

ประสิทธิผลของสารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้าต่อการเก็บรักษาผลกล้วยน้ำว้า

THE EFFECTIVENESS OF CHITOSAN COATING FROM OYSTER MUSHROOM
ON BANANA FRUIT'S SHELF LIFEนลินอร นุ้ยพลอด¹Nalin-on Nuiplot¹^{*1} งานวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

*nalin-on@vru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบไคโตซานที่ได้จากเห็ดนางฟ้าต่อการยืดอายุผลกล้วยน้ำว้า เนื่องจากผลการศึกษาก่อนหน้าเกี่ยวกับการยืดอายุผลไม้ด้วยฟิล์มยืดห่ออาหารชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์ที่เคลือบด้วยกลีเซอรอล พบว่าสามารถยืดอายุของกล้วยหอมได้ถึง 9 วัน ในอุณหภูมิห้อง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจประยุกต์สารเคลือบไคโตซานที่ได้จากเห็ดนางฟ้าที่มีปริมาณไคโตซานมากเป็นอันดับ 3 จากเห็ดกินได้ 7 ชนิด ทั้งยังเพาะง่าย และราคาถูก ให้มีสภาพพลาสติกของฟิล์มยืดห่ออาหาร โดยนำกลีเซอรอลและทวิน 80 มาใช้ร่วมกับไคโตซาน จากนั้นศึกษาผลของสารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของผลกล้วยน้ำว้าระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง โดยติดตามในทุก 5 วัน เป็นระยะเวลารวม 10 วัน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสีเปลือก และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ทั้งนี้สารเคลือบไคโตซานต้องทดสอบเรื่องความหนืดและการยึดเกาะกับพื้นผิว ก่อนนำไปใช้ทดลองในขั้นต่อไป ผลการวิจัยพบว่า 1) กล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเคลือบด้วยไคโตซานจากเห็ดนางฟ้ามีคุณภาพสูงกว่ากล้วยน้ำว้าที่ไม่ผ่านการเคลือบ และ 2) กล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเคลือบด้วยไคโตซานจากเห็ดนางฟ้าที่นำกลีเซอรอลและทวิน 80 มาใช้ร่วม มีคุณภาพสูงกว่ากล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเคลือบจากไคโตซานปกติ และยังสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลกล้วยน้ำว้าได้ประมาณ 10 วัน หรือมากกว่า ที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ: ไคโตซาน ไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า สารเคลือบไคโตซาน การยืดอายุกล้วยน้ำว้า

ABSTRACT

This research was aimed to study the efficiency of the chitosan coating from oyster mushroom on extension of banana's shelf life. According to previous study on fruit aging, polyvinyl chloride: a food wrap film was coated with glycerol. It was found that the life of the banana could

วันที่รับบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2564

วันแก้ไขบทความ 8 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 20 มีนาคม 2564

be extended up to 9 days at room temperature. The researcher, therefore, was interested in applying chitosan coatings obtained from Oyster mushroom; which contains the third highest content of chitosan out of 7 edible mushrooms, easy to grow and not expensive, to have a plastic condition as the food wrap film by applying glycerol and also tween 80 with the chitosan. The effect of the developed chitosan was further studied on the changes of banana's fruit during storage at room temperature. They were observed the color changing and % weight loss in every 5 days for a total period of 10 days. The coatings were tested for the viscosity and adhesion to the surface before being used for further testing. The results showed that: 1) the coated bananas had a higher quality than the uncoated ones, and 2) the bananas coated with the chitosan that was used with glycerol and tween 80 had a higher quality than the normal one. Moreover, it can extend the shelf life of banana fruit to around 10 days or more than at room temperature or at 25 degree Celsius.

Keywords: Chitosan, Chitosan from Oyster mushroom, Chitosan coating, Extension of banana fruit

1. บทนำ

กล้วยน้ำว้าเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีมูลค่า มีรสชาติดี ประกอบอาหารได้หลากหลายชนิด เป็นแหล่งอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ทานได้ทุกวัยตั้งแต่ทารกจนถึงวัยชรา เนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็นในการเจริญเติบโต คือ อาร์จินีน (Arginine) และฮิสทีดีน (Histidine) และมีปริมาณแคลเซียมสูงสุดเมื่อเทียบกับกล้วยสายพันธุ์อื่น ๆ ในปริมาณเท่ากัน [1] ทั้งยังมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากได้รับความนิยมในการรับประทานทั้งในและต่างประเทศ แม้กล้วยน้ำว้าเป็นกล้วยที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ [2] แต่ในบางช่วงก็เผชิญปัญหาในด้านการตลาดและส่งออก เพราะอายุการเก็บรักษาสั้นอันเป็นปัญหาต่อการกระจายสินค้า [3] การแปรรูปกล้วยน้ำว้าจึงอาจเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการยืดอายุการเก็บรักษาเพื่อขยายตลาดการส่งออก อย่างไรก็ตาม กล้วยน้ำว้าสดในรูปแบบสุกพร้อมทานก็ยังเป็นที่ต้องการและได้รับความนิยม ซึ่งการกระจายสินค้าในระยะทางไกลและสภาพอากาศร้อนชื้นจะทำให้กล้วยน้ำว้าเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพและเสื่อมเสียอย่างรวดเร็วจากกระบวนการออกซิเจน หรืออาจปนเปื้อนจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดอาหารเป็นพิษ รวมทั้งการย่อยสลายตัวเองเนื่องจากอุณหภูมิโปรตีนที่ย่อยง่ายและกรดอะมิโนจำเป็น [4] ส่งผลให้เกิดปัญหาทางคุณภาพ จึงสูญเสียคุณภาพและมูลค่าทางเศรษฐกิจ

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ส่วนใหญ่จะได้รับการสกัดสารจากเปลือกแข็งของสิ่งมีชีวิตจำพวกกุ้ง ปู และเห็ดรา เป็นสารธรรมชาติที่ปลอดภัย ไม่เป็นพิษ ราคาไม่สูง และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ มีประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร ช่วยส่งเสริมให้อาหารปราศจากสิ่งปนเปื้อน [5] โดยมีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ ทั้งที่ก่อโรคและทำให้เกิดการเน่าเสีย เนื่องจากประจุบวกที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของกลูโคซามีน สามารถทำปฏิกิริยากับเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งมีประจุลบ [6] ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดการรั่วและสูญเสียโปรตีนรวมทั้งสารอื่น ๆ ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ ส่งผลให้จุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในที่สุด นอกจากนี้ ไคโตซานยังมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน [7] เนื่องจากสามารถจับกับโมเลกุลของธาตุโลหะได้

(Chelating agent) โดยมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกที่สามารถจับโลหะที่เป็นตัวเร่งของปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยทั่วไปทั้งแบบที่เกิดจากเอนไซม์หรือไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องก็ตาม ดังนั้นไคโตซานจึงสามารถช่วยรักษาคุณภาพสีผิวของอาหารจำพวกผักและผลไม้ได้ อาจนับได้ว่าสามารถใช้ไคโตซานทดแทนสารต้านออกซิเดชันสังเคราะห์ได้ นอกจากนี้ จากการที่ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำมารับประทานได้ จึงมีแนวโน้มว่าจะมีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์ทางอาหารเพิ่มขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันผู้บริโภคใส่ใจสุขภาพมากขึ้นโดยการหลีกเลี่ยงสารเคมีที่ไม่ได้มาจากธรรมชาติ การเลือกใช้ไคโตซานจึงจะช่วยลดปริมาณใช้สารเคมีในอาหารสังเคราะห์ที่เติมไปด้วยสารเคมีอันอาจจะเกิดการสะสมและเป็นอันตรายต่อร่างกายในที่สุด ดังนั้นเห็ดนางฟ้าซึ่งนำมาใช้สกัดไคโตซานได้ประมาณ 0.5 ± 0.12 กรัม/ตัวอย่าง 100 กรัม [5] และมักไม่พบสถานการณ์การแพ้อาหารจำพวกเห็ดนางฟ้าเท่ากับจากกุ้งหรือปู [8] ทั้งยังมีการเพาะกันโดยทั่วไปโดยรอบบริเวณที่ศึกษา จึงเหมาะในการนำมาทำการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสารเคลือบไคโตซานที่ได้จากเห็ดนางฟ้าต่อการยืดอายุผลกล้วยน้ำว้า ด้วยการสังเกตและวัดผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกล้วยน้ำว้าที่เก็บรักษา ณ อุณหภูมิห้อง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบัน การใช้วัสดุจากธรรมชาติที่มีความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก หนึ่งในนั้นคือ สารพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural polymer) ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เช่น เซลลูโลส (Cellulose) แป้ง (Starch) เพกติน (Pectin) รวมทั้งไคติน (Chitin) และไคโตซาน โดยข้อดีของสารพอลิเมอร์เหล่านี้คือ ผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่มากมายในธรรมชาติ ทั้งบนบกและในทะเล นอกจากนี้ยังเข้ากับธรรมชาติได้ดีและย่อยสลายได้เอง [9] มีการพัฒนาสูตรสารเคลือบผิวไคโตซานสำหรับผักและผลไม้กันอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการถนอมอาหารของไคโตซานขึ้นอยู่กับชนิดและสภาวะการเก็บรักษาอาหาร ตลอดจนชนิดของจุลินทรีย์ที่มักมีการปนเปื้อนในอาหารนั้น ๆ [10] มีรายงานว่าสารเคลือบผิวจากไคโตซานมีความต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี ดังนั้นจึงมีการประยุกต์เติมสารประเภทไขมันซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านการซึมผ่านไอน้ำได้ดี เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของสารเคลือบ [11] ทั้งนี้เนื่องจากกล้วยน้ำว้าเป็นผลไม้ที่มีอัตราการหายใจ สูง (Climacteric fruit) ในระหว่างการเก็บรักษา ดังนั้นสารเคลือบผิวที่นำมาใช้จึงควรช่วยลดการสูญเสียน้ำและการแลกเปลี่ยนแก๊ส [12] ซึ่งการศึกษาของ อุมพร และคณะ (2552) [13] พบว่าการเคลือบผิวกล้วยหอมด้วยฟิล์มห่ออาหารชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์และกลีเซอรอล ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและการเกิดจุดสีน้ำตาลของกล้วยหอมได้ดีกว่ากล้วยที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และเนื่องจากกลีเซอรอลและทวิน 80 เป็นไขมันจากพืช ที่มักพบในอุตสาหกรรมอาหาร มีคุณภาพดี ราคาถูก และมีจุดหลอมเหลวต่ำ [14] จึงนิยมนำมาใช้ในการยืดอายุผลิตภัณฑ์อาหาร ในการวิจัยนี้จึงนำทั้งกลีเซอรอลและทวิน 80 มาใช้ร่วมกันเพื่อเพิ่มคุณภาพของไคโตซาน

