

The Journal of
Industrial Technology

Suan Sunandha Rajabhat University

Volume 7 / Number 1 / January – June 2019

ISSN 2351-0811

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน 2562



**FACULTY OF
INDUSTRIAL TECHNOLOGY**

จัดพิมพ์โดย : คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

1 ถนนอุทัยนอก เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

โทร 0 2160 1438 ต่อ 22 เว็บไซต์ <http://www.fit.ssu.ac.th>

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

วัตถุประสงค์ของการจัดพิมพ์วารสาร

1. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยที่มีคุณภาพด้านเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อเป็นช่องทางในการนำเสนอและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นด้านเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ฤเดช เกิดวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลัง วงษ์ธนสุภรณ์

อธิการบดีมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิบูล ไวกิจตรกรรม

รองคณบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิชัย บุญศรีเมือง

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงวุฒิ เอกวุฒินงศา

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.สุชปา เนตรประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.อรัญ หาญสืบสาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วินัย ไกรกล้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจนา จันทราสา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นารีนารถ รักสุนทร

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ดร.ชนมภัทร ไตรระสะ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

คณะกรรมการประเมินบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.มาโนช สรรพกิจทิพากร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุชปา เนตรประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

รองศาสตราจารย์ผกามาศ ผจญแก้ว

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฏางค์ ศุภระมุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

ในพระบรมราชูปถัมภ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกวิท สุวรรณหงษ์

มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา จารุศิริพจน์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ เพ็ชรประยูร	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ภูสมมา	มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรวิทย์ บุญศรีเมือง	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา วอนสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรียา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิตรี รตโนภาส สุวรรณลี	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริศรา เจริญปัญญาเนตร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ฝ่ายประสานงานและจัดการ

นางสาววรฤทัย หาญโชติพันธุ์

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – มิถุนายน) และ ฉบับที่ 2 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม)

เจ้าของวารสาร

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

สำนักงาน

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เลขที่ 1 ถนนอุทองนอก เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

โทรศัพท์ 0 2160 1438 ต่อ 22 โทรสาร 0 2160 1440 www.fit.ssru.ac.th

พิมพ์ที่

ห้างหุ้นส่วนจำกัด ดี-วิทย์ (สำนักงานใหญ่) 589/1091 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงบางอ้อ เขต บางพลัด กรุงเทพมหานคร

โทรศัพท์ 081 810 1419

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เป็นวารสารที่ตีพิมพ์เผยแพร่เฉพาะบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเทคโนโลยี และด้านวิศวกรรมศาสตร์ ที่มีผลกระทบโดยตรงกับการสร้างนวัตกรรมในแวดวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี อุตสาหกรรม และวิศวกรรม ฉบับนี้เป็นฉบับที่ 1 ของปีที่ 7 (เดือนมกราคม - มิถุนายน 2562) บทความวิจัยในเล่มนี้มี 10 เรื่อง ประกอบด้วยแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี, ชุดพอลิเมอร์สำหรับบำบัดสารเบนซีนโดยใช้เทคโนโลยีโฟโตแคทาไลติกออกซิเดชัน, การตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซโดยไม่สัมผัสด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 2.5 กิกะเฮิรตซ์, การจำแนกลักษณะภูมิสัณฐานและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ระหว่างปี 2521-2561, การประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดดอกอัญชันเพื่อบ่งบอกความสดของเนื้อปลา, การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก, ซอฟต์แวร์จำแนกเพศนกสวยงามด้วยการรู้จำเสียง, พฤติกรรมทางสรีรศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรง, สมบัติของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษอิฐมวลเบาควบรวมกับเถ้าลอย, Ready-to-Use Titanium Dioxide Slurry for Cosmetics Application เนื้อหาของบทความดังกล่าวมานี้ เรียบเรียงจากผลการวิจัยที่เป็นนวัตกรรมใหม่ มีความร่วมสมัยและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เหมาะสมสำหรับใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้าของคณาจารย์ นักวิชาการและผู้ที่เกี่ยวข้องทั่วไป

สำหรับวารสารฉบับต่อไป คือ ฉบับที่ 2 ของปีที่ 7 (เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2562) กำลังเปิดรับงานเขียนในรูปแบบบทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเทคโนโลยี และด้านวิศวกรรมศาสตร์เท่านั้น วารสารยังมีพื้นที่ให้ผู้สนใจ นักวิจัย อาจารย์และนักศึกษา ส่งผลงานมาให้พิจารณาเพื่อการตีพิมพ์ วารสารยินดีเป็นสื่อกลางสำหรับการเผยแพร่ผลงาน โดยบทความจะได้รับการประเมินคุณภาพจากกองบรรณาธิการและพิจารณาถ่วงดุล (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตามสาขาที่เกี่ยวข้อง

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ขอขอบคุณสมาชิกวารสารที่ได้ให้ความสนใจติดตามวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา มา ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิบูล ไวจิตรกรรม
บรรณาธิการ

สารบัญ

หน้า

บทความวิจัย

- แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี 6
Enhancement the efficiency of the wastewater treatment system of Suan Sunandha Rajabhat University by using the relation between BOD and COD values
ศิวิมล เชื้อรุ่ง, ศิวพันธุ์ ชูอินทร์
- ชุดฟอกอากาศสำหรับบำบัดสารเบนซีนโดยใช้เทคโนโลยีโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน 13
Air Purifier for Benzene Removal by using Photocatalytic Oxidation Technology
ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์, ต๋อพงค์ กรีธาชาดิ
- การตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซโดยไม่สัมผัส ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ 21
Non-contact Moisture Content Monitoring of Growing Media in Bonsai Pot by Using Radio Wave Frequency at 2.5 GHz
ประพนธ์ ลีกุล, พรพิมล ฉายแสง
- การจำแนกลักษณะภูมิฐานและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเล บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ระหว่างปี 2521-2561 31
Geomorphological Classification and the Coastal change in Prachuap Khiri Khan Province during 1978 – 2018
ศร้าวุฒิ ไวยสุศรี, สิริชัย อิมั่ว, สุเมธ อินหอม
- การประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดดอกอัญชันเพื่อบ่งบอกความสดของเนื้อปลา 41
Application of Indicator Film from Butterfly Pea Flower Extract for Detecting Freshness of Fish Fillets
รัชฎาพร ใจมั่น, วรัญญา หล้าดวงดี, ณัฐพงศ์ กันหา

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทความวิจัย

การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก Design and Construction brushless DC Motor control for small electric vehicles กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล, อิศรี ศรีคุณ, พรหมพัชร์ ดาวัลต์	52
ซอฟต์แวร์จำแนกเพศนกสวยงามด้วยการรู้จำเสียง Software for sex determination in beautiful bird by sound recognition ปริญญ์ กิตติสุทธิ, สุชาดา สิทธิจงสภาพร	62
พฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลัง โดยใช้แถบยางพาราอัดแรง Static Behavior of a Plank Girder Strengthening by Pre-Stressed Rubber Pads ชิษณุาส์ บุญมี, กิตติภูมิ รอดสิน	71
สมบัติของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษอิฐมวลเบาบดร่วมกับเถ้าลอย Properties of Self-Compacting Mortar Mixed with Ground-Recycled Lightweight Concrete Block Incorporating Fly Ash กฤษฎดา เลื้อเอี่ยม, ประกาศิต โสไกร, ณัฐฐ์ มากุล	83
Ready-to-Use Titanium Dioxide Slurry for Cosmetics Application Nuchanaporn Pijarn, Natchaya Mapong, Wipawadee Newamart, Somjintana Taveepanich, Janpen Intaraprasert	93

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏ สวนสุนันทาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

ศิวิมล เชื้อรุ่ง^{1*}, ศิวพันธุ์ ชูอินทร์²

^{1*} สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

² สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

Email: siwimol.ch@ssru.ac.th^{1*}, sivapan.ch@ssru.ac.th²

Received: January 24, 2019

Revised: April 27, 2019

Accepted: April 29, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสีย และหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบบำบัดน้ำเสีย จำนวน 160 ตัวอย่างทำการวิเคราะห์ค่าบีโอดี และค่าซีโอดี โดยใช้วิธีเอชไดโมดิฟิเคชัน 5 วัน 20 องศาเซลเซียส และวิธีโพแทสเซียมไดโครเมตตามลำดับ จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและค่าซีโอดีโดยใช้สถิติสหสัมพันธ์ และศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียโดยการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการน้ำเสีย

ผลการวิจัยพบว่าค่าบีโอดีของน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ย 22.28 ± 3.01 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออก มีค่าเฉลี่ย 16.09 ± 4.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีของน้ำเข้ามีค่าเฉลี่ย 36.53 ± 4.94 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออกมีค่าเฉลี่ย 25.95 ± 7.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาความสัมพันธ์ พบว่า ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีพบว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ทางบวก แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียทำได้โดยการตรวจวัดซีโอดีอย่างต่อเนื่อง ในระหว่างการปรับปรุงระบบและนำมาคำนวณหาค่าบีโอดีด้วยสมการถดถอยที่ได้จากการศึกษา เมื่อทราบค่าบีโอดีแล้วดำเนินการโดยควบคุมปริมาณน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำเสียให้เหมาะสม เพิ่มปริมาณจุลินทรีย์และเพิ่มธาตุอาหารอินทรีย์ลงในระบบบำบัดน้ำเสียควบคุมปริมาณและอัตราไหลของน้ำเสียให้เหมาะสม เพิ่มการเติมออกซิเจนลงในระบบบำบัดน้ำเสีย และควบคุมค่า pH ให้เป็นกลางอยู่เสมอ

คำสำคัญ : ซีโอดี, บีโอดี, ประสิทธิภาพ, ระบบบำบัดน้ำเสีย, ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์

Enhancement the efficiency of the wastewater treatment system of Suan Sunandha Rajabhat University by using the relation between BOD and COD values

Siwimol Chuarung^{1*}, Sivapan Choo-in²

^{1*}Department of Industrial Environmental Management Graduate School,
Suan Sunandha Rajabhat University

²Department of Environmental Science Faculty of Science and Technology,
Suan Sunandha Rajabhat University

Email: siwimol.ch@ssru.ac.th^{1*}, sivapan.ch@ssru.ac.th²

Received: January 24, 2019

Revised: April 27, 2019

Accepted: April 29, 2019

Abstract

A study on the optimization of wastewater treatment system of Suan Sunandha Rajabhat University by using the relationship between BOD and COD. The objectives of this research were study to the relationship between BOD and COD of wastewater treatment system and to find ways to improve wastewater treatment system of Suan Sunandha Rajabhat University. The 160 samples were analyzed BOD by acid modification method, 20°C 5 day and COD using potassium dichromate method. The relationship between BOD and COD was determined using the Correlation and the optimization of the wastewater treatment system by interviewing the wastewater management experts.

The results showed that BOD The average water influent was 22.28 milligrams per liter. Average water influent was 16.09 mg / L. The average water intake was 6.17 mg / L. The average water content was 4.51 mg / L. The COD was 36.53 mg /L. Average water content was 25.95 mg / L. Water content is 10.20 mg /L. The results of the study showed that the BOD and COD were correlated with water intake and discharge time. And have a relationship. The optimization of the wastewater treatment system by collecting COD samples continuously during the system improvement and calculating the BOD by the equation derived from the study. Well of the system, then operated by Controlling the amount of water into the wastewater treatment system. Increase the amount of microorganisms. And add other nutrients to the wastewater treatment system. Control the amount and flow rate of wastewater. It should be appropriate for the amount of wastewater generated and the rate of flow of wastewater. Control the appearance of wastewater entering the system does not contain toxic or heavy metals, these substances will inhibit the operation of the system.

Keywords : COD, BOD, efficiency, wastewater treatment, activated sludge

บทนำ

ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เป็นระบบบำบัดน้ำเสียประเภทแอกทิเวเตดสลัดจ์ ซึ่งเป็นวิธีบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีววิทยา โดยใช้แบคทีเรียพวกที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และมีความจำเป็นจะต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ ให้เหมาะสมแก่การทำงาน และการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด

ระบบตะกอนเร่ง หรือ แอกทิเวเตดสลัดจ์หรือระบบเลี้ยงตะกอน เป็นระบบที่มีการเติมอากาศให้แก่จุลินทรีย์เพื่อทำการย่อยสารอินทรีย์ในน้ำ โดยน้ำเสียจะถูกเติมเข้าสู่ถังเติมอากาศ (aeration tank) ที่มีจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายน้ำเสียรวมทั้งมีการเติมอากาศด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่นใช้เครื่องเติมอากาศ (aerator) บั้มเติมอากาศเติมอากาศตลอดเวลา จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนขึ้น ในขณะที่น้ำเสียจะมีค่าความสกปรกตกลง จุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตจะอยู่ในรูปของสลัดจ์ แล้วจะถูกส่งไปแยกที่ถังตกตะกอน (sedimentation tank) ที่ถังตกตะกอนน้ำใสกับตะกอนจะถูกแยกออกจากกัน กระบวนการบำบัด สลัดจ์จะถูกส่งไปกำจัดต่อไป ส่วนน้ำใสจะส่งไปผ่านการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อแล้วส่งออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งมีหลายรูปแบบ เช่นระบบตะกอนเร่งแบบธรรมดา (conventional activated sludge process) ระบบเติมอากาศเป็นขั้น ๆ (step aeration) ระบบเสถียรสัมผัส (contact stabilization) และระบบคลองน้ำวน (oxidation ditch) (เกษม จันทรแก้ว, 2541, น. 532)

ซีโอดี (chemical oxygen demand) เป็นการวัดปริมาณออกซิเจนเทียบเท่าที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ในตัวอย่างอย่างสมบูรณ์ด้วยตัวออกซิไดซ์อย่างแรง (strong chemical oxidant) ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในตัวอย่างบางตัวอย่างค่าซีโอดีนี้จะสามารถเชื่อมโยงไปถึงค่าที่แสดงปริมาณสารอินทรีย์ คือ บีโอดี (biochemical oxygen demand) ได้ การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีจะมี

ประโยชน์อย่างมากในการเฝ้าระวัง และควบคุมคุณภาพน้ำการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีซึ่งวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐานใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าการหาค่าบีโอดีซึ่งใช้เวลาในการวิเคราะห์ถึง 5 วัน หากนำค่าซีโอดีไปใช้ในการควบคุมและติดตามระบบบำบัดน้ำเสียก็จะได้วิเคราะห์ทันทั่วถึง แต่จำเป็นต้องมีการศึกษาให้เห็นว่าค่าซีโอดีกับค่าบีโอดีมีความสัมพันธ์กันก่อนที่จะนำผลความสัมพันธ์ไปประยุกต์ใช้ในการดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
2. เพื่อศึกษาหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ระเบียบวิธีวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

1. ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องโดยการสำรวจพื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำเสียของระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
2. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเข้าและออกจากระบบบำบัดน้ำเสียรวมบริเวณหน้าอาคารครุศาสตร์
3. ทำการวิเคราะห์หาค่าบีโอดีและค่าซีโอดีจากตัวอย่างน้ำเข้า-น้ำออกของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาโดยทำการเก็บตัวอย่าง 80 ครั้ง แบ่ง 2 ช่วง คือ ช่วงเปิดการเรียนการสอนเต็มเวลาเป็นเวลา และช่วงที่ไม่มีการเรียนการสอนรวมทั้งหมด 80 ตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างในวันจันทร์ถึงวันศุกร์ ทำการวิเคราะห์หาปริมาณ บีโอดีโดยใช้วิธีเอไซด์โมดิฟิเคชัน (azide modification) ที่เวลา 5 วัน

20°C และซีโอดีใช้วิธีย้อยสลาย โดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate) (คิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2559, น. 46 – 47)

4. หาความสัมพันธ์ของค่าบีโอดีต่อค่าซีโอดีโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติสหสัมพันธ์ (correlation) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5. ศึกษาความถดถอย (regression) ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

6. นำผลการศึกษาความสัมพันธ์ของค่าบีโอดีต่อค่าซีโอดี และผลการศึกษาความถดถอยเป็นข้อมูลเพื่อสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการน้ำเสียจำนวน 3 ท่าน โดยใช้แบบสอบถาม โดยผู้เชี่ยวชาญประกอบด้วย นักวิชาการสิ่งแวดล้อมชำนาญการจากกรมควบคุมมลพิษ รองศาสตราจารย์จากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และกรรมการผู้จัดการของบริษัทเอกชนด้านการจัดการน้ำเสีย เพื่อนำผลการสัมภาษณ์มาประมวลผลและสรุปเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

6. วิเคราะห์และสรุปผลจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเพื่อกำหนดเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ผลการวิจัย

1. ผลการตรวจวัดค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

ผลการตรวจวัดผลการตรวจวัดค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีช่วงเวลาเปิดเทอมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการตรวจวัดค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีช่วงเวลาเปิดเทอม

พารามิเตอร์	ช่วง	N	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ประเภท
BOD(mg/L)	16.47-27.45	40	22.28	3.01	น้ำเข้า
	5.58-24.80	40	16.09	4.54	น้ำออก
COD(mg/L)	27.00-45.00	40	36.53	4.94	น้ำเข้า
	9.00-40.00	40	25.95	7.33	น้ำออก

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าบีโอดี ช่วงเวลาเปิดเทอม น้ำเข้ามีค่าอยู่ระหว่าง 16.47-27.45 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 22.28 ± 3.01 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออกมีค่าอยู่ระหว่าง 5.58-24.80 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 16.09 ± 4.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดี ช่วงเวลาเปิดเทอม น้ำเข้ามีค่าอยู่ระหว่าง 27.00 -45.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 36.53 ± 4.94 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออกมีค่าอยู่ระหว่าง 9.00 - 40.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 25.95 ± 7.33 มิลลิกรัมต่อลิตร

ผลการตรวจวัดผลการตรวจวัดค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีช่วงเวลาปิดเทอมแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจวัดค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีช่วงเวลาปิดเทอม

พารามิเตอร์	ช่วง	N	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ประเภท
BOD(mg/L)	4.57-7.62	40	6.17	0.82	น้ำเข้า
	1.56-6.94	40	4.51	1.27	น้ำออก
COD(mg/L)	7.00-13.00	40	10.20	1.47	น้ำเข้า
	3.00-11.00	40	7.35	2.02	น้ำออก

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าบีโอดี ช่วงเวลาปิดเทอม น้ำเข้ามีค่าอยู่ระหว่าง 4.57-7.62 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 6.17 ± 0.82 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออก มีค่าอยู่ระหว่าง 1.56 - 6.94 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 4.51 ± 1.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าซีโอดีช่วงเวลาปิดเทอม น้ำเข้ามีค่าอยู่ระหว่าง 7.00 - 13.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 10.20 ± 1.47 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำออกมีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 - 11.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเฉลี่ย 7.35 ± 2.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. ผลการศึกษาอัตราส่วนค่าบีโอดีและค่าซีโอดี

จากผลการตรวจวัดค่าบีโอดีและค่าซีโอดีผู้วิจัยได้ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างค่าบีโอดีและค่าซีโอดีผลแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลอัตราส่วนบีโอดีต่อค่าซีโอดี

ช่วงเวลา	ประเภท					
	น้ำเข้า			น้ำออก		
	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	อัตราส่วน BOD/COD	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	อัตราส่วน BOD/COD
เปิดเทอม	22.28	36.53	0.61	16.09	25.95	0.62
ปิดเทอม	6.17	10.20	0.61	4.51	7.35	0.62

จากตารางที่ 3 พบว่าอัตราส่วนค่าบีโอดีต่อค่าซีโอดี ช่วงเปิดเทอมน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 0.61 ช่วงเปิดเทอม น้ำออกมีค่าเท่ากับ 0.62 ช่วงปิดเทอมน้ำเข้ามีค่าเท่ากับ 0.61 และช่วงปิดเทอมน้ำออกมีค่าเท่ากับ 0.61 ซึ่งมีค่าเป็นไปตามทฤษฎีของ (กรรณิการ์ สิริสิงห, 2549, น. 72) ที่อธิบายว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเสียจากอาคารบ้านเรือนที่พักอาศัย พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงบีโอดีเท่ากับ 60 % ของซีโอดี หรือมีค่าประมาณ 0.61

3. ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและค่าซีโอดีดำเนินการโดยใช้หลักสถิติสหสัมพันธ์ (correlation) ที่ระดับนัยสำคัญ .05 โดยมีสมมติฐานดังนี้

H_0 : ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยฯ ไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีจากจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยฯ มีความสัมพันธ์กัน

ผลการศึกษาความสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

ช่วงเวลา	ประเภท	r	sig	ระดับความสัมพันธ์*
เปิดเทอม	น้ำเข้า	1.000	.000	มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ทางบวก
	น้ำออก	1.000	.000	มีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ทางบวก
ปิดเทอม	น้ำเข้า	0.985	.000	มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงทางบวก
	น้ำออก	0.989	.000	มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงทางบวก

*ที่มา :ธีระดา ภิญญ และอดิษฐ์ ไทวิชา., 2552, น. 270

จากตารางที่ 4 พบว่าผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกในช่วงเวลาเปิดเทอมมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ทางบวก ($r=1$) ส่วนในช่วงปิดเทอมค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงเชิงบวก ($r=0.985$ และ 0.989 ตามลำดับ)

4. ผลการศึกษาความถดถอย (regression) ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีพบว่า ค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีมีความสัมพันธ์กันสูง ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อหาสมการในการประเมินค่าบีโอดีจากค่าซีโอดีผลการศึกษาดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความถดถอย (regression) ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

ช่วงเวลา	ประเภท	a	b	สมการถดถอย
เปิดเทอม	น้ำเข้า	5.451×10^{-15}	0.610	$BOD = 0.610 COD + 5.451 \times 10^{-15}$
	น้ำออก	7.466×10^{-15}	0.620	$BOD = 0.620 COD + 7.466 \times 10^{-15}$
ปิดเทอม	น้ำเข้า	0.564	0.549	$BOD = 0.549 COD + 0.564$
	น้ำออก	-0.073	0.623	$BOD = 0.623 COD + (-0.073)$

จากตารางที่ 5 พบว่าผลการวิเคราะห์ความถดถอย (regression) ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีของน้ำเสียมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยแยกศึกษาเป็น 4 กรณี ตามลักษณะน้ำเสีย ได้แก่ น้ำเข้าช่วงเปิดเทอม น้ำออกช่วงเปิดเทอมน้ำเข้าช่วงปิดเทอม และน้ำออกช่วงปิดเทอมสมการถดถอยระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาสรุปสมการได้ดังสมการที่ (1) - (4)

ช่วงเวลาเปิดเทอม ลักษณะน้ำเข้า

$$BOD = 0.610 COD + 5.451 \times 10^{-15} \quad ..(1)$$

ลักษณะน้ำออก

$$BOD = 0.620 COD + 7.466 \times 10^{-15} \quad ..(2)$$

ช่วงเวลาปิดเทอมลักษณะน้ำเข้า

$$\text{BOD}=0.549 \text{ COD} + 0.564 \quad \dots(3)$$

ลักษณะน้ำออก

$$\text{BOD}=0.623 \text{ COD} + (-0.073) \quad \dots(4)$$

5. ผลการศึกษาการใช้ได้ของสมการถดถอย

หลังจากได้สมการการถดถอยแล้วทำการทดสอบการใช้ได้ (validate) ของสมการถดถอยโดยทำการเก็บตัวอย่างซ้ำเพื่อหาค่าบีโอดีและคำนวณค่าบีโอดีจากค่าซีโอดีของน้ำเสียที่เก็บพร้อมกันและใช้ %RPD (ความแม่นยำของการวิเคราะห์) %recovery (ความถูกต้องของการวิเคราะห์) ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี

สมการ	ค่าความแม่นยำ (%RPD)	ค่าความถูกต้อง (%accuracy)
สมการที่ 1	2.54	102.67
สมการที่ 2	0	100
สมการที่ 3	1.41	99.60
สมการที่ 4	4.01	99.63

จากตารางที่ 6 พบว่าการทดสอบสมการถดถอยระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยนำข้อมูลคุณภาพน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียและน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาจากผลการทดสอบแสดงได้ผลดังตารางที่ 6 ซึ่งแบ่งตามลักษณะน้ำเสีย ได้แก่ น้ำเข้าช่วงเปิดเทอม น้ำออกช่วงเปิดเทอม น้ำเข้าช่วงปิดเทอม และน้ำออกช่วงปิดเทอม นั้น มีค่าความแม่นยำ (%RPD หรือ %RSD) ไม่เกิน 10% ทั้ง 4 สมการ และค่าความถูกต้อง (%accuracy) อยู่ในระหว่าง 80-120% ทั้ง 4 สมการ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ (คิวพันธ์ ชูอินทร์, 2560, น. 44 - 46)

6. ผลการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสีย

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียได้จากผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดี และสมการการถดถอย และผลการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการน้ำเสีย สรุปเป็นแนวทางได้

ดังนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาทำได้โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวัดซีโอดีอย่างต่อเนื่องในระหว่างการปรับปรุงระบบและนำมาคำนวณหาค่าบีโอดีด้วยสมการถดถอยที่ได้จากการศึกษาเมื่อทราบค่าบีโอดีของระบบแล้วดำเนินการ ดังนี้

6.1 ควบคุมปริมาณน้ำเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย

6.2 เพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ และเพิ่มธาตุอาหารอื่นลงไปในระบบบำบัดน้ำเสีย

6.3 ควบคุมปริมาณและอัตราไหลของน้ำเสียควรให้เหมาะสมต่อปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นและอัตราไหลของน้ำเสียที่เหมาะสม

6.4 ควบคุมลักษณะของน้ำเสียที่เข้าระบบไม่ให้เกิดความสารพิษหรือสารโลหะหนักสูงมลสารเหล่านี้จะยับยั้งการทำงานของระบบได้

6.5 ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เพราะจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและชีวภาพ นอกจากนี้สภาวะอุณหภูมิสูงจะเร่งปฏิกิริยาที่ให้เกิดกลิ่นเหม็นและข้อจำกัดด้านการกระจายตัวของมลสารอีกด้วย

6.6 เพิ่มการเติมออกซิเจนลงไปในระบบบำบัดน้ำเสีย

6.7 ควบคุมค่า pH ให้เป็นกลางอยู่เสมอ

6.8 งานเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียให้พร้อมสำหรับกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ในน้ำเสีย ต้องมีค่า SV 30 ประมาณ 300 mg/L

สรุปและอภิปรายผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบีโอดีกับค่าซีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา และมีวัตถุประสงค์รองในการศึกษาหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยการศึกษาความสัมพันธ์แบ่งเป็น 4 กรณี ตามลักษณะน้ำเสีย ได้แก่ น้ำเข้าช่วงเปิดเทอม น้ำออกช่วงเปิดเทอม น้ำเข้าช่วงปิดเทอม และน้ำออกช่วงปิดเทอมสรุปได้ดังนี้

ค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของน้ำเข้าและน้ำออกในช่วงเวลาเปิดเทอมมีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ทางบวก ($r = 1$) ส่วนในช่วงปิดเทอมค่าบีโอดีและค่าซีโอดีของ

น้ำเข้าและน้ำออกมีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงเชิงบวก ($r = 0.985$ และ 0.989 ตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของ ณมฤต แก้วกล้า (2523) ที่ได้ศึกษาการหาความสัมพันธ์ของค่า BOD5 กับ COD และ TOC ของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ จากการศึกษาเปรียบเทียบผลการทั้ง 4 สมการ ซึ่งแบ่งตามลักษณะน้ำเสีย ได้แก่ น้ำเข้าช่วงเปิดเทอม น้ำออกช่วงเปิดเทอม น้ำเข้าช่วงปิดเทอม และน้ำออกช่วงปิดเทอม นั้น มีค่าความแม่นยำ ไม่เกิน 10% (ศิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2560, น. 46) ทั้ง 4 สมการ และค่าความถูกต้อง (%accuracy) อยู่ระหว่าง 80-120% (ศิวพันธุ์ ชูอินทร์, 2560, น. 44) ทั้ง 4 สมการ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ สามารถนำค่าซีโอดีมาใช้ในการประเมินเพื่อหาค่าบีโอดีได้ โดยใช้สมการถอดถอยในสมการที่ (1) – (4) ส่วนแนวทางที่ได้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียได้มาจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการจัดการน้ำเสียซึ่งจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการนำมาใช้ในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสีย ทำการตรวจวัดค่าซีโอดีก่อนเข้าระบบและออกจากระบบ คำนวณเป็นค่าบีโอดีด้วยสมการที่ได้จากการศึกษาและคำนวณหาประสิทธิภาพในการลดค่าบีโอดีของระบบบำบัดน้ำเสีย

ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยได้นำข้อค้นพบจากการศึกษามาจัดทำข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป ดังนี้

1. การศึกษาในครั้งต่อไปทำการศึกษาโดยใช้แนวทางที่กำหนดไว้ไปดำเนินงานในการควบคุมระบบบำบัดน้ำเสียและทำการศึกษาว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นหรือไม่

2. ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของ

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยใช้วิธีการอื่น เช่น การสังเกตการปฏิบัติ การสัมภาษณ์ เพื่อให้ทราบข้อมูลที่ถูกต้องชัดเจนขึ้น

3. ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระดับความรู้ความเข้าใจในการศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เช่น อาจารย์ บุคลากรในมหาวิทยาลัย และประชากรในมหาวิทยาลัย

4. ควรศึกษาวิจัยระบบบำบัดทั้งหมดภายในมหาวิทยาลัย

References

- Kannika Sirisingha. (2006). *Chemistry of water, sewage and analysis*. 4th edition, Bangkok.
- Kasem Chankaew. (1998). *Environmental Technology*. Bangkok: Interdisciplinary Graduate Program Environmental Science Kasetsart University.
- Narumon Kaewklum. (1980). *Determination of relationship of values BOD COD and TOC of wastewater containing substances Organic is an element*. Thesis.M.E. Environmental Engineering Kasetsart University.
- Siwapan Chu In. (2016). *Monitoring of quality Environment*. Department of Environmental Science. Suan Sunandha Rajabhat University.
- _____. (2560). *Chemical analysis of pollutants*. Bangkok, Chulalongkorn University Publishing House.
- Thirada Pinyo and AdisaiTovicha (2009). *Statistics for Research*. Type 1 Nonthaburi. Six. Fern. Printing and Publishing.

ชุดฟอกอากาศสำหรับบำบัดสารเบนซินโดยใช้เทคโนโลยี

โฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน

ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์^{1*}, ต่อพงศ์ กริธาชาติ²

^{1*}สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

²วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา

Email: chaisri.th@ssru.ac.th^{1*}, tor_envi@hotmail.com²

Received: October 31, 2018

Revised: May 29, 2019

Accepted: June 5, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อประยุกต์ใช้ชุดฟอกอากาศทำการบำบัดสารเบนซินด้วยเทคโนโลยีโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดำแสงที่สังเคราะห์จากแผ่นฟิล์มชีวภาพขอบเขตการวิจัย ทำการทดลองใช้แผ่นฟิล์มพอลิแลคติก แอซิดที่ใส่ผงไทเทเนียมไดออกไซด์ 5.0, 10.0 และ 15.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยวิธีโบล์ฟิล์ม ความหนา 30.0 ไมครอน และติดตั้งชุดปฏิกรณ์แบบอากาศไหลทางเดียว ใช้หลอดกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องสแกนแบบส่องกราด พบว่ามีการกระจายตัวของสารไทเทเนียมไดออกไซด์ทั่วทั้งผิวฟิล์ม ผลึกโครงสร้างเป็นแบบอนาเทส และมีช่องว่างของพลังงานที่ 3.14-3.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารเบนซิน ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองใน 3 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยจากปริมาณสารเร่งปฏิกิริยา ความเข้มแสง และความเข้มข้นของสารเบนซินเริ่มต้น พบว่า แผ่นฟิล์มที่มีปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 10.0 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเบนซิน 5 ± 0.5 พีพีเอ็ม และความเข้มแสง 5.24 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าตอบสนองสูงสุด 58.90 เปอร์เซ็นต์ และจากวิเคราะห์แบบถดถอยพหุคูณสำหรับทำนายผลการบำบัดสารเบนซินในอนาคต พบว่ามีค่าสหสัมพันธ์เชิงเส้น เท่ากับ 0.82 สรุปได้ว่ากระบวนการบำบัดสารเบนซินในอากาศ สามารถที่จะประยุกต์ใช้กับชุดฟอกอากาศในสภาวะที่เหมาะสมได้

คำสำคัญ : ชุดฟอกอากาศ, เบนซิน, ฟิล์มชีวภาพ, โฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชัน

Air Purifier for Benzene Removal by using Photocatalytic Oxidation Technology

Chaisri Tharasawatpipat^{1*}, Torpong Kreetachat²

^{1*}Environmental science, Suansunandha Rajabhat University

²School of Energy and Environment, University of Phayao

Email: chaisri.th@ssru.ac.th^{1*}, tor_envi@hotmail.com²

Received: October 31, 2018

Revised: May 29, 2019

Accepted: June 5, 2019

Abstract

The objectives of this research were to apply the air purifier for benzene volatile organic compound removal through photocatalytic oxidation process using bio-composite film as photocatalyst. The polylactic acid films were embedded with 5.0, 10.0 and 15.0 %wt of titanium dioxide powder. Each film was installed in annular closed-system photoreactor with UV-C light at 254 nm. Blown film extrusion technique was used to create the films with 30.0 microns in thickness. The morphology of the films were examined by a scanning electron microscope (SEM). After SEM testing, it was found that titanium dioxide was equally distributed and embedded all over the films. The crystal structure of titanium dioxide was appeared to be an anatase structure. It was found that the energy band gap was from 3.14 to 3.26 eV. The experiment on the optimal conditions for benzene removal by surface response techniques on three effect as photocatalyst dosage, light intensity, initial benzene concentration showed that the optimised response was 58.90% for 10%wt of titanium dioxide with 5 ± 0.5 ppm of initial benzene concentration and 5.24 mW/cm^2 of light intensity. A linear correlation of 0.82 was found in the multiple regression analysis of benzene treatment prediction. In the conclusion, there was a possibility to integrate the benzene removal process with an air purifier using photocatalytic oxidation.

