การพัฒนาเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันราคาประหยัดเพื่องานสอนและงานวิจัย

An Improvement of an Economical Current Vane for Teaching and Research

ปราโมทย์ โศจิศุภร* ชาลี ครองศักดิ์ศิริ พงษ์ดนัย พิทยเมธากูล และ ธีรพงษ์ บุญชุม

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pramot Sojisuporn*, Charlie Krongsaksiri, Pongdanai Pitayametakul and Teerapong Boonchum

Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มุ่งประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันราคาประหยัดเพื่อใช้ในการสอนและงานวิจัย โดยปรับปรุงจากเครื่อง current vane ของ Kjerfve & Medeiros โดยใช้แผ่นสแตนเลสและใช้ก้อนน้ำหนักขนาด 0.5 กก. เพื่อถ่วงตัวเครื่องให้วัดกระแสน้ำ นำเครื่องวัดกระแสน้ำต้นแบบไปทดสอบในแม่น้ำเจ้าพระยาและร่องน้ำสายบุรีรวม 5 ครั้งโดยใช้น้ำหนักถ่วง 1, 2, 3 และ 5 กิโลกรัมเปรียบเทียบกับความเร็วของกระแสน้ำที่ได้จากเครื่องวัดกระแสน้ำ Valeport model 105 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์พบว่าความเอียงของสายเอ็นจากแนวดิ่ง (α) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเร็วของกระแสน้ำ (V) เครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันพร้อมด้วยน้ำหนักถ่วงรวม 1 กก. สามารถตรวจวัดกระแสน้ำได้ในช่วง 0 - 0.4 เมตรต่อวินาทีโดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.06 เมตรต่อวินาที เครื่องวัดกระแสน้ำร่วมกับน้ำหนักถ่วง 3 หรือ 5 กิโลกรัมสามารถตรวจวัดกระแสน้ำได้ในช่วง 0 - 1 เมตรต่อวินาทีโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.09 เมตรต่อวินาที เครื่องวัดกระแสน้ำที่ใช้น้ำหนักถ่วง 1 หรือ 3 กิโลกรัมก็เพียงพอสำหรับการวัดกระแสน้ำในแม่น้ำหรือชายฝั่งทะเลของไทยซึ่งมีความเร็วไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาที สำหรับการตรวจวัดกระแสน้ำในแม่น้ำช่วงน้ำหลากอาจต้องใช้น้ำหนักถ่วงเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : เครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน สหสัมพันธ์ แม่น้ำและชายฝั่งทะเล

Abstract

The purpose of this project is to develop an economical current vane for teaching and research purposes. Using the current vane of Kjerfve & Medeiros as the prototype, we used the stainless bars each having 0.5 kg weight to measure the speed of current. The current vanes with weight 1, 2, 3 or 5 kg attached to them were tested in the Chao Praya river and in the Sai Buri river for 5 times. The results were compared to the current reading from Valeport 105 current meter. The square root of the line slope (α) from the vertical was linearly correlated with the current speed (V). The current vane with 1 kg weight attached can be used to measure current in a range of 0 - 0.4 m/s with 0.06 m/s accuracy, while those with 3 or 5 kg weight can measure the current in a range of 0-1 m/s with 0.09 m/s accuracy. The current vanes with 1 kg and 3 kg weights are enough to measure the current in the river or coastal sea of Thai water. In case of high river discharge during flood, additional weights are needed to attach to the current vane.

Keywords : Current vane, correlation, river and coastal of Thai water

***Corresponding author.** E-mail: pramot.s@chula.ac.th

บทนำ

กระแสน้ำเป็นการตรวจวัดข้อมูลที่สำคัญในการศึกษาการไหลของน้ำ ความสมดุลของมวลน้ำ สิ่งมีชีวิต และสสารที่อยู่ในน้ำ ตัวอย่างเช่นการประเมินปริมาณน้ำท่า ตะกอนแขวนลอยที่ไหลจากแม่น้ำ ทะเลสาบลงสู่ทะเล การรุกล้ำของน้ำทะเลในหน้าแล้ง เป็นต้น (Kjerfve, 1990, Buranapratheprat and Yanagi, 2003)

การวัดกระแสน้ำสามารถกระทำได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ด้วยความแม่นยำที่ต่างกัน เช่น สามารถประเมินกระแสน้ำโดยลอยใบไม้ หรือลูกบอล (Lagrangian method) ซึ่งได้เฉพาะกระแสน้ำผิวหน้าและเป็นผลรวมของกระแสน้ำกับกระแสลมเท่านั้น การจะวัดกระแสน้ำให้ถูกต้องและหลายระดับจำเป็นต้องใช้เครื่องวัดกระแสน้ำ ซึ่งจะเป็นการวัดกระแสน้ำแบบอยู่กับที่ (Eulerian method) (Emery and Thomson, 1998)

