	0.251	0.676	-0.172	7.869
0.6	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.6	10	2	0.314	0.110	1.400	
0.6	10	3	0.314	0.286	5.144	
0.6	10	4	0.314	0.110	0.028	
0.6	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.6	10	6	0.314	0.738	-0.188	
0.6	10	7	0.314	0.914	-0.329	
0.6	10	8	0.314	0.738	-0.188	5.867
0.6	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.6	12	2	0.377	0.047	0.600	
0.6	12	3	0.377	0.223	4.013	
0.6	12	4	0.377	0.047	0.012	
0.6	12	5	0.377	0.377	0.000	

ตารางผนวกที่ ก5 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.6	12	6	0.377	0.801	-0.204	
0.6	12	7	0.377	0.977	-0.352	
0.6	12	8	0.377	0.801	-0.204	3.866
0.6	14	1	0.440	0.440	0.000	
0.6	14	2	0.440	-0.016	-0.200	
0.6	14	3	0.440	0.160	2.882	
0.6	14	4	0.440	-0.016	-0.004	
0.6	14	5	0.440	0.440	0.000	
0.6	14	6	0.440	0.864	-0.220	
0.6	14	7	0.440	1.040	-0.374	
0.6	14	8	0.440	0.864	-0.220	1.864

ตารางผนวกที่ 6 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.67 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.67	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.67	2	2	0.063	0.411	5.838	
0.67	2	3	0.063	0.607	12.204	
0.67	2	4	0.063	0.411	0.117	
0.67	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.67	2	6	0.063	0.537	-0.152	
0.67	2	7	0.063	0.733	-0.295	
0.67	2	8	0.063	0.537	-0.152	17.560
0.67	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.67	4	2	0.126	0.348	4.945	
0.67	4	3	0.126	0.544	10.941	
0.67	4	4	0.126	0.348	0.099	
0.67	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.67	4	6	0.126	0.599	-0.170	
0.67	4	7	0.126	0.796	-0.320	
0.67	4	8	0.126	0.599	-0.170	15.325
0.67	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.67	6	2	0.189	0.285	4.052	
0.67	6	3	0.189	0.481	9.678	
0.67	6	4	0.189	0.285	0.081	
0.67	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.67	6	6	0.189	0.662	-0.188	

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.67	6	7	0.189	0.859	-0.345	
0.67	6	8	0.189	0.662	-0.188	13.090
0.67	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.67	8	2	0.251	0.222	3.159	
0.67	8	3	0.251	0.419	8.415	
0.67	8	4	0.251	0.222	0.063	
0.67	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.67	8	6	0.251	0.725	-0.206	
0.67	8	7	0.251	0.921	-0.370	
0.67	8	8	0.251	0.725	-0.206	10.855
0.67	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.67	10	2	0.314	0.159	2.266	
0.67	10	3	0.314	0.356	7.152	
0.67	10	4	0.314	0.159	0.045	
0.67	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.67	10	6	0.314	0.788	-0.224	
0.67	10	7	0.314	0.984	-0.396	
0.67	10	8	0.314	0.788	-0.224	8.620
0.67	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.67	12	2	0.377	0.097	1.373	
0.67	12	3	0.377	0.293	5.888	
0.67	12	4	0.377	0.097	0.027	
0.67	12	5	0.377	0.377	0.000	

ตารางผนวกที่ ก6 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.67	12	6	0.377	0.851	-0.242	
0.67	12	7	0.377	1.047	-0.421	
0.67	12	8	0.377	0.851	-0.242	6.385
0.67	14	1	0.440	0.440	0.000	
0.67	14	2	0.440	0.034	0.480	
0.67	14	3	0.440	0.230	4.625	
0.67	14	4	0.440	0.034	0.010	
0.67	14	5	0.440	0.440	0.000	
0.67	14	6	0.440	0.914	-0.260	
0.67	14	7	0.440	1.110	-0.446	
0.67	14	8	0.440	0.914	-0.260	4.150

