

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กแรงสูง สำหรับกังหันลมขนาดเล็ก

The Development of Low-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) For Small-Scale Wind Turbine

ชัยนุสนธิ์ เกษตรพงศ์ศาล^{1*} กานต์ธิดา บุญมา² และมนตรี สุขเลี้ยง³
Chainuson Kasagepongsarn^{1*}, Kantida Boonma² and Montri Suklueng³

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสความเร็วรอบต่ำชนิดโรเตอร์แม่เหล็กถาวร สำหรับใช้กับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก ทำงานได้ที่ความเร็วรอบการหมุนต่ำ ประสิทธิภาพสูง และมีโครงสร้างขนาดเล็ก ผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 1,500 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ประสิทธิภาพร้อยละ 77.84 ความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่กระแสฟักซ์ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส (THD_v%) และกระแสไฟฟ้า (THD_A%) ที่กระแสไฟฟ้า (6A) เท่ากับร้อยละ 1.7 และร้อยละ 1.9 ตามลำดับ ผลจากการทดลองสามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ไปใช้เป็นเครื่องต้นกำลังของระบบกังหันลมความเร็วรอบต่ำเพื่อผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ว่าวัสดุแม่เหล็กมีราคาสูงมากแต่การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถลดเข้ขึ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ ให้น้อยลงจึงทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้มีข้อได้เปรียบด้านราคา โดยเฉพาะในกรณีที่มีการผลิตวัสดุแม่เหล็กเป็นจำนวนมากส่งผลต่อราคาวัสดุแม่เหล็กมีราคาต่ำลง

คำสำคัญ: แม่เหล็กแรงสูง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสชนิดแม่เหล็กถาวรความเร็วรอบต่ำ กังหันลมผลิตไฟฟ้า

¹ อ., หน่วยวิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน (REERCU) มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี 84000

² อ., สาขาวิชาการจัดการภัยพิบัติ คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี 84000

³ อ.ดร., สถาบันวิจัยระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (PERIN) วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90110

¹ Lecturer., Renewable Energy and Environment Research for Local Community Unit (REERCU) Suratthani Rajabhat University, Surat Thani, 84000

² Lecturer., Department of Disaster Management Faculty of Science and Technology Suratthani Rajabhat University, Surat Thani, 84000

³ Dr., PSU Energy System Research Institute (PERIN), Prince of Songkla University, Hatyai Campus, Songkhla, 90110

* Corresponding author: E-mail address: chainuson.kas@sru.ac.th

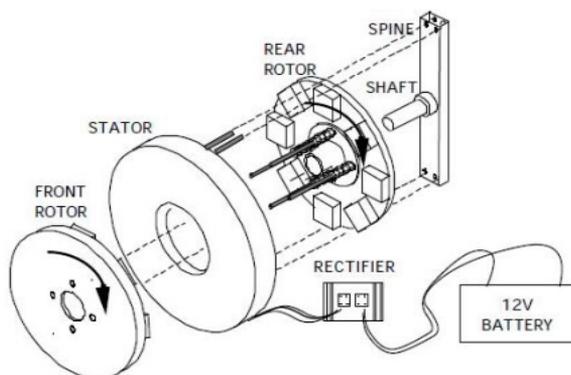
Abstract

The objective of this research is to develop low-speed permanent magnet synchronous generators (PMSG) based on small-scale wind turbine application, low-speed operation, high performance and a small structure size. The results show that maximum power of generator is 1.5 kW, at a synchronous speed of 500 rpm with a frequency of 50.00 Hz and efficiency of 77.84%. The harmonic distortion of total harmonic voltage distortion limits (THDv%) and total harmonic current distortion limits (THDA%) at electrical load 6 A, indicated 1.7% and 1.9%, respectively. Therefore, this study shows the generators of wind turbine power plant give a high efficiency. Although high performance permanent-magnets have a high cost, but a few component the construction PMSG can be compensated in parts of generator. Thus, the PMSG have a low cost when a material will be fabricated in mass production.

Keywords: Permanent Magnet Generator (PMG), Low Speed Synchronous Generator (PMSG), Wind Turbine Generator