การศึกษาผลของไคโตซานจากเห็ดในการยืดอายุการเก็บเกี่ยวพืชยังมีอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาเกี่ยวกับไคโตซานจากเห็ดต่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อราในกล้วยไม้รองเท้านารีชาวดุสิต [15] โดยพบว่าเมื่อสกัดใบกล้วยไม้ที่ได้รับไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า แสดงค่าการทำงานของเอนไซม์ไคตินเนส (Chitinase: CTN activity) สูงสุด นั่นแสดงว่าไคโตซานจากเห็ดนางฟ้าสามารถยับยั้งการเจริญของผนังเซลล์ของราได้มาก

ผลการศึกษาปริมาณไคโตซานจากเห็ดกินได้ 7 ชนิด ได้แก่ เห็ดหอม เห็ดกระด้าง เห็ดหูหนูสีน้ำตาล เห็ดเผาะ เห็ดฟาง เห็ดนางฟ้า และเห็ดนางรม [5] พบว่า ปริมาณไคโตซานจากเห็ดทั้ง 7 ชนิด มีปริมาณ 1.54%, 2.25%, 0.45%, 1.12%, 0.47%, 1.26% และ 0.50% ตามลำดับ โดยปริมาณไคโตซานที่พบมากเป็น 3 อันดับแรก

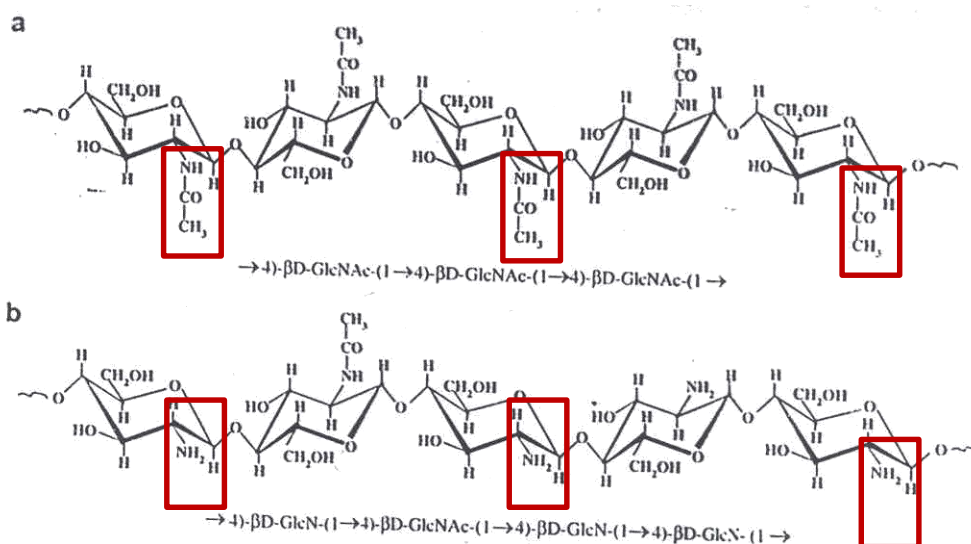
คือ เห็ดกระด้าง เห็ดหอม และเห็ดนางฟ้า ทั้งเนื่องจากเห็ดนางฟ้าเป็นเห็ดที่เพาะได้ง่าย เหมาะกับสภาพอากาศ โดยทั่วไปในทุกภูมิภาค และมีราคาถูก ผู้วิจัยจึงคัดเลือกเห็ดนางฟ้ามาใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

การผลิตโคโตซานโดยทั่วไปจะได้จากปฏิกิริยากากำจัดหมู่แอซิติล (Acetyl) ของโคติน หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาดีแอซิติลเลชัน (Deacetylation reaction) ทำให้ เอ็น-แอซิติลกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine) ซึ่งเป็นโมเลกุลเดี่ยวของโคตินถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคซามีน (ภาพที่ 1) ดังนั้นจากโคตินจึงเปลี่ยนเป็นโคโตซาน สามารถทำได้โดยให้โคตินทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสเข้มข้น 30-60% (w/v) เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80-140 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานถึง 10 ชั่วโมง [16]

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมโคโตซานจากเห็ดนางฟ้า (ดัดแปลงจาก [12])

นำเห็ดนางฟ้าที่ผึ่งแดดจนแห้งและบดละเอียดแล้วไปกำจัดไขมันออกด้วยปิโตรเลียม อีเธอร์ (Petroleum ether) (1 g: 5 ml) จากนั้นนำไปกรอง และอบแห้ง จนกลายเป็นผงของแข็ง จากนั้นนำผงของแข็งที่ได้ไปกำจัดแร่ธาตุด้วยการต้มกับกรด ในที่นี้ใช้ 2M HCl (1 g: 5 ml) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ กรอง และอบแห้งจนกลายเป็นผงของแข็ง นำผงของแข็งที่ได้ไปย่อยโปรตีนออกด้วยการต้มกับเบส ในที่นี้ใช้ 2M NaOH (1 g: 5 ml) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำ กรอง และอบแห้งจนกลายเป็นผงของแข็ง แล้วจึงนำผงของแข็งที่ได้ไปสกัดสารสี (Pigment) ออก ด้วยอะซิโตน (Acetone) (1 g: 3 ml) จากนั้นกรองแบบลดความดัน และอบแห้ง ในขั้นตอนนี้จะได้โคติน และนำโคตินไปทำปฏิกิริยากำจัดหมู่แอซิติลด้วย 50% NaOH ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำ กรอง และอบแห้ง ในขั้นตอนนี้จะได้โคโตซาน



ภาพที่ 1 โครงสร้างของโคติน (a) และโคโตซาน (b) แตกต่างกันที่ลักษณะหมู่แอซิติลของกลูโคซามีน [7]

3.2 การเตรียมสารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า (ดัดแปลงจาก [12])

ชั่งไคโตซาน 0.3 กรัม ละลายในสารละลายอะซิติกเข้มข้น 3% ปริมาตร 10 มิลลิลิตร กวนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า โดยค่อย ๆ เติมไคโตซานลงในกรดทีละน้อยจนกว่าไคโตซานจะละลายหมด จากนั้นใช้อัตราส่วนระหว่าง สารละลายไคโตซาน:กลีเซอรอล:ทวิน 80 ในอัตราส่วน 8:1:1 และใช้เครื่องกวนผสมให้เข้ากัน

3.3 การวิเคราะห์คุณภาพสารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า

โดยวิเคราะห์คุณภาพของสารเคลือบในรูปแบบสารละลายหรือสารเคลือบซึ่งได้จากการขึ้นรูปบนกระเจกที่หุ้มด้วยฟิล์มยืดห่ออาหารชนิดพอลิไวนิลคลอไรด์ ที่ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วประเมินค่าคุณสมบัติทางกายภาพ 4 ลักษณะ คือ 1) ลักษณะปรากฏของสารละลาย 2) ความหนืดของสารละลาย จากการขึ้นรูปสารเคลือบไคโตซานจำนวน 50 ครั้ง นับจำนวนครั้งที่สารเคลือบไคโตซานมีลักษณะการเกาะติดกันเป็นแผ่นเดียวกัน โดยควรมีค่ามากกว่า 80% 3) การเกาะติดพื้นผิววัสดุ นับจำนวนครั้งที่พลิกคว่ำกระเจก 50 ครั้ง แล้วสารเคลือบไคโตซานสามารถเกาะติดกระเจกอยู่ได้ โดยควรมีค่ามากกว่า 80% และ 4) ความหนาของสารเคลือบไคโตซานโดยเฉลี่ย จากการขึ้นรูปสารเคลือบไคโตซานจำนวน 50 ครั้ง

3.4 การประยุกต์ใช้สารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า

คัดเลือกสูตรสารเคลือบผิวที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าคุณภาพแล้ว มาเคลือบบนผิวกล้วยน้ำว้าที่แบ่งออกเป็นหวีย่อย ๆ หวีละประมาณ 10 ผล โดยใช้วิธีการจุ่ม (Dip) จากนั้นผึ่งให้แห้ง แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25 ± 2 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองทั้งหมด 3 กลุ่ม กับกล้วยน้ำว้าที่สุกพร้อมทานในอีก 1-2 วัน ดังนี้ 1) กลุ่มควบคุมที่ 1 หรือ กล้วยน้ำว้าปกติที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว 2) กลุ่มควบคุมที่ 2 หรือ กล้วยน้ำว้าที่ผ่านการห่อฟิล์มยืดห่ออาหารและเคลือบด้วยกลีเซอรอล และ 3) กลุ่มทดลอง หรือ กล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า โดยทำการทดลองกลุ่มละ 4 ซ้ำ เก็บผลการทดลองทุก ๆ 5 วัน เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 10 วัน เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีเปลือกโดยการสังเกตเฉดสีและจุดน้ำตาล (ตารางที่ 1) และวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) โดยนำการชั่งน้ำหนักกล้วยในทุก ๆ 5 วัน จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณค่าเฉลี่ย (%) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD)

ตารางที่ 1 เกณฑ์การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีเปลือก (ดัดแปลงจาก [18] และ [19])

การเปลี่ยนแปลงสีเปลือก		
ระดับสีเหลือง:เขียว	จำนวนจุดน้ำตาล	ความหมาย
< 20%	≤ 2 จุด	เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด
20-49%	3-5 จุด	เปลี่ยนแปลงน้อย
50-79%	6-9 จุด	เปลี่ยนแปลงปานกลาง
80-89%	10-15 จุด	เปลี่ยนแปลงมาก
$\geq 90\%$	≥ 16 จุด	เปลี่ยนแปลงมากที่สุด