ตารางผนวกที่ ๓7 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดตรง ที่มีความเร็วการไหล 0.73 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.73	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.73	2	2	0.063	0.453	7.018	
0.73	2	3	0.063	0.667	14.611	
0.73	2	4	0.063	0.453	0.140	
0.73	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.73	2	6	0.063	0.579	-0.179	
0.73	2	7	0.063	0.793	-0.347	
0.73	2	8	0.063	0.579	-0.179	21.063
0.73	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.73	4	2	0.126	0.390	6.045	
0.73	4	3	0.126	0.604	13.235	
0.73	4	4	0.126	0.390	0.121	
0.73	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.73	4	6	0.126	0.642	-0.199	
0.73	4	7	0.126	0.856	-0.375	
0.73	4	8	0.126	0.642	-0.199	18.628
0.73	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.73	6	2	0.189	0.328	5.072	
0.73	6	3	0.189	0.541	11.858	
0.73	6	4	0.189	0.328	0.101	
0.73	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.73	6	6	0.189	0.705	-0.218	

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.73	6	7	0.189	0.919	-0.402	
0.73	6	8	0.189	0.705	-0.218	16.193
0.73	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.73	8	2	0.251	0.265	4.099	
0.73	8	3	0.251	0.479	10.482	
0.73	8	4	0.251	0.265	0.082	
0.73	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.73	8	6	0.251	0.767	-0.238	
0.73	8	7	0.251	0.981	-0.430	
0.73	8	8	0.251	0.767	-0.238	13.758
0.73	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.73	10	2	0.314	0.202	3.126	
0.73	10	3	0.314	0.416	9.106	
0.73	10	4	0.314	0.202	0.063	
0.73	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.73	10	6	0.314	0.830	-0.257	
0.73	10	7	0.314	1.044	-0.457	
0.73	10	8	0.314	0.830	-0.257	11.323
0.73	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.73	12	2	0.377	0.139	2.153	
0.73	12	3	0.377	0.353	7.730	
0.73	12	4	0.377	0.139	0.043	
0.73	12	5	0.377	0.377	0.000	

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.73	12	6	0.377	0.893	-0.277	
0.73	12	7	0.377	1.107	-0.485	
0.73	12	8	0.377	0.893	-0.277	8.888
0.73	14	1	0.440	0.440	0.000	
0.73	14	2	0.440	0.076	1.180	
0.73	14	3	0.440	0.290	6.354	
0.73	14	4	0.440	0.076	0.024	
0.73	14	5	0.440	0.440	0.000	
0.73	14	6	0.440	0.956	-0.296	
0.73	14	7	0.440	1.170	-0.512	
0.73	14	8	0.440	0.956	-0.296	6.453
0.73	16	1	0.503	0.503	0.000	
0.73	16	2	0.503	0.013	0.207	
0.73	16	3	0.503	0.227	4.977	
0.73	16	4	0.503	0.013	0.004	
0.73	16	5	0.503	0.503	0.000	
0.73	16	6	0.503	1.019	-0.315	
0.73	16	7	0.503	1.233	-0.540	
0.73	16	8	0.503	1.019	-0.315	4.018

ตารางผนวกที่ ก8 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.28 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.28	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.28	2	2	0.063	0.135	1.037	
0.28	2	3	0.063	0.217	2.357	
0.28	2	4	0.063	0.135	0.021	
0.28	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.28	2	6	0.063	0.261	-0.040	
0.28	2	7	0.063	0.343	-0.074	
0.28	2	8	0.063	0.261	-0.040	3.261
0.28	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.28	4	2	0.126	0.072	0.555	
0.28	4	3	0.126	0.154	1.675	
0.28	4	4	0.126	0.072	0.011	
0.28	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.28	4	6	0.126	0.324	-0.050	
0.28	4	7	0.126	0.406	-0.088	
0.28	4	8	0.126	0.324	-0.050	2.054
0.28	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.28	6	2	0.189	0.009	0.072	
0.28	6	3	0.189	0.091	0.993	
0.28	6	4	0.189	0.009	0.001	
0.28	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.28	6	6	0.189	0.386	-0.059	

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.28	6	7	0.189	0.469	-0.102	
0.28	6	8	0.189	0.386	-0.059	0.847

ตารางผนวกที่ ก9 ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.43 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.43	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.43	2	2	0.063	0.241	2.843	
0.43	2	3	0.063	0.367	6.121	
0.43	2	4	0.063	0.241	0.057	
0.43	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.43	2	6	0.063	0.367	-0.086	
0.43	2	7	0.063	0.493	-0.164	
0.43	2	8	0.063	0.367	-0.086	8.683
0.43	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.43	4	2	0.126	0.178	2.102	
0.43	4	3	0.126	0.304	5.073	
0.43	4	4	0.126	0.178	0.042	
0.43	4	5	0.126	0.126	0.000	