ตาม Emery and Thomson (1998) เครื่องวัดกระแสน้ำแบบอยู่กับที่มีวิวัฒนาการมาเป็นลำดับ โดยในเบื้องต้นใช้แผ่นวัสดุเบา (ใช้ไม้หรือพลาสติก) มางอเป็นใบกังหัน 2 แฉก (current vane) หรือ 4 แฉก (current cross) ผูกอยู่กับเชือก หย่อนเครื่องให้ถึงระดับความลึกที่ต้องการ แรงดันของน้ำจะทำให้ใบกังหันเอียงจากแนวดิ่ง วัดมุมเอียงของเชือกแล้วนำไปคำนวณเป็นค่าความเร็วกระแสน้ำ และวัดทิศของเชือกด้วยเพื่อบอกทิศทางการไหล current vane ใช้งานง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ ก่อนใช้ต้องมีการ calibrate เครื่องกับเครื่องวัดกระแสน้ำแบบอื่นที่มีความถูกต้องสูงก่อนที่จะนำไปใช้งานได้

เครื่องวัดกระแสน้ำแบบต่อมาเป็นแบบเครื่องกลคือใช้ใบพัดหมุน นับจำนวนรอบที่ใบพัดหมุนต่อเวลาจะสัมพันธ์กับความเร็วกระแสน้ำตามสมการที่โรงงานได้หาไว้แล้ว

เครื่องวัดกระแสน้ำในลำดับต่อมาเป็นการตรวจวัดความเร็วและทิศทางกระแสน้ำวัดในทางอ้อม เช่น ตรวจวัดโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า ประจุไฟฟ้าในน้ำที่เคลื่อนผ่านหัววัดแม่เหล็กไฟฟ้าจะบ่งบอกถึงความเร็วของกระแสน้ำ สามารถวัดกระแสน้ำได้อย่างแม่นยำ ในตัวเครื่องจะมีหน่วยเก็บข้อมูลจึงสามารถเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องได้

เครื่องวัดกระแสน้ำรุ่นล่าสุดใช้หลักการสะท้อนของเสียงจากสารแขวนลอยในน้ำ เรียกว่า acoustic doppler current profiler (โดยมีเครื่องปล่อยเสียงและตัวรับเสียง ใช้หลักการเปลี่ยนความถี่ของเสียงในน้ำในการคำนวณเป็นความเร็วกระแสน้ำ) (Emery and Thomson, 1998) ค่าความเร็วกระแสน้ำที่ได้จะมีความแม่นยำไม่มากแต่มีข้อได้เปรียบคือสามารถวัดความเร็วกระแสน้ำได้หลายระดับในคราวเดียวกัน และสามารถวัดกระแสน้ำแบบต่อเนื่องได้เช่นกัน

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันราคาประหยัดเพื่อใช้สำหรับงานสอนและงานวิจัยเนื่องจากเครื่องวัดกระแสน้ำในท้องตลาดจะเป็นผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศราคาเครื่องวัดกระแสน้ำในท้องตลาดมีราคาแพงมาก ในการซื้อเครื่องวัดกระแสน้ำราคาแพงเพื่อการเรียนการสอนหรือการตรวจวัดในน้ำตื้นเช่นในป่าโกงกางจึงอาจไม่เหมาะสม เสี่ยงต่อการทำหลุดมือสูญหาย ควรที่จะใช้เครื่องวัดราคาย่อมเยาคือเครื่องวัดแบบใบกังหัน

การสำรวจเอกสาร

มีการใช้เครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน 4 แฉกอย่างแพร่หลายในช่วง 70 ปีที่ผ่านมา ตัวอย่างเช่น เครื่องมือที่ออกแบบและใช้งานโดยสถาบันอ่าวเชสปิค (Pickard & Emery, 1982) ต่อมา Kjerfve (1982) ได้พัฒนาเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน 4 แฉก (current cross) และใช้ในการตรวจวัดกระแสน้ำในลุ่มน้ำเค็ม (salt marsh) ที่ North Inlet รัฐเซาท์คาโรไลนา ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งใช้งานได้ดี ต่อมา Kjerfve and Medeiros (1989) ได้พัฒนาเครื่องให้ดียิ่งขึ้นโดยให้ความเห็นว่าเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน 4 แฉกจะวางตัวต้านกระแสน้ำได้ 2 ลักษณะ ซึ่งจะให้มุมความเอียงของเส้นเชือกแตกต่างกัน ส่งผลให้การคำนวณความเร็วกระแสน้ำไม่เที่ยงตรง จึงได้พัฒนาเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน 2 แฉกขึ้นมาใหม่ ซึ่งจะวางตัวต้านกระแสน้ำได้เพียงลักษณะเดียว และได้ทดลองใช้ในเอสทูรีในรัฐเซาท์คาโรไลน่า ปรากฏว่าใช้งานได้ดี โดยเครื่องพร้อมน้ำหนักถ่วง 2 กิโลกรัมวัดมุมได้ในช่วง 3-63 องศา เทียบเป็นความเร็วกระแสน้ำ 0.1-0.8 เมตรต่อวินาที และเครื่องพร้อมน้ำหนักถ่วง 7 กิโลกรัมวัดมุมได้ในช่วง 1-50 องศาเทียบเป็นความเร็วกระแสน้ำ 0.3-1.6 เมตรต่อวินาที

