



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

ปริญญา

วิศวกรรมชลประทาน

วิศวกรรมชลประทาน

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การวิเคราะห์ผลของการผลักดันน้ำโดยใบพัดชนิดแกนนอน

Analysis of the Effects of Water Pushing by Horizontal Axis Propeller

นามผู้วิจัย นายสาโรจน์ ศรีชัย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์จระกานต์ ศรีวิชญ์ไมตรี, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิมิตร เจ็ดจันทน์พิพัฒน์, วศ.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์ผลของการผลักดันน้ำโดยใบพัดชนิดแกนนอน

Analysis of the Effects of Water Pushing by Horizontal Axis Propeller

โดย

นายสาโรจน์ ศรีชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารโจน์ ศรีชัย 2557: การวิเคราะห์ผลของการผลัดคั้นน้ำโดยใบพัดชนิดแกนนอน
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมชลประทาน) สาขาวิศวกรรม
ชลประทาน ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์จระกานต์ ศิริวิชญ์ไมตรี, Ph.D. 114 หน้า

ในอุทกภัยน้ำท่วมครั้งใหญ่ในปี พ.ศ. 2554 มีการใช้วิธีการเพิ่มปริมาณการระบายน้ำ
ในแม่น้ำลำคลองโดยใช้วิธีการผลัดคั้นน้ำ การผลัดคั้นน้ำโดยใช้เรือต่างๆ เช่น เรือพาณิชย์และ
ของกองทัพเรือ รวมทั้งเครื่องผลัดคั้นน้ำของกรมชลประทาน การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่จะ
ประยุกต์ใช้แบบจำลองในทางชลศาสตร์ เพื่อหาคำตอบในปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ว่ามีผลอย่างไร
ในทางน้ำ

การทดลองจะศึกษาปรากฏการณ์การผลัดคั้นน้ำในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ใน
สถานการณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดชนิดแกนนอนที่มีขนาดใบพัด 8 cm. และ 20 cm. ผลัดคั้นในทางน้ำ
เปิด ขนาดหน้าตัด กว้าง 30 cm. สูง 40 cm. และยาว 10 m. จากผลการทดลองพบว่า
ในสภาวะที่อัตราการไหลในทางน้ำคงที่ (Fixed flow rate) เมื่อเริ่มเปิดเครื่องผลัดคั้นน้ำ ระดับน้ำ
ด้านเหนือน้ำจะลดลงหรือที่เรียกว่า "Drawdown" ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะยกตัวสูงขึ้น ซึ่งอัตรา
การไหลจะเพิ่มขึ้น แต่เป็นเพียงช่วงเวลาสั้นๆ หลังจากนั้นการผลัดคั้นน้ำจะเข้าสู่ภาวะสมดุล
(Steady state) ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะลดลงกลับมาสู่ระดับเดิมก่อนมีการผลัดคั้นน้ำ ซึ่งสภาวะนี้
จะไม่ช่วยเพิ่มอัตราการไหลในทางน้ำ แต่มีผลทำให้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำลดลงอย่างถาวร ในทาง
กลับกันถ้าทางน้ำมีอัตราการไหลที่เข้ามาเพิ่มทั้งทางด้านข้างหรือตัวทางน้ำเอง Drawdown ที่
เกิดขึ้นด้านเหนือน้ำจะค่อยๆลดลง และระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะยกตัวสูงขึ้นอย่างถาวร ซึ่งใน
ลักษณะเช่นนี้การผลัดคั้นน้ำจะช่วยเพิ่มอัตราการไหลในทางน้ำ จากผลการทดลอง การเพิ่มขึ้น
ของจำนวนใบพัดให้ประสิทธิภาพการผลัดคั้นน้ำมากกว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบใบพัด

ตำแหน่งของการวางใบพัดในหน้าตัดการไหลของน้ำ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางทางน้ำหรือ
ลึกลงไปมากกว่านั้นก็จะทำให้การผลัดคั้นน้ำมีประสิทธิภาพมากกว่าการวางใบพัดไว้ใกล้ผิวน้ำ
จากผลการศึกษาจึงสามารถทราบถึงประสิทธิภาพของการผลัดคั้นน้ำในรูปแบบต่างๆ และ
นำไปใช้ในการบรรเทาอุทกภัยได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

Saroj Sechai 2014: Analysis of the Effects of Water Pushing by Horizontal Axis Propeller. Master of Engineering (Irrigation Engineering), Major Field: Irrigation Engineering, Department of Irrigation Engineering. Thesis Advisor: Mr. Chirakarn Sirivitmaitrie, Ph.D. 114 pages.

According to the major flooding in 2011, water pushing was one of solutions used to increase drainage discharge in rivers and canals. Many types of boats such as break-bulk carrier, naval ship and RID water pusher were used. This study aims to determine the effects by using a physical hydraulic model.

Experiments to study the phenomenon of pushing water in the hydraulics laboratory, the 8 cm. and 20 cm. diameters horizontal axis propellers were used for pushing water in an open channel section size width 30 cm. height 40 cm. and length 10 m. The experiment showed that at fixed flow rate when turn on the water pushing machine causes an increase of downstream water and flow in a short period. After getting into steady state, the decrease of downstream water back to the previous level occurred. At this state, it causes permanent drawdown, but discharge speed in the canal. On the other hand, if the canal has an increase of flow not only from sideward but also through itself, upstream drawdown will slightly decrease and downstream water will permanently rise up. In this case, water pushing will help increase flow speed in the canal. The result shows that increasing the number of blades is more efficient than increasing speed of blades rotation.

The middle or deeper position of blades in a canal section will make the water pushing more efficient and be able to use for flooding mitigation. The results of this study show efficient of various scenarios.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.จิระกานต์ ศิริวิชัยไมตรี ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วราวุธ วุฒิมิษฐ์ ที่ให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนตรวจและปรับแก้วิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณ อ.ดร.พัชรศักดิ์ อาลัย ที่ตรวจและปรับแก้วิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอน และมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

สาโรจน์ ศรีชัย
มิถุนายน 2557

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| สารบัญ | (1) |
| สารบัญตาราง | (2) |
| สารบัญภาพ | (6) |
| คำนำ | 1 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 3 |
| การตรวจเอกสาร | 4 |
| อุปกรณ์และวิธีการ | 40 |
| อุปกรณ์ | 40 |
| วิธีการ | 45 |
| ผลและวิจารณ์ | 52 |
| ผล | 52 |
| วิจารณ์ | 73 |
| สรุปและข้อเสนอแนะ | 79 |
| สรุป | 79 |
| ข้อเสนอแนะ | 80 |
| เอกสารและสิ่งอ้างอิง | 83 |
| ภาคผนวก | 85 |
| ภาคผนวก ก ผลการทดสอบชุดที่ 1 | 86 |
| ภาคผนวก ข ผลการทดสอบชุดที่ 2 | 98 |
| ภาคผนวก ค ผลการทดสอบชุดที่ 3 | 102 |
| ภาคผนวก ง ผลการทดสอบชุดที่ 4 | 104 |
| ภาคผนวก จ ตารางคำนวณโมเมนต์ของใบพัด | 108 |
| ภาคผนวก ฉ การพิสูจน์สมการโมเมนต์ของใบพัด | 112 |
| ประวัติการศึกษาและการทำงาน | 114 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 1 | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s) กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ | 53 |
| 2 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s) กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ | 54 |
| 3 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 60 l/s) กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ | 55 |
| 4 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s) กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1,3 และ 6 ใบ | 56 |
| 5 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s) กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1,3 และ 6 ใบ | 57 |
| 6 | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 60 l/s) ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดใบพัดต่อพื้นที่ หน้าตัดทางน้ำ | 58 |
| 7 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s) กรณีใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ | 59 |
| 8 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s) กรณีใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ | 60 |
| 9 | ตารางระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 60 l/s) กรณีใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 700, 1400 rpm | 61 |
| 10 | การเกิด Drawdownและร้อยละ Drawdown ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. | 62 |
| 11 | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 50 l/s) ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ความเร็วรอบ 2200 rpm | 69 |
| 12 | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s) ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด | 71 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | | หน้า |
|---------------------|---|------|
| 13 | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s) ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด | 72 |
| 14 | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 60l/s) ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด | 73 |
| 15 | อัตราการไหลจริงจากการตวง ก่อนและหลังการผลักดันน้ำของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 3200 rpm | 74 |
| 16 | อัตราการไหลจริงจากการตวง ก่อนและหลังการผลักดันน้ำของ ใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 700 rpm | 74 |
| ตารางผนวกที่ | | |
| ก1 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของ การผลักดันน้ำ ก่อนมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s | 87 |
| ก2 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ ของการผลักดันน้ำ หลังมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (700 rpm) | 88 |
| ก3 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานค และฟรูดนัมเบอร์ของการผลักดันน้ำ หลังมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1700 rpm) | 89 |
| ก4 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลักดันน้ำ หลังมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (3200 rpm) | 90 |
| ก5 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของ การผลักดันน้ำก่อนมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1,3,6 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s | 91 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | | หน้า |
|--------------|---|------|
| ก6 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1700 rpm) | 92 |
| ก7 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1700 rpm) | 93 |
| ก8 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 6 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1700 rpm) | 94 |
| ก9 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงานของการผลัดคั้นน้ำก่อนมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s | 95 |
| ก10 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 20 cm. 1 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (700 rpm) | 96 |
| ก11 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 20 cm. 1 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1400 rpm) | 97 |
| ข1 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ ก่อนมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 40 l/s (2200 rpm) | 99 |
| ข2 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการใช้พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการใช้พลังงานประมาณการที่ 40 l/s (2200 rpm) | 100 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางผนวกที่ | | หน้า |
|--------------|--|------|
| ข3 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังการเพิ่มอัตราการไหล ในทางน้ำของการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหล ประมาณการที่ 40 l/s (2200 rpm) | 101 |
| ค1 | แสดงผลการทดสอบและระดับน้ำ ก่อนและหลัง การผลัดคั้นน้ำด้วย ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 50 l/s ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm ตำแหน่งของใบพัดในหน้าตัดทางน้ำ ที่ระดับต่างๆ | 103 |
| ง1 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของ การผลัดคั้นน้ำก่อนมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ 2 ชุด ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s | 105 |
| ง2 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1400 rpm) | 106 |
| ง3 | แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงาน และฟรูดนัมเบอร์ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s (1700 rpm) | 107 |
| จ1 | แสดงผลการคำนวณโมเมนต์ของใบพัดขนาด 8 cm. อัตราการไหล 20, 40 และ 60 l/s ในทางทฤษฎี | 109 |
| จ2 | แสดงผลการคำนวณโมเมนต์ของใบพัดขนาด 20 cm. อัตราการไหล 20, 40 และ 60 l/s ในทางทฤษฎี | 110 |
| จ3 | แสดงผลการคำนวณโมเมนต์ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. อัตราการไหล 20,40 และ 60 l/s จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ | 111 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 1 | Brass propeller | 4 |
| 2 | 2-Blade propeller | 5 |
| 3 | 3-Blade propeller | 6 |
| 4 | 4-Blade propeller | 7 |
| 5 | 5-Blade propeller | 7 |
| 6 | Fixed pitch propeller | 8 |
| 7 | Controllable pitch propeller | 9 |
| 8 | หน้าตัดการไหลแบบต่างๆ | 10 |
| 9 | ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจำเพาะ กับความลึกการไหลในทางน้ำเปิด รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก | 14 |
| 10 | กราฟพลังงานจำเพาะ ณ อัตราการไหลต่างๆ | 15 |
| 11 | ท้องคลองที่อยู่แนวระนาบเดียวกัน | 15 |
| 12 | ท้องคลองถูกยกระดับขึ้น | 16 |
| 13 | Hydraulic jump | 18 |
| 14 | ปรากฏการณ์น้ำกระโดดและแรงที่เกิดขึ้น | 18 |
| 15 | ตัวอย่างพฤติกรรมของแรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม | 21 |
| 16 | การเคลื่อนย้ายปริมาณ โมเมนตัมของระบบผ่านปริมาตรควบคุม | 22 |
| 17 | การไหลในทางน้ำเมื่อมีการผลัดดัน | 26 |
| 18 | แผนการผลัดดันน้ำ | 31 |
| 19 | Diagram of water level and momentum equation in water pushing | 33 |
| 20 | ชลศาสตร์การผลัดดันน้ำ (Water level on unsteady state) | 35 |
| 21 | ชลศาสตร์การผลัดดันน้ำ (Water level on unsteady state-upstream control) | 35 |
| 22 | ชลศาสตร์การผลัดดันน้ำ (Increase flow rate on upstream) | 36 |
| 23 | ชลศาสตร์การผลัดดันน้ำ (Water level on steady state 2.1) | 36 |
| 24 | ชลศาสตร์การผลัดดันน้ำ (Water level on steady state 2.2) | 37 |
| 25 | กังหันน้ำขนาดเล็กแบบเพลตัน | 38 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 26 | ใบพัดขนาด 8 cm. | 40 |
| 27 | ใบพัดขนาด 20 cm. | 40 |
| 28 | ฟลูมและชุดประกอบการทดลอง | 41 |
| 29 | มอเตอร์และชุดสายพาน | 42 |
| 30 | เครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร (1) | 42 |
| 31 | เครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร (2) | 43 |
| 32 | ทางน้ำจำลอง ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน | 44 |
| 33 | ตำแหน่งของใบพัดในหน้าตัดทางน้ำ | 45 |
| 34 | ภาพตัดด้านข้างฟลูมทดลอง | 46 |
| 35 | การติดตั้งแกนเพลลาใบพัดเข้ากับชุดมอเตอร์ | 47 |
| 36 | การเก็บค่าขณะทดลอง | 48 |
| 37 | ตัวอย่างใบพัดในทางน้ำขณะเริ่มทำการทดลอง | 48 |
| 38 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 20 l/s | 52 |
| 39 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 40 l/s | 53 |
| 40 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 60 l/s | 54 |
| 41 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1,3,6 ใบ อัตราการไหล 20 l/s | 55 |
| 42 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1,3,6 ใบ อัตราการไหล 40 l/s | 56 |
| 43 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1,3,6 ใบ อัตราการไหล 60 l/s | 57 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 44 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 20 l/s | 59 |
| 45 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 40 l/s | 60 |
| 46 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมของ ใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 60 l/s | 61 |
| 47 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบใบพัดกับค่าเฉลี่ย Drawdown ที่เกิดขึ้นขึ้นของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. | 63 |
| 48 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบใบพัดกับค่าเฉลี่ยร้อยละ Drawdown ที่เกิดขึ้นขึ้นของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. | 64 |
| 49 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัด ใบพัด กับ Drawdown ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. | 65 |
| 50 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักดันของใบพัดและ Drawdown ของใบพัด ขนาด 8 cm. ความเร็วรอบใบพัด 700, 1700, 3200 rpm และใบพัด ขนาด 8 cm. 1, 3, 6 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm และใบพัดขนาด 20 cm. ความเร็วรอบใบพัด 700, 1400 ในทางทฤษฎีและจากผลการทดลองในห้อง ปฏิบัติการ ที่อัตราการไหล 20, 40, 60 l/s | 66 |
| 51 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักดันของใบพัดและร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นที่ฟรูดนัมเบอร์ 0.187, 0.266, 0.329 | 67 |
| 52 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ อัตราการไหล 40 l/s | 68 |
| 53 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลอง ของใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ อัตราการไหล 50 l/s | 69 |
| 54 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลอง ของใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด อัตราการไหล 20 l/s | 70 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 55 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด อัตราการไหล 40 l/s | 71 |
| 56 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด อัตราการไหล 60 l/s | 72 |
| 57 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นจากการทดลองด้วยใบพัดแบบต่างๆกับอัตราการไหลที่ใช้ 20, 40, 60 l/s | 75 |
| 58 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของหน้าตัดใบพัดต่อหน้าตัดทางน้ำกับร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้น ใบพัดขนาด 8 cm. 6 ใบ ความเร็วรอบ 1700 rpm ที่อัตราการไหลที่ใช้ 20, 40, 60 l/s | 76 |
| 59 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ใบพัดขนาด 8 และ 20 cm. ความเร็วรอบ 700, 1700 rpm | 77 |
| 60 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ที่ความเร็วต่างๆ | 78 |
| 61 | กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ที่ความเร็วต่างๆ (2) | 81 |
| 62 | ระยะทางการเกิด Drawdown ในทางน้ำ | 82 |

การวิเคราะห์ผลของการผลักดันน้ำโดยใบพัดชนิดแกนนอน

Effects of Water Pushing by Horizontal Axis Propeller Analysis

คำนำ

ในปัจจุบันปัญหาอุทกภัยน้ำท่วมได้กลายเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศในหลายปีที่ผ่านมา เหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่ ปี 2554 อุทกภัยได้สร้างความเดือดร้อนให้ประชาชนในพื้นที่ต่างๆ หลายจุด โดยมีประชาชนที่ได้รับผลกระทบมากกว่า 12.8 ล้านคน ธนาคารโลกได้ประเมินมูลค่าความเสียหายสูงถึง 1.44 ล้านล้านบาท (Time, December 2-2011)

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตมรสุม ซึ่งมีฝนตกชุกและมีปริมาณฝนสูง มีแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นแม่น้ำสายหลัก ที่สำคัญของประเทศ ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นที่ราบลุ่มมีพื้นที่รับน้ำ (Watershed) ประมาณ 160,000 ตารางกิโลเมตรหรือประมาณหนึ่งในสามของพื้นที่ประเทศ รับน้ำบางส่วนจากตอนเหนือของพื้นที่ซึ่งมีระดับสูงกว่า และไหลผ่านกรุงเทพมหานคร เพื่อลงสู่ทะเลที่ปากอ่าวไทย ด้วยลำน้ำขนาดใหญ่ จากภัยธรรมชาติที่ผ่านมาจึงเกิดความรุนแรงมากกว่าลุ่มน้ำอื่น การแก้ปัญหา น้ำท่วมฉับพลันทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น การเปิดพื้นที่ทุ่งน้ำท่วม การใช้อุโมงค์ยักษ์กรุงเทพมหานคร ใช้เครื่องผลักดันน้ำ ฯลฯ

รัฐบาลจึงได้นำเครื่องผลักดันน้ำออกมาใช้ช่วยระบายน้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยาให้ไหลลงสู่ อ่าวไทยเร็วขึ้น โดยได้รับความร่วมมือจากเรือของทางกองทัพเรือและ เรือพาณิชย์ของชาวบ้าน มาช่วยกันเปิดเครื่องเพื่อช่วยผลักดันน้ำในแม่น้ำเจ้าพระยาลงสู่อ่าวไทย และกระจายเครื่อง ผลักดันน้ำ ไปตามคูคลองต่างๆ

การผลักดันน้ำด้วยใบพัดเป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายน้ำ ในทางน้ำเปิดเช่น คลองระบายน้ำ แม่น้ำธรรมชาติ หรือ แม้กระทั่งน้ำที่กำลังท่วมทุ่ง โดยไม่ต้อง เปลี่ยน แปลงลักษณะทางกายภาพของทางน้ำ เหมาะสมที่จะทำในทางน้ำที่ต้องการเพิ่มการระบาย น้ำหรือทางน้ำจุดที่เป็นคอขวดของการระบายน้ำ ซึ่งตัวใบพัดจะช่วยเร่งความเร็วของน้ำเป็นการ ถ่ายเทพลังงานของเครื่องยนต์สู่น้ำโดยผ่านการหมุนของใบพัด ซึ่งเป็นการเปลี่ยนพลังงานกลของ

เครื่องยนต์ให้เป็นพลังงานจลการไหลของน้ำ การเพิ่มความเร็วการไหลของน้ำในทางน้ำ ถ้าทำได้ อย่างมีประสิทธิภาพจะเพิ่มปริมาณการไหลได้เพิ่มขึ้น ในทางน้ำธรรมชาติ เมื่อมีปริมาณน้ำเพิ่ม มากขึ้นหรือเกิดสภาวะน้ำท่วม ปริมาณการไหลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ระดับน้ำใน ทางน้ำ เพิ่มสูงขึ้น ในทางเดียวกับการผลัดคันน้ำ ถ้าการผลัดคันน้ำมีประสิทธิภาพ สามารถทำให้ปริมาณ การไหลของน้ำเพิ่มมากขึ้น ระดับน้ำหลังจากจุดที่ผลัดคันน้ำจะเพิ่มระดับสูงขึ้นตามปริมาณ การไหลที่มากขึ้น

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในจำลองการไหลและการผลัดคันน้ำขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการ ที่เกิดขึ้น โดยใช้แบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical model) และสามารถนำผลของงานวิจัยไปใช้ ในการวางแผนรับมือกับอุทกภัยน้ำท่วมที่อาจเกิดขึ้นได้อีกในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ทำการศึกษาวิธีการและประสิทธิภาพของการผลักดันน้ำของใบพัดชนิดแกนนอน โดยแบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical model)

ขอบเขตการศึกษา

ทดลองผลักดันน้ำโดยใช้เครื่องยนต์ขับเคลื่อนใบพัดในทางน้ำเปิดจำลองในลักษณะต่างๆ โดยใช้เปลี่ยนความเร็วการหมุนใบพัด เพิ่มจำนวนใบพัด และเปลี่ยนลักษณะการไหลในทางน้ำ ทำการศึกษาภายในห้องทดลองปฏิบัติการชลศาสตร์ (Hydraulic laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน ภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

การตรวจเอกสาร

การศึกษาในเรื่องของการผลักดันน้ำ จำเป็นต้องมีพื้นฐานความเข้าใจทฤษฎีด้านต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกังหันน้ำแบบต่างๆรวมไปถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องของทฤษฎี หลักการ และเหตุผล มีดังต่อไปนี้

ใบพัด (Propeller)

ใบพัด ตั้งแต่ 2 ใบขึ้นไป ที่ติดอยู่บนเพลารหมุน (Shaft) สำหรับขับเคลื่อนของไหล เช่น ใบพัดที่ติดตั้งภายในถังผสมของเหลว (Mixer) พัดลม (Fan) ปั๊ม (Pump) เรือหรือพาหนะทางน้ำ เพื่อให้ของเหลว หรืออากาศ เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน (Axial flow) ตัวอย่างดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Brass propeller

ที่มา: ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร (2010)

การเคลื่อนที่ของเรืออยู่บนพื้นฐานหลักการของ Bernoulli และกฎข้อที่สามของนิวตัน ความแตกต่างความดันจะเกิดขึ้นที่ด้านข้างหน้าและหลังของใบพัด เกิดเป็นแรงดันของน้ำที่เร่งออกไปหลังใบพัด แรงผลักดันจากใบพัดถูกส่งไปยังเรือ ระบบส่งกำลังซึ่งประกอบด้วย การเคลื่อนไหวที่เกิดจากการหมุนเพลาคือข้อเหวี่ยงของเครื่องยนต์ แกนเพลากลางและแบร์ริงของเพลาท้ายจนถึงตัวใบพัด

วัสดุ ใบพัดเรือส่วนใหญ่ทำจากวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน เรือที่ใช้งานในน้ำทะเล ซึ่งน้ำทะเล เป็นตัวเร่งการกัดกร่อน วัสดุที่ใช้สำหรับการทำใบพัดทะเลเป็นโลหะผสมอลูมิเนียม และ สแตนเลส วัสดุที่นิยมใช้อื่นๆเป็นโลหะผสมของนิกเกิล อลูมิเนียมและทองแดงซึ่งเป็น 10 ~ 15% เบากว่าวัสดุอื่น ๆ และมีความแข็งแรงสูง

ชนิดของใบพัด

- การจำแนกประเภทตามจำนวนใบ

การใช้งานในรูปแบบต่างๆทำให้จำนวนใบพัดแตกต่างกันไป ใบพัด 2 ถึง 4 ใบพัด และบางครั้งก็มี 5 ใบพัด แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ 3 และ 4 ใบ

ใบพัด 2 ใบ 2-Blade: ใบพัด ขนาด 2 ใบ จะมีค่าแรงต้าน (Drag configuration) ต่ำที่สุด ราคา ปานกลางเมื่อเทียบกับใบพัดชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 2 2-Blade propeller

ที่มา: Flex of old sailboat propellers (2010)

ใบพัด 3 ใบ 3-Blade: ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าใบพัดชนิดอื่น ปกติใช้โลหะผสมอลูมิเนียม ให้ประสิทธิภาพเรื่องความเร็วและ ความเร่งดีกว่าประเภทอื่น แต่มีประสิทธิภาพด้อยลงเมื่อใช้งาน ที่ความเร็วใบพัดต่ำ



ภาพที่ 3 3-Blade propeller

ที่มา: Marine insight (2010)

ใบพัด 4 ใบ 4-Blade: ตัวใบพัดทำจาก โลหะผสมเหล็กสแตนเลส มีความแข็งแรงทนทาน มีประสิทธิภาพดีที่ความเร็วรอบต่ำ เหมาะกับการใช้งานในทะเล และประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง กว่าใบพัดชนิดอื่น



ภาพที่ 4 4-Blade propeller

ที่มา: Marine insight (2010)

ใบพัด 5 ใบ 5-Blade: ราคาสูงที่สุด เกิดการสั่นสะเทือนต่อการใช้งานน้อยที่สุด มีประสิทธิภาพสูงสุดกับการใช้งานในทะเล



ภาพที่ 5 5-Blade propeller

ที่มา: Marine insight (2010)

- การจำแนกประเภทจากมุม Pitch ของใบ มีสองแบบคือ

Fixed pitch propeller : ใบพัดจะยึดติดกับแกนอย่างถาวร ไม่สามารถปรับเปลี่ยนมุมที่บิดได้ การผลิตและติดตั้งง่าย ราคาต่ำ



ภาพที่ 6 Fixed pitch propeller

ที่มา: Ngc Marine Propulsion Europe (2013)

Controllable Pitch Propeller : มุมบิดของใบพัดสามารถปรับเปลี่ยนได้ ไปตามการใช้งาน ในลักษณะต่างๆ มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงกว่าใบพัดแบบ Fixed pitch propeller แต่การสร้างหรือการผลิตยุ่งยากและมีราคาสูง



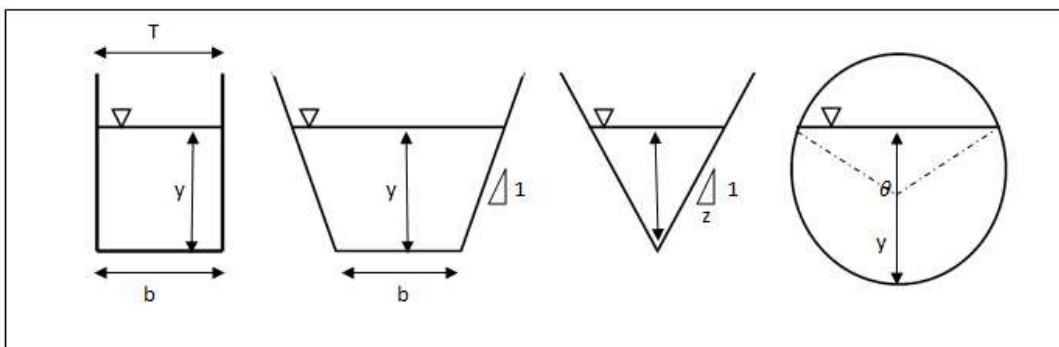
ภาพที่ 7 Controllable pitch propeller

ที่มา: Kamome-Propeller (2009)

ทางน้ำเปิด (Open channel)

การไหลในทางน้ำเปิด คือ การไหลที่ผิวของเหลวนั้นเปิดสู่บรรยากาศ เช่น การไหลในแม่น้ำ ลำคลอง หรือการไหลในท่อแบบไม่เต็มท่อ เป็นต้น ผิวอิสระของการไหลจะต้องสัมผัสกับบรรยากาศ หลักที่ทำให้เกิดการไหลประกอบด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อมวลของไหลแรง เนื่องจากความดันน้ำและแรงเฉือนที่ต้านทานการไหลของของไหล

ทั้งนี้ หากพิจารณาการไหลในทางน้ำที่มีหน้าตัดคงที่ ลักษณะทางเรขาคณิตของทางน้ำสามารถหาค่าได้จากภาพที่ 8



ตารางคุณสมบัติของหน้าตัดการไหลชนิดต่าง ๆ

| Section | Symbol | Rectangular | Trapezoidal | Triangular | Circular |
|------------------|--------|---------------------|--|---------------------------------|---|
| Area | A | by | $(b + zy)y$ | zy^2 | $\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)D^2$ |
| Wetted perimeter | P | $b + 2y$ | $(b + zy)\sqrt{1 + z^2}$ | $2y\sqrt{1 + z^2}$ | $\frac{1}{2}\theta D^2$ |
| Hydraulic Radius | R | $\frac{by}{b + 2y}$ | $\frac{(b + zy)y}{(b + zy)\sqrt{1 + z^2}}$ | $\frac{zy^2}{2y\sqrt{1 + z^2}}$ | $\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)D$ |
| Top width | B | b | $b + 2zy$ | $2zy$ | $D \sin \frac{\theta}{2}$ |
| Hydraulic depth | D | y | $\frac{(b + 2zy)y}{(b + 2zy)}$ | $\frac{y}{2}$ | $\left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2}}\right) \frac{D}{8}$ |

ภาพที่ 8 หน้าตัดการไหลแบบต่างๆ

ที่มา: ปรียาพร (2552)

การจำแนกประเภทของการไหล (Classification of flow)

การจำแนกประเภทของการไหล สามารถพิจารณาได้จากเกณฑ์ต่างๆ ซึ่งในการทดลองนี้ เราจะใช้เกณฑ์ในเรื่องของรูปแบบการไหลกับเวลาและตามสภาวะการไหล

การแบ่งประเภทของการไหลในทางน้ำเปิด

ในการวิเคราะห์ด้านชลศาสตร์ ประเด็นในการวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทของการไหลในทางน้ำเปิดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ จำแนกโดยพิจารณาจากรูปแบบของการไหล (Type of flow) และจำแนกโดยพิจารณาจากสภาวะของการไหล (State of flow)

1. การจำแนกประเภทการไหลในทางน้ำเปิดโดยพิจารณาจากรูปแบบของการไหล (Type of flow) พิจารณาการเปลี่ยนแปลงกับเวลา

1.1 การไหลคงที่ (Steady flow) คือการไหลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา กล่าวคือตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล เช่น ความลึก (y) ความเร็ว (V) อัตราการไหล (Q) พื้นที่หน้าตัดการไหล (A) จะคงที่ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา

$$\frac{d}{dt}(y, A, v, Q) = 0$$

1.2 การไหลไม่คงที่ (Unsteady flow) คือการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา กล่าวคือตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล เช่น ความลึก ความเร็ว อัตราการไหล พื้นที่หน้าตัดการไหล ไม่คงที่ตลอดช่วงเวลาที่พิจารณา

$$\frac{d}{dt}(y, A, v, Q) \neq 0$$

2. การจำแนกประเภทตามสภาวะของการไหล (State of flow)

ตัวเลขฟรูด (Fr) เป็นค่าที่ใช้แสดงรูปแบบการไหลของการไหลได้วิกฤต (Subcritical flow), การไหลวิกฤต (Critical flow) และการไหลเหนือวิกฤต (Supercritical flow) จากสมการดังต่อไปนี้

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy_h}}$$

เมื่อ y_h คือ ความลึกชลศาสตร์ = A/T

T คือ ความกว้างของหน้าตัดการไหล

$Fr < 1.0$ คือ การไหลได้วิกฤต

$Fr = 1.0$ คือ การไหลวิกฤต

$Fr > 1.0$ คือ การไหลเหนือวิกฤต

สมการแมนนิง (Manning equation)

การไหลสม่ำเสมอ (Uniform flow) หรือการไหลปกติ (Normal flow) คือ การไหลในทางน้ำเปิดที่มีหน้าตัดคงที่ตลอดแนวการไหล โดยมีความลึกเท่ากันในช่วงการไหลที่พิจารณา โดยค่าความเร็วของการไหลชนิดนี้ สามารถหาค่าได้จากสมการของแมนนิง ดังนี้