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.43	4	6	0.126	0.430	-0.101	
0.43	4	7	0.126	0.556	-0.185	
0.43	4	8	0.126	0.430	-0.101	6.830
0.43	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.43	6	2	0.189	0.115	1.361	
0.43	6	3	0.189	0.241	4.026	
0.43	6	4	0.189	0.115	0.027	
0.43	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.43	6	6	0.189	0.493	-0.116	
0.43	6	7	0.189	0.619	-0.206	
0.43	6	8	0.189	0.493	-0.116	4.976
0.43	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.43	8	2	0.251	0.053	0.621	
0.43	8	3	0.251	0.179	2.978	
0.43	8	4	0.251	0.053	0.012	
0.43	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.43	8	6	0.251	0.555	-0.131	
0.43	8	7	0.251	0.681	-0.227	
0.43	8	8	0.251	0.555	-0.131	3.122
0.43	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.43	10	2	0.314	-0.010	-0.120	
0.43	10	3	0.314	0.116	1.931	
0.43	10	4	0.314	-0.010	-0.002	

ตารางผนวกที่ ก9 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.43	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.43	10	6	0.314	0.618	-0.146	
0.43	10	7	0.314	0.744	-0.248	
0.43	10	8	0.314	0.618	-0.146	1.268

ตารางผนวกที่ ก10 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.51 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.51	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.51	2	2	0.063	0.298	4.162	
0.51	2	3	0.063	0.447	8.842	
0.51	2	4	0.063	0.298	0.083	
0.51	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.51	2	6	0.063	0.423	-0.118	
0.51	2	7	0.063	0.573	-0.227	
0.51	2	8	0.063	0.423	-0.118	12.624
0.51	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.51	4	2	0.126	0.235	3.284	
0.51	4	3	0.126	0.384	7.599	

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.51	4	4	0.126	0.235	0.066	
0.51	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.51	4	6	0.126	0.486	-0.136	
0.51	4	7	0.126	0.636	-0.251	
0.51	4	8	0.126	0.486	-0.136	10.425
0.51	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.51	6	2	0.189	0.172	2.405	
0.51	6	3	0.189	0.321	6.357	
0.51	6	4	0.189	0.172	0.048	
0.51	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.51	6	6	0.189	0.549	-0.154	
0.51	6	7	0.189	0.699	-0.276	
0.51	6	8	0.189	0.549	-0.154	8.227
0.51	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.51	8	2	0.251	0.109	1.527	
0.51	8	3	0.251	0.259	5.114	
0.51	8	4	0.251	0.109	0.031	
0.51	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.51	8	6	0.251	0.612	-0.171	
0.51	8	7	0.251	0.761	-0.301	
0.51	8	8	0.251	0.612	-0.171	6.028
0.51	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.51	10	2	0.314	0.046	0.648	

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.51	10	3	0.314	0.196	3.872	
0.51	10	4	0.314	0.046	0.013	
0.51	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.51	10	6	0.314	0.675	-0.189	
0.51	10	7	0.314	0.824	-0.326	
0.51	10	8	0.314	0.675	-0.189	3.830
0.51	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.51	12	2	0.377	-0.016	-0.230	
0.51	12	3	0.377	0.133	2.629	
0.51	12	4	0.377	-0.016	-0.005	
0.51	12	5	0.377	0.377	0.000	
0.51	12	6	0.377	0.738	-0.206	
0.51	12	7	0.377	0.887	-0.351	
0.51	12	8	0.377	0.738	-0.206	1.631

ตารางผนวกที่ ก11 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.57 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.57	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.57	2	2	0.063	0.340	5.315	
0.57	2	3	0.063	0.507	11.208	
0.57	2	4	0.063	0.340	0.106	
0.57	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.57	2	6	0.063	0.466	-0.146	
0.57	2	7	0.063	0.633	-0.280	
0.57	2	8	0.063	0.466	-0.146	16.058
0.57	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.57	4	2	0.126	0.277	4.333	
0.57	4	3	0.126	0.444	9.819	
0.57	4	4	0.126	0.277	0.087	
0.57	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.57	4	6	0.126	0.529	-0.165	
0.57	4	7	0.126	0.696	-0.307	
0.57	4	8	0.126	0.529	-0.165	13.601
0.57	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.57	6	2	0.189	0.214	3.351	
0.57	6	3	0.189	0.381	8.431	
0.57	6	4	0.189	0.214	0.067	
0.57	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.57	6	6	0.189	0.592	-0.185	

