การพัฒนาเครื่องมือวัดศักยภาพกำลังคลื่นทะเลชนิดทุ่นลอย บริเวณชายฝั่งทะเลหาดเจ้าสำราญ จ.เพชรบุรี

The Development of Measuring Instrument for Potential Wave Power by Buoyancy Type at Had Chao Samran, Phetchaburi Coastal Area

กังสดาล สกุลพงษ์มาลี* เจิมธง ปรารถนารักษ์ จุติพร อินทะนิน ภาณุศักดิ์ มูลศรี และ ชลีดล อินยาศรี

Kangsadan Sagulpongmalee*, Chermthong Prattanaruk, Jutiporn Intanin, Panusak Moonsri and Chaleedol Inyasri

หน่วยวิจัยและประยุกต์พลังงานทดแทน สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

Alternative Energy Research and Application Unit, Division of Energy Engineering,

Faculty of Engineering and Industrial Technology, Phetchaburi Rajabhat University

Received : 1 August 2016

Accepted : 19 June 2017

Published online : 7 August 2017

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือสำหรับตรวจวัดค่าศักยภาพกำลังคลื่นทะเลชนิดทุ่นลอย บริเวณชายทะเลหาดเจ้าสำราญ จ.เพชรบุรี ซึ่งจากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังคลื่นทะเลจากสมการคลื่นรูปซายน์แบบสมบูรณ์ ได้แก่ คาบของคลื่นทะเล และความสูงของคลื่นทะเล จึงออกแบบและสร้างเครื่องมือตรวจวัดศักยภาพกำลังคลื่นทะเลโดยใช้ทุ่นลอยหนึ่งกลไกเป็นอุปกรณ์รับแรงจากคลื่นทะเลและถ่ายทอดกำลังผ่านก้านต่อโยงให้กับกลไกซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุม จากการตรวจวัดค่าคาบของคลื่นทะเล พบว่า มีค่าไม่เท่ากันในแต่ละวัน ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.88 – 7.68 s และค่าความสูงคลื่นทะเลเฉลี่ยในช่วงเวลาทดสอบจากอุปกรณ์ตรวจวัด เท่ากับ 0.16 m ซึ่งเมื่อนำพารามิเตอร์ดังกล่าวไปคำนวณ พบว่า จะมีกำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.42 kW/m จากการวิเคราะห์ข้อมูลค่าศักยภาพกำลังคลื่นทะเลตลอดแนวชายฝั่งทะเลของจังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีระยะทางรวม 93,285 m จะสามารถเป็นกำลังจากคลื่นทะเลจากอุปกรณ์วัดศักยภาพคลื่นทะเลสำหรับหนึ่งกลไก เท่ากับ 43,843 kW อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเครื่องมือสำหรับการแปลงกำลังคลื่นทะเลเป็นพลังงานสำหรับประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยด้านกำลังคลื่นทะเลควรได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อพัฒนาพลังงานคลื่นเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนได้ในอนาคตของประเทศไทย

คำสำคัญ : คาบคลื่นทะเล ความสูงคลื่นทะเล กำลังคลื่นทะเล ทุ่นลอย ชายฝั่งทะเล จ.เพชรบุรี

***Corresponding author. E-mail** : kangsadan.sag@mail.pbru.ac.th

Abstract

This research aimed to develop instrument for measuring wave power potential by using buoyancy type at coastal area at Had Chao Samran in Phetchaburi province. The study of parameters of related to wave power from pure sinusoidal wave equation were wave period and wave height. The design and construction of wave power potential measuring instrument by using one mechanism of buoyancy, it is a device that receives waves from the sea and transmits power through a connecting rod to a mechanism which convert the linear motion to an angular motion. From measurement, the sea wave period is in the range of 4.88-7.68 s which not the equal each day and the average of wave height at testing time from measuring instrument is 0.16 m. The calculation of these parameters finds that the average of wave power is 0.42 kW/m. The analysis of potential wave power data along the coast of Phetchaburi, total distance of coast is 93,285 m, which can be the wave power from a potential measuring instrument for one mechanism is 43,843 kW. However, this research is a preliminary study of the feasibility of developing instrument for converting wave power into energy for Thailand. The wave power research should be developed to be more effective for develop wave power to alternative energy resource as a sustainable source in the future of Thailand.

Keywords: wave period, wave height, wave power, buoyancy, Phetchaburi Coastal

บทนำ

ประเทศไทยได้จัดทำแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 – 2564) (Ministry of Energy, 2011) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ ลดการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานชนิดอื่น ช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้า และลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งคาดการณ์ว่าในปี พ.ศ.2564 จะมีความต้องการพลังงานประเทศเพิ่มขึ้นเป็น 99,838 ktoe จากปัจจุบัน 71,728 ktoe โดยกำหนดให้มีสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นจาก 7,413 ktoe ในปี พ.ศ. 2555 เป็น 25,000 ktoe ในปี พ.ศ. 2564 หรือคิดเป็น 25% ของการใช้พลังงานรวม ซึ่งจากแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ได้กำหนดเป้าหมายพลังงานคลื่นทะเลซึ่งจัดอยู่ในพลังงานรูปแบบใหม่ที่จะได้รับการพัฒนาให้เกิดขึ้นจำนวน 2 MW ในปี พ.ศ. 2564 จึงมีแนวความคิดในการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาพลังงานจากคลื่นเพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายของแผนที่วางไว้ ประกอบกับ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรีมีพื้นที่ตั้งอยู่ในจังหวัดเพชรบุรี ซึ่งติดกับทะเลอ่าวไทย จึงมีแนวความคิดในการพัฒนางานวิจัยด้านพลังงานจากคลื่นทะเลตามศักยภาพของแหล่งภูมิภาคบริเวณชายฝั่งทะเลหาดเจ้าสำราญ จ.เพชรบุรี เพื่อประเมินศักยภาพของการนำพลังงานจากคลื่นทะเลมาใช้เพื่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยในอนาคต

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

López *et al.* (2013 ได้ศึกษาศักยภาพของพลังงานคลื่น พบว่า พลังงานคลื่นเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มหาศาลและมีความเสถียรภาพมากกว่าพลังงานหมุนเวียนชนิดอื่น เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม เพราะว่าศักยภาพในการผลิตพลังงานของพลังงานคลื่น เท่ากับ 2-3 kW/m^2 มากกว่าลม (0.4-0.6 kW/m^2) และแสงอาทิตย์ (0.1-0.2 kW/m^2) เนื่องจากการแปลงพลังงานคลื่นสามารถผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากถึง 90% ของช่วงเวลา ส่วนอุปกรณ์ของพลังงานลมและแสงอาทิตย์จะแปลงได้ 20-30% จากการศึกษาและสำรวจข้อมูลจากทั่วโลกในช่วง 10 ปี ได้ทำแผนที่คลื่น (wave atlas) พบว่า กำลังคลื่นทะเลที่มีศักยภาพสูงส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 40° และ 60° ของทั้งสองซีกโลก แต่ถ้าเปรียบเทียบระหว่างขั้วโลกเหนือและขั้วโลกใต้ พบว่า กำลังคลื่นรายปีเฉลี่ยของทางขั้วโลกใต้จะสูงกว่า แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฤดูกาลก็จะมีค่าน้อยลง

Mirzaei *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลของชายฝั่งตะวันออกของคาบสมุทรมาเลเซีย (Peninsular Malaysia) ที่อยู่ทะเลจีนใต้ (South China Sea, SCS) ในช่วง 31 ปี (ค.ศ. 1979-2009) ด้วยแบบจำลอง จากการคำนวณศักยภาพของคลื่นจะขึ้นกับสมการกำลังคลื่นทะเลน้ำลึก พบว่า พลังงานคลื่นจะสูงขึ้นในพื้นที่ทางตอนเหนือของชายฝั่ง ขณะที่ทางตอนใต้บางส่วนมีค่าต่ำกว่า

Buccino *et al.* (2015) ได้ทำการพัฒนาส่วนประกอบของระบบการแปลงพลังงานคลื่น (Wave Energy Converter, WEC) แบบกำแพงกันคลื่นในทะเล (sea wall) เพื่อพัฒนาโรงไฟฟ้าพลังน้ำชนิดความแตกต่างของเฮดต่ำมาก (น้อยกว่า 2.5 m) ซึ่งใช้กังหันน้ำชนิดคาปลาน (Kaplan turbine) โดยสะสมพลังงานคลื่นไว้ในอ่างเก็บน้ำแนวชายฝั่ง (shoreline overtopping reservoir) จากการทดสอบที่อัตรา พบว่า ความแตกต่างของระดับน้ำทั้งสอง ซึ่งมีการทดสอบที่ความสูงของคลื่น 1.0 และ 1.5 m แบบฐานเป็นทางลาด (ramp) ระหว่าง 0.71-2.5 m พบว่า คาบของคลื่นอยู่ในช่วง 3.5-10 s ที่ระดับความแตกต่างเฮดระหว่าง 1-2.5 m อัตราการไหล 1-3.5 m3/s/m จะได้กำลังคลื่น เท่ากับ 6-52 kW/m เมื่อทำการติดตั้งจริงที่ชายฝั่งตะวันตกเฉียงเหนือของอิตาลี พบว่า อัตราส่วนเปอร์เซ็นต์ของปริมาณพลังงานที่ผลิตจริง (capacity factor) อยู่ระหว่าง 12-20% ซึ่งมีค่าใกล้กับโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และลม ระบบสามารถทำงานได้และให้พลังงานออกมาในปริมาณตลอดระยะทางแนวชายฝั่งมีจำกัด และถ้ามุมลาดชันเพิ่มขึ้นจะทำให้ได้อัตราน้ำล้นมากยิ่งขึ้น

กฤษฎา พรหมแก้ว และ สมภพ ปัญญาสมพรรค์ (Phomkaeo & Punyasompun, 2013) ได้การศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นชายฝั่งทะเล โดยเครื่องผลิตไฟฟ้ามีขนาดกว้าง 1.5 m ยาว 1.4 m สูง 1.5 m ด้านหน้ามีทุ่นลอยขึ้นลงตามความสูงของคลื่น ขนาด กว้าง 1 m ยาว 1.4 m สูง 0.2 m และมีชุดกลไกขับอัลเตอร์เนเตอร์ (alternator) ประกอบด้วยชุดโซ่ และเฟืองปรับความเร็วรอบ การทดลองจะทำการวัด แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความสูงของคลื่น ชั่วขณะในเวลา 1 ชั่วโมง ทำการจดบันทึก ทุกๆ 5 นาที ทำการเก็บผลในระหว่างวันที่ 15 ถึง 17 พฤษภาคม 2556 ระหว่างเวลา 08.00 ถึง 23.00 น. ทดลองในสถานที่จริง ณ อุทยานสิ่งแวดล้อมนานาชาติ สิรินธร อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี และบ้านอ่าวมะนาว อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส จากการทดสอบผลของน้ำหนักทุ่นกับกำลังไฟฟ้าที่ได้ พบว่า เมื่อทำการต่อโหลด 50 W และน้ำหนักทุ่นเริ่มจาก 25 kg แล้วทำการเพิ่มน้ำหนักทุ่น 10, 20, 30 และ 40 kg ความสูงของคลื่นในวันที่ทำการทดลองอยู่ที่ 20 cm ทำการทดลอง 3 กรณี พบว่า กรณีทุ่นทำงานตอนขึ้น น้ำหนักที่เพิ่มของทุ่นจะให้กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าลดลงจริงตามการทดลองในห้องทดลอง ส่วนกรณีทุ่นกรณีทุ่นทำงานตอนลง น้ำหนักที่เพิ่มของทุ่นจะให้กำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่ามากขึ้นจริงตามการ

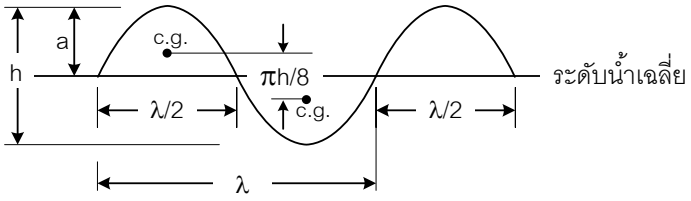
ทดลองในห้องทดลอง และทำการทดลองโดยต่อโหลดขนาด 50 และ 100 W เพื่อวัดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากการวิจัยพบว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเริ่มทำงานเมื่อคลื่นมีความสูงตั้งแต่ 0.1 - 0.6 m ซึ่งคลื่นในอ่าวไทยมีความสูงเฉลี่ยประมาณ 0.4 m เครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นทะเลที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพเมื่อคาบเวลาของคลื่น เท่ากับ 4 วินาทีต่อลูก ซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากห้องทดลอง และในการทดลองเครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นทะเลในสถานที่ทดลองจริงอยู่ที่ 217.56 W ขณะไม่มีโหลด และได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 32.5 W ขณะรับโหลด 50 W ตามลำดับ