ในโครงการศึกษาสมุทรศาสตร์ของป่าชายเลนบริเวณคลองหงาว (Wattayakorn *et. al*., 1990) ก็ได้น้ำต้นแบบเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน 2 แฉกของ Björn Kjerfve มาใช้งานในประเทศไทยโดยสามารถวัดความเร็วกระแสน้ำได้ในช่วง 0.2-1.9 เมตรต่อวินาที (ในบทความไม่ได้ให้รายละเอียดมุมเอียงของเอ็น) จากการค้นคว้าเอกสารล่าสุดไม่พบว่ามีการพัฒนา current cross หรือ current vane อีกเลย เข้าใจว่านักวิจัยหันไปใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้งานสะดวกแต่มีราคาแพงกว่า

หลักการทำงานของ current cross (Kjerfve, 1982) หรือ current vane (Kjerfve and Medeiros, 1989) ใช้หลักทางกลศาสตร์ (Elder and Williams, 1996) โดยที่วัตถุที่จมอยู่ภายในน้ำ

ที่เคลื่อนที่จะมีแรงลาก (drag force) ที่มวลน้ำทำกับวัตถุเป็นไปตามสมการที่ 1

$$F_D = \frac{1}{2} C_D(\mathrm{Re}) A \rho V^2 \quad \text{..... (1)}$$

เมื่อ F_D คือแรงลากหรือแรงเฉือนที่มวลน้ำกระทำต่อวัตถุจมน้ำ C_D คือสัมประสิทธิแรงลากซึ่งแปรตามสภาพการไหลของน้ำ เมื่อค่า Reynold's number (Re) มีค่าน้อยกว่า 0.4 สัมประสิทธิแรงลากจะมีค่าเท่ากับ 24/ Re ρ คือความหนาแน่นของน้ำ (1000-1028 กิโลกรัม/ล.บ.เมตร) *V* คือความเร็วกระแสน้ำ *A* คือพื้นผิวของวัตถุที่ตั้งฉากกับกระแสน้ำ และ Re (Reynold's number) คือสัดส่วนระหว่างแรงภายใน (Internal force) กับแรงเสียดทาน (Viscous force) ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีหน่วยคำนวณจากสมการที่ 2 (Elder and Williams, 1996)

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad \text{..... (2)}$$

เมื่อ μ และ ν เป็นค่าความหนืดทางพลศาสตร์ (10^{-3} นิวตัน*วินาที/เมตร^2) และจลศาสตร์ (10^{-6} เมตร^2/วินาที) ของน้ำตามลำดับ *L* คือมาตรความยาวของวัตถุ (ในที่นี้ก็คือความสูงของแผ่นใบกังหัน) ดังนั้นค่า Reynold's number จะขึ้นกับสภาพการไหลของน้ำ (larminar flow, turbulent flow) แรงลากทำให้สายเอ็นตึงและทำมุมเอียงกับแนวดิ่ง ในสภาพสมดุลแรงลาก (F_D) นี้ต้องเท่ากับน้ำหนักในแนวดิ่งของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน, *mg* tanα เมื่อ α คือมุมเอียงของเส้นเอ็น (Kjerfve, 1982 และ Kjerfve and Medeiros, 1989) ดังนั้น

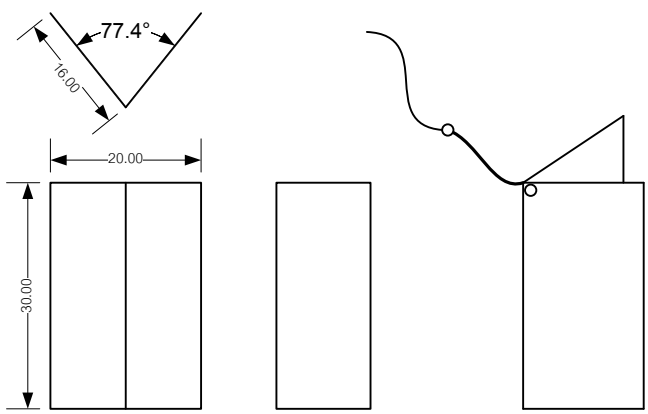
$$mg\tan(\alpha) = \frac{1}{2} C_D(\mathrm{Re}) A \rho V^2 \quad \text{..... (3)}$$

$$V = \left(\frac{2mg}{C_D(\mathrm{Re}) A \rho}\right)^{0.5} (\tan(\alpha))^{0.5}$$