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.57	6	7	0.189	0.759	-0.335	
0.57	6	8	0.189	0.592	-0.185	11.144
0.57	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.57	8	2	0.251	0.152	2.369	
0.57	8	3	0.251	0.319	7.042	
0.57	8	4	0.251	0.152	0.047	
0.57	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.57	8	6	0.251	0.654	-0.204	
0.57	8	7	0.251	0.821	-0.363	
0.57	8	8	0.251	0.654	-0.204	8.686
0.57	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.57	10	2	0.314	0.089	1.387	
0.57	10	3	0.314	0.256	5.653	
0.57	10	4	0.314	0.089	0.028	
0.57	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.57	10	6	0.314	0.717	-0.224	
0.57	10	7	0.314	0.884	-0.391	
0.57	10	8	0.314	0.717	-0.224	6.229
0.57	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.57	12	2	0.377	0.026	0.405	
0.57	12	3	0.377	0.193	4.264	
0.57	12	4	0.377	0.026	0.008	
0.57	12	5	0.377	0.377	0.000	

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.57	12	6	0.377	0.780	-0.244	
0.57	12	7	0.377	0.947	-0.419	
0.57	12	8	0.377	0.780	-0.244	3.772

ตารางผนวกที่ ก12 ตารางแสดงผลการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.67 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.67	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.67	2	2	0.063	0.411	7.545	
0.67	2	3	0.063	0.607	15.772	
0.67	2	4	0.063	0.411	0.151	
0.67	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.67	2	6	0.063	0.537	-0.197	
0.67	2	7	0.063	0.733	-0.381	
0.67	2	8	0.063	0.537	-0.197	22.693
0.67	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.67	4	2	0.126	0.348	6.391	
0.67	4	3	0.126	0.544	14.140	
0.67	4	4	0.126	0.348	0.128	

ตารางผนวกที่ ก12 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.67	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.67	4	6	0.126	0.599	-0.220	
0.67	4	7	0.126	0.796	-0.413	
0.67	4	8	0.126	0.599	-0.220	19.805
0.67	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.67	6	2	0.189	0.285	5.237	
0.67	6	3	0.189	0.481	12.507	
0.67	6	4	0.189	0.285	0.105	
0.67	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.67	6	6	0.189	0.662	-0.243	
0.67	6	7	0.189	0.859	-0.446	
0.67	6	8	0.189	0.662	-0.243	16.917
0.67	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.67	8	2	0.251	0.222	4.083	
0.67	8	3	0.251	0.419	10.875	
0.67	8	4	0.251	0.222	0.082	
0.67	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.67	8	6	0.251	0.725	-0.266	
0.67	8	7	0.251	0.921	-0.479	
0.67	8	8	0.251	0.725	-0.266	14.028
0.67	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.67	10	2	0.314	0.159	2.929	
0.67	10	3	0.314	0.356	9.242	

ตารางผนวกที่ ก12 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.67	10	4	0.314	0.159	0.059	
0.67	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.67	10	6	0.314	0.788	-0.289	
0.67	10	7	0.314	0.984	-0.511	
0.67	10	8	0.314	0.788	-0.289	11.140
0.67	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.67	12	2	0.377	0.097	1.775	
0.67	12	3	0.377	0.293	7.610	
0.67	12	4	0.377	0.097	0.036	
0.67	12	5	0.377	0.377	0.000	
0.67	12	6	0.377	0.851	-0.312	
0.67	12	7	0.377	1.047	-0.544	
0.67	12	8	0.377	0.851	-0.312	8.252
0.67	14	1	0.440	0.440	0.000	
0.67	14	2	0.440	0.034	0.621	
0.67	14	3	0.440	0.230	5.978	
0.67	14	4	0.440	0.034	0.012	
0.67	14	5	0.440	0.440	0.000	
0.67	14	6	0.440	0.914	-0.336	
0.67	14	7	0.440	1.110	-0.577	
0.67	14	8	0.440	0.914	-0.336	5.363

ตารางผนวกที่ ก13 ตารางแสดงผลการคำนวณโดยใช้ทฤษฎี กังหันน้ำแบบลดแรงเสียดทานชนิด
ใบพัดโค้ง ที่มีความเร็วการไหล 0.73 เมตรต่อวินาที