4. ผลการวิจัย

4.1 คุณภาพสารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า

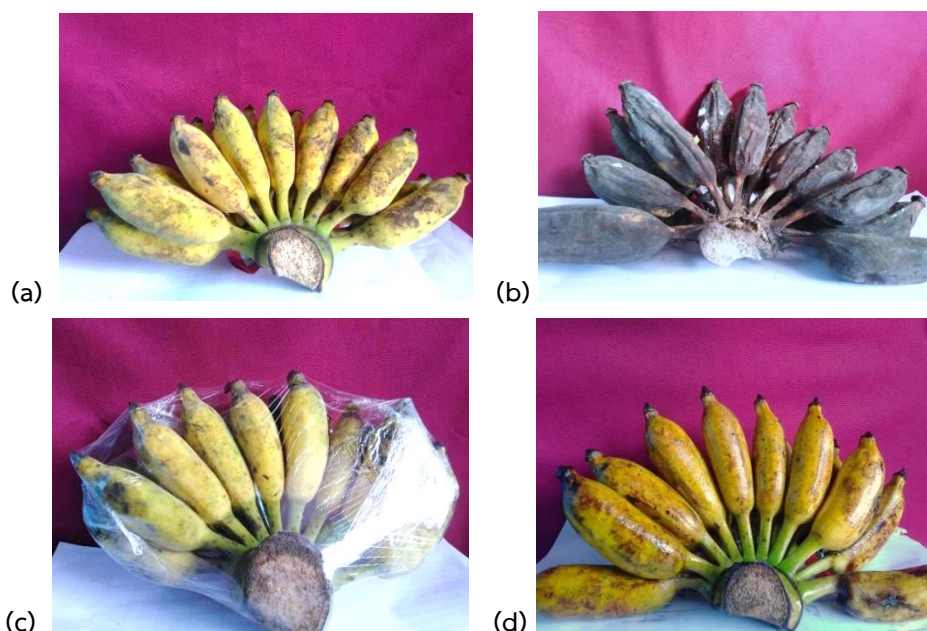
สารเคลือบไคโตซานมีลักษณะปรากฏเป็นของเหลว สารเนื้อเดียว สีขาวขุ่น อมเหลืงอ่อน สามารถขึ้นรูปโดยมีการเกาะติดเป็นแผ่นเดียวกัน คิดเป็น 96% และเมื่อพลิกคว่ำกระจก สารเคลือบไคโตซานสามารถเกาะติดกระจกอยู่ได้ คิดเป็น 94% และความหนาของสารเคลือบไคโตซานโดยเฉลี่ย มีค่า 0.025 เซนติเมตร (SD = 0.14)

4.2 การประยุกต์ใช้สารเคลือบไคโตซานจากเห็ดนางฟ้ากับกล้วยน้ำว้า

จากการศึกษาเบื้องต้นเพื่อทดสอบเรื่องความหนืดและการเกาะติดพื้นผิววัสดุของสารเคลือบไคโตซานพบว่า ทั้งความหนืดและการเกาะติดพื้นผิววัสดุ มีค่าสูงกว่า 80% ดังนั้นจึงถือว่าสารเคลือบไคโตซานผ่านการทดสอบ และสามารถนำไปใช้ทดสอบในขั้นต่อไป คือการประยุกต์ใช้สารเคลือบไคโตซานกับการยืดอายุกล้วยน้ำว้า โดยประเมินจากค่าลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงสีเปลือก

การเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกกล้วยน้ำว้าเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยน้ำว้าวันที่ 0 (2a) มีดังนี้ ในหรีปกติที่ไม่เคลือบผิว มีการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยในระดับมากที่สุด (2b) ในหรีที่ห่อด้วยฟิล์มยืดสำหรับห่ออาหาร และเคลือบด้วยกลีเซอร์รอล มีการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยในระดับมาก (2c) และในหรีที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบไคโตซาน มีการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยในระดับปานกลาง (2d) (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 (a) กล้วยน้ำว้าวันที่ 0, (b) กล้วยน้ำว้ากลุ่มควบคุมที่ 1, (c) กล้วยน้ำว้ากลุ่มควบคุมที่ 2, และ (d) กล้วยน้ำว้ากลุ่มทดลอง โดย (b), (c), และ (d) เป็นผลหลังเก็บรักษา ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 10 วัน

4.2.2 การสูญเสียน้ำหนัก

เมื่อครบระยะเวลาทดสอบ 10 วัน พบว่า กล้วยน้ำว่าในกลุ่มทดลอง มีค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่ากล้วยน้ำว่าในกลุ่มควบคุมที่ 1 โดยมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน 3.22% (และเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยน้ำว่าในกลุ่มทดลองกับกล้วยน้ำว่าในกลุ่มควบคุมที่ 2 พบว่ามีค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนักแตกต่างกัน 0.17% (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) โดยเฉลี่ยของกล้วยน้ำว่าทั้ง 3 กลุ่มทดสอบ เมื่อเก็บรักษา ณ อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 10 วัน

กลุ่มทดสอบ	การสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) โดยเฉลี่ย $\pm$ SD		
	วันที่ 0	วันที่ 5	วันที่ 10
กลุ่มควบคุมที่ 1	0	10.02 $\pm$ 0.3	15.30 $\pm$ 0.4
กลุ่มควบคุมที่ 2	0	5.57 $\pm$ 0.1	8.25 $\pm$ 0.2
กลุ่มทดลอง	0	5.10 $\pm$ 0.1	8.08 $\pm$ 0.2

5. อภิปรายผล สรุปผล และข้อเสนอแนะการวิจัย

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิวโคโตน พบว่าค่าความหนืดและการเกาะติดพื้นผิววัสดุของสารเคลือบ สามารถเกาะติดเป็นแผ่นเดียวกันและเกาะติดบนแผ่นกระจกอยู่ได้ คิดเป็น 96% และ 94% ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์ 80% แสดงให้เห็นว่า สารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยโคโตนและกลีเซอรอลและทวิน 80 ในอัตราส่วน 8:1:1 ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิวโคโตนมีความเหมาะสมในการนำไปเคลือบผิวกล้วยน้ำว่าเพื่อการยืดอายุการเก็บรักษาต่อไป ทั้งนี้เมื่อความหนืดของสารเคลือบเพิ่มสูงขึ้น จะแสดงถึงความต้านทานต่อการไหลในค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Perez-Gago *et al.* (2002) [19] ที่พบว่า การเกาะติดที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวข้องกับความหนืดของสารเคลือบผิวที่สูงขึ้น โดยกลีเซอรอลและทวิน 80 ส่งผลให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโครงสร้างโมเลกุลให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นความหนืดจึงเพิ่มขึ้น [18]

สำหรับคุณสมบัติของสารเคลือบผิวโคโตนเมื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม มีความหนาเฉลี่ย 0.025 เซนติเมตร (SD = 0.14) เมื่อพิจารณาไปถึงความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของอุมาพร และคณะ [13] พบว่าความหนาดังกล่าวทำให้มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดี แต่ยังคงพบว่า กลีเซอรอลมีอิทธิพลต่อความสามารถในการซึมผ่านออกซิเจนสูงกว่าทวิน 80 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Srinivasa *et al.* (2007) [21] ที่พบว่า การเติมกลีเซอรอลในฟิล์มโคโตนจะส่งผลให้ความสามารถของการซึมผ่านออกซิเจนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากส่งผลให้มีการขยายสายโซ่ของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ทำให้แรงต้านระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์และออกซิเจนลดลง แต่ทวิน 80 เป็นเพียงสารลดแรงตึงผิวที่ไม่ส่งผลต่อการซึมผ่านของออกซิเจน

จากผลการทดลองในภาพที่ 2 และตารางที่ 2 พบว่า ค่าคุณภาพทางกายภาพของกล้วยน้ำว่ากลุ่มทดลองมีค่าสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ 1 และ 2 โดยพิจารณาเมื่อวันที่ 10 ของการเก็บรักษา จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกของกล้วยน้ำว่าที่ผ่านการเคลือบผิวจากโคโตนจากเห็ดนางฟ้าโดยใช้ร่วมกับกลีเซอรอลและทวิน 80 มีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่ามากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มกล้วยน้ำว่าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และมีการเปลี่ยนแปลงช้ากว่าเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มกล้วยน้ำว่าที่ห่อฟิล์มยืดสำหรับห่ออาหารและเคลือบด้วยกลีเซอรอล แม้การเคลือบเปลี่ยนแปลงช้ากว่าเพียงเล็กน้อยทั้งที่มีสีเข้มกว่า

อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการห่อฟิล์มพลาสติก แต่เมื่อวิเคราะห์จากเฉดสีและจำนวนจุดน้ำตาลโดยเฉลี่ย พบว่ามีผลการทดลองที่แตกต่างกัน โดยการเคลือบมีผลการเปลี่ยนแปลงปานกลาง ส่วนการห่อพลาสติกมีผลการเปลี่ยนแปลงมาก แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวช่วยชะลอการเปลี่ยนสีเปลือกของกล้วยน้ำว้าให้ช้าลงจากปกติได้ดีกว่าการห่อฟิล์มพลาสติก และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยการสูญเสียน้ำหนัก พบว่ากล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเคลือบผิวจากไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่ามาก เมื่อเทียบกับกลุ่มกล้วยน้ำว้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเล็กน้อย เมื่อเทียบกับกลุ่มกล้วยน้ำว้าที่ห่อฟิล์มยืดสำหรับห่ออาหารและเคลือบด้วยกลีเซอรอลและทวิน 80 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของคณิศร และคณะ (2549) [22] ที่พบว่า การเคลือบผิวกล้วยไข่ด้วยสารสกัดจากครั้งเมียดช่วยลดการสูญเสียน้ำหนัก ความหนาแน่น และการเปลี่ยนสีของเปลือกกล้วยไข่ให้ช้าลง โดยสามารถเก็บรักษากล้วยไข่ไว้ได้นาน 4 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับการศึกษาของอุมาพร และคณะ (2552) [13] ที่พบว่า กล้วยหอมที่ผ่านการเคลือบผิวมีคุณภาพสูงกว่ากล้วยหอมที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และสามารถยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมได้อย่างน้อย 12 วัน ที่อุณหภูมิ 26 ± 2 องศาเซลเซียส