Keywords : Air Purifier, Benzene, Biocomposite film, Photocatalytic Oxidation

บทนำ

สารอินทรีย์ระเหยง่าย คือ กลุ่มสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอกระจายตัวไปในอากาศได้ ในที่อุณหภูมิและความดันปกติ ปัจจุบันพบเป็นสารที่มีในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่น สี ควันบุหรี่ สารฟอกสี ตัวทำละลายในงานพิมพ์ ปะปนในอากาศ ซึ่งพบว่าผลกระทบต่อสุขภาพ และเป็นอันตรายต่อสุขภาพ อาคารสำนักงานต่าง ๆ เป็นพื้นที่ทำงานหนึ่ง ที่มีแหล่งกำเนิดสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภท เบนซีน โทลูอีน เบนซอลดีไฮด์ ซึ่งหากได้รับในปริมาณมากย่อมก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคของผู้ให้บริการและผู้ใช้บริการ (Roschan & Tipayarom, 2014, pp. 971-976) เทคโนโลยีโฟโตแคตาไลติกออกซิเดชันเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกพัฒนามาใช้บำบัดสารอินทรีย์ทั้งที่อยู่ในน้ำและในอากาศที่อาศัยกลไกทางกายภาพเคมี อาศัยพลังงานจากแสงช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตร่วมกับการกระตุ้นโดยอนุภาคของสารกึ่งตัวนำ แต่เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ อาทิ สารตัวเร่งปฏิกิริยาต้องการให้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม การศึกษาครั้งนี้จึงมีความสนใจที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารไทเทเนียมไดออกไซด์ตรึงไว้ในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ($\text{TiO}_2/\text{Biocomposite}$ film) ที่ขึ้นรูปจากเทคนิคการเป่า (blown film) มาใช้บำบัดสารเบนซีนในอากาศ โดยเลือกเครื่องฟอกอากาศที่บรรจุในห้องจำลองขนาด 785 ลิตร ที่เป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ปฏิบัติงาน และหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลองด้วยเทคนิคการหาค่าการตอบพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology : RSM) แบบ box benken method (Srimanta, Jerald, & Nihar 2009, pp. 15–24) ในปัจจัยหลักที่มีผลต่อการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยเทคโนโลยีนี้ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มแสง ปริมาณสารตัวเร่ง

ปฏิกิริยา และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารมลพิษ Donya, Fariborz, Chang, & Ness (2013, pp. 148-157) ซึ่งผลการวิจัยนี้จะสามารถเป็นแนวทางต่อยอดถึงรูปแบบของการพัฒนาเทคโนโลยีไปสู่การออกแบบระบบบำบัดสาร VOCs ที่เป็นมลพิษในอุปกรณ์ฟอกอากาศในอนาคตต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพของการบำบัดสารเบนซีน ด้วยชุดฟอกอากาศจำลองที่ใช้เครื่องฟอกอากาศเป็นชุดทำให้เกิดปฏิกิริยา โฟโตแคตาไลติกออกซิเดชัน
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสารเบนซีน ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนองแบบ box benken

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยประเภทพัฒนาทดลองประยุกต์ เลือกใช้ขั้นตอนการบำบัดมลพิษทางอากาศด้วยเทคโนโลยีใหม่ โดยดำเนินการดังนี้

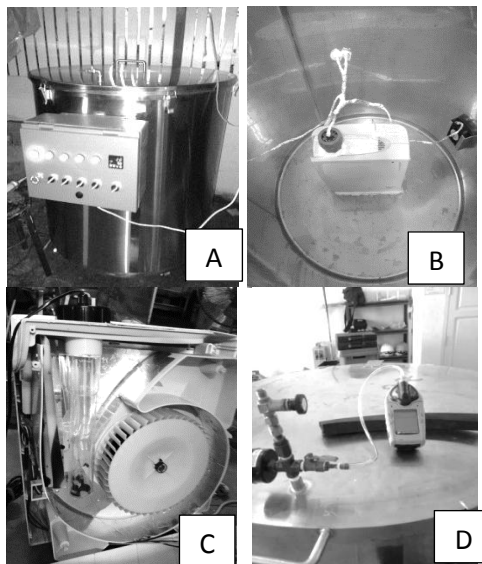
1. ออกแบบชุดฟอกอากาศให้อากาศไหลผ่านชุดปฏิกรณ์แบบ annular แบบทางเดียวประกอบด้วยกล่องขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เมตร สูง 1.0 เมตร ทำด้วยวัสดุทนการกัดกร่อน SS 314 เชื่อมปิดสนิท มีช่องเปิดเพื่อเปลี่ยนหลอด UV ที่ปิดด้วยวัสดุกันรั่วซึมแบบแผ่นยางกันซึม และพัดลมดูดอากาศภายนอกเข้าภายในกล่องโดยท่อที่มีการควบคุมการปิด-เปิดด้วยวาล์วควบคุมภายในกล่องบรรจุชุดปฏิกรณ์ที่ประกอบไว้ในชุดเครื่องฟอกอากาศ ที่ถูกดัดแปลงจากชุดฟอกอากาศยี่ห้อ Bionaire รุ่น BAP-625 ขนาด 420x210x476 มิลลิเมตร ความเร็วลมดัดแปลงต่ำสุด 0.240 m^3/hr . (4.0 L/min) ภายในติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม วัดอุณหภูมิ ชุดความชื้น และชุดปฏิกิริยาที่ภายในติดตั้งหลอดกำเนิดแสงช่วง UV-C และแผ่นฟิล์ม TiO_2/PLA film ซึ่งมี

คุณสมบัติเสถียรภาพต่อสารเคมี ปลอดภัยต่อผู้ใช้ และสิ่งแวดล้อม Suwannahong et al. (2012, pp. 955-959) ดังแสดงในรูปที่ 1

2. ตรวจสอบการรั่วไหลของสารเบนซีนเมื่อเปิดเครื่องฟอกอากาศด้วยวิธีตรวจสอบบริเวณรอยต่อ ด้วยฟองสบู่ และการอัดด้วยลมที่ติดตั้งเกจวัดแรงดันไว้ด้านบนถึงเพื่อสังเกตการณ์ลดลงของแรงดันในถังปฏิกรณ์

3. ทำการทดลองหาสถานะสมดุลของการปฏิกิริยาการดูดซับโดยการฉีดสารเบนซีนที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน 15 ppm. ตรวจสอบปริมาณสารเบนซีนทุก ๆ 1 ชั่วโมงจนพบจุดสมดุลของการดูดซับบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์ม (จุดที่ปริมาณสารเบนซีนไม่เปลี่ยนแปลง) แล้วทำการเปิดแสงอัลตราไวโอเล็ต แล้วทำการตรวจสอบปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารเบนซีนทุก ๆ 1 ชั่วโมงโดยเก็บตัวอย่างอากาศที่ผ่านจากระบบตรวจสอบปริมาณด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC-FID)

4. ทำการตรวจสอบสถานะการทดลองที่เหมาะสมตามเทคนิคพื้นผิวตอบสนองแบบ box benken โดยฉีดสารเบนซีนที่รู้ปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอนเข้าสู่ชุดทดลอง ทำการเปิดแสง UV-C หลังจากสถานะสมดุลของการดูดซับแล้ว โดยทำการทดลองบำบัดสารเบนซีน ที่ความเข้มข้น 5 ± 0.5 , 10 ± 0.5 , 15 ± 0.5 ppm.



รูปที่ 1 ลักษณะของชุดทดลองที่ดัดแปลงจากชุดกรองอากาศและการตรวจสอบประสิทธิภาพการบำบัด

A คือ ห้องทดลองและชุดควบคุมไฟฟ้าภายนอก

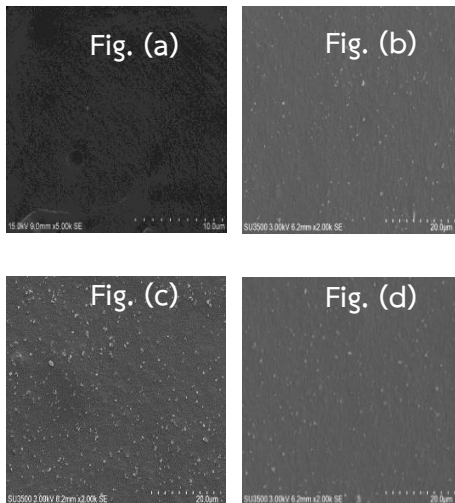
B คือ ชุดฟอกอากาศที่ภายในบรรจุหลอด UV และฟิล์ม TiO_2/PLA

C แสดงภายในชุดฟอกอากาศ

D แสดงจุดตรวจสอบปริมาณสารเบนซีนด้วยเครื่องตรวจวัดสารเบนซีน

ผลการวิจัย

1. ผลการตรวจสอบลักษณะของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO_2/PLA film ด้วยเครื่องสแกนแบบส่องกราด พบว่า ผิวหน้าของแผ่นฟิล์มมีลักษณะราบเรียบ โดยพบว่ามีการฝังตัวของสารเร่งปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิวของแผ่นฟิล์มจากภาพ (b)-(d) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลการตรวจสอบ SEM micrographs (a) PLA film 0.0, 5.0, 10.0 และ 15.0%wt. ตามลำดับ

ผลของการตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นแสง UV-Vis ของแผ่นฟิล์ม ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm. พบว่า สามารถดูดกลืนคลื่นแสงได้ดี ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 nm. เมื่อหาค่าพลังงานแบนแก๊ป (Eg) พบว่า มีค่าพลังงานในช่วงแบนแก๊ปที่ 3.14-3.26 eV. แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลของการคำนวณค่าพลังงานแบนแก๊ปของแผ่นฟิล์ม TiO₂/PLA

ปริมาณสารเร่ง ปฏิกิริยาด้วยแสงใน แผ่นฟิล์ม TiO ₂ (%wt)	ค่าพลังงานแบนแก๊ป (eV) TiO ₂ /PLA
5.0%	3.22
10.0%	3.18
15.0%	3.14

จากรูปที่ 2 และตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีการกระจายทั่วทั้งแผ่นฟิล์ม และค่าพลังงานแบนแก๊ปของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง TiO₂ ในแผ่นฟิล์ม PLA ใกล้เคียงกับค่าแถบพลังงานของผลึกสารเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสง ที่มีโครงสร้างแบบ Anatase (Eg 3.20 eV.) Obee et al. (2000, pp. 253-261)

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการบำบัดสารเบนซีนที่เลือกใช้ TiO₂/PLA ฟิล์มที่มีปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ที่ 5.0, 10.0 และ 15.0%w/w พบว่าประสิทธิภาพของการบำบัดสารระเหยเบนซีน ได้สูงสุด 63 เปอร์เซ็นต์ที่ TiO₂ 10.0%w/w

3. ผลการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสารเบนซีนในชุดฟอกอากาศ ที่ใช้ TiO₂/PLA film ด้วยเทคนิค respond surface method พบคำตอบสนองในสภาวะที่ดีที่สุดของการบำบัดสารเบนซีน มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นแบบสหสัมพันธ์ที่ R² เท่ากับ 0.82 ที่ ความเข้มแสง 5.24 mW/cm² ปริมาณTiO₂ 10.0%w/w และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารระเหยเบนซีน 5±0.5 ppm. มีคำตอบสนอง 58.90% และได้สมการทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองและสร้างแบบจำลองการถดถอย (multiple regression) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ ดังแสดงผลทางสถิติในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลทางสถิติ แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัย จากเทคนิคพื้นผิวผิวดตอบสนอง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	11	1234	112.2	6.23	0.001
Blocks	2	70.2	35.1	1.95	0.176
Linear	3	729.1	243.0	13.50	0.000
Light intensity	1	260.3	260.3	14.46	0.002
TiO ₂ Dosage(%TiO ₂)	1	48.0	48.0	2.67	0.123
Initial concentration	1	402.9	402.9	22.39	0.000
Square	3	361.4	120.4	6.69	0.004
Light intensity*Light intensity	1	118.6	118.6	6.59	0.021
%TiO ₂ *%TiO ₂	1	141.7	141.7	7.88	0.013
Initial concentration* Initial concentration	1	143.4	143.4	7.97	0.013
2-Way Interaction	3	38.1	12.7	0.71	0.563
Light intensity*%TiO ₂	1	16.3	16.3	0.91	0.355
Light intensity* Initial concentration	1	0.8	0.8	0.05	0.827
%TiO ₂ * Initial concentration	1	15.5	15.5	0.87	0.367
Lack-of-Fit	10	264.3	26.4	23.71	0.001
Total	15	1504.2			

สรุปและอภิปรายผล

แผ่นฟิล์มที่ผลิตจากแผ่นพลาสติกชีวรูปที่ใส สารเร่งปฏิกิริยาโดยใช้แสงร่วม พบว่าสามารถใช้บำบัดสารเบนซินที่เป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้ดี จากผลการตรวจสอบด้วย SEM micrographs และการตรวจสอบการยึดเกาะติดผิวของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์จากผลการวิเคราะห์ FTA สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kreetachat, Kruenate, & Suwannahong (2013) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีในรูปแบบของถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรอากาศใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดมลพิษ สามารถถูกนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสมในสภาวะของการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกประยุกต์ใช้ห้องทดสอบที่มีปริมาตรอากาศ 786 ลิตร และมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลติกออกซิเดชันที่เหมาะสมสามารถที่จะบำบัดสารเบนซินได้เช่นเดียวกับ

ผลการศึกษาของ Donya, Fariborz, Chang, & Ness, (2013, pp. 148-157) Hugo D et al. (2012, pp. 159-170) โดยพบว่าที่ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพการบำบัดสารเบนซินได้สูงกว่าปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 15 แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงที่ปริมาตรพื้นผิวสัมผัสของฟิล์มเท่าเดิมไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Suwanahong et al. (2012, pp. 955-959) จากผลการบำบัดสารเบนซินด้วยชุดทดลองที่ติดตั้งจากชุดฟอกอากาศได้สูงสุดที่ 62.28% และสภาวะที่เหมาะสมในการทดลองด้วยเทคนิค RSM มีค่าตอบสนองที่ดีที่สุด ที่ความเข้มแสง 5.24 mW/cm² ปริมาณ TiO₂ 10.0%w/w และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารเบนซิน 5±0.5 ppm. โดยมีค่าตอบสนอง 58.90% สอดคล้องกับ

ผลการวิจัยของ Hugo et al (2012, pp. 159-170) ที่พบว่าปริมาณสารเบนซีนที่เหมาะสมต่อการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตแคตตาไลติก ออกซิเดชันที่ค่าต่ำเช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Donya, Fariborz, Chang, & Ness (2013, pp. 148-157) ส่วนปัจจัยด้านค่าความเข้มแสง UV ที่สูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Obee et al (2000, pp. 253-261) และปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีความสัมพันธ์น้อยสุดโดยค่าที่เหมาะสมอยู่ที่ 10.0%w/w สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Kreetachat, Kruenate, & Suwannahong (2013, pp. 552-556)

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาประยุกต์ใช้นวัตกรรมด้านเครื่องฟอกอากาศที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารเบนซีนในอากาศในพื้นที่ปฏิบัติงานได้ แต่ยังมีคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยควบคุมที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบำบัดในส่วนของคุณภาพของกระแสอากาศที่นำพาสารอินทรีย์ระเหยง่ายเข้าสู่ระบบการฟอกอากาศ
2. ควรศึกษากลไกทางของการเกิดปฏิกิริยาในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายประเภทอื่น ๆ เพิ่มเติม
3. ควรมีการศึกษากาการจัดการผลผลิตได้ อาทิ การจัดการแผ่นฟิล์มที่เสื่อมประสิทธิภาพ การจัดการกับสารข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการบำบัด

References

- Donya, F., Fariborz H., Chang, S. L & Ness, L. (2013). Impact of design parameters on the performance of ultraviolet photocatalytic oxidation air cleaner. *Journal of Building and Environment*, 2013 (66), 148-157.
- Hugo, D., et-al. (2012). Key parameters influencing the performance of photocatalytic oxidation (PCO) air purification under realistic indoor conditions. *Journal of Applied Catalysis B Environmental*, 2012 (128), 159-170.
- Kreetachat, T., Kruenate, J., & Suwannahong, K. (2013). Preparation of TiO_2/Bio -composite Film by Sol-Gel Method in VOCs Photocatalytic Degradation Process. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, 2013 (390), 552-556.
- Obee, T.N., et-al. (2000). Photocatalytic Oxidation of Toluene on Nanoscale TiO_2 Catalysts: Studies of Deactivation and Regeneration. *Journal of Catalysis*, 2000 (196), 253-261.
- Roschan, S., Tipayarom, A. (2014). Health Risk Assessment of Exposure to Volatile Organic Compounds Emitted from Photocopiers. *KKU Institutional Research Journal*, 971-976.
- Srimanta, R., Jerald, A.L. & Nihar, B. (2009). Using the Box-Benkhen technique to statistically model phenol photocatalytic degradation by titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Chemical Engineering*, 2009 (150), 15–24.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2562

Suwannahong, K., et al. (2012). Application of nano-TiO₂/LDPE composite film on photocatalytic oxidation degradation of dichloromethane. *Journal of Environmental Biology*, 2012(33), 955-959.

การตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซโดยไม่สัมผัส ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ประพนธ์ ลิ้มกุล^{1*}, พรพิมล ฉายแสง¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมและสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

Email: prapan.l@rbru.ac.th^{1*}, pornpimon.c@rbru.ac.th¹

Received: January 23, 2019

Revised: May 1, 2019

Accepted: May 13, 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซ ด้วยการประยุกต์ใช้คลื่นความถี่วิทยุที่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ร่วมกับการตรวจวัดแบบเทคนิคอวกาศว่าง เพื่อตรวจสอบความชื้นของวัสดุปลูกโดยไม่สัมผัสและไม่ทำลายวัสดุทดสอบ ระบบประกอบด้วยสายอากาศส่งไมโครสตริปที่มีค่าพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -16 เดซิเบล ทำงานร่วมกับแหล่งกำเนิดความถี่สูงที่ใช้กำลังส่ง 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ กำลังความถี่ที่สร้างขึ้นจะถูกส่งผ่านวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซไปยังด้านรับและถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้วยอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน แล้วแสดงระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ วัสดุปลูกตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือหินพัมมิสสีขาว การตรวจสอบระดับความชื้นเริ่มจากวัสดุปลูกที่มีความชื้นสูงสุด 61.43% กำลังงานส่งผ่านของคลื่นวิทยุที่ตรวจสอบได้เมื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่ 1.405 โวลต์ จากนั้นให้วัสดุปลูกคายความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ความชื้นลดลงอยู่ที่ 61.33% ระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ 1.475 โวลต์ เมื่อเวลาการคายความชื้นเพิ่มเป็น 4 6 8 และ 10 ชั่วโมง ส่งผลโดยตรงกับระดับความชื้นที่ลดลงจาก 57.08% เป็น 39.61% ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 1.724 ถึง 2.013 โวลต์ นอกจากนี้ที่ระยะเวลา 14 ถึง 28 ชั่วโมง ความชื้นลดลงเล็กน้อยจาก 34.37% เป็น 32.82% ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เฉลี่ยอยู่ที่ 2.053 โวลต์ จากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นและระดับแรงดันไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่าคลื่นวิทยุสามารถตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซได้โดยไม่สัมผัส

คำสำคัญ : สายอากาศไมโครสตริป, ความชื้น, วัสดุปลูก, คลื่นความถี่วิทยุ, อุปกรณ์ตรวจจับกำลังงาน

Non-contact Moisture Content Monitoring of Growing Media in Bonsai Pot by Using Radio Wave Frequency at 2.5 GHz

Prapan Leekul^{1*}, Pornpimon Chaisaeng¹

¹Department of Telecommunication and Information Engineering,
Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University
Email: Email: prapan.l@rbru.ac.th^{1*}, pornpimon.c@rbru.ac.th¹

Received: January 23, 2019

Revised: May 1, 2019

Accepted: May 13, 2019

Abstract

This paper proposes the growing media moisture monitoring in bonsai pots using the electromagnetic waves at frequency of 2.5 GHz based on a free space technique. This technique monitors the growing media moisture content without contacting the samples and uses a non destructive testing material method. The proposed system consists of a microstrip patch antenna having the $|S_{11}|$ less than -16 dB. The antenna works with the high frequency synthesizer which has the transmitted power of 0 dBm. The generated power of frequency is transmitted to the bonsai pot and then the received power will be converted to DC voltage by using the power detector and displayed by digital multi-meter. The growing media sample under test is a pumice stone. The experiment started from fully saturated growing media of 61.43% moisture content. The measured power of radio frequency was 1.405 volt. Leaving the growing media to dehydrate in 2 hour, the moisture was decreased to 61.33% with the voltage of 1.475 volt. When increasing time from 4 6 8 to 10 hours, the moisture content levels decreased from 57.08% to 39.61% which voltage continuously increased from 1.724 to 2.013 volts. In addition, the dehydration time from 14 to 18 hours could cause a few impact on the reduction of moisture content from 34.37% to 32.82% with the average voltage of 2.053 volt. From the measured results, the relation between voltage and moisture content showed that the electromagnetic wave was able to efficiently use in monitoring the level of moisture content of growing media in bonsai pots by non-contact.

Keywords : Microstrip antenna, Moisture content, Growing media, Radio frequency Power detector

บทนำ

บอนไซคือศิลปะการปลูกต้นไม้ลงในกระถางให้มีลักษณะเหมือนต้นไม้ขนาดใหญ่ที่ย่อส่วน ใช้การตัด ตกแต่งลำต้น กิ่งและใบ ต้นไม้ที่นิยมนำมาเลี้ยง ได้แก่ พืชตระกูลสน (Juniper) (Relf, 2009) บอนไซอายุ 500 ปี ในพิพิธภัณฑ์บอนไซซุนเคเอ็น (Shunkaen bonsai museum) เมืองโตเกียวประเทศญี่ปุ่น มีราคากว่า 1 ล้านบาทสหรัฐ บอนไซถูกปลูกในกระถางการเจริญเติบโตจึงช้ากว่าต้นไม้ปกติ (Bonsai effect) (Passioura, 2002, pp. 311-318) ความชื้นหรือปริมาณของน้ำในวัสดุปลูกจึงสำคัญต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม รองมาคือการระบายน้ำและอากาศในวัสดุปลูก (Coder, 2007) ความชื้นที่น้อยเกินไปส่งผลให้วัสดุปลูกแห้งและบอนไซตายในที่สุด ระดับความชื้นสูงทำให้ความโปร่งลดลงอากาศถูกแทนที่ด้วยอนุภาคของน้ำ การหายใจของรากทำได้ไม่ดี (Kumar & Dwivedi, 2011, pp. 115-118) รวมถึงความชื้นเปลี่ยนแปลงง่ายเนื่องจากวัสดุปลูกภายในกระถางมีปริมาณน้อย และความชื้นในวัสดุปลูกควรมีค่าระหว่าง 5–50% การวัดความชื้นจึงเป็นเรื่องสำคัญและมีการนำเสนอไว้หลายเทคนิค เช่น การตรวจวัดความชื้นดินแบบเวอร์ริบ (Virrib) รีเฟลคโตมิเตอร์ ใช้วิธีการตรวจวัดองค์ประกอบของน้ำ (Water content reflectometer) แต่การติดตั้งมีความซับซ้อนเนื่องจากใช้วิธีฝังลงใต้ดิน จึงไม่สะดวกสำหรับการเปลี่ยนตัวอย่างทดสอบ Fatta et al. (2005, pp. 553-563) ได้ศึกษาวิธีการตรวจวัดความชื้นด้วยทีดีอาร์ ร่วมกับการวัดความเร็วของคลื่นพี (P wave velocity) วิธีนี้ใช้อุปกรณ์หลายส่วนมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น ให้ความผิดพลาดที่ 10% ต่อมา Piuze et al. (2010, pp. 2747-2754) ศึกษาการตรวจสอบความชื้นด้วยระบบทีดีอาร์และพัฒนาวิธีปรับเทียบ (Calibration) จึงมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการตรวจวัดแบบทีดีอาร์ยังคงใช้วิธีการเสียบเซนเซอร์ลงในวัสดุทดสอบเพื่อให้ความแม่นยำ

รวมถึงมีข้อจำกัดในการวัดบริเวณกว้าง ต่อมามีการพัฒนาการตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกภายในกระถาง โดย Darshna et al. (2015, pp. 32-36) นำเสนอการจำลองระบบตรวจสอบความชื้นและอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์เพียงจุดเดียว ซึ่งไม่ครอบคลุมความชื้นทั้งหมดและไม่ถูกนำไปใช้งานจริง จากนั้นมีการพัฒนาการวัดด้วยเซนเซอร์สำเร็จรูปใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าระดับความชื้นและควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดย Amardas & Rahim (2016, pp. 55-62) และ Imteaj et al. (2017, pp. 830-835) ในขั้นตอนการติดตั้งเซนเซอร์ใช้วิธีการเสียบลงในกระถางเพื่อวัดความชื้นจึงเสี่ยงต่อการทำลายรากพืช โดยเฉพาะรากของบอนไซที่มีความหนาแน่นของรากภายในกระถางสูง แต่สำหรับการวัดด้วยคลื่นวิทยุสามารถวัดได้ในบริเวณกว้างและไม่สัมผัสกับวัสดุทดสอบ รวมถึงการเปลี่ยนตัวอย่างทดสอบสามารถทำได้ต่อเนื่อง เช่น การวัดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเทคนิคอวกาศว่าง (Free space techniques) ที่มีประสิทธิภาพสูง (Limpiti & Krairiksh, 2012, pp. 2230-2241) รวมถึงได้มีการประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกเทียบกับระดับความชื้นและความชื้น (Seker & Abatay, 2005) (Nelson, 2006, pp. 688-702) จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการวัดความชื้นด้วยเทคนิคการส่งผ่านคลื่นวิทยุเหมาะสำหรับการตรวจวัดความชื้นเนื่องจากไม่สัมผัสกับวัสดุปลูกและสามารถตรวจวัดได้ในบริเวณกว้าง

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้คลื่นวิทยุเพื่อตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกด้วยเทคนิคอวกาศว่าง ใช้การส่งกำลังงานคลื่นผ่านกระถางบอนไซ อาศัยการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีผลมาจากความชื้น เมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลางที่คุณสมบัติต่างกัน กำลังงานเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและถูกดูดกลืน (Kharkovsky et al., 2002,

pp. 546-550) การลดทอนจึงต่างกัน การตรวจสอบแบ่งเป็นภาคส่ง ภาครับและแสดงผล ภาคส่งใช้แหล่งกำเนิดความถี่ที่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ ร่วมกับสายอากาศ ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังงานความถี่ผ่านกระถางบอนไซ ภาครับทำหน้าที่รับกำลังงานและเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า จากนั้นแสดงผลด้วยเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ และเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าที่วัดกับความชื้นของวัสดุปลูก

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นวัสดุปลูกต่อกำลังงานการส่งผ่านคลื่นวิทยุด้วยระบบตรวจสอบความชื้นโดยไม่สัมผัสแบบ

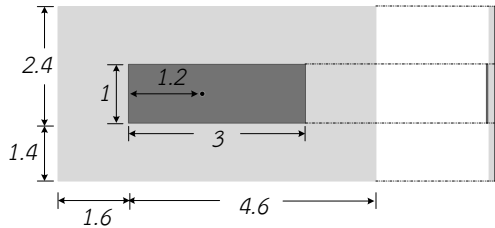
ระเบียบวิธีวิจัย

1. การพัฒนาสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปใช้สำหรับรับส่งคลื่นความถี่วิทยุ ได้รับการพัฒนาให้ทำงานได้ดีที่ความถี่ 2.5 กิกะเฮิร์ตซ์ การพัฒนาเริ่มจากคำนวณขนาดตัวนำ (PEC) คำนวณโครงสร้างและคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรอง (Substrate) ด้วยสมการที่ (1) (Balanis, 2016)

$$w = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \quad (1)$$

ขนาดจากการคำนวณถูกจำลองด้วยโปรแกรมจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า HOBBIES (Zhang et al., 2012) เพื่อปรับโครงสร้างอย่างละเอียด ผลการจำลองสมรรถนะให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ($|S_{11}|$) ต่ำกว่า -20 เดซิเบล โครงสร้างและขนาด (หน่วยเซนติเมตร) แสดงดังในรูปที่ 1



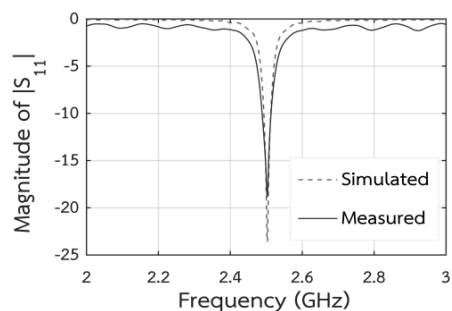
รูปที่ 1 ขนาดสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปได้รับการพัฒนาขึ้นจริงบนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 หน้า ชนิด FR4 มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุฐานรอง 4.1 ขนาดกว้างและยาว 6.2x2.8 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สายอากาศไมโครสตริป

ทดสอบสมรรถนะด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (VNA) รุ่น KEYSIGHT E5063A ENA ให้ค่า $|S_{11}|$ ที่ -16.6 เดซิเบล ซึ่งต่างจากการจำลองเล็กน้อยเนื่องจากคุณสมบัติและความหนาวัสดุฐานรอง



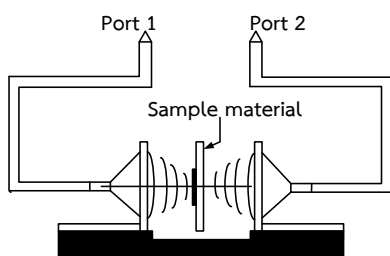
รูปที่ 3 ผลการจำลองเทียบผลวัดจริง ($|S_{11}|$)

อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3 สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้าง

ไม่ซับซ้อน กะทัดรัด เหมาะสำหรับการติดตั้งกับกระถางบอนไซเพื่อตรวจสอบความชื้น

2. เทคนิคอวกาศว่าง

การตรวจวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยเทคนิคอวกาศว่างเป็นวิธีที่ไม่ต้องเตรียมตัวอย่างพิเศษ ใช้ได้กับวัสดุที่มีอุณหภูมิสูงหรือไม่เป็นสารเนื้อเดียว เช่น การตรวจวัดความหวานของสารละลายด้วยการส่งผ่านความถี่และตรวจสอบกำลังงานที่ได้รับ (Chaisaeng, 2016, pp. 14-24) เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการตรวจสอบความชื้นวัสดุ วิธีการคือนำวัสดุทดสอบวางระหว่างสายอากาศส่งและรับ วัดขนาดของสัญญาณส่งจากตัวส่งไปยังตัวรับที่ผ่านวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวัดแบบเทคนิคอวกาศว่าง

ในส่วนของการคำนวณค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟ อธิบายได้ดังสมการที่ (2)

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2)$$

α คือ ค่าคงที่การลดทอน และ β คือ ค่าคงที่เฟส ในวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำ ($\sigma = 0$) ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่น ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ประกอบด้วย ค่าสภาพยอมไฟฟ้า (ϵ) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (μ) ซึ่งมีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นไมโครเวฟ ตามสมการที่ (2) (Pozar, 2012)

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon'}(1 - j\tan\delta) \quad (3)$$

เมื่อ ϵ' คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุบอกถึงการสะสมพลังงานสนามไฟฟ้า $\tan\delta$ คือ ค่าแทนเจนต์ของการสูญเสียไดอิเล็กตริกเป็นปริมาณการสูญเสียพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุที่เป็นฉนวนไม่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก ค่าความซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับในอากาศ (Kaye & Laby, 1986) การลดทอนของคลื่นจึงมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพยอมไฟฟ้าของวัสดุ

3. เปอร์เซ็นต์ความชื้นและโครงสร้างต้นแบบ

วิธีมาตรฐานในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นแบ่งออกเป็นรูปแบบเชิงน้ำหนัก (Gravimetric) และเชิงปริมาตร (Volumetric) ในงานนี้ใช้การวัดแบบเชิงน้ำหนักเนื่องจากมีความละเอียดและให้ความแม่นยำสูง

เมื่อ m_a คือ น้ำหนักถ้วย

m_b คือ น้ำหนักถ้วยและวัสดุปลูก

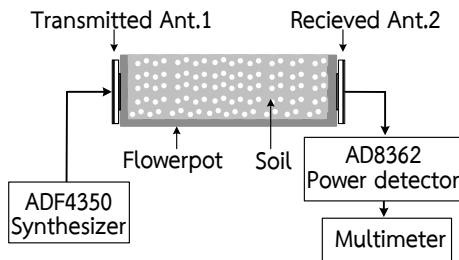
m_c คือ น้ำหนักถ้วยและวัสดุปลูกอบแห้ง

เริ่มต้นด้วยการตวงวัสดุปลูกใส่ถ้วย เพื่อใช้เป็นตัวแทนวัสดุปลูกในแต่ละระดับความชื้น ทำการชั่งน้ำหนักแต่ละตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักถ้วยตวง ชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้ง คำนวณเปอร์เซ็นต์ความชื้นในสมการที่ (4) (Bilskie, 2001)

$$\% \text{moisture content} = \frac{m_b - m_c}{m_c - m_a} \times 100 \quad (4)$$

การตรวจสอบความชื้นใช้การส่งคลื่นวิทยุผ่านวัสดุปลูกภายในกระถางบอนไซ สายอากาศถูกติดตั้งอยู่ด้านข้างกระถางในลักษณะตรงข้าม ภาคส่งใช้อุปกรณ์ส่งเคราะห์ความถี่เชื่อมต่อกับอากาศส่ง ทำหน้าที่สร้างและส่งออกกำลังงานเพื่อให้คลื่นวิทยุเดินทางผ่านกระถางบอนไซ ภาครับทำหน้าที่

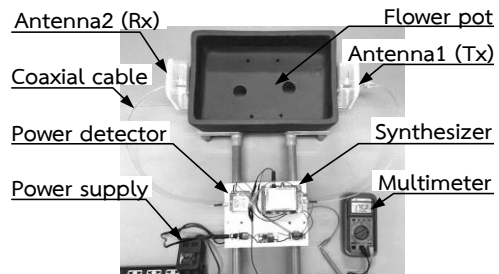
ตรวจจบกำลังงานคลื่นวิทยุ ส่งต่อไปอุปกรณ์ตรวจจบกำลังงานและเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและแสดงค่าแรงดันในแต่ละระดับความชื้น ไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ไดอะแกรมระบบตรวจสอบความชื้น

4. ระบบตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูก

ภาคส่งประยุกต์ใช้แหล่งกำเนิดความถี่สูง (Synthesizer) ของบริษัท Analog Devices รุ่น ADF4351 สร้างความถี่ในช่วง 0.35 ถึง 4.4 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานสร้างได้ในช่วง -5 ถึง +5 เดซิเบลมิลลิวัตต์ ความถี่ถูกส่งไปยังสายอากาศ (Antenna 1: Tx) เพื่อแพร่กระจายคลื่นให้เดินทางผ่านวัสดุปลูก จากนั้นภาครับใช้สายอากาศ (Antenna 2: Rx) รับกำลังงานความถี่สูงและส่งต่อไปยังอุปกรณ์ตรวจจบกำลังงาน (Power Detector) ของบริษัท Analog Devices รุ่น AD8362 ที่ตรวจจบกำลังงานได้ในช่วง 0.05 ถึง 3.8 กิกะเฮิรตซ์ กำลังงานที่ตรวจจับได้ -52 ถึง +8 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0.3 ถึง 3.6 โวลต์ และแสดงผลด้วยเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์ ระบบแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ระบบตรวจวัดความชื้นดินแบบ

การวัดใช้คลื่นวิทยุย่านอิสระ (ISM bands) กำลังส่ง 0 เดซิเบลมิลลิวัตต์ อุปกรณ์ตรวจจบกำลังงานให้เอาท์พุทเป็นเชิงเส้นแปรผันกับกำลังงานที่ตรวจจับ จึงมีความซับซ้อนต่ำ และวัดด้วยดิจิทัลมัลติมิเตอร์ที่มีความละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง ซึ่งเพียงพอต่อการแบ่งระดับความชื้น การหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นใช้เครื่องชั่งดิจิทัลรุ่น ARB120 Digital balance แสดงผลเป็นตัวเลขทศนิยม มีความแม่นยำ $\pm 3\%$ มีการป้องกันเครื่องชั่งจากสิ่งรบกวนต่างๆ

5.การทดสอบ

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นแบบเชิงน้ำหนัก ถูกทดสอบภายในห้องปฏิบัติการ ของคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จ.จันทบุรี โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส การทดสอบเริ่มจากการเตรียมวัสดุปลูกคือ หินพิมพ์ มีสีขาว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของก้อน 0.5 ถึง 1.5 เซนติเมตร วัสดุปลูกได้รับการปรับความชื้นด้วยการแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และแบ่งวัสดุปลูกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบความชื้นด้วยระบบต้นแบบและใช้สำหรับหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นเชิงน้ำหนัก วัสดุปลูกตัวอย่างที่ 1 ถูกบรรจุลงในกระถาง ก และตัวอย่างที่ 2 บรรจุลงกระถาง ข กระถางทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือกว้างยาวสูง 20x30x8 เซนติเมตร บรรจุวัสดุปลูกในปริมาณที่พอดีกับกระถาง โดยที่กระถาง ก ใช้สำหรับระบบตรวจสอบความชื้นด้วยการส่งกำลังงานความถี่ผ่านวัสดุปลูก ในเวลาเดียวกันวัสดุปลูกในกระถาง

ข ถูกวางใส่ถ้วยอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสูง 6.2x4.5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ดังแสดงในรูปที่ 8



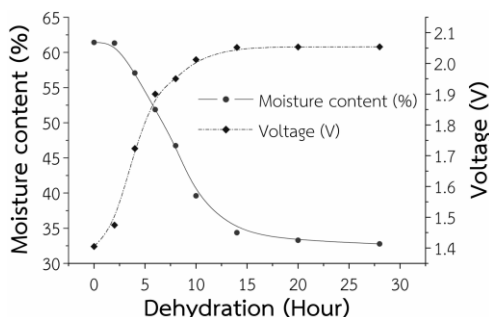
รูปที่ 8 การหาค่าความชื้นแบบเชิงน้ำหนัก

การวัดความชื้นครั้งที่ 1 ทำในขณะที่วัสดุปลูกมีความชื้นสูงสุดคือ หลังจากแช่น้ำมาเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นกระถาง ก ถูกวัดด้วยการส่งผ่านคลื่นวิทยุและบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่รับได้ของภาครับ ในเวลาเดียวกันกระถาง ข ถูกวางใส่ถ้วยอลูมิเนียมเพื่อเป็นตัวอย่างในการหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นวัสดุปลูก การวัดครั้งแรกกำหนดเป็นระยะการคายความชื้นที่ 0 ชั่วโมง ดังนั้นวัสดุปลูกจึงมีความชื้นสูงสุด การวัดในครั้งที่ 2 ทำโดยการปล่อยให้วัสดุปลูกคายความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบในลักษณะเดียวกับครั้งแรก ด้วยการส่งผ่านคลื่นวิทยุผ่านกระถาง ก บันทึกค่าแรงดันที่รับรู้ และในเวลาเดียวกันเก็บตัวอย่างวัสดุปลูกในกระถาง ข ใส่ถ้วยอลูมิเนียมเช่นเดียวกับครั้งแรก การวัดความชื้นครั้งที่ 3 ให้วัสดุปลูกคายความชื้น 4 ชั่วโมง ทำการวัดค่าการส่งผ่านกระถาง ก ในลักษณะเดียวกันกับการวัดก่อนหน้านี้ เก็บวัสดุปลูกตัวอย่างในกระถาง ข แบบเดียวกับครั้งก่อนหน้านี้ การวัดในครั้งที่ 4 ใช้เวลาคายความชื้นเพิ่มเป็น 6 ชั่วโมง การวัดในครั้งที่ 5 ใช้เวลา 8 ชั่วโมง การวัดครั้งที่ 6 ใช้เวลา 10 ชั่วโมง ครั้งที่ 7 ใช้เวลา 14 ชั่วโมง ครั้งที่ 8 ใช้เวลา 20 ชั่วโมง และครั้งสุดท้าย ใช้เวลา 28 ชั่วโมง การทดสอบ

ทำซ้ำทั้งหมด 5 รอบ และนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์

ผลการวิจัย

วัสดุปลูกถูกวางและถูกชั่งน้ำหนักเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น การชั่งวัสดุปลูกพร้อมถ้วยตวง ซึ่งเฉพาะถ้วยตวง (m_0) วัสดุปลูกทั้ง 9 ตัวอย่าง ถูกชั่งในครั้งที่ 1 (m_1) จากนั้นถูกนำไปอบเพื่อให้ความชื้นลดและเปลี่ยนเป็นวัสดุปลูกแห้ง ซึ่งน้ำหนักวัสดุปลูกแห้ง (m_2) ทั้ง 9 ตัวอย่าง แบ่งเป็นน้ำหนักของวัสดุปลูกที่มีความชื้นปะปนอยู่ที่ 80.2 ถึง 90.2 กรัม น้ำหนักวัสดุปลูกแห้งอยู่ที่ 56.2 ถึง 73.53 กรัม และน้ำหนักถ้วยตวงอยู่ที่ 16.35 ถึง 22.73 กรัม ข้อมูลถูกคำนวณเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นด้วยสมการที่ (4) น้ำหนักของวัสดุปลูกที่มีความชื้นปะปน น้ำหนักวัสดุปลูกแห้ง น้ำหนักถ้วยตวงและเปอร์เซ็นต์ความชื้น แสดงในตารางที่ 1 จากนั้นตรวจวัดความชื้นด้วยระบบวัสดุปลูกที่ความชื้นสูงสุดแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ 1.405 โวลต์ ความชื้นอยู่ที่ 61.43% เมื่อเวลาคายความชื้น 2 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มเล็กน้อย 1.475 โวลต์ แปรผันกับความชื้นที่ลดลง 61.33% ที่เวลา 4 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าเพิ่มเป็น 1.724 โวลต์ ค่าความชื้นลดลงเหลือ 57.08% ที่เวลาเพิ่มเป็น 6 และ 10 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง 1.901 1.951 และ 2.013 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความชื้นที่ลดลง 51.88% 46.75% 39.61% ตามลำดับ เมื่อเวลาการคายความชื้นเพิ่มขึ้นเป็น 14 ชั่วโมง แรงดันไฟฟ้าวัดได้ 2.052 โวลต์ ค่าความชื้น 34.37% ที่เวลา 20 ชั่วโมง ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มเล็กน้อยคือ 2.054 โวลต์ ความชื้นลดลงอยู่ที่ 33.29% และที่เวลาสูงสุดคือ 28 ชั่วโมง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ที่ 2.054 โวลต์ ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง แต่ระดับความชื้นเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ที่ 32.82% ข้อมูลการเปรียบเทียบแสดงดังในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ระดับแรงดันไฟฟ้าต่อความชื้นวัสดุปลูก

ทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุปลูกต่อความชื้น บรรจุวัสดุปลูกลงกระถางในปริมาณเท่ากัน ทดสอบส่งผ่านกำลัง

งานในวัสดุปลูกก้อนเล็กและก้อนใหญ่ ผลที่ได้คือวัสดุปลูกที่ก้อนเล็กลงการลดทอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุปลูกที่ก้อนเล็กเมื่อบรรจุลงในกระถางให้ความหนาแน่นมากกว่าก้อนใหญ่ จึงส่งผลต่อปริมาณความชื้นโดยรวมสูงกว่า แต่แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกำลังงานต่อระดับความชื้นยังคงสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 9 รวมถึงสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Nelson et al., 1998, pp. 483-487) (Trabelsi & Nelson, 2004, pp. 1999-2008)

ตารางที่ 1 น้ำหนักและระดับความชื้นวัสดุปลูก

Dehydration (Hour)	Weight (grams)			Dry weight (%)
	Growing media (m_b)	Growing media (m_c)	Cup (m_a)	
0	80.20	56.20	17.13	61.43
2	84.52	58.73	16.68	61.33
4	87.52	61.76	16.63	57.08
6	84.43	61.35	16.86	51.88
8	86.17	63.94	16.39	46.75
10	80.67	62.42	16.35	39.61
14	86.94	69.09	17.15	34.37
20	84.47	67.57	16.80	33.29
28	90.20	73.53	22.73	32.82

สรุปและอภิปรายผล

ระบบตรวจสอบความชื้นวัสดุปลูกด้วยคลื่นวิทยุด้วยเทคนิคอวกาศว่าง สามารถตรวจสอบได้ครอบคลุมและไม่สัมผัสวัสดุปลูก สายอากาศไมโครสตริปถูกพัฒนาให้ทำงานที่ 2.5 กิกะเฮิรตซ์ ให้ค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -16 เดซิเบล ทดสอบความชื้นวัสดุปลูก 9 ระดับ เริ่มตั้งแต่ 32.82% ถึง 61.43% แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้อยู่ในช่วง 2.054 ถึง 1.405 โวลต์ ใช้เวลาทั้งหมด 28 ชั่วโมง ระดับความชื้นที่แยกได้ชัดเจนอยู่ในช่วง 34.37% ถึง 61.43% แรงดันไฟฟ้าที่

วัดได้ตอบสนองต่อความชื้นอย่างเป็นเชิงเส้น ความชื้นที่ลดลงแปรผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจสอบความชื้นอย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการตรวจสอบความชื้นที่นำเสนอสามารถตรวจสอบความชื้นได้โดยไม่สัมผัสกับวัสดุปลูก การเปลี่ยนตัวอย่างทดสอบทำได้อย่างต่อเนื่องและไม่เซนเซอร์ติดตั้งลงในกระถางจึงไม่เสี่ยงต่อความเสียหายของรากบอนไซ และเหมาะกับการใช้งานเมื่อเทียบกับงาน Amardas.