ระบบ SI :

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

ระบบอังกฤษ :

$$v = \frac{1.49}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อ n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของแมนนิง

R คือ รัศมีชลศาสตร์ = A/P

A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

P คือ เส้นขอบเปียก

S คือ ความลาดชัน

จากคุณสมบัติของสมการต่อเนื่องที่กล่าวไว้ว่า ในช่วงทางน้ำที่พิจารณาอัตราการไหลเข้าจะมีค่าเท่ากับอัตราการไหลออก นั่นคือ

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล

v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

จากสมการแมนนิ่งและสมการต่อเนื่อง จะได้ว่า

ระบบ SI :
$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

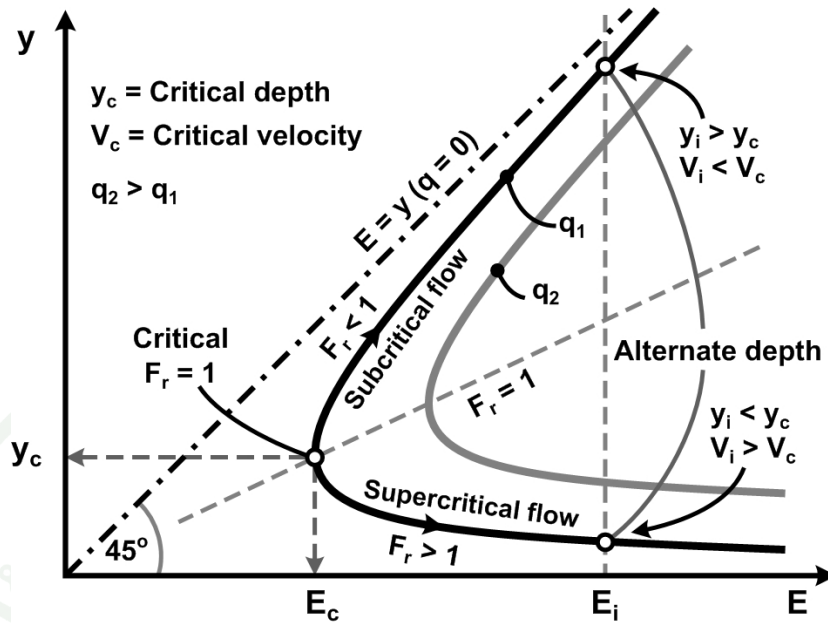
ระบบอังกฤษ :
$$Q = \frac{1.49}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

พลังงานจำเพาะ (Specific energy)

จากเสดทั้งหมดเท่ากับ
$$E = z + y + \frac{\alpha v^2}{2g}$$

สำหรับการไหลในทางน้ำเปิด
$$E = y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}$$

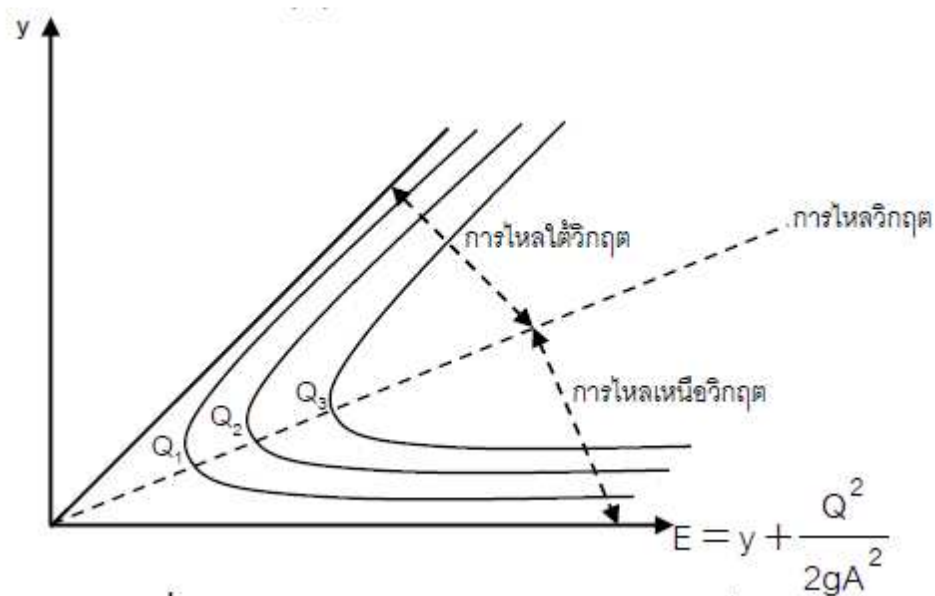
เรียกว่า พลังงานจำเพาะ เมื่อให้ $z = 0$



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจำเพาะ กับความลึกของการไหลในทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ที่มา: ชาญดร (2553)

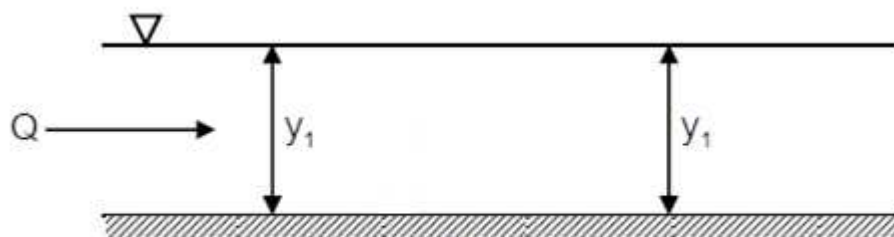
ในกรณีที่มีค่าอัตราการไหล (Q) หลายค่า จะทำให้ค่าพลังงานจำเพาะที่เกิดขึ้น ดังกราฟ ภาพที่ 10



ภาพที่ 10 กราฟพลังงานจำเพาะ ณ อัตราการไหลต่าง ๆ

ที่มา: ปรีชาพร (2552)

ในกรณีที่ท้องคลองอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน และตามกฎอนุรักษ์พลังงาน พลังงานจำเพาะที่ความลึกการไหล y_1 และ y_2 สามารถพิจารณาค่าได้จากสมการ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 11 ท้องคลองอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน

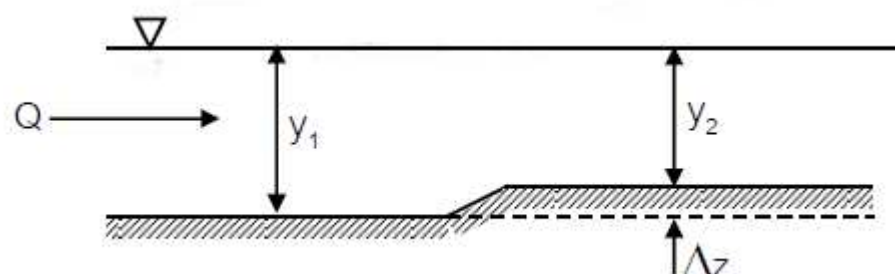
ที่มา: ปรีชาพร (2552)

สมการท้องคลองอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน;

$$E_1 = E_2$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

ในกรณีที่ท้องคลองถูกยกระดับขึ้น Δz และตามกฎอนุรักษ์พลังงาน พลังงานจำเพาะที่ความลึกการไหล y_1 และ y_2 สามารถพิจารณาค่าได้จากสมการ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 12 ท้องคลองถูกยกระดับขึ้น

ที่มา: ปรีชาพร (2552)

สมการท้องคลองถูกยกระดับขึ้น ;

$$E_1 = E_2$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = (y_2 + \Delta z) + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อ $Q = 0$, $E = y$ เส้นกราฟเป็นเส้นตรงทำมุม 45°
2. เมื่อ $Q > 0$, E จะได้ค่าความลึก 2 ค่า หรือเรียกว่า ความลึกสลับ (Alternate depth)

ค่ามาก หรือ y_1 เรียกว่า ความลึกระดับสูง (High state) ค่าน้อย หรือ y_2 เรียกว่า ความลึกระดับต่ำ (Low state)

3. ที่การไหลวิกฤตจะมี ความลึกวิกฤต (Critical depth; y_c) ความเร็ววิกฤต (Critical velocity; v_c) อัตราการไหลวิกฤต (Critical discharge; Q_c) และ ความลาดชันวิกฤต (Critical slope; S_c),

4. การไหลวิกฤต จะมีค่า Fr เท่ากับ 1.0

5. เมื่อ $y = y_1 > y_c$ เรียกว่า การไหลใต้วิกฤต และมี Fr น้อยกว่า 1.0

$y = y_2 < y_c$ เรียกว่า การไหลเหนือวิกฤต และมี Fr มากกว่า 1.0

6. สมการที่ใช้หาค่า y_c สำหรับทางน้ำเปิดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

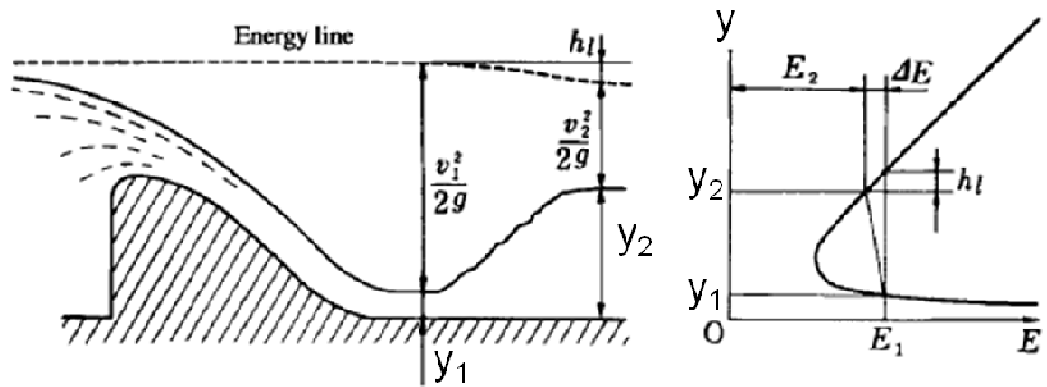
$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; \quad \text{เมื่อ } q = \frac{Q}{b} = \text{อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง}$$

$$Fr = 1 = \frac{v_c^2}{gy_c}$$

$$E_c = y_c + \frac{v_c^2}{2g} = y_c + \frac{y_c}{2} = \frac{3}{2}y_c$$

ปรากฏการณ์น้ำกระโดด (Hydraulic jump)

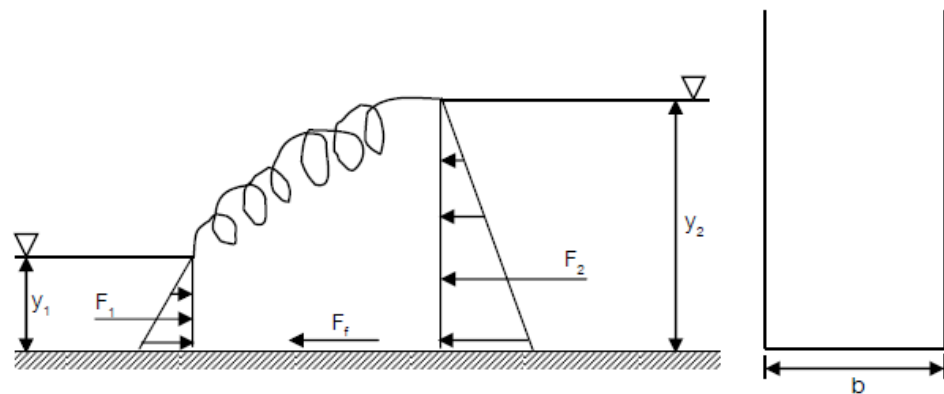
ปรากฏการณ์น้ำกระโดดเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของน้ำ มักจะเกิดขึ้นบริเวณท้ายฝาย น้ำล้น ท่อลอด และประตูน้ำแบบไหลลอดทั้งประตูบานตรงและประตูบานโค้ง โดยปรากฏการณ์น้ำกระโดดมีคุณสมบัติของการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการไหลจากการไหลเหนือวิกฤตเป็นการไหลวิกฤต และสุดท้ายเป็นการไหลใต้วิกฤต ทั้งนี้ ความลึกของการไหลจะมากขึ้น แต่ความเร็วของกระแสน้ำจะลดลง ดังภาพที่ 13 ต่อไปนี้



ภาพที่ 13 Hydraulic jump

ที่มา: รัชฎดร (2553)

เมื่อพิจารณาปรากฏการณ์น้ำกระโดดด้วยสมการโมเมนตัม จะได้



ภาพที่ 14 ปรากฏการณ์น้ำกระโดดและแรงที่เกิดขึ้น

ที่มา: ปรียาพร (2552)

สมการโมเมนตัม : $\Sigma F = \rho Q(v_2 - v_1)$

จะได้ $F_1 - F_2 - F_f = \rho Q(v_2 - v_1)$

เมื่อ

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma y_1^2 b$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \gamma y_2^2 b$$

$$F_f = 0$$

คือ แรงเสียดทาน (ระยะทางในการเกิดน้ำกระโดดไม่มากจึงให้เป็นศูนย์)

สมการต่อเนื่อง :

$$Q_1 = Q_2$$

$$b y_1 v_1 = b y_2 v_2$$

จะได้

ถ้าทราบ y_1, v_1 หา y_2 ได้

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right) \quad \text{เมื่อ } F_{r1} = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}}$$

ถ้าทราบ y_2, v_2 หา y_1 ได้

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r2}^2} - 1 \right) \quad \text{เมื่อ } F_{r2} = \frac{v_2}{\sqrt{g y_2}}$$

พลังงานที่สูญเสียไป

$$h_L = \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad \text{หรือ } h_L = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2}$$

ปรากฏการณ์น้ำกระโดด มีความสำคัญต่อการไหลในทางน้ำเปิด ดังนี้ (ปรีชาพร, 2552)

1. ทำให้การไหลมีการสูญเสียพลังงาน เช่น การไหลออกจากเขื่อน ฝ่ายน้ำล้น เป็นต้น
2. ขกระดับน้ำที่สูงขึ้น สำหรับจ่ายน้ำให้คลองส่งน้ำ

3. เพิ่มอัตราการไหลลดประตุน้ำ โดยปรากฏการณ์น้ำกระโดด จะรักษาระดับน้ำเดิม หลังประตุน้ำให้ต่ำ โดยไม่เกิดการไหลจมน้ำลดประตุน้ำ (Submerged flow)

4. ลดแรงดันจากน้ำใต้ดิน (Uplift pressure) ที่คันอาคารชลศาสตร์ โดยการทำให้ระดับน้ำบนอาคารสูงขึ้น

5. ช่วยในการผสมสารเคมี สำหรับบำบัดน้ำเสีย

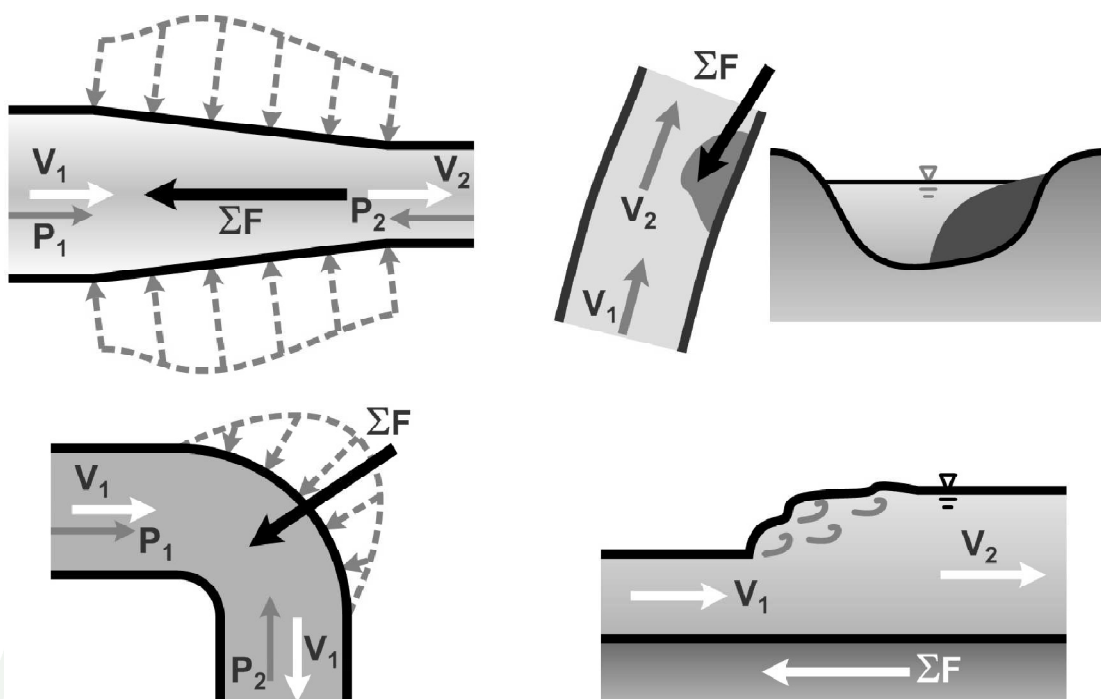
6. ช่วยให้น้ำสัมผัสอากาศมากขึ้นและใช้ในขบวนการเติมคลอรีนในการขจัดน้ำเสีย

7. ช่วยขจัดฟองอากาศจากการไหลในทางน้ำเปิดรูปวงกลม

8. ปรากฏการณ์น้ำกระโดด เกิดขึ้นที่ใด จะทำให้ระบุคุณสมบัติพิเศษของการไหลได้ เช่น การไหลเหนือหรือใต้วิกฤต และตำแหน่งหน้าตัดควบคุม เป็นต้น

สมการโมเมนตัม (Momentum equation)

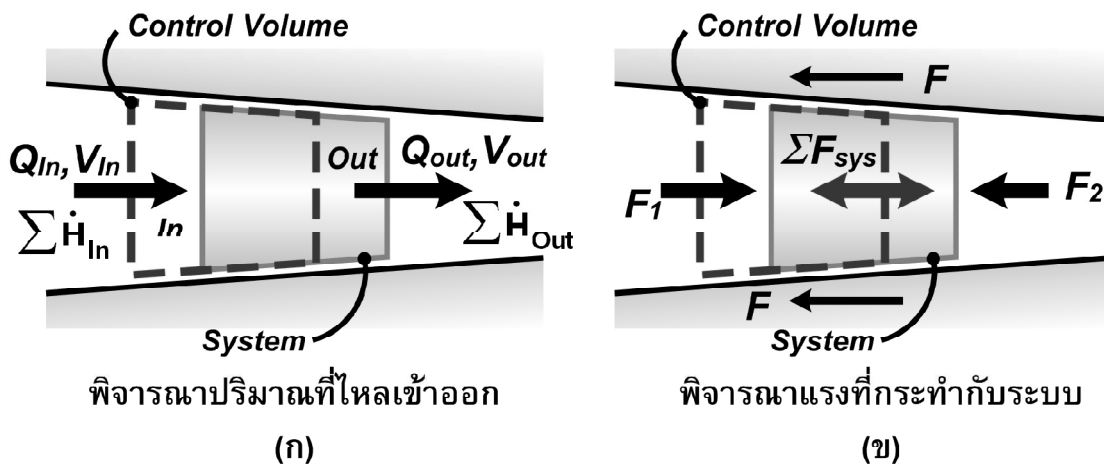
หากพิจารณาวัตถุใดๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำไม่สมดุล จะเกิดความเร่งขึ้น ทำให้ขนาดหรือ ทิศทาง ของความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็ว จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ถ้าวัตถุนั้นมวลมาก หรือแรงที่มากระทำมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วถ้าวัตถุนั้นมวลน้อย หรือแรงที่มากระทำมีค่ามาก เป็นไปตามกฎอิมพัลส์โมเมนตัม (Impulse momentum) ในของไหลก็เช่นเดียวกัน หากการไหลมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางหรือขนาดของความเร็ว นั้นเป็นผลมาจากแรงภายนอกที่มากระทำ เช่น ในกรณีของการไหลในท่อที่มีการลดขนาดหรือข้ออชนิดต่างๆ บริเวณผิวของผนังท่อจะส่งแรงกระทำไปยังกับของไหล ทำให้ขนาดและทิศทางของความเร็วเปลี่ยนแปลงไป หรือในกรณีการไหลในทางน้ำเปิด แรงเสียดทานที่ผิวของทางน้ำ หรือแรงดันจากสิ่งกีดขวางจะทำให้ความเร็วของการไหลเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ตัวอย่างพฤติกรรมของแรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม

ที่มา: ชาญดร (2553)

สมการโมเมนตัมเชิงเส้น (Linearly momentum equation) พิจารณาการเคลื่อนย้ายปริมาณโมเมนตัมของระบบผ่านปริมาตรควบคุม โดยสมมุติให้การไหลมีเพียงทิศทางเดียว และไม่มี การไหลทางด้านข้างดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การเคลื่อนย้ายปริมาณโมเมนตัมของระบบผ่านปริมาตรควบคุม

ที่มา: รัชฎดร (2553)

ภาพที่ 24 เป็นการแสดงสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับระบบ โดยภาพที่ 16 (ก) เป็นการพิจารณาเกี่ยวกับ อัตราการไหลความเร็ว และ โมเมนตัม ที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุม ส่วนภาพที่ 16 (ข) พิจารณาเฉพาะ แรงภายนอกที่กระทำกับระบบ

จากสมการการเคลื่อนย้ายของเรย์โนลด์ โดยพิจารณาปริมาณโมเมนตัม (H) ที่อยู่ในระบบ จะได้ว่า

$$\frac{DH_{\text{sys}}}{Dt} = \frac{\partial H_{\text{cv}}}{\partial t} - \Sigma H_{\text{in}} + \Sigma H_{\text{out}}$$

เมื่อ H คือ โมเมนตัม

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

$$\Sigma F = ma = m \frac{dv}{dt}$$

$$\Sigma F(dt) = m(dv)$$

ซึ่งจากสมการคือ กฎของอินพัลส์โมเมนตัม (Impulse momentum) โดยเราจะเรียกเทอมของ $\Sigma F(dt)$ ว่า อินพัลส์ (Impulse) ส่วนเทอมของ $m(dV)$ คือ การเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม

เมื่อพิจารณา โมเมนตัม และแรงที่กระทำกับระบบในภาพที่ 16-ก จะได้ว่า

$$\Sigma F_{\text{sys}}(dt) = m_{\text{sys}}(dV_{\text{sys}})$$

$$\Sigma F_{\text{sys}} = \frac{DH_{\text{sys}}}{Dt}$$

ซึ่งความหมายของสมการนี้คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงเส้นของระบบ จะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของแรงภายนอกที่กระทำกับระบบ (ΣF_{sys})

เมื่อแทนค่าสมการ ΣF_{sys} ในสมการ กฎของอินพัลส์จะได้ว่า

$$\Sigma F_{\text{sys}} = \frac{\partial H_{\text{cv}}}{\partial t} - \Sigma H_{\text{in}} + \Sigma H_{\text{out}}$$

ถ้าปริมาณของไหล (ระบบ) ภายในปริมาตรควบคุมมีขนาดคงที่ ปริมาตรควบคุมคงตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) และสภาพการไหลไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Steady flow) จะได้ว่า

$$\frac{\partial H_{\text{cv}}}{\partial t} = 0$$

และ

$$\Sigma H = \Sigma \left(\frac{mV}{dt} \right) = \Sigma \frac{(\rho V) * v}{dt}$$

∴

$$\Sigma H = \Sigma (\rho * Q * V)$$

ดังนั้น สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\Sigma F_{\text{sys}} = \Sigma (\rho_{\text{out}} * Q_{\text{out}} * V_{\text{out}}) - \Sigma (\rho_{\text{in}} * Q_{\text{in}} * V_{\text{in}})$$

ซึ่งสมการนี้ก็คือ สมการโมเมนตัม (Momentum equation) ของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) ภายใต้การไหลที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Steady state)

การวิเคราะห์การดันน้ำในแม่น้ำ

ในสภาพแวดล้อมของแม่น้ำธรรมชาติ การไหลของน้ำเป็นไปตามแรงโน้มถ่วงของโลก จากที่สูงลงสู่ที่ต่ำ ความเร็วการไหลของน้ำในแม่น้ำธรรมชาติที่ไม่ถูกรบกวน จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกันคือ ความลาดเทของลำน้ำ ความขรุขระของพื้นลำน้ำ สิ่งกีดขวางลำน้ำ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการไหลของน้ำทั้งสิ้น ดังนั้นเมื่อสภาวะแวดล้อมไม่ได้ถูกเปลี่ยนแปลง การเพิ่มปริมาณการไหลจะส่งผลให้ระดับน้ำสูงมากขึ้นและความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย

ดังนั้น การผลักดันน้ำที่มีประสิทธิภาพ จะสามารถเพิ่มอัตราการไหลของน้ำได้มากขึ้น โดยในสภาวะเริ่มต้นที่บริเวณใบพัดที่เริ่มทำงานความเร็วการไหลจะเพิ่มมากขึ้น น้ำจะถูกดันให้ไหลเข้าปะทะกับระดับน้ำด้านท้ายน้ำ จากพลังงานจลน์(ความเร็ว) จะเปลี่ยนไปเป็น พลังงานศักย์ (ระดับน้ำ) ที่เพิ่มมากขึ้นด้านท้ายน้ำ และเมื่อมวลน้ำด้านเหนือน้ำของใบพัดถูกดูดเข้าสู่ใบพัดมากขึ้น ทำให้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำลดลง

จากนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในบริเวณใกล้เคียงใบพัดซึ่งสภาวะชั่วขณะหนึ่งเท่านั้น ระดับความแตกต่างระหว่างระดับน้ำด้านเหนือน้ำของใบพัดกับระดับน้ำในแม่ที่ห่างออกไปจะทำให้ความเร็วการไหลของน้ำในบริเวณนั้นเพิ่มมากขึ้นเพื่อที่จะลดความแตกต่างของระดับน้ำระหว่างสองจุด ส่งผลให้เกิดการเพิ่มอัตราการไหลมากขึ้น

เมื่อมีปริมาณน้ำไหลเข้ามาสู่ใบพัดมากขึ้น จะทำให้มีน้ำไหลผ่านใบพัดด้วยความเร็วสูงมากขึ้นตามมา ดังนั้นน้ำที่ไหลในลำน้ำด้านท้ายน้ำหลังจากที่ถูกผลักดันจะเพิ่มระดับสูงขึ้นตามธรรมชาติการเพิ่มอัตราการไหลของลำน้ำธรรมชาติ

ทฤษฎีการผลักดันน้ำ

การผลักดันน้ำเป็นการส่งถ่ายพลังงานจากเครื่องจักรกลลงสู่น้ำ การเพิ่มพลังงานให้กับน้ำ จะส่งผลให้ความเร็วและแรงดันของมวลน้ำในบริเวณนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ความเร็วการไหลของน้ำในช่องทางน้ำขนาดเท่าใบพัดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณรอบนอกของใบพัด เมื่อความเร็วของการไหลในช่องใบพัดได้เพิ่มมากขึ้น ปริมาณการไหลโดยรวมก็เพิ่มมากขึ้นด้วยตามสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation)

$$Q_{\text{total}} = V_{\text{propeller}} A_{\text{propeller}} + V_{\text{outside}} A_{\text{outside}} \quad \dots(1)$$

$$Q_{\text{total}} = \text{Total discharge (m}^3/\text{s)}$$

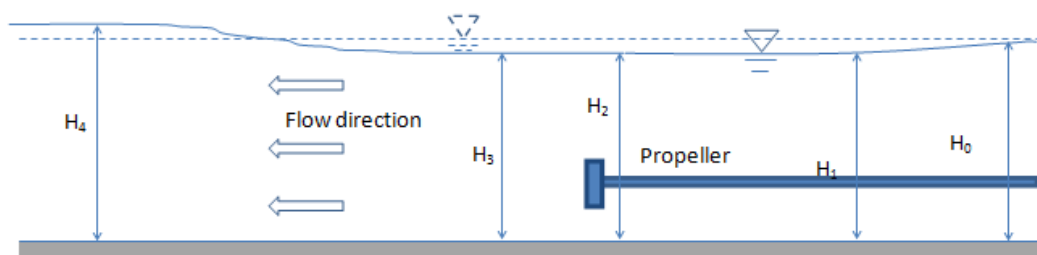
$$V_{\text{propeller}} = \text{Flow velocity in propeller area (m/s)}$$

$$A_{\text{propeller}} = \text{Propeller area (m}^2\text{)}$$

$$V_{\text{outside}} = \text{Outside propeller velocity (m/s)}$$

$$A_{\text{outside}} = \text{Outside propeller area (m}^2\text{)}$$

การที่ใบพัดผลักดันน้ำด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วของการไหลปกติของทางน้ำ ทำให้เกิดการเพิ่มของอัตราการไหลด้านท้ายน้ำอย่างฉับพลันในบริเวณด้านหลังหน้าตัดของใบพัด (H_2) ทางด้านเหนือน้ำ (Upstream) ของใบพัดจะเกิดแรงดูดซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการเพิ่มความเร็วช่วงพื้นที่ของใบพัด ทำให้เกิดการลดแรงต้านการไหลของน้ำด้านเหนือน้ำ (H_1) ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ Drawdown ขาวต่อเนื่องไปทางด้านเหนือน้ำ ด้านท้ายน้ำ (Downstream) ของใบพัดจะเกิดการเร่งความเร็วของการไหลขึ้นชั่วขณะเนื่องจากพลังงานที่ใบพัดส่งถ่ายให้กับน้ำในหน้าตัดการไหล (H_3) ส่งผลให้ปริมาณการไหลเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของทางน้ำทางด้านท้ายน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการไหลของน้ำในทางน้ำมีแรงเฉื่อย (Inertia force) และเสียดทาน (Friction) ที่พื้นที่ท้องน้ำ และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อการไหลมีความเร็วมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ความเร็วที่จากการกระทำของใบพัดลดลงสู่ความเร็วในสภาวะปกติของทางน้ำในบริเวณท้ายน้ำที่ห่างออกมา (H_4) เมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้นแต่ความเร็วของการไหลอยู่ในสภาวะปกติ ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจึงเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การไหลในทางน้ำเมื่อมีการผลัดกัน

ที่มา: จิระกานต์ (2555)

ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ความเร็วของการไหล ความลึก อัตราการไหล และอัตราการเปลี่ยนแปลงการไหลของทางน้ำ กำลังของเครื่องจักร ขนาดของใบพัด

1. ความเร็วการไหลของน้ำในทางน้ำ ความเร็วการไหลของน้ำในทางน้ำจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของการถ่ายเทพลังงานจากใบพัดลงสู่น้ำ เปลี่ยนแปลงไป ความเร็วของการไหลที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ อัตราส่วนของความเร็วการเคลื่อนที่ของน้ำผ่านใบพัดต่อความเร็วรอบของใบพัดลดลงหรือค่า TSR (Tip Speed Ratio) ลดลง แสดงถึงค่าความเร็วสัมพัทธ์ของการหมุนของใบพัดต่อความเร็วการไหลใบพัดผ่านลดลง ประสิทธิภาพของใบพัดจึงลดลง

2. ความลึกของการไหล ความลึกของการไหลจะเป็นการตัวแปรที่กำหนด

3. อัตราการไหลอัตราการไหลของทางน้ำส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของการผลัดกัน โดย จะสามารถพิจารณาถึงอัตราส่วนของพื้นที่ของใบพัดต่อปริมาณอัตราการไหล สภาพการไหลของทางน้ำส่งจะผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลัดกันน้ำ