ตามสมการ 3 สามารถใช้คำนวณความเร็วกระแสน้ำได้หากรู้ค่ามุมเอียงของเส้นเอ็นหากเทอม $\left(\frac{2mg}{C_D(\mathrm{Re}) A \rho}\right)^{0.5}$ มีค่าคงที่ในช่วงความเร็วที่ศึกษา ความสัมพันธ์ของความเร็วกระแสน้ำกับ $(\tan(\alpha))^{0.5}$ จะเป็นแบบเชิงเส้น สมการ 3 จะลดรูปเหลือ $V = K(\tan(\alpha))^{0.5}$ เมื่อ $K = \left(\frac{2mg}{C_D(\mathrm{Re}) A \rho}\right)^{0.5}$ (K คือความชันของกราฟที่พลอตระหว่าง *V* และ $(\tan\alpha)^{0.5}$)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ทำการออกแบบและจัดทำเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันพร้อมก้อนน้ำหนักถ่วงโดยปรับปรุงแบบของ Kjerfve and Medeiros (1989) ให้สะดวกในการเก็บรักษาและใช้งาน (ภาพที่ 1, 2 และ 3) โดยเป็นเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน 2 แฉกทำจากแผ่นวัสดุอลูมิเนียม 2 แผ่นขนาดกว้าง 15 x 30 ตารางเซนติเมตร ยึดต่อกันเป็นมุมด้วยแผ่นยึดทำมุม 77.4 องศาเพื่อให้เมื่อประกอบเข้ากันแล้วเกิดพื้นที่หน้าตัดกว้าง 20 เซนติเมตร ส่วนก้อนน้ำหนักถ่วงทำจากโลหะสแตนเลสหนักก้อนละ 0.5 กิโลกรัม คล้องเครื่องวัดกระแสน้ำด้วยสายสลิงเส้นเล็กยาวประมาณ 20 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการเสียดสีกับสายเอ็นที่นำมาคล้องอีก



ภาพที่ 1 ขนาดของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันที่ออกแบบ

ภาพที่ 2 ภาพของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันที่สร้างเสร็จแล้ว

ภาพที่ 3 เครื่องวัดความเอียงของสายเอ็น 2 รูปแบบ ด้านซ้ายเป็นเครื่องวัดมุมจากประเทศญี่ปุ่น ส่วนด้านขวาสามารถซื้อได้ตามร้านช่าง (คลองถม เป็นต้น) รูปล่างเป็นเครื่องวัดกระแสน้ำที่ใช้ก้อนน้ำหนักรวม 4 กิโลกรัม (ก้อนน้ำหนัก 8 ก้อน)

ต่อหนึ่ง เมื่ออยู่ในน้ำตัวเครื่องจะตั้งตรงได้ระดับหนึ่งถึงแม้ว่าสายเอ็นจะเอียงก็ตาม น้ำหนักเครื่องวัดกระแสน้ำพร้อมสายสลิงหนัก 0.996 กิโลกรัมในอากาศ แทนที่ปริมาตรน้ำ 0.490 ลิตร ดังนั้นเครื่องวัดกระแสน้ำจะหนักประมาณ 0.506 กิโลกรัมในน้ำซึ่งเบาเกินไป เมื่อมีกระแสน้ำพัดผ่านจะทำให้บางส่วนของตัวเครื่องลอยพ้นน้ำได้ ส่วนก้อนน้ำหนักถ่วง 2 ก้อนหนัก 1.015 กิโลกรัม แทนที่น้ำ 0.129 ลิตรจึงมีน้ำหนักในน้ำประมาณ 0.886 กิโลกรัม