กับ Rahim (2016, pp. 55-62.) และ Imteaj et al. (2017, pp. 830-835) การวัดด้วยคลื่นวิทยุสามารถตรวจสอบความชื้นในวัสดุปลูกได้ดีกว่างานของ Darshna et al. (2015, pp.32-36) เนื่องจากคลื่นเดินทางผ่านวัสดุปลูกครอบคลุมทั้งกระถาง

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนวิจัย ภายใต้การบริหารงานของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี สัญญาเลขที่ 2215/2561

References

- Amardas, S. & Rahim, R. A. (2016). Development of Automated Solar Watering System. *The International Journal Of Engineering And Science*, Vol.5 (12) pp. 55-62.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory, analysis and design*. (4th ed.), John Wiley & Sons. USA.
- Bilskie, J. (2001). *Soil water status: content and potential*. Application note, Campbell Scientific. USA.
- Chaisaeng, P. (2016). Study of correlation between sugar content of solution and transmission coefficient with microwave. *The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University*. Vol.4(2). pp.14-24.
- Coder, K. D. (2007). *Soil compaction stress & Trees: symptoms, measures, treatments*. Warnell School Outreach Monograph, University of Georgia. USA.
- Darshna, S. Sangavi, T. Mohan, S. Soundharya, A. & Desikan, S. (2015). Smart irrigation system. *Journal of Electronics and Communication Engineering*, Vol. 10 (3), pp.32-36.
- Fratta, D. Alshibli, K. A. Tanner, W. M. & Roussel, L. (2005). Combined TDR and P-wave velocity measurements for the determination of In Situ soil density-experimental study. *Geotechnical Testing Journal*, Vol.28 (6), pp. 553-563.
- Imteaj, A. Rahman, T. Alam, M. S. & Alam, T. (2017). Automated expedient watering system for small plants and acquaintance about deficit in water supply. *Proceedings of the International Conference on Engineering Research, Innovation and Education 2017*, 13-15 January, Bangladesh. pp. 830-835.
- Kaye, G.W.C. & Laby, T.H. (1986) *Table of physical and chemical constants*. (15th ed.), Longman.
- Kharkovsky, S. N. Akay, F. Hasar, U. C. & Atis, C. D. (2002). Measurement and monitoring of microwave reflection and transmission properties of cement-based specimen. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 51 (6), pp. 546-550.
- Kumar, P. & Dwivedi, P. (2011). Bonsai: symbol of culture, ideals, money and beauty. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, Vol. 4 (2), pp.115-118.

- Limpiti, T. & Krairiksh, M. (2012). In Situ moisture content monitoring sensor detecting mutual coupling magnitude between parallel and perpendicular dipole antennas. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.61 (8), pp 2230 – 2241.
- Nelson, S. O. Trabelsi, S. Kraszewski, A. W. (1998). Advances in sensing grain moisture content by microwave measurements. *Transactions of the ASAE*. Vol. 41(2), pp.483-487.
- Nelson, S. O. (2006). Agricultural applications of dielectric measurements. *IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13(4), pp. 688-702.
- Passioura, J. B. (2002). Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell and Environment*, Vol.25, pp. 311–318.
- Piuzzi, E. Cataldo, A. Cannazza, G. & Benedetto, D. E. (2010). Improved reflectometric method for soil moisture measurement exploiting an innovative triple-short calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.59 (10), pp. 2747-2754.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave engineering*. (4th ed.), John Wiley & Sons: USA.
- Relf, D. (2009). *The art of bonsai*. Virginia Cooperative Extension. Publication. USA.
- Seker, S. & Abatay, H. (2005). New frequency-dependent parametric modeling of dielectric materials. *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, Vol. 60 (4), pp.320-327.
- Trabelsi, S. & Nelson, S. O. (2004). Calibration methods for nondestructive microwave sensing of moisture content and bulk density of granular materials. *Transactions of the ASAE*. Vol. 47(6), pp.1999–2008
- Zhang, Y. SARKAR, T. K. Zhao, X. Garcia-donoro, D. Zhao, W. Salazar-palma, M. & Ting, S. (2012). *Higher Order Basis Based Integral Equation Solver (HOBBIES)*. John Wiley & Sons: USA.

การจำแนกลักษณะภูมิฐานและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเล บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ระหว่างปี 2521-2561

ศราวุฒิ ไวยสุศรี^{1*}, สิริชัย อิ่มทั่ว¹, สุเมธ อินทอม¹

¹สาขาวิชาภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

Email: katawut.wa@ssru.ac.th^{1*}

Received: March 11, 2019

Revised: May 28, 2019

Accepted: June 5, 2019

บทคัดย่อ

การกัดเซาะพื้นที่ชายฝั่งทะเลเป็นปัญหาที่พบมาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดปัญหาตามมาทั้งด้านเศรษฐกิจและสังคม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาลักษณะภูมิฐาน และการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเล ระหว่างปี 2521-2561 โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ในการจำแนกภูมิฐาน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ปี 2521, 2541 และ 2561 ด้วยเทคนิคการจำแนกโดยการกำกับดูแล (Supervised Classification) และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ผลการศึกษาพบว่า ภูมิฐานที่ง่ายต่อการกัดเซาะในพื้นที่นี้ คือ หาดทรายและปากแม่น้ำ โดยตำบลที่ถูกกัดเซาะมากที่สุดจะอยู่บริเวณตอนล่างของจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยปีที่ถูกกัดเซาะมากที่สุดระหว่างปี 2521-2561 พบที่ตำบลแม่รำพึง อำเภอบางสะพาน ถูกกัดเซาะถึง 129 ตารางกิโลเมตร และรองลงมาคือ ตำบลนาหูกวาง อำเภอทับสะแก ซึ่งตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของจังหวัด โดยถูกกัดเซาะถึง 75 ตารางเมตร ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปวางแผนบริหารจัดการพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ : การจำแนกภูมิฐาน, การกัดเซาะชายฝั่ง, การจำแนกโดยการกำกับดูแล

Geomorphological Classification and the Coastal change in Prachuap Khiri Khan Province during 1978 – 2018

Katawut Waiyasusri^{1*}, Sirichai Imtua¹, Sumate Inhom¹

¹Geography and Geo-Informatics Program, Faculty of Humanities and Social Sciences,

Suan Sunandha Rajabhat University

Email: katawut.wa@ssru.ac.th^{1*}

Received: March 11, 2019

Revised: May 28, 2019

Accepted: June 5, 2019

Abstract

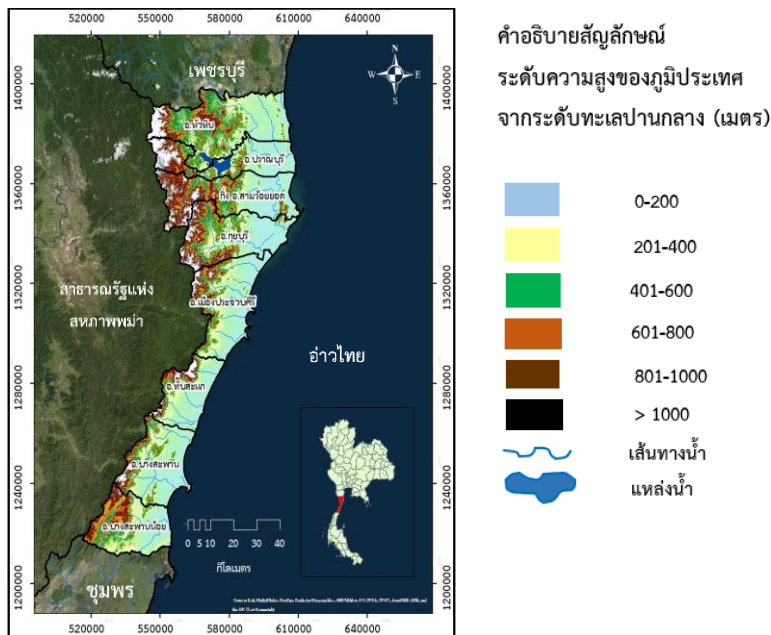
Coastal erosion is a crucial problem in socio-economic issues which has continually occurred for many years. This study aims to analyze the geomorphology and detect the coastal change during 1978-2018 by using Landsat satellite images for the years 1978, 1998 and 2018 in classification process by using supervised classification techniques and detected the coastal areas changing in Prachuap Khiri Khan Province. The results revealed that the geomorphologies which easily eroded were the beach and delta. area. The most affected areas of coastal erosion, about 129 sq km² during 1978 to 2018, had occurred at Mae Ramphueng sub-district, Bang Saphan district in the lower part of Prachuap Khiri Khan province and the coastal areas of Na Hu Kwang sub-district which situated in Thap Sakae district in the central part of Prachuap Khiri Khan, have been eroded about 75 sq km². All of these results can be used for further effective coastal zone management and planning.

Keywords : Geomorphological Classification, Coastal change, Supervised Classification

บทนำ

จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ตั้งอยู่บริเวณชายฝั่งด้านตะวันตกของอ่าวไทย มีลักษณะรูปแบบธรณีสัณฐานเป็นพื้นที่ราบชายฝั่งทะเลมีความยาวรวม 78.12 กิโลเมตร โดยทางทิศตะวันตกเป็นเขตเทือกเขาสูงต่อเนื่องมาจากภาคเหนือ คือเทือกเขาตะนาวศรี ส่วนพื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบลูกฟูก

เป็นลอนลาด ซึ่งเป็นเขตต่อเนื่องมาจากเขตเทือกเขาบริเวณนี้มีความลาดชันระดับต่ำ ถัดมาด้วยสภาพภูมิประเทศที่ลดระดับความสูงและความลาดชันที่ลดลงลาดมาทางทิศตะวันออก (กรมทรัพยากรธรณี, 2551, น.4) ทำให้ปรากฏภูมิสัณฐานเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำและพื้นที่ราบชายฝั่งทะเลดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษาบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์

การกัดเซาะชายฝั่งของจังหวัดประจวบเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน พบว่าการกัดเซาะเกิดขึ้นอย่างรุนแรงปานกลาง (1-5 เมตรต่อปี) มีระยะทางรวม 76.19 กิโลเมตร และกัดเซาะอย่างรุนแรง (มากกว่า 5 เมตรต่อปี) ระยะทางรวม 1.93 กิโลเมตร (กรมทรัพยากรธรณี, 2551, น.22) โดยเกิดจากคลื่นลมมรสุมมีกำลังแรงและปริมาณน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นรวมถึงพายุชนิดต่าง ๆ ที่พัดเข้ามาในชายฝั่งทำให้เกิดการกัดเซาะเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี (Shanzhong & Fang, 2008, p. 1190) การกัดเซาะหากสะสมเป็นระยะหลายสิบปีก็จะเกิดการ

เปลี่ยนแปลงแนวพื้นที่ชายฝั่งได้ชัดเจนยิ่งขึ้น Choowong et al. (2009, p. 2) ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเล ได้แก่ การบุกรุกป่าชายเลน (Xuejie & Damen, 2010, p. S56) และการพัฒนาพื้นที่ชายฝั่งเป็นแหล่งท่องเที่ยว การบุกรุกพื้นที่ป่าชายเลน การสร้างเขื่อนบริเวณปากแม่น้ำ Burak et al. (2004, p. 525)

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งทะเลจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลจากระบบการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing) สามารถศึกษาพื้นที่

ครอบคลุมเป็นบริเวณกว้างและงบประมาณน้อยในการติดตามและตรวจสอบการกัดเซาะพื้นที่ชายฝั่งทะเล (Siripong, 2010, p. 993) โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้อาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat อันเป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรธรรมชาติดวงแรกของโลกที่ได้ขึ้นปฏิบัติการตั้งแต่ปี 23 กรกฎาคม 2515 (Lillesand & Keifer, 2000, p. 430-431) ซึ่งมีการพัฒนาระบบตรวจวัดอย่างต่อเนื่องไม่ว่าจะเป็นระบบเชิงคลื่น และความละเอียดเชิงพื้นที่ และยังไม่มีดาวเทียมดวงใดที่สามารถบันทึกภาพได้เก่าและได้ภาพกว้างเท่าดาวเทียมชนิดนี้ ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลดาวเทียม Landsat 2-MSS, Landsat 4-TM และ Landsat 8-OLI/TIRS ทำการบันทึกผลภาพข้อมูล วิเคราะห์ ติดตามและตรวจสอบตลอดแนวชายฝั่งจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จำแนกลักษณะภูมิฐานพื้นที่ชายฝั่งทะเล และตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งทะเล บริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ จำแนกภูมิฐาน 3 ช่วงเวลา ได้แก่ ปี 2521, 2541 และ 2561

ระเบียบวิธีวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลเชิงพื้นที่ภาพดาวเทียมทั้ง 3 ปี ได้แก่ 2521, 2541 และ 2561 และนำเข้าข้อมูลภาพจากดาวเทียม Landsat ทั้ง 3 ปีเข้าสู่โปรแกรม ArcMap 10.4 เพื่อแสดงผลข้อมูล จากนั้นทำการเชื่อมต่อภาพถ่ายดาวเทียม(Mosaic Image) เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ครอบคลุมสองระวาง ดังตารางที่ 1
2. การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลได้ทำการทำภาพสีผสม (Band Composite) โดยผสมสีในช่วงแบนด์ 7:5:4 สำหรับภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 2 และ 8 และภาพสีผสมช่วงแบนด์ 7:4:3 สำหรับภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 4 และ 5 ทั้งนี้เนื่องจากแบนด์ดังกล่าวอยู่ในช่วงคลื่นตรวจวัดที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 1 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ตั้งแต่ปี 2521–2561

Image Type	Path/Row	Band (R:G:B)	Acquisition date	Resolution	Sources
Landsat 2 MSS	129/51	7:5:4	16/12/2521	60 m.	U.S.
	129/52	7:5:4	16/12/2521	60 m.	Geological
Landsat 5 TM	129/51	7:4:3	05/01/2541	30 m.	Survey
	129/52	7:4:3	05/01/2541	30 m.	สำนักงาน
Landsat 8 OLI, TIRS	129/51	7:5:4	01/03/2561	30 m.	ธรณีวิทยาของ
	129/52	7:5:4	01/03/2561	30 m.	สหรัฐอเมริกา

3. วิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อจำแนกภูมิฐานปี 2521, 2541 และ 2561 โดยแปลความรูปแบบภูมิฐานจากภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้โปรแกรม ERDAS IMAGINE Version 9.2 ด้วยวิธีการจำแนกแบบกำกับดูแล (Supervised Classification) และใช้การตัดสินใจ

เพื่อการจำแนกข้อมูลภาพแบบความน่าจะเป็นไปได้สูงสุด (Maximum likelihood classifier) จากนั้นกำหนดจุดตัวอย่าง (Training area) ของภูมิฐานทั้ง 8 รูปแบบตัวอย่างละ 30 กลุ่มตัวอย่างรวม 240 พื้นที่ (Chairat, 2008, p. 30-31) ซึ่งการจำแนกลักษณะภูมิฐานได้กำหนดมาตรฐานการจำแนก

ตามหลักการของ U.S.D.A. Forest Service (1998, p.51) และใช้ข้อมูลระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model-Dem) ร่วมในการแปลความหมายทางธรณีสัณฐานด้วย ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงเป็นค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) และค่าสัมประสิทธิ์ Kappa Coefficient (KHAT) เพื่อประเมินความถูกต้องหลังการจำแนกประเภทข้อมูลต่าง ๆ ที่ปรากฏบนภาพถ่ายดาวเทียมโดยค่าเกณฑ์การจำแนกมีดังนี้ < 0 หมายถึง ข้อมูลการจำแนกยอมรับไม่ได้ 0.01 – 0.40 หมายถึง ระดับพอใช้ 0.41 – 0.60 หมายถึง ระดับกลาง 0.61 – 0.80 หมายถึง ระดับดี และ 0.81 – 1.00 หมายถึง ระดับดีมาก (Lillesand & Keifer, 2000, p. 611-612)

4. นำข้อมูลภูมิสารสนเทศที่ได้มาจัดสร้างเส้นแนวชายฝั่งโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลโดยวิธีการจัดประเภทใหม่ (Reclassification) เพื่อแก้ไขข้อมูลที่มีความผิดหลังจากการแปลผล ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงเป็นสัดส่วนภูมิสารสนเทศแต่ละชนิดในแผนที่ ตั้งแต่ปี 2521, 2541 และ 2561 พร้อมกับการ

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงลักษณะภูมิสารสนเทศ (Change Detection) โดยใช้โปรแกรมระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Lillesand & Keifer, 2000, p. 619) ดังสมการ

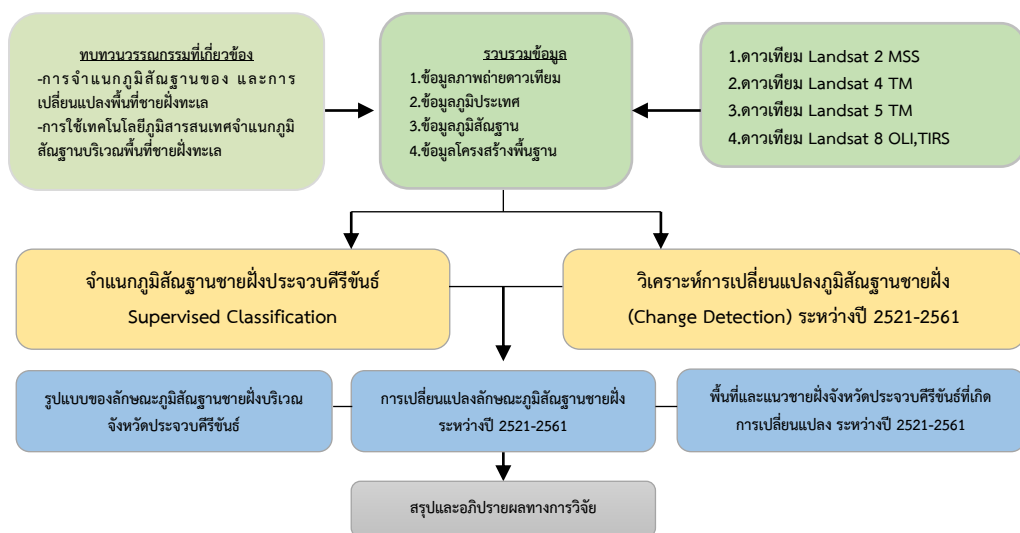
$$\Delta = [(A2 - A1) / A1 \times 100] / (T2 - T1)$$

โดยที่ Δ คือ สัดส่วนรูปแบบภูมิสารสนเทศที่เปลี่ยนแปลงไป (ร้อยละ)

A1 คือ ประเภทของรูปแบบภูมิสารสนเทศ ณ เวลาที่หนึ่ง (T1)

A2 คือ ประเภทของรูปแบบภูมิสารสนเทศ ณ เวลาที่สอง (T2)

ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงเป็นสัดส่วนรูปแบบภูมิสารสนเทศของแต่ละชนิดในแผนที่ ซึ่งแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงภูมิสารสนเทศ และพื้นที่ที่ถูกกัดเซาะชายฝั่ง ตั้งแต่ปี 2521 ถึง 2561 พร้อมกับการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง (Change Detection) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ Tabulate area ใน ArcMap 10.4 ขั้นตอนการศึกษาแสดงรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการศึกษา

ผลการวิจัย

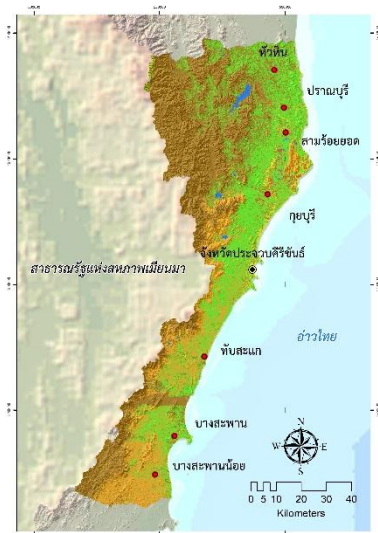
1. การจำแนกลักษณะภูมิฐานบริเวณ
จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ระหว่างปี 2521-2561

จากการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียม 3 ช่วงเวลา พบว่าปรากฏภูมิฐานมีพื้นที่ราบ (P) มากที่สุด แสดงสีเขียวในแผนที่ (รูปที่ 3) มีเนื้อที่ 3,840.14, 3,839.59 และ 3,835.42 ตร.กม. ตามลำดับ (ตารางที่ 2) เนื่องจากพื้นที่ส่วนมากอยู่ภายในแผ่นดินไม่ติดกับบริเวณชายฝั่งทะเลจึงทำให้ได้รับผลกระทบจากการกัดเซาะชายฝั่งน้อย

หรือไม่ได้รับผลกระทบเลย การเกิดพื้นที่ราบเป็นบริเวณกว้างเนื่องจากการเกิดกระบวนการพัดพาตะกอนจากเทือกเขาหินแกรนิต และหินปูนมาโดยกระบวนการของทางน้ำ ส่วนภูมิฐานบริเวณชายฝั่งปรากฏพื้นที่ลดลงตลอดช่วงเวลาที่ได้แก่ ภูมิฐานของหาดทราย (B) คือ 28.21, 26.90 และ 23.71 ตร.กม. ตามลำดับ และภูมิฐานปากแม่น้ำ (D) คือ 8.16, 7.64 และ 5.12 ตร.กม. ตามลำดับ โดยแสดงเป็นแผนที่ดังรูปที่ 3 และสัดส่วนภูมิฐานดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนของพื้นที่ลักษณะภูมิฐานบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ปี 2521-2561

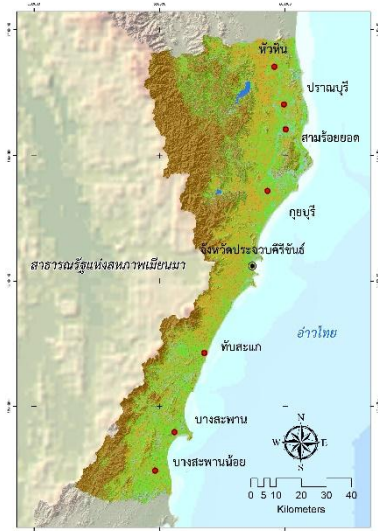
ภูมิฐาน	ปี 2521		ปี 2541		ปี 2561	
	ตร.กม.	ร้อยละ	ตร.กม.	ร้อยละ	ตร.กม.	ร้อยละ
AF	427.39	6.66	424.85	6.63	423.91	6.61
LM	68.44	1.07	70.81	1.10	79.62	1.24
WL	102.06	1.59	104.03	1.62	110.45	1.72
SD	17.67	0.28	18.74	0.29	15.74	0.25
D	8.16	0.13	7.64	0.12	5.12	0.08
B	28.21	0.44	26.90	0.42	23.71	0.37
GS	1920.74	29.95	1920.33	29.95	1918.54	29.92
P	3,840.14	59.88	3839.59	59.88	3,835.42	59.82
รวม	6412	100	6412	100	6412	100
OA (%)		65.008		75.986		72.602
KHAT (%)		64.838		74.992		71.202



ปี 2521



ปี 2541



ปี 2561



รูปที่ 3 แผนที่ลักษณะภูมิฐานบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในปี 2521-2561 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการจำแนกแบบกำกับดูแล

2. การเปลี่ยนแปลงพื้นที่และแนวชายฝั่งบริเวณพื้นที่ชายฝั่งจังหวัดประจวบคีรีขันธ์

การเปลี่ยนแปลงภูมิฐานบริเวณชายฝั่งทะเลระหว่างปี 2521- 2561 (ตารางที่ 3) ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดคือ ภูมิฐานของหาดทราย (B) ที่เปลี่ยน

เป็นพื้นที่ภาคพื้นทะเล (Sea) ถึง 165.23 ตร.กม. รองลงมาถูกเปลี่ยนแปลงเป็นที่ราบ (P) เพียง 3.46 ตร.กม. ทั้งนี้นอกจากพื้นที่ชายหาดที่เปลี่ยนแปลงไปยังพบว่าตะกอนปากแม่น้ำ (D) ได้ถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นภาคพื้นทะเลเช่นกันถึง 54.78 ตร.กม. โดย

มีปัจจัยที่สำคัญคือการขยายตัวของสิ่งปลูกสร้างใกล้เขตแนวชายฝั่งทะเลไม่ว่าจะเป็นหมู่บ้านชาวประมง ท่าเรือน้ำลึก ซึ่งบางบริเวณได้สร้างสิ่งปลูกสร้างยื่นออกไปในทะเลโดยขาดการวางแผนส่วนพื้นที่อื่น ๆ ที่ได้รับผลกระทบได้แก่ พรุหรือที่ลุ่มชื้นแฉะและที่ลุ่มน้ำขัง (WL) นั้นถูกเปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่ราบ (P) ซึ่งเกิดจากการขยับขยายพื้นที่แหล่งอนุบาลสัตว์น้ำและพื้นที่เกษตรกรรมทำให้ลดจำนวนพื้นที่ถึง 52.46 ตร.กม.

จากการแปลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ตลอดแนวชายฝั่งทะเล ตั้งแต่ปี 2521-2561 พบว่า

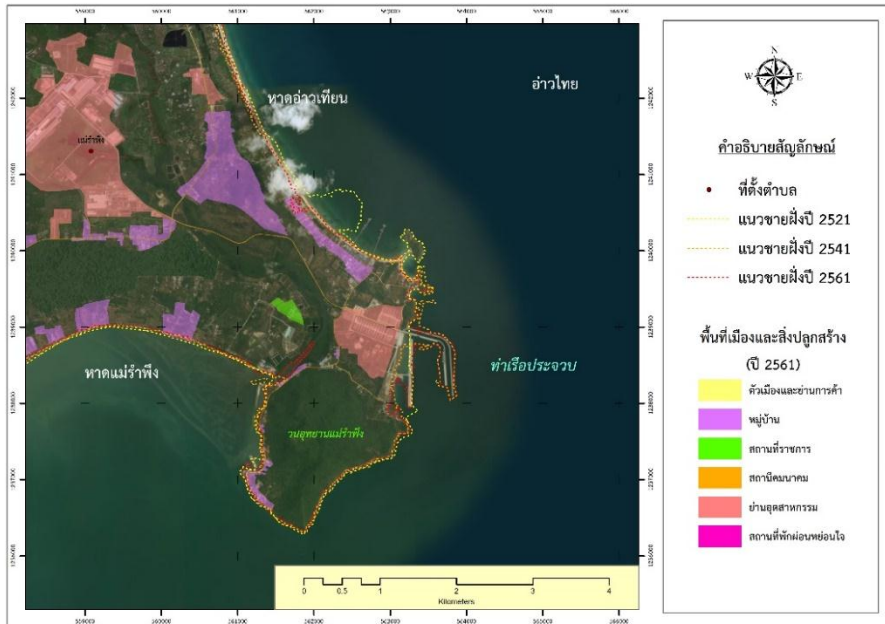
ชายฝั่งทะเลถูกกัดเซาะมากที่สุดคือตำบลแม่รำพึง อำเภอบางสะพานมากถึง 129 ตร.กม. รองลงมาคือ ตำบลนาหูกวาง อำเภอทับสะแก พบพื้นที่การกัดเซาะถึง 75 ตร.กม. ซึ่งตำบลแม่รำพึงปรากฏท่าเรือน้ำลึกและมีสิ่งปลูกสร้างใกล้แนวชายฝั่ง ทำให้อัตราการกัดเซาะรุนแรงที่สุด ดังรูปที่ 4 แสดงแนวเส้นชายฝั่งปี 2521 (สีเหลือง) ปรากฏระยะห่างจากแนวปัจจุบัน (สีแดง) ถึง 50 เมตร แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการก่อสร้างท่าเรือ และย่านอุตสาหกรรมใกล้ชายฝั่งทะเล

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงภูมิฐานบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ระหว่างปี 2521-2561

		รูปแบบภูมิฐานปี 2561								
		LM	WL	AF	D	SD	GM	B	P	Sea
รูปแบบภูมิฐานปี 2521	LM	65.87	0	0	0	0.14	0	1.27	0	0
	WL	0	47.56	0	1.27	0	0	0	52.46	0
	AF	0	2.6	94.54	0	0	0	0	128.57	0
	D	0	0	0	7.5	0	0	3.71	0	54.78
	SD	0	0.69	0	0.94	0.72	0	0.59	17.15	0
	GM	0	0	0	0	0	1914.21	0	0	0
	B	0	0.21	0	2.17	0.43	0	321.49	3.46	165.23
	P	0	119.76	21.45	0	27.96	0	2.31	3421.47	0
	Sea	0	0	0	5.32	0	0	11.23	0	554.16

ตารางที่ 4 พื้นที่การกัดเซาะชายฝั่งบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ปีระหว่างปี 2521-2561

ตำแหน่ง		พื้นที่การกัดเซาะชายฝั่ง (ตร.กม.)
อำเภอ	ตำบล	2521-2561
หัวหิน	หัวหิน	18
ปราณบุรี	ปากน้ำปราณ	26
สามร้อยยอด	สามร้อยยอด	61
กุยบุรี	กุยเหนือ	56
เมืองประจวบคีรีขันธ์	อ่าวน้อย	54
เมืองประจวบคีรีขันธ์	ห้วยทราย	43
ทับสะแก	นาหูกวาง	75
บางสะพาน	แม่รำพึง	129
บางสะพานน้อย	ปากแพรก	41
รวม (เมตร)		503



รูปที่ 4 แนวชายฝั่งระหว่างปี 2521-2561 บริเวณตำบลแม่รำพึง อำเภอบางสะพาน สำหรับการประกอบ การวางแผนเพื่อหามาตรการลดผลกระทบจากการกัดเซาะแนวชายฝั่งทะเล

สรุปและอภิปรายผล

การรับรู้ระยะไกลเป็นเครื่องมือที่สามารถ บันทึกลักษณะภูมิประเทศได้เป็นบริเวณกว้าง โดยเฉพาะภาพถ่ายดาวเทียม Landsat เป็นประโยชน์ ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของแนวชายฝั่งทะเล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ทราบการเปลี่ยนแปลง พื้นที่ชายฝั่งทะเลบริเวณจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ระหว่างปี 2521-2561 พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เกิด การเปลี่ยนแปลงบริเวณตอนล่างของจังหวัด ปรากฏบริเวณปากแม่น้ำและหาดทรายอันเป็นผล มาจากการขยายตัวด้านท่องเที่ยวและอุตสาหกรรม ซึ่งสอดคล้องกับ Siripong (2010) ที่ได้ศึกษา การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ชายฝั่งของประเทศไทย ในปี 1987-2002 ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ ชายฝั่งในด้านการขยายตัวของสิ่งก่อสร้างตลอด แนวชายฝั่ง ไม่ว่าจะเป็นสถานประกอบการด้าน ท่องเที่ยว ย่านอุตสาหกรรม และการก่อสร้างแนว กันคลื่นบริเวณท่าเรือประจวบที่ตำบลแม่รำพึง

อำเภอบางสะพาน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งคล้ายคลึง กับพื้นที่มาบตาพุด จังหวัดระยอง (น.994-995) แต่ยังไม่รุนแรงเท่า ซึ่งพื้นที่แม่รำพึงถูกกัดเซาะ เข้ามายังแผ่นดินเป็นพื้นที่ถึง 129 ตร.กม. บริเวณ ที่หายไปคือชายหาด (รูปที่ 4) ทำให้ต้องเร่งหา มาตรการป้องกันกับพื้นที่ดังกล่าว งานวิจัยชิ้นนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเชิงพื้นที่สำหรับ การจัดการพื้นที่แนวชายฝั่งใน พร้อมกับเป็น ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่อป้องกันการกัดเซาะชายฝั่ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นรูปธรรม

References

- Burak, S., Dogan, E., Gazioğlu, L. (2004). Impact of Urbanization and Tourism on Coastal Environment. *Ocean and Coastal Management*. 47(9), 515-527.