บทนำ

ในอนาคตปัญหาเรื่องราคาพลังงาน การแข่งขันทรัพยากรพลังงานระหว่างประเทศและปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลพวงของการผลิตและการใช้พลังงานกำลังสร้างปัญหาอย่างทวีคูณ แนวโน้มทางด้านพลังงานที่สำคัญคือการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) จากแหล่งพลังงานสะอาด (Clean Energy) ใช้สะดวกมีประสิทธิภาพ [1] ตามหลักปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงในการจัดการพลังงาน โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของการพึ่งพาพลังงานจากแหล่งพลังงานที่เหมาะสมในท้องถิ่นหรือภายในประเทศให้สามารถผลิตและใช้งานได้ อย่างยั่งยืน [2] โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานลมตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี ในแผนปฏิบัติการพัฒนาพลังงานลม (Wind Energy Action Plan) โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน [3] จากรายงานวิจัยศักยภาพพลังงานลมตามแนวชายฝั่งทะเลอ่าวไทยบริเวณภาคใต้ตอนกลางของประเทศไทยในรอบปี พ.ศ. 2551-2553 พบว่าความเร็วลมเฉลี่ยรายปีมีค่าประมาณ 2.8-5.2 เมตรต่อวินาที ที่ระดับความสูง 50 เมตร [4] ซึ่งเป็นระดับความสูงของกังหันลมขนาดใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูง จากรายงานความสามารถกำลังลมของ World Bank ได้ประเมินศักยภาพพลังงานลมในพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ กัมพูชา ลาว ไทย และเวียดนาม พบว่าประเทศไทยมีความเหมาะสมกับกังหันลมขนาดเล็ก ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง ติดตั้งได้ในระดับความสูงไม่เกิน 30 เมตร [5]



ภาพที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ AFPM ที่ออกแบบโดย Hugh Piggott และมีการเผยแพร่จากอินเทอร์เน็ต [6]

ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในลักษณะ Home Made โดยอาศัยความรู้ต่างๆ จากอินเทอร์เน็ต สร้างกังหันลมขนาดเล็กขึ้นใช้เอง โดยสร้างใบพัดจากไม้และสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรแนวแกน (AFPM) [6] ประกอบเป็นกังหันลมขนาดเล็กได้อย่างครบวงจรดังภาพที่ 1 ต่อมามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้ทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ AFPM พบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ ยากกำลังไฟฟ้าได้ต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพต่อปริมาตรต่ำ [7]

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของบทความวิจัยนี้ คือการพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสความเร็วรอบต่ำ โรเตอร์แม่เหล็กถาวร (Permanent-Magnet Synchronous Generator; PMSG) แบบ 3 เฟส ทำงานได้ที่ความเร็วรอบการหมุนต่ำ ประสิทธิภาพสูง เหมาะสมกับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กเพื่อผลิตในประเทศ เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากต่างประเทศที่มีราคาสูงมาก

การพัฒนาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำหรับกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก

1. ความเร็วเชิงโรตัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเชิงโรตัสชนิดแม่เหล็กแรงสูงนิยมใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของกังหันลมขนาดเล็กเนื่องจากสร้างได้ง่าย ทำงานที่ความเร็วรอบต่ำไม่ต้องการชุดเกียร์ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอกในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีความสูญเสียที่ทองแดงสำหรับชุดขดลวดสนามเนื่องจากสามารถผลิตสนามแม่เหล็กได้เองจากแม่เหล็กถาวรที่มีความเข้มสนามสูงมาก ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงแต่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้มาก [8] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กตามหลักการของไมเคิลฟาราเดย์ (Faraday's law) ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กขึ้นกับเวลา [9] แสดงดังสมการที่ (1)

$$E = \frac{dq}{dt} \quad (1)$$

จำนวนขั้วแม่เหล็กและความเร็วรอบของโรเตอร์จะมีผลต่อค่าความถี่ของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2) กำหนดให้ P คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก θ_c เป็นมุมทางไฟฟ้าและ θ_m เป็นมุมทางกลที่มีการเปลี่ยนแปลงในหน่วยของเรเดียนต่ออนาที แสดงดังสมการที่ (3)

$$\theta_c = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2)$$

$$\frac{\theta_c}{2\pi \times 60} = \frac{P}{2} \cdot \frac{\theta_m}{2\pi \times 60} \quad (3)$$

เมื่อ $\theta_c/2\pi \times 60$ คือ ความถี่ (f) และ $\theta_m/2\pi$ คือ ความเร็วเชิงโรตัส (N_s) ดังสมการที่ (4)

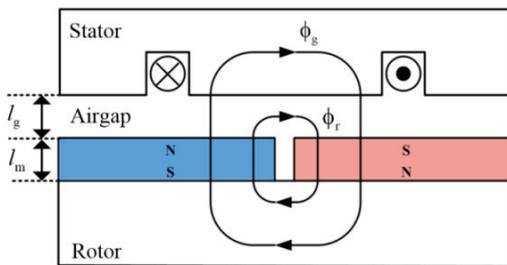
$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (4)$$

สมการที่ (4) แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นๆ อยู่กับค่าสนามแม่เหล็กของขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่เชิงโรตัส และจำนวนขั้วแม่เหล็กที่โรเตอร์ ในทำนองเดียวกันค่าความเร็วเชิงโรตัส สามารถกำหนดได้โดยค่าความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและจำนวนขั้วแม่เหล็ก [10]