เจิมธง ปรารถนารักษ์ และ คณะ (Prattanaruk *et al.,* 2015).ได้พัฒนาต้นแบบกลไกผลิตกระแสไฟฟ้าแบบทุ่นลอย ซึ่งใช้คลื่นทะเลเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนชุดกลไก โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ช่วง ตามค่าแอมปลิจูดของคลื่น ผลการทดสอบ พบว่า ระบบกลไกสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วง 300 วินาที ได้ 57.83 , 189.80 และ 228.25 W ตามลำดับ คิดเป็นประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน 8.31 , 16.29, 13.95% ตามลาดับ จากนั้นทำการปรับปรุงการทำงานของกลไก โดยเลื่อนเฟสและเลือกความถี่การแกว่งตัวของทุ่นให้สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของคลื่นทะเล พบว่า ระบบกลไกสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วง 300 วินาที ได้ 81.49, 368.24 และ 929.77 W ตามลำดับ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 11.59, 31.63 และ 56.85 % ตามลาดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยว พบว่า งานวิจัยมีทั้งที่เป็นแบบจำลองและการสร้างเครื่องมือทดสอบจริง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยในต่างประเทศเป็นการสร้างอุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นทะเลนอกชายฝั่ง อีกทั้งในต่างประเทศยังมีลักษณะของคลื่นทะเลที่มีความสูงคลื่นมากกว่าประเทศไทย จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสมกับประเทศไทย ซึ่งก่อนที่ประเทศไทยจะพัฒนาพลังงานคลื่นทะเลสู่การผลิตพลังงานไฟฟ้าจำเป็นต้องมีข้อมูลด้านศักยภาพกำลังคลื่นทะเล แต่เนื่องจากประเทศได้มีความสนใจด้านพลังงานคลื่นทะเลไม่นานนักจึงทำให้ยังขาดข้อมูลในด้านนี้ และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าพลังงานคลื่นทะเลมีราคาสูงมาก จึงได้ออกแบบอุปกรณ์ทดสอบศักยภาพกำลังคลื่นทะเลใกล้ชายฝั่งชนิดทุ่นลอย เพื่อหาค่าความสูงคลื่นทะเลสำหรับคลื่นทะเลที่มีค่าความสูงคลื่นต่ำ

<u>ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</u>

คลื่นในทะเลและมหาสมุทรเป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลมพัดผ่านผิวน้ำ คลื่นน้ำเป็นการถ่ายทอดพลังงานจากจุดที่มีลมพัดไปยังจุดอื่น ๆ แล้วแต่ทิศทางลม ซึ่งมิใช่เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำในแนวราบ แต่เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำแต่ละอนุภาคที่ประกอบขึ้นเป็นตัวคลื่นหมุนเวียนเป็นวงในทิศเดียวกับลมหรือทิศเดียวกับคลื่น สำหรับประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรเป็นเขตร้อนอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมหรือลมประจำฤดู (Thai Marine Meteorological Center, 2557) ซึ่งเป็นลมที่พัดเปลี่ยนทิศทางไปตามฤดูกาลของช่วงระยะเวลา พลังงานคลื่นที่ตกกระทบจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่สามารถคำนวณได้จากมวลของน้ำที่ตกผ่านหน้าคลื่น พลังงานศักย์ของคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าเท่ากับ การย้ายมวลของน้ำจากระดับน้ำทะเลไปยังจุดศูนย์กลางของคลื่น (Jangsawang, 2010) หากคลื่นทะเลมีลักษณะเป็นคลื่นรูปซายน์แบบสมบูรณ์ (pure sinusoidal wave) ดังภาพที่ 1 Tester et al. (Tester et al., 2005) ได้มีการคำนวณหากำลังคลื่นจากไฮโดรไดนามิกส์ของคลื่นซึ่งมีความซับซ้อนมากแต่สามารถประมาณคราว ๆ ได้จากพลังงานของคลื่นลม เมื่อ a เป็นความสูงของยอดคลื่นหรือท้องคลื่นเมื่อเทียบจากระดับน้ำเฉลี่ย โดยระยะจากจุดศูนย์ถ่วง (c.g.) ของลูกคลื่นด้านบนกับลูกคลื่นด้านล่าง เท่ากับ $\pi h/8$ ซึ่งมีสมการดังนี้



ภาพที่ 1 ลักษณะคลื่นทะเล (Tester *et al.*, 2005)

พลังงานศักย์โน้มถ่วง $$\Delta PE = mg\,\Delta h = \left[\rho\left(\frac{h}{\pi}\right)\left(\frac{\lambda}{2}\right)\right] g\left(\frac{\pi h}{8}\right) = \frac{1}{16}\rho\lambda\, gh^{2} \qquad (1)$$

แทนค่า ความยาวคลื่น (λ) มีค่า $\lambda = \frac{gT^{2}}{2\pi}$ ลงในสมการ (1) จะได้ $\Delta PE = \frac{1}{32}\frac{\rho g^{2} T^{2} h^{2}}{\pi}$ (2)

เมื่อ กำลังศักย์คลื่น (P_{PE}) คือ พลังงานศักย์ต่อหน่วยเวลา จากสมการ (2) จะได้

$$P_{PE} = \frac{\rho g^{2} h^{2} T}{32\pi}$$

โดย กำลังคลื่นรวม มีค่าเท่ากับ กำลังจลน์คลื่นบวกกับกำลังศักย์คลื่น ซึ่งกำลังจลน์คลื่นสามารถประมาณค่าเท่ากับกำลังศักย์คลื่น ดังนั้น จึงสามารถหาสมการคลื่นรวม (P_T) ในหน่วย (W/m) ดังสมการ (3)

$$P_{T} = \frac{\rho g^{2} h^{2} T}{16\pi} \qquad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำทะเล (kg/m^3)

h คือ ความสูงคลื่นทะเล (m)