- Chairat, W. (2008). Coastline change due to Storm Surge during 1989-2006 at Amphoe Hua Hin, Changwat Prachup Khiri Khan, Southern Thailand. The Degree of Master of Science, Earth Science program, Chulalongkorn University.
- Choowong, M., Songmuang, R., Phantuwongraj, S., Daorerk, V., Charusiri, P., Nume, L., (2009), Monitoring Beach Morphology changes and Coastal Sediment balance from Prachuap Khiri Khan, Thailand. *BEST 2009*. 3, 1-10.
- Department of Mineral Resources. (2008). *The Geological Classification for Geological and Mineral Resources Management, Prachuap Khiri Khan*. (1). Bangkok: Department of Mineral Resources, Ministry of Natural Resources and Environment.
- Haskins, D.M., Correll, C.S., Foster, R.A., Chatoian, J.M., Fincher, J.M., Strenger, S., Keys, J.E. Jr., Maxwell, J.R., King, T. (1998), *A Geomorphic Classification System*. (1). Washington, D.C. :U.S.D.A. Forest Service.
- Lillesand, T.M., and Keifer, R.W., 2000. *Remote Sensing and image interpretation*. 4th ed. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Shanzhong, Q., Fang, L. (2008). Land use change and Environmental Hazard in Coastal area: The case of Laizhou Gulf, China. *Journal of Coastal Research*. 24(5), 1189-1193.
- Siripong, A., (2010), Detect the Coastline Changes in Thailand by Remote Sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. 8, 992-996.
- Xuejie, L., Damen, M.C.J. (2010). Coastline Change Detection with Satellite Remote Sensing for Environmental Management of Pearl River Estuary, China. *Journal of Marine Systems*. 82, S54- S61

การประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดดอกอัญชันเพื่อบ่งบอกความสดของเนื้อปลา

รัชฎาพร ใจมั่น^{1*}, วรณญา หล้าดวงดี¹, ณัฐพงศ์ กันหา²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Email: ratchadaporn.jaimun@gmail.com^{1*}

Received: February 11, 2019

Revised: May 17, 2019

Accepted: May 21, 2019

บทคัดย่อ

สารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชันมีสีสด และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (pH) จึงสามารถนำมาใช้เป็นอินดิเคเตอร์ได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตฟิล์มอินดิเคเตอร์บ่งบอกความสดจากสารสกัดดอกอัญชัน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเนื้อปลา โดยเลือกศึกษากับเนื้อปลาแซลมอนและเนื้อปลาดอรี่ การเตรียมฟิล์มอินดิเคเตอร์ใช้ของผสมระหว่างสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ความเข้มข้นร้อยละ 0.2 (น้ำหนักต่อปริมาตร) กับสารสกัดดอกอัญชันที่ปรับค่า pH ให้เท่ากับ 4 เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มที่ได้ในการเป็นอินดิเคเตอร์ด้วยวิธีการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 2-9 สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ทันที โดยที่ค่า pH 2 ฟิล์มอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นสีจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงและสีน้ำเงินตามลำดับ จนกระทั่งที่ค่า pH 7 ฟิล์มอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนเป็นสีเขียว เช่นเดียวกับการทดสอบโดยให้สัมผัสกับไอระเหยของกรดอะซิติกและแอมโมเนีย ที่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ทันที กล่าวคือ เมื่อฟิล์มสัมผัสกับไอระเหยของกรดจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง แล้วจึงเปลี่ยนเป็นสีชมพู ในขณะที่เมื่อสัมผัสกับไอระเหยของด่างจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปจนกระทั่งเป็นสีเขียว เมื่อนำฟิล์มอินดิเคเตอร์ไปประยุกต์ใช้กับเนื้อปลาแซลมอนและปลาดอรี่ ที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิแช่เย็น 4 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 วัน โดยเก็บข้อมูลทุก 3 วัน พบว่าฟิล์มอินดิเคเตอร์มีการเปลี่ยนสีตามระยะเวลาการเก็บรักษาเนื้อปลา โดยเริ่มเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินซีด จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีเขียว ซึ่งการเปลี่ยนสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อปลา เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานทางการค้า การศึกษานี้ได้ทำการออกแบบฉลากอินดิเคเตอร์ แล้วนำไปให้ผู้บริโภคจำนวน 100 ราย ประเมินด้านความเข้าใจความหมายของฉลากอินดิเคเตอร์ ผลจากการศึกษา พบว่าผู้บริโภคส่วนใหญ่สามารถเข้าใจความหมายบนฉลากอินดิเคเตอร์ที่อธิบายโดยใช้ข้อความสั้น ๆ ได้ถูกต้องมากกว่าการใช้สัญลักษณ์

คำสำคัญ : ฟิล์มอินดิเคเตอร์, สารสกัดดอกอัญชัน, เนื้อปลา

Application of Indicator Film from Butterfly Pea Flower Extract for Detecting Freshness of Fish Fillets

Ratchadaporn Jaimun^{1*}, Waranya Laduangdee¹, Nattapong Kanha²

¹Printing and Packaging Technology, Faculty of Arts and Architecture,
Rajamangala University of Technology Lanna

²Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University

Email: ratchadaporn.jaimun@gmail.com^{1*}

Received: February 11, 2019

Revised: May 17, 2019

Accepted: May 21, 2019

Abstract

Color of anthocyanin extract from butterfly pea is bright and can easily be changed by pH value, so it can be used as pH indicator. The objectives of this study were to produce the freshness indicator for application with two fish fillets (pangasius dory and salmon). The indicator film was prepared by using 2 (% w/v) carboxymethyl cellulose incorporating with butterfly pea extracts at pH 4. For evaluating the efficacy of film as pH indicator by immersion test, the results found that the color of indicator film can be changed immediately after immersing films into different pH buffers (pH values of 2 to 9). At pH 2, the indicator film exhibited a pink color. When the pH value increased, its color was changed as more purple to blue shade and became a green color at pH 7. Likewise, vapor diffusion test using acetic acid and ammonia as an evaporating agent showed the great result of color change that it is a function of time. The color was increasingly changed from blue to pink, when the film was exposed with a vapor of acetic acid solution for a longer time while changed from blue to green when exposed with a vapor of ammonia. The film indicator was applied on salmon and dory fillets and stored at 4 °C for 15 days. It was found that the color change of film indicator was depended on storage time. Its color was changed from blue to deep blue, and finally green. The result also demonstrated that the color change of film indicator was related to the quality change of fish fillet. For evaluating its feasibility to be used for commercial purpose, fish fillet labels were designed and conducted with 100 consumers. It was found that most of consumers had more correct the meaning of indicator designed using a short text than indicator designed using a symbol.

Keywords : Indicator film, Butterfly pea flower extract, Fish fillets

บทนำ

บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (intelligent packaging) เป็นนวัตกรรมบรรจุภัณฑ์ที่ผู้ผลิตอาหารให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากผู้บริโภคในยุคปัจจุบันต้องการอาหารที่สดใหม่ ปลอดภัย หรือผ่านการถนอมคุณภาพด้วยวิธีทางธรรมชาติ ผู้ผลิตอาหารจึงต้องหาเครื่องมือที่สามารถสร้างความมั่นใจให้ผู้บริโภคทราบถึงคุณภาพของสินค้านั้น อีกทั้งความซับซ้อนของระบบโลจิสติกส์ในการกระจายสินค้า ทำให้จำเป็นต้องมีเครื่องมือที่สามารถบอกคุณภาพอาหารที่สังเกตได้ง่ายด้วยตาเปล่า จึงเป็นที่มาของการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น อินดิเคเตอร์ความสด อินดิเคเตอร์ความสุก อินดิเคเตอร์รอยร้าว เป็นต้น มีลักษณะเป็นวัตถุชิ้นเล็ก ๆ ติดบนบรรจุภัณฑ์ ซึ่งติดได้ทั้งด้านนอกและด้านใน อินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนสีเมื่อสถานะของอาหารเปลี่ยนแปลงไป (poovarodom, 2007, p. 321)

อินดิเคเตอร์ความสด ใช้บอกคุณภาพของอาหารด้านจุลินทรีย์ นอกจากนี้อาจหมายถึงรวมถึงคุณภาพด้านอื่น ๆ ที่เหมาะสมกับการบริโภคในช่วงเวลานั้น ๆ การทำงานของอินดิเคเตอร์เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีในอินดิเคเตอร์กับสารที่ได้จากการเมตาบอไลต์ของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ (Poovarodom, 2007, pp. 321-322) อินดิเคเตอร์ความสดที่มีประสิทธิภาพดีจะต้องสามารถบ่งชี้คุณภาพของอาหารได้แม่นยำและสังเกตได้ง่าย การเลือกชนิดของสารอินดิเคเตอร์ที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการนำมาใช้ผลิตเป็นอินดิเคเตอร์ โดยทั่วไปสารที่มีความไวต่อค่าความเป็นกรด-เบสนิยมนำมาใช้ผลิตเป็นอินดิเคเตอร์มากที่สุด เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ในช่วงค่า pH หนึ่ง ๆ จึงสามารถบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงความสดของอาหารได้ง่าย งานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า สารแอนโทไซยานิน

(anthocyanin) สามารถประยุกต์ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ได้ ทั้งในอินดิเคเตอร์บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของเวลาและอุณหภูมิ (time-temperature indicator) และอินดิเคเตอร์บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของค่า pH (pH indicator) (Zhang et al., 2014, pp. 268-273; Pereira et al., 2014, pp. 180-188) ดอกอัญชันมีสารแอนโทไซยานิน สามารถเปลี่ยนแปลงสีได้ตามค่า pH โดยจะมีสีแดง-น้ำเงินในสภาวะที่เป็นกรด (pH 1-6) มีสีน้ำเงินอมเขียวในสภาวะที่เป็นกลาง (pH 7) และจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวในสภาวะที่เป็นเบส (pH 8-14) แอนโทไซยานินที่ได้จากดอกอัญชันมีข้อได้เปรียบกว่าแหล่งอื่น เนื่องจากเป็นอะซิลเลตแอนโทไซยานิน (acylated anthocyanin) ที่มีความคงตัวสูง Yonekura-Sakakibara et al. (2009, pp. 178-179) มีสีที่สด และให้เฉดสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละสภาวะความเป็นกรด-เบส จึงมีความน่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นอินดิเคเตอร์

ปัจจุบันผู้บริโภคนิยมรับประทานเนื้อปลาอย่างแพร่หลาย ทั้งรูปแบบปรุงสุกและรับประทานดิบ เช่น ซาชิมิ หรือข้าวปั้นหน้าปลาดิบในอาหารญี่ปุ่น เป็นต้น ซึ่งหัวใจสำคัญของการรับประทานแบบดิบนั้น เนื้อปลาดองสด สะอาด และไม่มีกลิ่นคาว เนื้อปลาเหล่านี้มักมีราคาสูง และถูกหั่นเป็นชิ้นบรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ที่เป็นที่เรียบร้อยแล้ว การสังเกตลักษณะภายนอกอาจยังไม่สร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคได้เพียงพอในการเลือกซื้อ หากมีเครื่องมือที่ช่วยบ่งชี้คุณภาพอาหารที่แม่นยำและสังเกตได้ง่าย ก็จะสามารถตอบโจทย์ความต้องการของผู้บริโภคในยุคปัจจุบันได้ดียิ่งขึ้น

จากความสำคัญของบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ การศึกษานี้ได้นำสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชันมาผลิตเป็นฟิล์มอินดิเคเตอร์ความสด และนำอินดิเคเตอร์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับเนื้อปลา ซึ่งสามารถเน่าเสียได้ง่ายจากการย่อยของจุลินทรีย์ และทำให้เกิดการปลดปล่อยสารที่มีคุณสมบัติเป็นเบสในกลุ่มสารประกอบไนโตรเจนที่

ระเหยได้ (total volatile basic nitrogen, TVBN) Amegovu et al. (2012, pp. 654) เพื่อป้องกันคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการเก็บรักษา และทำการออกแบบฉลากอินดิเคเตอร์ให้มีรูปแบบที่น่านสนใจและง่ายต่อการใช้งาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อผลิตฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดดอกอัญชัน
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มอินดิเคเตอร์ในการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสสารละลายกรดและเบส
3. เพื่อประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดดอกอัญชันกับเนื้อปลา
4. เพื่อออกแบบฉลากอินดิเคเตอร์บ่งบอกความสดของเนื้อปลา และประเมินความเข้าใจความหมายของฉลากอินดิเคเตอร์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การผลิตฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัดดอกอัญชัน
 - 1.1 เตรียมวัตถุดิบ โดยทำการอบดอกอัญชันในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นนำดอกที่อบเสร็จแล้วบดให้เป็นผงแล้วจึงเก็บใส่ถุงพอลียัล
 - 1.2 เตรียมสารละลายจากผงอัญชันต่อน้ำต่อเอทานอล ในอัตราส่วน 19 กรัม : 190 มิลลิลิตร : 190 มิลลิลิตร โดยคนให้เข้ากันบนเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (hot plate stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการกรองแยกกากด้วยผ้าขาวบาง 1 รอบ เพื่อแยกส่วนกากทิ้ง ส่วนสารละลายนำมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ และระเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องระเหยสารที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง (Kanha & Laokuldilok, 2014, pp. 412) ปรับค่า pH ของสารสกัดให้เป็น 4 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ สาเหตุที่ต้อง

ปรับค่า pH เนื่องจากต้องการให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ได้ชัดเจนขึ้น ถ้าเตรียมที่ค่า pH สูงกว่านี้ อาทิ ค่า pH 7 ซึ่งฟิล์มมีสีน้ำเงินอมเขียว เมื่อฟิล์มสัมผัสกับ TVBN จะเปลี่ยนเป็นสีแดง ซึ่งมีสีค่อนข้างใกล้เคียงกันไป จึงไม่เหมาะสมที่จะเตรียมที่ค่า pH นี้ แต่หากเตรียมที่ค่า pH ต่ำ อาทิ ค่า pH 2 แอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปของ flavylium cation ซึ่งคงตัวมากกว่ารูปอื่น ๆ จึงอาจเกิดการเปลี่ยนสีได้ยากกว่า และหากมีการปลดปล่อย TVBN ที่ไม่มากพอ อาจไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟิล์มขึ้นได้ จึงไม่เลือกเตรียมฟิล์มที่ค่า pH ต่ำเกินไป

1.3 ละลายสารคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose, CMC) ปริมาณ 2 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร กวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที เติมน้ำเกลือ 1 กรัม เตรียมฟิล์มอินดิเคเตอร์ที่อัตราส่วนของสารละลาย CMC 20 กรัม ต่อปริมาณสารสกัดดอกอัญชัน 800 ไมโครลิตร กวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วทำการไล่ฟองอากาศด้วยเครื่องไล่ก๊าซด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Degas ultrasonic cleaner)

1.4 ขึ้นรูปฟิล์มโดยเทสารผสมที่ได้ปริมาณ 20 กรัม ลงในเพลทแก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ปล่อยให้แห้งให้แห้งนาน 48 ชั่วโมง

2. การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มในการเป็นอินดิเคเตอร์

2.1 ทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มอินดิเคเตอร์ในการเปลี่ยนสีเมื่อจุ่มในสารละลายกรดและด่าง โดยนำฟิล์มอินดิเคเตอร์ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร ไปแช่ในเพลทแก้วที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH ตั้งแต่ 2 ถึง 9 สังเกตการเปลี่ยนสี บันทึกผล

2.2 ทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มอินดิเคเตอร์ในการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของสารละลายกรดและเบส โดยนำฟิล์มอินดิเคเตอร์ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร มาแปะติดบนฝาเพลท จากนั้นนำ

ผ้าเพลทมาครอบบนเพลทแก้วที่บรรจุกรดอะซิติก และเพลทแก้วที่บรรจุแอมโมเนีย สังเกตการเปลี่ยนสี บันทึกลงผล

3. การประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์กับเนื้อปลา การศึกษานี้เลือกใช้เนื้อปลาแซลมอน และเนื้อ ปลาดอรี่ เป็นตัวอย่างในการทดสอบ

3.1 บรรจุเนื้อปลาน้ำหนักโดยเฉลี่ย 40 – 50 กรัม ลงในถาดพลาสติกพร้อมฟิล์มยึด

3.2 ติดฟิล์มอินดิเคเตอร์ขนาด 2 x 4 เซนติเมตร บนฟิล์มยึด จากนั้นเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ แช่เย็น (4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 15 วัน โดย สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ ควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทาง กายภาพของเนื้อปลา ได้แก่ สี กลิ่น เนื้อสัมผัส และการปรากฏของจุลินทรีย์ บันทึกลงผลทุก ๆ 3 วัน ทั้งนี้ใช้บรรจุภัณฑ์ติดฟิล์มอินดิเคเตอร์ ที่ไม่ได้ บรรจุเนื้อปลาและเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น เป็นชุดควบคุม

4. การออกแบบฉลากอินดิเคเตอร์สำหรับ เนื้อปลา

4.1 เขียนแบบภาพร่าง จากนั้นพัฒนา แบบร่างด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator

4.2 จัดทำฉลากต้นแบบ (mock up)

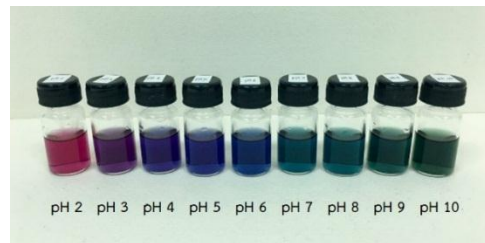
4.3 ประเมินความเข้าใจในการใช้งานกับ ผู้บริโภคจำนวน 100 ราย

ผลการวิจัย

1. ลักษณะฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสารสกัด ดอกอัญชัน

สารสกัดที่ได้จากดอกอัญชัน มีลักษณะเป็น ของเหลว ไม่ข้นหนืด และมีสีน้ำเงินเข้ม สามารถ รวมตัวกับน้ำได้ดี จึงสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน กับสารละลาย CMC ที่ใช้เป็นสารก่อฟิล์ม (film forming agent) ได้ โดยลักษณะเฉดสีของสารสกัด เมื่ออยู่ในระบบที่มีค่า pH แตกต่างกัน แสดงได้ ดังรูปที่ 1 กล่าวคือ ที่ค่า pH 2 จะมีสีชมพู ที่ค่า pH

3 จะมีสีม่วงแดง ที่ค่า pH 3-6 จะมีสีน้ำเงิน ที่ค่า pH 7-8 จะมีสีน้ำเงินอมเขียว และที่ค่า pH 9-10 จะมีสีเขียว เมื่อผสมสารสกัดอัญชันกับสารละลาย CMC วัดค่า pH ได้เท่ากับ 4 ลักษณะแผ่นฟิล์มที่ได้ มีสีที่สม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น มีความยืดหยุ่นดี แผ่นฟิล์มค่อนข้างบาง เหมาะแก่การนำไป ประยุกต์ใช้ (รูปที่ 2)



รูปที่ 1 ลักษณะเฉดสีของสารสกัดดอกอัญชัน เมื่ออยู่ในระบบที่มีค่า pH แตกต่างกัน

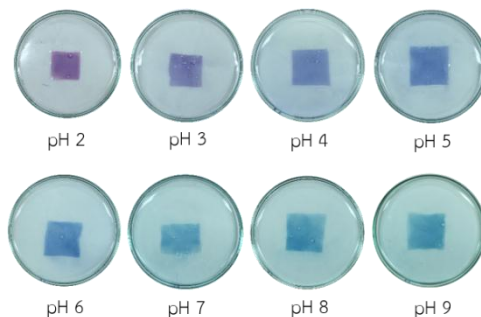


รูปที่ 2 ความสามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ระหว่างสารสกัดดอกอัญชันและสารก่อฟิล์ม

2. ประสิทธิภาพของฟิล์มในการเป็นอินดิเคเตอร์

จากการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มอินดิเคเตอร์ ด้วยวิธีการจุ่มแผ่นฟิล์มลงในสารละลายบัฟเฟอร์ ที่มีค่า pH แตกต่างกัน ตั้งแต่ 2 ถึง 9 สามารถ สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ทันทีที่จุ่ม แผ่นฟิล์ม (รูปที่ 3) โดยฟิล์มอินดิเคเตอร์สามารถ เปลี่ยนสีได้ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนสีของสารสกัด อัญชัน (รูปที่ 1) จากรูปที่ 3 พบว่า ที่ค่า pH 2 ฟิล์มอินดิเคเตอร์จะมีสีชมพู เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น สีของแผ่นฟิล์มจะเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำเงินมากยิ่งขึ้น และเมื่อค่า pH สูงกว่า 7 สีของฟิล์มอินดิเคเตอร์จะ

เปลี่ยนเป็นสีเขียว ผลที่ได้จากการทดสอบนี้จึงช่วยยืนยันได้ว่า หากฟิล์มอินดิเคเตอร์อยู่ภายในสภาวะเปียกหรือมีของเหลวล้อมรอบ (ซึ่งเทียบได้กับการที่ฟิล์มอินดิเคเตอร์เปียกชุ่มไปด้วยน้ำ) แผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์จะยังคงสามารถเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับผลการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มอินดิเคเตอร์ในการเปลี่ยนสีเมื่อสัมผัสกับไอระเหยของสารละลายกรดและเบส พบว่า ไอระเหยของกรดอะซิติกที่ลอยขึ้นไปสัมผัสกับสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชันในฟิล์มอินดิเคเตอร์ จะทำให้สีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ที่มีสีน้ำเงินเริ่มเปลี่ยนเป็นสีม่วงแดง เมื่อทิ้งให้เกิดการสัมผัสกับไอระเหยของกรดอะซิติกเป็นระยะเวลาเวลานานขึ้น และสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนกลายเป็นสีชมพูเข้มขึ้น เช่นเดียวกับการทดสอบกับไอระเหยของแอมโมเนีย ที่ทำให้ฟิล์มอินดิเคเตอร์ค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเขียว แสดงให้เห็นว่าเมื่อฟิล์มอินดิเคเตอร์สัมผัสกับสารละลายที่มีค่า pH สูงและต่ำ แผ่นฟิล์มอินดิเคเตอร์จะเปลี่ยนสีได้เช่นเดียวกับการจุ่มในสารละลาย

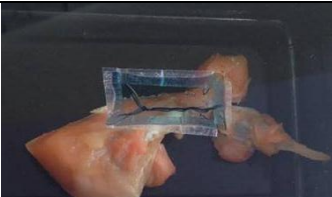
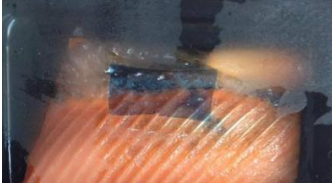
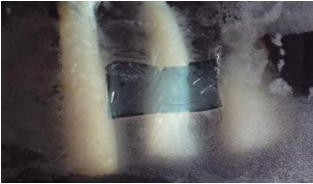
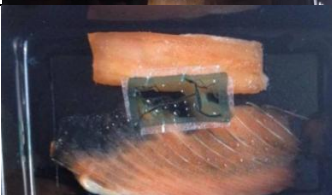
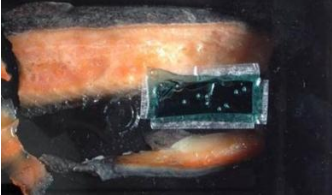
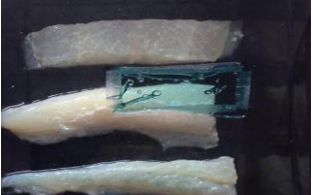
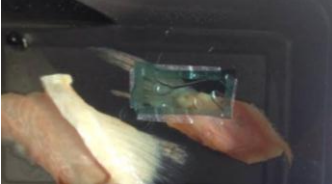


รูปที่ 3 การเปลี่ยนสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์เมื่อจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH แตกต่างกัน

3. การประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์กับเนื้อปลา

ตารางที่ 1 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ เมื่อทดสอบกับเนื้อปลาแชลมอนและเนื้อปลาตอร์รี่ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา และตารางที่ 2 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อปลาแชลมอนและปลาตอร์รี่ในระหว่างการเก็บรักษา ผลจากการสังเกตพบว่า อินดิเคเตอร์มีการเปลี่ยนสีตามระยะเวลาการเก็บรักษาเนื้อปลาที่นานขึ้น กล่าวคือ ในวันแรกที่เนื้อปลามีความสดใหม่ และคุณภาพของเนื้อปลายังมีสภาพดี สีของอินดิเคเตอร์ยังคงไม่เปลี่ยน และเริ่มเป็นสีน้ำเงินซีดในวันที่ 3 จนกระทั่งวันที่ 6 ของการเก็บรักษาที่เนื้อปลามีสภาพที่เลอะกุดแล้วยวบยัวสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์เริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินอมเขียวอย่างเห็นได้ชัดเจน

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์ เมื่อทดสอบกับเนื้อปลาตลอดระยะเวลา 15 วัน

วันที่	การเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์				
	เนื้อปลาแซลมอน	ชุดทดลอง	เนื้อปลาดอรี่	ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
0		น้ำเงิน		น้ำเงิน	น้ำเงิน
1		น้ำเงิน		น้ำเงิน	น้ำเงิน
3		น้ำเงิน (เริ่มซีด)		น้ำเงิน (เริ่มซีด)	น้ำเงิน
6		น้ำเงินอมเขียว		น้ำเงินอมเขียว	น้ำเงิน
9		น้ำเงินอมเขียว		น้ำเงินอมเขียว	น้ำเงิน
12		น้ำเงินอมเขียว		น้ำเงินอมเขียว	น้ำเงิน
15		เขียว		เขียว	น้ำเงิน

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเนื้อปลาในระหว่างการเก็บรักษา

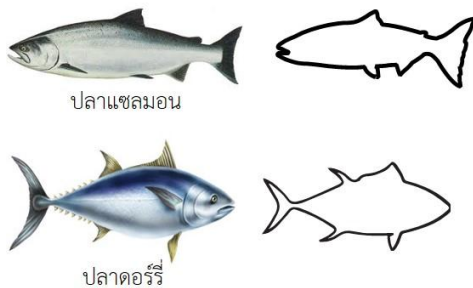
ชนิดของเนื้อปลา	ระยะเวลาเก็บรักษา (วัน)	ลักษณะการประเินทางประสาทสัมผัส		
		สีเนื้อปลา	กลิ่น	เนื้อสัมผัส
แซลมอน	0	สีส้ม	กลิ่นคาวปลาตามธรรมชาติ	สดใหม่ กดแล้วต้ง
	1	สีส้ม	กลิ่นคาวปลาตามธรรมชาติ	แห้ง แต่เนื้อปลายังคงสภาพดี กดแล้วต้ง
	3	สีส้มอมน้ำตาล	กลิ่นคาวปลาแรงขึ้น	แห้ง แต่เนื้อปลายังคงสภาพดี กดแล้วต้ง
	6	สีส้มอ่อนลง	กลิ่นเหม็นเน่า	และ กดแล้วติดมือ
	9	สีส้มซีดออกสีขาว	กลิ่นเหม็นเน่าค่อนข้างแรง	แห้ง มีเมือก กดแล้วยุบไม่คืนสภาพ
	12	สีส้มซีดออกสีขาว ใส	กลิ่นเหม็นเน่าค่อนข้างแรง	ค่อนข้างแห้ง และมีเมือก
	15	สีส้มปนเหลือง และมีจุดสีขาว	กลิ่นเหม็นเน่าค่อนข้างแรง	และ มีเมือก กดแล้วยุบไม่คืนสภาพ
ดอร์รี่	0	สีขาว บางชั้นมีสีขาวอมเหลือง	กลิ่นคาวปลาตามธรรมชาติ	นิ่ม ต้ง กดแล้วคืนสภาพ
	1	สีขาว บางชั้นมีสีขาวอมเหลือง	กลิ่นคาวปลาตามธรรมชาติ	นิ่ม ต้ง กดแล้วคืนสภาพ
	3	สีขาว บางชั้นมีสีขาวอมเหลือง	กลิ่นฉุนเล็กน้อย คล้ายคลอรีน	นิ่ม ต้ง กดแล้วคืนสภาพ
	6	สีขาวอมเหลือง	กลิ่นฉุนขึ้น	กดแล้วติดมือเล็กน้อย
	9	สีขาวอมเหลือง และมีจุดสีขาว	กลิ่นเหม็นเน่า	กดแล้วยุบไม่คืนสภาพ
	12	สีขาวซีด	กลิ่นเหม็นเน่า	มีเมือก กดแล้วยุบไม่คืนสภาพ
	15	มีจุดสีขาวทั่วเนื้อปลา	กลิ่นเหม็นเน่าค่อนข้างแรง	และ มีเมือกมาก กดแล้วยุบไม่คืนสภาพ

หลังจากวันที่ 6 ของการเก็บรักษา อินดิเคเตอร์เปลี่ยนเป็นสีเขียว เนื้อปลาทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะเป็นเมือก และกดแล้วไม่คืนตัว ผลที่ได้ยืนยันให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อปลาที่มีการปลดปล่อย TVB-

N เพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาการเก็บที่เพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน

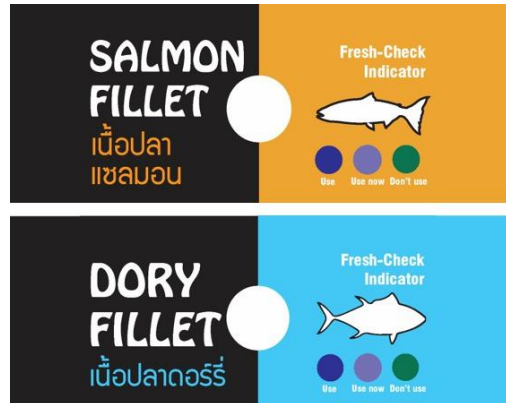
4. การออกแบบฉลากอินดิเคเตอร์สำหรับเนื้อปลา

แนวคิดในการออกแบบฉลาก ต้องการสร้างจุดสนใจให้กับอินดิเคเตอร์ จึงได้คัดเลือกตรงตำแหน่งที่ติดอินดิเคเตอร์ให้เป็นรูปร่างของปลาแซลมอนและปลาดอร์รี่ (รูปที่ 4) เมื่ออินดิเคเตอร์เปลี่ยนสี จะเห็นตัวปลาเปลี่ยนสีไป



รูปที่ 4 ได้คัทรูปร่างปลาบนฉลาก

ฉลากได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นแถบคาวาย จึงจัดองค์ประกอบโดยแบ่งออกเป็น 2 ฝั่ง ใช้สีดำตัดกับสีพื้น เนื้อปลาแซลมอนมีสีส้มแดง จึงเลือกใช้สีเหลืองเป็นสีพื้น เพื่อขับสีเนื้อปลาให้ดูน่ารับประทาน ส่วนปลาดอร์รี่มีเนื้อสีขาว เลือกใช้สีฟ้า เพื่อสื่อถึงน้ำ ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของผลิตภัณฑ์ จัดวางข้อความโดยระบุชนิดของเนื้อปลานบนฝั่งพื้นดำเพื่อให้อ่านได้ชัด สามารถรับรู้ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ฝั่งสีพื้นเป็นพื้นที่สำหรับติดอินดิเคเตอร์ มีการระบุความหมายของสีอินดิเคเตอร์ที่เปลี่ยนด้วยข้อความที่กระชับ เข้าใจง่าย แสดงภาพลักษณ์ฉลาก และฉลากต้นแบบได้ดังรูปที่ 5 และ 6



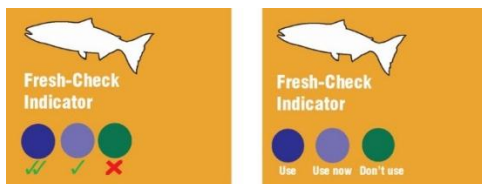
รูปที่ 5 ภาพคลื่นฉลากอินดิเคเตอร์ความสดสำหรับเนื้อปลาแซลมอนและปลาดอร์รี่



รูปที่ 6 ฉลากต้นแบบ

5. การประเมินความเข้าใจที่มีต่อฉลากอินดิเคเตอร์

การศึกษานี้ต้องการประเมินความเข้าใจของผู้บริโภคที่มีต่ออินดิเคเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบผลสัมฤทธิ์ด้านการออกแบบระหว่างการอธิบายความหมายของสีที่เปลี่ยน โดยใช้สัญลักษณ์กับการใช้ข้อความสั้น ๆ (รูปที่ 7)



(ก)

(ข)

รูปที่ 7 ผลากที่อธิบายโดยใช้สัญลักษณ์ (ก) และ
ผลากที่อธิบายด้วยข้อความสั้น ๆ (ข)

จากการประเมินความเข้าใจความหมายบน
ผลากอินดิเคเตอร์กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 ราย
พบว่าผู้บริโภคระบุว่าเข้าใจความหมายบนผลาก
แบบ (ก) ร้อยละ 46.66 และผลากแบบ (ข) ร้อยละ
73.33 เมื่อให้ระบุความหมายตามที่เข้าใจ พบว่า
ผู้บริโภคระบุความหมายของผลากแบบ
(ก) ได้ถูกต้อง คิดเป็นร้อยละ 43.33 ในขณะที่
แบบ (ข) ตอบได้ถูกต้องมากกว่า คิดเป็นร้อยละ
53.55 และเมื่อให้ผู้บริโภคเลือกระหว่างผลากที่
อธิบายโดยใช้สัญลักษณ์ กับที่ใช้ข้อความสั้น ๆ พบว่า
ผู้บริโภคส่วนใหญ่ ร้อยละ 66.66 เลือกการอธิบาย
โดยใช้ข้อความสั้น ๆ มากกว่าการอธิบายโดยใช้
สัญลักษณ์ (ร้อยละ 33.33) แสดงให้เห็นว่าการอธิบาย
ความหมายของอินดิเคเตอร์โดยใช้เพียง
สัญลักษณ์อาจไม่เพียงพอที่จะสื่อสารข้อมูลบน
ผลากให้ผู้บริโภคเข้าใจได้ถูกต้อง

สรุปและอภิปรายผล

การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มอินดิเคเตอร์
ด้วยวิธีการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 2-9
สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของสีได้ทันที
โดยที่ค่า pH 2 ฟิล์มอินดิเคเตอร์จะเป็นสีชมพู
เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นสีจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงและสีน้ำ
เงินตามลำดับ จนกระทั่งที่ค่า pH 7 ฟิล์มอินดิเคเตอร์
จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียว เช่นเดียวกับการทดสอบ
ด้วยไธเรเฮย เมื่อฟิล์มสัมผัสกับไธเรเฮยของกรด
จะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วง แล้วจึง
เปลี่ยนเป็นสีชมพู ในขณะที่เมื่อสัมผัสกับไธเรเฮย

ของเบสจะค่อยๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปจนกระทั่ง
เป็นสีเขียว เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับเนื้อปลา ผลที่ได้
ยืนยันให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์มี
ความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของ
เนื้อปลา โดยกลไกการเปลี่ยนสีของฟิล์มอินดิเคเตอร์
เป็นผลมาจาก TVBN ซึ่งมีสมบัติเป็นเบสกล่าวคือ
ภายหลังจากที่ปลาตาย เนื้อปลาจะเกิดกลไก
การย่อยสลายสารไตรเมทิลเอมีนออกไซด์
(trimethylamine oxide, TMAO) ที่เป็นผลจาก
การทำงานของเอนไซม์เกิดขึ้น (enzymatic
decomposition) และส่งผลให้เกิด TVBN ชนิด
ต่าง ๆ ขึ้น Amegovu et al. (2012, pp. 654) ซึ่ง
ประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด ได้แก่
แอมโมเนีย ไตรเมทิลเอมีน (trimethylamine,
TMA) และไดเมทิลเอมีน (dimethylamine,
DMA) Byrne et al. (2002, pp. 1338) ปริมาณ
TVBN ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า pH สูงขึ้น ทำให้สีของ
ฟิล์มอินดิเคเตอร์จากสีน้ำเงินไปเป็นสีเขียวมากขึ้น
เรื่อย ๆ

ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากฟิล์มอินดิเคเตอร์ผลิตจาก CMC
ซึ่งเป็นวัสดุชีวฐานที่ไม่ทนต่อสภาวะการใช้งานที่มี
ความชื้นสูง ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึง
แนวทางในการปรับปรุงสมบัติฟิล์มให้ดีขึ้น หรือ
หาแนวทางในการผลิตฟิล์มอินดิเคเตอร์จากวัสดุ
ชนิดอื่น

2. ควรศึกษาต่อยอดนำสารสกัดแอนโทไซยานิน
จากพืชชนิดอื่น เช่น มันม่วงและกะหล่ำปลีม่วง
เป็นต้น มาผลิตเป็นอินดิเคเตอร์ เปรียบเทียบกับ
อินดิเคเตอร์ที่ผลิตจากสารสกัดดอกอัญชัน

3. ควรศึกษาต่อยอดประยุกต์ใช้ฟิล์มอินดิเคเตอร์
จากสารสกัดดอกอัญชันกับเนื้อสัตว์และอาหาร
ทะเลชนิดอื่น ๆ เพื่อเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพ
ในการใช้งานของอินดิเคเตอร์

References

- Amegovu, A. K., Sserunjogi, M. L., Ogwok, P., & Makokha, V. (2012). Nucleotided degradation products, total volatile basic nitrogen, sensory and microbiological quality of Nile perch (*Lates niloticus*) fillets under chilled storage. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2, 653-666.
- Byrne, L., Lau, K. T., & Diamond, D. (2002). Monitoring of headspace total volatile basic nitrogen from selected fish species using reflectance spectroscopic measurements of pH sensitive films. *Analyst*, 127, 1338-1341.
- Kanha, N., & Laokuldilok, T. (2014). Effects of spray-drying temperatures on powder properties and antioxidant activities of encapsulated anthocyanins from black glutinous rice bran. *CMU NS Special Issue on Food and Applied Bioscience*, (13)1, 411-423.
- Pereira, V. C., Arruda, I. N. Q., & Stefani, R. (2014). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from Brassica oleraceae (Red Cabbage) as time temperature indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43, 180-188.
- Poovarodom, N. (2007). *Food Packaging*. (1st ed.). Bangkok: S. P. M. Printing Co., Ltd.
- Yonekura-Sakakibara, K., Nakayama, T., Yamazaki, M., & Saito, K. (2009). Modification and stabilization of anthocyanins. In Gould, K., Davies, K., & Winefield, C. (Eds.), *Anthocyanins. Biosynthesis, functions, and applications* (pp. 169 - 190). New York, NY, USA: Springer Science + Business Media, LLC.
- Zhang, X., Lu, S., & Chen, X. (2014). A visual pH sensing film using natural dyes from Bauhinia blakeana Dunn. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 198, 268-273.

การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก

กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล^{1*}, อิศรี ศรีคุณ¹, พรหมพัชร์ ดาวัลต์²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Email : kaweeppott@gmail.com^{1*}, isaree@hotmail.com¹, promphak.dawan@gmail.com²

Received: May 27, 2019

Revised: June 13, 2019

Accepted: June 18, 2019

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งในปัจจุบันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นมีประสิทธิภาพที่สูง และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า แต่ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นยังต้องได้รับการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งส่งผลให้มีราคาที่สูงและซ่อมแซมได้ยาก คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและสร้างตัวชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านพิกัดขนาด 1 กิโลวัตต์ พิกัดแรงดันอินพุต ระหว่าง 12-50 Vdc และพิกัดกระแส 20 A อีกทั้งยังสามารถปรับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า และหยุดการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านได้ พร้อมทั้งมีหน้าจอแสดงผลความเร็วรอบมอเตอร์ หลังจากทำการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านเสร็จแล้ว ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของชุดควบคุมโดยการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านทำงานแบบมีภาระทางกล เริ่มทดสอบตั้งแต่น้ำหนักโหลด 0.5 กิโลกรัม เพิ่มน้ำหนักโหลดครั้งละ 0.5 กิโลกรัม ไปจนน้ำหนักโหลด 10 กิโลกรัม ทดสอบทั้งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านหมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกาที่การทำงานเต็มพิกัดกำลัง ซึ่งผลจากการทดสอบ ได้ประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สร้างมีค่าโดยรวมเฉลี่ย 90.98 % ถือว่ามีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีขายตามท้องตลาดแต่มีราคาที่ถูกลงและสามารถซ่อมแซมได้

คำสำคัญ : ชุดควบคุมมอเตอร์, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน, ยานยนต์ไฟฟ้า

Design and Construction brushless DC Motor control for small electric vehicles

Kaweepoj Woranetsuttikul^{1*}, Isaree Srikun¹, Promphak Dawan²

¹Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology,
Phranakhon Rajabhat University

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University

Email: kaweepott@gmail.com^{1*}, isaree@hotmail.com¹, promphak.dawan@gmail.com²

Received: May 27, 2019

Revised: June 13, 2019

Accepted: June 18, 2019

Abstract

This research article presents the design and construction of a brushless DC motor controller. At present, the brushless DC motor has high efficiency and is widely popular in the electric automotive industry but the brushless DC motor control unit must still be imported from most countries. The results in expensive and difficult repairs the research team therefore designed and built a brushless DC motor control unit with a rated power of 1 kW, rated input voltage between 12-50 Vdc and 20 A rated current. It can also adjust the rotation direction of the electric motor and stop. The operation of brushless DC motors with a motor speed display screen after the construction of the brushless DC motor control unit has been completed have tested the efficiency of the control unit by testing the brushless DC motor with mechanical load start testing from 0.5 kilograms load weight, 0.5 kilogram load to 10 kilograms of load, test both brushless DC motor, turn clockwise and counter-clockwise rotation at full power. The results from the test efficiency of the brushless DC motor control unit is 90.98%, which is considered to have the efficiency close to that of a brushless DC motor control unit, which is commercially available but has a lower price and can be repaired.

Keywords : Speed Control motor, Brushless dc motor, Vehicle Electric

บทนำ

ในปัจจุบันยานยนต์ไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่สูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ข้อเสียคือมีราคาที่ยากต่อการเข้าถึงและอุปกรณ์ซ่อมแซมหายได้ยากมอเตอร์และชุดควบคุมมอเตอร์ถือเป็นหัวใจหลักของยานยนต์ไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพที่สูง คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless Direct Current Motor : BLDC Motor) เนื่องจากว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นมีประสิทธิภาพสูง มีแรงบิดที่ความเร็วรอบสูง แรงบิดต่อขนาดของมอเตอร์สูง และอายุการใช้งานยาวนานกว่ามอเตอร์ไฟฟ้าแบบใช้แปรงถ่านและมอเตอร์ชนิดอื่น ๆ (เทวินทร์ นิลสาคร, 2557)

แต่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านก็มีข้อเสียที่ราคาแพง การควบคุมทำได้ยากและซับซ้อน ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านนั้นสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด โดยชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ขายตามท้องตลาดจะเป็นชุดควบคุมที่ถูกผลิตมาจากโรงงานที่ต่างประเทศเป็นหลัก เมื่อผู้ใช้งานซื้อชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านไปแล้วเกิดชำรุดเสียหาย จะไม่สามารถซ่อมแซมแก้ไขได้เนื่องจากหาตัวแทนซ่อมแซมได้ยาก และราคาอาจสูงกว่าที่ควรจะเป็น ในประเทศไทยได้มีการวิจัยเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้าและชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านขึ้นตามความต้องการของกระทรวงพลังงานและการพัฒนาของประเทศ เช่น การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านด้วยเทคนิคการสร้างสัญญาณอินพุตจากซีโรว์ ครอสซิง (กฤตภาส ผินสันเทียะ, 2558) และการจำลองด้วยโปรแกรม Math Lab (ประจัน พลังสันติกุล, 2551) แต่เนื่องจากปัญหาด้านความเชี่ยวชาญของบุคลากรเกี่ยวกับยานยนต์ไฟฟ้ายังต้องเรียนรู้

และมีประสบการณ์เพิ่มขึ้นอีกมาก จึงส่งผลให้งานวิจัยส่วนใหญ่สามารถทำได้ในห้องแล็บแต่ไม่สามารถนำมาใช้งานได้จริงและประสิทธิภาพยังต่ำกว่าท้องตลาด

จากปัญหาที่กล่าวมาทางคณะผู้วิจัยได้เห็นประโยชน์ในการสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สำหรับใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่คณะผู้วิจัยสร้างขึ้นนั้น จะมีการดูแลรักษาและซ่อมแซมสามารถทำได้ง่าย และราคาค่าซ่อมแซมเมื่อชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านชำรุดเสียหายก็จะมีราคาที่ต่ำ สุดท้ายจะเป็นการหาประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นต่อไป

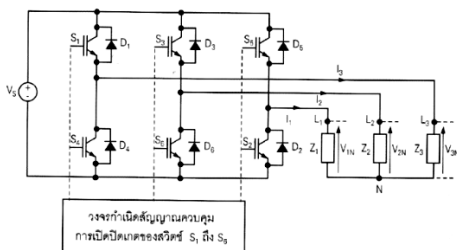
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านโดยเน้นวัสดุภายในประเทศ
2. เพื่อพัฒนาชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านให้สามารถควบคุมได้สองทิศทาง
3. เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่พัฒนาขึ้น

ระเบียบวิธีวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลและเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องอินเวอร์เตอร์(Inverter)
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือ วงจรแปลงผันพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เครื่องผกผัน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้ หรือเพื่อให้ได้ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตที่มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุต หรือใช้หลักการ

ควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น ใช้เทคนิคแบบมอดูเลต ความกว้างพัลส์ (PWM) เป็นต้น หรืออาจใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ก็ได้เช่นกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมแรงบิดได้คงที่ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานอื่น ๆ ที่ต้องการความถี่เอาต์พุตคงที่ ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการปิด-เปิด สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่น วิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา หรือแบบ 120 องศา เป็นต้น วีรเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิระเศรษฐ์ (2557)



รูปที่ 1 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์

Brushless DC motor (BLDC)

มอเตอร์ที่ใช้ตัวสับเปลี่ยนแบบอิเล็กทรอนิกส์ ปัญหาบางส่วนมอเตอร์ DC ที่ใช้แปรงถ่านจะถูกตัดทิ้งไปในมอเตอร์แบบ BLDC ซึ่งแทนที่ “สวิตช์หมุน” หรือตัวสับเปลี่ยนแบบกลไก ไปเป็นแบบสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอก ที่จะ Synchronous กับตำแหน่งของโรเตอร์ มอเตอร์แบบ BLDC มักจะมีประสิทธิภาพประมาณ 85-90% และสูงได้ถึง 96.5% ในขณะที่มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ brush gear มักจะมีประสิทธิภาพเพียง 75 -80% เท่านั้น

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูของมอเตอร์แบบ BLDC ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าด้านกลับ (back-emf)

และบางส่วนมาจากขดลวด สเตเตอร์ และบางส่วนได้จากการจัดตำแหน่งแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ เซนเซอร์แบบ Hall Effect จะถูกติดตั้งอยู่บนขดลวดสเตเตอร์เพื่อการตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์ เพื่อให้วงจรควบคุมจ่ายกระแสให้ขดลวดชุดใดชุดหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชุดเพื่อให้โรเตอร์หมุนตามความเร็วที่ต้องการ

มอเตอร์ DC ที่มีตัวสับเปลี่ยนแบบอิเล็กทรอนิกส์จะเป็นเหมือนมอเตอร์ DC ที่เอาเข้าในออกข้างนอก และในส่วนของ BLDC มอเตอร์ถูกใช้กันโดยทั่วไปในที่ซึ่งการควบคุมความเร็วอย่างแม่นยำเป็นสิ่งจำเป็น อย่างเช่นในดิสก์ไดรฟ์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือเครื่องบันทึกวีดีโอเทป, ไดรฟ์ภายใน CD, CD-ROM ฯลฯ และกลไกภายในผลิตภัณฑ์สำนักงาน เช่น พัดลม, เครื่องพิมพ์เลเซอร์ และเครื่องถ่ายเอกสาร ซึ่งมีข้อดีหลายอย่างมากกว่ามอเตอร์ธรรมดา เช่น เมื่อเทียบกับพัดลม มอเตอร์ AC ทั่วไป มอเตอร์แบบ BLDC มีขดลวดอยู่บนสเตเตอร์ที่ติดอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์ ทำให้การระบายอากาศทำได้จากภายนอก การทำงานในอากาศที่เย็นจึงทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า ตัวมอเตอร์สามารถทำเป็นโครงสร้างปิด ทำให้ไม่มีฝุ่นละอองผ่านเข้าไปได้ ทำให้สามารถควบคุมการทำงานได้แม่นยำตลอดอายุการใช้งาน เนื่องจากไม่มีตัวสับเปลี่ยนที่สึกหรอได้ อายุการใช้งานของมอเตอร์ BLDC จึงยาวนานกว่ามอเตอร์ที่ใช้แปรงและตัวสับเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญ (ศิวัะ หงส์นภา, 2547)



รูปที่ 2 BLDC Motor

2. การออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ส่วนประกอบของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยวงจรภายในชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีทั้งหมด 5 ส่วน ดังนี้

- 1) วงจรกำลัง
- 2) วงจรขับเคลื่อน
- 3) วงจรควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์
- 4) วงจรไฟเลี้ยง
- 5) วงจรแสดงผลผ่านจอ LCD

นคร ภักดีชาติ, ณัฐพล วงศ์สุนทรชัย, กฤษฎา ใจเย็น และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล (2548)

จากอุปกรณ์ที่เลือกใช้งานในการออกแบบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านจะมีคุณสมบัติด้านไฟฟ้าดังนี้

รับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า = 12 – 50 Vdc

รับกระแสไฟฟ้าด้านเข้า = ≤ 20 A

รับกำลังไฟฟ้าด้านเข้า = ≤ 1 kW ที่ใช้งานสมาร์ทเลิร์นนิ่ง (2543)

สำหรับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านทางผู้วิจัยทำการออกแบบจะใช้งานแผ่น PCB ขนาดกว้าง 5 นิ้ว และยาว 7 นิ้ว โดยออกแบบลายวงจรผ่านโปรแกรม Altium Designer กฤตภาส ผินสันเทียะ, กวีพจน์ วรเนตรสุทธิกุล, กิตติศักดิ์ เส้นเศษ และ กนิษฐนันท์ มั่นพรรษา (2554)

การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านประกอบด้วยดังต่อไปนี้

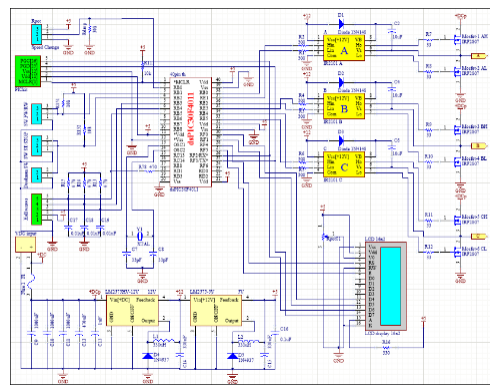
1) อุปกรณ์ส่งกำลังไฟฟ้าใช้ Mosfet เบอร์ IFR 2807 ชนิด N type พิกัดแรงดัน 75 Vdc, 82 A, 13 m Ω

2) อุปกรณ์ขับเคลื่อน ใช้ IR2101 เพื่อยกระดับแรงดันจาก 5 Vdc เป็น 12 Vdc

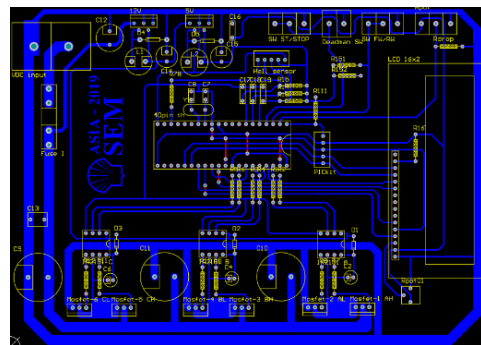
3) อุปกรณ์ควบคุมการทำงาน เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ 30F4011 ที่มีฟังก์ชันในการสร้างสัญญาณ PWM ในการควบคุมมอเตอร์ BLDC ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4) ระบบไฟเลี้ยงใช้ LM-2575-5V สำหรับเลี้ยงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และ LM-2575-12V สำหรับวงจรขับเคลื่อน

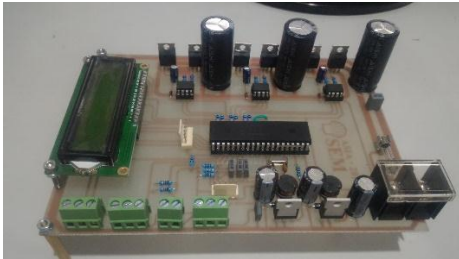
จากรายละเอียดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลัก ๆ ดังกล่าวได้นำเสนอในรูปที่ 3, 4 และ 5 ดังนี้



รูปที่ 3 BLDC Drive Circuit



รูปที่ 4 ลายวงจรสำหรับใส่ PCB



รูปที่ 5 Electric Drive

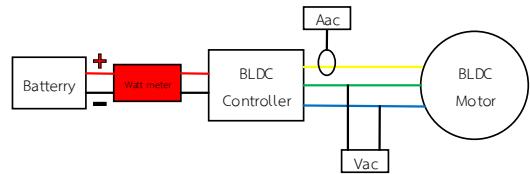
ผลการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีดังนี้

1. Multimeter แบบดิจิตอล 2 ตัว สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า
2. Watt meter แบบจอ LCD16x2 สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายแบตเตอรี่
3. Digital Oscilloscope
4. Battery 36 โวลต์
5. แผ่นเหล็กบาร์เบล ขนาดน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม จำนวน 1 แผ่น และ 1 กิโลกรัม จำนวน 10 แผ่น

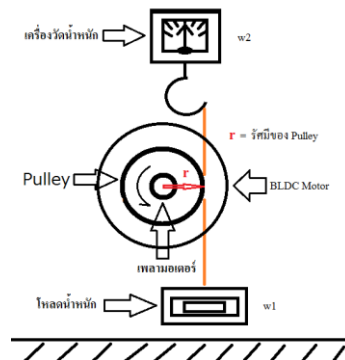
วิธีการทดสอบ

การทดสอบประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 36 โวลต์ (แบตเตอรี่) ต่อเข้ากับชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน ต่อเครื่องมือวัดแรงดัน กระแส และกำลังไฟฟ้าทั้งด้านพลังงานไฟฟ้าเข้าชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน และด้านพลังงานไฟฟ้าออกจากชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน

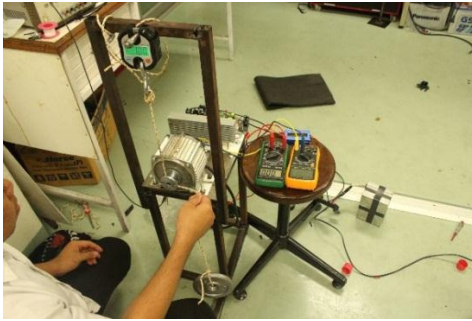


รูปที่ 6 แผนภาพการทดสอบ

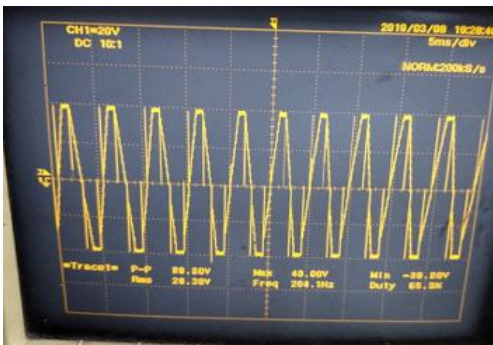
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีสภาวะทางกล ทดสอบโดยใช้เชือกพันรอบ Pulley (ลูกรอก) ที่ยึดอยู่กับเพลาของมอเตอร์ ปลายเชือกด้านบนผูกติดกับตาชั่งดิจิตอลแบบแขวนซึ่งเกี่ยวยึดไว้กับคานด้านบน ปลายเชือกถ่วงด้วยมวล และทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบสูงสุด จนเกิดแรงกระทำระหว่างมอเตอร์และเชือก ทำให้เกิดแรงฉุดดึงมวลขึ้นบนตีกค่า แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ค่าที่อ่านได้จากตาชั่งดิจิตอลแบบแขวน และความถี่ (สำหรับหาความเร็วรอบมอเตอร์) โดยเพิ่มขนาดของมวลทีละ 0.5 กิโลกรัม โดยเริ่มทดสอบจากน้ำหนักมวล 0.5 กิโลกรัม บันทึกข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัด ที่ขนาดของมวลต่าง ๆ



รูปที่ 7 รูปแบบการทดสอบ



รูปที่ 8 การทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีสถานะทางกล



รูปที่ 9 สัญญาณรูปคลื่น L-L

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

จากการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านและมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีสถานะทางกล ด้วยการทำการเพิ่มขนาดของมวลตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัม จนถึง 10 กิโลกรัม โดยจะทำการเพิ่มขนาดของ มวลทีละ 0.5 กิโลกรัม

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\tau = |W_1 - W_2| \times 9.81 \times r \quad \text{N-m}$$

$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} \quad \text{rad/s}$$

$$N_r = \frac{120 f}{P} \quad \text{rpm}$$

$$P_3 = \tau \omega \quad \text{W}$$

$$P_2 = \sqrt{3V_{L-L} I_2 \cos \theta} \quad \text{W}$$

$$P_1 = V_1 I_1 \quad \text{W}$$

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad \%$$

$$\eta_M = \frac{P_3}{P_2} \times 100 \quad \%$$

เมื่อ

τ = แรงบิดที่เพลามอเตอร์ (N-m)

W_1 = มวลของแผ่นน้ำหนัก (kg)

W_2 = มวลที่อ่านจากตาชั่งดิจิตอลแบบแขวน (kg)

r = รัศมีของ Pulley (m)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

N_r = ความเร็วมอเตอร์ (rpm)

P = จำนวนแม่เหล็ก

f = ความถี่ (Hz)

V_1 = แรงดันไฟฟ้าด้านเข้าชุดควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (V)

I_1 = กระแสไฟฟ้าด้านเข้าชุดควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (A)

V_{L-L} = แรงดันไฟฟ้าด้านออกชุดควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน วัดระหว่างไซน์กับไซน์ (V)

I_2 = กระแสไฟฟ้าด้านออกจากชุดควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน วัดจากเฟสที่มีค่ากึ่งกลางระหว่าง 3 เฟส (A)

P_1 = กำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย แบตเตอรี่ (W)

P_2 = กำลังไฟฟ้าจากชุดควบคุมมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (W)

P_3 = กำลังไฟฟ้าจากมอเตอร์กระแสตรง ไร้แปรงถ่าน (W)

η_c = ประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์
ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (%)

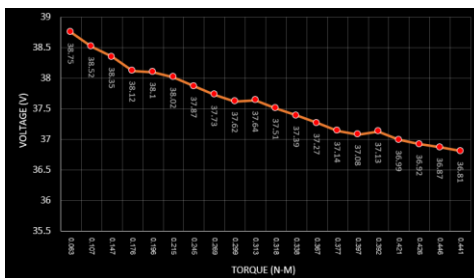
η_M = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงไร้แปรงถ่าน(%)

โดย $P = 10$

$r = 0.01 \text{ m}$

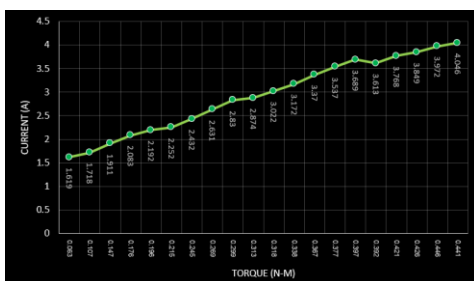
$\cos \theta = 0.87$

ผลการทดสอบชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงไร้แปรงถ่านแบบมีภาระทางกล แหล่งจ่าย
แบตเตอรี่ 36 โวลต์



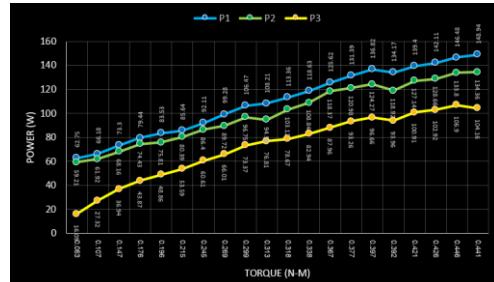
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์ (τ) กับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า (V_1)

จากกราฟในรูปที่ 10 พบว่า เมื่อทำการ
เพิ่มโหลดมากขึ้น ทอร์กก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม
แต่แรงดันของแบตเตอรี่จะมีค่าต่ำลง เนื่องจาก
แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายที่มีความจำกัดในเรื่อง
ของพลังงานเมื่อจ่ายกระแสมากขึ้นแรงดัน
แบตเตอรี่จะต่ำลง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์ (τ) กับกระแสไฟฟ้าด้านเข้า (I_1)

จากกราฟในรูปที่ 11 พบว่า เมื่อทำการ
เพิ่มโหลดมากขึ้น ทอร์กก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม
และกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามโหลดที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์ (τ) กับกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย (P_1) กำลังไฟฟ้าจากชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (P_2) และกำลังไฟฟ้าจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (P_3)

จากกราฟในรูปที่ 12 พบว่า เมื่อทำการ
เพิ่มโหลดมากขึ้น ทอร์กก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม
กำลังไฟฟ้ามี่มีค่าเพิ่มขึ้นตาม โดย P_2 จะมี
ประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ที่ 90.98 % ซึ่งจะมี
ประสิทธิภาพมากกว่า P_3 เนื่องจาก
ประสิทธิภาพที่มอเตอร์จะมีค่าน้อยกว่า
อินเวอร์เตอร์และอินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่
สูง



รูปที่ 13 ตัวแทนประเทศไทย ใน รายการ Shell eco marathon Asia 2019 ณ Sepang F1 circuit ประเทศ มาเลเซีย



รูปที่ 14 นำชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ได้ออกแบบและสร้างใช้งาน ใน รายการ Shell eco marathon Asia 2019 ณ Sepang F1 circuit ประเทศ มาเลเซีย



รูปที่ 15 Sepang F1 circuit ประเทศมาเลเซีย

สรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สร้างขึ้น โดยการทดลองรับภาระทางกล ตั้งแต่ 0.5 กิโลกรัม จนถึง 10 กิโลกรัม พบว่า ประสิทธิภาพของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่สร้างเมื่อทำงานเต็มกำลัง ทำการทดลองแบบมีภาระทางกลทั้งมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาและหมุนทวนเข็มนาฬิกา มีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 90.98% และสามารถวัดประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 69.72% และสามารถนำชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมาใช้ในการแข่งขันในรายการ Shell Eco- marathon Asia 2019 ได้เป็นอย่างดี และสามารถนำมาต่อยอดสู่ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าได้ในอนาคต สุดท้ายสรุปผลการทดลองเป็นไปตามข้อหาดังต่อไปนี้

1. ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้วัสดุภายในประเทศสามารถทดสอบการทำงานได้โดยการทดสอบแบบมีภาระทางกล และค่าใช้จ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์มีราคาที่ถูก

2. ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่พัฒนาขึ้นโดยเน้นวัสดุภายในประเทศสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย รวมถึงใช้ในการขับเคลื่อนยานพาหนะต้นแบบประหยัดพลังงานในการแข่งขันรายการ Shell Eco-marathon Asia 2019

3. ชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเฉลี่ยจากการทดสอบไม่ต่ำกว่า 90 %

จากการทดลองและสรุปผลการทดลองพบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกันกับวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบและตั้งใจไว้ โดยชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน สามารถขับเคลื่อนได้ทั้งหมดตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา และยังสามารถรับภาระทางกลได้เป็นอย่างดีจากการเลือกใช้วัสดุที่มีภายในประเทศทำให้ราคาของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่านมีราคาถูกและสามารถซ่อมแซมได้ง่าย ผลการวิจัยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งในเรื่องของกำลังไฟฟ้า การควบคุมการทำงาน และการตอบสนองต่อตำแหน่งฮอลล์เซนเซอร์ แต่ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงและมีประสิทธิภาพที่สูง สุดท้ายประสิทธิภาพโดยรวมเฉลี่ยของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน มีประสิทธิภาพเฉลี่ยเท่ากับ 90.98% ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบและตั้งใจไว้

ข้อเสนอแนะ

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นรุ่นที่มีการวางจำหน่ายมานานแล้ว ในปัจจุบันไม่มีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวางจำหน่ายแล้ว

2. ในการทดสอบมอเตอร์แบบมีภาระทางกลแต่ละครั้ง แรงกระทำระหว่างมอเตอร์และเชือกจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้ผลที่ได้อาจจะคลาดเคลื่อนไป

3. จากการใช้ Pulley (ลูกรอก) ที่มีขนาดรัศมี 1 เซนติเมตร (0.01 เมตร) ซึ่งถือว่าเล็กมาก ทำให้แรงบิดที่ได้มีค่าน้อย

4. เพื่อให้ได้ค่าการทดสอบที่แม่นยำที่สุด ต้องทำการลดความร้อนที่ตัว Pulley (ลูกรอก) และเชือกที่ใช้ทดสอบ ตรงส่วนเพลามอเตอร์เสมอ

References

- Krittapas Phinsuntea Kaweepoj Woranetsuttikul Gittisak Senset and Kanit Nuntmanpansa. (2011). *Design of brushless DC hub motor control prototype*. Thesis Master of Engineering in Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- Krittapas Phinsuntea. (2015). *Design Technique of brushless DC motor control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection*. Thesis Master of Engineering in Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- Nakhon Phakdeechart Nathaphon Wongsunthomchai Gritsada Jaiyen and Chaiwat Limpomjitwtai. (2005). *DsPIC Microcontroller Experiment Guide with C language program with MPLAB C 30*. Bangkok: Innovative Experiment Co.,Ltd.
- Prajin Palungsuntikul. (2008). *Programming Control of microcontroller dsPIC30F with MPLAB C compiler*. Bangkok: Appsoftech Co.,Ltd.
- Siwa Hongnapha. (2004). *Control and AC Drive Application*. Bangkok: Good View Collection Co.,Ltd
- Smart Learning Team. (2000). *Advance PIC Microcontroller in C (1)*. Bangkok: Smart Learning.
- Tawin Nilsakhon. (2014). *Efficiency improvement on brushless DC motor drive systems*. Thesis Master of Engineering in Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- Weerachet Khunngern and Wuttipol Tarateraset. (2014). *Power Electronics (3)*. Bangkok: v-j-printing-limited-partnership.

ซอฟต์แวร์จำแนกเพศนกสวยงามด้วยการรู้จำเสียง

ปริญญากิตติสุทธิ^{1*}, สุชาดา สิทธิจึงสถาพร²

^{1*}สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตคลองหลวง

²สถาบันนวัตกรรมมหานคร สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

Email: parinya.ki@rmuti.ac.th^{1*}, ssuchada@mut.ac.th²

Received: May, 23 2019

Revised: June, 12 2019

Accepted: June, 18 2019

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการงานวิจัยเรื่อง ออกแบบและพัฒนา ซอฟต์แวร์จำแนกเพศด้วยเสียง สำหรับนกสวยงาม ซึ่งมีลักษณะภายนอกเหมือนกันทั้งในเพศผู้และเพศเมีย (sexually monomorphic) มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการส่งเสียงของนกและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อหาค่าสเปกตรัมของเสียงที่นกส่งออกมา และไปประมวลเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลนกที่ได้ทำการตรวจสอบไว้แล้ว โดยทำการเก็บผลของนกชั้นคอนัวร์ จำนวน 5 ตัว ซึ่งจากผลที่วัดได้นกที่เป็นเพศผู้จะมีความสเปกตรัมอยู่ที่ 696 Hz และเพศเมียจะมีความสเปกตรัมอยู่ที่ 869 Hz และระบบจะมีความผิดพลาดที่ 6.75%

คำสำคัญ : จำแนกเพศนกด้วยเสียง, อนุกรมเส้นเสียง, ซอฟต์แวร์จำแนกเสียง

Software for sex determination in beautiful bird by sound recognition

Parinya Kittisut^{1*}, Suchada Sitjongsataporn²

^{1*}Electrical of Engineering, Faculty of Industry and Technology,

Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus

²Mahanakorn Institute of Innovation Department of Electronic Engineering Faculty of Engineering

Mahanakorn University of Technology

Email: parinya.ki@rmuti.ac.th^{1*}, ssuchada@mut.ac.th²

Received: May, 23 2019

Revised: June, 12 2019

Accepted: June, 18 2019

Abstract

This paper introduces the design and development of software for sex determination in beautiful bird by sound recognition. Beautiful bird has the same characteristics both in male and female that is called “sexually monomorphic”. To study the sound of birds and develop software to determine the spectrum of the sound that birds send out. And to compare with the database of bird that has already been verified. By collecting the results of the 5 sunconure birds, which the result of the males that have a spectrum of 696 Hz and females have a spectrum of 869 Hz with error 6.75 %.

Keywords : Sex, Bird, Voice, Sound Spectrum, Subtitled Audio

บทนำ

ในปัจจุบันความนิยมของคนไทยในการเลี้ยงนกมีสูงขึ้นแทบทุกวัน นับตั้งแต่เดิมที่เคยเลี้ยงนกป่าที่หาจากธรรมชาติ เช่น นกขุนทอง เพื่อใช้เป็นสัตว์เลี้ยงประเภทฟังเสียงเสียเป็นส่วนใหญ่ (ชนากร ฤทธิ์โสสง, 2546) ต่อมาก็ผันแปรเป็นนกประเภทสวยงาม ซึ่งมีความหลากหลายด้วยสีสัน รูปพรรณต่าง ๆ จนแสงแสวงหาเอานกต่างประเทศเข้ามาด้วยความแปลกและตามสมัยนิยม โดยมีปัญหาสำหรับลูกนกจะพบว่าการแยกเพศเป็นสิ่งที่ยากมากเช่นกัน การที่ไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นเพศผู้หรือเพศเมียนั้น (sexually monomorphic) เนื่องจากความเหมือนสรีระทางด้านร่างกายทั้งขนาด สีขน หรืออาจรวมไปถึงการแสดงออกของพฤติกรรมทำให้ไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นเพศใด การพิสูจน์เพศนกจึงมีความสำคัญมาก (Bermúdez Humarán, 2002, p. 677-80) สำหรับการศึกษาถึงพฤติกรรมของสัตว์ปีก ศึกษาถึงระบบนิเวศวิทยา วิวัฒนาการทางชีววิทยาและทางพันธุศาสตร์ รวมไปถึงการอนุรักษ์นกที่ใกล้จะสูญพันธุ์ อีกทั้งยังช่วยในการพัฒนาสายพันธุ์ของนกให้ดีขึ้นด้วย ซึ่งในปัจจุบันการระบุเพศนกเป็นปัญหาหนึ่งสำหรับผู้ที่ยกเลี้ยงนกสวยงามในประเทศไทยด้วยเช่นกัน โดยเทคนิคการดูเพศนกได้แก่ การสังเกตทางกายวิภาค (Anatomical) การจับตะเกียบ (The Pelvic Bone Test) การสังเกตพฤติกรรม (Behavior Signs) การตรวจสอบโครโมโซม (Chromosomal Testing, Chromosomal Karyotyping) การตรวจสอบฮอร์โมน (Steroid Study) การตรวจด้วยเทคนิคทางโมเลกุล (Cerit H, 2007, p. 91-99) ซึ่งเกิดจากการได้ค้นพบยีนส์ chromo-helicase-DNA binding (CHD) บนโครโมโซม W (Griffiths R, 1995, p. 454) และโครโมโซม Z (Griffiths R, 1997, p.225-229)

โดยการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการจำแนกเพศโดยใช้เทคนิคการใช้การรู้จำเสียง

(sound recognition) (Jitsup U, 2007, p.29-32), (S. Chougule, 2006, p.364-368), (N. Jittiwarangkul, 1998, p.169-172) ซึ่งจะทำให้การเก็บเสียงของนกชั้นคอนัวร์และแต่ละประเภทที่รู้ว่าเป็นเพศผู้ หรือเพศเมีย เพื่อนำมาเก็บสถิติค่าความเข้มเสียงเพื่อเป็นฐานข้อมูลในการเปรียบเทียบเพศของนก ซึ่งการจำแนกเพศของนกโดยวิธีรู้จำเสียงจะมีข้อดีคือไม่ทำร้ายหรือรบกวนนกแต่อย่างใด และผลการทดสอบยังสามารถประยุกต์กับนกสายพันธุ์อื่น ๆ ได้ต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 นกสวยงาม

นก (bird) จัดเป็นสัตว์มีกระดูกสันหลังชนิดหนึ่ง หรือเรียกว่า สัตว์ปีก ซึ่งอยู่ในชั้น Aves (คำว่า Aves เป็นภาษาละติน หมายถึง นก) โดยมีลักษณะทั่วไป คือ เป็นสัตว์ทวิบาท เลือดอุ่น ออกลูกเป็นไข่ รางจืดคู้หน้าเปลี่ยนแปลงไปเป็นปีก มีขนนก และมีกระดูกที่กลวงเบา นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่านกเกิดมีขึ้นบนโลกนานกว่า 150 ล้านปีมาแล้ว

2.2 จำแนกเพศของนกทางกายภาพภายนอก

นกสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม โดยดูจากลักษณะภายนอก ได้แก่

1) ลักษณะทางกายภาพทางเพศที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงตลอดอายุขัย เรียกว่า Monomorphic (ชนาธิป กรรมกร, 2009)

2) นกที่ความแตกต่างทางเพศที่โดดเด่น โดยแสดงออกทางกายภาพ เรียกว่า Dimorphic เช่น นกแก้วสายพันธุ์ Eclectus (Eclectus sp.) เป็นนกที่มีลักษณะที่โดดเด่นในการแยกเพศ โดยดูจากลักษณะทางกายภาพ



รูปที่ 1 นกแก้วซันคอนัวร์

ที่มา : <https://www.technologychaoban.com/>

2.3 วิธีการจำแนกเพศสัตว์ปีก (ชนาธิป กรรมกร, 2552)

1) สังเกตทางกายวิภาค (Anatomical) เป็นการแบ่งเพศที่ง่ายที่สุด โดยการสังเกตด้วยตาเปล่าถึงสิ่งที่แตกต่างกันในตัวนกเพศผู้และเพศเมีย โดยส่วนมากแล้วสิ่งที่สังเกตเห็นได้ง่าย คือ ขนาดหัว เช่น นกหงส์หยก

2) การจับตะเกียบ (The Pelvic Bone Test) วิธีการนี้เป็นวิธีที่สามารถเช็คเพศได้อย่างค่อนข้างแน่นอนในนกบางประเภท โดยมากแล้วจะใช้กับนกเล็ก เช่น เลิฟเบิร์ด (Love bird)

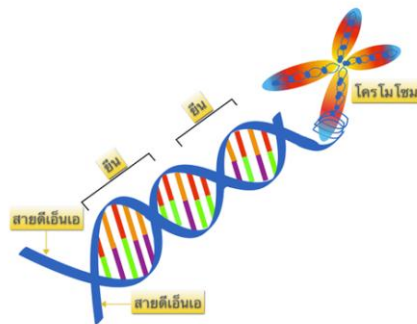
3) การสังเกตพฤติกรรม (Behavior Signs) วิธีการนี้จัดได้ว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด เพราะพฤติกรรมนกที่ถูกจับอยู่ด้วยกันนาน