ดังนั้น กลีเซอรอลและทวิน 80 มีบทบาทต่อคุณสมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิวไคโตซานจากเห็ดนางฟ้า ดังนี้ กลีเซอรอลความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ขณะที่ทวิน 80 มีผลต่อความหนืดและการเกาะติดของพื้นผิว และเมื่อนำสารเคลือบผิวไคโตซานจากเห็ดนางฟ้ามาประยุกต์ใช้ในกล้วยน้ำว้า พบว่าสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกและการสูญเสียน้ำหนักได้ ส่งผลให้มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น

อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อเนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ ในเรื่องความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน และในเรื่องการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไคโตซาน โดยใช้เครื่องมือเฉพาะทางเพื่อให้เห็นเป็นตัวเลขชัดเจน และเนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ที่สุกเร็ว จึงควรวัดผลการเปลี่ยนแปลงของสีที่ถี่มากขึ้น เพื่อสามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนมากขึ้น

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ คุณสุชาดา ปลั่งกระจำง เจ้าหน้าที่ยังพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลวัดเสถียร จ.นครปฐม ผู้ดูแลและประสานงานการใช้เครื่องอบอุณหภูมิต่ำสูง

ขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่สนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังใจในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุนทรี แสงสีโสธ. กล้วย : ผลไม้สารพัดประโยชน์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2543, 48(153), หน้า 3-5.
- [2] มติชนออนไลน์. กล้วยไทยนิยมทั่วโลก ก.เกษตรฯ ส่งเสริมพื้นที่ปลูก ชู “บ้านลาด” โมเดล, 2560. สืบค้นจาก [http:// www.prachachat.net/economy/news-44949](http://www.prachachat.net/economy/news-44949).
- [3] สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.). การผลิตกล้วยน้ำว้าและการแปรรูป. กรุงเทพฯ: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2554.
- [4] สุทธิวัลย์ สีทา. ผลของการเคลือบผิวด้วยไคโตซานต่อการชะลอการสุกของผลกล้วยหอมพันธุ์คาเวนดิช. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542.
- [5] จันทพรพร ทองเอกแก้ว. การศึกษาปริมาณไคตินและไคโตซานจากเห็ดกินได้ชนิดต่าง ๆ. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2551.

-
- [6] Ki Myong Kim, Jeong Hwa Son, Sung-Koo Kim, Curtis L. Weller and Milford A. Hanna. **Properties of Chitosan Films as a Function of pH and Solvent Type.** Journal of Food Science, 2006, 71(3), 119-124.
- [7] Harish Prashanth and Tharanathan. **Chitin/chitosan : modification and their unlimited application potential – an overview.** Journal of Trends in Food Science & Technology, 2007. 18(3), 117-131.
- [8] Lee C.H., Park H.J. and Lee D.S. **Influence of antimicrobial packaging of kinetics of spoilage microbial growth in milk and orange juice.** Journal of Food Engineering, 2004, 65(4), 527-531.
- [9] Frank Devlieghere and An Vermeulen. **Chitosan: antimicrobial activity, interactions with food components and applicability as a coating on fruit and vegetables.** Journal of Food Microbiology, 2004, 21(6), 703-714.
- [10] นภาพร เชี่ยวชาญ และธนรัตน์ ศรีสุวรรณนิช. **ไคโตแซนกับการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหาร.** วารสารอาหาร, 2546, 34(2), หน้า 120-124.
- [11] ดนัย บุญเกียรติ. **การปฏิบัติภายหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.** พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2548. 248 หน้า.
- [12] สุกัญญา วงวาท. **การพัฒนาสารเคลือบผิวอิมัลชันจากไคโตซาน.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [13] อุมพร ขนประชา, อนุวัตร แจ่มชัด และกมลวรรณ แจ่มชัด. **ผลของสารเสริมสภาพพลาสติกต่อคุณสมบัติสารเคลือบไคโตซานและการประยุกต์ในกล้วยหอม.** กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.
- [14] จิรสา ทรงกรด. **สารลดแรงตึงผิว.** กรุงเทพฯ: กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2548.
- [15] อาร์ชีซะ ดินอะ. **ผลของไคโตซานต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราในกล้วยไม้รองเท้านารีชาวดุสิต.** สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ, 2541.
- [16] Synowiecki and Al-Khateeb. **Production, properties, and some new applications of chitin and its derivatives.** Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2003, 43(2), 145-171.
- [17] Perez-Gago, Rojas and Del Rio. **Effect of lipid type and amount of edible hydroxypropyl Methylcellulose-lipid composite coatings used to protect postharvest quality of mandarin cv.Fortune.** Journal of Food Science, 2002, 67(8): 2903-2910.
- [18] นลินอร นัยปลอด. **การศึกษาการขจัดคราบเลือดโดยใช้ผักโขม.** วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ, 2562, 13(1), หน้า 109-115.
- [19] กนกกรณ์ อุปรัง, ปาลิตา เกิดทวี และเพื่อนจิต สิงห์แผ่น. **ผลของสารสกัดจากใบชะพลูในการขจัดคราบเลือด.** พิษณุโลก: โรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี.
- [20] Everette and McLeod. **Interactions of polysaccharide stabilizers with casein aggregates in stirred skim-milk yoghurt.** Journal of International Dairy, 2005, 15(11), 1175-1183.

- [21] Srinivasa, Ramesh and Tharanathan. **Effect of plasticizer and fatty acids on mechanical and permeability characteristics of chitosan films.** Journal of Food Hydrocolloids, 2007, 21(7), 1113-1122.
- [22] คณิศร นุตวงษ์, จักรกฤษ วงศา และสุภาเวท มานิช. **การพัฒนาสารเคลือบผิวกล้วยหอมทองโดยใช้สารสกัดจากครั่งเม็ด.** เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549.

การกำจัดโครเมียม (VI) โดยใช้ไคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์เบตนิ่ง

CHROMIUM (VI) REMOVAL USING CROSSLINKED CHITOSAN IN FIXED BED COLUMN

รัตนกร ยวงสวัสดิ์^{*1} สุรเชษฐ์ ปิโย² ณัฐพล เกษตรนิยม³

Ratanaporn Yuangsawad¹, Surachet Piyo², Nattapol Kasetniyom³

^{*1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.

*ratanaporn.y@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับโครเมียมด้วยไคโตซานในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง วัสดุดูดซับสังเคราะห์จากการเชื่อมขวางของไคโตซานโดยใช้โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 mm ทำการทดสอบการดูดซับในคอลัมน์แบบเบตนิ่งโดยศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายโครเมียม (150, 250 และ 350 cm³/h) ความสูงเบต (5, 10 และ 15 cm) และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (1, 2 และ 3 ppm) ที่มีผลต่อการดูดซับ ทำการทดลองโดยป้อนสารละลายโครเมียมเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์และเก็บตัวอย่างที่ทางออกด้านบนตามเวลาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์สี ด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 540 nm จากการทดลองพบว่าเวลาเบรคทูร์เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มความสูงของเบตส่งผลให้เวลาเบรคทูร์เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาแบบจำลองการดูดซับ โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของโทมัส อัดัม-โบฮาร์ท และ ยูน-เนลสัน พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของโทมัสเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ไคโตซานแบบเชื่อมขวาง การดูดซับ คอลัมน์เบตนิ่ง โลหะหนัก

ABSTRACT

This research aims to study the adsorption of chromium ion using chitosan in fixed bed column. The adsorbent prepared from crosslinking of chitosan, sodium tripolyphosphate was used as crosslinking agent. The spherical beads with the diameter of 2.5 mm were achieved. The continuous adsorption was carried out in the fixed bed column. The effect of feed flow rate (150, 250 and 350 cm³/h), bed height (5, 10 and 15 cm) and initial chromium concentration (1, 2 and 3 ppm) on the breakthrough curve were investigated. The chromium solution was fed at the bottom

วันที่รับบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2564

วันที่แก้ไขบทความ 9 มีนาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 20 มีนาคม 2564

and chromium effluent was collected at the top of column. The chromium concentration was determined by colorimetric technique with UV-Vis spectrophotometer at wavelength of 540 nm. The results showed that breakthrough time increased with increasing bed height, decreasing feed flow rate and initial chromium concentration. The adsorption model study indicated that Thomas model was in good agreement with the experimental results.

Keywords: crosslinked chitosan, adsorption, fixed bed column, heavy metal

1. บทนำ

โลหะหนักเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่กำจัดได้ยากและมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่สามารถเสื่อมสลายได้ตามธรรมชาติ และเมื่อเข้าสู่สิ่งมีชีวิตจะทำให้เป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ ตามมา [1] เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ก่อนจะปล่อยน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมจึงต้องทำการบำบัดให้ปริมาณของโลหะหนักอยู่ในระดับที่กฎหมายกำหนด รัฐบาลจึงมีกฎหมายในการกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อควบคุมคุณภาพน้ำที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น Cr^{6+} ไม่เกิน 0.25 mg/L, Cr^{3+} ไม่เกิน 0.75 mg/L, Ni ไม่เกิน 1.0 mg/L, Cd ไม่เกิน 0.03 mg/L และ Cu ไม่เกิน 2.0 mg/L เป็นต้น [2] วิธีในการกำจัดโลหะหนักสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ออสมิซิสผกผัน การสะเทิน การเกิดออกซิเดชันและรีดักชันทางเคมี [3] การกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ถึงแม้จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีแต่วิธีการและเทคโนโลยีที่ใช้ยังคงมีความซับซ้อน ส่งผลถึงต้นทุนที่ใช้ในการกำจัด ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการหาวิธีที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีแต่ต้นทุนต่ำ โดยวิธีการที่ได้รับความสนใจ คือ การดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และยังสามารถเลือกใช้วัสดุดูดซับได้หลากหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารที่ต้องการดูดซับ

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นอนุพันธ์ของไคติน (Chitin) ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์อย่างหนึ่ง สามารถพบได้ในธรรมชาติ เช่น เปลือกหอย เปลือกกุ้ง กระจงปู เป็นต้น โครงสร้างของไคโตซานประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) และหมู่อะมิโน (NH_2) ซึ่งสามารถจับไอออนของโลหะหนักได้ จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ [4] แต่เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของไคโตซานมีความถ่วงจำเพาะต่ำ พองตัวในน้ำ มีเสถียรภาพต่ำ สลายตัวได้ง่าย จึงต้องมีการดัดแปลงเพื่อพัฒนาสมบัติโดยวิธีต่างๆ เช่น การตรึง (Immobilization) การกราฟต์ (Grafting) และการเชื่อมระหว่างโมเลกุล (Crosslinking) [5-6] เป็นต้น

งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงไคโตซานโดยทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน (Crosslinked chitosan) และศึกษาการนำไคโตซานแบบเชื่อมขวางมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักในระบบต่อเนื่อง โดยเลือกโครเมียม (IV) เป็นตัวแทนของโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ อัตราการไหล ความสูงของเบตนิ่ง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก และศึกษาแบบจำลองการดูดซับเพื่อทำนายเส้นโค้งการดูดซับ (Breakthrough curve) บนวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดโลหะในน้ำเสียโดยใช้วัสดุดูดซับนั้นได้มีการวิจัยอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือวัสดุที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย ราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยวัสดุดูดซับที่นิยมใช้ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ชังข้าวโพด ฟางข้าว [7-9] รวมไปถึงไคโตซานที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการกำจัดหมู่ Acetyl ออกจากโครงสร้างของไคติน ทำให้ไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการดูดซับ โดยทั่วไปไคโตซานที่สังเคราะห์ได้จะอยู่ในรูปของเกล็ดหรือผงไคโตซาน Ahmad และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการใช้ไคโตซานชนิดผงและเกล็ดในการดูดซับน้ำมันจากน้ำทิ้งของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับน้ำมันได้ถึงร้อยละ 99 อย่างไรก็ตามการใช้ไคโตซานที่อยู่ในรูปผงหรือเกล็ดนั้นจะมีแนวโน้มเกิดการฟุ้งกระจายและเสียเสถียรภาพได้ง่ายโดยเฉพาะในสารละลายกรดอ่อน อีกทั้งยังแยกออกจากระบบภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการได้ยากซึ่งทำให้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ การปรับปรุงโครงสร้างของไคโตซานโดยวิธีการเชื่อมขวางทำให้ไคโตซานมีเสถียรภาพและสามารถแยกออกจากสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยสมบัติด้านการดูดซับของไคโตซานยังคงอยู่ สารเชื่อมขวางที่นิยมใช้ เช่น Glutaraldehyde, Ethylene glycol และ Sodium tripolyphosphate เป็นต้น [4] Wan Ngah และคณะ [11] ได้ศึกษาการกำจัดไอออนทองแดง โดยใช้ไคโตซานและไคโตซานแบบเชื่อมขวางพบว่าไคโตซานแบบเชื่อมขวางสามารถฟื้นฟูสภาพได้โดยทำให้เกิดการคายซับด้วย EDTA Sebastain และคณะ [12] ศึกษาการใช้ไคโตซานแบบเชื่อมขวางกับฟอสโฟเนียม (PCC) เพื่อกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียพบว่าวัสดุดูดซับสามารถดูดซับได้ในช่วง pH ระหว่าง 6-10 ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 142 mg/L ที่ pH 6 และสามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยแมกนีเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมคลอไรด์เพื่อนำมาใช้ซ้ำ นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการดูดซับในคอลัมน์หรือในระบบต่อเนื่องซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบดูดซับในระดับอุตสาหกรรม Jaime และคณะ [4] ใช้ไคโตซานที่เชื่อมขวางด้วย Glutaraldehyde เพื่อดูดซับสีย้อมในคอลัมน์เบตนิ่งโดยได้ความจุสูงสุดในการดูดซับประมาณ 343.59 mg/g และเส้นโค้งการดูดซับสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลอง BDST (Bed depth service time model) Suhong และคณะ [9] ใช้ชังข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรในการดูดซับโครเมียมในคอลัมน์เบตนิ่ง พบว่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความสูงเบต แต่จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นและอัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้น และทั้งแบบจำลองของ Thomas และ Yoon-Nelson สามารถใช้ทำนายเส้นโค้งการดูดซับได้เป็นอย่างดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ไคโตซานที่ปรับปรุงโครงสร้างโดยการทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลจะทำให้โครงสร้างมีเสถียรภาพมากขึ้นและสมบัติด้านการดูดซับยังคงอยู่ จึงเหมาะสมในการนำมาใช้ดูดซับไอออนของโลหะหนักและยังสามารถแยกออกจากระบบหลังการใช้งานได้ง่ายทำให้นำกลับมาใช้ซ้ำได้ จึงสามารถลดต้นทุนของกระบวนการลงได้ด้วย

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

ละลายไคโตซานปริมาณ 2 กรัม ในสารละลายกรดแอสซิติคความเข้มข้น 2%v/v ปริมาตร 150 ml กวนทิ้งไว้ 3 ชั่วโมง หยดสารละลายไคโตซานลงในสารละลายโซเดียมไตรฟอสเฟตความเข้มข้น 10%w/v กวนทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้ได้ปฏิกิริยารูปร่างสมบูรณ์ ล้างปฏิกิริยาที่ได้น้ำปราศจากไอออนจน pH คงที่ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform spectroscopy (FTIR) วัสดุที่สังเคราะห์ได้จะถูกใช้เป็นวัสดุดูดซับในขั้นต่อไป

3.2 การดูดซับในคอลัมน์

บรรจุวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในคอลัมน์ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ณ ตำแหน่งกึ่งกลางโดยปรับความสูงของเบตด้วยเมตแก้ว ป้อนสารละลายโครเมียมเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ และเก็บตัวอย่างที่ทางออกตามเวลา เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมด้วยวิธี Colorimetric ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 nm ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับโครเมียม ได้แก่ อัตราการไหลเท่ากับ 150, 250 และ 350 cm³/h ความสูงเบตเท่ากับ 5, 10 และ 15 cm และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม(VI) เท่ากับ 1, 2 และ 3 ppm

3.3 แบบจำลองการดูดซับ

แบบจำลองการดูดซับของโทมัส อัดัมโบฮาร์ท และยูน-เนลสัน เป็นแบบจำลองที่นิยมนำมาศึกษาเส้นโค้งการดูดซับในคอลัมน์ที่มีการไหลต่อเนื่อง [4,9] โดยแบบจำลองดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายและตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เวลาในการดูดซับ อัตราการไหล และความสูงของชั้นวัสดุดูดซับ ดังสมการ (1)-(3)

แบบจำลองของ Thomas;

$$C_t = \frac{1}{1 + e^{\frac{K_{Th} q_m^m}{v} - K_{Th} C_0 t}} \quad (1)$$

แบบจำลองของ Yoon-Nelson;

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{k_{YN}(\tau - t)}} \quad (2)$$

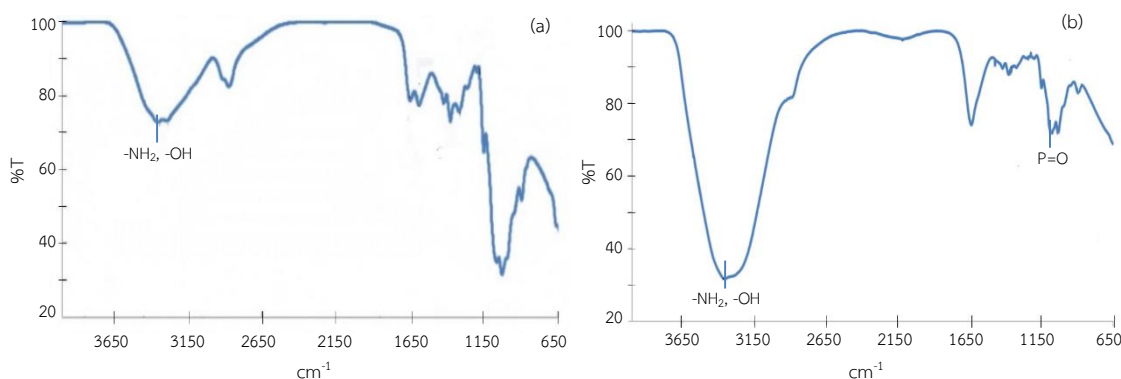
แบบจำลองของ Adam-Bohart;

$$\frac{C_t}{C_0} = \exp(k_{AB} C_0 t - k_{AB} N_0 \left(\frac{Z}{U_0} \right)) \quad (3)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 สมบัติของวัสดุดูดซับ

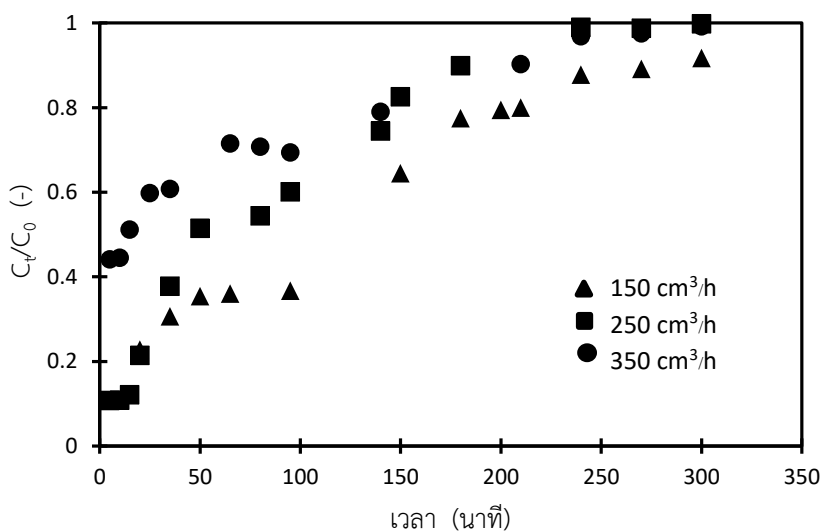
วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นเม็ดกลมสีขาวขุ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 mm ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเทคนิค FTIR ของไคโตซานและไคโตซานที่สังเคราะห์โดยการเชื่อมขวางด้วยโซเดียมไตรฟอสเฟต แสดงดังภาพที่ 1 (a)-(b) โดยพบพีกที่ 3400 cm⁻¹ แสดงถึงหมู่ -NH₂ และหมู่ -OH ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของไคโตซาน และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของไคโตซานที่มีการเชื่อมขวางด้วยโซเดียมไตรฟอสเฟตพบว่ามีพีกที่เกิดขึ้นที่ 1250 และ 1100 cm⁻¹ แสดงถึงการเกิดขึ้นของพันธะ P=O [6]