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.73	2	1	0.063	0.063	0.000	
0.73	2	2	0.063	0.453	9.070	
0.73	2	3	0.063	0.667	18.883	
0.73	2	4	0.063	0.453	0.181	
0.73	2	5	0.063	0.063	0.000	
0.73	2	6	0.063	0.579	-0.232	
0.73	2	7	0.063	0.793	-0.449	
0.73	2	8	0.063	0.579	-0.232	27.222
0.73	4	1	0.126	0.126	0.000	
0.73	4	2	0.126	0.390	7.813	
0.73	4	3	0.126	0.604	17.104	
0.73	4	4	0.126	0.390	0.156	
0.73	4	5	0.126	0.126	0.000	
0.73	4	6	0.126	0.642	-0.257	
0.73	4	7	0.126	0.856	-0.484	
0.73	4	8	0.126	0.642	-0.257	24.075
0.73	6	1	0.189	0.189	0.000	
0.73	6	2	0.189	0.328	6.555	
0.73	6	3	0.189	0.541	15.325	
0.73	6	4	0.189	0.328	0.131	
0.73	6	5	0.189	0.189	0.000	
0.73	6	6	0.189	0.705	-0.282	

ตารางผนวกที่ ก13 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.73	6	7	0.189	0.919	-0.520	
0.73	6	8	0.189	0.705	-0.282	20.928
0.73	8	1	0.251	0.251	0.000	
0.73	8	2	0.251	0.265	5.298	
0.73	8	3	0.251	0.479	13.547	
0.73	8	4	0.251	0.265	0.106	
0.73	8	5	0.251	0.251	0.000	
0.73	8	6	0.251	0.767	-0.307	
0.73	8	7	0.251	0.981	-0.556	
0.73	8	8	0.251	0.767	-0.307	17.781
0.73	10	1	0.314	0.314	0.000	
0.73	10	2	0.314	0.202	4.040	
0.73	10	3	0.314	0.416	11.768	
0.73	10	4	0.314	0.202	0.081	
0.73	10	5	0.314	0.314	0.000	
0.73	10	6	0.314	0.830	-0.332	
0.73	10	7	0.314	1.044	-0.591	
0.73	10	8	0.314	0.830	-0.332	14.634
0.73	12	1	0.377	0.377	0.000	
0.73	12	2	0.377	0.139	2.783	
0.73	12	3	0.377	0.353	9.990	
0.73	12	4	0.377	0.139	0.056	
0.73	12	5	0.377	0.377	0.000	

ตารางผนวกที่ ก13 (ต่อ)

ความเร็ว การไหลของ กระแสน้ำ เมตรต่อวินาที	จำนวนรอบ การหมุน รอบต่อนาที	ใบพัดที่	ความเร็ว กลางใบพัด เมตรต่อ วินาที	ความเร็ว กระทบบ ใบพัด เมตรต่อวินาที	แรงที่กระทำ ต่อใบพัด นิวตัน	ผลรวม แรง นิวตัน
0.73	12	6	0.377	0.893	-0.357	
0.73	12	7	0.377	1.107	-0.627	
0.73	12	8	0.377	0.893	-0.357	11.487
0.73	14	1	0.440	0.440	0.000	
0.73	14	2	0.440	0.076	1.525	
0.73	14	3	0.440	0.290	8.211	
0.73	14	4	0.440	0.076	0.031	
0.73	14	5	0.440	0.440	0.000	
0.73	14	6	0.440	0.956	-0.383	
0.73	14	7	0.440	1.170	-0.662	
0.73	14	8	0.440	0.956	-0.383	8.340
0.73	16	1	0.503	0.503	0.000	
0.73	16	2	0.503	0.013	0.268	
0.73	16	3	0.503	0.227	6.433	
0.73	16	4	0.503	0.013	0.005	
0.73	16	5	0.503	0.503	0.000	
0.73	16	6	0.503	1.019	-0.408	
0.73	16	7	0.503	1.233	-0.698	
0.73	16	8	0.503	1.019	-0.408	5.193



ความเร็วการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.52 เมตรต่อวินาที กังหันหมุน 6.87 รอบต่อนาที ใบพัดตรง