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น

สภาวะการไหลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการผลัดคั้นน้ำ

สภาวะการไหลแบบอัตรการไหลไม่คงที่ (Unsteady state) เมื่อเริ่มต้นผลัดคั้นน้ำ อัตราการไหลของทางน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยจะมีการย้ายมวลน้ำผ่านช่องทางของใบพัดมากกว่า การไหลปกติทำให้ทางด้านท้ายน้ำมีปริมาณการไหลมากขึ้น จึงเกิดสภาวะการไหลแบบไม่คงที่ (Unsteady state) ขึ้นชั่วขณะในตอนเริ่มต้นการผลัดคั้นน้ำ ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการเคลื่อนย้ายมวลน้ำจากทางด้านเหนือน้ำมายังด้านท้ายน้ำมากขึ้น จะสังเกตได้จากระดับน้ำด้านท้ายน้ำเพิ่มระดับสูงขึ้นจากระดับน้ำปกติ ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณการไหลที่สูงขึ้นของทางด้านท้ายน้ำ ระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำอาจจะยุบตัวลงหรือลดระดับลงเล็กน้อย สภาวะการไหลแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้ 1. กำลังของใบพัด 2. อัตรการไหล 3. ปริมาณน้ำทางด้านเหนือน้ำของใบพัด ถ้าทางน้ำมีขนาดเล็กและใช้เครื่องผลัดคั้นน้ำขนาดกำลังสูง จะทำให้การผลัดคั้นน้ำมีประสิทธิภาพ สภาวะการไหลแบบไม่คงที่มีระยะเวลายาว ในทางกลับกันถ้าทางน้ำมีขนาดใหญ่และใช้เครื่องผลัดคั้นน้ำขนาดกำลังต่ำ จะทำให้การผลัดคั้นน้ำไม่มีประสิทธิภาพ สภาวะการไหลแบบไม่คงที่มีระยะเวลายาวนาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอัตรการพื้นที่หน้าตัดการไหลต่อพื้นที่ของใบพัดและกำลังการผลัดคั้นน้ำ

สภาวะการไหลแบบอัตรการไหลคงที่ (Steady state) เป็นสภาวะการไหลที่ต่อเนื่องจากการไหลแบบอัตรการไหลไม่คงที่ เกิดจากการที่อัตรการไหลทางด้านเหนือน้ำขึ้นไปมีการไหลแบบควบคุม (Upstream control) เกิดขึ้น ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการผลัดคั้นน้ำอย่างมีประสิทธิภาพทำให้การไหลทางด้านเหนือน้ำไม่สามารถไหลได้ทันกับอัตรการไหลที่เพิ่มขึ้นของการไหลผลัดคั้นน้ำ การไหลในสภาวะนี้จะเกิดขึ้นต่อเนื่องจากการไหลแบบอัตรการไหลไม่คงที่ อัตรการไหลของด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำจะเท่ากับอัตรการไหลปกติก่อนการผลัดคั้น ด้านท้ายน้ำจะมีการลดระดับน้ำลงสู่ระดับน้ำปกติของทางน้ำ เท่ากับระดับน้ำก่อนที่จะมีการผลัดคั้นน้ำ แสดงให้เห็นว่าอัตรการไหลกลับมามีที่อัตรปกติ ระดับน้ำด้านเหนือน้ำจะลดระดับลงต่ำกว่าระดับน้ำปกติแต่มีความเร็วของการไหลมากขึ้นเพื่อชดเชยระดับน้ำที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลเครื่องผลัดคั้นน้ำกระทำต่อทางน้ำ ทำให้เกิดการลดแรงต้านกลับของน้ำด้านเหนือน้ำ ทำให้เกิดการไหลที่เร็วขึ้น

การผลักดันน้ำจะต้องคำนึงถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นทั้งทางด้านเหนือและท้ายน้ำเป็นสิ่งสำคัญ เมื่อการผลักดันน้ำมีประสิทธิภาพ ในขณะที่เริ่มต้นเดินเครื่องจะมีการยกตัวของน้ำสูงขึ้นทางด้านท้ายน้ำ ซึ่งเป็นผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มปริมาณการไหลอย่างฉับพลันทางด้านท้ายน้ำของใบพัด ที่เกิดจากความเร็วการไหลที่สูงขึ้นอย่างมาก เกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณอุโมงค์ที่เป็นรัศมีของใบพัดเท่านั้น ความเร็วการไหลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากใบพัดไม่มีผลกระทบที่ท้ายน้ำที่ห่างไกลมากๆ แต่จะลดความเร็วลงอย่างรวดเร็วในบริเวณท้ายน้ำใกล้ๆ ใบพัด เนื่องจากเกิดแรงเสียดทานและแรงต้านการไหลของการไหลตามธรรมชาติ เมื่อปริมาณการไหลของน้ำมีการเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อให้ระดับน้ำด้านท้ายน้ำมีการยกตัวสูงขึ้นตามปริมาณการไหลที่สูงขึ้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \dots(2)$$

สำหรับทางน้ำที่กว้างมากๆ ค่ารัศมีชลศาสตร์ (R) จะมีค่าเท่ากับค่าความลึก (y) แทนค่าลงในสมการดังนั้นจะได้

$$q \times b = \frac{1}{n} (b \times y)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \dots(3)$$

$$q = \frac{1}{n} y^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \dots(4)$$

เมื่อคุณสมบัติของทางน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความลึกดังนี้

$$q \propto y^{\frac{5}{3}}$$

$$\text{ความสัมพันธ์ของเร็วการไหลที่สูงขึ้นต่อความลึกคือ } v_y = ay^{\frac{5}{3}} : a = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{หรือ } v = \frac{1}{n} y^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} ; v \propto y^{\frac{2}{3}}$$

ซึ่งเมื่อระดับความลึกของน้ำทางด้านท้ายน้ำเพิ่มมากขึ้นความเร็วของการไหลก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย การไหลทางด้านท้ายน้ำจะยังคงรักษาระดับที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งในสภาวะนี้เรียกว่าเป็นสภาวะการไหลที่ไม่คงที่ (Unsteady state flow) การไหลในสภาวะนี้จะเกิดขึ้นจนกว่าปริมาณน้ำ

สะสมชั่วคราวของทางด้านเหนือน้ำ (Upstream temporary storage) จะลดลง จะส่งผลให้ระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำเริ่มตัวลดลง (Drawdown) และส่งผลให้ระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำเริ่มลดตัวลงด้วยการลดตัวลงของระดับน้ำจะหยุดลงเมื่อด้านเหนือน้ำที่ห่างไกลเกิดสภาวะการไหลที่เป็นการไหลที่ควบคุมด้วยเหนือน้ำ (Upstream control) ในสภาวะนี้การผลักดันน้ำจะไม่มีการเพิ่มอัตราการไหล (Steady state flow) ระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำของใบพัดจะกลับมาอยู่ที่ระดับความลึกปกติ (Normal depth) ทางด้านเหนือน้ำความเร็วของการไหลจะเพิ่มขึ้นระดับน้ำจะลดลง ซึ่งจะสามารถคำนวณปริมาณการลดลงของระดับน้ำได้จากสมการแรก

ตัวอย่างเช่น สมมุติการไหลอยู่ในสภาวะอัตราการไหลคงที่ (Steady state flow) ระดับความลึกทางด้านท้ายน้ำคือ 12.5 เมตร ความเร็วของการไหลอยู่ที่ 2 เมตรต่อวินาที ถ้าความเร็วการไหลทางด้านเหนือน้ำเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากอิทธิพลของการผลักดันน้ำ ระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำจะลดตัวลง 10 เปอร์เซ็นต์

$$Q = 25 \text{ m}^3$$

$$V_1 = 2 \text{ m/s}$$

$$D_1 = 12.5 \text{ m}$$

$$\text{ถ้าความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์} \quad V_2 = 2.2 \text{ m/s}$$

$$\text{ความลึกของการไหลจะประมาณได้} \quad D_2 = 11.36 \text{ m}$$

การลดลงของระดับน้ำทางท้ายเหนือน้ำเกิดขึ้นได้เมื่อการผลักดันน้ำมีประสิทธิภาพ การพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องมือด้วย

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการผลักดันน้ำ

การผลักดันน้ำเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับมวลน้ำเพื่อเพิ่มให้อัตราการไหลมากขึ้น การเพิ่มปริมาณการไหลของน้ำ จะสามารถคำนวณออกมาเป็นพลังงานได้โดยการคำนวณการเคลื่อนที่ของมวลน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการผลักดันน้ำ โดยพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนมวลน้ำจะสามารถพิจารณาได้จากสมการโมเมนตัม

$$\text{แรงผลักดัน (Thrust)} = \rho \times m \times (V_{\text{out}} - V_{\text{in}}) \quad \dots(5)$$

โดย แรงผลักดัน(Thrust) = แรงที่ผลักดันน้ำ($N = \text{kg} \times \text{m/s}^2$)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (1000 kg/m^3)

m = อัตราไหลผ่านใบพัดในหนึ่งหน่วยเวลา (m^3/s)

V_{in} = ความเร็วของการไหลเข้าใบพัด (m/s)

V_{out} = ความเร็วการไหลออกจากใบพัด (m/s)

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการเคลื่อนมวลด้วยความเร็วมากจะใช้พลังงานมากกว่า



ภาพที่ 18 แผนการผลัดคัน

ที่มา: จิระกานต์ (2555)

ทฤษฎีการผลัดน้ำ (Momentum Eq.)

การไหลในทางน้ำเปิดเป็นการไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) จากที่สูงไปสู่ที่ต่ำ ซึ่งขณะที่ของไหลเคลื่อนที่ จะเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากมีแรงเสียดทานของไหลที่สัมผัสกับผิวของทางน้ำเปิด แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้มีทิศตรงข้ามกับทิศทางของการไหล ซึ่งถ้าไม่มีสิ่งใดรบกวนการไหลในทางน้ำเปิดนี้ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะเท่ากับแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงของโลกในทิศทางของการไหล เส้นระดับพลังงานจำเพาะจะขนานกับแนวระดับน้ำ การไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลแบบปกติ สำหรับการผลัดน้ำจะไปรบกวนสถานะการไหลปกติในทางน้ำเปิด รูปแบบการผลัดน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ

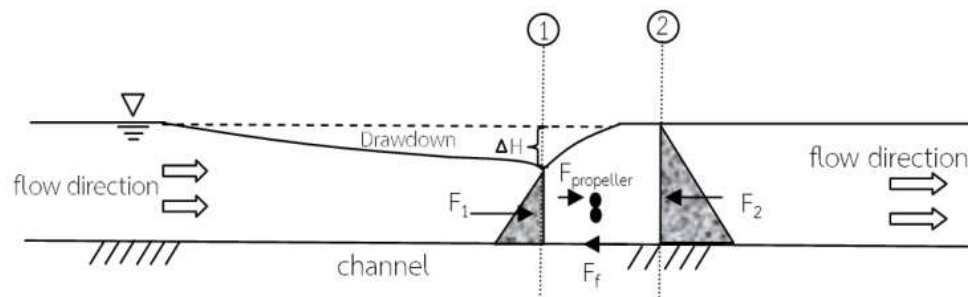
รูปแบบที่ 1. สถานะควบคุมการไหลด้านเหนือน้ำ (Upstream control) เมื่อเริ่มผลัดน้ำ การไหลอยู่ในสถานะ Unsteady state ความเร็วด้านเหนือน้ำก่อนถึงใบพัดจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพล ใบพัดที่เร่งความเร็วให้น้ำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลที่เร็วขึ้น ระดับน้ำด้านเหนือน้ำก่อนถึงใบพัดจะค่อยๆ ลดลงหรือที่เรียกว่า (Drawdown) ระยะทางของ Drawdown ที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการผลัดน้ำ ส่วนอีกด้านหนึ่งของใบพัด ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะยกตัวสูงขึ้น อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป การไหลเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะลดลงกลับมาที่ระดับเดิมก่อนมีการเปิดเครื่องผลัดน้ำ และระดับของ Drawdown ด้านเหนือน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งระดับพลังงานในแต่ละจุดนั้นแสดงด้วยสมการพลังงานจำเพาะ Specific energy ดังแสดงในสมการที่ 6

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad \dots(6)$$

E = Specific energy m.

y = Water depth m.

V = Velocity m. s⁻¹



ภาพที่ 19 Diagram of water level and momentum equation in water pushing

จากภาพที่ 19 แรงจากใบพัดที่กระทำต่อมวลน้ำ สมการ Momentum Eq.

$$\Sigma F = (\rho Qv)_{out} - (\rho Qv)_{in} \quad \dots(7)$$

section 1-2 ;

$$F_1 - F_2 - F_f + F_{propeller} = \rho Q(v_1 - v_2) \quad \dots(8)$$

สมมติให้ F_f มีค่าน้อยมาก ; ($F_f = 0$)

$$\frac{F_{propeller}}{b} = \rho q(v_1 - v_2) + \gamma \left(\frac{y_2^2}{2} - \frac{y_1^2}{2} \right) \quad \dots(9)$$

$$f_{propeller} = \Delta H \left\{ \frac{\rho q v_2}{y_2 - \Delta H} + \frac{\gamma}{2} (2y_2 - \Delta H) \right\} \quad \dots(10)$$

$f_{propeller}$ = Water pushing force by propeller (Thrust) $N \cdot m^{-1}$

F_1 = Hydrostatic load section 1 $N \cdot m^{-1}$

F_2 = Hydrostatic load section 2 $N \cdot m^{-1}$

ΔH = Drawdown m .

q = Flow rate $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$

V_1, V_2 = Velocity $m \cdot s^{-1}$

y_1, y_2 = Water level m .

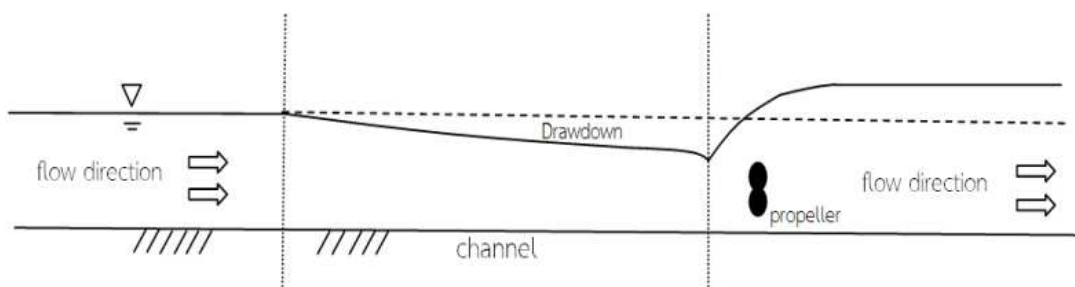
b = Wide channel m .

ในสถานะ Unsteady state ไบพัตที่หมุนอยู่พยายามเร่งความเร็วการไหล คุณน้ำจากด้านเหนือน้ำออกไปด้านท้ายน้ำ ทำให้ความเร็วของน้ำสูงขึ้น ซึ่งเมื่อความเร็วมากขึ้นมีผลทำให้เกิดความเสียดทานในทางน้ำ (Friction loss) สูงขึ้น ระดับน้ำในส่วนนี้จึงลดลง ซึ่งก็คือ Drawdown ที่จะเกิดขึ้น ระยะทางของ Drawdown ที่เกิดขึ้น จึงมีความสัมพันธ์กับความเสียดทานของทางน้ำ ถ้าความเสียดทานของทางน้ำมาก จะทำให้ระยะทางของ Drawdown ที่เกิดขึ้นสั้น และถ้าความเสียดทานทางน้ำมีน้อยก็จะทำให้ระยะทางของ Drawdown ที่เกิดขึ้นยาวกว่า หลังจากนั้นในสถานะ Steady state ไบพัตพยายามจะคุณน้ำให้ได้เท่าเดิม แต่เนื่องจากไม่มีการเพิ่มของอัตราการไหล ระดับน้ำด้านท้ายน้ำจึงลดระดับกลับมาสู่ระดับเดิมก่อนมีการผลัดดันน้ำ พลังงานกลับสู่สถานะเดิม โดยระบบจะการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่เดียวคือ Drawdown ด้านเหนือน้ำที่เกิดจาก Friction loss ที่เกิดขึ้น

รูปแบบที่ 2 ในสถานะ Non-upstream control เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลเข้ามาในทางน้ำ ณ สถานะ Steady state แล้ว ระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่เกิด Drawdown จะยกตัวสูงขึ้น และจากที่ไบพัตพยายามคุณน้ำออกให้ได้เท่าเดิม แต่มีปริมาณการไหลสูงขึ้น ทำให้ระดับน้ำด้านท้ายน้ำที่ยกตัวสูงขึ้นในสถานะ Unsteady state นั้น ระดับน้ำจะยกตัวสูงขึ้นอย่างถาวรด้วยปริมาณอัตราการไหลที่เข้ามาเพิ่ม ทำให้อัตราการไหลในทางน้ำนั้นสูงขึ้นโดยที่ระดับน้ำด้านเหนือน้ำไม่ยกตัวสูงขึ้นกว่าระดับเดิม เมื่อมีอัตราการไหลที่เพิ่มเข้ามาในทางน้ำ

ทฤษฎีและกลศาสตร์การผลัดดันน้ำ

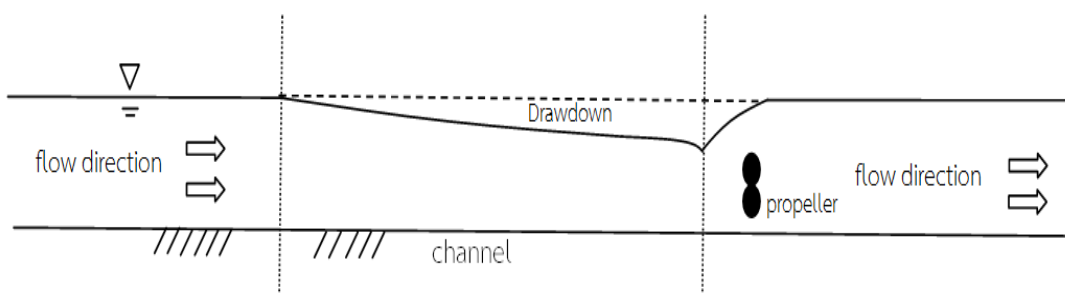
หลังจากเปิดเครื่องผลัดดันน้ำ ในทางน้ำเปิด การเคลื่อนที่ของของไหลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก จะได้รับอิทธิพลของไบพัตผลัดดันน้ำ ไบพัตที่หมุนอยู่พยายามเร่งความเร็วการไหล คุณน้ำจากด้านเหนือน้ำออกไปด้านท้ายน้ำ ทำให้ความเร็วของน้ำสูงขึ้น โดยที่ในสถานะเริ่มต้น Unsteady state ระดับน้ำด้านเหนือน้ำจะลดระดับลงหรือที่เรียกว่า Drawdown ระดับน้ำด้านท้ายน้ำยกตัวสูงขึ้น ดังภาพที่ 20 โดยในสถานะ Unsteady state นี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นด้วยในช่วงเวลานี้



ภาพที่ 20 *Water level on unsteady state*

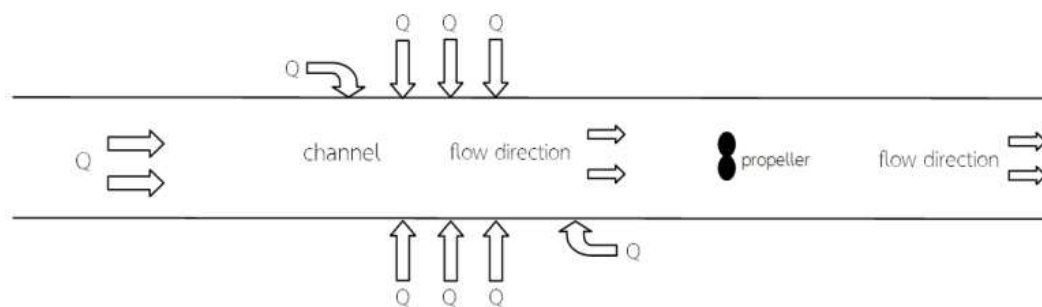
หลังจากนั้น ทางน้ำจะเข้าสู่สภาวะ Steady state ซึ่งในสภาวะคงที่นี้ ทางน้ำจะมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นใน 2 กรณี คือ

1. อัตราการไหลไม่เปลี่ยนแปลง (Upstream control) อัตราการไหลที่เข้ามาในทางน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือลักษณะทางกายภาพของทางน้ำด้านเหนือน้ำเป็นสภาวะคอขวด ระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่เกิด Drawdown จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยระดับน้ำอยู่ที่ระดับเดียวกับสภาวะ Unsteady state และระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะลดลงกลับมาที่ระดับเดิมเท่ากับตอนที่ไม่มีการผลักดันน้ำ ซึ่งในรูปแบบนี้เมื่อเข้าสู่สภาวะ Steady state จะไม่มีการเพิ่มของอัตราการไหล แต่ระดับน้ำด้านเหนือน้ำจะลดลงอย่างถาวร ดังแสดงในภาพที่ 21



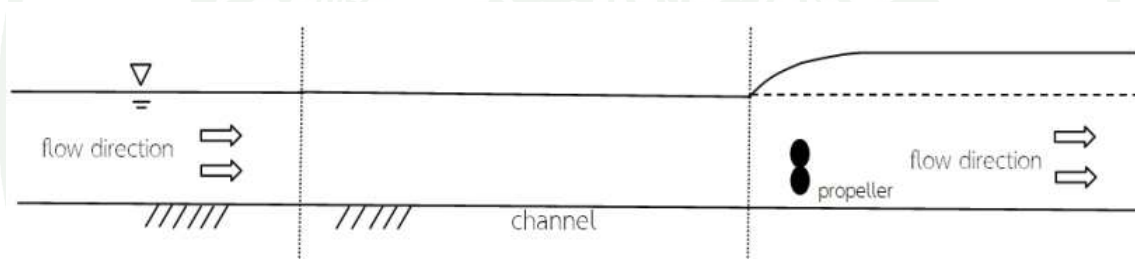
ภาพที่ 21 *Water level on steady state (upstream control)*

2. อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง (Non-upstream control) มีน้ำไหลเข้ามาเพิ่มในทางน้ำ ทั้งด้านเหนือน้ำโดยตรงและด้านข้างตลิ่ง ดังแสดงใน ภาพที่ 22 ซึ่งในรูปแบบนี้ก็จะแบ่ง ออกเป็น 2 กรณี



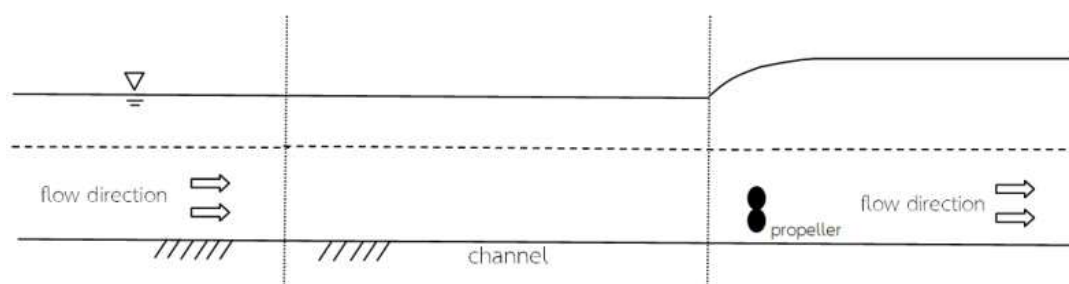
ภาพที่ 22 Increase flow rate on upstream

2.1 มีอัตราการไหลเข้ามาเพิ่มเท่าเดิม เมื่อน้ำไหลเข้ามาเพิ่มเท่าเดิมในทางน้ำ ในสภาวะนี้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำจะเกิด Drawdown หรือไม่เกิดก็ได้ตามปริมาณการไหลที่เข้ามาเพิ่ม ส่วนระดับน้ำ ด้านท้ายน้ำจะยกตัวสูงขึ้นจากระดับเดิมก่อนมีการผลักดันน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 Water level on steady state (2.1)

2.2 มีอัตราการไหลเข้ามาเพิ่มในปริมาณมาก หากปริมาณการไหลที่เข้ามาเพิ่มทางเหนือน้ำมีปริมาณมาก จะมีผลทำให้ ระดับน้ำด้านเหนือน้ำยกตัวสูงขึ้น และระดับน้ำด้านท้ายน้ำก็จะยกตัวสูงขึ้นมากกว่าเดิม ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 Water level on steady state (2.2)

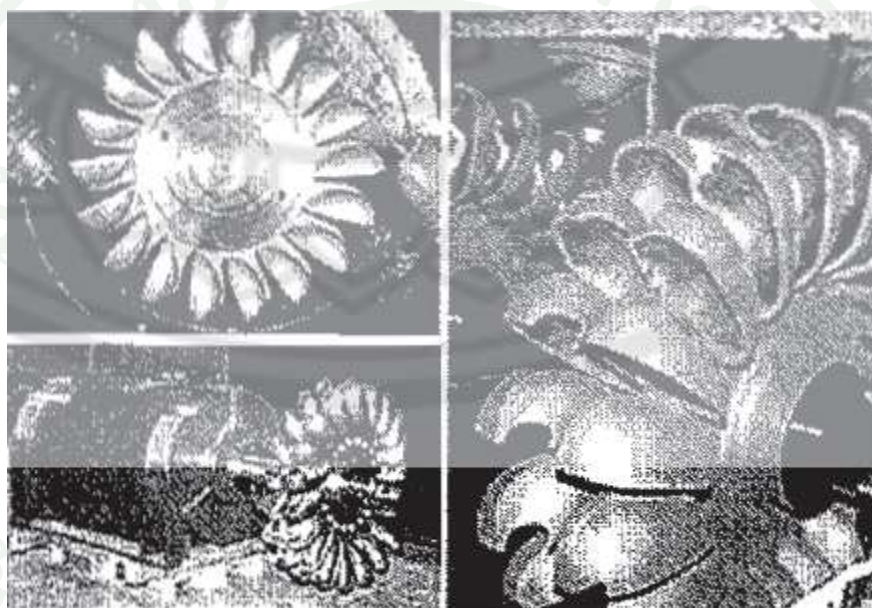
ซึ่งในสถานะที่อัตราการไหลเปลี่ยนแปลง (Non-upstream control) การผลักดันน้ำจะช่วยเพิ่มอัตราการระบายน้ำให้มากขึ้น แต่ต้องคำนึงถึงสภาพทางท้ายน้ำว่ามีความเหมาะสมที่จะรองรับระดับน้ำที่ยกตัวสูงขึ้นได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วุฒิเกียรติ (2547) ได้เสนอการวิเคราะห์สมรรถนะกักหน้ด้วยวิธีพลศาสตร์การไหล โดยกักหน้ น้ำชนิดการไหลตามแนวแกน (Bulb turbine) โดยการขึ้นรูปด้วย Solidwork และใช้โปรแกรม CFX5.7 ในการวิเคราะห์ CFD โดยวิเคราะห์ร่วมกับแบบจำลองกักหน้ น้ำของเขื่อนปากมูล ครอบคลุมถึงกักหน้ขนาด 340 มิลลิเมตร เสดน้ำขนาด 10 m. ใช้การสร้าง Mesh ในบริเวณที่เราสนใจ ตรวจสอบสภาวะการไหลต่างๆ ในเรื่องของประสิทธิภาพและคาวิตชัน แต่การสร้าง Mesh ของงานทดลองนี้ยังมีความละเอียดน้อยเกินไป และต้องมีการศึกษาสภาพ (Unsteady flow) ของน้ำหลังผ่านกักหน้ในส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา

อัศวิน (2552) ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของใบพัดของกักหน้ น้ำแบบลูกตุ้ม เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยทำการสร้างแบบจำลองกักหน้ น้ำมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร และทำการเปรียบเทียบใบพัด 3 แบบ ซึ่งผลที่ได้พบว่าใบพัดแบบโค้งมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานน้ำเป็นพลังงานกล 35 เปอร์เซ็นต์ และสร้างกักหน้ ขนาดใหญ่ขึ้นให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 เซนติเมตร ทำการทดลองที่ความเร็วน้ำ 1 เมตรต่อวินาที พบว่า กักหน้ น้ำที่สร้างขึ้นสามารถขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 15 วัตต์ และมีปริมาณเพียงพอต่อการนำไปใช้ในระบบส่องสว่าง

วิโรจน์ (2549) เสนอ โปรแกรมสำหรับการออกแบบกังหันน้ำขนาดเล็กแบบเพลตัน โดยใช้โปรแกรม Matlab โดยขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าไม่เกิน 10 Kw ขนาดใบพัดไม่เกิน 0.6 m. โดยโปรแกรมจะออกแบบ เส้นผ่านศูนย์กลาง เส้นลำนํ้า จำนวนหัวฉีด จำนวนถั่วย ประสิทธิภาพโดยรวมของกังหัน ประสิทธิภาพเชิงไฮดรอลิก ความเร็วลำนํ้า ความเร็วในท่อ หัวน้ำสูญเสี่ย อัตราการไหล และ สัดส่วนของถั่วยรับน้ำ แต่ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบนั้นจะทำให้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนในการผลิตสูงเกินไป ไม่คุ้มต่อการลงทุน รวมทั้งเป็นโปรแกรมใหม่ที่ยังแพร่หลาย จึงต้องมีคู่มือในเรื่องของวิธีการเฉพาะ

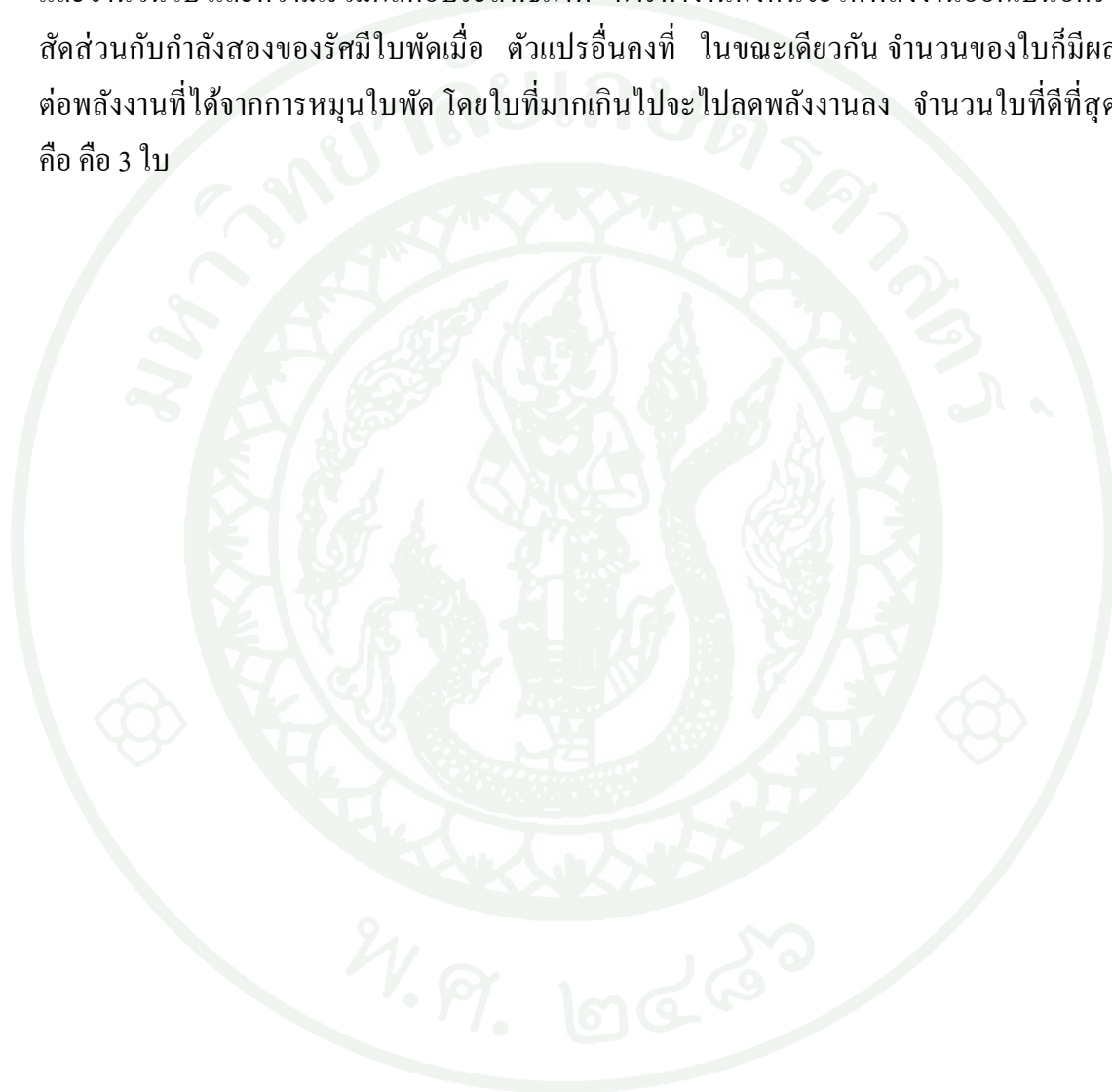


ภาพที่ 25 กังหันน้ำขนาดเล็กแบบเพลตัน

ที่มา: วิโรจน์ (2549)

สนธิ (2542) เสนอการเปรียบเทียบแบบจำลองคำนวณการไหลแบบเปลี่ยนแปลงหนึ่งมิติ เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการไหลในทางน้ำเปิด แบบไม่คงที่มีผิวอิสระชนิดหนึ่งมิติ โดยใช้กระบวนการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนบนพื้นฐาน Flux vector splitting ร่วมกับค่าประมาณ Jacobian เพื่อแก้สมการตามแบบ Beam&Warming ซึ่งมีพื้นฐานบนการคำนวณแบบ Implicit จากผลของการจำลองพบว่าสามารถนำไปใช้กับปัญหาน้ำกระโดด ปัญหาการเคลื่อนตัวของคลื่นน้ำ และปัญหาเขื่อนแตกในอุดมคติ ซึ่งทำนายปรากฏการไหลแบบเปลี่ยนแปลงในทางน้ำเปิด

Hsing-nan Wu (2012) ได้เสนอการออกแบบและตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จาก การออกแบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันชนิดแกนนอน (HAWTs) โดยเฉพาะ ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีโมเมนตัม แรงบิดของกังหันที่คำนวณ โดย ทฤษฎีทางพลศาสตร์การไหล (CFD) แบบจำลองนี้พิสูจน์จากการเปรียบเทียบสองชุดข้อมูล หลังการจำลองพบว่าผลของรัศมี และจำนวนใบ และความเร็วมีผลต่อประสิทธิภาพ การทำงานกังหันจะให้พลังงานออกเป็นอัตรา สัดส่วนกับกำลังสองของรัศมีใบพัดเมื่อ ตัวแปรอื่นคงที่ ในขณะที่เดียวกัน จำนวนของใบก็มีผล ต่อพลังงานที่ได้จากการหมุนใบพัด โดยใบที่มากเกินไปจะไปลดพลังงานลง จำนวนใบที่ดีที่สุด คือ คือ 3 ใบ



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ใบพัดชนิดแกนนอนทำด้วยเหล็ก ขนาด 8 cm. (2 blades) จำนวน 6 ชุด



ภาพที่ 26 ใบพัดขนาด 8 cm.