ภาพที่ 1 สเปกตรัม FTIR ของ (a) Chitosan (b) Crosslinked chitosan

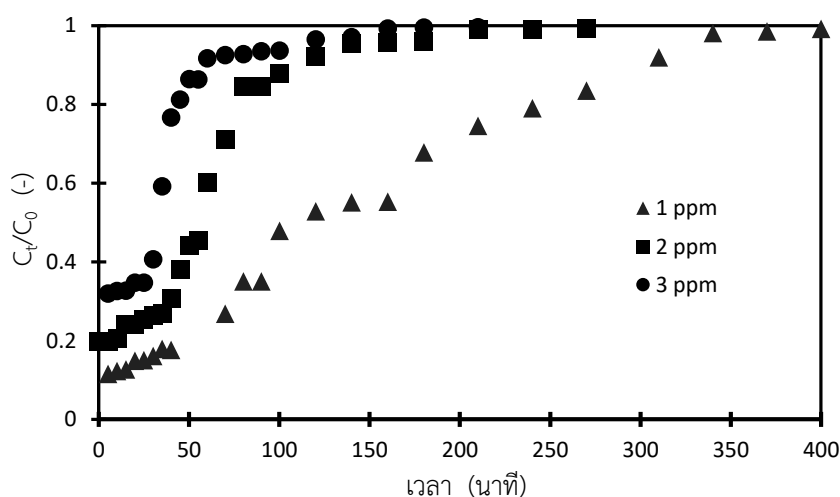
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับในคอลัมน์แบบเบตนิ่ง

ภาพที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายที่เข้าสู่คอลัมน์ โดยให้ความสูงของเบตเท่ากับ 10 cm และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 1 ppm จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เวลา Breakthrough จะมีค่าลดลง โดยที่อัตราการไหล $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ จะมีการดูดซับอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก หลังจากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลงและอิ่มตัวที่เวลา 240 นาที และเมื่ออัตราการไหลเพิ่มสูงขึ้นเวลาที่วัสดุดูดซับอิ่มตัวจะเร็วขึ้นโดยมีค่าประมาณ 180 และ 140 นาที ที่อัตราการไหล $250 \text{ cm}^3/\text{h}$ และ $350 \text{ cm}^3/\text{h}$ ตามลำดับ การที่เวลา Breakthrough สั้นลงเมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็นผลมาจากการลดลงของระยะเวลาที่ตัวถูกดูดซับ (โครเมียม) สัมผัสกับวัสดุดูดซับ โดยเวลาสัมผัส (Contact time) มีค่าลดลงจาก 10.61 นาที เหลือ 4.57 นาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 150 เป็น $350 \text{ cm}^3/\text{h}$

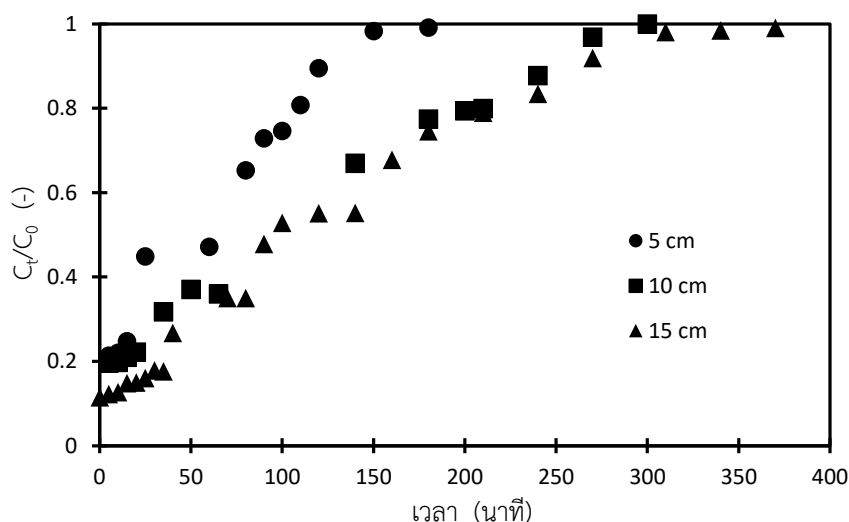


ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา ที่อัตราการไหลต่างๆ (ความสูงเบต = 10 cm, ความเข้มข้นเริ่มต้น = 1 ppm)

เมื่อทำการทดสอบการดูดซับโดยให้อัตราการไหลคงที่เท่ากับ $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ ความสูงของเบตนิ่งเท่ากับ 15 cm และเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเป็น 1, 2 และ 3 ppm ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 3 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมมีค่ามาก การดูดซับจะเกิดอย่างรวดเร็วและถึงจุดอิ่มตัวเร็วกว่า สารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยเวลาที่วัสดุดูดซับอิ่มตัวมีค่าเท่ากับ 340, 240 และ 160 นาที ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมเป็น 1, 2 และ 3 ppm ตามลำดับ เนื่องมาจากความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทมวลสาร กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายมีค่ามากเมื่อเทียบกับปริมาณโครเมียมที่อยู่นบนผิววัสดุดูดซับ โครเมียมจะมีการเคลื่อนที่จากสารละลายเข้าไปยังพื้นผิวของวัสดุดูดซับได้เร็ว จนกระทั่งปริมาณโครเมียมที่พื้นผิวมีปริมาณมากขึ้นทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายและบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีค่าน้อยลงทำให้อัตราการดูดซับจึงค่อยๆ ลดลง



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา ที่ความเข้มข้นต่างๆ
(ความสูงเบต = 15 cm , อัตราการไหล $150 \text{ cm}^3/\text{h}$)



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกตามเวลา ที่ความสูงเบตต่างๆ
(อัตราการไหล $150 \text{ cm}^3/\text{h}$, ความเข้มข้นเริ่มต้น = 1 ppm)

ภาพที่ 4 แสดงผลของความสูงเบดที่มีต่อความสามารถในการดูดซับโครเมียม เมื่อให้อัตราการไหลคงที่ที่ $150 \text{ cm}^3/\text{h}$ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 1 ppm พบว่า เวลา Breakthrough มีค่าเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบด โดยเวลาที่วัสดุดูดซับอิ่มตัวมีค่าเป็น 150, 270 และ 340 นาที เมื่อความสูงของเบดเป็น 5, 10 และ 15 cm ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณที่ใช้ในการดูดซับมีค่ามากขึ้นทำให้สามารถกำจัดโครเมียมได้เพิ่มขึ้น

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการดูดซับโครเมียมบนโคโตซานแบบเชื่อมขวางจะถูกนำไปใช้ในการศึกษาเส้นโค้งการดูดซับในหัวข้อต่อไป

4.3 การศึกษา Breakthrough curve

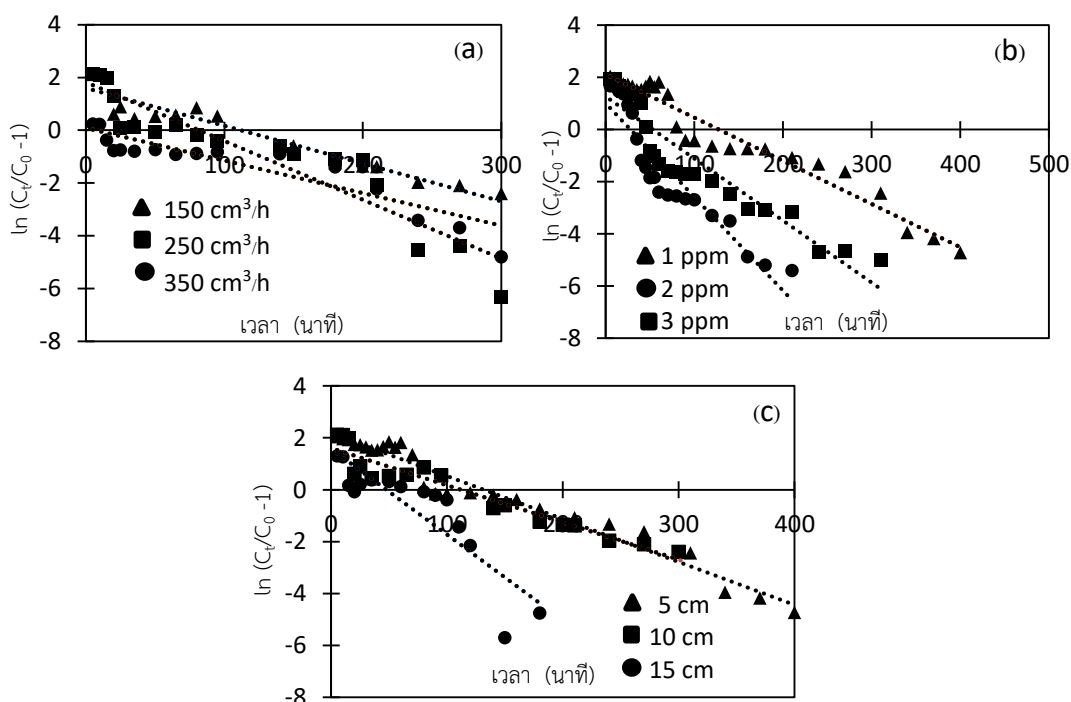
จากแบบจำลองของ Thomas, Adams-Bohart และ Yoon-Nelson ที่แสดงในสมการ (1) – (3) จัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

$$\text{Thomas ;} \quad \ln\left(\frac{C_t}{C_0} - 1\right) = \frac{K_{Th} q_m m}{v} - K_{Th} C_0 t \quad (4)$$

$$\text{Adams-Bohart ;} \quad \ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = K_{AB} C_0 t - K_{AB} N_0 \left(\frac{Z}{U_0}\right) \quad (5)$$