หลังจากจัดทำและจัดหาอุปกรณ์ครบถ้วนแล้วได้นำเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันไปทดสอบในภาคสนามรวม 5 ครั้ง ในแม่น้ำเจ้าพระยาและปากแม่น้ำสายบุรีโดยเลือกจุดที่น้ำไหลเป็นทางตรงมีความเร็วกระแสน้ำตั้งแต่น้ำนิ่งจนไปถึงน้ำไหลแรงสุดมากกว่า 1 เมตรต่อวินาที ใช้เครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันที่มีก้อนน้ำหนักถ่วงรวมกัน 1, 2, 3 และ 5 กิโลกรัม วัดมุมเอียงของสายเอ็นและความเร็วของกระแสน้ำโดยใช้เครื่องวัดกระแสน้ำชนิดอื่นๆ (ในที่นี้ใช้ Valeport 105 หรือ ADCP) หลายๆ ครั้งให้ครอบคลุมตั้งแต่กระแสน้ำใกล้นิ่งจนถึงกระแสน้ำไหลแรงสุด จากนั้นนำข้อมูลการทดสอบทั้งหมดมาแจกแจงตามขนาดของก้อนน้ำหนักรวม โดยพิจารณาเฉพาะมุมเอียงของเอ็นซึ่งไม่ควรเกิน 45^0 (หากเกินต้องเพิ่มตุ้มน้ำหนัก) เนื่องจากตัวเครื่องวัดไม่ตั้งอยู่ในแนวดิ่งอันจะทำให้พื้นที่หน้าตัดของเครื่องวัดกระแสน้ำคลาดเคลื่อนไปได้ คำนวณรากที่สองของความเอียงของสายเอ็น ($(\tan\alpha)^{0.5}$) แล้วทดสอบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน, *r*, ตามวิธีการที่ปรากฏใน Press *et. at*. (1986) (ตารางที่ 1)

ทำการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ด้วยวิธี *t* – test) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยเปรียบเทียบค่า $t_{\text{คำนวณ}}$ จากสมการ $t = r\sqrt{\frac{N-2}{1-r^2}}$ (เมื่อ *N* คือจำนวนข้อมูลและ *r* คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน) กับค่า $t_{\text{วิกฤต}}$ จากตารางแจกแจงค่า *t* ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (2 ด้าน) และ degree of freedom (*df*) = *N* – 2 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง $(\tan\alpha)^{0.5}$ กับอัตราเร็ว ของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันแต่ละขนาด และความแม่นยำในการวัด

น้ำหนักรวมของก้อนน้ำหนักที่ใช้	1 กก.	2 กก.	3 กก.	5 กก.
จำนวนจุดข้อมูล (*N*)	46	43	82	56
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ *r*	0.8798	0.8081	0.8954	0.9644
ความแม่นยำในการวัด r^2x 100%	77.40	65.37	80.17	93.01
$t_{\text{วิกฤต}}$	2.0129	2.0167	1.9893	2.0040
$t_{\text{คำนวณ}}$	12.2767	8.7838	17.9842	26.8103
a (slope)	0.510	0.884	1.003	1.223
b (y-intercept)	-0.029	-0.106	-0.045	-0.034
ช่วงความเร็วที่วัดได้ (m/s)	0.02-0.42	0.01-0.68	0.05-0.93	0.08-1.05
ความคลาดเคลื่อน (m/s)	0.06	0.13	0.09	0.06

ขั้นต่อไปคำนวณสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น (สมการการถดถอย) เพื่อสร้างตารางเปรียบเทียบมุมเอียงของสายเอ็นกับความเร็วกระแสน้ำโดยเป็นสมการเส้นตรง

$$V = a(\tan\alpha)^{0.5} + b \quad \text{..... (4)}$$

เมื่อ *V* คือความเร็วกระแสน้ำ (เมตรต่อวินาที)

$\tan\alpha$ คือมุมเอียงของสายเอ็น (องศา)

a เป็นค่าความชันของเส้นการถดถอย หาจาก

$$a = \frac{N\sum((\tan\alpha)^{0.5}V) - \sum(\tan\alpha)^{0.5}\sum V}{N\sum((\tan\alpha)^{0.5})^2 - (\sum(\tan\alpha)^{0.5})^2}$$

b เป็นจุดบนแกน Y ที่ตัดกับเส้นการถดถอย หาจาก

$$b = \frac{\sum V - a\sum(\tan\alpha)^{0.5}}{N}$$

การหาความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดได้จากสมการ

standard error of measurement, *S.E.*

$$S.E. = \left\{ \sum_{N} (v_i - v_r)^2 / (n-2) \right\}^{0.5} \quad \text{..... (5)}$$

เมื่อ *S.E.* คือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดความเร็วกระแสน้ำ,

v_i คือค่ากระแสน้ำจากเครื่องวัด และ

v_r คือค่ากระแสน้ำความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลความเร็วกระแสน้ำ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\tan\alpha)^{0.5}$ กับความเร็วกระแสน้ำจากเครื่องวัดกระแสน้ำ จากกราฟจะเห็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น จึงสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน, *r* และตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง $(\tan\alpha)^{0.5}$ กับความเร็วกระแสน้ำที่แบ่งตามน้ำหนักของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหัน จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง $(\tan\alpha)^{0.5}$ กับความเร็วกระแสน้ำจะพบว่าเมื่อเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันมีน้ำหนักมากขึ้นค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์จะสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากว่าน้ำหนักที่มากขึ้นทำให้เครื่องวัดกระแสน้ำนิ่งมากขึ้นไม่แปรปรวนตามกระแสน้ำที่ปั่นป่วน (turbulence)

ผลการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะพบว่าเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันทั้งสี่ขนาดให้ค่า $t_{คำนวณ}$ มากกว่าค่า $t_{วิกฤต}$ แสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตารางที่ 1 เป็นค่าที่มีนัยสำคัญ (เป็นจริง) ทั้งสี่ขนาด หรือกล่าวได้ว่า $(\tan\alpha)^{0.5}$ กับความเร็วกระแสน้ำมีความสัมพันธ์กันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ในการคำนวณสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ค่าความชัน (*a*) และจุดที่สมการถดถอยตัดกับแกน *y* ของกราฟ (ตารางที่ 1) เมื่อสังเกตจากค่าความชันในสมการพบว่าเมื่อใช้ก้อนน้ำหนักรวม 3 กิโลกรัมถ่วงกับเครื่องวัดกระแสน้ำแบบแผ่นพับมีค่าใกล้หนึ่ง ซึ่งบ่งบอกว่ารากที่สองของความชัน ($(\tan\alpha)^{0.5}$) มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วกระแสน้ำ การใช้เครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันร่วมกับก้อนน้ำหนักถ่วง 1 และ 2 กิโลกรัมทำให้มุมเอียงของสายเอ็นสูง ส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของใบกังหันน้อยกว่าค่าตั้งต้นไปมาก การใช้ก้อนน้ำหนักถ่วง 5 กิโลกรัมอาจหนักเกินไปสำหรับความเร็วกระแสน้ำต่ำๆ

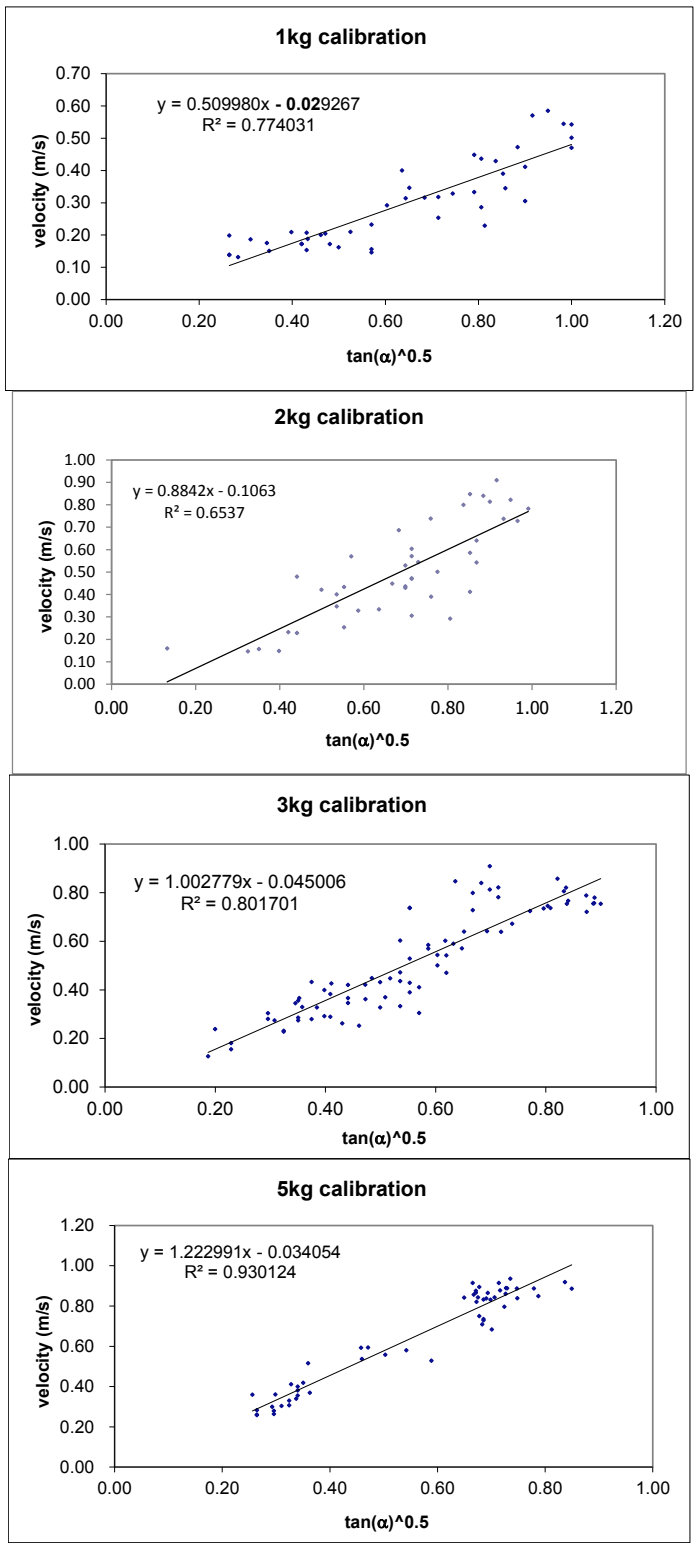
หากใช้มุม 45 องศาเป็นมุมที่เอียงที่มากที่สุดสำหรับการใช้งานเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันร่วมกันก้อนน้ำหนักรวมแต่ละขนาดจะสามารถประเมินช่วงความเร็วกระแสน้ำที่เครื่องวัด +น้ำหนักถ่วงแต่ละขนาดจะตรวจวัดได้ดังแสดงในตารางที่ 1 เครื่องวัดกระแสน้ำร่วมกับก้อนน้ำหนักถ่วง 1 กิโลกรัมสามารถวัดกระแสน้ำได้แรงสุด 0.42 เมตรต่อวินาทีจึงเหมาะสำหรับในบริเวณที่น้ำไหลช้า เครื่องวัดกระแสน้ำร่วมกับก้อนน้ำหนักถ่วง 3 และ 5 กิโลกรัมสามารถวัดกระแสน้ำได้แรงสุดประมาณ 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งเหมาะกับการวัดกระแสน้ำในทะเลและชายฝั่ง สำหรับการวัดกระแสน้ำในแม่น้ำช่วงฤดูน้ำหลากซึ่งมีความเร็วกระแสน้ำสูงกว่า 1 เมตรต่อวินาทีจะต้องใช้ก้อนน้ำหนักเพิ่มขึ้น โดยสรุปแล้วการใช้เครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันร่วมกับก้อนน้ำหนักถ่วง 1 และ 3 กิโลกรัมจะเพียงพอสำหรับวัดกระแสน้ำในทะเลและในแม่น้ำในสถานการณ์ปกติ เมื่อถึงฤดูน้ำหลากจะต้องเพิ่มก้อนน้ำหนักเป็น 5 - 7 กิโลกรัม

ผลการคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัด (ตารางที่ 1) พบว่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานในการวัดความเร็วกระแสน้ำสำหรับเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันพร้อมก้อนน้ำหนักถ่วง 1, 3 และ 5 กิโลกรัมมีค่าต่ำกว่า 0.1 เมตรต่อวินาที ซึ่งใกล้เคียงกับความคลาดเคลื่อนของเครื่องต้นแบบ (Kjerfve & Medeiros, 1989) ส่วนการใช้ก้อนน้ำหนักถ่วง 2 กิโลกรัมมีความคลาดเคลื่อนเกินกว่า 0.1 เมตรต่อวินาทีซึ่งอาจสูงเกินไป ความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากจำนวนจุดข้อมูลมากขึ้นจากการตรวจวัดในพื้นที่มากกว่าหนึ่งแห่ง

ตารางที่ 2 สรุปคุณสมบัติของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันในน้ำรวมทั้งพารามิเตอร์ทางกลศาสตร์ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องวัดกระแสน้ำเมื่ออยู่ในน้ำมีค่าคงที่หากเครื่องวัดตั้งอยู่ใน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันพร้อมก้อนน้ำหนักถ่วง 1, 2, 3 และ 5 กิโลกรัม

	เครื่อง + 1 กก.	เครื่อง + 2 กก.	เครื่อง + 3 กก.	เครื่อง + 5 กก.
พื้นที่หน้าตัด (m^2)	0.0585	0.0585	0.0585	0.0585
น้ำหนักในน้ำ (kg)	1.392	2.278	3.164	4.936
C_D(-)	1.78	0.97	1.04	1.09



ภาพที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\tan\alpha)^{0.5}$ และความเร็วกระแสน้ำจากเครื่องวัดสำหรับเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันที่ใช้ก้อนถ่วงน้ำหนัก 1, 2, 3 และ 5 กิโลเมตร