4) การตรวจสอบโครโมโซม (Chromosomal Testing, Chromosomal Karyotyping) จากที่เรา รู้กันดีถึงร่างกายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์จำนวนมาก และจะมีเซลล์อยู่คู่หนึ่งที่เป็นตัวแสดงเพศ เราเรียกว่า Sex Chromosome

5) การตรวจสอบฮอร์โมน (Steroid Study) วิธีการนี้เป็นวิธีที่ล้าสมัยไปแล้วแต่ก็มีใช้กันอยู่บ้าง เป็นวิธีการตรวจสอบฮอร์โมนของนก โดยนำข้อมูลมาตรวจสอบ เนื่องจากในเพศผู้จะมีการหลั่งฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (Testosterone)

6) การตรวจด้วยเทคนิคทาง DNA วิธีนี้ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันโดยใช้การสกัดดีเอ็นเอ

จากเลือดหรือขนนก แล้วนำมาเพิ่มจำนวนด้วยปฏิกิริยาพีซีอาร์ เป็นวิธีที่สะดวก

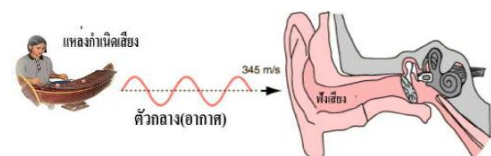


รูปที่ 2 ส่วนประกอบของสายดีเอ็นเอ

ที่มา : <http://www.dnacenterthailand.com/>

2.4 ทฤษฎีกำเนิดเสียงและลักษณะของเสียง

องค์ประกอบของเสียง เสียงจะเกิดขึ้นได้ต้องมีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ แหล่งกำเนิดเสียง ตัวกลาง และแหล่งรับฟังเสียง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงองค์ประกอบของเสียง

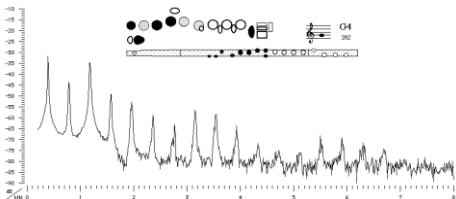
ที่มา : <http://www.sa.ac.th/winyoo/Sound>

2.5 สัญญาณเสียง

คลื่นเสียง คือ คลื่นตามยาวซึ่งหูของคนเราสามารถได้ยินเสียงได้ โดยคลื่นนี้มีความถี่ตั้งแต่ประมาณ 20 Hz ถึง 20,000 Hz ความถี่เสียงในช่วงนี้เรียกว่า audio frequency เสียงที่คนเราสามารถได้ยินแต่ละเสียงอาจเหมือนกันหรือแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเสียงซึ่งมีอยู่ 3 ข้อ 1) ความดัง (Loudness) 2) คุณภาพของเสียง (quality) 3) ระดับเสียง (pitch) โดยมีการวิจัยได้นำเสนอ ไกวิทย์ พันธุ์ครู, 2550) การแยกความแตกต่างการออกเสียงที่ถูกต้องและไม่ถูกต้อง กระทำโดย

นำสัญญาณเสียงอินพุตที่รับมา จะถูกนำมาทำ Normalize Amplitude เพื่อให้สัญญาณมีค่า Amplitude ไม่เกิน 1 หลังจากปรับขนาด Amplitude และ (วรรณชัย วรรณสวัสดิ์, 2548) การวิเคราะห์สัญญาณเสียงนิยมวิเคราะห์ใน 2 รูปแบบ คือ วิเคราะห์เชิงเวลา และวิเคราะห์เชิงความถี่ ในการวิเคราะห์ความถี่มูลฐานเพื่อวิเคราะห์หาโทนเสียง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าความถี่มูลฐาน (J. Jitsup, 2550, p. 29-32) นำขบวนการแปลงเวฟเลต (Wavelet transform) หนึ่งระดับเข้ามาช่วยในการแยกพยางค์ ซึ่งการแปลงเวฟเลตจะเป็นการแยกสัญญาณเสียงออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของสัญญาณความถี่ต่ำ และส่วนของสัญญาณความถี่สูงจากนั้นจะนำเฉพาะสัญญาณความถี่สูง (High frequency) มาแปลงเวฟเลตกลับ (Inverse wavelet transform : IWT)

2.6 สเปกตรัม



รูปที่ 4 ลักษณะสเปกตรัมของเสียงเครื่องดนตรี
ที่มา : <http://www.soundstagemag.com/>

สเปกตรัม หมายถึง อนุกรมของแถบสีหรือเส้นที่ได้จากการผ่านพลังงานรังสีเข้าไปในสเปกโตรสโคป (AM J, 1996, p.64) ซึ่งทำให้พลังงานรังสีแยกออกเป็นแถบหรือเป็นเส้นที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ เรียงลำดับกันไป

2.7 การออกแบบวิธีการแยกความถี่เสียง

การออกแบบโปรแกรมเพื่อทำการจำแนกเพศนกด้วยเสียงนั้น จะต้องทำการออกแบบขั้นตอนการรับเสียงนก โดยการใช้ไมโครโฟนเป็น

อุปกรณ์ในการรับเสียงเพื่อส่งมาประมวลผลและทำการแสดงผลออกทางหน้าจอ โดยมีลักษณะการส่งต่อสัญญาณเสียงดังรูปที่ 5



โดย

1-546E-5

รูปที่ 5 แสดงการส่งต่อสัญญาณเสียง

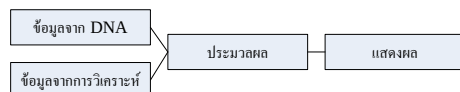
โดยรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลจะทำการรับสัญญาณเสียงของตัวนกชั้นคอนัวร์ ซึ่งจะทำการเก็บผลข้อมูลประจำตัวนก และเสียงของนก เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์เชิงความถี่ และแปลงเป็นสเปกตรัมของเสียงที่เก็บมา และบันทึกลงยังฐานข้อมูลตามข้อมูลประจำตัวนกที่เก็บก่อนหน้าสำหรับการยืนยันตัวนก ดังแสดงรูปที่ 6



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

2.8 การเปรียบเทียบเสียงและการแสดงผล

จากการประมวลผลเสียงจะทำการส่งข้อมูลไปเก็บยังฐานข้อมูลและเมื่อผู้ใช้งานต้องการทราบเพศ จะทำการแสดงผลการเปรียบเทียบออกทางหน้าจอ ดังแสดงในรูปที่ 7

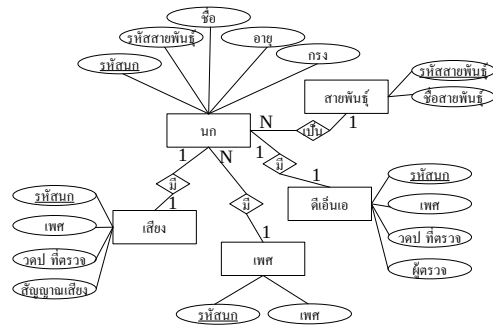


รูปที่ 7 ขั้นตอนการเปรียบเทียบและการแสดงผล

2.9 เก็บผลและเปรียบเทียบผลการจำแนกเพศนก

ส่วนการเก็บผลข้อมูลจะทำการสร้างฐานข้อมูลและทำการเก็บตามรูปแบบข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้ โดยมีการออกแบบดังนี้

- นก กำหนดเป็นเอนทิตีเพื่อเก็บข้อมูลคุณสมบัติของนกที่เลี้ยง โดยจะแสดงข้อมูลคือ รหัสห้วงขานก, สายพันธุ์ของนก, ชื่อของนก, อายุของนก, หมายเลขกรง
- สายพันธุ์ กำหนดเป็นเอนทิตีเพื่อเก็บข้อมูลคุณสมบัติของสายพันธุ์นก โดยจะแสดงข้อมูลคือ รหัสสายพันธุ์, ชื่อสายพันธุ์
- เสียง กำหนดเป็นเอนทิตีเพื่อเก็บข้อมูลเสียงของนก โดยจะแสดงข้อมูลคือ รหัสห้วงขานก, เพศ, วันที่ตรวจ, สัญญาณเสียง
- ดีเอ็นเอ กำหนดเป็นเอนทิตีเพื่อเก็บข้อมูลเพศนกที่ตรวจสอบจากดีเอ็นเอนก โดยจะแสดงข้อมูลคือ รหัสห้วงขานก, เพศ, วันที่ตรวจ, ผู้ตรวจ
- ดีเอ็นเอ กำหนดเป็นเอนทิตีเพื่อเก็บข้อมูลเพศนกที่ตรวจสอบจากดีเอ็นเอนก โดยจะแสดงข้อมูล คือ รหัสห้วงขานก, เพศ



รูปที่ 8 ER Diagram ของระบบการเก็บและเปรียบเทียบเพศนก

2.10 การออกแบบหน้าแอปพลิเคชัน

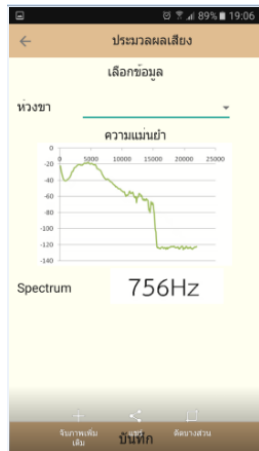
การดำเนินการออกแบบโปรแกรมเพื่อให้ทำงานบนอุปกรณ์สมาร์ตโฟน สามารถทำงานได้ง่ายและเก็บเสียงนกโดยไม่ทำการรบกวนนกนำไปวางในตำแหน่งที่ต้องการ และได้เสียงของนกที่เหมาะสมกับการนำมาประมวลผล



รูปที่ 9 หน้าหลักโปรแกรมออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์



รูปที่ 10 หน้าโปรแกรมเก็บประวัตินก



รูปที่ 11 หน้าโปรแกรมประมวลผลเสียง



รูปที่ 12 หน้าโปรแกรมแสดงผลเป็นเพศเมีย

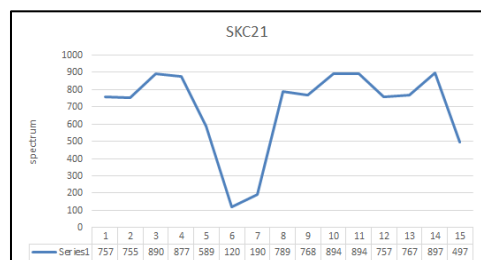


รูปที่ 13 หน้าโปรแกรมแสดงผลเป็นเพศผู้

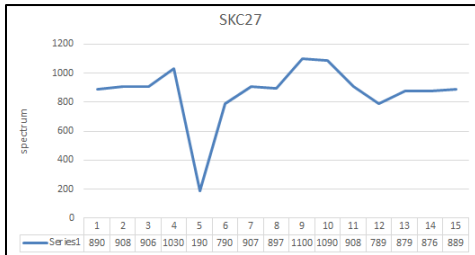
ผลการจำแนกเพศ	Result
SKC12	Female
SKC13	Female
SKC14	Female
SKC20	Female
SKC24	Female
SKC27	Female
SKC29	Female
SKC30	Female

รูปที่ 14 หน้าโปรแกรมผลการจำแนกเพศรวมทั้งหมด

จากการทำการเก็บผลเสียงเพื่อแปลงเป็นสเปกตรัมของนกกลุ่มตัวอย่างทั้ง 5 ตัวแล้ว จะแสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟเส้น โดยรูปที่ 15 เป็นสัญญาณเสียงของนกห่วงขาเลข SKC21 จะมีค่าสเปกตรัมอยู่ระหว่าง 696 Hz ซึ่งจากฐานข้อมูลจะวิเคราะห์เป็นเพศผู้ และรูปที่ 16 เป็นสัญญาณเสียงของนกห่วงขาเลข SKC27 จะมีค่าสเปกตรัมอยู่ระหว่าง 869 Hz ซึ่งจากฐานข้อมูลจะวิเคราะห์เป็นเพศเมีย



รูปที่ 15 แสดงการรวมของข้อมูลสเปกตรัมนก SKC21



รูปที่ 16 แสดงการรวมของข้อมูลสเปกตรัม
SKC27

การหาประสิทธิภาพของออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์จำแนกเพศด้วยเสียงสำหรับนกสวยงามที่จะใช้สมการ $\%error = 100\% - \%accuracy$

จากการเก็บผล 75 ครั้งจากนกจำนวน 5 ตัว มีค่าผิดพลาดที่นำมาประมวลผลไม่ได้อยู่ 9 ค่า

จะได้ $(75 \times 9) / 100$ จะมีค่าเป็น 6.75 %

ดังนั้น $\%accuracy = 93.25\%$

แทนค่า $\%error = 100\% - 93.25\%$
 $= 6.75\%$

ดังนั้นการระบบจะมีความผิดพลาดที่ 6.75%

สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินการ งานวิจัยเรื่องออกแบบและพัฒนา ซอฟต์แวร์จำแนกเพศด้วยเสียงสำหรับนกสวยงาม ผู้วิจัยได้ทำการสร้างและเก็บผลของซอฟต์แวร์จำแนกเพศด้วยเสียงนก และเก็บผลเสียงของนกให้ซอฟต์แวร์ประมวลผลจากกลุ่มตัวอย่างนกทั้งหมด 5 ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะทำการเก็บตัวอย่างเสียงตัวละ 15 ครั้ง โดยจะได้สัญญาณเสียงทั้งหมด 75 ค่าเสียง ซึ่งผ่านการวิเคราะห์เสียงผลที่ได้คือ SKC21, SKC 30 เป็นเพศผู้ มีค่าสัญญาณเสียงอยู่ระหว่าง 650 – 755 Hz และนกห่านขาว SKC27, SKC33, SKC45 เป็นเพศเมีย มีค่าความถี่เสียงอยู่ระหว่าง 850 – 950 Hz

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ดำเนินโครงการวิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 ทำให้สามารถดำเนินโครงการวิจัยครั้งนี้ได้สำเร็จเรียบร้อยตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

References

- Am.J. (1996), Teaching Fourier analysis in microcomputer based laboratory. *American Journal of Physics*. p.64. AIP Publishing.
- Bermúdez-Humarán, L.G., García-García, A., Leal-Garza, C.H., Riojas-Váldez, V., Jaramillo- Rangel, G. and Montes-de-Oca-Luna, R. (2002). *Molecular sexing of monomorphic endangered Ara birds*. J Exp Zool 292: p.677–80.
- Cerit, H. and Avanus, K. (2007) *Sex identification in avian species using DNA typing methods*. World Poult Sci J 63: p.91–99.
- Chanathip Kammakarn. (2552). Sex separation in beautiful birds. *The Journal of Thai Veterinary Practitioners*. (Vol.21 No.4), p.62-9.
- Griffiths, R. and Korn, R.M.. (1997). *A CHD1 gene is Z chromosome linked in the chicken Gallus domesticus*, Gene 197: p.225–229. IEEE Computer Society Press.
- Griffiths, R. and Tiwari, B. (1995). Sex of the last wild Spix's macaw. *Nature International journal of science*. p.454. 2019 Springer Nature Publishing AG.

- J. Jitsup, U. Sritheeravirojana, and S. Udomhunsakul (2007). *Syllable segmentation of Thai human speech using stationary wavelet transform. Asia-Pacific Conference on Communications*. p.29-32. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Jitsup, U. Sritheeravirojana, and S. Udomhunsakul (2007). *Syllable segmentation of Thai human speech using stationary wavelet transform, Asia-Pacific Conference on Communications*, p.29-32. IEEE Computer Society Press.
- Kowit Phankru, (2550). *Phonetic analysis system "ร" and "ล"*. Master Degree. King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- N. Jittiwangkul, S. Jitapunkul, S. Luksaneeyanawin, V. Ahkuputra, and C. Wutiwwatchai(1998). *"Thai Syllable Segmentation for Connected Speech Based on Energy"* IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems. p.169-172.
- S. Chougule and P. P. Rege (2006), *Language Independent Speaker Identification. IEEE International Conference on Industrial Technology*. p. 364-368. IEEE Computer Society Press.
- Thnakorn Ritthaisong.(2546). *Beautiful bird*. Bangkok: KPON (1996).
- Wannachai Wannasawat, Yeun Puworawan, (2548). *A comparison of the Pronunciation of Thai consonants between the original sound and Synthesized Sound*. Master Degree. King Mongkut's University of Technology Thonburi.

พฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลัง

โดยใช้แถบยางพาราอัดแรง

ชัชญาส์ บุญมี^{1*}, กิตติภูมิ รอดสิน²

^{1*} ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม ศูนย์วิจัยเฉพาะทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Email : chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th^{1*}, kittipoom.kmutnb@gmail.com²

Received: May 22, 2019

Revised: June 11, 2019

Accepted: June 13, 2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมทางสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรง ซึ่งการทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ประเภทที่ 1 คือ การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยว โดยทำการทดสอบแบบไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา และแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราตามแนวยาวของชิ้นส่วนสะพาน เพื่อเสริมกำลังการรับโมเมนต์ดัดของชิ้นส่วน ประเภทที่ 2 คือ การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบขึ้นคู่ โดยทำการทดสอบแบบไม่เสริมกำลังจนรอยต่อเกิดการแตกร้าวโดยจำลองเหตุการณ์ว่าไม่มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือน Shear Key และทดสอบแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวางของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเพื่อเพิ่มแรงอัดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน โดยการทดสอบทั้ง 2 ประเภทนี้จะทำการทดสอบแบบภาวะสถิตยศาสตร์ (Static Test) จากผลการทดสอบ พบว่า การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยวชิ้นส่วนที่ไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราเกิดการแตกร้าวที่การแอ่นตัวเท่ากับ 5 มิลลิเมตร แต่เมื่อเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังเริ่มมีการแตกร้าวที่ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ 7 มิลลิเมตร และการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่แบบไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา เมื่อโดนแรงกดทดสอบ 5.92 ตันจนทำให้เกิดการแอ่นตัวเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เริ่มมีการแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อ แต่ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวแกนขวางเพื่อเพิ่มแรงอัดแนวตามขวาง เมื่อทดสอบชิ้นส่วนไปที่ระยะ 10 มิลลิเมตร ที่แรงกด 7.606 ตัน ยังไม่เกิดการแตกร้าวเกิดขึ้นในรอยต่อแผ่นพื้น

คำสำคัญ : ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป, ยางพารา, เสริมกำลัง

Static Behavior of a Plank Girder Strengthening by Pre-Stressed Rubber Pads

Chichaya Boonmee^{1*}, Kittipoom Rodsin²

^{1*} Department of Teacher Training in Civil Engineering Faculty of Technical Education
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Department of Civil and Environmental Engineering Technology, Center of Excellence in Structural
Dynamics and Urban Management, The College of Industrial Technology King Mongkut's University
of Technology North Bangkok

Email : chichaya.b@fte.kmutnb.ac.th^{1*}, kittipoom.kmutnb@gmail.com²

Received: May 22, 2019

Revised: June 11, 2019

Accepted: June 13, 2019

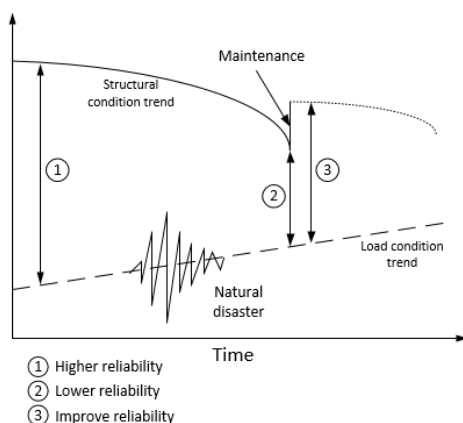
Abstract

This paper aims to investigate the behavior of a plank girder strengthen by pre-stressed rubber pads. There are two test schemes. For the first scheme, the capability of the rubber pad in improving bending moment capacity of the plank has been investigated. In the strengthened specimen, the rubber pad will be attached along the longitudinal axis of the plank and tested under static load in order that the moment capacity could be compared to the controlled specimen. For the second scheme, in the controlled specimen, two planks were placed adjacently and filled up with non-shrink mortar. Then, the load was eccentrically applied, and the test will be terminated when the cracks were observed between the planks. The rubber pad was then attached laterally across the joint and test under the same procedure. For the first scheme, the test results revealed that the first crack was observed at 5 mm and 7 mm for the controlled specimen and strengthened specimen respectively. The strengthening method using rubber pad found to a promising method in improving the flexural capacity of beam. For the second scheme, the crack along the joint was found when the load reached 5.92 ton at the deflection around 6 mm for the controlled specimen. In contrast, the plank strengthening with rubber pad could withstand the load up to 7.606 ton (at deflection around 10 mm) without any cracks along the joint.

Keywords : Plank Girder, Rubber, Strengthening

บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาการพัฒนาความต้องการด้านโครงสร้างพื้นฐานถูกให้ความสำคัญจากทุกรัฐบาล โดยเฉพาะการสร้างระบบโครงสร้างเพื่อการคมนาคม ได้แก่ ถนน สะพาน ฯลฯ โครงสร้างสะพานก็เป็นโครงสร้างหนึ่งที่ถูกสร้างจำนวนมากในประเทศไทย ซึ่งโครงสร้างสะพานเหล่านี้ได้มีการก่อสร้าง และใช้งานมาอย่างยาวนานส่งผลให้สภาพการใช้งานของโครงสร้างมีการเสื่อมสภาพ นอกจากนั้นปริมาณการใช้งานและน้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยทางเศรษฐกิจหรือบางครั้งมีการใช้งานภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่เกินกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด รวมถึงผลกระทบจากภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้น (Natural Disaster) เช่น น้ำท่วม ฯลฯ จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน รวมถึงส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถในการใช้งาน (Serviceability) และความมั่นคงแข็งแรง (Strength) ตลอดจนอายุการใช้งานหรือความทนทานของสะพาน (Durability)



รูปที่ 1 การเสื่อมสภาพของสะพานตามเวลาที่เปลี่ยนที่ ที่มา Grubb, Michael A Corven, John A Wilson, Kenneth E Bouscher, Justin W Volle and Laura E (2017)

ซึ่งปัจจัยดังกล่าวข้างต้นจะส่งผลกระทบต่อระดับความเชื่อมั่นที่มีต่อระบบโครงสร้าง (Reliability) และปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องซ่อมบำรุงหรือปรับปรุงแก้ไขโครงสร้างของสะพาน ด้วยวิธีการเสริมกำลังโครงสร้างสะพาน (Strengthening) ซึ่งหากไม่ได้เสริมกำลังของโครงสร้างหรือได้รับการบำรุงรักษาซ่อมแซม อาจส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัย หรือเป็นอันตรายต่อการใช้งานของสะพานได้ (Lower Reliability) ดังนั้นการเสริมกำลังโครงสร้างหรือซ่อมแซม (Maintenance) สะพาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานนั้นกลับคืนมา

สะพานถือเป็นโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงชนิดหนึ่ง ซึ่งการเสริมกำลังของโครงสร้างมีวัตถุประสงค์เพื่อให้โครงสร้างเดิมสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้น หรือเพื่อให้โครงสร้างที่เสื่อมสภาพให้สามารถรับแรงได้ดังเดิม ซึ่งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างนั้นมีด้วยกันหลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการใช้บล็อกเหล็ก R.S. Aboutaha, M.D. Engelhardt, J.O. Jirsa, and M.E. Kreger (1999) and Y. Xiao, and H. Wu (2003) and A. Ghobarah, A. Biddah, and M. Mahgoub (1997) and An He, Jian Cai, Qing-Jun Chen, Xinpei Liu, Hua Xue, and Chenjie Yu (2017) and Gia Toai Truong, Jong-Chan Kim, and Kyoung-Kyu Choi (2017) หรือการใช้วัสดุไฟเบอร์ในการโอบรัดโครงสร้าง เช่น แผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เส้นใยแก้ว (GFRP) ฯลฯ Kittipoom Rodsin (2017) แต่วัสดุที่นิยมนำมาเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่สุด คือ แผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงและมีงานวิจัยและผลการทดสอบรองรับอยู่จำนวนมาก A.R. Rahai, P. Sadeghian, and M.R. Ehsani (2008) and Colomb F, Tobbi H, Ferrier E, Hamelin P (2008) and Pedro Faustino,

Pedro Frade, and Carlos Chastre (2016) and Mohamed Elchalakani, and Guowei Ma (2017) and Ruo-Yang Wu, and Chris P. Pantelides (2017) แต่ก็มีข้อเสียที่แผ่นเส้นใยคาร์บอนราคาสูงมาก เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ บางครั้งจึงไม่เหมาะกับการเสริมกำลังโครงสร้างที่มีงบประมาณอยู่อย่างจำกัด

การหาวัสดุในประเทศมาทดแทนการใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP) น่าจะเป็นทางเลือกที่ดี เนื่องจากจะเป็นวัสดุที่หาง่าย และราคาถูกเพราะลดการนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งในปัจจุบันยางพาราในท้องตลาดนั้นมีราคาถูกมาก รัฐบาลจึงให้ความสำคัญในการพัฒนาวัสดุยางพาราเพื่อนำมาเพิ่มมูลค่าอุปกรณ์ยางพาราก็เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงเพียงพอ เนื่องจากสามารถรับแรงดึงได้ 800 กิโลกรัม ที่ระยะยืดประมาณ 100% จากการทดสอบ ซึ่งน่าจะนำมาเสริมกำลังโครงสร้างชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปได้

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้วัสดุยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังของโครงสร้างสะพานเพื่อที่จะสามารถเพิ่มการรับโมเมนต์ของโครงสร้างได้มากขึ้น และยังช่วยลดปัญหาการแตกร้าวตามรอยต่อของชิ้นส่วนของสะพาน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปขึ้นเดียวแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราตามแนวยาว
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางสถิติศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปขึ้นคู่ที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวาง

ระเบียบวิธีวิจัย

การทดสอบและตรวจวัดพฤติกรรมของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปภายใต้แรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์ มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมิน

ความสามารถในการรับแรงระหว่างการเสริมแรงและไม่เสริมแรงด้วยวัสดุยางพาราโดยการทดสอบที่เกิดขึ้นจะทดสอบจนถึงการแตกร้าวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปหรือมีการแอ่นตัวไม่เกิน 10 มิลลิเมตร โดยการทดสอบตรวจวัดพฤติกรรมชิ้นส่วนสะพานจะดำเนินการในลักษณะของ Diagnostic Load Test ซึ่งเป็นทดสอบหาการตอบสนองของโครงสร้าง สะพานภายใต้น้ำหนักของรถบรรทุก โดยการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การทดสอบภายใต้แรงกระทำ แบบสถิตยศาสตร์ (Static load test) และการทดสอบภายใต้ แรงกระทำแบบพลวัต (Dynamic load test) ซึ่งในบทความนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการทดสอบภายใต้สภาวะสถิตยศาสตร์ Static test เท่านั้น โดยวิธีการประมวลผลการตรวจวัดแบบสถิตยศาสตร์ จะพิจารณาเปรียบเทียบแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเพื่อจะทราบถึงค่าความแข็งแรงชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป (Stiffness)

ผู้วิจัยขอเสนอวิธีการทดสอบและ ดำเนินการในการทำวิจัยเริ่มตั้งแต่การทดสอบหาลำดับดึงของแผ่นยางพารา และชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลัง โดยใช้แถบยางพาราอัดแรง สำเร็จรูปทั้งแบบเดี่ยวและแบบคู่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) อุปกรณ์วัดแรงแบบดึง (Tension Load Cell)
- 2) อุปกรณ์ให้แรงดึง (Hydraulic Pump)
- 3) โครงข้อแข็ง (Frame Test)
- 4) อุปกรณ์จับยึด

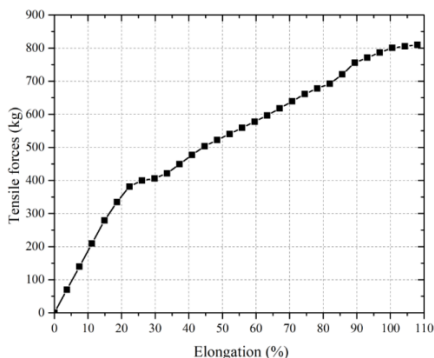
ขั้นตอนการทดสอบการหาลำดับดึงของแผ่นยางพารา โดยผู้วิจัยจะใช้ยางพาราเกรด Hardness 60 ซึ่งเป็นเกรดเดียวกันกับแผ่นยางรองสะพาน (Plain Pad) ที่ใช้ในสะพานช่วงสั้นของกรมทางหลวง (Span 5-10 เมตร)

นำแผ่นยางพารา ขนาดกว้างยาวหนาเท่ากับ 20 เซนติเมตร x 50 เซนติเมตร x 4 เซนติเมตร มายึดติดกับอุปกรณ์จับยึด และดึงแผ่นยางพารา

โดยมีการยืดตัวของแผ่นยางเป็น 2 เท่า เนื่องจากต้องการให้ได้แรงมากที่สุด และถ้าดึงมากไปกว่านี้ ก็ไม่สามารถทำได้เนื่องจากยางอาจเสียหายจากความยาวเดิมและตรวจวัดแรงดึงของแผ่นยางเป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อวัดแรงดึงที่ลดลงเมื่อวัสดุถูกดึงทิ้งไว้เป็นเวลานาน



รูปที่ 2 การดึงแผ่นยางพาราโดยมีการยืดตัวของแผ่นยางเป็น 2 เท่าจากความยาวเดิม



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและระยะยืด

จากผลการทดสอบพบว่า แฉวยางพาราขนาดดังกล่าว สามารถรับแรงดึงได้ 800 กิโลกรัม ที่ระยะยืดประมาณ 100% ระยะยืดดังกล่าวเป็นระยะยืดที่สูงมากและหากยืดเกินกว่าระยะนี้จะทำให้ยางพาราเสียรูปไปมาก ไม่เหมาะกับการติดตั้งกับโครงสร้าง ดังนั้น ในการออกแบบจะแนะนำให้ยืดยางพาราที่ระยะ 100% หรือ 2 เท่าจากความยาวเดิม

ขั้นตอนการเสริมกำลังชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเสริมแฉวยางพาราอัดแรง

ขั้นตอนที่ 1 นำแผ่นยางพาราขนาด 20 x 4 x 50 เซนติเมตร มาติดตั้งกับชุดอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพารา

ขั้นตอนที่ 2 ใช้ปั๊มไฮดรอลิกดึงแผ่นยางพาราให้มีการยืดเป็น 2 เท่าของความยาวเดิม และล็อกอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพาราให้ยางพารามีการยืดตัวค้างไว้

ขั้นตอนที่ 3 ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพารากับชิ้นส่วนที่ตำแหน่งชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป (บริเวณท้องของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปตามแนวยาว)

ขั้นตอนที่ 4 ติดแผ่นยางพาราเข้ายึดติดกับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปตามแนวยาว โดยวิธีการยัดน็อตล็อกแผ่นยางพาราเข้ากับอุปกรณ์จับยึดในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 ปลดล็อกอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพาราให้ยางพารามีการดึงตัวกลับแรงจะถ่ายเข้าสู่ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปผ่านอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพารา



รูปที่ 4 แสดงอุปกรณ์จับยึดแผ่นยางพาราติดกับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป



รูปที่ 5 ภาพภาพแสดงขั้นตอนการติดตั้งแผ่นยางพาราเข้ากับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป

การออกแบบตัวอย่างการทดสอบ

การออกแบบตัวอย่างชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่จะนำมาทดสอบเป็นตัวแทนชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปชนิดท้องเรียบ ที่พบทั่วไปโดยส่วนมากในประเทศ คือ สะพานของกรมทางหลวง ฯลฯ โดยในงานวิจัยนี้ จะนำแถบยางพารามายึดและติดตั้งเข้ากับแผ่นพื้นสำเร็จรูป และทดสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดเปรียบเทียบกับ แผ่นพื้นที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยจะใช้แถบยางพาราจำนวน 9 แผ่น และแต่ละแผ่นมีขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร และหนาเท่ากับ 4 เซนติเมตร และนำแถบยางพาราดังกล่าวมายึดออก 2 เท้าของความยาวเดิม แล้วนำมายึดติดกับชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 7 เมตร และหนา 35 เซนติเมตร การทดสอบจะทดสอบการรับโมเมนต์ดัดแบบ 3 จุด (3-point flexural test) โดยจะทำการทดสอบแบบเดียวกัน สำหรับแผ่นพื้นที่เสริมและไม่เสริมยางพารา การทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบควบคุมระยะการแอ่นตัว (displacement-controlled test) โดยจะบันทึกค่าการทดสอบทุก ๆ การแอ่นตัว 1 มิลลิเมตร และจะหยุดการทดสอบเมื่อการแอ่นตัวประมาณ 10 มิลลิเมตร เนื่องจากการแอ่นตัว (Deflection) ที่สูงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการโยก (Pumping) และต่อมาก็ทำให้เกิดความเสียหาย (Faulting)

โดยมีรายละเอียดการทดสอบ และจำนวนตัวอย่างที่นำมาทดสอบดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงรายละเอียดการทดสอบ

ลำดับการทดสอบ	รูปแบบ	การเสริมกำลัง
1	เดี่ยว	ไม่เสริม
2	เดี่ยว	เสริมตามแนวยาว
3	คู่	ไม่เสริม
4	คู่	เสริมตามแนวขวาง

การติดตั้งอุปกรณ์การตรวจวัด

การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องมือวัดค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของพฤติกรรมชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง ดังนี้

Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความสั่นของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 6 โดยกำหนดให้ทิศทางตามแนวแกน Y เครื่องหมาย + มีทิศทางขึ้นบน และเครื่องหมาย - มีทิศทางลง



รูปที่ 6 Accelerometer

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าความยุบตัวของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 7 โดยวัดในรูปแบบระยะแอ่นตัวของโครงสร้าง โดยกำหนดให้ เครื่องหมาย - เป็นระยะแอ่นตัวลงในแนว แกน Z ของโครงสร้าง เครื่องหมาย + เป็นระยะแอ่นตัวขึ้นในแนว แกน Z ของโครงสร้าง



รูปที่ 7 Linear Variable Differential Transducer

Strain Gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดค่าการยืด/หดตัวของโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 8 โดยกำหนดให้ทิศทางตามแนวการติดตั้งเครื่องหมาย + มีการยืดตัวของโครงสร้าง และเครื่องหมาย - มีการหดตัวของโครงสร้าง

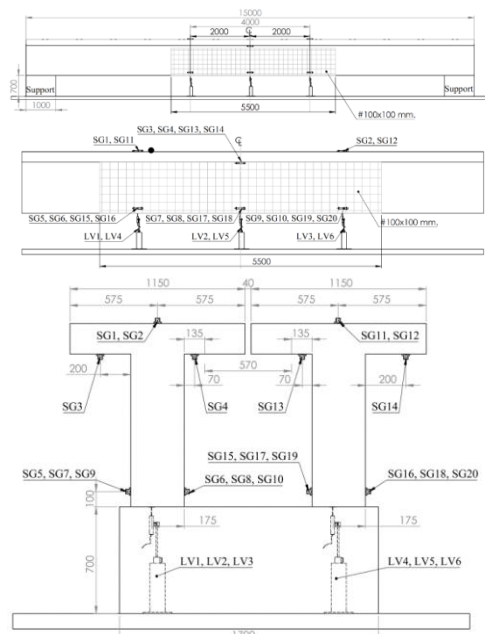


รูปที่ 8 Strain Gage

Data Logger ชนิดไร้สายสำหรับบันทึกข้อมูล เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บและแปลงข้อมูลจาก Accelerometer, LVDT และ Strain gage ซึ่งส่งข้อมูลที่วัดได้จากเซ็นเซอร์เข้ามาในรูปของสัญญาณ Analog และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณ Digital ซึ่งสามารถส่งต่อไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผล Data logger

วิธีการทดสอบ

ก่อนทำการทดสอบต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์บนชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ซึ่งในการทดสอบแบบภาวะสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดียวจะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Linear Variable Differential Transformer) ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป ทั้งหมด 3 ตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าความเครียดของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งหมด 10 ตำแหน่ง แต่ในการทดสอบแบบสภาวะสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ จะทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว (Linear Variable Differential Transformer) ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งหมด 6 ตำแหน่ง และอุปกรณ์วัดค่าความเครียดของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งหมด 20 ตำแหน่ง และบันทึกภาพการทดสอบในแต่ละขั้นตอนของการทดสอบแล้วบันทึกค่าผลทดสอบ



รูปที่ 9 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์บนชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปทั้งแบบเดี่ยว และแบบคู่



รูปที่ 10 การติดตั้ง LVDT



รูปที่ 11 การติดตั้ง Strain Gage

การทดสอบเพื่อประเมินการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเดี่ยวแบบสถิติศาสตร์จะเปรียบเทียบแรงกดทดสอบระหว่างก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพาราตามภาพที่ 12



รูปที่ 12 ภาพการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเดี่ยวแบบสถิติศาสตร์

การทดสอบเพื่อประเมินการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปคู่แบบสถิติศาสตร์จะเปรียบเทียบแรงกดทดสอบระหว่างก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพารา โดยพิจารณาการแตกร้าวระหว่างรอยต่อของแผ่นพื้นทั้ง 2 แผ่น โดยมีขั้นตอนการทดสอบแบบเดียวกันกับแบบเดี่ยว ตามภาพที่ 13