2. ใบพัดชนิดแกนนอนทำด้วยเหล็ก ขนาด 20 cm (4blades) จำนวน 1 ชุด



ภาพที่ 27 ใบพัดขนาด 20 cm.

3. ทางน้ำเปิดจำลองขนาดหน้าตัดกว้าง 30 cm. สูง 40 cm. ยาว 10 m ความลาดเท 1:1000



ภาพที่ 28 ฟลูมและชุดประกอบการทดลอง

4. มอเตอร์ ขนาด 1 แรงม้า ยี่ห้อ *Mitsubishi* ชุดสายพานใบพัด และเฟืองทดรอบ



ภาพที่ 29 มอเตอร์และชุดสายพาน

5. เครื่องสูบน้ำและเครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร



ภาพที่ 30 เครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร (1)



ภาพที่ 31 เครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร (2)

สถานที่ที่ใช้ทำการทดสอบ

ในการทดสอบผลกักคั้นน้ำนั้นได้ใช้แบบจำลองทางน้ำ ณ ห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ซึ่งทางน้ำจำลองหรือฟลูมที่เป็นแบบจำลองนั้น มีความยาว 10 เมตร หน้าตัดฟลูมเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความกว้าง 30 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ดังภาพที่ 32 สามารถปรับความลาดชันของคลองได้ตั้งแต่ 1:1000 จนถึง 1:20 อัตราการไหลสูงสุดประมาณ 60 ลิตรต่อวินาที และยังสามารถควบคุมอัตราการไหลได้อีกด้วย



ภาพที่ 32 ทางน้ำจำลอง ณ ห้องปฏิบัติการทางชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน

วิธีการ

ติดตั้งชุดการทดลองทั้งใบพัดและเครื่องมอเตอร์ที่ทางน้ำเปิดจำลองในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ โดยใบพัดที่ทำการทดสอบจะมีวิธีการดังนี้

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ชุดการทดลอง

1. การทดลองในสภาวะอัตราการไหลคงที่ (Upstream control) ใช้อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 และ 80 l/s ในแต่ละการทดลอง

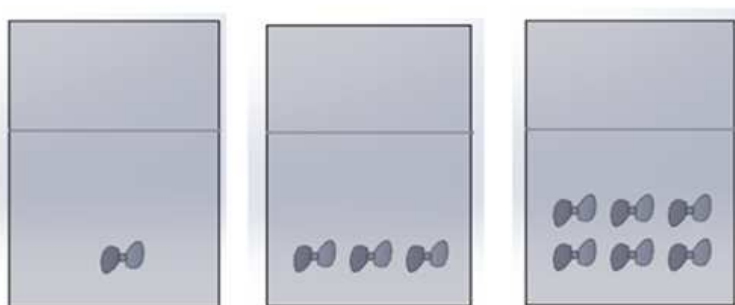
1.1 ใช้ใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 700, 1700, 3200 rpm

ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

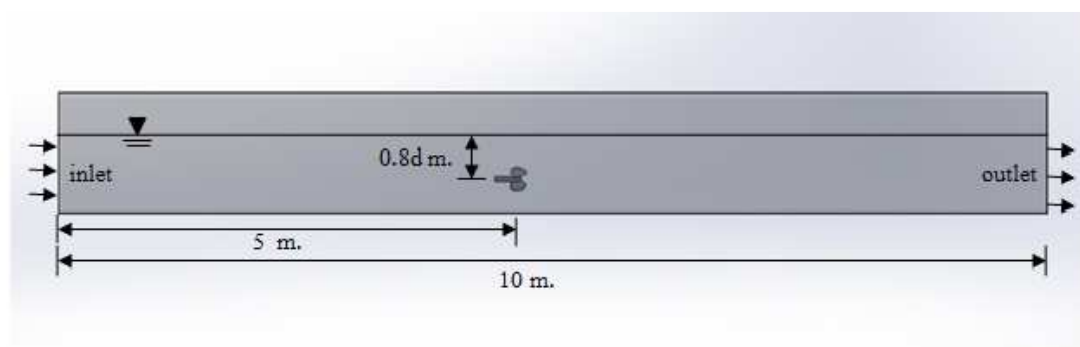
ใบพัดขนาด 8 cm. 6 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

1.2 ใช้ใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 700, 1400 rpm

ตำแหน่งของใบพัดขณะทำการผลัดคั้นน้ำดังแสดงดังภาพที่ 33 และ 34



ภาพที่ 33 ตำแหน่งของใบพัดในหน้าตัดทางน้ำ



ภาพที่ 34 ภาพตัดด้านข้างฟลูมทดลองแสดงระยะทางตำแหน่งใบพัด

d = Water depth

วัดค่าระดับน้ำในฟลูมทุกๆ 50 cm. และวัดค่าอัตราการไหลด้วยเครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร สังเกต ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังการเปิดเครื่องผลักดันน้ำ และบันทึกวิดีโอการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นทดลอง ดังภาพที่ 35, 36 และ 37

2. การทดลองในสถานะที่มีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลในทางน้ำ (Non-upstream control)

- ใช้ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm
- อัตราการไหลเริ่มต้น 40 l/s หลังจากทางน้ำเข้าสู่สถานะ Steady state แล้วจะมีเพิ่มอัตราการไหลเข้ามาในทางน้ำ

3. ตำแหน่งใบพัดในหน้าตัดของทางน้ำ

- ใช้ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm อัตราการไหล 50 l/s
- ใช้ตำแหน่งการวางใบพัดที่หน้าตัดของทางน้ำ สามตำแหน่งคือ 1. ใกล้ฝั้วน้ำ $0.2d$ 2. กึ่งกลางหน้าตัด ทางน้ำ $0.5d$ 3. ใกล้พื้นทางน้ำ $0.8d$ (d = ความลึกน้ำ)

- วัดค่าระดับน้ำในฟลูมทุกๆ 50 cm. และวัดค่าอัตราการไหลด้วยเครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร สังเกต ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังการเปิดเครื่องผลักดันน้ำ และบันทึกวิดีโอการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นทดลอง

4. การผลัดคันน้ำแบบอนุกรม

- ใช้ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด ติดตั้งสองจุดในทางน้ำเป็นลักษณะอนุกรม ใช้ความเร็วรอบใบพัด 1400, 1700 rpm อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40 และ 60 l/s
- วัดค่าระดับน้ำในฟลูมทุกๆ 50 cm. และวัดค่าอัตราการไหลด้วยเครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร สังเกต ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังการเปิดเครื่องผลัดคันน้ำ และบันทึกวิดีโอการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นทดลอง



ภาพที่ 35 การติดตั้งแกนเพลลาใบพัดเข้ากับชุดมอเตอร์



ภาพที่ 36 การเก็บค่าขณะทดลอง



ภาพที่ 37 ตัวอย่างใบพัดในทางน้ำขณะเริ่มทำการทดลอง

การทดลองวัดค่าระดับน้ำที่ระยะทางต่างๆของทางน้ำ โคนระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่ลดระดับลงหรือเรียกว่า Drawdown จะนำมาหาค่าเฉลี่ย

- อัตราการไหลจากการตวงด้วยเครื่องตรวจวัดน้ำแบบวัดปริมาตร

ถังรองปริมาตรน้ำขนาด กว้าง 2.44 m ยาว 4.88 m 2 ถัง

$$\text{อัตราการไหลจากการตรวจวัด} \quad Q = \frac{D \cdot 2.44 \cdot 4.88 \cdot 2}{\Delta t}$$

Q = อัตราการไหล m^3/s .

D = ความลึกน้ำในถังรองปริมาตรหลังการตวง m .

Δt = เวลา s .

- ความเร็วน้ำในฟลูม

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{0.3 \cdot z}$$

z = ความลึกน้ำที่ระยะทางต่างๆ m .

- พลังงานรวม (energy)

$$E = z + \frac{v^2}{2g}$$

E = พลังงานรวม m .

z = ความลึกน้ำที่ระยะทางต่างๆ m .

- Froude number

$$F = \frac{v}{\sqrt{gd}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

เปิดเครื่องผลักดันน้ำ ด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ความเร็วรอบ 1700 rpm

ด้วยอัตราการไหลประมาณการที่ 20 l/s

ผล ที่ระยะทาง 3 m ด้านเหนือน้ำ ระดับน้ำลึก 0.221 m. ความสูงของน้ำในถังรอง

ปริมาตรหลังจากตวง ก่อนตวง 7 cm. หลังตวง 25 cm. เวลา 3 นาที

$$- Q = \frac{D \cdot 2.44 \cdot 4.88 \cdot 2}{\Delta t} = \frac{(0.25 - 0.07) \cdot 2.44 \cdot 4.88 \cdot 2}{180}$$

$$= 0.0238 \text{ m}^3/\text{s} = 23.8 \text{ l/s}$$

$$- V = \frac{Q}{0.3 \cdot z} = \frac{0.0238}{0.3 \cdot 0.221}$$

$$= 0.359 \text{ m/s}$$

- พลังงานรวม

$$E = z + \frac{v^2}{2g} = 0.221 + \frac{0.359^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$= 0.228 \text{ m.}$$

- froude number

$$F = \frac{v}{\sqrt{gd}} = \frac{0.359}{\sqrt{9.81 \cdot 0.221}}$$

$$= 0.244$$

ซึ่งในแต่ละการทดลองนั้น ถ้ามีการใช้อัตราการไหลประมาณการที่ 80 l/s ไม่สามารถหาค่าได้ เนื่องจากน้ำสั่นฟลูมทดลอง

คำนวณโมเมนต์

ผลการคำนวณทางทฤษฎี จากตัวอย่างผลการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ Drawdown
0.01 m

ทฤษฎี $Q = 20 \text{ l/s}$ $y_2 = 0.235$ Drawdown = 0.01 m

$$q = \frac{Q}{0.3} = \frac{0.02}{0.3} = 0.06667 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

$$v_2 = \frac{q}{y_2} = \frac{0.06667}{0.235} = 0.28369 \text{ m/s}$$

จาก

$$F_{\text{propeller}} = \Delta H \left\{ \frac{\rho q v_2}{y_2 - \Delta H} + \frac{\gamma}{2} (2y_2 - \Delta H) \right\}$$

แทนค่าในสมการ

$$F_{\text{propeller}} = 0.01 \left\{ \frac{1000 * 0.06667 * 0.28369}{0.235 - 0.01} + \frac{9810}{2} (2 * 0.235 - 0.01) \right\}$$

$$= 23.4036 \text{ N/m} \quad \therefore$$

ผลการทดลอง $Q = 23.8 \text{ l/s}$ $y_2 = 0.231 \text{ m}$ $y_1 = 0.221 \text{ m}$ Drawdown = 0.01 m

$$q = \frac{Q}{0.3} = \frac{0.0238}{0.3} = 0.07933 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

$$v_1 = \frac{q}{y_1} = \frac{0.07933}{0.221} = 0.3590 \text{ m/s}$$

$$v_2 = \frac{q}{y_2} = \frac{0.07933}{0.231} = 0.3434 \text{ m/s}$$

จาก

$$F_{\text{propeller}} = \rho q (v_1 - v_2) + \gamma \left(\frac{y_2^2}{2} - \frac{y_1^2}{2} \right)$$

แทนค่าในสมการ

$$F_{\text{propeller}} = 1000 * 0.07933 * (0.359 - 0.3434) + 9810 \left(\frac{0.231^2}{2} - \frac{0.221^2}{2} \right)$$

$$= 23.4034 \text{ N/m} \quad \therefore$$

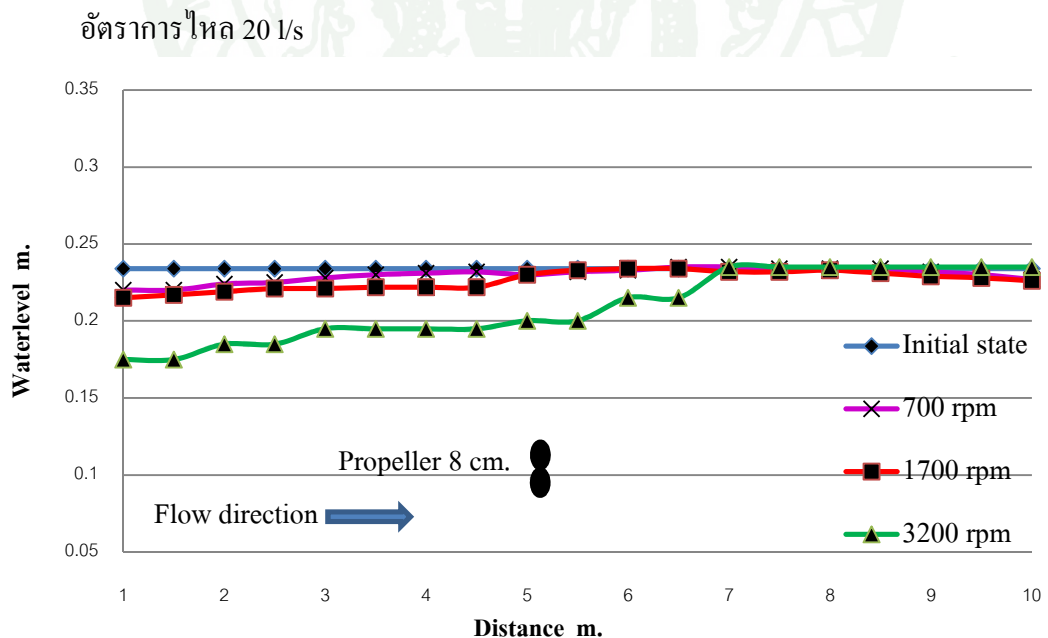
ผลและวิจารณ์

ผล

จากการศึกษาการผลักดันน้ำด้วยใบพัดในลักษณะต่างๆพบว่า เมื่อเครื่องผลักดันน้ำทำงาน จะทำให้ระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำ(ก่อนใบพัด)ลดลงหรือที่เรียกว่า "Drawdown" และระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำ(หลังใบพัด)ยกตัวสูงขึ้น และเมื่อการไหลของทางน้ำเข้าสู่ภาวะสมดุล (Steady state) ระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำจะลดระดับลงมาที่ระดับเดิม ส่วนระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำจะเกิด Drawdown ยาวไปตลอดความยาวของฟลูมทดสอบ

ผลการทดลองชุดที่ 1 การทดลองในสถานะอัตราการไหลคงที่ (Upstream control) ใช้ อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 และ 80 l/s ในแต่ละการทดลอง

การทดลองที่ 1.1 ใช้ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm. ที่ 3 ความเร็วรอบ 700, 1700 และ 3200 จะได้ระดับ Drawdown ดังแสดงในกราฟระดับน้ำที่ระยะทางต่างๆ ดังนี้



ภาพที่ 38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 8 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 20 l/s

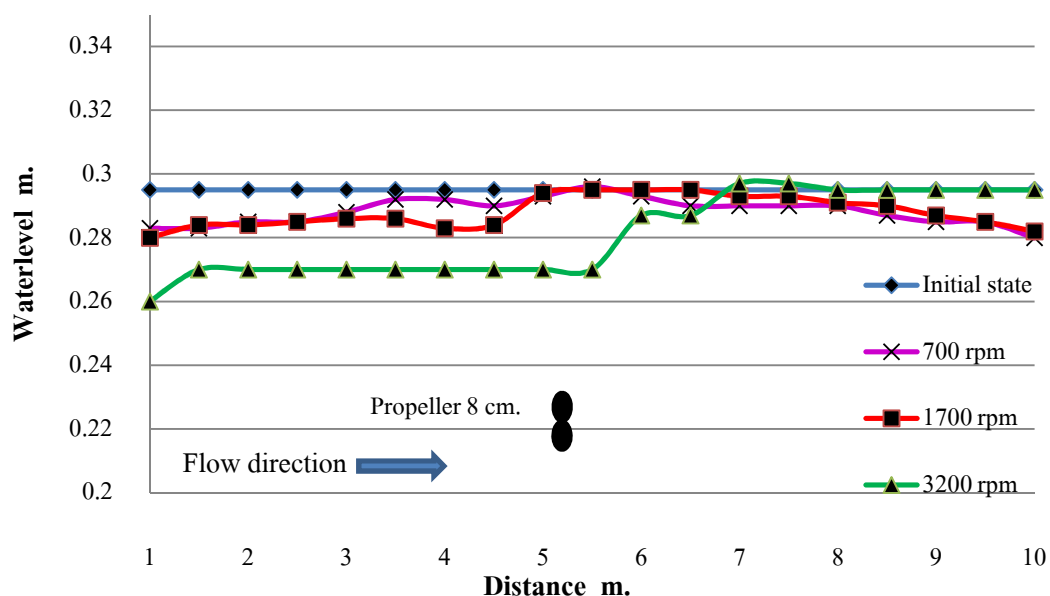
ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 1 ที่อัตราการไหล 20 l/s ความเร็วรอบ 700, 1700 และ 3200 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 3.31%, 6.04%, และ 19.87% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s)

กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ

| ความเร็วรอบ (rpm) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|----------------------|----------------------------------|---------------|
| 0 | 0.234 | 0 |
| 700 | 0.226 | 3.311 |
| 1700 | 0.220 | 6.04 |
| 3200 | 0.188 | 19.87 |

อัตราการไหล 40 l/s



ภาพที่ 39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด

ขนาด 8 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 40 l/s

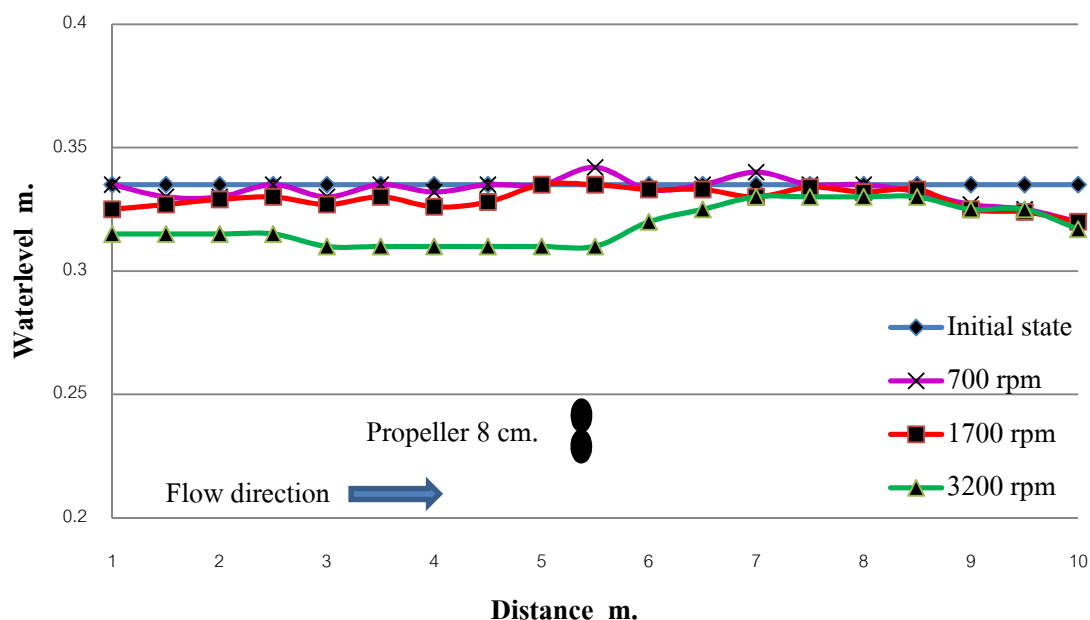
ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 2 ที่อัตราการไหล 40 l/s ความเร็วรอบ 700,1700 และ 3200 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 2.63%, 3.73%, และ 8.90% ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s)

กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ

| ความเร็วรอบ (rpm) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|----------------------|----------------------------------|---------------|
| 0 | 0.295 | 0 |
| 700 | 0.287 | 2.63 |
| 1700 | 0.284 | 3.73 |
| 3200 | 0.269 | 8.90 |

อัตราการไหล 60 l/s



ภาพที่ 40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 60 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 3 ที่อัตราการไหล 60 l/s ความเร็วรอบ 700, 1700 และ 3200 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.67%, 2.16%, และ 6.72% ตามลำดับ

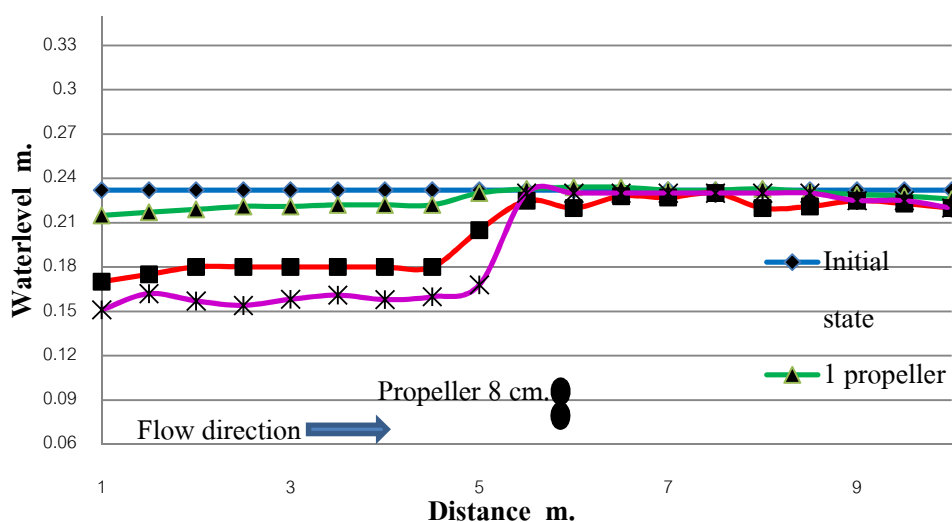
ตารางที่ 3 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 60 l/s)

กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ

| ความเร็วรอบ (rpm) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|----------------------|----------------------------------|---------------|
| 0 | 0.335 | 0 |
| 700 | 0.333 | 0.67 |
| 1700 | 0.328 | 2.16 |
| 3200 | 0.313 | 6.72 |

ใช้ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm. และใช้จำนวนใบพัด 1,3 และ 6 ใบตามลำดับ ความเร็วรอบ 1700 rpm จะได้ระดับ Drawdown ดังแสดงในกราฟระดับน้ำที่ระยะทางต่างๆดังนี้

อัตราการไหล 20 l/s



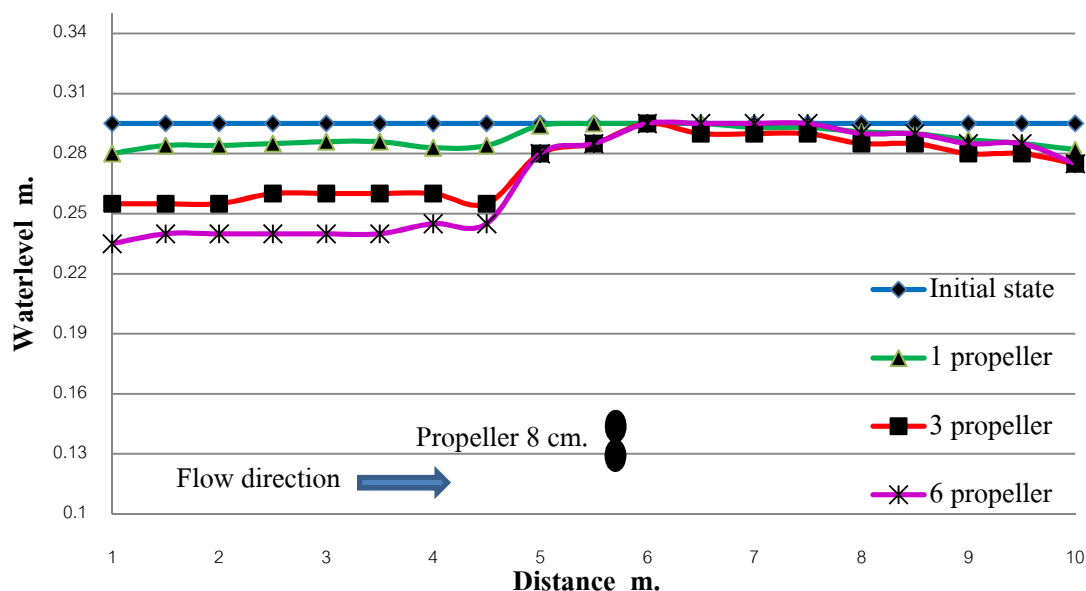
ภาพที่ 41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 8 cm. 1,3,และ 6 ใบ อัตราการไหล 20 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดังตารางที่ 4 ที่อัตราการไหล 20 l/s ความเร็วรอบ 1700 จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 5.23%, 23.22% และ 32.05% ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s) ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดใบพัดต่อพื้นที่หน้าตัดทางน้ำ

| จำนวนใบพัด (ชุด) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย | Drawdown | Area ratio |
|---------------------|----------------------------|----------|-----------------|
| | m. | % | propeller/flume |
| 0 | 0.232 | 0 | 0 |
| 1 | 0.220 | 6.04 | 0.057 |
| 3 | 0.178 | 23.22 | 0.170 |
| 6 | 0.158 | 32.05 | 0.341 |

อัตราการไหล 40 l/s



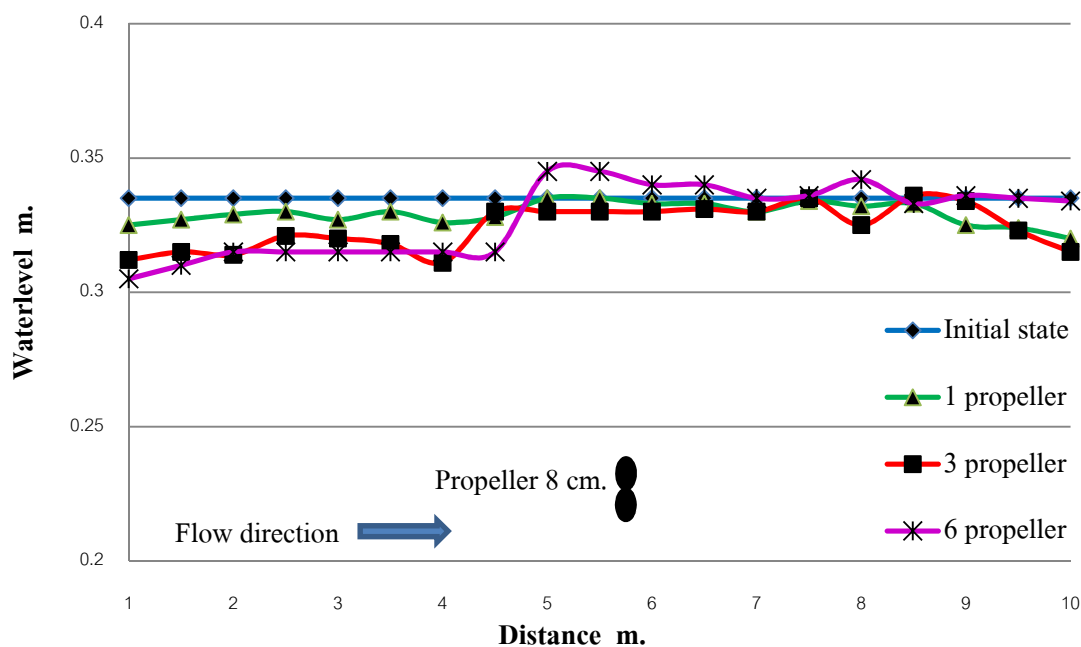
ภาพที่ 42 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 8 cm. 1,3,และ 6 ใบ อัตราการไหล 40 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 5 ที่อัตราการไหล 40 l/s ความเร็วรอบ 1700 จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 3.73%, 12.71%, และ 18.43% ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s) ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดใบพัดต่อพื้นที่หน้าตัดทางน้ำ

| จำนวน ใบพัด (ชุด) | ระดับน้ำ ด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % | Area ratio |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------|
| | | | m ² /m ² |
| 0 | 0.295 | 0 | 0 |
| 1 | 0.284 | 3.73 | 0.057 |
| 3 | 0.258 | 12.71 | 0.170 |
| 6 | 0.241 | 18.43 | 0.341 |

อัตราการไหล 60 l/s



ภาพที่ 43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 8 cm. 1,3,และ 6 ใบ อัตราการไหล 60 l/s