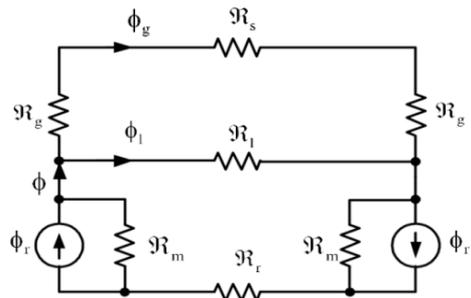
2. การออกแบบและโครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การออกแบบเริ่มต้นด้วยการกำหนดข้อมูลวัสดุแม่เหล็กตัวนำเหล็ก จำนวนคู่ของขั้วแม่เหล็ก (Pole Pairs;P) และจำนวนร่องสลอต/เฟส/ขั้วแม่เหล็ก (Slot/Phase/Pole) แบบของโรเตอร์สำหรับขั้วแม่เหล็กแรงสูง มีลักษณะพื้นผิวโค้งตามแกน (Surface Mounted Permanent Magnet; SMPM) [11] ซึ่งส่งผลต่อเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux) ให้เดินทางตามแนวรัศมี (Radial Flux Permanent Magnet; RFPM) ของสเตเตอร์ซึ่งส่งผลต่อแรงต้านการบิดขณะเริ่มหมุน [12-13] แสดงดังภาพที่ 2

เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศ (Φ_g) พิจารณาจากวงจรแม่เหล็กสมมูลของแม่เหล็กถาวรดังภาพที่ 3 โดยไม่นำค่าความต้านในแกนเหล็กโรเตอร์ (\mathfrak{R}_r) และค่าความต้านทานในแกนเหล็กสเตเตอร์ (\mathfrak{R}_s) มาคำนวณ เนื่องจากค่าความต้านทานของแกนเหล็ก $\mathfrak{R}_r + \mathfrak{R}_s$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานในช่องว่างอากาศ (\mathfrak{R}_g) ซึ่งถูกกำหนดโดยค่าตัวประกอบความต้านทาน (Reluctance Factor; K_r) [14] ดังสมการที่ (5) [15]



ภาพที่ 2 ไดอะแกรมแสดงเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กตามแนวรัศมีของสเตเตอร์



ภาพที่ 3 วงจรแม่เหล็กสมมูล

$$\Phi_g = \frac{\Phi_r 2\mathfrak{R}_m}{2\mathfrak{R}_m + 2\mathfrak{R}_g + \mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_r} = \frac{\Phi_r 2\mathfrak{R}_m}{2\mathfrak{R}_m + 2K_r\mathfrak{R}_g} = \frac{\Phi_r}{1 + K_r \frac{\mathfrak{R}_g}{\mathfrak{R}_m}} \quad (5)$$

ความสามารถต้านทานค่าการลบสิ่งสภาพแม่เหล็ก (Demagnetization) สามารถวิเคราะห์ได้จากสัมประสิทธิ์ความนำแม่เหล็ก (Permeance Coefficient, P_c) ซึ่งแทนความชันด้วยเส้นช่องว่างอากาศ (Air Gapline) ในเส้นโค้งความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็นฟังก์ชันของความเข้มสนามแม่เหล็ก (B-H Curve) [16] แสดงดังสมการที่ (6)

$$P_c = \frac{l_m A_g}{l_g A_m} \quad (6)$$

เมื่อกำหนดให้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก \mathfrak{R}_m และค่าความต้านทานในช่องว่างอากาศ \mathfrak{R}_g แสดงดังสมการที่ (7)-(8) ตามลำดับ

$$\mathfrak{R}_m = \frac{l_m}{\mu_o \mu_r A_m} \quad (7)$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_o A_g} \quad (8)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (7) และ (8) ในสมการที่ (5) ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กที่ผ่านช่องว่างอากาศ (Φ_g) ได้ดังสมการที่ (9)

$$\Phi_g = \frac{\Phi_r}{1 + K_r \frac{l_g A_m}{l_m A_g} \mu_r} \quad (9)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศ (B_g) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (10)

$$B_g = \frac{B_r}{1 + K_r \mu_r \frac{l_g}{l_m}} \quad (10)$$

ความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศสามารถนำมาคำนวณผลกระทบจากแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, mmf) ที่มีสาเหตุจากการกระจายของแรงเคลื่อนแม่เหล็กบนสเตเตอร์เป็นฟังก์ชันไซน์ซอซด์ (Sinusoids) ที่เป็นสัญญาณรายคาบ (Periodic Signal) มีขนาด (Amplitude) เปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบฟังก์ชันไซน์ (Sine) ของกระแสจากสเตเตอร์และสามารถคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำในหนึ่งเฟสได้จากสมการที่ (11)

$$E_{rms} = 4.44fN_{ph} \cdot k_w \frac{\Phi_r}{1 + K_r \frac{\mu_r}{P_c}} \quad (11)$$

การพันขดลวดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบกระจายดังนั้นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induce emf) ต้องคูณด้วยค่าแฟกเตอร์การพันขดลวด (k_w) สมการที่ (12) ซึ่งประกอบด้วยค่าแฟกเตอร์การพันกระจายขดลวด (k_d) สมการที่ (13) และพิทซ์แฟกเตอร์ (k_p) สมการที่ (14)

$$k_w = k_d k_p \quad (12)$$

$$k_d = \sin\left(\frac{\sigma}{2}\right) / g \sin\left(\frac{\sigma}{2g}\right) \quad (13)$$

$$k_p = \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \quad (14)$$

ประสิทธิภาพ (Effency; η) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแสดงการคำนวณในสมการที่ (15)

$$\text{Effency} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (15)$$

การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีความเร็วรอบต่ำ

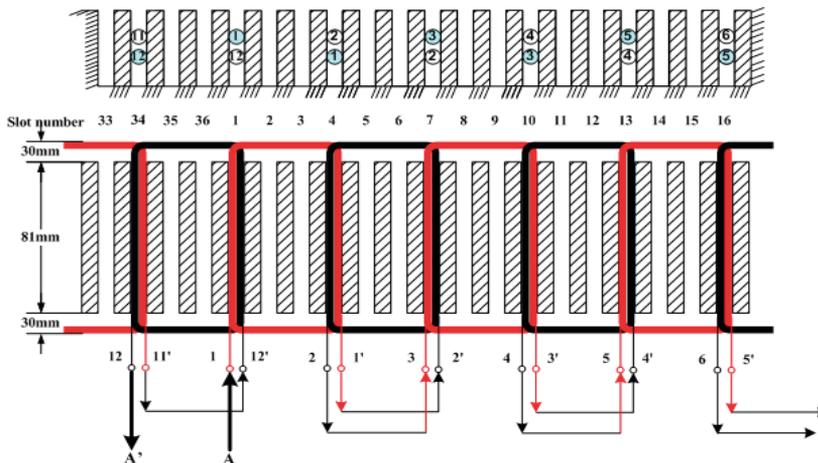
1. สเตเตอร์และการพันขดลวดในสเตเตอร์

สเตเตอร์คือส่วนที่ยึดกับโครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีชุดขดลวดเพื่อรับการเหนี่ยวนำจากเส้นแรงแม่เหล็กของโรเตอร์ ผลิตจากแผ่นเหล็กซิลิกอนหนา 0.5 มิลลิเมตร เพื่อลดการสูญเสียจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ภายในแกนเหล็ก ซึ่งส่งผลต่อความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นระหว่างแผ่นเหล็กจะมีฉนวนเคลือบ [17] และเพื่อลดแรงต้านการบิดขณะเริ่มหมุน การขึ้นรูปสเตเตอร์จะบิดร่องสลอตให้มีมุมเอียงเท่ากับหนึ่งร่องสลอต [18] ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผ่นเหล็กซิลิกอนและสเตเตอร์ที่บิดร่องสลอต

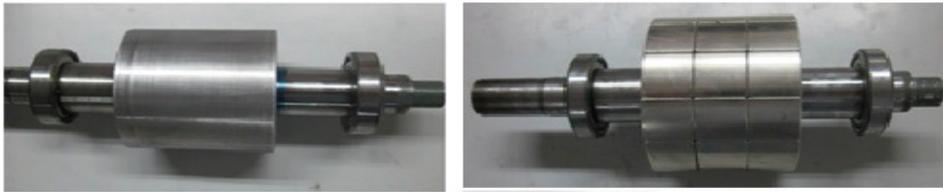
เพื่อให้เกิดความเป็นฉนวนระหว่างแผ่นเหล็กซิลิกอนกับขดลวดทองแดงและป้องกันขดลวดทองแดงลวดกวด ดังนั้นการพันขดลวดจำเป็นต้องร่องแผ่นไมก้าในร่องสลอตเสมอ ซึ่งลักษณะการพันขดลวดจะเป็นการพันแบบเต็มพิทช์ (Full Pitch) ในลักษณะซ้อนทับ (Lap) ตามจำนวนร่องต่อหนึ่งขั้วต่อหนึ่งเฟส (Slots per Pole per Phase, SPP) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แบบการพันขดลวดในสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารีความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร

2. โรเตอร์และการติดแม่เหล็กบนโรเตอร์

โรเตอร์เป็นส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็ก และหมุนอยู่แกนกลางของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยสามารถรับแรงบิดหรือพลังงานกลผ่านแกนเหล็กที่เชื่อมต่อกับต้นกำลัง ขึ้นรูปด้วยแผ่นเหล็กชนิดเดียวกับสเตเตอร์แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โรเตอร์และการติดแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์