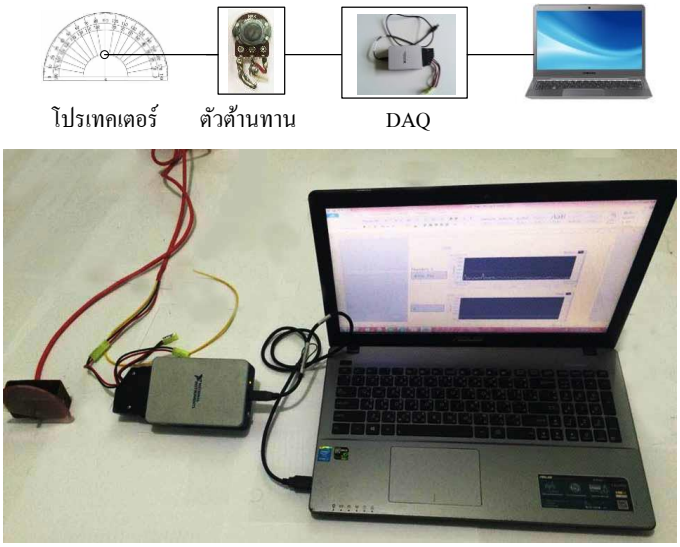
T คือ คาบของคลื่น (s)

จากสมการ (3) แสดงให้เห็นว่า พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการหาค่ากำลังคลื่นทะเล ได้แก่ ความหนาแน่นของน้ำทะเล ความสูงคลื่นทะเล และคาบของคลื่นทะเล จึงควรออกแบบอุปกรณ์และวิธีการตรวจวัดเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ดังกล่าว

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. การสอบเทียบค่าเครื่องมือวัดมุมการเคลื่อนที่ของแขนยึด

เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ทำการทดสอบจริงในพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเล ดังนั้น การออกแบบอุปกรณ์และกลไกตรวจวัดส่วนใหญ่ของระบบจะมีส่วนที่จมอยู่ในน้ำทะเล อีกทั้งระบบทุ่นและโครงสร้างเสาเหล็กยังต้องรับการกระแทกจากคลื่นทะเลตลอดเวลา ดังนั้น การใช้เครื่องมือวัดโดยทั่วไปจึงมีข้อจำกัดและไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน จึงได้ออกแบบระบบตรวจวัดหาความสูงคลื่นทะเลโดยเฉพาะขึ้นมา โดยใช้วัดการเคลื่อนที่เชิงมุมด้วยตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (variable resistor) ชนิด B ขนาด 5 kΩ ซึ่งสอบเทียบค่ามุมกับไม้โปรแทรกเตอร์ (protractor) ครึ่งวงกลมซึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์จัดเก็บสัญญาณ (Data Acquisition, DAQ) และจัดเก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่เชิงมุมของทุ่นลอยกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังภาพที่ 2 ก่อนทำการทดสอบระบบอุปกรณ์วัดศักยภาพคลื่นทะเลต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดก่อนกับอุปกรณ์วัดค่ามุม โดยนำโรตารีเอนโคดเดอร์ (rotary encoder) ประกอบเข้ากับไม้ครึ่งวงกลมแล้วบันทึกผลเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าเทียบกับค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนที่ของแขนยึดทุ่นลอย โดยตัวต้านทานที่ปรับค่าได้จะติดตั้งอยู่บนจุดหมุนของแขนยึดทุ่นลอย จากนั้นทำการหมุนแขนยึดทุ่นลอยตามองศาตามไม้โปรแทรกเตอร์ ตั้งแต่มุม 0° – 180° โดยทำการเพิ่มมุมทีละ 5° แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับมุมการเคลื่อนที่ เพื่อนำไปใช้สอบเทียบค่าความต้านทานกลับเป็นมุมในช่วงเวลาทดสอบจริง



ภาพที่ 2 อุปกรณ์และระบบการวัดค่าการเคลื่อนที่เชิงมุมกับค่าความต้านทานไฟฟ้า

2. การทดสอบความหนาแน่นของน้ำทะเล

เนื่องจากน้ำทะเลในแต่ละพื้นที่จะมีค่าความหนาแน่นไม่เท่ากัน จึงควรตรวจสอบน้ำทะเลในสถานที่ทำการทดสอบ ณ บริเวณชายฝั่งหาดเจ้าสำราญ อ.เมือง จ.เพชรบุรี โดยใช้เครื่องมือไฮดรอมิเตอร์ชนิดตวง สำหรับหาค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำทะเลที่มีช่วงความละเอียดของการวัดค่าของน้ำทะเล 1.012 – 1.032 แล้วนำไปแทนค่าเพื่อหาค่าความหนาแน่นของน้ำทะเล ดังสมการ (4)

$$\rho = s\rho_w \quad (4)$$

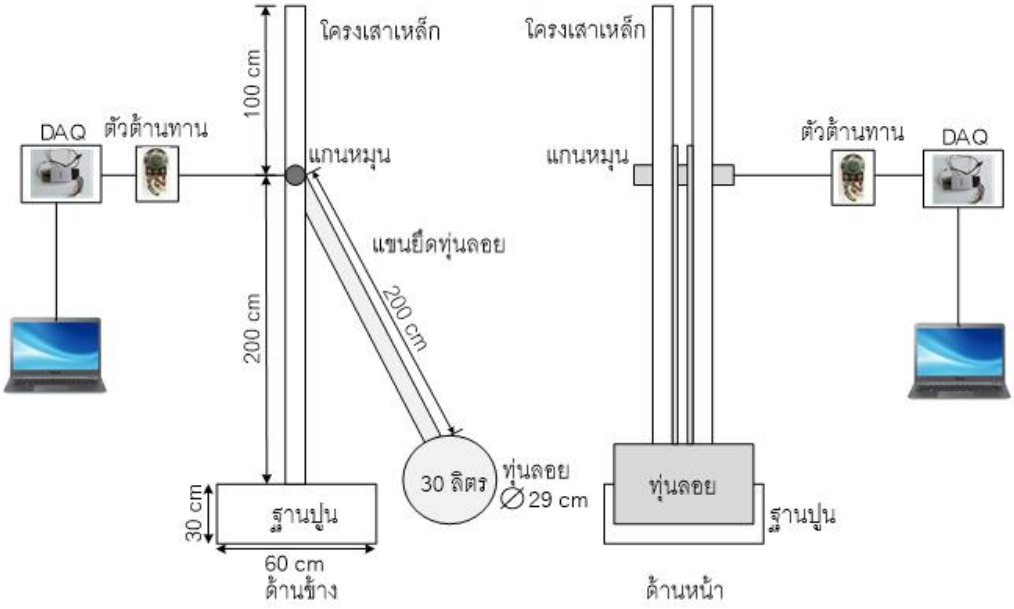
เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำทะเล (kg/m^3)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำ เท่ากับ 1,000 kg/m^3