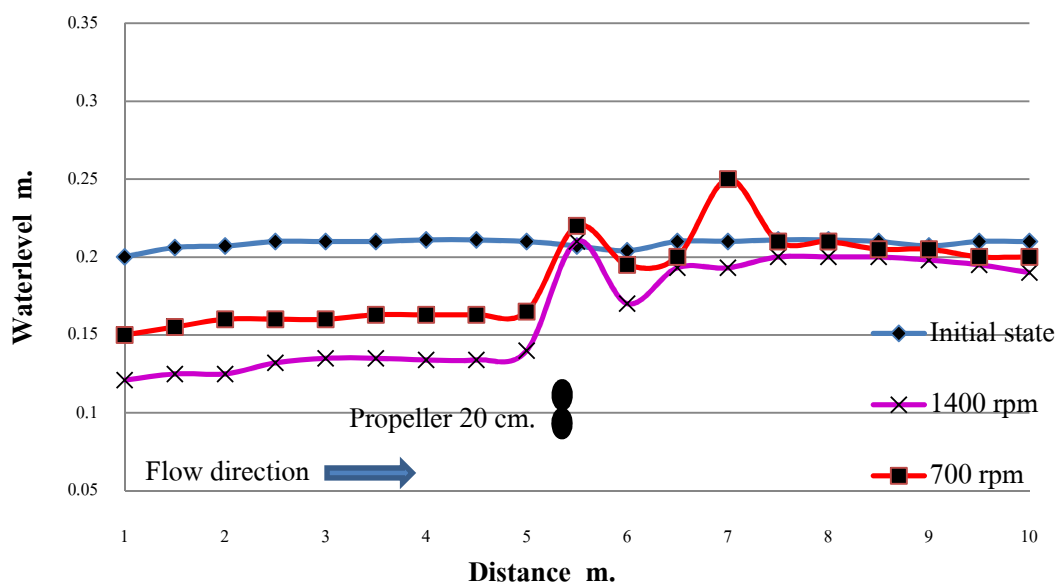
ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 6 ที่อัตราการไหล 60 l/s ความเร็วรอบ 1700 จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 2.16%, 5.19%, และ 6.53% ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและร้อยละของ Drawdown (Q 60 l/s) ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm และอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดใบพัดต่อพื้นที่หน้าตัดทางน้ำ

| จำนวน ใบพัด (ชุด) | ระดับน้ำ | Drawdown | Area ratio |
|-------------------------|--------------------------|----------|--------------------------------|
| | ด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | % | m ² /m ² |
| 0 | 0.335 | 0 | 0 |
| 1 | 0.328 | 2.16 | 0.057 |
| 3 | 0.318 | 5.19 | 0.170 |
| 6 | 0.313 | 6.53 | 0.341 |

การทดลองที่ 1.2 ใช้ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm. 1 ใบ ที่ 2 ความเร็วรอบ 700,1400 จะได้ระดับ Drawdown ดังแสดงในกราฟระดับน้ำที่ระยะทางต่างๆ ดังนี้

อัตราการไหล 20 l/s



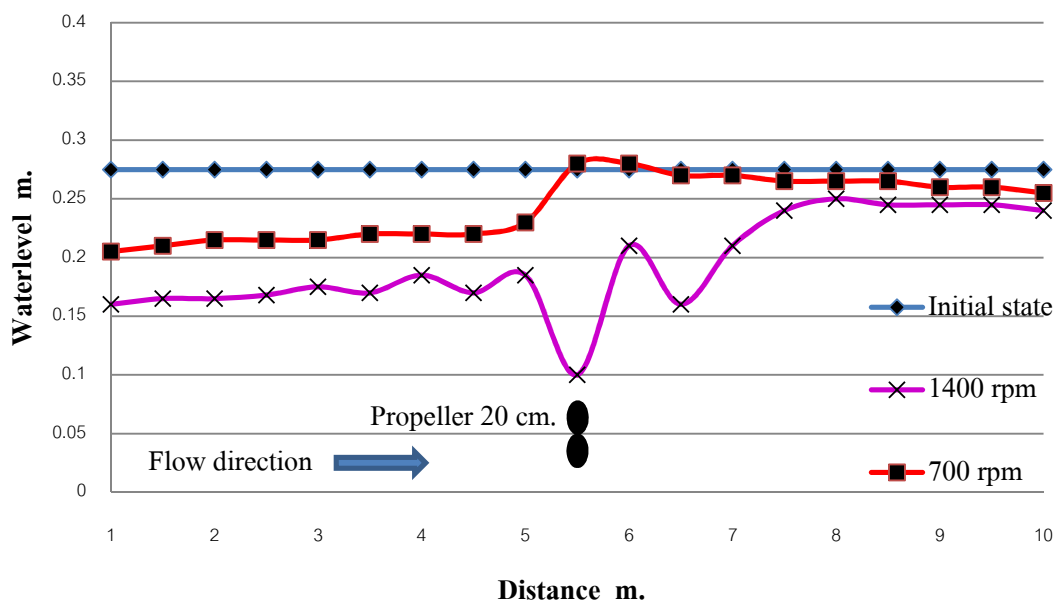
ภาพที่ 44 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 20 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 20 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 7 ที่อัตราการไหล 20 l/s ความเร็วรอบ 700,1400 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 24.17%, และ 38.04% ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s) กรณีใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ

| ความเร็วรอบใบพัด (rpm) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|---------------------------|----------------------------------|---------------|
| 0 | 0.210 | 0 |
| 700 | 0.159 | 24.17 |
| 1400 | 0.130 | 38.04 |

อัตราการไหล 40 l/s



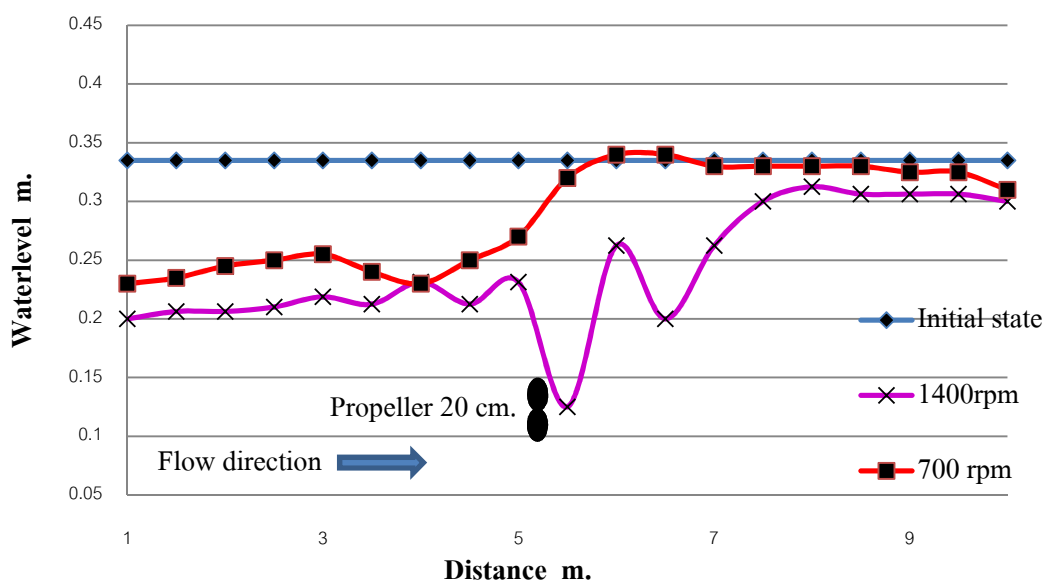
ภาพที่ 45 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 20 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 40 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 8 ที่อัตราการไหล 40 l/s ความเร็วรอบ 700, 1400 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 24.17%, และ 38.04% ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s) กรณีใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ

| ความเร็วรอบใบพัด (rpm) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|---------------------------|----------------------------------|---------------|
| 0 | 0.275 | 0 |
| 700 | 0.215 | 21.82 |
| 1400 | 0.170 | 38.27 |

อัตราการไหล 60 l/s



ภาพที่ 46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 20 cm. 1 ใบ อัตราการไหล 60 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับ ระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 9 ที่อัตราการไหล 60 l/s ความเร็วรอบ 700, 1400 rpm จะได้ ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 27.80% และ 36.66% ตามลำดับ

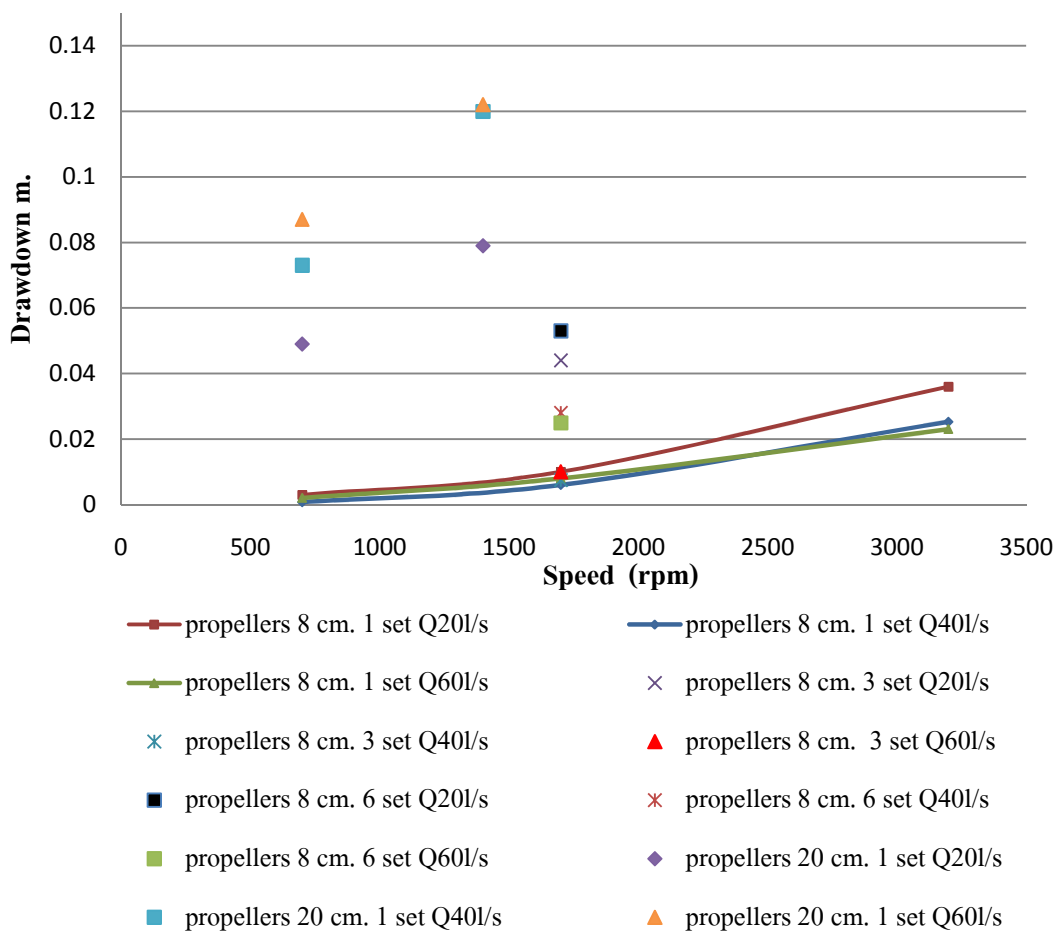
ตารางที่ 9 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 60 l/s) กรณีใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ

| ความเร็วรอบใบพัด (rpm) | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|---------------------------|----------------------------------|---------------|
| 0 | 0.335 | 0 |
| 700 | 0.242 | 27.80 |
| 1400 | 0.212 | 36.66 |

ตารางรวมผลการทดลอง Drawdown ของใบพัดชนิดต่างๆ ที่อัตราการไหล 20, 40, 60 l/s โดยการทดลองอยู่ในสภาวะที่อัตราการไหลคงที่ (Upstream control)

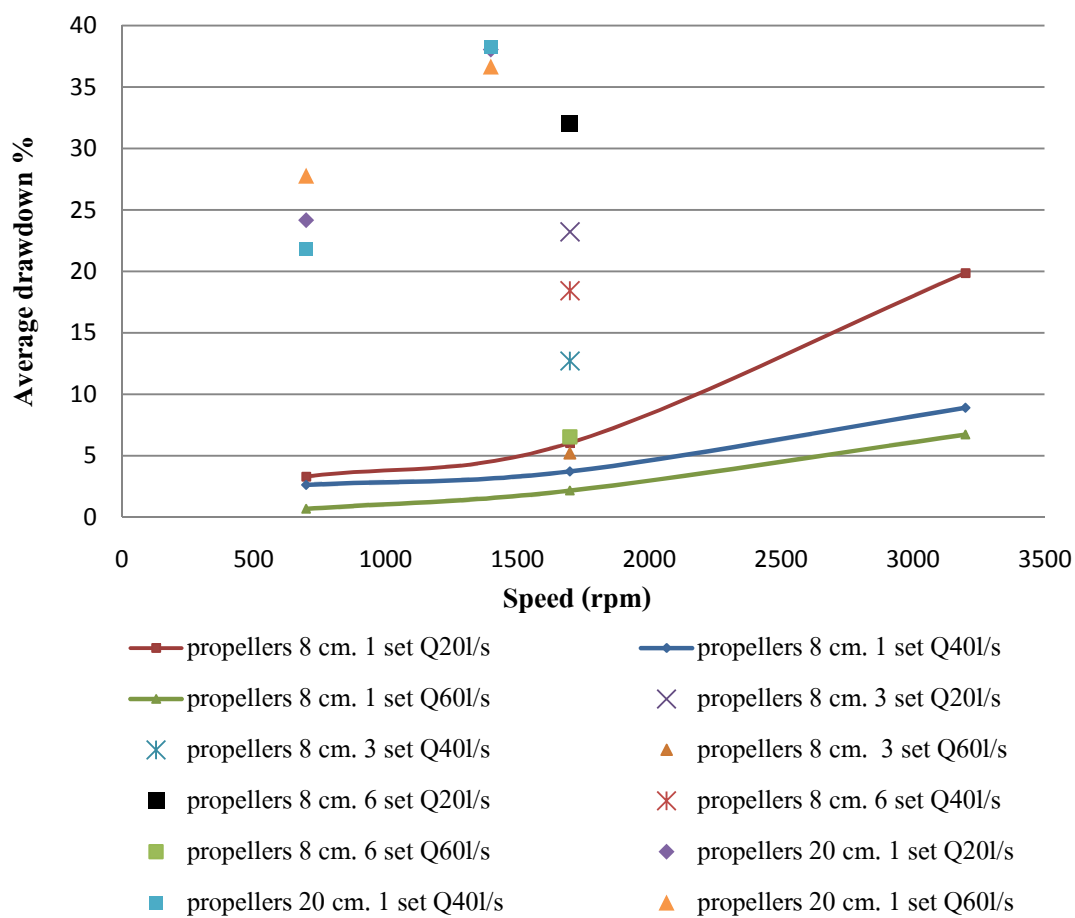
ตารางที่ 10 การเกิด Drawdown และร้อยละ Drawdown ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm.

| Propellers diameter cm. | Number of propellers(set) | Speed rpm | Average drawdown m.(%) | | |
|-------------------------|---------------------------|-----------|------------------------|---------------|--------------|
| | | | 20 l/s | 40 l/s | 60 l/s |
| 8 | 1 | 700 | 0.003(3.311) | 0.00075(2.63) | 0.002(0.67) |
| 8 | 1 | 1700 | 0.01(6.04) | 0.006(3.73) | 0.008(2.16) |
| 8 | 1 | 3200 | 0.036(19.87) | 0.02525(8.90) | 0.023(6.72) |
| 8 | 3 | 700 | | | |
| 8 | 3 | 1700 | 0.044(23.22) | 0.0075(12.71) | 0.01(5.19) |
| 8 | 3 | 3200 | | | |
| 8 | 6 | 700 | | | |
| 8 | 6 | 1700 | 0.053(32.05) | 0.028(18.43) | 0.025(6.53) |
| 8 | 6 | 3200 | | | |
| 20 | 1 | 700 | 0.049(24.17) | 0.073(21.82) | 0.087(27.80) |
| 20 | 1 | 1400 | 0.079(38.04) | 0.12(38.27) | 0.122(36.66) |

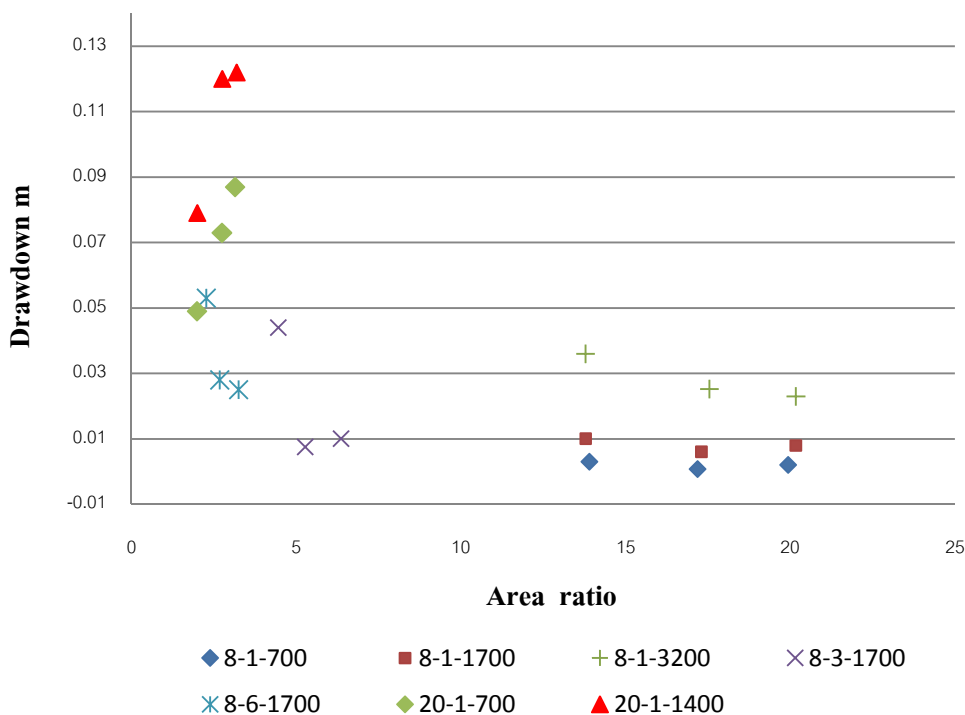


ภาพที่ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบใบพัดกับค่าเฉลี่ย Drawdown ที่เกิดของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm.

จากกราฟในภาพที่ 47 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด Drawdown มี 3 ปัจจัย คือ 1. ความเร็วรอบของใบพัด 2. จำนวนใบพัด 3. อัตราการไหล ซึ่งจากกราฟการเพิ่มของอัตราการไหลจะส่งผลถึง Drawdown น้อยที่สุด



ภาพที่ 48 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบใบพัดกับค่าเฉลี่ยร้อยละของ Drawdown ที่เกิดของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm.



ภาพที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm.

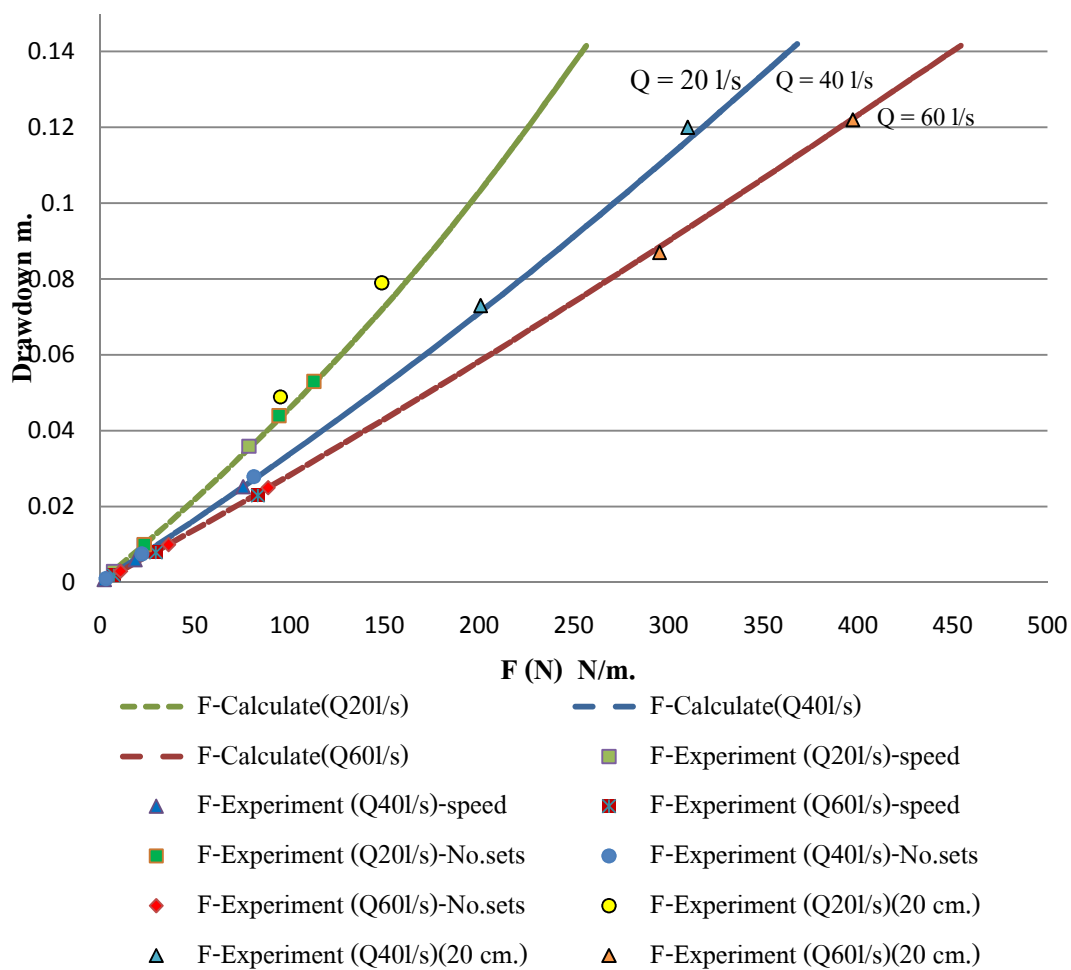
$\text{Area ratio} = \text{water area} / \text{propellers area}$

สัญลักษณ์: propellers of diameter - No. of sets - speed

จากกราฟที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ พบว่า ผลการทดลองแบ่งเป็นสามกลุ่ม ของการเกิด Drawdown คือ 1. การเพิ่ม speed มีผลทำให้ Drawdown สูงขึ้น จากผลในกราฟ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ 8-1-1700, 8-1-1700, 8-1-3200, 20-1-700, 20-1-1400 กลุ่มที่ 2 ค่า Area ratio ที่น้อยกว่าทำให้ได้การเกิด Drawdown ที่สูงกว่า ซึ่งค่า Area ratio ในปัจจุบันนี้เป็นผลมาจาก อัตราการไหลและ จำนวนของใบพัด กลุ่มที่ 3 ชนิดของใบพัดขนาดใหญ่กว่าจะให้การเกิดของ Drawdown ที่สูงกว่า

วิเคราะห์โมเมนต์

วิเคราะห์โมเมนต์ แรงของใบพัดที่เกิดขึ้นในการผลักดันน้ำ โดยเปรียบเทียบโมเมนต์ ในทาง ทฤษฎีดังแสดงดังภาพที่ 50 ของใบพัดขนาด 8 cm. เมื่อเปลี่ยนความเร็วรอบและเพิ่ม ปริมาณใบพัด และใบพัดขนาด 20 cm. ตามลำดับกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ



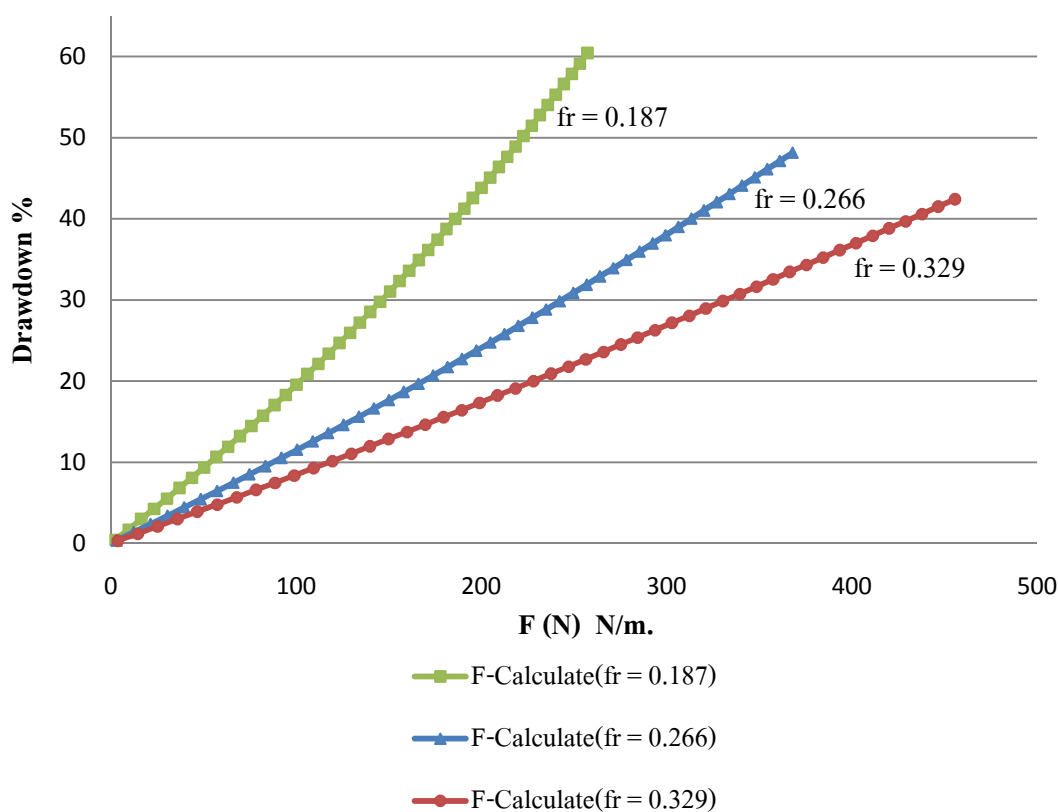
ภาพที่ 50 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักดันของใบพัด และ Drawdown ของใบพัด ขนาด 8 cm. ความเร็วรอบ 700, 1700, 3200 rpm และใบพัด ขนาด 8 cm. 1, 3, 6 ใบ ความเร็ว รอบใบพัด 1700 rpm และใบพัดขนาด 20 cm. ความเร็วรอบใบพัด 700, 1400 ในทาง ทฤษฎีและจากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ที่อัตราการไหล 20, 40, 60 l/s

$F(N)$ = For Water pushing force by propeller (Thrust)

F-Experiment -speed = ใบพัดขนาด 8 cm. เปลี่ยนความเร็วรอบ

F-Experiment -No. set = ใบพัดขนาด 8 cm. เปลี่ยนจำนวนใบพัด

F-Experiment -(20 cm.) = ใบพัดขนาด 20 cm. เปลี่ยนความเร็วรอบ



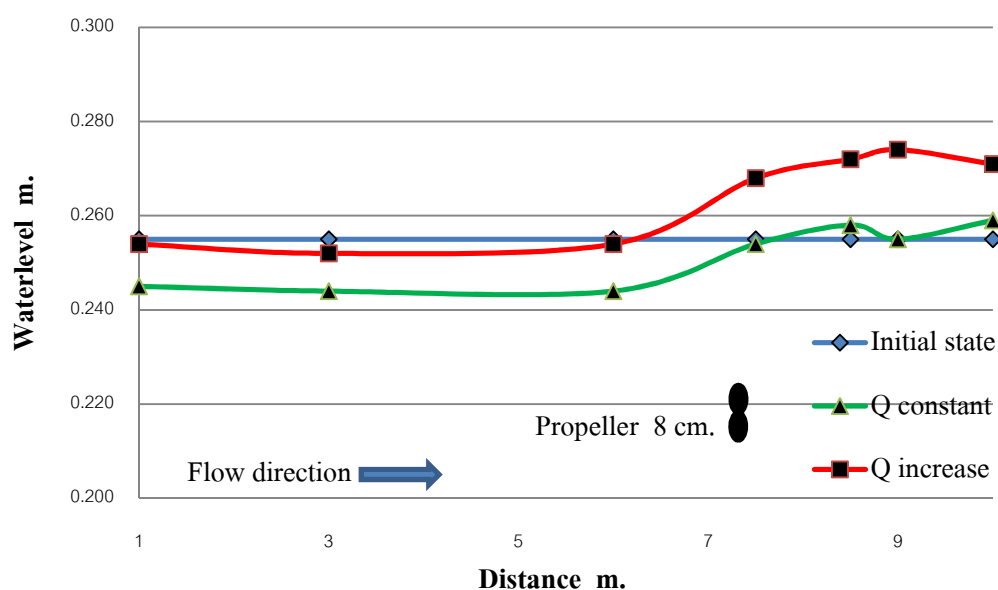
ภาพที่ 51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักดันของใบพัดและร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นที่ฟรุตันัมเบอร์ 0.187, 0.266, 0.329

$F(N)$ = Water pushing force by propeller (Thrust)

จากกราฟที่ 51 สามารถนำไปใช้ในสถานการณ์จริงโดยนำค่า fr ของการไหลนำมาเทียบกับกราฟ โดยจากกราฟนี้ fr ที่สามารถใช้ได้ในกราฟจะอยู่ในช่วง 0.187-0.329

การทดลองชุดที่ 2

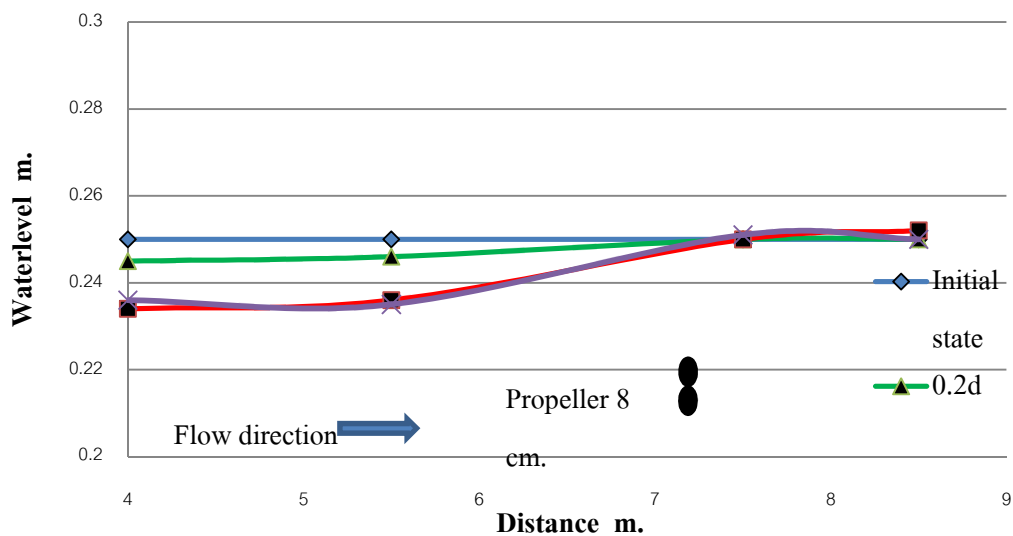
การทดลองในลักษณะที่มีการเพิ่มอัตราการไหลในทางน้ำ (Non-upstream control) นั้น พบว่า เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลเข้ามาในทางน้ำจะทำให้ Drawdown ของด้านเหนือน้ำจะลดลง และระดับน้ำด้านท้ายน้ำจะยกตัวสูงขึ้นอย่างถาวร ดังแสดงใน ภาพที่ 52 และอัตราการไหลในทางน้ำเพิ่มขึ้นจาก 48.8 L s^{-1} เป็น 52 L s^{-1}



ภาพที่ 52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ อัตราการไหล 40 l/s