3. การประกอบโรเตอร์กับโครงสเตเตอร์

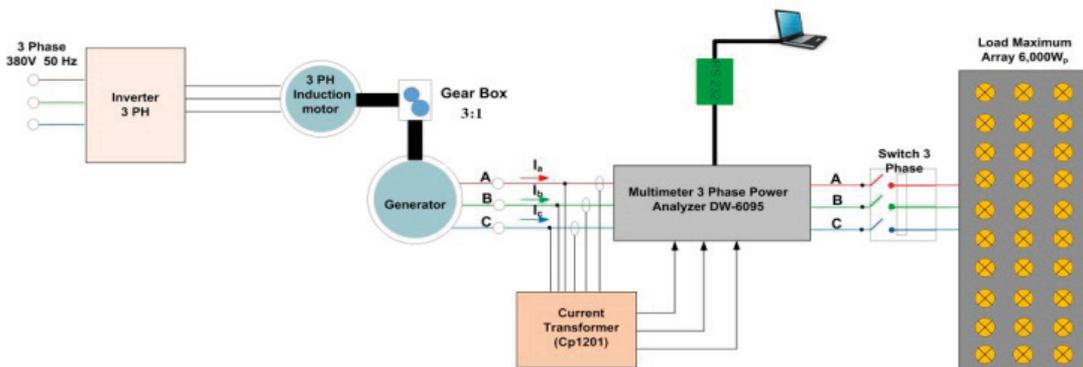
การประกอบโรเตอร์กับโครงสเตเตอร์ โดยการสวมแกนเหล็กโรเตอร์ในสเตเตอร์จากนั้นปิดฝาครอบหน้า-หลัง ใช้นอตยาวร้อยผ่านโครงหุ้มผ่านฝาครอบหน้า-หลัง แล้วใช้ไขควงขันแสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ภาพที่ 8 แสดงไดอะแกรมการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การหมุนถูกควบคุมโดยมอเตอร์ไฟฟ้าระหว่างมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชื่อมต่อเกียร์ทดรอบด้วยขอย (Coupling) ปรับความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์ วิเคราะห์พลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่อง Power Analyzer DW-6095 โดยใช้คลิปแอมป์ Cp1201 คล้องสายไฟของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในแต่ละเฟสผ่านการเชื่อมต่อข้อมูลสัญญาณพอร์ต (USB) กับคอมพิวเตอร์ ประกอบด้วยการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าในขณะที่เปิดวงจร (OCC curve) และในขณะที่มีการทางไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่างๆ



ภาพที่ 8 ไดอะแกรมที่ใช้ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ผลการทดลอง

1. ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัทความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร

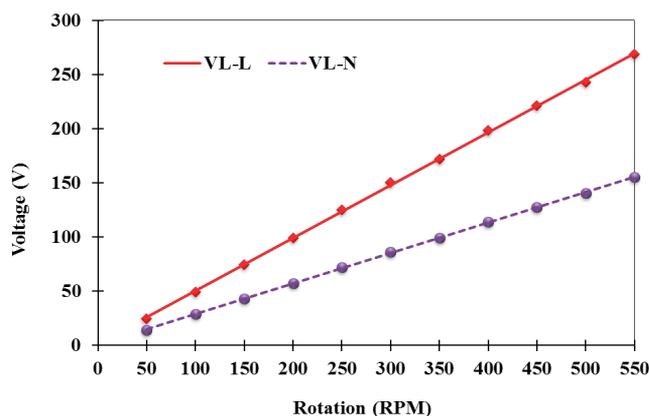
ผลการทดลองวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัทความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับกังหันลมขนาดเล็คประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัทความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กถาวร

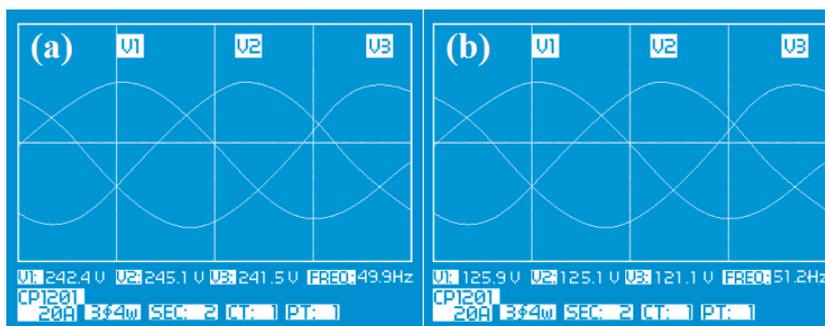
ลำดับ	ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
1	ชนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	เชิงโรตัทชนิดแม่เหล็กถาวร
2	ขนาดของขดลวด	SWG#22
3	จำนวนเฟส	3 เฟส
4	จำนวนขั้วแม่เหล็ก	12 ขั้ว
5	จำนวนรอบของขดลวดต่อสล็อต	40 รอบ/สล็อต
6	จำนวนรอบของขดลวดต่อเฟส	480 รอบ/เฟส
7	ความต้านทานขดลวดเฟส A	6.29 Ω /เฟส
8	ความต้านทานขดลวดเฟส B	6.00 Ω /เฟส
9	ความต้านทานขดลวดเฟส C	6.02 Ω /เฟส
10	ความเหนี่ยวนำขดลวดเฟส A	21.0 mH/เฟส
11	ความเหนี่ยวนำขดลวดเฟส B	21.9 mH/เฟส
12	ความเหนี่ยวนำขดลวดเฟส C	21.4 mH/เฟส

2. การทดสอบแรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจร

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าในขณะเปิดวงจรได้แก่การทดสอบแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส (V_{L-L}) และสามเฟสเทียบนิวตรอน (V_{L-N}) ที่ความเร็วรอบ 3 ระดับ ได้แก่ ความเร็วต่ำกว่า ความเร็วเท่ากับ และความเร็วมากกว่าความเร็วเชิงโรตัทแสดงให้เห็นชัดเจนว่าแรงดันไฟฟ้าแปรผันอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเร็วรอบการหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [18] ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กราฟแรงดันไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับรอบการหมุน



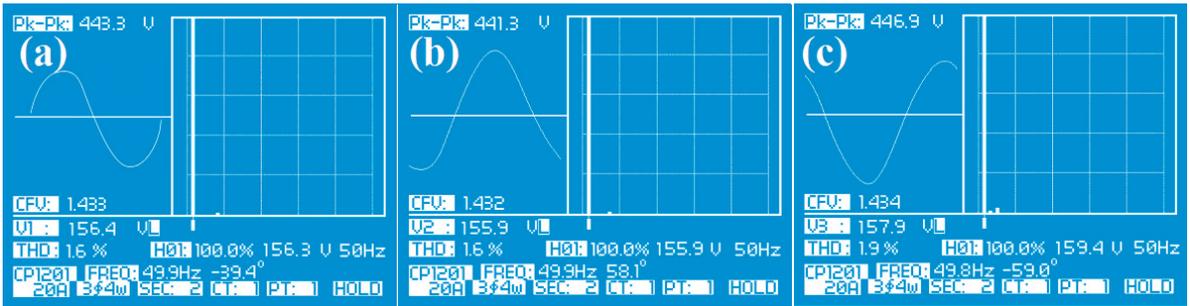
ภาพที่ 10 สัญญาณคลื่นไซน์ในขณะเปิดวงจรของแรงดันไฟฟ้าทั้ง 2 แบบ

3. การทดสอบสัญญาณคลื่นไซน์

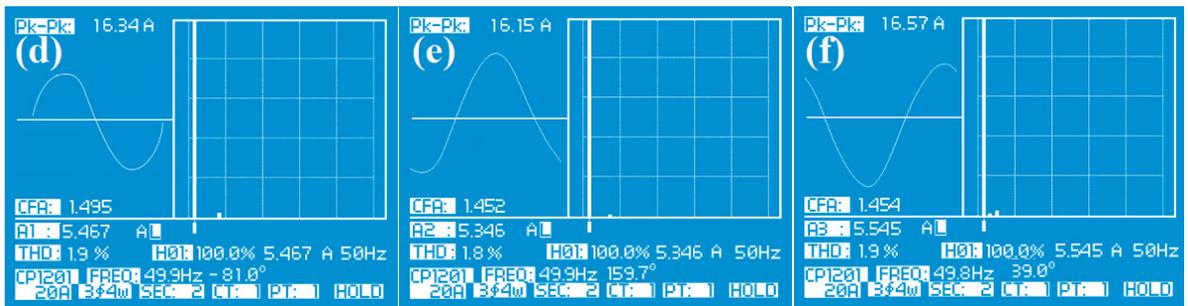
การทดสอบสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส และสามเฟสเทียบนิวตรอนที่ความเร็วเชิงโรนัส 500 รอบต่อนาที ในขณะเปิดวงจร พบว่าได้สัญญาณคลื่นไซน์แบบเต็มคลื่น (Full Waver) มีค่าเฉลี่ย 243 โวลต์ ความถี่ 49.99 เฮิรตซ์ ภาพที่ 10(a) และ 140.53 โวลต์ ความถี่ 51.12 เฮิรตซ์ ภาพที่ 10(b) ตามลำดับ

4. การทดสอบขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิกขณะมีภาระทางไฟฟ้าที่กระแสพิคก

สัญญาณฮาร์มอนิกเป็นส่วนประกอบของคลื่นไซน์ที่มีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่มูลฐานตามมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีขีดจำกัดความเพี้ยนฮาร์มอนิก (THD%) ไม่เกินร้อยละ 5 ที่แรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อรวม 0.4 กิโลโวลต์ [19] ผลการทดลองพบว่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟสเท่ากับร้อยละ 1.6, 1.6 และ 1.9 ดังภาพที่ 11(a), 11(b) และ 11(c) ตามลำดับ และค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้ามียุ่ค่าเท่ากับร้อยละ 1.9, 1.8 และ 1.9 ดังภาพที่ 12(d), 12(e) และ 12(f) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกในแต่ละเฟสมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1.7 และร้อยละ 1.9 ตามลำดับ