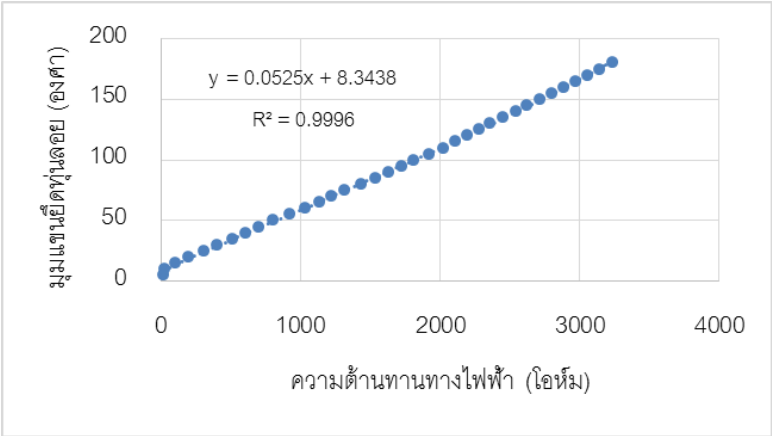
s คือ ความถ่วงจำเพาะ

3. การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบศักยภาพคลื่นทะเล

การออกแบบชุดทดสอบการวัดศักยภาพพลังงานจากคลื่นทะเล เนื่องจากการศึกษาพารามิเตอร์ที่สำคัญของการหาศักยภาพกำลังคลื่นทะเล คือ ความสูงคลื่น และ คาบของคลื่น ดังนั้น งานวิจัยนี้ได้เลือกรูปแบบการถ่ายทอดพลังงานเป็นแบบลอยเคลื่อนที่ตามคลื่นทะเล ดังภาพที่ 3 ซึ่งอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของคลื่นตามแนวดิ่งทำให้เกิดพลังงานศักย์แล้วส่งผ่านพลังงานมาให้กับชุดอุปกรณ์แขนของทุ่นลอยที่เชื่อมต่อกับเพลาตรงฐานยึดเพื่อวัดความสูงของคลื่นและตรวจวัดคาบของคลื่น ทำการทดสอบเก็บค่าทุก 30นาที และช่วงเวลาเก็บค่าเป็นระยะเวลานาน 5 นาที แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ส่วนการหาคาบของคลื่นหาได้โดยการจับเวลาของยอดคลื่นถึงยอดคลื่นอีกลูกหนึ่งที่เคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง โดยอุปกรณ์วัดศักยภาพคลื่นทะเลประกอบด้วย โครงเสาเหล็ก ความสูง 200 cm ทำจากเหล็กแท่งทาสีกันสนิม ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างยึดแขนทุ่นลอย แขนยึดทุ่นลอย ความยาว 200 cm มีหน้าที่ยึดทุ่นลอยแกนหมุนกับแกนหมุน ทุ่นลอยเป็นถังน้ำมันขนาด 30 ลิตร ทำหน้าที่เคลื่อนที่ตามผิวคลื่นทะเลเพื่อนำไปหาค่าความสูงของคลื่นทะเล แกนหมุนเป็นเพลาทำด้วยเหล็กกลมและแบริ่งชนิดบอลแบริ่ง มีหน้าที่หมุนตามแขนยึดทุ่นลอยและต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data logger) เพื่อเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่เชิงมุมของทุ่นลอย และฐานปูนเป็นฐานของโครงสร้างเสาเหล็กและยึดอุปกรณ์ไม่ให้เคลื่อนที่ตามคลื่นทะเล



ภาพที่ 3 อุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์วัดศักยภาพคลื่นทะเล



ภาพที่ 4 กราฟสอบเทียบมุมแขนยึดทุ่นลอยกับความต้านทานทางไฟฟ้า

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการสอบเทียบค่าเครื่องมือวัดมุมการเคลื่อนที่ของแขนยึด

การทดสอบหาค่ากำลังคลื่นทะเลในสถานที่ทดสอบจริงต้องทำการสอบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนยึดทุ่นลอยกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลจะได้ค่าผลการสอบเทียบ ดังภาพที่ 4 เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้กับการทดสอบจริงซึ่งค่าที่วัดได้จะมีค่าเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าแล้วนำมาเทียบกับค่าสอบเทียบเพื่อเปลี่ยนค่าที่ได้เป็นมุมการเคลื่อนที่ของแขนทุ่นลอย

2. ผลการทดสอบความหนาแน่นของน้ำทะเล

ผลการทดสอบความหนาแน่นของน้ำทะเลจากบริเวณชายฝั่งหาดเจ้าสำราญ อ.เมือง จ.เพชรบุรี โดยใช้เครื่องมือไฮดรอมิเตอร์ชนิดตวง พบว่า น้ำทะเลมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 1.025 ซึ่งคิดเป็นค่าความหนาแน่นของน้ำทะเลเท่ากับ 1,025 kg/m^3 นำไปแทนค่าในสมการ (3) และแทนค่า $g = 9.81\ m/s^2$ จะมีค่าดัง สมการ (5)