แนวดิ่งเสมอเท่ากับ 0.195 * 0.30 = 0.0585 ตารางเมตร น้ำหนักของเครื่องวัดกระแสน้ำเพียงอย่างเดียวประมาณ 0.5 กิโลกรัม เมื่อใส่น้ำหนักถ่วงจำนวนต่างๆ กันทำให้น้ำหนักของเครื่องเพิ่มขึ้นตามตาราง ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ได้จากการคำนวณจากค่าความชันตามสมการ (3) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงสุดสำหรับเครื่องที่ใช้น้ำหนักถ่วงเพียง 1 กิโลกรัมจึงทำให้มุมเอียงของสายเอ็นมากที่สุด เมื่อใช้น้ำหนักถ่วงตั้งแต่ 2 กิโลกรัมขึ้นไปจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การต้านมีค่าใกล้เคียงกัน

อนึ่งการทดสอบเครื่องมือกระทำใกล้ผิวน้ำเพื่อให้เห็นความเอียงและเส้นเอ็นและเครื่องวัดกระแสน้ำว่าอยู่ในระนาบเดียวกันหรือไม่ ในการใช้งานจริงสามารถหย่อนเครื่องวัดกระแสน้ำได้ทุกระดับในน้ำลึกระดับสิบเมตร โดยสังเกตว่าสายเอ็นตึงอยู่เสมอ ซึ่งต้องใช้ตุ้มน้ำหนักให้เหมาะสม และระมัดระวังเป็นพิเศษหากกระแสน้ำเปลี่ยนทิศทางการไหล (ไหลเข้า-ไหลออก) เพราะสายเอ็นอาจไม่เอียงในทิศทางเดียวกันตลอดทั้งเส้นเอ็น

สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันโดยพัฒนาต่อยอดจากผู้วิจัย Kjerfve & Medeiros (1989) ได้ตัวเครื่องวัดกระแสน้ำสามารถถอดแยกชิ้นได้ พื้นที่หน้าตัดไม่ลดลงมากแม้เมื่อสายเอ็นเอียงทำมุมสูงกว่า 30 องศา (เครื่องไม่เอียงตามกระแสน้ำ) เพิ่มน้ำหนักได้ 1 ถึง 5 กิโลกรัมโดยมุมเอียงของเครื่องไม่เกิน 45 องศาเทียบเป็นกระแสน้ำได้มากสุดประมาณ 1 เมตรต่อวินาที ซึ่งเพียงพอสำหรับขนาดความเร็วกระแสน้ำในแม่น้ำและฝั่งทะเลของไทย เครื่องวัดกระแสน้ำที่พัฒนาขึ้นนี้มีราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับเครื่องวัดกระแสน้ำอื่นๆ อีกทั้งความคลาดเคลื่อนในการวัดกระแสน้ำก็ไม่แตกต่างจากกระแสน้ำรุ่นแพงๆ ดังนั้นเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันที่พัฒนาขึ้นนี้จึงเหมาะสำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนและเหมาะสำหรับการวิจัยได้อีกด้วย

อนึ่งมีข้อแนะนำในการใช้งานก็คือควรถอดแยกส่วนประกอบออกจากกันหลังใช้งานแล้วเนื่องจากสกรูที่ใช้มักจะเป็นสนิมหลังการใช้งานในทะเลหรือปากแม่น้ำ และในอนาคตควรทำกล่องใส่เครื่องวัดกระแสน้ำให้เป็นระเบียบ เหมาะแก่การเก็บรักษาและนำไปใช้งานภาคสนาม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณกองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนิสิตที่มีส่วนร่วมในการวิจัยในครั้งนี้ ขอบคุณคุณสมพร เอี่ยมสำอางค์ ฝ่ายเครื่องมือของคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยจัดทำเครื่องวัดกระแสน้ำแบบใบกังหันชุดนี้

เอกสารอ้างอิง

Buranapratheprat, A., and Yanagi, T. (2003). Seasonal variations in circulation and average residence time of the Bangpakong estuary, Thailand. La mer, 41, 199-213.

Elder, S.A., and Williams, J. (1996). *Fluid Physics for Oceanographers and Physicists*. Butterworth-Heinemann, England.

Emery, W.J., and Thomson, R.E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon, England.

Kjerfve, B. (1982). Calibration of estuarine current crosses. Estuarine. Coastal and Shelf Science, 15, 553-559.

Kjerfve, B., and Medeiros, C. (1989). Current vanes for measuring tidal currents in estuaries. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 28, 87-93.

Kjerfve, B. (1990). *Manual for Investigation of Hydrological Processes in Mangrove Ecosystems*. UNESCO/UNDP Regional Project. Thomson Press, India.

Pickard, G.L., and Emery, W.J. (1982). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. Pergamon Press, England.

Wattayakorn, G., Wolanski, E., and Kjerfve, B. (1990). Mixing, Trapping and Outwelling in the Klong Ngao Mangrove Swamp, Thailand. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 31, 667-688.

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T. (1986). *Numerical Recipes : The Art of Scientific Computing. Cambridge*. England.