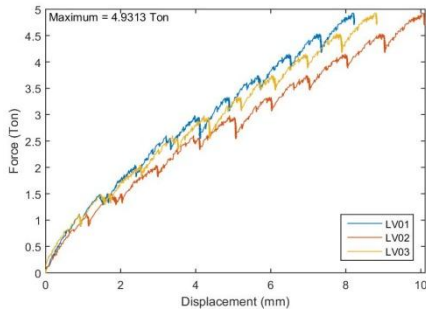


รูปที่ 13 ภาพการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปคู่แบบสถิติศาสตร์ เพื่อพิจารณารอยแตกร้าวระหว่างแผ่น

ผลการวิจัย

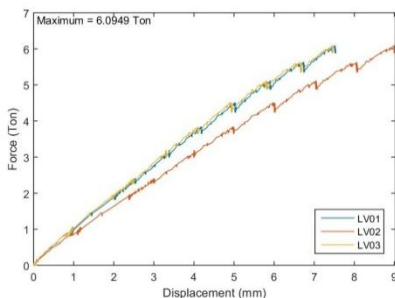
ผลการทดสอบแบบสถิติศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยว ชนิดเสริมกำลัง และไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นอย่างพารา

ก่อนเสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพาราชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุอย่างพารา เมื่อถูกแรงกดทดสอบ ด้วยขนาดของแรงเท่ากับ 2.87 ตัน ทำให้เกิดระยะการแอ่นตัวของชิ้นส่วนเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ทำให้ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปเริ่มมีการแตกร้าวที่บริเวณกลางสะพาน และเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ ขนาดของแรงกดทดสอบที่ทำให้ระยะตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปมีการแอ่นตัวเท่ากับ 10 มิลลิเมตร เท่ากับ 4.931 ตัน ตามภาพที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

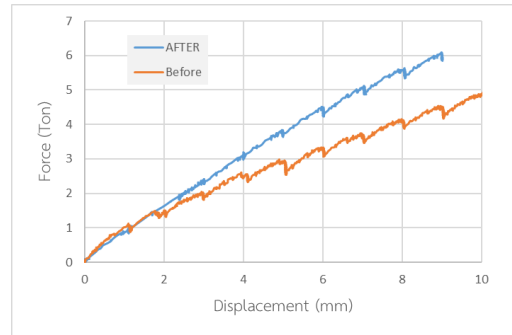
ภายหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารามีการเกิดการแตกร้าวที่การแอ่นตัวเท่ากับ 7 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการเสริมยางพาราทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างสะพานโดยรวมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสามารถรับแรงกดสูงสุดได้ถึง 6.095 ตัน ซึ่งมากกว่าแผ่นพื้นที่ไม่เสริมกำลัง ตามภาพที่ 15



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

จากผลการทดสอบก่อนและภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบเดี่ยวย พบว่า ในระยะแอ่นตัวที่เท่ากันชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา สามารถรับแรงกดทดสอบได้

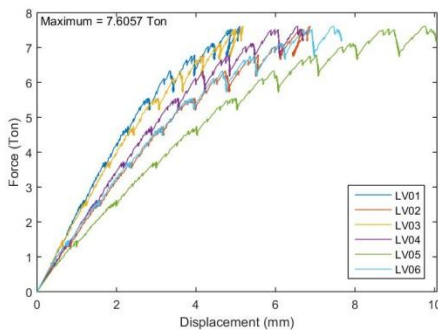
เพิ่มมากขึ้นจากชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลัง เนื่องจากแถบยางพาราอัดแรงทำหน้าที่เหมือนกับลวดอัดแรงในคอนกรีตอัดแรงชนิดดึงลวดทีหลัง (Posttensioned System) แต่แตกต่างกันที่การเสริมกำลังจะกระทำภายนอก ไม่ได้กระทำผ่านท่อร้อยเหล็ก ตามภาพที่ 16



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัว ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

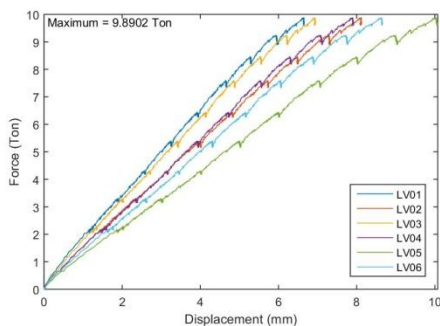
ผลการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ ชนิดเสริมกำลัง และไม่เสริมกำลังด้วยแผ่นยางพารา

ก่อนเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา ผลทดสอบของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่แบบไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราเมื่อโดนแรงกดทดสอบ 5.92 ตัน จนทำให้เกิดแอ่นตัวเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เริ่มมีการแตกร้าวที่จุดบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ แรงกดทดสอบที่จะทำให้เกิดการแอ่นตัวเท่ากับ 10 มิลลิเมตรมีค่าเท่ากับ 7.606 ตัน ตามภาพที่ 17



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปคู่ก่อนการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

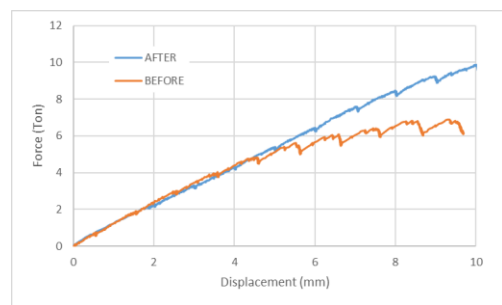
ภายหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวแกนขวาเพื่อเพิ่มแรงอัดแนวตามขวางบททดสอบเมื่อทดสอบชิ้นส่วนทดสอบไปที่ระยะ 10 mm ยังไม่เกิดการแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ จึงหยุดทดสอบ



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนคานสำเร็จรูปคู่ภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

จากผลการทดสอบก่อน และภายหลังการเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ พบว่า ในระยะแอ่นตัวที่ 6 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราเกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อแผ่น ส่วนชิ้นส่วน

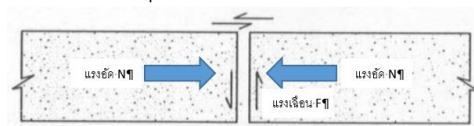
สะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราไม่เกิดการแตกร้าวบริเวณรอยต่อแผ่น จากภาพที่ 19 พบว่า ในระยะแอ่นตัวที่เท่ากันชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่เสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา สามารถรับแรงกดทดสอบได้เพิ่มมากขึ้นจากชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลัง เนื่องจากการเพิ่มแรงอัดเข้าไประหว่างแผ่นพื้น จะทำให้ความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างแผ่นพื้นเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของแรงอัด (N) ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดทดสอบกับระยะแอ่นตัวของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคู่ก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพารา

โดยการเสริมกำลังความสามารถในการถ่ายเทแรงเฉือนด้วยแถบยางพาราอัดแรงสามารถใช้หลักการของการถ่ายแรงเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีต เมื่อมีแรงอัดระหว่างแผ่นพื้น (N) จะทำให้การถ่ายแรงระหว่างแผ่นพื้น (F) เพิ่มขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวคอนกรีต (μ) ตามสมการที่ 1 R. C. Hibbeler (2010)

$$F = \mu N \quad (1)$$



รูปที่ 19 การถ่ายแรงเฉือนระหว่างแผ่นพื้นตามสมการ

สรุปและอภิปรายผล

จากผลการทดสอบการใช้แถบยางพาราอัดแรงในการเสริมกำลังชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป พบว่า

1. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นเดียว ที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรงตามแนวยาวของชิ้นส่วน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับโมเมนต์ดัดของแผ่นพื้นในสภาวะการใช้งานในสภาวะทางสถิติศาสตร์

2. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นเดียว ที่เสริมกำลังโดยใช้แถบยางพาราอัดแรงตามแนวยาวของชิ้นส่วน เป็นวิธีที่ช่วยลดการแตกร้าวของระหว่างแผ่นของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปได้

3. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นคู่ ทดสอบแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวางของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มแรงอัดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน สามารถรับแรงกดทดสอบได้เพิ่มมากขึ้นจากชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปที่ไม่ได้เสริมกำลัง

4. การทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบชิ้นคู่ ทดสอบแบบเสริมกำลังด้วยวัสดุยางพาราในแนวขวางของชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูป เพื่อเพิ่มแรงอัดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน ช่วยลดการแตกร้าวรอยต่อของแผ่นพื้นได้

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดสอบจะพบว่าเป็นการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปแบบคานทอ้งเรียบ ซึ่งในอนาคตควรมีการทดสอบชิ้นส่วนสะพานสำเร็จรูปชนิดอื่น ๆ เช่น คานรูปตัวที ฯลฯ เพื่อหาแนวทางในการเสริมกำลังต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมทางหลวงผู้สนับสนุนทุนวิจัย และทีมนักวิจัยจากศูนย์วิจัยเฉพาะทางพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่มีส่วนช่วยในการทดสอบตัวอย่างในงานวิจัยนี้

References

- A. Ghobarah, A. Biddah, and M. Mahgoub, (1997). Rehabilitation of reinforced concrete columns using corrugated steel jacketing. *J. Earthquake Eng.* 1.
- A.R. Rahai, P. Sadeghian, and M.R. Ehsani. (2008). Experimental Behavior of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites.
- An He, Jian Cai, Qing-Jun Chen, Xinpei Liu, Hua Xue, and Chenjie Yu.(2017). Axial compressive behavior of steel-jacket retrofitted RC columns with recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*.
- Colomb F, Tobbi H, Ferrier E and Hamelin P. (2008). Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials. *Composite Structure*.
- Gia Toai Truong, Jong-Chan Kim, and Kyoung-Kyu Choi. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. *Engineering Structures*.
- Grubb, Michael A Corven, John A Wilson, Kenneth E Bouscher, Justin W Volle, Laura E. (2007). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) For Highway Bridge Superstructures*. (Fourth Edition). Arlington: Federal Highway Administration Final Submission National Highway Institute.

- Kittipoom rodsin (2017). *Reinforced concrete reinforcement design by Polymer fibers*. (First Edition).Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Mohamed Elchalakani, and Guowei Ma. (2017). Tests of glass fiber reinforced polymer rectangular concrete columns subjected to concentric and eccentric axial loading. *Engineering Structures*.
- Pedro Faustino, Pedro Frade, and Carlos Chastre. (2016). Lateral Cyclic Behaviour of RC Columns Confined With Carbon Fibres. *Structures*.
- R. C. Hibbeler, (2010). *Engineering Mechanics Statics*. (Twelfth Edition). Pearson Education, Inc.
- R.S. Aboutaha, M.D. Engelhardt, J.O. Jirsa, and M.E. Kreger. (1999). Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets. *ACI Struct. J*.
- Ruo-Yang Wu, and Chris P. Pantelides. (2017). Rapid repair and replacement of earthquake-damaged concrete columns using plastic hinge relocation. *Composite Structure*.
- Y. Xiao, and H. Wu. (2003).Retrofit of reinforced concrete columns using partially stiffened steel jackets. *J. Struct. Eng*.

สมบัติของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษอิฐมวลเบา

บดร่วมกับเถ้าลอย

กฤษฎา เสือเอี่ยม^{1*}, ประกาศิต โสไกร², ณัฐ ภาณุ²

^{1*}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอาคาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร

Email: gritsada.s@rmutp.ac.th^{1*}, psokrai@pnru.ac.th², natt@pnru.ac.th²

Received: May 24, 2019

Revised: June 6, 2019

Accepted: June 10, 2019

บทคัดย่อ

การนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศอีกด้วย มอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองนี้ถูกทำขึ้นโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตไฟฟ้าและอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ได้แก่ เถ้าลอยและเศษอิฐมวลเบา เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เศษอิฐมวลเบานำมาทำการบดละเอียดโดยเครื่องลอสแองเจลีส์ และแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก และ/หรือผสมรวมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 60 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมคอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานรวมเท่ากับ 591 กก/ลบ.ม. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.40 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้เส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 25 ± 2.5 ซม. โดยการปรับปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มและทำการทดสอบความสามารถในการทำงานได้ สมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะสด และแข็งตัว จากผลการศึกษาพบว่า มอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษอิฐมวลเบาร้อยละ 10 (FA0LB10) หรือผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 (FA40LB0) มีกำลังอัดกำลังดึง และมีความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม (FA0LB0) สอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำที่ต่ำ ทั้งนี้เมื่อผสมรวมเศษอิฐมวลเบา และเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 60 (FA40LB20) การพัฒนากำลังอัดได้สูงมากกว่าร้อยละ 80 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 91 วัน

คำสำคัญ : มอร์ตาร์ชนิดไหลอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง, เถ้าลอย, อิฐมวลเบา, กำลังอัด, กำลังดึง

Properties of Self-Compacting Mortar Mixed with Ground-Recycled Lightweight Concrete Block Incorporating Fly Ash

Gritsada Sua-iam^{1*}, Prakasit Sokrai², Natt Makul²

^{1*}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

²Department of Building Technology, Faculty of Industrial Technology, Phranakhon Rajabhat University

Email: gritsada.s@rmutp.ac.th^{1*}, psokrai@pnru.ac.th², natt@pnru.ac.th²

Received: May 24, 2019

Revised: June 6, 2019

Accepted: June 10, 2019

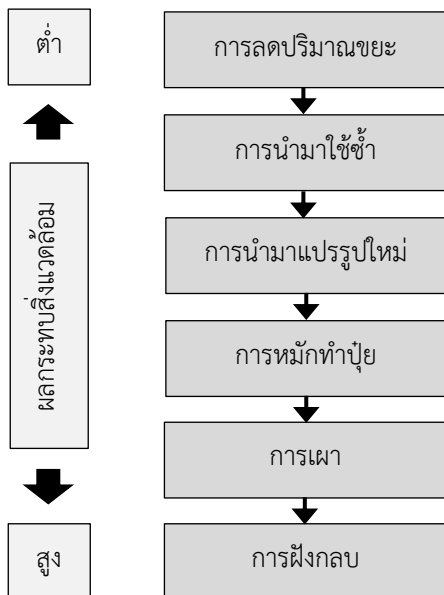
Abstract

Recycling of waste materials in construction materials can make materials environmental friendly and also reduce greenhouse gas emissions to atmosphere. This self-compacting mortar is prepared by using waste materials from thermal power plants and construction industry, including fly ash and lightweight concrete blocks as a cement replacement. Recycled lightweight concrete blocks was finely ground by Los Angeles machine, at replacement ratios of 10 and 20 percent by weight and/or mixed with fly ash at the cement replacement ratios of 40 and 60 percent by weight. Total binder material was maintain at 591 kg/cu.m. with a water-to-binder material ratio of 0.40. Controlling flow slump in the targeted flow slump diameter in the range of 25 ± 2.5 cm by varying the superplasticizer dosage was conducted. The workability-, fresh- and hardened- properties of self-compacting mortars were tested. The results showed that self-compacting mortar mixed with 10 percentage replacement with lightweight concrete blocks (FA0LB10) or 40 percentage replacement of fly ash (FA40LB0), the compressive strength, tensile strength, and ultrasonic pulse velocity was higher than those of the control concrete (FA0LB0) consistent to the lower water absorption results. However, when incorporating lightweight concrete blocks with and fly ash as a cement replacement at 60 percent (FA40LB20), the compressive strengths of self-compacting mortar had higher than 80% compared to the control self-compacting mortar at the age of 91 days.

Keywords : self-compacting mortar, fly ash, lightweight concrete block, compressive strength, tensile strength

บทนำ

ในปัจจุบันการกำหนดมาตรการในการส่งเสริมหรือข้อเรียกร้องในการจัดการสิ่งแวดล้อม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยการหาวิธีการที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการปกป้องสภาพแวดล้อมจากทุกภาคส่วนอุตสาหกรรมโดยรวมถึงอุตสาหกรรม การก่อสร้างสร้างนั้นมีการตื่นตัวเป็นอย่างมาก อย่างที่ทราบกันดีว่าอุตสาหกรรม การก่อสร้าง โดยธรรมชาตินั้นไม่ได้สร้างกิจกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากนัก โดยทั่วไปลำดับขั้นหรือแนวทางในการกำจัดขยะจากการก่อสร้างหากเรียงลำดับที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากน้อยไปหามาก (Tam & Tam, 2006, p. 210) สรุปได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวทางในการกำจัดขยะจากการก่อสร้างที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันงานก่อสร้างนิยมใช้คอนกรีตมวลเบาหรืออิฐมวลเบาอย่างแพร่หลายทั้งนี้เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจส่งผลให้อุตสาหกรรม การก่อสร้างเติบโตขึ้นรวมถึงคุณสมบัติพิเศษ ได้แก่ น้ำหนักเบา ขนาดที่ได้มาตรฐาน ทนไฟและ

ป้องกันความร้อนได้ดี ที่สำคัญช่วยในการลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอีกด้วย (นิตยร์ติ ดอเลาะ, 2552, น. 51) ในทางกลับกันความต้องการในการใช้งานอิฐมวลเบาที่มากขึ้นส่งผลให้มีเศษอิฐมวลเบาจากกระบวนการผลิต และจากการก่อสร้างมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อเป็นการนำเศษวัสดุเหลือใช้ต่าง ๆ เหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น อาทิเช่น การนำกลับมาทำอิฐสำหรับงานผนัง (ธรรมชนก เจริญทรัพย์ และคณะ, 2561, น. 111) การนำมาเป็นมวลรวมละเอียดในการผลิตคอนกรีต (รัฐพล สมนา และคณะ, 2557, น. 18) หรือนำกลับมาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลรวมเบา (Fenyvesi & Janhus, 2015, pp. 66) แทนที่จะนำไปถมที่หรือนำไปทิ้งเป็นขยะ ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้

มอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองเป็นนวัตกรรมของผลิตภัณฑ์รูปแบบหนึ่งสำหรับใช้ในงานซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเทมอร์ตาร์หลังจากผสมใหม่โดยไม่ต้องทำการจี้เขย่าในขณะที่มอร์ตาร์ซึ่งมีความเหลวยังคงมีความสม่ำเสมอ ไม่แยกตัวและสามารถไหลเข้าแบบได้อย่างทั่วถึง (Natt Makul et al., 2015, p. 15) จากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูง รวมถึงการนำสารเคมีมาผสมรวมเพื่อช่วยลดแรงดึงผิวของมอร์ตาร์ ในทางกลับกันกลับส่งผลทำให้ราคาของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองสูงขึ้นตามไปด้วย (Güneyisi & Gesoğlu, 2008, p. 1519) ดังนั้นการหาแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ในการผลิตมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง จะช่วยลดปัญหากระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนในงานก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดความยั่งยืนในอุตสาหกรรม การก่อสร้างในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการใช้วัสดุเหลือทิ้งโรงงานผลิตไฟฟ้าและจากการก่อสร้าง ได้แก่

เถ้าลอย และเศษอิฐมวลเบา นำมาใช้เป็นวัสดุ
ประสานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตมอร์ตาร์
ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

ระเบียบวิธีวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)
คุณสมบัติตามมาตรฐาน American Society for
Testing and Materials (ASTM) C150

2. เถ้าลอย วัสดุเหลือทิ้งจากการเผาถ่านหิน
เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ของโรงไฟฟ้า แม่เมาะ จ.ลำปาง
มีปริมาณผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3
มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นเป็นไป
ตามมาตรฐาน ASTM C618 ชนิด F (Class F)

3. เศษอิฐมวลเบากระบวนการผลิตแบบการอบ
ไอน้ำภายใต้แรงดัน

4. มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำที่มีขนาด
ละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33

5. น้ำประปา ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง ในช่วง
6-7

6. สารเคมีผสมเพิ่ม ประเภทสารลดน้ำ
จำนวนมากชนิดคาร์บอกซีแลค ประเภท F ตาม
มาตรฐาน ASTM C494

การเตรียมตัวอย่างและส่วนผสม

นำเศษอิฐมวลเบามาทำการบดละเอียดโดย
เครื่องลอสเองเจลีส และเลือกใช้เศษอิฐมวลเบา
บดละเอียดเฉพาะที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (เล็กกว่า
74 ไมครอน) มาทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20
โดยน้ำหนัก ผสมรวมเถ้าลอยในอัตราส่วนร้อยละ
40 และ 60 โดยน้ำหนัก ส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้ปริมาณ
วัสดุประสานรวมและทรายเท่ากับ 591 กก/ลบ.ม.
และ 810 กก/ลบ.ม. ตามลำดับ คิดเป็นอัตราส่วน
ปริมาณวัสดุประสานรวมต่อทรายเท่ากับร้อยละ
60:40 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน
(w/b) เท่ากับ 0.40

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตนเอง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ส่วนผสม	วัสดุประสาน						ทราย	น้ำ
	ปริมาณรวม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ร้อยละการแทนที่	เถ้าลอย	ร้อยละการแทนที่	เศษอิฐมวลเบา		
*FA0LB0	591	591	-	-	-	-	810	236.4
FA0LB10	591	531.9	-	-	10	59.1	810	236.4
FA0LB20	591	472.8	-	-	20	118.2	810	236.4
FA40LB0	591	354.6	40	236.4	-	-	810	236.4
FA40LB10	591	295.5	40	236.4	10	59.1	810	236.4
FA40LB20	591	236.4	40	236.4	20	118.2	810	236.4
FA60LB0	591	236.4	60	354.6	-	-	810	236.4
FA60LB10	591	177.3	60	354.6	10	59.1	810	236.4
FA60LB20	591	118.2	60	354.6	20	118.2	810	236.4

*หมายเหตุ : สัญลักษณ์ FA หมายถึง ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Fly ash) และ LB หมายถึง ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเศษอิฐมวลเบาบดละเอียด (Ground-recycled lightweight concrete block)

ควบคุมการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ให้อยู่ในช่วง
25±2.5 ซม. โดยการปรับปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม

ปริมาณส่วนผสมต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดง
ในตารางที่ 1

วิธีการทดสอบ

1. ทดสอบความสามารถในการทำงานได้ของมอร์ตาร์ ได้แก่ ความสามารถในการไหลแผ่โดย Mini-Slump Flow Cone กำหนดระยะการไหลแผ่ควบคุมของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมให้อยู่ในช่วง 25 ± 2.5 ซม. และการประเมินค่าความหนืดของมอร์ตาร์จากการไหลผ่านกลองแบนรูปทรงวี (Mini V-funnel) ตามมาตรฐาน European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC)

2. ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะสด ได้แก่ หน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) และระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ของมอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C807

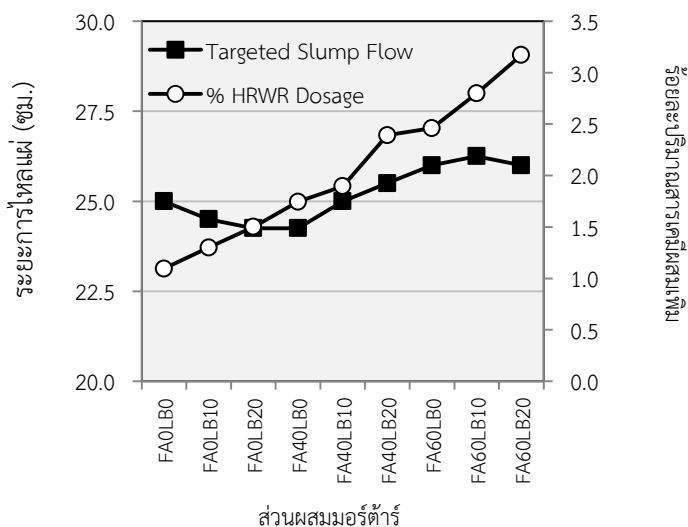
3. ทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ในสภาวะแข็งตัว ได้แก่ อัตราการดูดซึมน้ำที่อายุ 7 และ 28 วัน ตาม

มาตรฐาน ASTM C128 ทดสอบกำลังอัดประลัย (Compressive Strength) จากตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. ทดสอบกำลังดึง (Tensile Strength) จากตัวอย่างแบบบริเคต (Briquette) และทดสอบคุณภาพของมอร์ตาร์ด้วยวิธี Ultrasonic Pulse Velocity Test ตามระยะเวลาการบ่มน้ำที่อายุ 7, 28, 56 และ 91 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109, ASTM C307 และ ASTM C597 ตามลำดับ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ความสามารถทำงานได้

การประเมินความสามารถทำงานได้ จากการทดสอบการไหลแผ่โดย จากการกำหนดระยะการไหลแผ่ควบคุมของมอร์ตาร์อยู่ในช่วง 22.5-27.5 ซม. โดยความสัมพันธ์ของความสามารถในการไหลแผ่ที่กำหนดกับปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มดังแสดงในรูปที่ 2

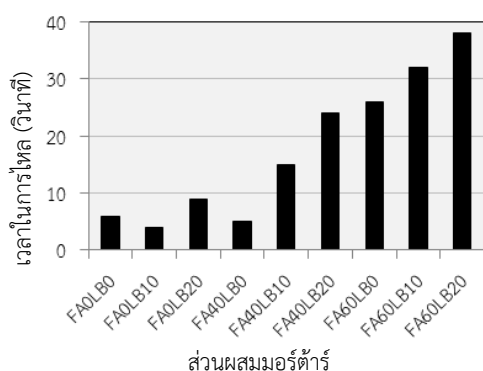


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของความสามารถในการไหลแผ่ที่กำหนดกับปริมาณสารเคมีผสมเพิ่ม

พบว่ามอร์ตาร์ทุกส่วนผสมมีความสามารถในการไหลแผ่ได้ตามกำหนด ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มที่ปรับตามส่วนผสมที่เปลี่ยนไป

โดยอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ปริมาณสารเคมีผสมเพิ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 1.09-3.17

การประเมินความสามารถทำงานได้ จากการทดสอบเพื่อประเมินค่าความหนืดของมอร์ตาร์ ทำโดยการวัดระยะเวลาในการไหลผ่านกลองที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังแสดงผลในรูปที่ 3 พบว่ามอร์ตาร์มีแนวโน้มความหนืดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากระยะเวลาในการไหลเพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น

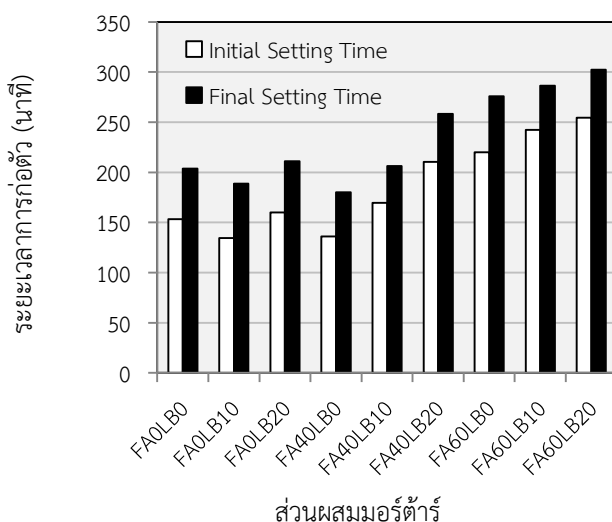


รูปที่ 3 เวลาไหลผ่านกลองแบบรูปทรงวี

ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดและอัตรา การดูดกลืนน้ำของเถ้าลอยและเศษอิฐมวลเบา ส่งผลให้มีความต้องการน้ำในส่วนผสมมากขึ้น มอร์ตาร์มีความหนืดสูงขึ้นตามไปด้วย (Natt Makul et al., 2015, p. 21; Güneyisi & Gesoğlu, 2008, p. 1525)

สมบัติของมอร์ตาร์ในสถานะสด

การวัดหน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่น ได้ด้วยตนเอง พบว่ามอร์ตาร์ทุกส่วนผสมที่มีการนำ เถ้าลอยและเศษอิฐมวลเบามาแทนที่ปูนซีเมนต์ หน่วยน้ำหนักมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ ควบคุม (FA0LB0) และมีแนวโน้มลดลงมากขึ้น เมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้น ผลเนื่องจากความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ เถ้าลอยและเศษอิฐมวลเบามีความแตกต่างกัน ส่วนผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตนเองดังแสดงในรูปที่ 4

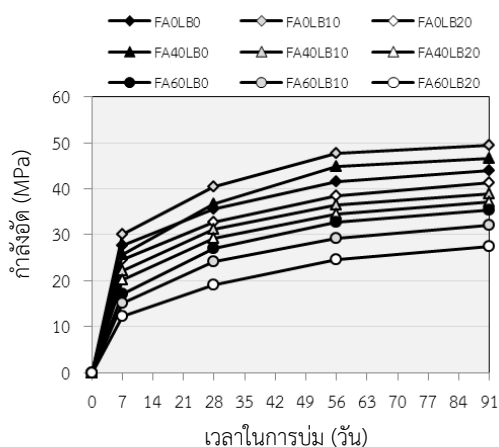


รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์

พบว่าการก่อตัวระยะต้นอยู่ในช่วง 134-254 นาที่ และการก่อตัวระยะปลายอยู่ในช่วง 180-302 นาที่ ทั้งนี้อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าลอยและเศษอิฐมวลเบาในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ลดลงส่งผลต่อความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในแต่ละส่วนผสมที่แตกต่างกัน (Natt Makul et al., 2015, p. 20; Güneysi & Gesoğlu, 2008, p. 1525)

สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัว

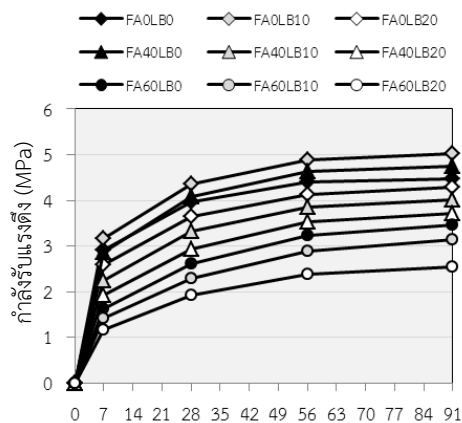
จากการทดสอบกำลังอัด และกำลังดึงของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตนเอง แสดงผลดังรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

มอร์ตาร์ควบคุม (FA0LB0) มีกำลังแรงอัดเท่ากับ 28, 36, 41 และ 44 เมกะปาสกาล (MPa) ที่อายุ 7, 28, 56 และ 91 วันตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่นำเถ้าลอย และ/หรือเศษอิฐมวลเบามาแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่ามอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษอิฐมวลเบาร้อยละ 10 (FA0LB10) มีค่ากำลังแรงอัดสูงสุด รองลงมาคือมอร์ตาร์ผสม

เถ้าลอยร้อยละ 40 (FA40LB0) มีค่าเท่ากับ 41 และ 37 MPa ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 47 MPa ที่อายุ 91 วัน ตามลำดับโดยกำลังแรงอัดที่ได้ดังกล่าวมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ควบคุม ในขณะที่ส่วนผสมมอร์ตาร์ที่เหลือมีค่ากำลังแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ละเอียดของเศษอิฐมวลเบาและเถ้าลอยช่วยเติมแทรกในระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้นในช่วงต้น ในขณะที่เดียวกันกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยยังเกิดจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานอีกด้วย ในขณะที่เมื่อทำการแทนที่เถ้าลอยและ/หรือเศษอิฐมวลเบามากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลงส่งผลให้สารประกอบทางเคมีจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตลดน้อยลงตามไปด้วย (Natt Makul et al., 2015, p. 22; Güneysi & Gesoğlu, 2008, p. 1528)

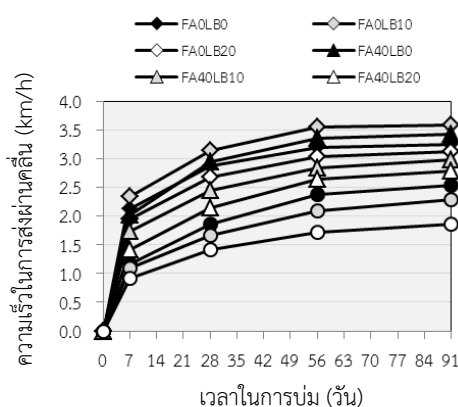


รูปที่ 6 กำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังดึงของมอร์ตาร์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัด และ มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่ม โดยมอร์ตาร์ควบคุม (FA0LB0) มีกำลังดึงเท่ากับ 2.9, 4.0, 4.4 และ 4.5 MPa ที่อายุ 7, 28, 56 และ 91 วัน

ตามลำดับ จากรูปที่ 6 พบว่ามอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเศษอิฐมวลเบาร้อยละ 10 (FA0LB10) มีค่ากำลังดึงสูงสุด รองลงมาคือมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 (FA40LB0) มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.1 MPa ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 5.0 และ 4.7 MPa ที่อายุ 91 วัน ตามลำดับ

จากรูปที่ 7 แสดงผลการทดสอบคุณภาพของมอร์ตาร์ด้วยวิธีวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

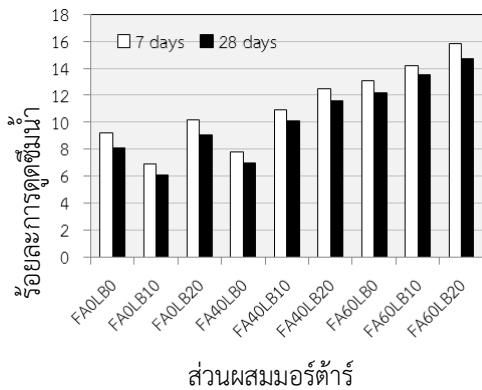


รูปที่ 7 การส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก

เพื่อประเมินความหนาแน่นจากการพัฒนาโครงสร้างภายใน กล่าวคือเมื่อโครงสร้างมีความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้นความเร็วในการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกย่อมสูงขึ้นตามไปด้วย และพบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความเร็วแปรผันตามระยะเวลาในการบ่ม และผลที่ได้สอดคล้องกับผลของกำลังอัด (Güneyisi & Gesoğlu, 2008, p. 1528) และกำลังดึงเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์เข้าไปแทรกกระหว่างอนุภาคส่งผลมอร์ตาร์มีความหนาแน่นมากขึ้นตามไปด้วย

การทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาในการบ่ม 7 และ 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า มอร์ตาร์มีอัตราการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่างร้อยละ 6.90-15.80 ที่อายุ 7 วัน และลดลงอยู่ระหว่างร้อยละ 6.10-14.70 ที่อายุ 91

วัน ตามลำดับ ผลการทดสอบอัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุของมอร์ตาร์มากขึ้น (ธรรมชนก เจริญทรัพย์และคณะ, 2561, น. 118) สอดคล้องกับผลการทดสอบการส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิก เนื่องจากโครงสร้างภายในมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นโดยขึ้นอยู่กับสัดส่วนผสม



รูปที่ 8 อัตราการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

การแทนที่เถ้าลอยหรือเศษอิฐมวลเบาในอัตราส่วนที่เหมาะสมส่งผลให้อัตราการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์ลดลง และมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (FA0LB0) ผลจากขนาดอนุภาคของวัสดุทดแทนที่เล็กกว่าเข้าไปอุดช่องว่างในภายใน รวมถึงการพัฒนาโครงสร้างภายในจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นส่งผลให้ช่องว่างและความพรุนของมอร์ตาร์ลดลงตามไปด้วย

สรุปผลการวิจัย

1. ความสามารถทำงานได้ของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองขึ้นกับชนิดและปริมาณการแทนที่ของวัสดุเหลือทิ้งที่นำมาทำการทดสอบในแต่ละชนิดโดยอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นมอร์ตาร์มีแนวโน้มความหนืดเพิ่มสูงขึ้น รวมถึงปริมาณการใช้สารเคมีผสมเพิ่มในส่วนผสมเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

2. หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองเมื่อนำเกลี่ยและ/หรือเศษอิฐมวลเบามาแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่สูงขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

3. การพัฒนากำลังอัด กำลังดึง และความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มที่เพิ่มขึ้น อายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โดยมอร์ตาร์ผสมเศษอิฐมวลเบาร้อยละ 10 (FA0LB10) มีการพัฒนาการรับกำลังสูงสุด รองลงมาคือ มอร์ตาร์ผสมเกลี่ยร้อยละ 40 (FA40LB0) ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมรวมเกลี่ยและเศษอิฐมวลเบาสูงถึงร้อยละ 60 (FA40LB20) สามารถกำลังอัดได้มากกว่าร้อยละ 85 เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 91 วัน สอดคล้องกับผลการทดสอบความเร็วในการส่งคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อประเมินความหนาแน่นของมอร์ตาร์มีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราการดูดซึมน้ำของตัวอย่างมอร์ตาร์มีค่าลดลง

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอายุในการใช้งานที่ยาวนานหลายสิบปี ดังนั้นควรมีการพิจารณาถึงสมบัติของคอนกรีตในระยะยาวที่เกิดจากผลกระทบต่อความคงทนของคอนกรีตในระยะยาว ตลอดจนการนำวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นกลับมาผสมรวมเศษอิฐมวลเบาในอัตราส่วนที่สูงสำหรับการผลิตมอร์ตาร์ชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครที่ได้สนับสนุนทุนในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึง นายกฤษฎิ์ชัย มากุล และ นายเกียรติศักดิ์ วรรณพงษ์ ที่ได้ช่วยจัดเตรียมข้อมูลในการทดสอบ งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

References

- Erhan Güneyisi and Mehmet Gesoğlu, (2008). Properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and metakaolin. *Materials and Structures*, 41, 1519–1531.
- Natt Makul, Gritsada Sua-iam and Prakasit Sokrai, (2015). Properties of Self-compacting mortar made with binary and ternary cementitious blends of untreated rice husk ash and silica fume. *Engineering Journal of Research and Development*. 26(4), 15-23.
- Nitradee Dolah, (2009). Light materials used in construction industry. *Princess of Naradhiwas University Jormal*. 1(3), 48-62.
- Oliver FENYVESI and Bence JANKUS, (2015). Opportunities in recycling AAC waste as aggregate for lightweight concrete. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 67(2), 66-70.
- Rattapon Somna, Chutipong Euathitaporn and Suksun Horpibulsuk, (2014). Compressive strength of concrete using recycled lightweight brick as fine. *Technical Education Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok*. 5(1), 18-24.
- Thanchanok Charoensap, Pipat Sornwongt, Watcharin Witayakul, (2018). Use of lightweight concrete debris for brick in wall works. *Engineering Journal Kasetsart*. 31(104), 111-120.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ปีที่ 7 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2562

Vivian W.Y. Tam and C.M. Tam. (2006). A review on the viable technology for construction waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 47, 209-221.