การทดลองชุดที่ 3

ตำแหน่งของใบพัดในหน้าตัดของทางน้ำ โดยเลือกการวางใบพัดที่ด้านบนใกล้ผิวน้ำ กลาง และใกล้พื้นทางน้ำ ได้กราฟแสดงระดับน้ำด้านเหนือน้ำที่เกิด Drawdown เปรียบเทียบกัน สามจุด ดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัด ขนาด 8 cm. 3 ใบ อัตราการไหล 50 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 11 ที่ระดับบน กลาง ล่าง ของทางน้ำจะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.8%, 6% และ 36.66% ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 50 l/s) ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ความเร็วรอบ 2200 rpm

| ตำแหน่งของใบพัด m. | ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย m. | Drawdown % |
|-----------------------|----------------------------------|---------------|
| - | 0.250 | 0 |
| 0.2d | 0.246 | 1.8 |
| 0.5d | 0.235 | 6 |
| 0.8d | 0.236 | 5.8 |

d = ความลึกของน้ำ

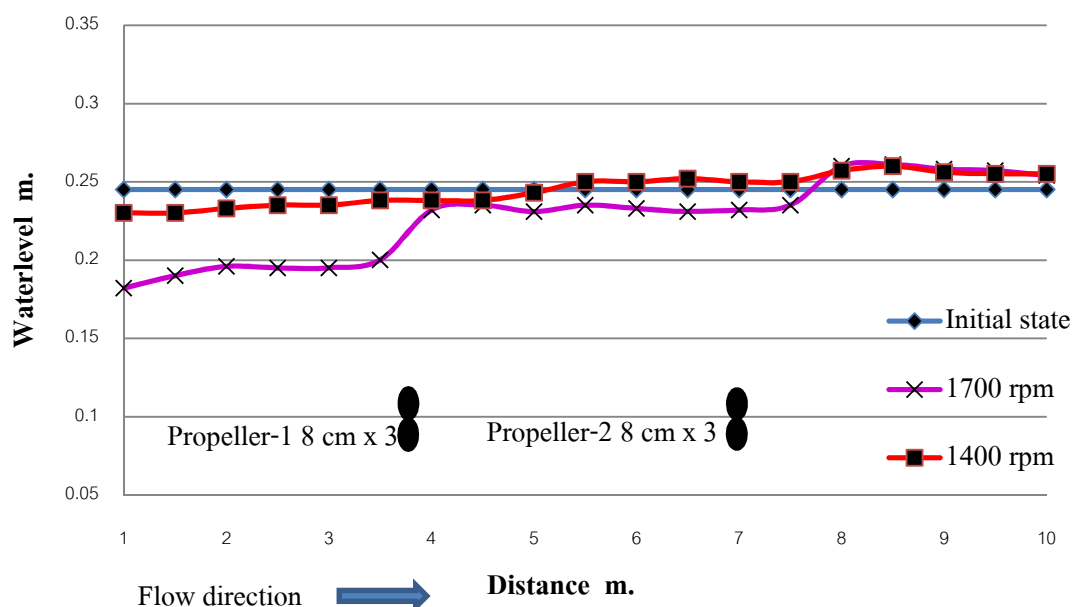
ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การวางใบพัดผลักดันน้ำที่ กึ่งกลางทางน้ำหรือบริเวณใกล้พื้นทางน้ำจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการวางใบพัดที่ใกล้ผิวน้ำ

การทดลองชุดที่ 4

การผลักดันน้ำแบบอนุกรม

จากการทดลองใช้ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด ใช้ความเร็วรอบใบพัด 1400 และ 1700 rpm ติดตั้งสองจุดในทางน้ำเป็นลักษณะอนุกรม พบว่า ระดับน้ำด้านเหนือน้ำก่อนใบพัดตัวที่ 1 และก่อนใบพัดตัวที่ 2 และระดับน้ำด้านท้ายน้ำ จะยกตัวสูงขึ้นมากกว่าระดับน้ำเดิมก่อนมีการผลักดันน้ำ จากการทดลองจะได้ระดับน้ำและ Drawdown ดังแสดงในกราฟระดับน้ำที่ระยะทางต่างๆ ดังนี้

อัตราการไหล 20 l/s



ภาพที่ 54 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด อัตราการไหล 20 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 12 ที่อัตราการไหล 20 l/s ความเร็วรอบ 1400, 1700 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่มากที่สุด ด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 1 เท่ากับ 4.69% และ 21.22% ตามลำดับ

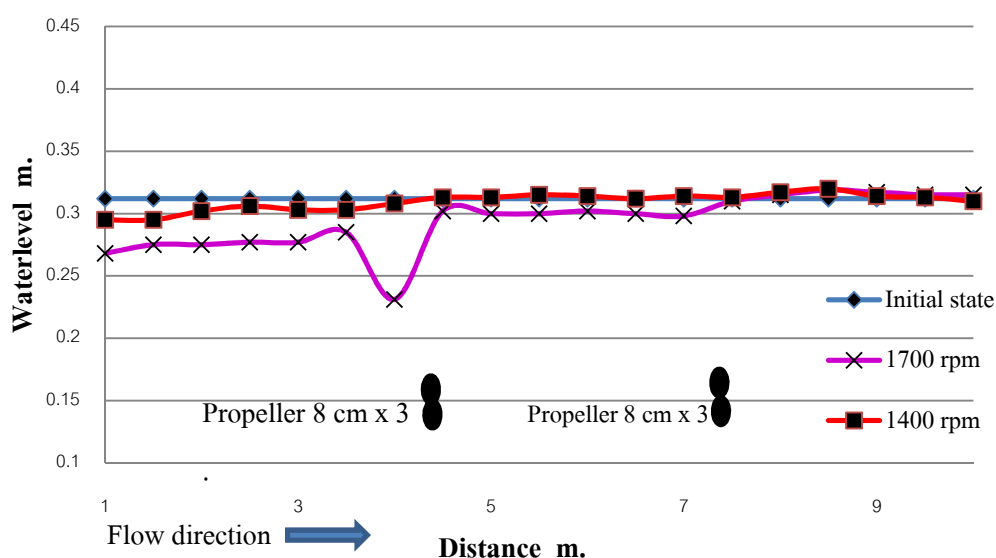
ตารางที่ 12 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 20 l/s)
ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด

| ความเร็วรอบใบพัด (rpm) | Drawdown(1) % | Drawdown(2) % |
|---------------------------|------------------|------------------|
| 1400 | 4.69 | 0.41 |
| 1700 | 21.22 | 4.97 |

Drawdown(1) = Drawdownด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 1

Drawdown(2) = Drawdownด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 2

อัตราการไหล 40 l/s



ภาพที่ 55 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด อัตราการไหล 40 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 13 ที่อัตราการไหล 40 l/s ความเร็วรอบ 1400,1700 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่มากที่สุด ด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 1 เท่ากับ 3.63% และ 11.48% ตามลำดับ

ตารางที่ 13 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 40 l/s)

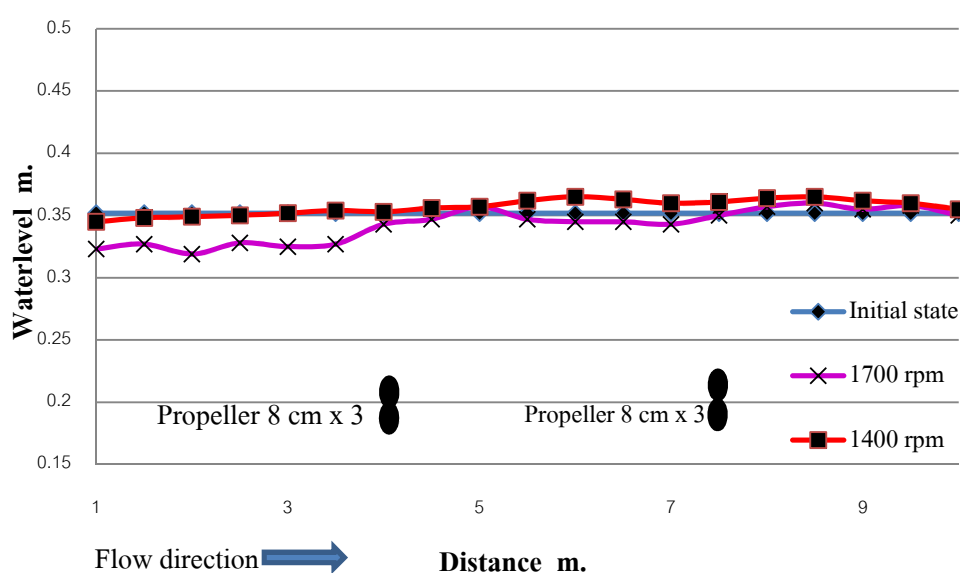
ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด

| ความเร็วรอบใบพัด (rpm) | Drawdown(1) | Drawdown(2) |
|---------------------------|-------------|-------------|
| | % | % |
| 1400 | 3.63 | 0.32 |
| 1700 | 11.48 | 3.74 |

Drawdown(1) = Drawdownด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 1

Drawdown(2) = Drawdownด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 2

อัตราการไหล 60 l/s



ภาพที่ 56 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและระยะทางในฟลูมทดลองของ ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุดอนุกรม อัตราการไหล 60 l/s

ค่าของระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ย และร้อยละของการลดลงของระดับน้ำเมื่อเทียบกับระดับน้ำเดิม แสดงดัง ตารางที่ 14 ที่อัตราการไหล 60 l/s ความเร็วรอบ 1400,1700 rpm จะได้ค่าร้อยละของ Drawdown ที่มากที่สุด ด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 1 เท่ากับ 0.66% และ 7.72% ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ระดับน้ำด้านเหนือน้ำเฉลี่ยและ ร้อยละของ Drawdown (Q 60l/s)
ใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ 2 ชุด

| ความเร็วรอบใบพัด (rpm) | Drawdown(1) % | Drawdown(2) % |
|---------------------------|------------------|------------------|
| 1400 | 0.66 | 0.28 |
| 1700 | 7.72 | 1.33 |

Drawdown(1) = Drawdownด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 1

Drawdown(2) = Drawdownด้านเหนือน้ำของใบพัดตัวที่ 2

วิจารณ์

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้ หาความเร็ว และอัตราการไหลในแต่ละการทดลองพบว่า ที่การทดลองในสภาวะที่อัตราการไหลไม่เปลี่ยนแปลง หลังจากการเปิดเครื่องผลักดันน้ำแล้วจากผลการทดลองวัดอัตราการไหลโดยการตวงน้ำ โดยรวมแล้ว อัตราการไหลไม่มีการเพิ่มขึ้นหลังจากการผลักดันน้ำยกตัวอย่างเช่น กรณีใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่ความเร็วใบพัด 3200 rpm และ ใบพัดขนาด 20 cm. ความเร็วรอบใบพัด 700 rpm

ตารางที่ 15 อัตราการไหลจริงจากการตวง ก่อนและหลังการผลัดดันน้ำของใบพัดขนาด 8 cm.
1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 3200 rpm

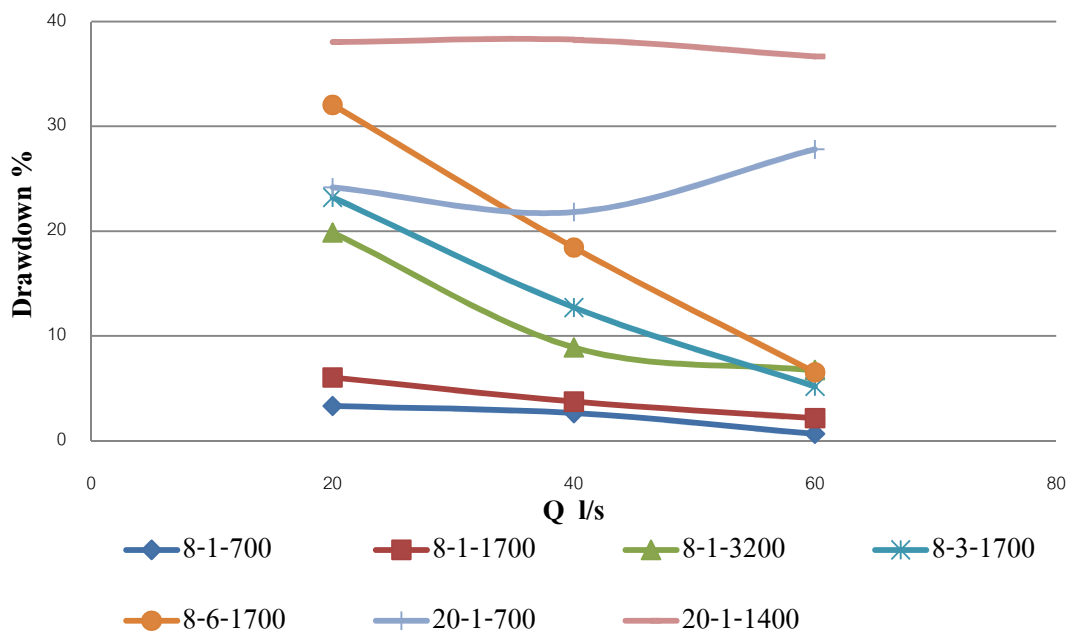
| อัตราการไหล ประมาณการ m^3/s | อัตราการการไหล ก่อนการผลัดดัน (ตวง) m^3/s | อัตราการการไหล หลังการผลัดดัน (ตวง) m^3/s | ผลต่างอัตราการไหล ก่อนและหลัง m^3/s |
|-------------------------------------|---|---|---|
| 20 | 0.019 | 0.0196 | -0.0006 |
| 40 | 0.038 | 0.0407 | -0.00270 |
| 60 | 0.061 | 0.0635 | -0.0025 |

ตารางที่ 16 อัตราการไหลจริงจากการตวง ก่อนและหลังการผลัดดันน้ำของใบพัดขนาด 20 cm.
1 ใบ ความเร็วรอบใบพัด 700 rpm

| อัตราการไหล ประมาณการ m^3/s | อัตราการการไหล ก่อนการผลัดดัน (ตวง) m^3/s | อัตราการการไหล หลังการผลัดดัน (ตวง) m^3/s | ผลต่างอัตราการไหล ก่อนและหลัง m^3/s |
|-------------------------------------|---|---|---|
| 20 | 0.0194 | 0.0205 | -0.0011 |
| 40 | 0.0382 | 0.0398 | -0.0016 |
| 60 | 0.0607 | 0.0652 | -0.0045 |

ซึ่งจากตารางตัวที่ 15 และ 16 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลจากการตวงน้ำก่อนและหลังการผลัดดันน้ำนั้นใกล้เคียงกัน และผลต่างอัตราการไหลก่อนและหลังการผลัดดันน้ำมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการผลัดดันน้ำในลักษณะนี้ จะไม่สามารถเพิ่มอัตราการไหลในทางน้ำได้ โดยจะมีผลต่อทางน้ำคือทำให้เกิดการลดลงของระดับน้ำที่ด้านเหนือน้ำหรือ Drawdown

จากการทดลองชุดที่ 1 การผลัดดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. จากอัตราการไหลเริ่มต้นที่ 20 l/s เพิ่มอัตราการไหลขึ้นเป็น 40,60 l/s ตามลำดับ ร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลในแต่ละการทดลอง ดังกราฟในภาพที่ 57

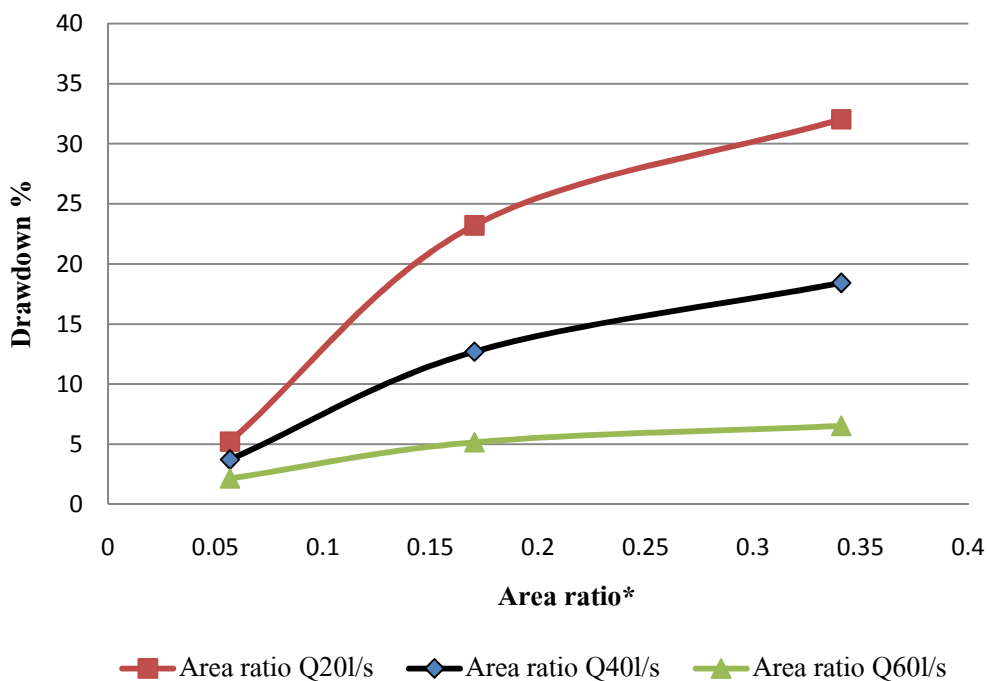


ภาพที่ 57 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้นจากการทดลองด้วยใบพัดแบบต่างๆ กับอัตราการไหลที่ใช้ 20, 40, 60 l/s

หมายเหตุ: * Propeller diameter - Number of set - Propeller speed

โดยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มปริมาณมวลน้ำ ทำให้ใบพัดที่ทำงานให้ Drawdown ลดลงในการเพิ่มแต่ละอัตราการไหล เนื่องจากต้องใช้แรงโมเมนตัมมากขึ้นในการผลักดันน้ำ ซึ่งแรงโมเมนตัมที่ใช้แสดงดังกราฟภาพที่ 50 ของ ทำให้การเกิด Drawdown ลดลงไปตามผลการทดลองที่ได้แสดงไปแล้ว

ผลการทดลองผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ 3 ความเร็วรอบและการเพิ่มจำนวนใบพัดของการทดลองผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. จาก 1 ใบ เป็น 3 ใบ และ 6 ใบ พบว่าการเพิ่มของ Drawdown ของการเพิ่มจำนวนใบมีผลทำให้เกิด Drawdown มากกว่าการเพิ่มความเร็วรอบของใบพัด ดังนั้นพื้นที่หน้าตัดใบพัดจึงมีผลต่อพื้นที่ทางน้ำด้วย อัตราส่วนของหน้าตัดใบต่อหน้าตัดทางน้ำกับร้อยละ Drawdown ที่เกิดขึ้น ของการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 6 ใบ ความเร็วรอบ 1700 rpm อัตราการไหล 20, 40, 60 l/s แสดงดังกราฟภาพที่ 58

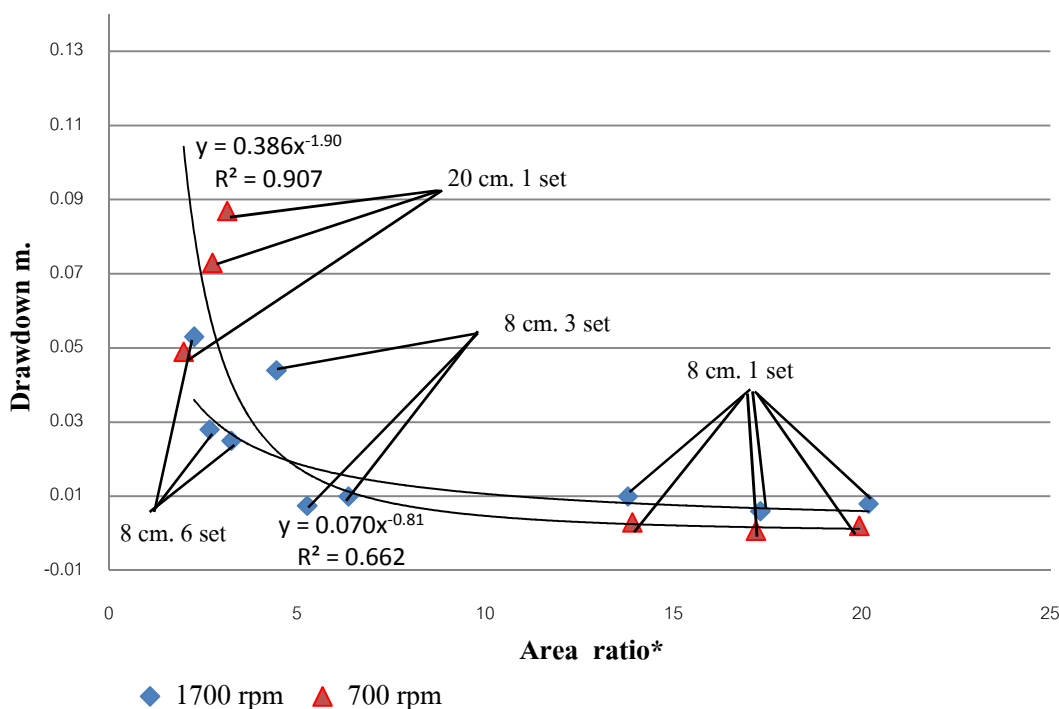


ภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของหน้าตัดใบพัดต่อน้ำตัดทางน้ำ* กับ ร้อยละของ Drawdown ที่เกิดขึ้น ใบพัดขนาด 8 cm. 1, 3, 6 ใบ ความเร็วรอบ 1700 rpm อัตราการไหล 20, 40, 60 l/s

หมายเหตุ: * Area Ratio = พื้นที่หน้าตัดใบพัด / พื้นที่หน้าตัดของความลึกน้ำ

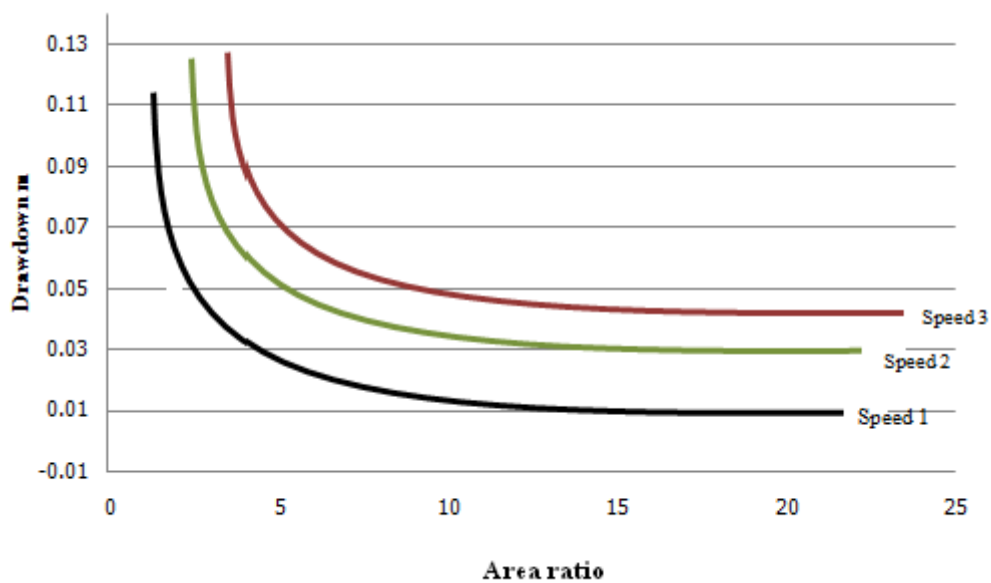
จากรูปแบบการทดลองทั้งหมด ใบพัดขนาด 20 cm. จะให้ Drawdown ได้สูงที่สุด ที่อัตราการไหล 40 l/s การทดลองชุดที่ 3 เรื่องตำแหน่งการวางใบพัดของทางน้ำ จะเห็นว่า Drawdown ที่เกิดขึ้นของการผลักดันน้ำ ที่ตำแหน่ง กึ่งกลางทางน้ำ และใกล้พื้นทางน้ำ จะให้ค่า Drawdown ที่ใกล้เคียงกัน และการวางใบพัดที่บริเวณใกล้ผิวน้ำจะให้ประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า

จากกราฟที่ 49 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ พบว่า ผลการทดลองแบ่งเป็นสองกลุ่ม ของการเกิด Drawdown คือ 1. การเพิ่ม Speed มีผลทำให้ Drawdown สูงขึ้น กลุ่มที่ 1 ได้แก่ 8-1-1700, 8-1-1700, 8-1-3200, 20-1-700, 20-1-1400 กลุ่มที่ 2 ค่า Area ratio ที่น้อยกว่าทำให้ได้การเกิด Drawdown ที่สูงกว่า จากความสัมพันธ์ของสองกลุ่มดังกล่าวจะได้ และแยกกลุ่มที่ 2 ออกมา จะได้กราฟที่ 59



ภาพที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm. ความเร็วรอบใบพัด 700 และ 1700 rpm
 *Area ratio = water area / propellers area

จากภาพกราฟที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ที่เกิดขึ้นในกรณี ที่ความเร็วรอบของใบพัดเท่ากันที่ 700 และ 1700 สองชุดข้อมูลในกราฟ เมื่อทำการ Fitting Curve จะได้ความสัมพันธ์เป็นแบบสมการยกกำลัง ดังรูป ค่า R² ของ Curve ที่ความเร็ว 1700 rpm เท่ากับ 0.662 Curve ความเร็วรอบ 700 rpm เท่ากับ 0.907 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ ความเร็วรอบเดียวกัน Area ratio มีผลต่อ Drawdown ที่เกิดขึ้น โดยที่เมื่อค่า Area ratio มีค่าสูงขึ้น Drawdown จะมีค่าลดลง ในทางกลับกันจากกราฟที่ 59 ความสัมพันธ์ของ Speed กับ Drawdown ที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้นที่ว่า เมื่อ Speed ของใบพัดเพิ่มขึ้น Drawdown จะเพิ่มขึ้นด้วย ดังตัวอย่างกราฟที่ 60 แต่ความสัมพันธ์จากผลการทดลองในกราฟที่ 59 ไม่เป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว ซึ่งเป็นผลมาจาก Curve ของ Speed 700 rpm มีใบพัด สองชนิด ในการทดลองคือ ใบพัดขนาด 20 cm. และ 8 cm. ทำให้ Drawdown ไม่มีความสม่ำเสมอ และไม่เป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว



ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ที่ความเร็วต่างๆ (Speed 3 > Speed 2 > Speed 1)

หมายเหตุ: *Area ratio = water area / propellers area

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองผลึกดันน้ำ ด้วยใบพัดทั้งสองชนิดพบว่า เมื่อเริ่มเดินเครื่องผลึกดันน้ำ สิ่งที่เกิดขึ้นก็คือ น้ำไหลเร็ว ขึ้นระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำจะค่อยๆยุบตัวลง ซึ่งเรียกว่า Drawdown และเป็นผลให้ระดับน้ำด้านท้ายน้ำยกตัวสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าอัตราการระบายน้ำเพิ่มขึ้น แต่ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น ถ้า "Drawdown" ที่เกิดขึ้นทางด้านเหนือน้ำไม่สามารถเพิ่มอัตราการไหลของน้ำได้ เนื่องจากข้อจำกัดของทางด้านเหนือน้ำ ระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำก็จะลดลงเท่ากับระดับน้ำเดิมก่อนการเดินเครื่องผลึกดันน้ำ กรณีนี้จะสรุปได้ว่าการผลึกดันน้ำมีผลเพียงทำให้เกิด "Drawdown" ทางด้านเหนือน้ำซึ่งเกิดผลคือระดับน้ำทางด้านเหนือน้ำลดลง แต่ไม่ได้เพิ่มอัตราการระบายน้ำแต่อย่างใด แต่ถ้า "Drawdown" ที่เกิดขึ้นมีผลทำให้ทางน้ำมีความจุเพิ่มขึ้น น้ำจากคลองสาขาหรือจากท่อระบายน้ำ หรือน้ำที่ไหลล้นตลิ่งบริเวณเหนือน้ำ สามารถไหลลงสู่ทางน้ำได้มากขึ้น ปริมาณน้ำที่ถูกผลักไปด้านท้ายน้ำก็จะยิ่งมีมากขึ้น มีผลทำให้ระดับน้ำทางด้านท้ายน้ำยกตัวสูงขึ้นแบบถาวร จะสรุปได้ว่าการผลึกดันน้ำในลักษณะนี้สามารถเพิ่มอัตราการระบายน้ำได้จริง

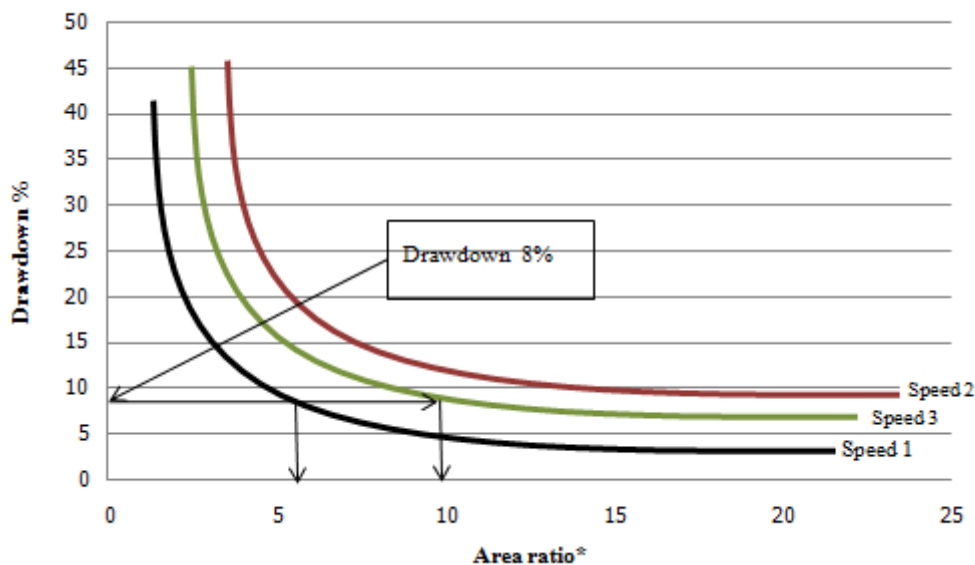
"Drawdown" ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบและอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของใบพัดต่อพื้นที่หน้าตัดทางน้ำ ถ้าความเร็วรอบของใบพัดที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วนของพื้นที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ระดับของ Drawdown เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน ที่อัตราส่วนพื้นที่ที่ทางน้ำต่อพื้นที่ใบพัด (Area ratio) ที่ความเร็วรอบเดียวกัน พบว่า เมื่อ Area ratio มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ Drawdown ที่ขึ้นนั้นลดลง โดยที่ค่า Area ratio ที่มีค่าน้อยจะให้ผลของการเกิด Drawdown ที่สูง ซึ่งจากผลการทดลอง ใบพัดขนาด 8 cm. เมื่อใช้จำนวนใบพัด 6 ใบ ทำให้เกิด Drawdown สูงสุดที่ 32.05% ที่อัตราการไหล 20 l/s และใบพัดขนาด 20 cm. ทำให้เกิด Drawdown สูงสุดที่ 38.27% ที่อัตราการไหล 40 l/s และถ้ามีการเพิ่มอัตราการไหลในทางน้ำด้านเหนือน้ำ ระดับน้ำด้านเหนือน้ำจะยกตัวสูงขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ระดับของ Drawdown จะลดลง และระดับน้ำท้ายน้ำจะยกตัวสูงขึ้นอย่างถาวรแสดงถึงอัตราการระบายน้ำที่สูงขึ้น กรณีนี้จะมีผลทำให้ระดับน้ำท้ายน้ำจะยกตัวสูงจนอาจล้นตลิ่งได้ ดังนั้นตำแหน่งที่เหมาะสมต้องการติดตั้งเครื่องผลึกดันน้ำคือบริเวณปากแม่น้ำ หรือใกล้ๆ จุดระบายน้ำทิ้ง ที่เมื่อระดับน้ำท้ายน้ำยกตัวแล้วจะไม่ล้นเข้าท่วมพื้นที่สำหรับด้านท้ายน้ำที่เป็นปากแม่น้ำหรือทะเล หรือระดับน้ำด้านท้ายน้ำ ที่อาจจะมียกระดับที่สูงขึ้น