$$P_T = 1.962\ h^2\ T \quad \text{หน่วย} \quad kW / m \tag{5}$$

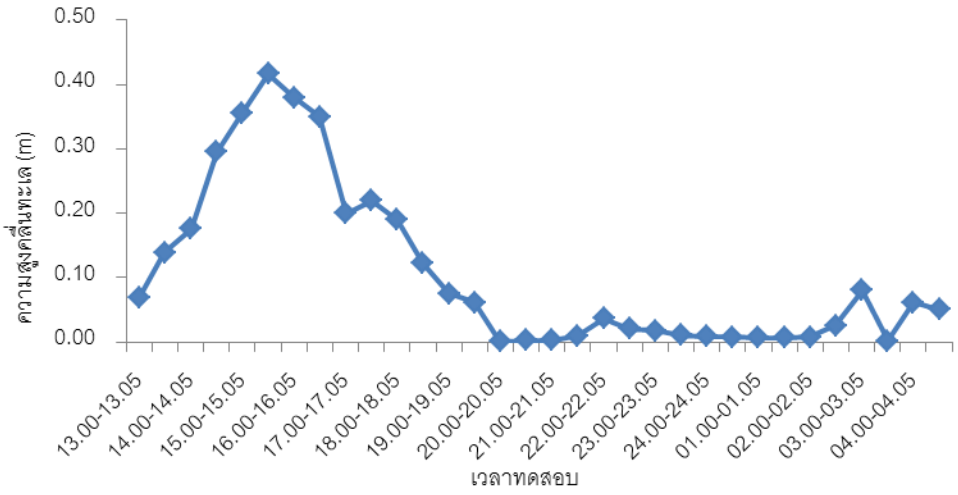
3. ผลการทดสอบการหาศักยภาพพลังงานคลื่นทะเล

จากการออกแบบ สร้างเครื่องมือ และทำการติดตั้ง เพื่อทำการทดสอบหาศักยภาพพลังงานจากคลื่นทะเลบริเวณชายฝั่งทะเล ณ พื้นที่หาดเจ้าสำราญ อ.เมือง จ.เพชรบุรี จะมีลักษณะของอุปกรณ์และสถานที่ทำการทดสอบ ดังภาพที่ 5 ค่าที่ได้จากการทดสอบ ได้แก่ ความสูงคลื่นทะเล คาบของคลื่นทะเล แล้วนำไปแทนค่าหากำลังจากคลื่นทะเล (P_T) ในสมการ (5) โดยได้กำหนดช่วงเวลาทดสอบ ได้แก่ ช่วงเวลาทดสอบในช่วงระยะเวลา 24 ชั่วโมง ช่วงเวลาทดสอบช่วงระยะเวลา 1 สัปดาห์ และช่วงทดสอบช่วงระยะ 1 เดือน ตามลำดับ ซึ่งมีผลการทดสอบดังนี้

ภาพที่ 5 การติดตั้งและทดสอบอุปกรณ์วัดศักยภาพพลังงานคลื่นทะเล

3.1 การทดสอบการหาศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 วัน

ทำการทดสอบในวันที่ 27 ธันวาคม 2558 โดยในช่วงเช้าระดับน้ำทะเลมีระดับสูงเกินความสูงของอุปกรณ์ตรวจวัด จึงสามารถเริ่มทำการทดสอบได้ในเวลา 13.10 น. ทำการทดสอบเก็บค่าความสูงของคลื่นทะเลทุก ๆ 30นาที เป็นระยะเวลานาน 5 นาที จนถึงวันที่ 28 ธันวาคม 2558 เวลา 04.35 น. เนื่องจากหลังจากเวลาดังกล่าวระดับน้ำทะเลต่ำกว่าความยาวของแขนอุปกรณ์ โดยผลการตรวจวัดจะได้เป็นค่าความต้านทานแล้วนำไปสอบเทียบกับสมการจากกราฟสอบเทียบมุมแขนยึดทุ่นลอยกับความต้านทานทางไฟฟ้า ในภาพที่ 4 อุปกรณ์ตรวจวัดจะแสดงค่าความสูงของคลื่นทะเล จากนั้นเฉลี่ยค่าความสูงคลื่นทะเลในช่วง 5 นาที ก็จะได้ค่าความสูงคลื่นทะเลตามช่วงเวลา ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลการทดสอบความสูงคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 วัน ในช่วงวันที่ 27-28 ธันวาคม 2558

จากภาพที่ 6 อุปกรณ์สามารถตรวจวัดค่าความสูงคลื่นทะเลได้ ในช่วงเวลา 13.10- 04.35 น. โดยช่วงเวลา 15.40-15.45 น. มีค่าความสูงคลื่นทะเลสูงสุด เท่ากับ 0.42 m และ คาบของคลื่นทะเล มีค่าเท่ากับ 6.28 วินาที เมื่อนำไปแทนค่าในสมการ (5) จะได้กำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 2.13 kW/m และถ้านำค่ากำลังคลื่นในระยะเวลา 1 วันมาเฉลี่ย พบว่าจะมีความสูงคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.11 m ซึ่งสามารถคำนวณค่ากำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.33 kW/m

3.2 ผลการทดสอบการหาศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลในระยะ 1 สัปดาห์

จากการทดสอบในระยะเวลา 1 วัน พบว่า อุปกรณ์สามารถตรวจวัดความสูงคลื่นทะเลบริเวณทะเลหาดเจ้าสำราญได้สูง ในช่วงเวลา 14.00 – 18.05 น. จึงทำการทดสอบในช่วงเวลาดังกล่าว เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ในระหว่างวันที่ 4 ถึง 10 มกราคม 2559 ซึ่งจากการทดสอบจะได้ค่าคาบของคลื่นทะเลและค่าความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ยในแต่ละวัน แล้วนำมาคำนวณค่ากำลังคลื่นทะเล ดังตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการทดสอบศักยภาพคลื่นทะเล วันที่ 4 มกราคม 2559

ช่วงเวลาทดสอบ	คาบคลื่นทะเล (s) T	ความสูงเฉลี่ยคลื่นทะเล (m) h	กำลังคลื่นทะเล (kW/m) P_w
14.00-14.05	7.68	0.08	0.10
14.30-14.35	7.68	0.12	0.23
15.00-15.05	7.68	0.13	0.25
15.30-15.35	7.68	0.33	1.61
16.00-16.05	7.68	0.34	1.72
16.30-16.35	7.68	0.24	0.85
17.00-17.05	7.68	0.22	0.72
17.30-17.35	7.68	0.25	0.96
18.00-18.05	7.68	0.19	0.55
เฉลี่ย		0.21	0.78

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดสอบศักยภาพคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 สัปดาห์