Ready-to-Use Titanium Dioxide Slurry for Cosmetics Application

Nuchanaporn Pijarn^{1*}, Natchaya Mapong¹, Wipawadee Newamart¹,

Somjintana Taveepanich¹, Janpen Intaraprasert¹

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

Email: nuchanaporn.p@ubu.ac.th^{1*}, natchaya.mapong@gmail.com¹, wipawadee28063@gmail.com¹,
noksomjintana@gmail.com¹, kjanpen@gmail.com¹

Received: May 27, 2019

Revised: June 21, 2019

Accepted: June 24, 2019

Abstract

The objective of research was to prepare ready-to-use TiO₂ in slurry form for easy use in cosmetics. Three types of TiO₂ source were prepared as TiO₂ slurry, namely commercial TiO₂ (TiO₂-A and TiO₂-P25) and synthesized TiO₂ (TiO₂-S). The suitability of solvents and amount of TiO₂, including optimum sonication time were studied. The experiments were set up as two groups of solvent, i.e. (1) six types of pure solvent and (2) nine types of mixed solvent. In order to achieve the best result of using solvent, 0.0075 g TiO₂ powder was added to each of 15 mL solvent and sonicated for 10 minutes. The results showed that butylene glycol (BG) was the best of pure solvent, and mixture of propylene glycol (PG) and BG ratio 1:1 was the best of mixed solvent. Due to lower cost of PG than BG, PG mixed with BG was chosen as the solvent for slurry preparation. The amount of TiO₂ was varied from 10-60% w/v of BG. Best slurry texture obtained using 60 %w/v of TiO₂. The study of sonication time was varied from 10-60 minutes. It was found that the optimum time was at 30 minutes. Texture and stability of prepared slurry were similar to commercial. Different sunscreens were formulated by containing prepared and commercial slurry separately and evaluated. There were no significant difference results between prepared slurry and commercial. In order to investigate the satisfaction of products, 40 volunteers were asked to use products for one week and answer in the questionnaires. The product containing prepared slurry was satisfied by 96% of volunteers, whereas the product containing commercial slurry was satisfied by 76% of volunteers.

Keywords : Titanium dioxide slurry, Titasol, Ready-to-Use TiO₂, Cosmetics, Sunscreen

Introduction

Nanotechnology and nanomaterials has been plays an important role in human life (Kimbrell, 2007, p. 117) making humans more comfortable living. Nowadays, there are many applications in various fields, such as medicine (Miraftab, 2017, p. 301) engineering (Profire & Constantin, 2019, p. 421) agriculture (Chaudhry, N, 2018, pp. 196-200) industry (Singh, 2017, pp. 185-191) and biotechnology (Panahi et al., 2018, pp. 15550-15558) Nanomaterials are materials that can be synthesized for obtaining particle sizes 1–100 nm. Titanium Dioxide (TiO_2) is one choice that can be synthesized and classified because of interesting properties, i.e. high refractive index, large energy band-gap, and a good property for using as photocatalyst.

TiO_2 , commercial name is Titanic anhydride or Titania (Greenwood & Earnshaw, 1984, pp. 1117–19) It has three types of chemical structure namely anatase, rutile, and brookite. The difference of the three structures is caused by the distortion shape and the arrangement of each octahedral. Anatase structure is formed by arrangement with each other using the top, the rutile structure is formed by arrangement with each other using the edge, and the brookite crystal structure is formed by arrangement with each other using both the top and the edge of each octahedral. (Oi et al., 2016, pp. 108741–108754) These different arrangements of atoms in the three

structures that are make different properties. The properties of brookite structures have an orbital crystal structure is orthorhombic, if it is heated more than 750°C , will change into a tetragonal of rutile form. Anatase structure is a tetragonal structure, if moderately heated above 915°C to change the crystal structure to rutile. Energy gap of TiO_2 is 3.20 eV (Scanlon et al., 2013, pp.798-801) When it was stimulated by higher energy than energy band gap, electrons jump up from the surface, electrons holes occurred, and will create free radicals of hydroxyl radicals, which are the gases and unstable. TiO_2 has been developed to make the particles smaller, thus having sun protection properties that can be used in sunscreen cream because this material helps to prevent radiation from the sun during 260-700 nm and can prevent visible and invisible radiation by using the principle of instantaneous radiation reflection that can prevent sunlight (Ibrahim et al., 2019, pp. 953-962) For these reasons, TiO_2 has been applied to use as an ingredient in cosmetics for sun protection. However, the limitation of using TiO_2 in powder form is non-homogeneous texture when adding in some liquid cosmetics. TiO_2 is the substance which hard to dissolve with general polar and non-polar solvent, separate from these solvent by

precipitation in the short time when contact with these solvent.

Consequently, from these interesting properties of TiO_2 and the limitation for using TiO_2 powder in cosmetics, the researchers of this research realized the importance of TiO_2 in slurry form preparation for ready to use in cosmetics.

Objectives

The objectives of this work were;

1. To prepare TiO_2 slurry for using as an ingredient in cosmetics.
2. To study the suitable solvent, amount of TiO_2 and time of ultrasonic for preparing TiO_2 slurry.
3. To prepare sunscreen cream using prepared TiO_2 slurry and commercial slurry (Titasol S-35).
4. To investigate the satisfaction of volunteers after using both sunscreens creams containing prepared TiO_2 slurry and commercial slurry.

Research methodology

1. Synthesis and characterization of TiO_2

TiO_2 was synthesized followed by previous report (Pijarn, Jeimsirilers & Jinawath, 2013, pp. 661-666) and used as TiO_2 slurry in comparison to commercial (TiO_2 -A and TiO_2 -P25). TiO_2 was characterized with various techniques as following; Morphology of TiO_2 -S, TiO_2 -A, and TiO_2 -P25 were observed by Scanning Electron Microscope (SEM) using a JSM 5410-LV, JEOL. The elemental analyses of three

TiO_2 samples were verified by Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS). Specific surface area of all sample were measured by Surface Area and Pore Size Analyzer using Quadrasorb-EVO, Quantachrome with Brunauer-Emmett-Teller (BET) method. Particle size distribution of TiO_2 -S, TiO_2 -A, and TiO_2 -P25 was measured by Zetasizer using Nano ZS, Malvern. The particle size was measured in range of 10 nm to 30 μm by dissolving the sample with water and sonication for 1 minute. The colloidal sample was put on sample cell and measured the particle size, and size distribution.

2. Study of the optimum condition for TiO_2 slurry preparation

Six types of pure solvent i.e. water (H_2O), propylene glycol (PG), dipropylene glycol (DPG), butylene glycol (BG), cyclomethicone (CMC), dimethicone (DMC) and nine types of mixed solvent in the ratio of 1:1, i.e. 1) PG and DMC, 2) PG and CMC, 3) DPG and DMC, 4) DPG and CMC, 5) BG and DMC, 6) BG and CMC, 7) PG and DPG, 8) PG and BG, and 9) DPG and BG were studied. In order to achieve the best result of suitable solvent for slurry preparation, 0.0075 g TiO_2 powder was added to each of 15 mL solvent and sonicated for 10 minutes. The optimum time of sonication was studied using 15 mL BG with 0.0075 g of TiO_2 powder and sonication time for 10, 20, 30, 40, 50, and 60 min. The optimum amount of TiO_2 powder was

studied in various amounts of TiO_2 powder for 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, and 6.0 g with 10 mL of BG and sonication time for 30 minutes. The suitable source of TiO_2 powder was studied by using two sources of commercial TiO_2 powder (TiO_2 -A and TiO_2 -P25) and one source of synthesized TiO_2 (TiO_2 -S) as the purpose of precursor using in TiO_2 slurry preparation instead of expensive commercial slurry. The texture properties of TiO_2 slurry from all conditions was studied compared with commercial TiO_2 slurry (Titasol S-35).

3. Preparation of sunscreen cream

Sunscreen cream was prepared from TiO_2 slurry of TiO_2 -S compared with the sunscreen cream prepared from commercial Titasol S-35 followed in Table 1

Table 1 formula of sunscreen cream

Part	Materials	Weight (%)
A	Water	55.0
	Glycerin	3.0
	Amino Coat TM	2.0
	Oligo GGF TM	1.0
	Glydant Plus	0.35
B	Stearic acid	3.0
	E-wax	3.0
	Cethyl alcohol	3.0
	Shea butter	1.0
	Jojoba oil	1.0
	Caprylic Capric Triglyceride	2.5
	Cetiol OE	5.0
	Hostaphat KL340D	1.0
	TiO_2 slurry*, **	6.0
	Zincsol-S50	1.0

Part	Materials	Weight (%)
C	Octylmethoxycinnamate	2.0
	Cyclomethicone	5.0
D	Water	10.0
E	Urea	2.0
	Vitamin E	1.0

*Formula 1; TiO_2 slurry from commercial Titasol S-35

**Formula 2; synthesized TiO_2 slurry from this work

4. Stability test of sunscreen cream

Stability testing for two sunscreen cream formulas was based on protocols designed to test the cosmetic product attributes that are susceptible to change during storage. These attributes may influence cosmetic product quality, safety and performance. We evaluated product stability using freeze and thaw cycle (freeze and then thaw it out) for 6 cycles (Smaoui et al., 2017, pp. S1216–S1222) Appearance, odor, viscosity, texture and pH of sunscreen cream were also tested.

5. The volunteer's satisfaction test

Two formulas of sunscreen products were satisfaction tested by 40 volunteers who used both sunscreen creams that prepared from commercial Titasol S-35 and TiO_2 slurry from this work. Each formula of sunscreen cream was tested for one week. The satisfaction on sunscreen products was evaluated by questionnaire.

Results

TiO₂ powder was synthesized by microwave method and TiO₂ slurry was prepared by the optimum condition study. TiO₂ slurry was prepared from TiO₂-A, TiO₂-P25, and TiO₂-S. Results of this study were in Figure 1 TiO₂-A had peak pattern shows high intensity at $2\theta = 24.8$ and followed by 37.3, 37.81, 38.51, 47.99, 53.89, 55.07, 62.71, 69.0, 70.0, 75.0, respectively. TiO₂-P25 had peak pattern show high intensity at $2\theta = 24.8$, and followed by 37.3, 47.99, 53.89, 55.07, 62.71, 69.0, 70.0, 75.0, respectively. TiO₂-S had high intensity peak at $2\theta = 24.8$, 27.31 and 29.0.

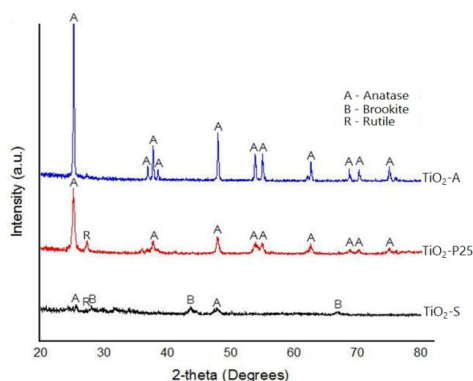


Figure 1 XRD patterns of TiO₂

TiO₂ powder was synthesized by microwave method and TiO₂ slurry was prepared by the optimum condition study. TiO₂ slurry was prepared from TiO₂-A, TiO₂-P25, and TiO₂-S. The morphology of TiO₂-A, TiO₂-P25, and TiO₂-S were observed by SEM at magnification of 5,000 and 10,000 as shown in Figure 2.

The result shows that TiO₂-A and TiO₂-P25 show clouded of spherical shape, agglomerated particle, and roughness surface. TiO₂-S found that the particle size is larger size than TiO₂-A and TiO₂-P25, and forming a group of cubes with a shape that is apiece or a bar and a small scale mixed particles together.

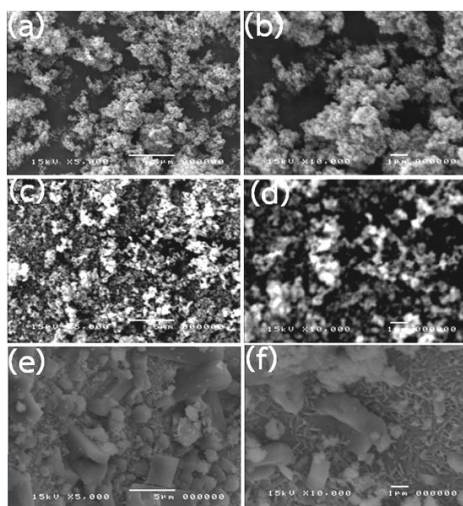


Figure 2 Morphology of TiO₂; (a) x5k of TiO₂-A, (b) x10k of TiO₂-A, (c) x5k of TiO₂-P25, (d) x10k of TiO₂-P25, (e) x5k of TiO₂-S, and (f) x10k of TiO₂-S

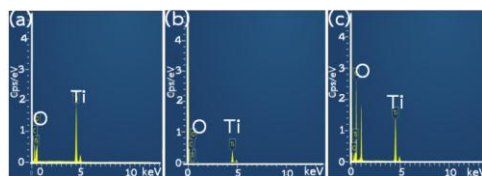
The particle size of TiO₂-A, TiO₂-P25, and TiO₂-S had particles size distribution around 90-700, 0.4-8, and 0.3-3 μm , respectively. The particles size in each range was calculated by program in zetasizer found that the particle size of TiO₂-A, TiO₂-P25, and TiO₂-S as shown in Table 2 The average particle size was evaluated of TiO₂-A, TiO₂-P25, and TiO₂-S as 0.297 μm , 8.427 μm , and 2.847 μm , respectively.

Table 2 Particles size of three TiO_2

No.	TiO_2 -A (nm)	TiO_2 -P25 (nm)	TiO_2 -S (nm)
1	296.3	10,535.8	1,279.3
2	285.5	7,575.8	3,065.9
3	290.2	7,172.4	2,509
Average	290.7	8,427.9	2,284.7

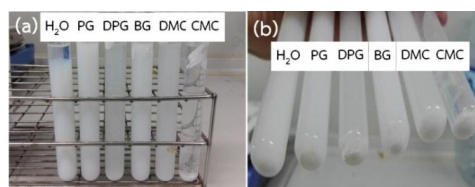
Specific surface area of TiO_2 -A, TiO_2 -P25, and TiO_2 -S were measured by BET method. The results show that specific surface area of TiO_2 -A, TiO_2 -P25, and TiO_2 -S was 56, 8, and $156.9 \text{ m}^2/\text{g}$, respectively.

The EDS spectrums showed that Ti and O were the main elements of TiO_2 powder for all TiO_2 samples as can be seen in Figure 3.

**Figure 3** EDS spectrum of TiO_2 ; (a) TiO_2 -A, (b) TiO_2 -P25, and (c) TiO_2 -S

Results of the suitable pure solvent study, the particles dispersion and precipitation after left for 5 days were observed. The dispersion occurred in H_2O , PG, DPG and BG, whereas separated of layer in DMC and CMC. After left at room temperature for 5 days, the precipitate can be seen in $\text{CMC} > \text{DMC} > \text{DPG} > \text{H}_2\text{O} > \text{PG} > \text{BG}$. (Figure 4). Due to low-molecular weight of CMC and DMC, dispersion of TiO_2 in that silicone oil needs polymeric dispersants for example, polyethylene

glycol (Traiphol et al., 2013, pp. 315-321) Whereas, DPG, H_2O , PG, BG gave better results than CMC or DMC due to its high polarity. Nine Mixtures of medium; 1) PG and DMC, 2) PG and CMC, 3) DPG and DMC, 4) DPG and CMC, 5) BG and DMC, 6) BG and CMC, 7) PG and DPG, 8) PG and BG, and 9) DPG and BG were studied. It was found that PG mixed with BG gave the better result than other mixtures and it is similar result to single BG solvent. Even though, BG gave the best result in slurry form, it is expensive. Therefore, PG mixed with BG was chose as the medium for slurry preparation.

**Figure 4** Sedimentation of TiO_2 -S after sonication for 5 days; (a) layers, and (b) precipitate

The optimum time of sonication was studied to find the suitable time for sonication by varying as 10, 20, 30, 40, 50, and 60 minutes. The results showed that the precipitate decreased with increasing time of sonication. Due to ultrasonic wave has been proven as a useful tool to disperse nanoparticles and to eliminate agglomeration in aqueous suspensions. Precipitation of sample at 30 minutes shows the precipitate as little as 60 minutes. Therefore, time of sonication 30

minutes was selected as the optimum time.

The optimum amount of TiO_2 powder was studied in various amount of 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, and 6.0 g, with 10 mL of BG and PG (or 10, 20, 30, 40, 50, and 60% w/v) and sonication time for 30 minutes. Figure 5a show various amount of TiO_2 powder in 10 mL of BG and PG immediately after sonication. Figure 5b show various amount of TiO_2 powder in 10 mL of BG and PG immediately after sonication for 5 days. It was found that the optimum amount of TiO_2 as 60% w/v because of viscosity and flow rate of texture as same as commercial slurry, i.e. Titalol S-35.

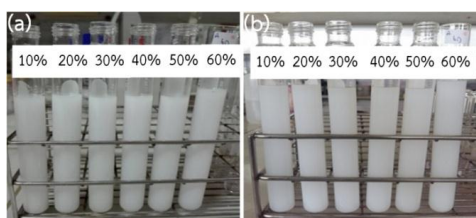


Figure 5 TiO_2 -S in BG and PG; (a) immediately and (b) after sonication for 5 days

The suitable source of TiO_2 powder was studied by using three sources of TiO_2 powder that were commercial TiO_2 -A, TiO_2 -P25, and TiO_2 -S. Each TiO_2 powder 12 g was dissolved in 20 mL BG and PG (60% w/v) with sonication time for 30 minutes. The result of slurry showed that TiO_2 -A had homogeneous of white texture, TiO_2 -P25 had heterogeneous of white texture but liquefied more than

TiO_2 -A and TiO_2 -S. TiO_2 -S, texture had homogeneous white-yellow color with viscosity as same as TiO_2 -A. Therefore, TiO_2 -A slurry was suitable for using in white cream, and TiO_2 -S slurry was suitable for cream no need to be very white. On the other hand, TiO_2 -P25 was not suitable for using in cream because of heterogeneous texture (see Figure 6)

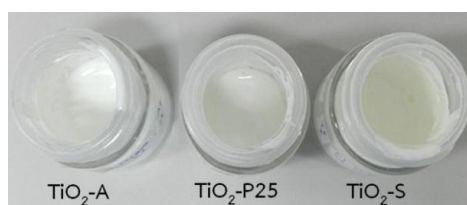


Figure 6 Texture of TiO_2 -A, TiO_2 -P25, and TiO_2 -S slurry

The stability of TiO_2 slurry in both sunscreen creams was tested for 6 cycles by observing color, odor, viscosity, texture. The results showed in Table 3

Table 3 Properties of sunscreen cream

Property	Form. 1 (cream from Titalol-S35)	Form. 2 (cream from TiO_2 slurry)
Texture	homogeneous	homogeneous
Color	white	white-yellow
Odor	pleasant	pleasant
smell	smell	smell
pH	6.0	5.8
Viscosity (cps)	35,846	35,267

The satisfaction on sunscreen products was evaluated by questionnaire. The results showed in Table 4 This table

revealed that most volunteers prefer formula 2 that were prepared from TiO_2 slurry in this work (96 %) more than formula 1 (76 %). The reason, may be Titasol S-35 (commercial TiO_2 slurry) contains many ingredients, such as TiO_2 , cyclopentasiloxane, PEG-10, dimethicone, aluminum hydroxide (and) stearic acid (Sinthai, 2018 p. 10) might that cause in sticky texture on skin when using.

Table 4 Satisfaction of volunteers on both sunscreen formulas

Satisfaction assessment criteria	Satisfaction level (5 point)	
	Formula 1	Formula 2
Color	3.80	3.95
Odor	3.70	3.75
Texture	3.70	4.40
Permeability into the skin	3.35	4.20
Moisturizing of the product	3.65	4.05
Feeling after applying	3.55	4.35
Average	3.63	4.80
Percentage	76.00	96.00

Conclusions and Discussion

TiO_2 slurry has been successfully prepared for easy use in cosmetics. Crystal structure of TiO_2 -A had structure of anatase phase, TiO_2 -P25 had structure mixed phase of anatase and rutile phase, and TiO_2 -S after calcinations 700°C for 2 hours shows small crystallinity of mixed phase of anatase, rutile and brookite. These results were correlated with the

structure of anatase, brookite and rutile phase of TiO_2 . The high intensity peak at $2\theta = 24.8$ referred to anatase, 2θ at 27.31 referred to rutile, and 2θ at 29.0 referred to brookite phase followed by JCPDS 29-1360 standard peak pattern of orthorhombic (Alkallas, Elshokrofy, & Mansour, 2019, pp. 1-7) The crystal structures of orthorhombic brookite (space group Pbca), tetragonal anatase (I41/amd), and tetragonal rutile (P42/mnm). The edge-sharing and corner-sharing TiO_6 octahedral were the more or less distorted trigonal planar environments of the oxygen atoms (Riedel, 2004, pp.71)

The morphology from SEM results show clouded of spherical shape and agglomerated particles of TiO_2 -A and TiO_2 -P25 because of the spherical of anatase phase (Kamitakahara et al., 2011, pp. 2283-2287) On the other hand, TiO_2 -S, the particle size was larger size than TiO_2 -A and TiO_2 -P25, and forming a group of various shape and size may caused by mixed phase of anatase, brookite, and rutile. This result was related that TiO_2 has various particle shapes follow phase content and the condition of synthesis (García-López et al., 2019, pp. 118-124) Specific surface area of all TiO_2 from BET method shows that TiO_2 -S has higher surface area than TiO_2 -A and TiO_2 -P25 (156.9 , 56 and $8 \text{ m}^2/\text{g}$, respectively). Although particle size of TiO_2 -S is bigger than the other, this is mixed phase of

anatase, brookite and rutile. Thus this high surface area may be caused by pore between particles. In addition to having pore between each particle, there was also a pore between each phase, this enhance photocatalytic activity related with some report (Chang & Cho, 2019, pp. 683-693) The optimum solvent study for preparation of TiO_2 slurry show that the pure solvent is butylene glycol and mixed solvent is propylene glycol mixed with butylene glycol in ratio of 1:1. This result related the widely used cosmetic solvent (Veiga et al., 2018, pp. 261-271) The amount of TiO_2 as 60 % w/v was the optimum amount of TiO_2 for preparation of TiO_2 slurry because the viscosity and texture of TiO_2 slurry was same as commercial texture. The stability test of products, precipitation increased with increasing of the cycle number. The satisfaction of two formulas of sunscreen products exposed that most people like sunscreen prepared from this work for 96 %, this value is more than the commercial Titasol S-35.

Acknowledgement

This work was supported by Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University.

References

- Alkallas, F. H., Elshokrofy, K. M., Mansour, S. A. (2019). Structural and diffuse reflectance characterization of cobalt-doped titanium dioxide nanostructured powder prepared via facile sonochemical hydrolysis technique. *Nanomaterials and Nanotechnology*. 2019 (9), 1-7.
- Chang, L. H., Cho, C.-P. (2019). Enhanced photocatalytic characteristics by Ag-sensitized TiO_2 photocatalysts with mixed phases. *Materials Chemistry and Physics*. 2019 (223), 683-693.
- Chaudhry, N., Dwivedi S., Chaudhry, V., Singh, A., Saquib, Q., Azamb, A., Musarrat, J. (2018). Bio-inspired nanomaterials in agriculture and food: Current status, foreseen applications and challenges. *Microbial Pathogenesis*. 2018 (123), 196-200.
- García-López, E. I., Marci, G., Dozzi V. M., Palmisano, L., Selli, E. (2019). Photoactivity of shape-controlled TiO_2 in gas-solid regime under solar irradiation. *Catalysis Today*. 2019(328), 118-124.
- Greenwood, N. N., Eamshaw, A. (1984). *Chemistry of the Elements*. Oxford: Pergamon Press.
- Ibrahim, M. M., Mezni, A., El-Sheshtawy, S. H., Zaid, A. A. A., Alsawat, M., Sameh, N.-S. , Abdallah, A. I., Mohammed, A. S., Amin, A., Kumeria, T., Altalhi, T. (2019). Direct Z-scheme of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ enhanced self-cleaning, antibacterial activity, and UV protection of cotton fiber under sunlight. *Applied Surface Science*. 2019.479(15), 953-962.

- Kamitakahara, M., Kawaguchi, O., Watanabe, N., Loku, K. (2011). Characterisation and photocatalytic activity of structure - controlled spherical granules of an anatase/hydroxyapatite composite. *Materials Research Bulletin*. 2011. 46(12), 2283-2287.
- Kimbrell, G. A. (2007). *Global Regulatory Issues for the Cosmetics Industry*. Amsterdam: William Andrew.
- Mirafteb, M. (2017). *Nanobiomaterials Science*. Amsterdam: Woodhead Publishing.
- Oi, E. L., Yee, M. C., Lee, V. H., Ong, H. C., Hamid, B. A. S., Juan, C. J. (2016). Recent advances of titanium dioxide (TiO₂) for green organic synthesis. *RSC Advances*. 2016(6), 108741–108754.
- Panahi, Y., Mellatyar, H., Farshbaf, M., Sabet, Z., Fattahi, T., Akbarzadehe, A. (2018). Biotechnological applications of nanomaterials for air pollution and water/wastewater treatment. *Materials Today Proceeding*. 5(7/3), 15550-15558.
- Pijarn, N., Jeimsirilers, S., Jinawath S. (2013). Photocatalytic Activity of Mixed Phase TiO₂ from Microwave-Assisted Synthesis. *Advanced Materials Research*. 2013 (664), 661-666.
- Profire, L., Constantin, S. M. (2019). *Polymeric Nanomaterials in Nanotherapeutics*. Amsterdam: Elsevier Publishing.
- Riedel, R., (2004). *Handbook of Ceramic Hard Materials*. (4th edition) New Jersey: Wiley-VCH.
- Scanlon, O. D., Dunnill, W. C., Buckeridge, J., Shevlin, A. S., Logsdail, J. A., Woodley, M. S., Catlow, A. C. R., Powell, J. M., Palgrave, G. R., Parkin, P. I., Watson, W. G., Keal, W. T., Sherwood, P., Walsh, A., and Sokol A. A. (2013). Band alignment of rutile and anatase TiO₂. *Nature Material*. 2013(12), 798-801.
- Sin Thai Chemicals and Trading, (2018). *Product List, Thickener and Emulsifier*. Bangkok: Sin Thai Chemicals and Trading Ltd.
- Singh, A. N., (2017). Nanotechnology innovations, industrial applications and patents. *Environmental Chemistry Letters*. 2017 15(2), 185-191.
- Smaoui, S., Hlima B. H., Chobba B. I., Kadri, A. (2017). Development and stability studies of sunscreen cream formulations containing three photo-protective filters. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017 (10), S1216–S1222.
- Traiphol N., Toommee, S., Rutnakompituk, M., Traiphol, R., Jinawath, S. (2013) Improvement of dispersion and stability of fine titanium dioxides in silicone fluid using poly (ethylene oxide-b-dimethylsiloxane-b-ethylene oxide) triblock copolymer: Effects of the dispersant structure and concentration *Journal of Ceramic Processing Research*. 14(3), 315-321.

Veiga, M.P., Gomes, A. C. L., Veloso, C. O.,
Henriqu, C. A.(2018). Etherification of
different glycols with ethanol or 1-
octanol catalyzed by acid zeolites.
Molecular Catalysis. 2018 458(B),
261-271.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เป็นวารสารตีพิมพ์และเผยแพร่บทความวิจัยในด้านเทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารฉบับนี้จะต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องจำนวน 2 ท่านต่อหนึ่งบทความ หากผู้ทรงคุณวุฒิ 2 ท่าน มีความคิดเห็นไม่ตรงกัน ทางวารสารจะส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิท่านที่ 3 เป็นผู้พิจารณา และต้องได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา โดยบทความที่พิจารณาตีพิมพ์ในวารสารนี้จะต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของวารสารอื่น กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ในการแก้ไขต้นฉบับและการพิจารณาตีพิมพ์ตามลำดับก่อนหลัง โดยมีข้อเสนอแนะในการส่งบทความดังนี้

การเตรียมต้นฉบับบทความ

ชื่อเรื่อง (Title)	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษคร่าวสั้น กระชับ ครอบคลุมเนื้อหาสำคัญ และสื่อความหมายของเรื่องที่ทำการวิจัย
ชื่อ นามสกุลของผู้เขียน	ระบุชื่อนามสกุลเต็ม ของผู้เขียนให้ครบทุกคน <u>โดยไม่ต้องใส่คำนำหน้านามใดๆ</u> ระบุสถานที่ทำงานหรือหน่วยงานที่สังกัดของผู้เขียน, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Email) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
บทคัดย่อ (Abstract)	มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษเป็นเนื้อความสรุปสาระสำคัญของเรื่อง ครอบคลุมวัตถุประสงค์ วิธดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย และผลสรุป มีความยาวไม่เกิน 250 คำ ให้พิมพ์คอลัมน์เดียว
คำสำคัญ (Keyword)	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรเลือกคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบทความ จำนวน 3-5 คำ
บทนำ	อธิบายถึงความสำคัญหรือที่มาของปัญหาที่ทำการศึกษาวัตถุประสงค์ และอาจรวมไปถึงวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
เนื้อเรื่อง	ใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย กระชับและชัดเจน
วิธีการวิจัย	อธิบายขั้นตอนการวิจัย วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล และวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย
ผลการวิจัย	อธิบายผลการทดลองที่พบอย่างชัดเจน ครบถ้วน
สรุปและอภิปรายผล	เป็นการประเมิน การตีความ และการวิเคราะห์ในแง่มุมต่าง ๆ ของผลที่ได้ว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์หรือไม่ มีความสอดคล้องหรือขัดแย้งกับผลงานผู้อื่นอย่างไร โดยต้องมีการอ้างทฤษฎีหรือผลการศึกษาของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ
กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี)	ระบุสั้น ๆ ว่าได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและความช่วยเหลือจากแหล่งใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References)

ให้เขียนเอกสารอ้างอิงตามรูปแบบ American Psychological Association (APA) ตามรูปแบบที่กำหนด โดยแปลเอกสารอ้างอิง (References) จากภาษาไทยให้เป็นภาษาอังกฤษ

รูปภาพและตาราง

ต้องมีความคมชัดเป็นภาพขาวดำที่ชัดเจน มีคำอธิบายสั้น ๆ ครบถ้วนและเข้าใจ กรณีที่เป็นตาราง ให้ระบุลำดับที่ของตาราง ใช้คำว่า “ตารางที่.....” และอธิบายใส่ไว้เหนือตาราง กรณีที่เป็นรูป ให้ระบุลำดับที่ของรูปใช้คำว่า “รูปที่.....” และมีคำอธิบายใส่ไว้ใต้รูป

การเขียนเอกสารอ้างอิง

American Psychological Association (APA)

การอ้างอิงในเนื้อหา

กรณีที่ผู้เขียนต้องการระบุแหล่งที่มาของข้อมูลในเนื้อเรื่องให้ใช้วิธีการอ้างอิงแบบนาม-ปี (author-date in-text citation) มี 3 รูปแบบ ดังนี้

1. (ผู้แต่ง, ปีพิมพ์, เลขหน้า) ไว้ท้ายข้อความที่อ้างอิง เช่น (ธานินทร์ ศิลป์จารุ, 2553, น. 35-40)

(McCartney & Phillips, 2006, pp. 498-499) (Murphy, 1999, p. 85)

กรณีที่ไม่มีปรากฏเลขหน้าให้ลงแค่ชื่อผู้แต่งกับปีพิมพ์ไว้ในวงเล็บเดียวกัน

เช่น (ธานินทร์ ศิลป์จารุ, 2553)

2. ผู้แต่ง (ปีพิมพ์, เลขหน้า) กรณีมีการระบุชื่อผู้แต่งในเนื้อหาแล้ว ไม่ต้องระบุ ไว้ในวงเล็บ ท้ายข้อความที่อ้างอิง เช่น ยุทธ โกยวรรณ์ (2557, น.45) ได้ศึกษาถึง.....

Kanokon Boonsarngsuk (2002, p. 14) studied.....

กรณีที่ไม่มีปรากฏเลขหน้าให้ลงแค่ชื่อผู้แต่งกับปีพิมพ์โดยลงปีพิมพ์ไว้ในวงเล็บ

เช่น สายชล ทองคำ (2550)

3. ปีพิมพ์ ผู้แต่ง (เลขหน้า) กรณีมีการระบุปีพิมพ์และผู้แต่งในเนื้อหาแล้ว (ปีพิมพ์และผู้แต่งสามารถสลับที่กันได้) ให้ระบุเฉพาะเลขหน้าที่อ้างอิงในวงเล็บเท่านั้น เช่น ในปี 2551 รังสรรค์ ประเสริฐศรี ได้กล่าวว่า ผู้นำ คือ บุคคลที่ทำให้องค์กรประสบความสำเร็จ และบรรลุผลสำเร็จ โดยเป็นผู้แสดงบทบาทความสัมพันธ์ระหว่างบุคคล หรือผู้นำคือ บุคคลซึ่งก่อให้เกิดความมั่นคงและช่วยเหลือบุคคลต่าง ๆ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของกลุ่ม จากความหมายของผู้นำที่กล่าวข้างต้น พอสรุปได้ว่า ผู้นำเป็นบุคคลที่มีอำนาจหรืออิทธิพลเหนือบุคคลอื่นในกลุ่มหรือชุมชน เป็นที่ยอมรับและได้รับการเชื่อฟังจากสมาชิกของกลุ่มหรือชุมชนที่ต้องปฏิบัติตามเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์และเป้าหมายของกลุ่มที่ตั้งไว้ (น. 9)

การอ้างอิงท้ายบทความ

เป็นการรวบรวมเอกสารทั้งหมดที่ผู้เขียนบทความได้ใช้อ้างอิงในการเขียนบทความ ****โดยแปลเอกสารอ้างอิงจากภาษาไทยให้เป็นภาษาอังกฤษ** และจัดเรียงรายการตามลำดับอักษรชื่อผู้แต่ง ตัวอย่าง เช่น

ชื่อผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). *ชื่อหนังสือ(ตัวเอียง)*. (พิมพ์ครั้งที่). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์ หรือโรงพิมพ์.

ชื่อผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. ใน ชื่อบรรณาธิการ, *ชื่อหนังสือ(ตัวเอียง)*. (เลขหน้าบทความ). เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์หรือโรงพิมพ์.

ชื่อผู้แต่ง. (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. *ชื่อวารสาร(ตัวเอียง)*. ปีที่พิมพ์ (ฉบับที่), เลขหน้าบทความ.

ชื่อผู้เขียนวิทยานิพนธ์. (ปีที่วิจัยสำเร็จ). *ชื่อวิทยานิพนธ์(ตัวเอียง)*. วิทยานิพนธ์ปริญญา(ระดับ) ชื่อสาขาวิชา สังกัดของสาขาวิชา มหาวิทยาลัย.

การส่งต้นฉบับบทความ

ส่งบทความผ่านระบบ <http://www.journal.fit.ssru.ac.th> เท่านั้น หากต้องการรายละเอียดเพิ่มเติม สามารถติดต่อได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา เลขที่ 1 ถนนอุทองนอก แขวงวชิระ เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2160 1438 ต่อ 22 โทรสาร 0 2160 1440 Email : fit@ssru.ac.th



แบบฟอร์มส่งบทความวิจัยเพื่อพิจารณาตีพิมพ์
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

(ภาษาอังกฤษ)

ชื่อ-สกุล ผู้เขียนบทความ

ระดับการศึกษาสูงสุด ตำแหน่งทางวิชาการ

หน่วยงาน

สถานที่ติดต่อผู้เขียนบทความ

เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร

E-mail.....

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมบทความ (1)

เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร

E-mail.....

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมบทความ (2)

เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรศัพท์มือถือ โทรสาร

E-mail.....

ข้าพเจ้า และผู้เขียนร่วม (ถ้ามี) ขอรับรองบทความที่เสนอตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา ดังนี้

1. บทความฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน และไม่ได้อยู่ระหว่างกระบวนการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารใดๆ

2. เนื้อหาของบทความ ทั้งข้อความ รูปภาพ ทั้งหมดที่ปรากฏขอรับรองว่าเป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วม ในกรณีที่มีการอ้างถึงผลงานจากผู้อื่น ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมได้ดำเนินการตามจรรยาบรรณทางการวิจัยทุกประการ กรณีมีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมขอรับผิดชอบแต่เพียงผู้เดียว

3. ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมยินยอมรับเงื่อนไขการพิจารณาบทความ และยินยอมปรับแก้บทความตามคำแนะนำ ของผู้ทรงคุณวุฒิหรือตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร

4. ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมขอมอบลิขสิทธิ์บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ให้แก่มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

ลงชื่อผู้ส่งบทความ

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....