จากการหมุนของน้ำทะเลหรือปัจจัยภายนอกนั้น จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการผลักดันน้ำด้วย เพราะปริมาณน้ำด้านท้ายน้ำจะไหลกลับมาทางด้านเหนือน้ำ ซึ่งทำให้เครื่องผลักดันน้ำจะดันน้ำไปด้านหน้าได้นั้นน้อยลง เนื่องจากแรงน้ำที่ไหลย้อนมา ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับระดับและปริมาณน้ำด้านท้ายน้ำที่สูงขึ้นหรือมากขึ้นอีกด้วย และการเพิ่มจำนวนของเครื่องผลักดันน้ำ โดยการนำมาต่อกันแบบอนุกรม ก็จะมีผลทำให้ระดับน้ำท้ายน้ำของเครื่องผลักดันน้ำตัวสุดท้ายสูงขึ้นมากกว่าการใช้เครื่องผลักดันน้ำชุดเดียว จึงต้องมีการวางแผนบริหารจัดการน้ำบริเวณท้ายน้ำให้เหมาะสม

ผลสรุปประสิทธิผลของการผลักดันน้ำในทางน้ำเปิดนั้นคือ การผลักดันน้ำสามารถที่จะช่วยเพิ่มอัตราการระบายน้ำได้นั้น อัตราการไหลหลังเครื่องผลักดันน้ำหรืออัตราการไหลในทางน้ำนั้นจะสูงขึ้นหลังการเปิดเครื่องผลักดันน้ำ แต่ถ้าในกรณีที่อัตราการไหลในทางน้ำไม่สูงขึ้น จะมีผลทำให้เกิด Drawdown ขึ้นที่ด้านเหนือน้ำ ซึ่งจะมีผลช่วยให้ระดับน้ำด้านเหนือน้ำลดลงและอาจช่วยลดอุทกภัยน้ำท่วมได้โดยระดับน้ำที่ลดลงอาจจะป้องกันคลื่นพังเสียหายหรือมวลน้ำที่บ่าล้นตลิ่งไหลเข้าท่วมพื้นที่

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองเพิ่มเติมในส่วนของ Drawdown กับ Area ratio (Water/propeller) และ Drawdown ที่ความเร็วรอบใบพัดต่างๆ เพื่อการนำไปใช้ในการผลักดันน้ำในแม่น้ำ และตอบคำถามได้ว่า เมื่อต้องการทำให้เกิด Drawdown ที่ต้องการ จะต้องใช้ความเร็วรอบที่เท่าไรและ Speed ที่เท่าไร ดังกราฟที่ 61



ภาพที่ 61 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัดกับ Drawdown ที่ความเร็วต่างๆ

หมายเหตุ: *Area ratio = water area / propellers area

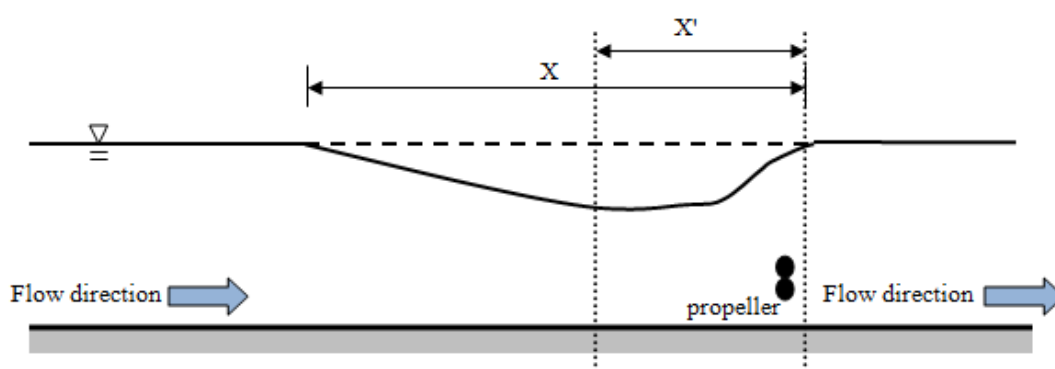
เช่น ต้องการให้เกิด Drawdown 8% จากกราฟจะพบว่าเราสามารถเลือกได้ ข้อมูลได้ 2 ชุด คือ ที่ Speed 1 จะได้ค่า Area Ratio 5.5 ชุดที่ 2 ที่ Speed 2 Area Ratio 10 ก็จะสามารถนำไปปรับใช้กับขนาดทางน้ำ หรือเครื่องจักรที่มีอยู่ได้

2. จากข้อเสนอแนะที่ 1 เมื่อได้ค่า Area ratio ที่ต้องการ อาจต้องมีการทดสอบในเรื่องของ จำนวนใบพัด ต่อประสิทธิภาพการเกิด Drawdown ที่เกิดขึ้น ค่า Area ratio ที่ได้มานั้น ต้องใช้จำนวนใบเท่าใดจึง จึงทำให้เกิด Drawdown ที่เหมาะสม หรือดีที่สุด

3. รูปแบบของลักษณะใบพัด ต่อประสิทธิภาพภาพการผลัดคั้นน้ำ

4. การเปรียบเทียบผลการทดลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(CFD) เพื่อเปรียบเทียบปรากฏการณ์และผลที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองทางกายภาพ โดยการทดลองใน CFD จะทำการผลัดคั้นน้ำโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ประกอบไปด้วย ขนาดฟลูม ขนาดใบพัด รูปแบบใบพัดลักษณะต่างๆ จำนวนใบ อัตราการไหล และความเร็วรอบใบพัด และช่วยหาค่าตอบเพิ่มเติมจาก

ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจากรูปที่ 62 การทดลองในห้องปฏิบัติการจะทำให้ทราบค่า Drawdown ที่ค่า X' ซึ่งเราจะไม่สามารถทราบได้ว่า Drawdown ที่เกิดขึ้นนั้นจะไปสิ้นสุดลงที่ระยะทางเท่าไร นั่นคือระยะ X ที่เราไม่ทราบค่า เนื่องจากข้อจำกัดของความยาวด้านเหนือน้ำของทางน้ำในห้องปฏิบัติการชลศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้เราสามารถเพิ่มระยะทางด้านเหนือน้ำได้ยาวมากกว่า และจะได้คำตอบที่ว่าระยะของ Drawdown ที่เกิดขึ้นจะยาวไปเป็นระยะทางเท่าใดในการผลักดันน้ำ



ภาพที่ 62 แสดงระยะการเกิด Drawdown ในทางน้ำ

5. จากสมการโมเมนตัม จะได้แรง F (n) หรือแรงที่ใช้ผลักดันน้ำ ซึ่งเป็นการคิดแรงที่ใบพัดกระทำต่อน้ำ ดังนั้นต้องมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของแรงที่เกิดเมื่อถ่ายมาจากเครื่องยนต์ส่งผ่านสู่ใบพัดและส่งกำลังหรือพลังงาน ไปดันน้ำ นำไปสู่การเลือกใช้ขนาดของใบพัดและเครื่องยนต์ที่มีขนาดเหมาะสม เมื่อใช้ในทางน้ำขนาดต่างๆ

6. การศึกษา ในส่วนของปัจจัยที่มีผลต่อค่า F (n) หรือแรงที่ใช้ผลักดันน้ำ ประกอบด้วย การพิจารณา อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดทางน้ำต่อพื้นที่หน้าตัดใบพัด (Area ratio) ความเร็วรอบใบพัด ความเร็วน้ำ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่า F (n) ในส่วนของค่า Area ratio นั้นยังเกี่ยวข้องกับขนาดของใบ โดยจากการทดลอง ที่ค่า Area ratio มีค่าเท่ากันแต่ขนาดของใบพัดไม่เท่ากัน Drawdown ที่ได้ไม่เท่ากัน โดยที่ใบพัดขนาดใหญ่กว่า ทำให้เกิด Drawdown สูงกว่า ที่ความเร็วรอบเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าแรง F (n) ที่น้ำได้รับไม่เท่ากัน ซึ่งต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนนี้ถึงปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิริติ ลีวัจนกุล. 2550. การไหลในทางน้ำเปิด. วิศวกรรมชลศาสตร์. SPEC, ปทุมธานี.
- จิระกานต์ ศิริวิชญ์ไมตรี. 2555. หลักการผลัดดันน้ำเบื้องต้น. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปรียาพร โกษา. 2552. ทางน้ำเปิด. สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พงศธร โสภากันธุ์. 2550. กังหัน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐมฯ.
- ชัยคร ออภาเวลา. 2553. กลศาสตร์ของไหล. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วุฒิเกียรติ ทัดพิทักษ์กุล. 2547. การวิเคราะห์สมรรถนะกังหันน้ำด้วยวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. 2553. **propeller**. แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0451/propeller>, 25 มกราคม 2557.
- สนิธ วงษา. 2542. การเปรียบเทียบแบบจำลองคำนวณการไหลแบบเปลี่ยนแปลงหนึ่งมิติ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 22 (2): 95-111.
- Engineer Hydraulic jump and its practical applications. 2013. **Hydraulic jump**. Available Source: <http://optimist4u.blogspot.com/2011/04/hydraulic-jump-and-its-practical.html>, April 18, 2013.

Flexofold sailboat propellers. 2010. **2-Blade folding propeller**. Available Source:

<http://www.flexofold.com/2-blade-folding-propeller/>, May 21, 2013.

Kamome-Propeller. 2009. **Controllable Pitch Propellers**. Available Source:

<http://www.kamome-propeller.co.jp/en/products/propeller/cpp/>, May 21, 2013.

Marine, I. 2010. **Propeller, Types of Propellers and Construction of Propellers**.

Available Source: <http://www.marineinsight.com/sports-luxury/equipment/propeller-types-of-propellers-and-construction-of-propellers/>, May 21, 2013.

Ngc Marine Propulsion Europe. 2013. **Fixed Pitch Propellers**. Available Source:

http://ngcmarinepropulsion europe.com/?page_id=148. May 21, 2013.

R C8RIEW SHOP. 2010. **Brass propeller 32**. Available Source: http://www.rc8riew.com/Default.aspx?pageid=112&PRODUCT_ID=456, January 25, 2014.

Wua, H.N., J.C. Long, H.Y. Ming, Y.L. Wen and F.C. Bang. 2012. On design and performance prediction of the horizontal-axis water turbine. **An International Journal of Research and Development Ocean Engineering** 50 (2012): 23–30.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบชุดที่ 1

ตารางผนวกที่ ก1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของการผลักดันน้ำ ก่อนมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตรา
การไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s

| เวลาดวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | | ระยะทาง m. | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3:00:16 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.234 |
| 16.2 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 | 0.277 |
| 30.9 cm. | 0.019 | พลังงาน | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.238 |
| 2:58:97 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 |
| 31.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 |
| 60.2 cm. | 0.038 | พลังงาน | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 |
| 3:00:41 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 |
| 12.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 |
| 58.2 cm. | 0.061 | พลังงาน | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 |

ตารางผนวกที่ ก2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั่นน้ำ หลังมีการผลัดคั่นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 700 rpm

| เวลาตวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | 0.0259 | ระดับน้ำ cm. | 0.220 | 0.220 | 0.224 | 0.225 | 0.228 | 0.230 | 0.231 | 0.232 | 0.230 | 0.232 | 0.233 | 0.235 | 0.235 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.232 | 0.230 | 0.227 |
| 17.4 | | ความเร็ว m/s | 0.393 | 0.393 | 0.386 | 0.384 | 0.379 | 0.376 | 0.374 | 0.373 | 0.376 | 0.373 | 0.371 | 0.368 | 0.368 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.373 | 0.376 | 0.381 |
| 37 | | พลังงานรวม E | 0.228 | 0.228 | 0.232 | 0.233 | 0.235 | 0.237 | 0.238 | 0.239 | 0.237 | 0.239 | 0.240 | 0.242 | 0.242 | 0.241 | 0.241 | 0.241 | 0.239 | 0.237 | 0.234 |
| | | Fr | 0.267 | 0.267 | 0.260 | 0.259 | 0.253 | 0.250 | 0.249 | 0.247 | 0.250 | 0.247 | 0.245 | 0.242 | 0.242 | 0.244 | 0.244 | 0.244 | 0.247 | 0.250 | 0.255 |
| 3:00:22 | 0.0417 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 43 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.283 | 0.283 | 0.285 | 0.285 | 0.288 | 0.292 | 0.292 | 0.290 | 0.293 | 0.296 | 0.293 | 0.290 | 0.290 | 0.290 | 0.290 | 0.287 | 0.285 | 0.285 | 0.280 |
| 74.5 | | ความเร็ว m/s | 0.491 | 0.491 | 0.487 | 0.487 | 0.482 | 0.476 | 0.476 | 0.479 | 0.474 | 0.469 | 0.474 | 0.479 | 0.479 | 0.479 | 0.479 | 0.484 | 0.487 | 0.487 | 0.496 |
| | | พลังงานรวม E | 0.295 | 0.295 | 0.297 | 0.297 | 0.300 | 0.304 | 0.304 | 0.302 | 0.304 | 0.307 | 0.304 | 0.302 | 0.302 | 0.302 | 0.302 | 0.299 | 0.297 | 0.297 | 0.293 |
| | | Fr | 0.295 | 0.295 | 0.292 | 0.292 | 0.287 | 0.281 | 0.281 | 0.284 | 0.280 | 0.275 | 0.280 | 0.284 | 0.284 | 0.284 | 0.284 | 0.288 | 0.292 | 0.292 | 0.299 |
| 3:00:34 | 0.0635 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 28.5 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.335 | 0.330 | 0.330 | 0.335 | 0.330 | 0.335 | 0.332 | 0.335 | 0.335 | 0.342 | 0.333 | 0.335 | 0.340 | 0.335 | 0.335 | 0.332 | 0.327 | 0.325 | 0.320 |
| 60.5 | | ความเร็ว m/s | 0.632 | 0.641 | 0.641 | 0.632 | 0.641 | 0.632 | 0.638 | 0.632 | 0.632 | 0.619 | 0.636 | 0.632 | 0.623 | 0.632 | 0.632 | 0.638 | 0.647 | 0.651 | 0.662 |
| | | พลังงานรวม E | 0.355 | 0.351 | 0.351 | 0.355 | 0.351 | 0.355 | 0.353 | 0.355 | 0.355 | 0.362 | 0.354 | 0.355 | 0.360 | 0.355 | 0.355 | 0.353 | 0.348 | 0.347 | 0.342 |
| | | Fr | 0.349 | 0.357 | 0.357 | 0.349 | 0.357 | 0.349 | 0.353 | 0.349 | 0.349 | 0.338 | 0.352 | 0.349 | 0.341 | 0.349 | 0.349 | 0.353 | 0.361 | 0.365 | 0.373 |

ตารางผนวกที่ ก3 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

| เวลาตวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | 0.0238 | ระดับน้ำ cm. | 0.215 | 0.217 | 0.219 | 0.221 | 0.221 | 0.222 | 0.222 | 0.222 | 0.230 | 0.233 | 0.234 | 0.234 | 0.232 | 0.232 | 0.233 | 0.231 | 0.229 | 0.228 | 0.226 |
| 7 | | ความเร็ว m/s | 0.369 | 0.366 | 0.362 | 0.359 | 0.359 | 0.358 | 0.358 | 0.358 | 0.345 | 0.341 | 0.339 | 0.339 | 0.342 | 0.342 | 0.341 | 0.344 | 0.347 | 0.348 | 0.351 |
| 25 | | พลังงานรวม E | 0.222 | 0.224 | 0.226 | 0.228 | 0.228 | 0.229 | 0.229 | 0.229 | 0.236 | 0.239 | 0.240 | 0.240 | 0.238 | 0.238 | 0.239 | 0.237 | 0.235 | 0.234 | 0.232 |
| | | Fr | 0.254 | 0.251 | 0.247 | 0.244 | 0.244 | 0.242 | 0.242 | 0.242 | 0.230 | 0.225 | 0.224 | 0.224 | 0.227 | 0.227 | 0.225 | 0.228 | 0.231 | 0.233 | 0.236 |
| 3:00:22 | 0.0463 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 10 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.280 | 0.284 | 0.284 | 0.285 | 0.286 | 0.286 | 0.283 | 0.284 | 0.294 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.293 | 0.293 | 0.291 | 0.290 | 0.287 | 0.285 | 0.282 |
| 45 | | ความเร็ว m/s | 0.551 | 0.543 | 0.543 | 0.542 | 0.540 | 0.540 | 0.545 | 0.543 | 0.525 | 0.523 | 0.523 | 0.523 | 0.527 | 0.527 | 0.530 | 0.532 | 0.538 | 0.542 | 0.547 |
| | | พลังงานรวม E | 0.295 | 0.299 | 0.299 | 0.300 | 0.301 | 0.301 | 0.298 | 0.299 | 0.308 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.307 | 0.307 | 0.305 | 0.304 | 0.302 | 0.300 | 0.297 |
| | | Fr | 0.333 | 0.326 | 0.326 | 0.324 | 0.322 | 0.322 | 0.327 | 0.326 | 0.309 | 0.308 | 0.308 | 0.308 | 0.311 | 0.311 | 0.314 | 0.316 | 0.321 | 0.324 | 0.329 |
| 3:00:34 | 0.0635 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 12 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.335 | 0.330 | 0.330 | 0.335 | 0.330 | 0.335 | 0.332 | 0.335 | 0.335 | 0.342 | 0.333 | 0.335 | 0.340 | 0.335 | 0.335 | 0.332 | 0.327 | 0.325 | 0.320 |
| 44 | | ความเร็ว m/s | 0.632 | 0.641 | 0.641 | 0.632 | 0.641 | 0.632 | 0.638 | 0.632 | 0.632 | 0.619 | 0.636 | 0.632 | 0.623 | 0.632 | 0.632 | 0.638 | 0.647 | 0.651 | 0.662 |
| | | พลังงานรวม E | 0.355 | 0.351 | 0.351 | 0.355 | 0.351 | 0.355 | 0.353 | 0.355 | 0.355 | 0.362 | 0.354 | 0.355 | 0.360 | 0.355 | 0.355 | 0.353 | 0.348 | 0.347 | 0.342 |
| | | Fr | 0.349 | 0.357 | 0.357 | 0.349 | 0.357 | 0.349 | 0.353 | 0.349 | 0.349 | 0.338 | 0.352 | 0.349 | 0.341 | 0.349 | 0.349 | 0.353 | 0.361 | 0.365 | 0.373 |

ตารางผนวกที่ ก4 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 3200 rpm

| เวลาควมน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | 0.0196 | ระดับน้ำ cm. | 0.175 | 0.175 | 0.185 | 0.185 | 0.195 | 0.195 | 0.195 | 0.195 | 0.200 | 0.200 | 0.215 | 0.215 | 0.235 | 0.235 | 0.235 | 0.235 | 0.235 | 0.235 | 0.235 |
| 42.5 | | ความเร็ว m/s | 0.373 | 0.373 | 0.353 | 0.353 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.326 | 0.326 | 0.304 | 0.304 | 0.278 | 0.278 | 0.278 | 0.278 | 0.278 | 0.278 | 0.278 |
| 57.3 | | พลังงานรวม E | 0.182 | 0.182 | 0.191 | 0.191 | 0.201 | 0.201 | 0.201 | 0.201 | 0.205 | 0.205 | 0.220 | 0.220 | 0.239 | 0.239 | 0.239 | 0.239 | 0.239 | 0.239 | 0.239 |
| | | Fr | 0.285 | 0.285 | 0.262 | 0.262 | 0.242 | 0.242 | 0.242 | 0.242 | 0.233 | 0.233 | 0.209 | 0.209 | 0.183 | 0.183 | 0.183 | 0.183 | 0.183 | 0.183 | 0.183 |
| 3:00:22 | 0.0407 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 16 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.260 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.287 | 0.287 | 0.297 | 0.297 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 |
| 36.5 | | ความเร็ว m/s | 0.522 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.502 | 0.473 | 0.473 | 0.457 | 0.457 | 0.460 | 0.460 | 0.460 | 0.460 | 0.460 |
| | | พลังงานรวม E | 0.274 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.283 | 0.298 | 0.298 | 0.308 | 0.308 | 0.306 | 0.306 | 0.306 | 0.306 | 0.306 |
| | | Fr | 0.327 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.282 | 0.282 | 0.267 | 0.267 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | |
| 3:00:34 | 0.0635 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 14 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.315 | 0.315 | 0.315 | 0.315 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.320 | 0.325 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.325 | 0.325 | 0.317 |
| 46 | | ความเร็ว m/s | 0.672 | 0.672 | 0.672 | 0.672 | 0.683 | 0.683 | 0.683 | 0.683 | 0.683 | 0.683 | 0.662 | 0.651 | 0.641 | 0.641 | 0.641 | 0.641 | 0.651 | 0.651 | 0.668 |
| | | พลังงานรวม E | 0.338 | 0.338 | 0.338 | 0.338 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.342 | 0.347 | 0.351 | 0.351 | 0.351 | 0.351 | 0.347 | 0.347 | 0.340 |
| | | Fr | 0.382 | 0.382 | 0.382 | 0.382 | 0.392 | 0.392 | 0.392 | 0.392 | 0.392 | 0.373 | 0.365 | 0.357 | 0.357 | 0.357 | 0.357 | 0.365 | 0.365 | 0.379 | |

ตารางผนวกที่ ก5 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของการผลักดันน้ำ ก่อนมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1, 3, 6 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s

| เวลาดวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | | ระยะทาง m. | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 3:00:16 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 | 0.232 |
| 16.2 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 |
| 30.9 cm. | 0.0194 | พลังงาน | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 |
| 2:58:97 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 |
| 31.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 |
| 60.2 cm. | 0.0382 | พลังงาน | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.305 |
| 3:00:41 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 |
| 12.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 |
| 58.2 cm. | 0.0607 | พลังงาน | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 |

ตารางผนวกที่ 6 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

| เวลาตวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | 0.0238 | ระดับน้ำ cm. | 0.215 | 0.217 | 0.219 | 0.221 | 0.221 | 0.222 | 0.222 | 0.222 | 0.230 | 0.233 | 0.234 | 0.234 | 0.232 | 0.232 | 0.233 | 0.231 | 0.229 | 0.228 | 0.226 |
| 7 | | ความเร็ว m/s | 0.369 | 0.366 | 0.362 | 0.359 | 0.359 | 0.358 | 0.358 | 0.358 | 0.345 | 0.341 | 0.339 | 0.339 | 0.342 | 0.342 | 0.341 | 0.344 | 0.347 | 0.348 | 0.351 |
| 25 | | พลังงานรวม E | 0.222 | 0.224 | 0.226 | 0.228 | 0.228 | 0.229 | 0.229 | 0.229 | 0.236 | 0.239 | 0.240 | 0.240 | 0.238 | 0.238 | 0.239 | 0.237 | 0.235 | 0.234 | 0.232 |
| | | Fr | 0.254 | 0.251 | 0.247 | 0.244 | 0.244 | 0.242 | 0.242 | 0.242 | 0.230 | 0.225 | 0.224 | 0.224 | 0.227 | 0.227 | 0.225 | 0.228 | 0.231 | 0.233 | 0.236 |
| 3:00:22 | 0.0463 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 10 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.280 | 0.284 | 0.284 | 0.285 | 0.286 | 0.286 | 0.283 | 0.284 | 0.294 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.293 | 0.293 | 0.291 | 0.290 | 0.287 | 0.285 | 0.282 |
| | | ความเร็ว m/s | 0.551 | 0.543 | 0.543 | 0.542 | 0.540 | 0.540 | 0.545 | 0.543 | 0.525 | 0.523 | 0.523 | 0.523 | 0.527 | 0.527 | 0.530 | 0.532 | 0.538 | 0.542 | 0.547 |
| 45 | | พลังงานรวม E | 0.295 | 0.299 | 0.299 | 0.300 | 0.301 | 0.301 | 0.298 | 0.299 | 0.308 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.307 | 0.307 | 0.305 | 0.304 | 0.302 | 0.300 | 0.297 |
| | Fr | 0.333 | 0.326 | 0.326 | 0.324 | 0.322 | 0.322 | 0.327 | 0.326 | 0.309 | 0.308 | 0.308 | 0.308 | 0.311 | 0.311 | 0.314 | 0.316 | 0.321 | 0.324 | 0.329 | |
| 3:00:34 | 0.0635 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 12 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.335 | 0.330 | 0.330 | 0.335 | 0.330 | 0.335 | 0.332 | 0.335 | 0.335 | 0.342 | 0.333 | 0.335 | 0.340 | 0.335 | 0.335 | 0.332 | 0.327 | 0.325 | 0.320 |
| | | ความเร็ว m/s | 0.632 | 0.641 | 0.641 | 0.632 | 0.641 | 0.632 | 0.638 | 0.632 | 0.632 | 0.619 | 0.636 | 0.632 | 0.623 | 0.632 | 0.632 | 0.638 | 0.647 | 0.651 | 0.662 |
| 44 | | พลังงานรวม E | 0.355 | 0.351 | 0.351 | 0.355 | 0.351 | 0.355 | 0.353 | 0.355 | 0.355 | 0.362 | 0.354 | 0.355 | 0.360 | 0.355 | 0.355 | 0.353 | 0.348 | 0.347 | 0.342 |
| | Fr | 0.349 | 0.357 | 0.357 | 0.349 | 0.357 | 0.349 | 0.353 | 0.349 | 0.349 | 0.338 | 0.352 | 0.349 | 0.341 | 0.349 | 0.349 | 0.353 | 0.361 | 0.365 | 0.373 | |

ตารางผนวกที่ ก7 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

| เวลาควนน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | | ระดับน้ำ cm. | 0.170 | 0.175 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.205 | 0.220 | 0.228 | 0.227 | 0.230 | 0.220 | 0.221 | 0.225 | 0.223 | 0.220 |
| 11.2 | | ความเร็ว m/s | 0.485 | 0.471 | 0.458 | 0.458 | 0.458 | 0.458 | 0.458 | 0.458 | 0.402 | 0.375 | 0.362 | 0.363 | 0.359 | 0.375 | 0.373 | 0.367 | 0.370 | 0.375 | |
| 29.9 | 0.0247 | พลังงานรวม E | 0.182 | 0.186 | 0.191 | 0.191 | 0.191 | 0.191 | 0.191 | 0.191 | 0.213 | 0.227 | 0.235 | 0.234 | 0.237 | 0.227 | 0.228 | 0.232 | 0.230 | 0.227 | |
| | | Fr | 0.376 | 0.360 | 0.345 | 0.345 | 0.345 | 0.345 | 0.345 | 0.345 | 0.284 | 0.255 | 0.242 | 0.243 | 0.239 | 0.255 | 0.253 | 0.247 | 0.250 | 0.255 | |
| 3:00:22 | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.255 | 0.255 | 0.255 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.255 | 0.280 | 0.285 | 0.295 | 0.290 | 0.290 | 0.290 | 0.285 | 0.285 | 0.280 | 0.280 | 0.275 |
| 30 | | ความเร็ว m/s | 0.621 | 0.621 | 0.621 | 0.609 | 0.609 | 0.609 | 0.609 | 0.621 | 0.565 | 0.537 | 0.546 | 0.546 | 0.546 | 0.556 | 0.556 | 0.565 | 0.565 | 0.576 | |
| 65.9 | 0.0475 | พลังงานรวม E | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.279 | 0.275 | 0.296 | 0.310 | 0.305 | 0.305 | 0.305 | 0.301 | 0.301 | 0.296 | 0.296 | 0.292 | |
| | | Fr | 0.393 | 0.393 | 0.393 | 0.381 | 0.381 | 0.381 | 0.381 | 0.393 | 0.341 | 0.315 | 0.324 | 0.324 | 0.324 | 0.332 | 0.332 | 0.341 | 0.341 | 0.351 | |
| 3:00:34 | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.312 | 0.315 | 0.314 | 0.321 | 0.320 | 0.318 | 0.311 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.331 | 0.330 | 0.335 | 0.325 | 0.336 | 0.334 | 0.323 | 0.315 |
| 8.5 | | ความเร็ว m/s | 0.735 | 0.728 | 0.730 | 0.714 | 0.717 | 0.721 | 0.737 | 0.695 | 0.695 | 0.695 | 0.695 | 0.693 | 0.695 | 0.685 | 0.706 | 0.683 | 0.687 | 0.710 | 0.728 |
| 60.5 | 0.0688 | พลังงานรวม E | 0.340 | 0.342 | 0.341 | 0.347 | 0.346 | 0.345 | 0.339 | 0.355 | 0.355 | 0.355 | 0.355 | 0.355 | 0.355 | 0.359 | 0.350 | 0.360 | 0.358 | 0.349 | 0.342 |
| | | Fr | 0.420 | 0.414 | 0.416 | 0.403 | 0.404 | 0.408 | 0.422 | 0.386 | 0.386 | 0.386 | 0.386 | 0.384 | 0.386 | 0.378 | 0.395 | 0.376 | 0.379 | 0.399 | 0.414 |

ตารางผนวกที่ ๘ แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั่นน้ำ หลังมีการผลัดคั่นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 6 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

| เวลาตรวจน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | | ระดับน้ำ cm. | 0.151 | 0.162 | 0.157 | 0.154 | 0.158 | 0.161 | 0.158 | 0.160 | 0.168 | 0.230 | 0.230 | 0.230 | 0.230 | 0.230 | 0.230 | 0.230 | 0.225 | 0.225 | 0.220 |
| 27 | | ความเร็ว m/s | 0.520 | 0.485 | 0.500 | 0.510 | 0.496 | 0.488 | 0.497 | 0.491 | 0.467 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.349 | 0.349 | 0.357 |
| 44.8 | 0.0235 | พลังงานรวม E | 0.165 | 0.174 | 0.170 | 0.167 | 0.171 | 0.173 | 0.171 | 0.172 | 0.179 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.236 | 0.231 | 0.231 | 0.226 | |
| | | Fr | 0.427 | 0.384 | 0.403 | 0.415 | 0.398 | 0.388 | 0.399 | 0.392 | 0.364 | 0.227 | 0.227 | 0.227 | 0.227 | 0.227 | 0.227 | 0.227 | 0.235 | 0.235 | 0.243 |
| 3:00:22 | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.235 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.245 | 0.245 | 0.280 | 0.285 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.295 | 0.290 | 0.290 | 0.285 | 0.285 | 0.275 |
| 9.5 | | ความเร็ว m/s | 0.681 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.667 | 0.653 | 0.653 | 0.572 | 0.562 | 0.543 | 0.543 | 0.543 | 0.543 | 0.552 | 0.552 | 0.562 | 0.562 | 0.582 |
| 45.8 | 0.0480 | พลังงานรวม E | 0.259 | 0.263 | 0.263 | 0.263 | 0.263 | 0.263 | 0.267 | 0.267 | 0.297 | 0.301 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.310 | 0.306 | 0.306 | 0.301 | 0.301 | 0.292 |
| | | Fr | 0.449 | 0.435 | 0.435 | 0.435 | 0.435 | 0.435 | 0.421 | 0.421 | 0.345 | 0.336 | 0.319 | 0.319 | 0.319 | 0.319 | 0.327 | 0.327 | 0.336 | 0.336 | 0.354 |
| 3:00:34 | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.305 | 0.310 | 0.315 | 0.315 | 0.315 | 0.315 | 0.315 | 0.315 | 0.345 | 0.345 | 0.340 | 0.340 | 0.335 | 0.336 | 0.342 | 0.333 | 0.336 | 0.335 | 0.334 |
| 20 | | ความเร็ว m/s | 0.632 | 0.622 | 0.612 | 0.612 | 0.612 | 0.612 | 0.612 | 0.612 | 0.559 | 0.559 | 0.567 | 0.567 | 0.575 | 0.574 | 0.564 | 0.579 | 0.574 | 0.575 | 0.577 |
| 63.7 | 0.0578 | พลังงานรวม E | 0.325 | 0.330 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.334 | 0.361 | 0.361 | 0.356 | 0.356 | 0.352 | 0.353 | 0.358 | 0.350 | 0.353 | 0.352 | 0.351 |
| | | Fr | 0.365 | 0.356 | 0.348 | 0.348 | 0.348 | 0.348 | 0.348 | 0.348 | 0.304 | 0.304 | 0.310 | 0.310 | 0.317 | 0.316 | 0.308 | 0.320 | 0.316 | 0.317 | 0.319 |