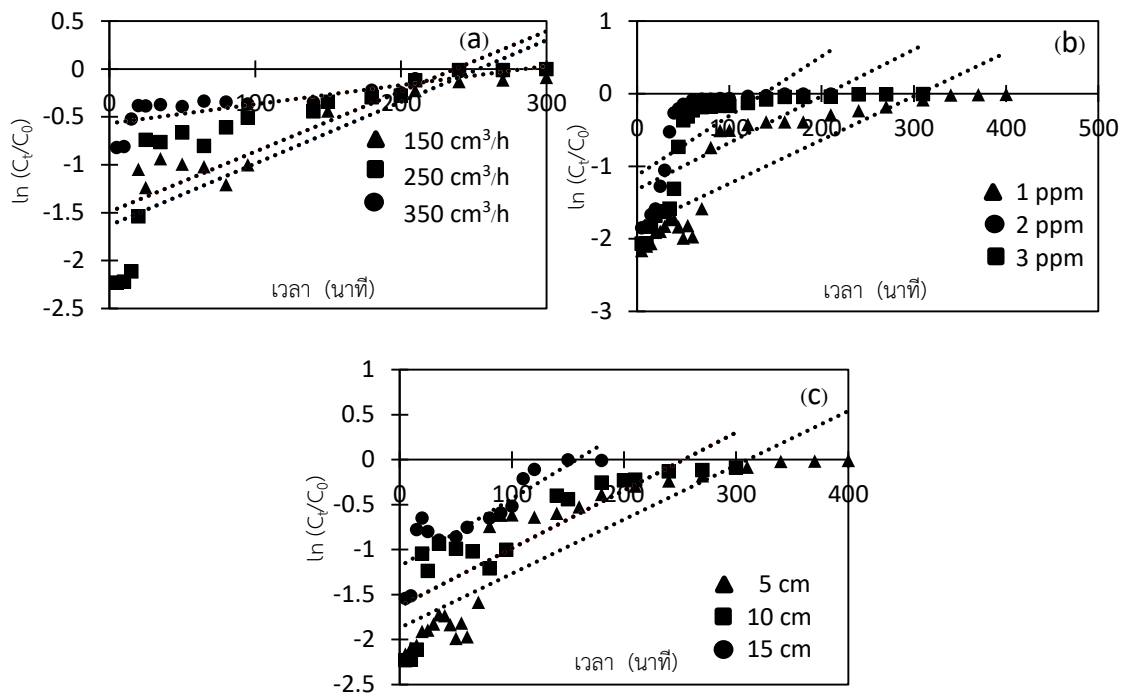
$$\text{Yoon-Nelson ;} \quad \ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = K_{YN} t - \tau K_{YN} \quad (6)$$

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองต่างๆ จากสมการ (4) – (6) ได้ดังภาพที่ 5 – 7 และมีค่า R^2 ดังตารางที่ 1 โดยในการเลือกแบบจำลองการดูดซับจะพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด



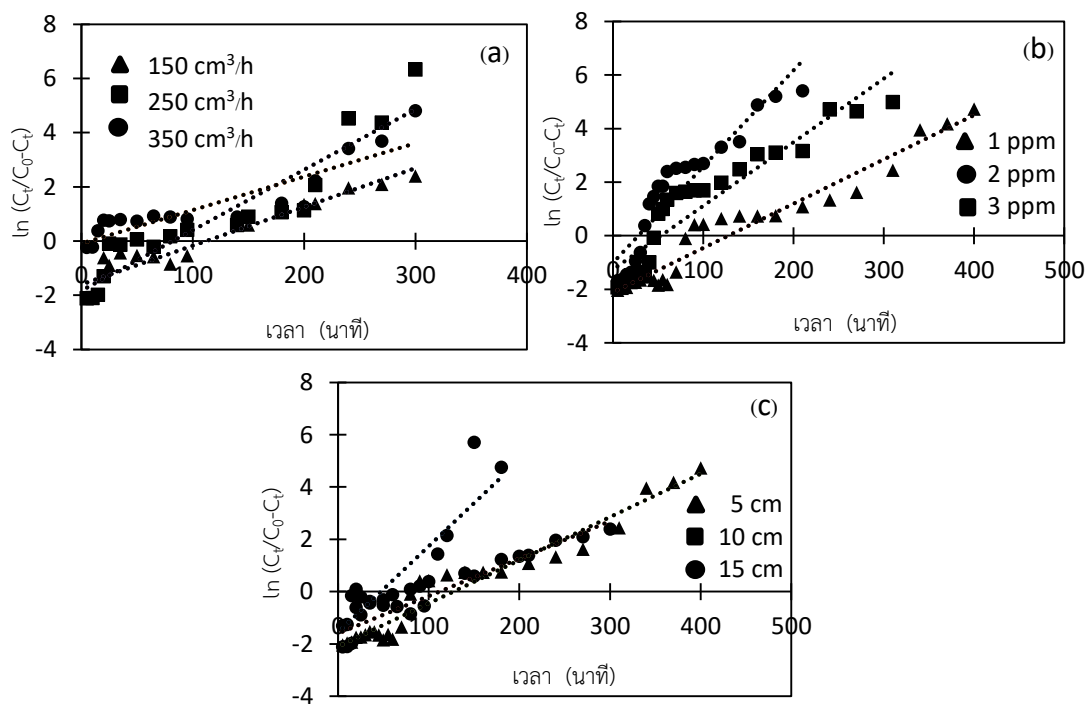
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของ Thomas

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบด



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของ Adams-Bohart

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบด



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองของ Yoon-Nelson

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบด

ตารางที่ 1 ค่า R^2 ของแบบจำลองต่างๆ

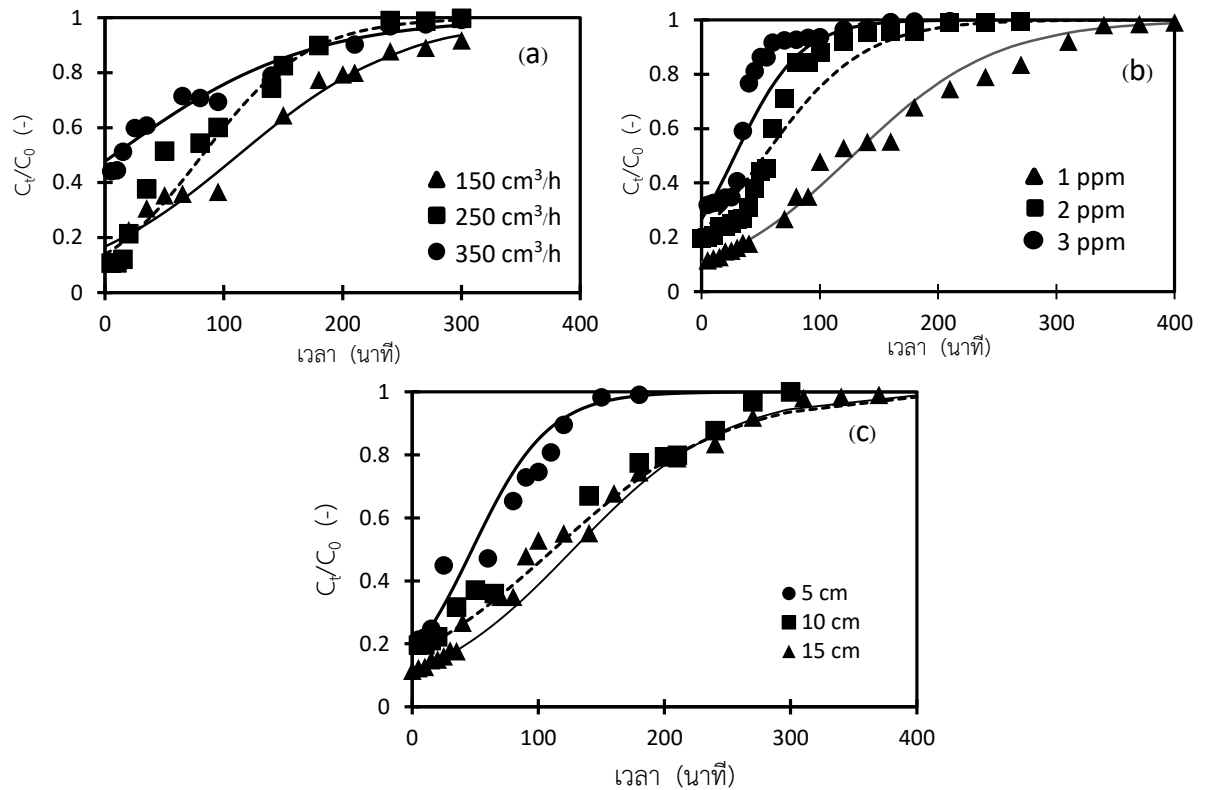
ตัวแปร	ค่า	R^2		
		Thomas	Adams-Bohart	Yoon-Nelson
อัตราการไหล (cm ³ /h)	150	0.920	0.751	0.920
	250	0.872	0.659	0.872
	350	0.795	0.732	0.795
ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	1	0.940	0.750	0.944
	2	0.920	0.526	0.876
	3	0.876	0.488	0.871
ความสูงเบด (cm)	5	0.777	0.768	0.777
	10	0.920	0.751	0.920
	15	0.960	0.789	0.944

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

โคโตซานแบบเชื่อมขวางที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ สังเคราะห์จากเกล็ดโคโตซาน โดยมีโซเดียมไตรฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมขวาง วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 mm และมีความสามารถในการใช้เป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียในคอลัมน์แบบเบดนิ่งและสามารถแยกออกจากกระบบได้ง่ายหลังจากการใช้งาน

การทดสอบการดูดซับโครเมียมโดยใช้โคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง พบว่าทุกภาวะที่ทำการทดลอง อัตราการดูดซับจะมีค่ามากในช่วงแรกของการดูดซับจากนั้นอัตราการดูดซับจะช้าลงซึ่งเป็นบริเวณที่มีการดูดซับในคอลัมน์ (Adsorption zone) จนถึงระยะเวลาหนึ่งที่มีความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางออกเท่ากับ ความเข้มข้นของโครเมียมที่ทางเข้าซึ่งจะทำให้ไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นอีกต่อไป [13] จากการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับพบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารละลายโครเมียมเพิ่มขึ้นทำให้เวลา Breakthrough ลดลง เนื่องจากเวลาที่สารละลายโครเมียมสัมผัสกับวัสดุดูดซับมีค่าน้อยและการเพิ่มอัตราการไหลทำให้อัตราการถ่ายเทมวลเพิ่มขึ้นจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัวมีค่าน้อยกว่าที่อัตราการไหลต่ำ เช่นเดียวกับการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมจะทำให้เวลา Breakthrough ลดลง โดยอัตราการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการดูดซับโดยเฉพาะที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมมีค่ามาก (3 ppm) เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของโครเมียมที่ถูกดูดซับกับโครเมียมในสารละลาย [14] โดยในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่มีโครเมียมยึดติดผิวอยู่ ในขณะที่สารละลายมีความเข้มข้นของโครเมียมสูง จึงทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของโครเมียมส่งผลทำให้อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาผ่านไปพื้นผิวของวัสดุดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของโครเมียมทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นที่ผิววัสดุดูดซับกับในสารละลายมีค่าลดลงการดูดซับจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงจุดอิ่มตัว ในขณะที่การเพิ่มความสูงของเบดนิ่งส่งผลทำให้การดูดซับเกิดได้ดีและใช้เวลาการดูดซับนานขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณและพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น