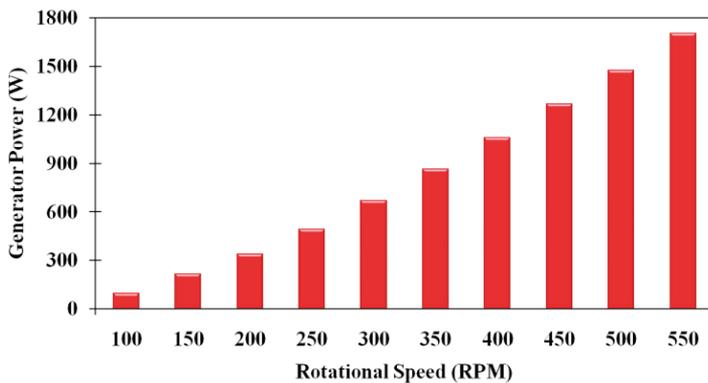
ภาพที่ 11 สัญญาณฮาร์มอนิกในขณะที่มีการะทางไฟฟ้าของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสเทียบสามเฟส



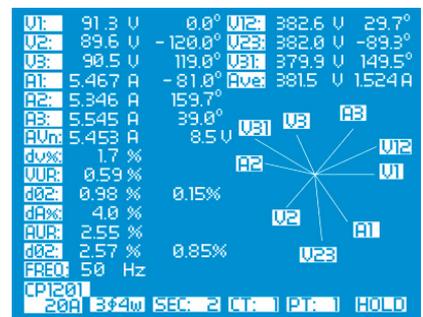
ภาพที่ 12 สัญญาณฮาร์มอนิกในขณะที่มีการะทางไฟฟ้าของกระแสไฟฟ้า

5. การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่างๆ และมุมเฟสแสดงเวกเตอร์แรงดันและกระแสไฟฟ้า

การทดสอบพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบต่างๆ เพื่อหาจุดที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจ่ายพลังงานได้สูงสุดโดยนำค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีค่ากระแสไฟฟ้าไม่เกิน 6 แอมแปร์ สำหรับสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับความเร็วรอบการหมุนภาพที่ 13 ผลการทดสอบพบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 1,500 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่ออนาที ประสิทธิภาพร้อยละ 77.84 การทดสอบมุมเฟสแสดงเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า พบว่ามุมเฟสแสดงเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามักมีค่ามุมต่างกันเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้า ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ดังภาพที่ 14



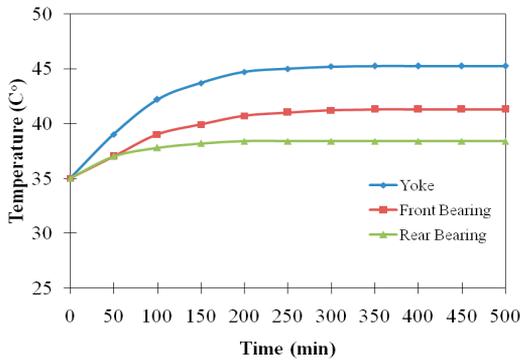
ภาพที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า เป็นฟังก์ชันของความเร็วรอบการหมุน



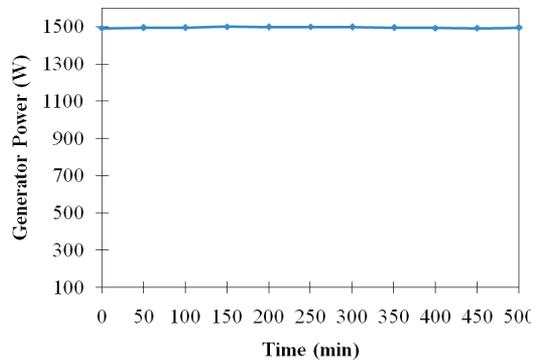
ภาพที่ 14 มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

6. การทดสอบความทนทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดสอบความทนทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประกอบด้วย การทดสอบความสามารถในการระบายความร้อน และการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระยะยาว โดยทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที ที่ภาระทางไฟฟ้าเต็มพิกัด เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อใช้ในการพิจารณาความทนทานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



ภาพที่ 15 กราฟแสดงอุณหภูมิกับเวลา



ภาพที่ 16 กราฟแสดงกำลังไฟฟ้ากับเวลา

ภาพที่ 15 แสดงผลการทดลองวัดอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 34.8 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 150 นาที อุณหภูมิบริเวณ โครงเครื่อง 45.1 องศาเซลเซียส บริเวณแบร์ริงหน้า 41.3 องศาเซลเซียส และแบร์ริงหลัง 37.4 องศาเซลเซียส และภาพที่ 16 แสดงผลการทดลองวัดค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 200 นาที โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าประมาณ 1,497 วัตต์