วันที่ทดสอบ	คาบคลื่นทะเล (s) T	ความสูงคลื่นเฉลี่ยทะเล (m) h	กำลังคลื่นเฉลี่ยทะเล (kW/m) P_w
4/1/59	7.68	0.21	0.78
5/1/59	6.24	0.14	0.28
6/1/59	6.60	0.12	0.21
7/1/59	4.88	0.13	0.20
8/1/59	5.00	0.15	0.23
9/1/59	5.08	0.26	0.74
10/1/59	5.60	0.22	0.57
เฉลี่ย		0.17	0.43

จาก ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลใน วันที่ 4 มกราคม 2559 ซึ่งมีคาบของคลื่นทะเล เท่ากับ 7.68 s และความสูงของคลื่นทะเลในช่วง 0.08 – 0.34 m ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่ากำลังคลื่นทะเลได้ในช่วง 0.10 – 1.72 kW/m ซึ่งคิดเป็นค่าเฉลี่ยกำลังคลื่นทะเล เท่ากับ 0.78 kW/m จากนั้นทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ตั้งแต่ วันที่ 4 ถึง 10 มกราคม 2559 ในช่วงเวลา 14.00 – 18.05 น. ดังตารางที่ 2 พบว่า คาบของคลื่นทะเลในแต่ละวันมีค่าไม่เท่ากัน อยู่ในช่วง 4.88 – 7.68 s และความสูงคลื่นทะเลเฉลี่ยในแต่ละวันก็มีค่าไม่เท่ากัน อยู่ในช่วง 0.12 – 0.26 m ซึ่งสามารถผลิตกำลังคลื่นทะเลได้ในช่วง 0.20 – 0.78 kW/m โดยเฉลี่ยค่าความสูงคลื่นทะเลในระยะ 1 สัปดาห์ เท่ากับ 0.17 m ซึ่งสามารถผลิตกำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย ได้เท่ากับ 0.43 kW/m

3.3 ผลการทดสอบการหาศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 เดือน

ทำการทดสอบหาศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 เดือน ระหว่างวันที่ 7 ถึง 31 มกราคม 2559 โดยทำการทดสอบสัปดาห์ละหนึ่งวันเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ ช่วงเวลาทดสอบ 14.00 – 18.00 น. ของทุกวัน ซึ่งได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบศักยภาพคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 เดือน

วันที่ทดสอบ	คาบคลื่นทะเล (s) T	ความสูงคลื่นทะเลเฉลี่ย (m) h	กำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย (kW/m) P_w
7/1/59	4.88	0.13	0.20
13/1/59	6.96	0.21	0.69
20/1/59	7.68	0.05	0.05
31/1/59	5.56	0.26	0.74
เฉลี่ย		0.16	0.42

จากตารางที่ 3 แสดงผลการทดลองศักยภาพกำลังคลื่นทะเลในระยะเวลา 1 เดือน พบว่า ในแต่ละวันมีคาบของคลื่นทะเลบริเวณชายฝั่งทะเลหาดเจ้าสำราญ จ.เพชรบุรี มีค่าไม่เท่ากัน อยู่ในช่วง 4.88 - 7.68 วินาที สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 0.05 – 0.74 kW/m โดยเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่า กำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.16 m และกำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.42 kW/m

4. วิจารณ์ผล

เนื่องจากรูปแบบของคลื่นทะเลในสภาพทะเลจริงมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น การนำสมการของคลื่นรูปซายน์แบบสมบูรณ์มาใช้ในการคำนวณในการทดลองนี้จึงมีผลการคำนวณค่ากำลังคลื่นทะเลจะมีค่าคลาดเคลื่อน จึงควรหาวิธีอื่นในการคำนวณให้ได้ผลใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นหรือออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถตรวจวัดค่าได้แม่นยำมากขึ้นหรือทดสอบในอุปกรณ์ควบคุมความสูงคลื่นได้

จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดศักยภาพคลื่นทะเล พบว่า ผลการทดสอบของความสูงคลื่นทะเลของบริเวณทะเลหาดเจ้าสำราญมีค่าไม่มาก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากช่วงเวลาที่ทำการทดสอบระหว่างวันที่ 29 ธันวาคม 2558 ถึง 31 มกราคม 2559 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ทะเลบริเวณหาดเจ้าสำราญ จ.เพชรบุรี มีลมค่อนข้างสงบ ทำให้เกิดคลื่นทะเลที่มีความสูงไม่มาก ส่งผลให้ค่ากำลังคลื่นทะเลมีค่าไม่มากตามไปด้วย ดังนั้น การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ควรระวังว่าเป็นค่าเฉพาะช่วงเวลาเท่านั้น เนื่องจากงบประมาณในการทำวิจัยไม่สูงมากประกอบกับเป็นการศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดศักยภาพคลื่นทะเลเป็นสำคัญ

ในช่วงการทดสอบมีระยะไม่ครอบคลุมตลอดทั้งปี ทำให้ไม่สามารถประเมินศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลเพื่อการผลิตไฟฟ้าได้ตลอดทั้งปี เนื่องจากปัญหาด้านวัสดุโครงสร้างของอุปกรณ์ส่วนใหญ่เป็นเหล็กซึ่งไม่ทนต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล ทำให้เมื่อทำการทดสอบไปประมาณ 2 เดือน อุปกรณ์ในส่วนที่แช่อยู่ในน้ำทะเลเริ่มชำรุดเสียหาย ดังนั้น ถ้าต้องการเพิ่มระยะเวลาการทดสอบให้ครอบคลุมตลอดทั้งปี ควรเลือกวัสดุที่นำมาใช้สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดศักยภาพคลื่นทะเลสามารถทนการกัดกร่อนน้ำทะเลได้

คาบของคลื่นทะเลที่ทำการตรวจวัดมีไม่เท่ากันในแต่ละวัน อยู่ในช่วง 4.88 – 7.68 s ซึ่งเป็นผลเนื่องจากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอยู่ใกล้ชายฝั่งมาก ทำให้ในแต่ละช่วงเวลาที่น้ำทะเลขึ้นหรือลงจะส่งผลต่อคาบของคลื่นทะเลอย่างมาก

ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลทำให้บางช่วงเวลาไม่สามารถตรวจวัดค่าความสูงของคลื่นทะเลได้เนื่องจากระดับน้ำทะเลไม่สูงเพียงพอ จึงควรกำหนดจุดติดตั้งอุปกรณ์ให้สามารถวัดค่าได้ตลอดทั้งวัน

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเครื่องมือวัดศักยภาพพลังงานคลื่นทะเลเพื่อการผลิตพลังงานบริเวณชายทะเลหาดเจ้าสำราญ จ.เพชรบุรี จากการศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกำลังคลื่นทะเลในสมการคลื่นรูปซายน์แบบสมบูรณ์ ได้แก่ คาบของคลื่นทะเล และความสูงของคลื่นทะเล จึงได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดศักยภาพกำลังคลื่นทะเลในสถานที่ จากการตรวจวัดคาบของคลื่นทะเล พบว่า ในแต่ละวันมีค่าคาบของคลื่นทะเลไม่เท่ากัน โดยอยู่ในช่วง 4.88 – 7.68 s ซึ่งเป็นผลเนื่องจากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอยู่ใกล้ชายฝั่งมากทำให้ในแต่ละช่วงเวลาที่น้ำทะเลขึ้นหรือลงจะส่งผลต่อคาบของคลื่นทะเลอย่างมาก และจากการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดศักยภาพกำลังคลื่นทะเลโดยใช้ทุ่นลอยเป็นอุปกรณ์รับแรงจากคลื่นทะเลและถ่ายทอดกำลังผ่านก้านต่อโยงให้กับกลไกซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นให้เป็นเชิงมุม โดยทดสอบในช่วง วันที่ 27-28 ธันวาคม 2558 ดังภาพที่ 1 เป็นการทดสอบในระยะเวลา 1 วัน ในช่วงเวลาประมาณ 13.00 – 20.00 น. พบว่า อุปกรณ์สามารถตรวจวัดความสูงคลื่นทะเลบริเวณทะเลหาดเจ้าสำราญได้สูง ในช่วงเวลา 14.00-18.05 น. จึงทำการทดสอบในช่วงเวลาดังกล่าว เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ในระหว่างวันที่ 4 ถึง 10 มกราคม 2559 ดังตารางที่ 2 พบว่า ค่าความสูงเฉลี่ยคลื่นทะเล เท่ากับ 0.17 m ซึ่งสามารถผลิตกำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย ได้เท่ากับ 0.43 kW/m และทำการทดสอบหาศักยภาพพลังงานคลื่น

ทะเลในระยะเวลา 1 เดือน ระหว่างวันที่ 7 ถึง 31 มกราคม 2559 ดังตารางที่ 3 พบว่า สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในช่วง 0.05-0.74 kW/m โดยเมื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่า กำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.16 m และกำลังคลื่นทะเลเฉลี่ย เท่ากับ 0.42 kW/m

จังหวัดเพชรบุรีเป็นจังหวัดที่ติดกับทะเลฝั่งอ่าวไทย มีระยะทางตลอดแนวชายฝั่งรวม 93,285 m (Sarajit & Nakhapakorn, 2014) จากผลการทดสอบกำลังคลื่นเฉลี่ยในระยะเวลาที่ทำการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.47 kW/m พบว่า อุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังจากคลื่นทะเลหนึ่งกลไกจะสามารถผลิตกำลังได้ 43,843 kW อย่างไรก็ตาม ถ้าคลื่นทะเลมีความสูงมากขึ้น คาบของคลื่นทะเลมีค่ามากขึ้น และอุปกรณ์การแปลงกำลังคลื่นมีประสิทธิภาพมากขึ้น ก็จะส่งผลทำให้คลื่นทะเลมีศักยภาพการผลิตกำลังคลื่นทะเลมากขึ้น ซึ่งสามารถพัฒนาพลังงานคลื่นทะเลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพของประเทศไทยได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี และได้รับความอนุเคราะห์สถานที่ทำการทดสอบและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจาก เทศบาลตำบลหาดเจ้าสำราญ อ.เมือง จ.เพชรบุรี และกรมอุตุนิยมวิทยา จ.เพชรบุรี

เอกสารอ้างอิง

Buccino, M., Stagonas, D., & Vicinanza, D. (2015). Development of a composite sea wall wave energy converter system. *Renewable Energy*, *81*, 509-522.

Chiba, S., Waki, M., Wada, T., Hirakawa, Y., Masuda, K., & Ikoma, T. (2013). Consistent ocean wave energy harvesting using electroactive polymer (dielectric elastomer) artificial muscle generators, *Applied Energy*, *104*, 497-502.

Cordonnier, J., Gorintin, F., Cagny, A.D., Clement, A.H., and Babarit, A. (2015). SEAREV: Case study of the development of a wave energy converter, *Renewable Energy*, *80*, 40-52.

Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction, *Marine Structures*, *20*, 185-201.

López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Alegría, I.M., and Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *27*, 413–434.

Mirzaei, A., Tangang, F., & Juneng, L. (2014). Wave energy potential along the east coast of Peninsular Malaysia. *Energy*, *68*, 722-734.

Tester, J.W., Drake, E.M., Golay, M.W., Driscoll, M.J., & Peters, W.A. (2005). *Sustainable Energy Choosing Among Options*. United States of America: The MIT Press.Interior.

Thai Marine Meteorological Center. (2557). *Ocean Wave Energy.* Retrieved May 4, 2014, from http://www.marine.tmd.go.th

Ministry of Energy. (2011). Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021). Retrieved October 17, 2012, from http://www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf

Phomkaeo, K., & Punyasompun, S. (2013). Study of Electric Power Generation from Coast Waves. *Princess of Naradhiwas University Journal, 5*(3), 37-46.

Prattanaruk, C., Sagulpongmalee, K., Intanin, J., & Arunsawat, C. (2015). Efficiency Improvement in Electrical Generation with Oscillation Phase Shift of Onshore Power Buoy. *The 8th Thailand Renewable Energy for Community Conference*. (pp. 331-334).

Jangsawang, W., (2010). *Renewable Energy* ((2nd ed.). Bangkok: Chulalongkorn Universtiy Press.

Sarajit ,O., & Nakhapakorn, K. (2014). Geo-information Application for Coastal Erosion Situation, Phetchaburi Province. *Journal of Science and Technology*, *6*, 789-800.