ตารางผนวกที่ ก9 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของการผลักดันน้ำ ก่อนมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s

| เวลาดวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | | ระยะทาง m. | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3:00:16 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.200 | 0.206 | 0.207 | 0.210 | 0.210 | 0.210 | 0.211 | 0.211 | 0.210 | 0.207 | 0.204 |
| 16.2 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.324 | 0.315 | 0.313 | 0.309 | 0.309 | 0.309 | 0.307 | 0.307 | 0.309 | 0.313 | 0.318 |
| 30.9 cm. | 0.0194 | พลังงาน | 0.205 | 0.211 | 0.212 | 0.215 | 0.215 | 0.215 | 0.216 | 0.216 | 0.215 | 0.212 | 0.209 |
| 2:58:97 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.275 |
| 31.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 | 0.463 |
| 60.2 cm. | 0.0382 | พลังงาน | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 | 0.286 |
| 3:00:41 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 | 0.335 |
| 12.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 | 0.604 |
| 58.2 cm. | 0.0607 | พลังงาน | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 | 0.354 |

ตารางผนวกที่ ก10 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลักดันน้ำ หลังมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัด ขนาด 20 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 700 rpm

| เวลาดวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:16 | 0.0205 | ระดับน้ำ cm. | 0.150 | 0.155 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.163 | 0.163 | 0.163 | 0.165 | 0.220 | 0.195 | 0.200 | 0.250 | 0.210 | 0.210 | 0.205 | 0.205 | 0.200 | 0.200 |
| 15 | | ความเร็ว m/s | 0.456 | 0.441 | 0.427 | 0.427 | 0.427 | 0.419 | 0.419 | 0.419 | 0.414 | 0.311 | 0.351 | 0.342 | 0.273 | 0.326 | 0.326 | 0.333 | 0.333 | 0.342 | 0.342 |
| 30.5 | | พลังงานรวม E | 0.161 | 0.165 | 0.169 | 0.169 | 0.169 | 0.172 | 0.172 | 0.172 | 0.174 | 0.225 | 0.201 | 0.206 | 0.254 | 0.215 | 0.215 | 0.211 | 0.211 | 0.206 | 0.206 |
| | | Fr | 0.376 | 0.358 | 0.341 | 0.341 | 0.341 | 0.332 | 0.332 | 0.332 | 0.326 | 0.211 | 0.253 | 0.244 | 0.175 | 0.227 | 0.227 | 0.235 | 0.235 | 0.244 | 0.244 |
| 3:00:22 | 0.0398 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.205 | 0.210 | 0.215 | 0.215 | 0.215 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.230 | 0.280 | 0.280 | 0.270 | 0.270 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.260 | 0.260 | 0.255 |
| 30.8 | | ความเร็ว m/s | 0.648 | 0.632 | 0.617 | 0.617 | 0.617 | 0.603 | 0.603 | 0.603 | 0.577 | 0.474 | 0.474 | 0.492 | 0.492 | 0.501 | 0.501 | 0.501 | 0.511 | 0.511 | 0.521 |
| 60.9 | | พลังงานรวม E | 0.226 | 0.230 | 0.234 | 0.234 | 0.234 | 0.239 | 0.239 | 0.239 | 0.247 | 0.291 | 0.291 | 0.282 | 0.282 | 0.278 | 0.278 | 0.278 | 0.273 | 0.273 | 0.269 |
| | Fr | 0.457 | 0.440 | 0.425 | 0.425 | 0.425 | 0.411 | 0.411 | 0.411 | 0.384 | 0.286 | 0.286 | 0.302 | 0.302 | 0.311 | 0.311 | 0.311 | 0.320 | 0.320 | 0.329 | |
| 3:00:34 | 0.0652 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.230 | 0.235 | 0.245 | 0.250 | 0.255 | 0.240 | 0.230 | 0.250 | 0.270 | 0.320 | 0.340 | 0.340 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.325 | 0.325 | 0.310 |
| 12 | | ความเร็ว m/s | 0.945 | 0.925 | 0.887 | 0.870 | 0.853 | 0.906 | 0.945 | 0.870 | 0.805 | 0.679 | 0.639 | 0.639 | 0.659 | 0.659 | 0.659 | 0.659 | 0.669 | 0.669 | 0.701 |
| 61.3 | | พลังงานรวม E | 0.276 | 0.279 | 0.285 | 0.289 | 0.292 | 0.282 | 0.276 | 0.289 | 0.303 | 0.344 | 0.361 | 0.361 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.348 | 0.348 | 0.335 |
| | Fr | 0.629 | 0.609 | 0.572 | 0.555 | 0.539 | 0.590 | 0.629 | 0.555 | 0.495 | 0.383 | 0.350 | 0.350 | 0.366 | 0.366 | 0.366 | 0.366 | 0.375 | 0.375 | 0.402 | |

ตารางผนวกที่ ก11 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 20 cm. 1 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1400 rpm

| เวลาดวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:25 | | ระดับน้ำ cm. | 0.121 | 0.125 | 0.125 | 0.132 | 0.135 | 0.135 | 0.134 | 0.134 | 0.140 | 0.210 | 0.170 | 0.193 | 0.193 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.198 | 0.195 | 0.190 |
| 10 | | ความเร็ว m/s | 0.638 | 0.617 | 0.617 | 0.585 | 0.572 | 0.572 | 0.576 | 0.576 | 0.551 | 0.368 | 0.454 | 0.400 | 0.400 | 0.386 | 0.386 | 0.386 | 0.390 | 0.396 | 0.406 |
| 27.5 | 0.0232 | พลังงานรวม E | 0.142 | 0.144 | 0.144 | 0.149 | 0.152 | 0.152 | 0.151 | 0.151 | 0.155 | 0.217 | 0.181 | 0.201 | 0.201 | 0.208 | 0.208 | 0.208 | 0.206 | 0.203 | 0.198 |
| | | Fr | 0.585 | 0.558 | 0.558 | 0.514 | 0.497 | 0.497 | 0.502 | 0.502 | 0.470 | 0.256 | 0.352 | 0.291 | 0.291 | 0.275 | 0.275 | 0.275 | 0.280 | 0.286 | 0.298 |
| 3:00:13 | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.160 | 0.165 | 0.165 | 0.168 | 0.175 | 0.170 | 0.185 | 0.170 | 0.185 | 0.100 | 0.210 | 0.160 | 0.210 | 0.240 | 0.250 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.240 |
| 9.9 | | ความเร็ว m/s | 0.783 | 0.759 | 0.759 | 0.746 | 0.716 | 0.737 | 0.677 | 0.737 | 0.677 | 1.252 | 0.596 | 0.783 | 0.596 | 0.522 | 0.501 | 0.511 | 0.511 | 0.511 | 0.522 |
| 38.3 | 0.0376 | พลังงานรวม E | 0.191 | 0.194 | 0.194 | 0.196 | 0.201 | 0.198 | 0.208 | 0.198 | 0.208 | 0.180 | 0.228 | 0.191 | 0.228 | 0.254 | 0.263 | 0.258 | 0.258 | 0.258 | 0.254 |
| | | Fr | 0.625 | 0.597 | 0.597 | 0.581 | 0.546 | 0.571 | 0.503 | 0.571 | 0.503 | 1.265 | 0.416 | 0.625 | 0.416 | 0.340 | 0.320 | 0.330 | 0.330 | 0.330 | 0.340 |
| 3:00:13 | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.200 | 0.206 | 0.206 | 0.210 | 0.219 | 0.213 | 0.231 | 0.213 | 0.231 | 0.125 | 0.263 | 0.200 | 0.263 | 0.300 | 0.313 | 0.306 | 0.306 | 0.306 | 0.300 |
| 8.9 | | ความเร็ว m/s | 1.012 | 0.981 | 0.981 | 0.964 | 0.925 | 0.953 | 0.875 | 0.953 | 0.875 | 1.619 | 0.771 | 1.012 | 0.771 | 0.675 | 0.648 | 0.661 | 0.661 | 0.661 | 0.675 |
| 54.8 | 0.0607 | พลังงานรวม E | 0.252 | 0.255 | 0.255 | 0.257 | 0.262 | 0.259 | 0.270 | 0.259 | 0.270 | 0.259 | 0.293 | 0.252 | 0.293 | 0.323 | 0.334 | 0.329 | 0.329 | 0.329 | 0.323 |
| | | Fr | 0.723 | 0.690 | 0.690 | 0.672 | 0.632 | 0.660 | 0.581 | 0.660 | 0.581 | 1.462 | 0.481 | 0.723 | 0.481 | 0.393 | 0.370 | 0.381 | 0.381 | 0.381 | 0.393 |



ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบชุดที่ 2

ตารางผนวกที่ ข1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ ก่อนมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 40 l/s ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm

ก่อนการผลัดคั้น

| เวลาตวงน้ำ | | อัตราการไหล | | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | |
|------------|-------------|--------------|--|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (s) | ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | | 1 | 3 | 6 | 7.5 | 8.5 | 9 | 10 |
| 3:00:12 | | ระดับน้ำ cm. | | 0.255 | 0.255 | 0.255 | 0.255 | 0.255 | 0.255 | 0.255 |
| 17.3 | | ความเร็ว m/s | | 0.638 | 0.638 | 0.638 | 0.638 | 0.638 | 0.638 | 0.638 |
| 41.9 | 0.0488 | พลังงานรวม | | 0.276 | 0.276 | 0.276 | 0.276 | 0.276 | 0.276 | 0.276 |
| | | Fr | | 0.403 | 0.403 | 0.403 | 0.403 | 0.403 | 0.403 | 0.403 |

ตารางผนวกที่ ข2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 40 l/s ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm

หลังการผลัดคั้น

| เวลาตวงน้ำ | | อัตราการไหล | | ตำแหน่งใบพัด | | | | | |
|------------|-------------|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (s) | ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | 1 | 3 | 6 | 7.5 | 8.5 | 9 | 10 |
| 3:00:12 | | ระดับน้ำ cm. | 0.245 | 0.244 | 0.244 | 0.254 | 0.258 | 0.255 | 0.259 |
| 16.5 | | ความเร็ว m/s | 0.675 | 0.678 | 0.678 | 0.651 | 0.641 | 0.649 | 0.639 |
| 41.5 | 0.0496 | พลังงานรวม | 0.268 | 0.267 | 0.267 | 0.276 | 0.279 | 0.276 | 0.280 |
| | | Fr | 0.435 | 0.438 | 0.438 | 0.412 | 0.403 | 0.410 | 0.401 |

ตารางผนวกที่ ข3 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 40 l/s ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm

หลังการเพิ่มอัตราการไหลในทางน้ำ

| เวลาตวงน้ำ (s) | อัตราการไหล | | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | |
|-------------------|-------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | 1 | 3 | 6 | 7.5 | 8.5 | 9 | 10 |
| 3:00:12 | | ระดับน้ำ cm. | 0.254 | 0.252 | 0.254 | 0.268 | 0.272 | 0.274 | 0.271 |
| 41.5 | | ความเร็ว m/s | 0.682 | 0.688 | 0.682 | 0.647 | 0.637 | 0.633 | 0.640 |
| 67.7 | 0.0520 | พลังงานรวม | 0.278 | 0.276 | 0.278 | 0.289 | 0.293 | 0.294 | 0.292 |
| | | Fr | 0.432 | 0.437 | 0.432 | 0.399 | 0.390 | 0.386 | 0.392 |



ตารางผนวกที่ ค 1 แสดงผลการทดสอบและระดับน้ำ ก่อนและหลัง การผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 3 ใบ ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 50 l/s ความเร็วรอบใบพัด 2200 rpm ตำแหน่งของใบพัดในหน้าตัดทางน้ำที่ระดับต่างๆ

| ตำแหน่งใบพัดในหน้าตัดทางน้ำ | ตำแหน่งใบพัด | | | |
|-----------------------------|--------------|-------|-------|-------|
| | ระยะทาง m. | 4 | 5.5 | 7.5 |
| Initial state | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| 0.2d* | 0.245 | 0.246 | 0.250 | 0.250 |
| 0.5d* | 0.234 | 0.236 | 0.250 | 0.252 |
| 0.8d* | 0.236 | 0.235 | 0.251 | 0.25 |

d* ความลึกฟลูม



ตารางผนวกที่ ๑1 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานของการผลักดันน้ำ ก่อนมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ 2 ชุด ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s

| เวลาตวงน้ำ (s) | อัตรา การไหล ลิตร/วินาที | | ระยะทาง m. | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------------|--------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 3:00:16 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 | 0.245 |
| 16.2 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 | 0.265 |
| 30.9 cm. | 0.0194 | พลังงาน | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 | 0.249 |
| 2:58:97 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 | 0.312 |
| 31.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 | 0.408 |
| 60.2 cm. | 0.0382 | พลังงาน | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 | 0.321 |
| 3:00:41 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 | 0.352 |
| 12.3 cm. | | ความเร็ว m/s | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 | 0.575 |
| 58.2 cm. | 0.0607 | พลังงาน | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 | 0.369 |

ตารางผนวกที่ 2 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ ของการผลัดคั้นน้ำ หลังมีการผลัดคั้นน้ำด้วยใบพัด ขนาด 8 cm. 1 ใบ 2 ชุด ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1400 rpm

| เวลาควนน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:25 | 0.0278 | ระดับน้ำ cm. | 0.230 | 0.230 | 0.233 | 0.235 | 0.235 | 0.238 | 0.238 | 0.238 | 0.243 | 0.250 | 0.250 | 0.252 | 0.250 | 0.250 | 0.257 | 0.260 | 0.256 | 0.255 | 0.255 |
| 18 | | ความเร็ว m/s | 0.403 | 0.403 | 0.397 | 0.394 | 0.394 | 0.389 | 0.389 | 0.389 | 0.381 | 0.370 | 0.370 | 0.368 | 0.370 | 0.370 | 0.360 | 0.356 | 0.362 | 0.363 | 0.363 |
| 39 | | พลังงานรวม E | 0.238 | 0.238 | 0.241 | 0.243 | 0.243 | 0.246 | 0.246 | 0.246 | 0.250 | 0.257 | 0.257 | 0.259 | 0.257 | 0.257 | 0.264 | 0.266 | 0.263 | 0.262 | 0.262 |
| | | Fr | 0.268 | 0.268 | 0.263 | 0.260 | 0.260 | 0.255 | 0.255 | 0.255 | 0.247 | 0.237 | 0.237 | 0.234 | 0.237 | 0.237 | 0.227 | 0.223 | 0.228 | 0.230 | 0.230 |
| 3:00:13 | 0.0452 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.295 | 0.295 | 0.302 | 0.306 | 0.303 | 0.303 | 0.308 | 0.313 | 0.313 | 0.315 | 0.314 | 0.312 | 0.314 | 0.313 | 0.317 | 0.320 | 0.314 | 0.313 | 0.310 |
| 22.8 | | ความเร็ว m/s | 0.511 | 0.511 | 0.499 | 0.493 | 0.498 | 0.498 | 0.490 | 0.482 | 0.482 | 0.479 | 0.480 | 0.483 | 0.480 | 0.482 | 0.476 | 0.471 | 0.480 | 0.482 | 0.487 |
| 57 | | พลังงานรวม E | 0.308 | 0.308 | 0.315 | 0.318 | 0.316 | 0.316 | 0.320 | 0.325 | 0.325 | 0.327 | 0.326 | 0.324 | 0.326 | 0.325 | 0.329 | 0.331 | 0.326 | 0.325 | 0.322 |
| | Fr | 0.301 | 0.301 | 0.290 | 0.284 | 0.289 | 0.289 | 0.282 | 0.275 | 0.275 | 0.272 | 0.274 | 0.276 | 0.274 | 0.275 | 0.270 | 0.266 | 0.274 | 0.275 | 0.279 | |
| 3:00:13 | 0.0645 | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| | | ระดับน้ำ ซม. | 0.345 | 0.348 | 0.349 | 0.350 | 0.352 | 0.354 | 0.353 | 0.356 | 0.357 | 0.362 | 0.365 | 0.363 | 0.360 | 0.361 | 0.364 | 0.365 | 0.362 | 0.360 | 0.355 |
| 15.5 | | ความเร็ว m/s | 0.623 | 0.618 | 0.616 | 0.614 | 0.611 | 0.607 | 0.609 | 0.604 | 0.602 | 0.594 | 0.589 | 0.592 | 0.597 | 0.596 | 0.591 | 0.589 | 0.594 | 0.597 | 0.606 |
| 48 | | พลังงานรวม E | 0.365 | 0.367 | 0.368 | 0.369 | 0.371 | 0.373 | 0.372 | 0.375 | 0.375 | 0.380 | 0.383 | 0.381 | 0.378 | 0.379 | 0.382 | 0.383 | 0.380 | 0.378 | 0.374 |
| | Fr | 0.339 | 0.334 | 0.333 | 0.332 | 0.329 | 0.326 | 0.327 | 0.323 | 0.322 | 0.315 | 0.311 | 0.314 | 0.318 | 0.316 | 0.313 | 0.311 | 0.315 | 0.318 | 0.325 | |

ตารางผนวกที่ 3 แสดงผลการทดสอบและการคำนวณอัตราการไหล พลังงานและฟรูดนัมเบอร์ของการผลักดันน้ำ หลังมีการผลักดันน้ำด้วยใบพัดขนาด 8 cm. 1 ใบ 2 ชุด ที่อัตราการไหลประมาณการที่ 20, 40, 60 l/s ความเร็วรอบใบพัด 1700 rpm

| เวลาตวงน้ำ (s) | อัตราการไหล ลิตร/วินาที | ระยะทาง m. | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | | | ตำแหน่งใบพัด | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:25 | | ระดับน้ำ cm. | 0.182 | 0.190 | 0.196 | 0.195 | 0.195 | 0.200 | 0.232 | 0.235 | 0.231 | 0.235 | 0.233 | 0.231 | 0.232 | 0.235 | 0.260 | 0.261 | 0.258 | 0.257 | 0.254 |
| 18 | | ความเร็ว m/s | 0.509 | 0.487 | 0.473 | 0.475 | 0.475 | 0.463 | 0.399 | 0.394 | 0.401 | 0.394 | 0.397 | 0.401 | 0.399 | 0.394 | 0.356 | 0.355 | 0.359 | 0.360 | 0.365 |
| 39 | 0.0278 | พลังงานรวม E | 0.195 | 0.202 | 0.207 | 0.206 | 0.206 | 0.211 | 0.240 | 0.243 | 0.239 | 0.243 | 0.241 | 0.239 | 0.240 | 0.243 | 0.266 | 0.267 | 0.265 | 0.264 | 0.261 |
| | | Fr | 0.381 | 0.357 | 0.341 | 0.343 | 0.343 | 0.331 | 0.265 | 0.260 | 0.266 | 0.260 | 0.263 | 0.266 | 0.265 | 0.260 | 0.223 | 0.222 | 0.226 | 0.227 | 0.231 |
| | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:13 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.268 | 0.275 | 0.275 | 0.277 | 0.277 | 0.285 | 0.231 | 0.302 | 0.300 | 0.300 | 0.302 | 0.300 | 0.298 | 0.310 | 0.315 | 0.319 | 0.317 | 0.315 | 0.315 |
| 22.8 | | ความเร็ว m/s | 0.563 | 0.548 | 0.548 | 0.544 | 0.544 | 0.529 | 0.653 | 0.499 | 0.503 | 0.503 | 0.499 | 0.503 | 0.506 | 0.487 | 0.479 | 0.473 | 0.476 | 0.479 | 0.479 |
| 57 | 0.0452 | พลังงานรวม E | 0.284 | 0.290 | 0.290 | 0.292 | 0.292 | 0.299 | 0.253 | 0.315 | 0.313 | 0.313 | 0.315 | 0.313 | 0.311 | 0.322 | 0.327 | 0.330 | 0.329 | 0.327 | 0.327 |
| | | Fr | 0.347 | 0.334 | 0.334 | 0.330 | 0.330 | 0.316 | 0.434 | 0.290 | 0.293 | 0.293 | 0.290 | 0.293 | 0.296 | 0.279 | 0.272 | 0.267 | 0.270 | 0.272 | 0.272 |
| | | ระยะทาง | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | 3 | 3.5 | 4 | 4.5 | 5 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 | 7.5 | 8 | 8.5 | 9 | 9.5 | 10 |
| 3:00:13 | | ระดับน้ำ ซม. | 0.323 | 0.327 | 0.319 | 0.328 | 0.325 | 0.327 | 0.343 | 0.347 | 0.357 | 0.347 | 0.345 | 0.345 | 0.343 | 0.350 | 0.357 | 0.360 | 0.355 | 0.358 | 0.350 |
| 15.5 | | ความเร็ว m/s | 0.666 | 0.657 | 0.674 | 0.655 | 0.662 | 0.657 | 0.627 | 0.620 | 0.602 | 0.620 | 0.623 | 0.623 | 0.627 | 0.614 | 0.602 | 0.597 | 0.606 | 0.601 | 0.614 |
| 48 | 0.0645 | พลังงานรวม E | 0.346 | 0.349 | 0.342 | 0.350 | 0.347 | 0.349 | 0.363 | 0.367 | 0.375 | 0.367 | 0.365 | 0.365 | 0.363 | 0.369 | 0.375 | 0.378 | 0.374 | 0.376 | 0.369 |
| | | Fr | 0.374 | 0.367 | 0.381 | 0.365 | 0.370 | 0.367 | 0.342 | 0.336 | 0.322 | 0.336 | 0.339 | 0.339 | 0.342 | 0.332 | 0.322 | 0.318 | 0.325 | 0.320 | 0.332 |



ตารางผนวกที่ จ1 แสดงผลการคำนวณโมเมนต์ของใบพัดขนาด 8 cm. อัตราการไหล 20,40 และ 60 l/s ในทางทฤษฎี

| Drawdown | fx(Q=20l/s) | fx(Q=40l/s) | fx(Q=60l/s) | Drawdown | fx(Q=20l/s) | fx(Q=40l/s) | fx(Q=60l/s) |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| m. | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ | m. | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ |
| 0.001 | 2.381 | 3.094 | 3.639 | 0.067 | 139.982 | 189.585 | 228.018 |
| 0.004 | 9.470 | 12.326 | 14.510 | 0.070 | 145.363 | 197.291 | 237.550 |
| 0.007 | 16.478 | 21.482 | 25.312 | 0.073 | 150.674 | 204.936 | 247.034 |
| 0.010 | 23.404 | 30.564 | 36.047 | 0.076 | 155.915 | 212.522 | 256.468 |
| 0.013 | 30.248 | 39.571 | 46.714 | 0.079 | 161.088 | 220.051 | 265.857 |
| 0.016 | 37.012 | 48.504 | 57.315 | 0.082 | 166.194 | 227.523 | 275.199 |
| 0.019 | 43.695 | 57.363 | 67.849 | 0.085 | 171.233 | 234.940 | 284.498 |
| 0.022 | 50.297 | 66.149 | 78.318 | 0.088 | 176.208 | 242.303 | 293.755 |
| 0.025 | 56.820 | 74.863 | 88.722 | 0.091 | 181.120 | 249.613 | 302.971 |
| 0.028 | 63.262 | 83.505 | 99.062 | 0.094 | 185.971 | 256.874 | 312.148 |
| 0.031 | 69.626 | 92.075 | 109.339 | 0.097 | 190.761 | 264.085 | 321.289 |
| 0.034 | 75.911 | 100.575 | 119.553 | 0.100 | 195.494 | 271.249 | 330.395 |
| 0.037 | 82.117 | 109.004 | 129.705 | 0.103 | 200.171 | 278.369 | 339.468 |
| 0.040 | 88.245 | 117.363 | 139.796 | 0.106 | 204.795 | 285.445 | 348.510 |
| 0.043 | 94.29632 | 125.6536 | 149.827 | 0.109 | 209.368 | 292.480 | 357.524 |
| 0.046 | 100.2702 | 133.8758 | 159.7984 | 0.112 | 213.892 | 299.477 | 366.512 |
| 0.049 | 106.1676 | 142.0304 | 169.7114 | 0.115 | 218.3711 | 306.4374 | 375.4768 |
| 0.052 | 111.9891 | 150.1182 | 179.5669 | 0.118 | 222.8083 | 313.3646 | 384.4209 |
| 0.055 | 117.7355 | 158.14 | 189.3658 | 0.121 | 227.2071 | 320.2613 | 393.3471 |
| 0.058 | 123.4072 | 166.0967 | 199.1092 | 0.124 | 231.5716 | 327.1305 | 402.2586 |
| 0.061 | 129.0051 | 173.9892 | 208.7983 | 0.127 | 235.9064 | 333.9754 | 411.1584 |
| 0.064 | 134.5299 | 181.8183 | 218.434 | | | | |

ที่มา: fx = F-Calculate

ตารางผนวกที่ จ2 แสดงผลการคำนวณโมเมนต์ของใบพัดขนาด 20 cm. อัตราการไหล 20,40 และ 60 l/s ในทางทฤษฎี

| Drawdown | fx(Q=20l/s) | fx(Q=40l/s) | fx(Q=60l/s) | Drawdown | fx(Q=20l/s) | fx(Q=40l/s) | fx(Q=60l/s) |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| m. | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ | m. | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ | N. m ⁻¹ |
| 0.001 | 2.145 | 2.929 | 3.639 | 0.073 | 134.774 | 194.159 | 247.034 |
| 0.004 | 8.527 | 11.667 | 14.510 | 0.076 | 139.464 | 201.387 | 256.468 |
| 0.007 | 14.830 | 20.332 | 25.312 | 0.079 | 144.100 | 208.567 | 265.857 |
| 0.010 | 21.055 | 28.926 | 36.047 | 0.082 | 148.684 | 215.701 | 275.199 |
| 0.013 | 27.201 | 37.449 | 46.714 | 0.085 | 153.219 | 222.791 | 284.498 |
| 0.016 | 33.270 | 45.902 | 57.315 | 0.088 | 157.709 | 229.840 | 293.755 |
| 0.019 | 39.262 | 54.285 | 67.849 | 0.091 | 162.155 | 236.849 | 302.971 |
| 0.022 | 45.177 | 62.598 | 78.318 | 0.094 | 166.563 | 243.821 | 312.148 |
| 0.025 | 51.016 | 70.843 | 88.722 | 0.097 | 170.935 | 250.759 | 321.289 |
| 0.028 | 56.780 | 79.020 | 99.062 | 0.100 | 175.276 | 257.666 | 330.395 |
| 0.031 | 62.469 | 87.130 | 109.339 | 0.103 | 179.591 | 264.544 | 339.468 |
| 0.034 | 68.084 | 95.174 | 119.553 | 0.106 | 183.886 | 271.396 | 348.510 |
| 0.037 | 73.626 | 103.152 | 129.705 | 0.109 | 188.167 | 278.227 | 357.524 |
| 0.040 | 79.095 | 111.066 | 139.796 | 0.112 | 192.440 | 285.039 | 366.512 |
| 0.043 | 84.493 | 118.916 | 149.827 | 0.115 | 196.713 | 291.837 | 375.477 |
| 0.046 | 89.820 | 126.703 | 159.798 | 0.118 | 200.995 | 298.625 | 384.421 |
| 0.049 | 95.077 | 134.429 | 169.711 | 0.121 | 205.297 | 305.407 | 393.347 |
| 0.052 | 100.266 | 142.094 | 179.567 | 0.124 | 209.629 | 312.189 | 402.259 |
| 0.055 | 105.387 | 149.700 | 189.366 | 0.127 | 214.004 | 318.975 | 411.158 |
| 0.058 | 110.442 | 157.248 | 199.109 | 0.130 | 218.438 | 325.772 | 420.050 |
| 0.061 | 115.432 | 164.739 | 208.798 | 0.133 | 222.948 | 332.585 | 428.937 |
| 0.064 | 120.358 | 172.174 | 218.434 | 0.136 | 227.554 | 339.422 | 437.823 |
| 0.067 | 125.223 | 179.554 | 228.018 | 0.139 | 232.281 | 346.290 | 446.712 |
| 0.070 | 130.028 | 186.882 | 237.550 | 0.142 | 237.156 | 353.197 | 455.608 |

ที่มา: fx = F-Calculate

ตารางผนวกที่ จ3 แสดงผลการคำนวณโมเมนต์ของใบพัดขนาด 8 cm. และ 20 cm.

อัตราการไหล 20,40 และ 60 l/s จากผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

| propeller | Speed | Drawdown | fx(Q=20l/s) | Drawdown | fx(Q=40l/s) | Drawdown | fx(Q=60l/s) |
|------------|------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| diameter | rpm | Q20 l/s | | Q40 l/s | | Q60 l/s | |
| 8 cm. | 700 | 0.003 | 7.230293 | 0.00075 | 2.291362 | 0.002 | 7.341533 |
| 8 cm. | 1700 | 0.01 | 23.40344 | 0.006 | 18.62804 | 0.008 | 29.42572 |
| 8 cm. | 3200 | 0.036 | 78.63442 | 0.02525 | 75.57911 | 0.023 | 83.34664 |
| Speed | No. of set | | | | | | |
| 1700 rpm | | | | | | | |
| 8 cm. | 1 | 0.01 | 23.40344 | 0.001 | 3.085222 | 0.003 | 10.97916 |
| 8 cm. | 3 | 0.044 | 94.58876 | 0.0075 | 21.97686 | 0.01 | 36.20329 |
| 8 cm. | 6 | 0.053 | 112.9166 | 0.028 | 81.10018 | 0.025 | 88.79693 |
| No. of set | Speed | | | | | | |
| 1 set | rpm | | | | | | |
| 20 cm. | 700 | 0.049 | 95.12494 | 0.073 | 200.8566 | 0.087 | 295.2789 |
| 20 cm. | 1400 | 0.079 | 148.7497 | 0.12 | 310.1195 | 0.122 | 397.2681 |

หมายเหตุ: fx = F-Experiment



Momentum Eq. of propeller

จาก Diagram การผลักดันน้ำจากภาพที่ 27 จะได้สมการ

$$F_1 - F_2 - F_f + F_{\text{propeller}} = \rho Q(v_1 - v_2) \quad \dots(11)$$

สมมติให้ F_f มีค่าน้อยมาก ; ($F_f=0$)

$$F_{\text{propeller}} = \rho Q(v_1 - v_2) + F_2 - F_1 \quad \dots(12)$$

$$\therefore \frac{F_{\text{propeller}}}{b} = \rho q(v_1 - v_2) + \gamma \left(\frac{y_2^2}{2} - \frac{y_1^2}{2} \right) \quad \dots(13)$$

$$f_{\text{propeller}} = \rho q \left(\frac{q}{y_1} - v_2 \right) + \frac{\gamma}{2} (y_2^2 - y_1^2) \quad \dots(14)$$

$$f_{\text{propeller}} = \rho q \left(\frac{v_2 y_2}{y_1} - v_2 \right) + \frac{\gamma}{2} (y_2 - y_1)(y_2 + y_1) \quad \dots(15)$$

$$f_{\text{propeller}} = \rho q v_2 \left(\frac{y_2 - y_1}{y_1} \right) + \frac{\gamma}{2} (y_2 - y_1)(y_2 + y_1) \quad \dots(16)$$

$$(y_2 - y_1) = \Delta H; y_1 = y_2 - \Delta H;$$

$$\therefore f_{\text{propeller}} = \Delta H \left[\frac{\rho q v_2}{y_2 - \Delta H} + \frac{\gamma}{2} (2y_2 - \Delta H) \right] \quad \dots(17)$$

แทน v_2 ด้วย ฟังก์ชันของฟรุตนัมเบอร์ (fr)

$$\therefore f_{\text{propeller}} = \Delta H \left[\frac{\rho * q * fr * \sqrt{g y_2}}{y_2 - \Delta H} + \frac{\gamma}{2} (2y_2 - \Delta H) \right] \quad \dots(18)$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

| | |
|----------------------|---|
| ชื่อ-สกุล | นายสาโรจน์ ศรีชัย |
| เกิดวันที่ | 21 พฤษภาคม 2531 |
| สถานที่เกิด | อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ |
| ประวัติการศึกษา | วศ.บ.(โยธา-ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| ทุนการศึกษาที่ได้รับ | ได้รับทุนผู้ช่วยสอนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2555 – พ.ศ. 2556) |