การคิดความเร็วกลางใบของใบพัด

$$V_T = 2\pi RN$$

$$V_T = 2 \times 3.142 \times 0.3 \times (6.87/60)$$

$$V_T = 0.216$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 1

$$F = \rho AV(V - V_T) \times 0$$

$$F = 1000 \times (0.002 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 - 0.216) \times 0$$

$$F = 0 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 2

$$F = \rho AV(V - V_T) \times 1$$

$$F = 1000 \times (0.3 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 - (0.216 \times 0.707)) \times 1$$

$$F = 1.67 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 3

$$F = \rho AV(V - V_T) \times 1$$

$$F = 1000 \times (0.3 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 - 0.216) \times 1$$

$$F = 4.74 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 4

$$F = \rho AV(V - V_T) \times 1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 - (0.216 \times 0.707)) \times 1$$

$$F = 0.03 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 5

$$F = \rho AV(V - V_T) \times 0$$

$$F = 1000 \times (0.002 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 - 0.216) \times 0$$

$$F = 0 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 6

$$F = \rho AV(V + V_T) \times -1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 + (0.216 \times 0.707)) \times -1$$

$$F = -0.13 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 7

$$F = \rho AV(V + V_T) \times -1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 + 0.216) \times -1$$

$$F = -0.23 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 8

$$F = \rho AV(V + V_T) \times -1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 + (0.216 \times 0.707)) \times -1$$

$$F = -0.13 \text{ N}$$

รวมแรงแต่ละใบพัด $0+1.67+4.74+0.03+0-0.13-0.23-0.13 = 5.96 \text{ N}$

$$P = V_T F$$

$$P = 0.216 \times 5.96$$

$$P = 1.28 \text{ watts}$$

ความเร็วการไหลเฉลี่ยเท่ากับ 0.52 เมตรต่อวินาที กังหันหมุน 6.87 รอบต่อนาที ใบพัดโค้ง

การคิดความเร็วกลางใบของใบพัด

$$V_T = 2\pi R N$$

$$V_T = 2 \times 3.142 \times 0.3 \times (6.87/60)$$

$$V_T = 0.216$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 1

$$F = \rho A V (V - V_T) (1 - \cos \theta) \times 0$$

$$F = 1000 \times (0.002 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 - 0.216) \times (1 - (-0.29)) \times 0$$

$$F = 0 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 2

$$F = \rho A V (V - V_T) (1 - \cos \theta) \times 1$$

$$F = 1000 \times (0.3 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 - (0.216 \times 0.707)) \times (1 - (-0.29)) \times 1$$

$$F = 2.16 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 3

$$F = \rho AV(V - V_r)(1 - \cos\theta) \times 1$$

$$F = 1000 \times (0.3 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 - 0.216) \times (1 - (-0.29)) \times 1$$

$$F = 6.12 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 4

$$F = \rho AV(V - V_r)(1 - \cos\theta) \times 1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 - (0.216 \times 0.707)) \times (1 - (-0.29)) \times 1$$

$$F = 0.04 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 5

$$F = \rho AV(V - V_r)(1 - \cos\theta) \times 0$$

$$F = 1000 \times (0.002 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 - 0.216) \times (1 - (-0.29)) \times 0$$

$$F = 0 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 6

$$F = \rho AV(V + V_r)(1 - \cos\theta) \times -1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 + (0.216 \times 0.707)) \times (1 - (-0.29)) \times -1$$

$$F = -0.17 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 7

$$F = \rho AV(V + V_r)(1 - \cos\theta) \times -1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1) \times 0.52 \times (0.52 + 0.216) \times (1 - (-0.29)) \times -1$$

$$F = -0.30 \text{ N}$$

การคิดแรงที่กระทำต่อใบพัดใบที่ 8

$$F = \rho AV(V + V_r)(1 - \cos\theta) \times -1$$

$$F = 1000 \times (0.02 \times 0.1 \times 0.707) \times 0.52 \times (0.52 + (0.216 \times 0.707)) \times (1 - (-0.29)) \times -1$$

$$F = -0.17 \text{ N}$$

รวมแรงแต่ละใบพัด $0 + 2.16 + 6.12 + 0.04 + 0 - 0.17 - 0.30 - 0.17 = 7.68 \text{ N}$

$$P = V_r F$$

$$P = 0.216 \times 7.68$$

$$P = 1.66 \text{ watts}$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-สกุล	นายณัฐวุฒิ จันทเลิศ
เกิดวันที่	3 พฤษภาคม 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมโยธา – ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2554)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน (พ.ศ.2555-2556)