สรุปผลการทดลอง

การสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสความเร็วรอบต่ำชนิดแม่เหล็กแรงสูงเพื่อใช้กับกังหันลมขนาดเล็กสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 1,500 วัตต์ ที่ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที มีความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ประสิทธิภาพร้อยละ 77.84 ความเพี้ยนฮาร์มอนิกที่กระแสพิกัดของแรงดันไฟฟ้าสามเฟสที่เทียบสามเฟส (THDv%) และกระแสไฟฟ้า (THDA%) เท่ากับร้อยละ 1.7 และร้อยละ 1.9 ตามลำดับ มุมเฟสแสดงเวกเตอร์ของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 120 องศาทางไฟฟ้าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฉลี่ย 41.3 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถนำเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ไปใช้ร่วมกับระบบกังหันลมแบบระบบอิสระ (Stand-Alone System) ระบบพลังงานแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม (Solar and Wind Hybrid System) สำหรับระบบสูบน้ำ [20] ที่ความเร็วลมต่ำได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 หน่วยวิจัยพลังงานทดแทนและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน (REERCU) มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี และสถาบันวิจัยระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (PERIN)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Yongxiu, H., Yang, X., Yuexia, P., Huiying, T. and Rui, W. (2016). "A regulatory policy to promote renewable energy consumption in China: Review and future evolutionary path", **Renewable Energy**. 89, 695–705.
- [2] Phoochinda, W. (2012). **The Management of Energy production for consumption at community and household level**. Research Report. National Institute of Development Administration (NIDA). Thailand.
- [3] Ministry of Energy. (2015). **Alternative Energy Development Plan: AEDP2015**. Department of Renewable Energy Development and Energy Efficiency, September. Thailand.
- [4] Chancham, C., Waewsak, J., matan, N. and Tirawanichakul, Y. (2012). "Wind energy potential along the coast of Thai-Gulf in Central Southern Thailand", **Thaksin University Journal**. 15(2), 10-17.
- [5] Leiserson, M., Lindauer, D., Meesook, O.A. and Suebsaeng, P. **The World Bank Asia Alternative Energy Program (ASTAE): status report**.
- [6] Piggott, H. (2011). **Windpower Workshop: Building Your Own Wind Turbine**. Centre for Alternative Technology Publications. Wales. United Kingdom.
- [7] Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering King Mongkut's University Of Technology North Bangkok. (2011). **Research and Development of Low Speed Wind Turbine Generators for Manufacturer in Country. Final Report**. Energy Policy and Planning Office (EPP). Ministry Of Energy Thailand.
- [8] Petrua, L. and Mazonb, G. (2014). "Experimental Stand for the Study of a Three-Phase Synchronous Generator with Permanent Super Magnets", **Procedia Engineering**. 69, 231–236.
- [9] Crooks, M. J., Litvin, D. B., Matthew, P. W., Macaulay, R. and Shaw, J. (1978). "One-piece Faraday generator: A paradoxical experiment from 1851", **American Journal of Physics (AJP)**. 46(7), 729-731.
- [10] Cathey, J. J. (2000). **Electric Machines: Analysis and Design Applying Matlab**. McGraw-Hill Higher Education.
- [11] Zakotnik, M. and Tudor, C.O. (2015). "Commercial-scale recycling of NdFeB-type magnets with grain boundary modification yields products with 'designer properties' that exceed those of starting materials", **Waste Management**. 44, 48-54.
- [12] Zhu, Z. Q., Ng, K., Schofield, N. and Howe, D. (2004). "Improved analytical modelling of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets", **IEEE Proceedings-Electric Power Applications**. 151(6), 641-650.
- [13] Lateb, R., Takorabet, N. and Meibody-Tabar, F. (2006). "Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors", **IEEE Transactions on Magnetics**. 42(3), 442-445.
- [14] Hsiao, C. Y., Yeh, S. N. and Hwang, J. C. (2014). "Design of high performance permanent-magnet synchronous wind generators", **Energies**. 7(11), 7105-7124.
- [15] Hanselman, D. (2003). **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. Magna Physics Pub. Orono. ME. USA.
- [16] Hsu, J. S. (2007). "Study on enhancement and weakening of permanent magnet air gap flux density", **IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC'07)**. 1552-1556.
- [17] Casinovi, G. and Veca, G.M. (1982). "Eddy current losses in the armature of a superconducting turbine-generator", **IEEE Transactions on Magnetics**. 18, 1725-1727.
- [18] Kasagepongsan, C. and Suklueng, M. (2015). "Fabrication of permanent magnet for low speed synchronous generators using waste motors", **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok**. 25(3), 361-370.

- [19] Thammavong, P. and Kveeyarn, K. (2013). “Principle of Harmonics Standard in Power System of Thailand”, **Kasetsart engineering journal**. 83(26), 56-63.
- [20] Waewsak, J., Kasagepongsan, C., Boonbumrong, U. and Khedari, J. (2011). “Transient Simulation and Verification of a Hybrid Solar and Wind Water Pumping System for Rural Area of Southern Thailand”, In **2011 International Conference on Alternative Energy in Developing and Emerging Economy**, 243. 25-26 May. Songkhla. Thailand.