จากการศึกษาแบบจำลองการดูดซับพบว่าแบบจำลองของ Thomas สามารถนำมาใช้ทำนายพฤติกรรม การดูดซับโครเมียมบนโคโตซานแบบเชื่อมขวางในคอลัมน์แบบเบตนิ่งได้ โดยมีค่า $R^2 = 0.89$ โดยเส้นโค้งการดูดซับ ที่ได้จากแบบจำลองของ Thomas สอดคล้องกับผลการทดลองเป็นอย่างดี ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 เส้นโค้งการดูดซับจากแบบจำลองของโทมัส

(a) อัตราการไหล (b) ความเข้มข้นเริ่มต้น (c) ความสูงเบต

รายการสัญลักษณ์

- C_0 ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)
- C_t ความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (mg/L)
- K_{Th} ค่าคงที่ของโทมัส (mL/mg.min)
- k_{YN} ค่าคงที่ของ Yoon-Nelson (min^{-1})
- k_{AB} ค่าคงที่ของ Adams-Bohart (L/mg.min)
- q_m ความจุสูงสุด (mg/g)
- U_0 ความเร็วในการไหลผ่านเบต (cm/min)
- τ เวลาที่ใช้ในการดูดซับตัวถูกดูดซับได้ 50% (min)
- t เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (min)
- N_0 ความเข้มข้นที่อิ่มตัว (mg/L)
- Z ความสูงเบต (cm)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jutarat_DPM. (2012). ภัยร้ายจากโลหะหนักไม่รู้ได้แล้ว. สืบค้น 1 ตุลาคม 2563, จาก <http://dpm.nida.ac.th>
- [2] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน. (2560, 7 มิถุนายน). ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 134
- [3] Fenglian Fu & Qi Wang. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92 (3), 407-418. doi:10.1016/j.jenvman.2010.11.011
- [4] Jaime, L., Dalia, I.S., Reyna, G.S. & Ma, A.C. (2018). Study of a fixed-bed column in the adsorption of an azo dye from an aqueous medium using a chitosan - gluteraldehyde biosorbent. *Adsorption Science & Technology*, 36 (1-2), 215-232. doi:10.1177/0263617416688021
- [5] Jayakumar, R., Prabakaran, M., Reis, R.L. & Mano, J.F. (2005). Graft copolymerized chitosan-present status and applications. *Carbohydrate Polymer*, 62 (2), 142-158. doi:10.1016/j.carbpol.2005.07.017
- [6] Devika, R.B. & Varsha, B.P. (2006). Studies on Effect of pH on cross-linking of chitosan with sodium tripolyphosphate: A technical note. *AAPS PharmSciTech*, 7 (2), doi:10.1208/pt070250
- [7] Kadirvelu, K., Senthikumar, P., Thamaraiselvi, K. & Subburam, V. (2002). Activated carbon prepared from biomass as adsorbent: elimination of Ni(II) from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 81 (1), 87-90. doi:10.1016/s0960-8524(01)00093-1
- [8] Ahmaruzzaman, M. & Vinod, F.G. (2011). Rice husk and its ash as low-cost adsorbents in water and wastewater treatment. *Industrial & Engineering Chemistry research*, 50, 13589- 13613. doi:10.1021/ie201477c
- [9] Suhong, C, Qinyan, Y, Baoyu, G., Qian, L., Xing, X. & Kiafang, F. (2012). Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by modified corn stalk: A fixed-bed column study. *Bioresource Technology*, 113, 114-120. doi:10.1016/j.biortech2011.11.110
- [10] Ahmad, A.L., Sumathi, S. & Hameed, B.H. (2005). Adsorption of Residue oil from palm oil mill effluent using powder and flake chitosan: Equilibrium and kinetic studies. *Water Research*, 39, 2483-2494. doi:10.1016/j.watres.2005.03.035
- [11] Wan Ngah, W.S., Endud, C.S. & Mayanar, R. (2002). Removal of copper(II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads. *Reactive and Functional Polymers*, 50 (2), 181-190. doi:10.1016/S1381-5148(01)00113-4
- [12] Sebastian, S., Simone, C. S.R, Ye, X., Qingye, L. & Josephine, M.H. (2019). Phosphonium-enhanced chitosan for Cr(VI) adsorption in wastewater treatment. *Carbohydrate Polymers*, 211, 249-256. doi:10.1016/j.carbpol.2019.02.003

- [13] Renu, B. , Madhu, A., Kailash, S. , Ragini, G. & Dohare, R.K. (2020). Continuous fixed-bed adsorption of heavy metals using biodegradable adsorbent: Modeling and experimental study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(2). doi:10.1016/(ASCE)EE.1943-7870.0001636
- [14] Ghinwa, N. & Bohumil, V. (2006). Behavior of the mass transfer zone in a biosorption column. *Environmental Science & Technology*, 40, 3996-4003. doi:10.1021/es051542p

การพัฒนาเส้นสปาเก็ตตี้จากข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมงาดำ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้นด้วย โมเลกุลาร์แกสโตรโนมี

DEVELOPMENT OF SPAGHETTI FROM RICE BERRY RICE COMPOSITE BLACK SESAME BY USING SPAGHETTI FORMING MOLECULAR GASTRONOMY TECHNIQUES

อัจฉรา ดลวิทย์คุณ^{*1}, จักรกฤษณ์ พลจันทร์¹, ชยุตม์ เกิดแก้ว¹, วราภรณ์ บุญศรี¹, ศศิประภา สุขกล้า¹
และศิริลักษณ์ แจ่มหม้อ¹

Achara Dholvitayakhun^{*1}, Jakkrit pronrakan¹, Chayut Kerdkaew¹, Warapohn Boonsree¹,
Sasiprapha sukkla¹ and Sirilak Jammor¹

¹ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

*ที่อยู่ E-mail ผู้รับผิดชอบบทความ (Corresponding Author): achara2518@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์อาหารปราศจากกลูเตนได้รับความนิยมเพิ่มสูงขึ้นทั่วโลก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเส้นสปาเก็ตตี้ปราศจากกลูเตนจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมงาดำ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบเส้นด้วยโมเลกุลาร์แกสโตรโนมี และศึกษาสมบัติทางกายภาพ การยอมรับทางด้านประสาทสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้น ผลการศึกษาพบว่า เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยใช้เทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมีแบบเส้น มีอัตราส่วนระหว่างข้าวไรซ์เบอร์รี่สุกต่อน้ำเท่ากับ 1 : 3.1 ผสมลงในสารละลายโซเดียมอัลจินเตที่ความเข้มข้น 1.25 ปั่นให้เข้ากัน นำส่วนผสมที่ได้ใส่หลอดฉีดยา ขนาด 20 ml. ต่อกับสายยาง ยาว 25 cm. เพื่อช่วยในการขึ้นรูปให้เป็นเส้น และปล่อยลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.31 แช่ทิ้งไว้ 3 นาที และเมื่อนำมาเสริมงาดำผง 4 ระดับ (ร้อยละ 6, 8, 10 และ 12) พบว่า ปริมาณงาดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสว่าง (L*) ค่าสีเหลือง(b*) มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ค่าสีแดง(a*) และค่าความหนืดเพิ่มขึ้น (p<0.05) โดยเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมงาดำผงทั้ง 4 ระดับมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3.25-3.57 มิลลิเมตร จากผลการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมงาดำผงร้อยละ 10 มีแนวโน้มคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด (6.17-6.93) อยู่ในเกณฑ์ชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง นอกจากนี้เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่พัฒนาขึ้นมีปริมาณพลังงาน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เส้นใย วิตามินบีหนึ่ง บีสองและแคลเซียมเพิ่มขึ้นกว่าเส้นสปาเก็ตตี้ทางการค้า

คำสำคัญ: เส้นสปาเก็ตตี้, ข้าวไรซ์เบอร์รี่ และเทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมี

วันที่รับบทความ 3 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 14 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 20 มีนาคม 2564

ABSTRACT

Gluten-free products are increasingly popular in widespread consumption. The objectives of this research were to develop gluten-free spaghetti from rice berry rice composite black sesame powder by using spaghetti forming molecular gastronomy techniques and to evaluate the physical quality and sensory evaluation of developed formulations. The result found that the rice berry rice spaghetti formula was the ratio of rice berry rice and water at 1: 3.1 by wt., mixed and blended with 1.25% sodium alginate, injected through a 20 ml. syringe that is connected to 25 cm. tube for spaghetti forming, and then soaked in 1.31 calcium chloride for 3 minutes. The levels of black sesame powder content (6, 8, 10, and 12%, w/w) on spaghetti formulas were investigated. The increasing content of black sesame powder resulted in the decreasing intensity of lightness and yellow color while red color and viscosity increasing in spaghetti product ($p \leq 0.05$). All of the formulas have a diameter of 3.25-3.57 mm. Sensory quality showed that rice berry rice spaghetti containing 10% black sesame powder gained the highest score (6.17-6.93), which referred to criteria as like slightly to like moderately. Additionally, the developed rice berry rice spaghetti contains high amounts of calories, protein, carbohydrates, fat fiber, vitamin B1, vitamin B2, and more calcium than commercial spaghetti.

Keywords: spaghetti, rice berry rice and molecular gastronomy

1. บทนำ

สเปกเกตตี้ เป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ประเภทของเส้นพาสต้าที่มีต้นกำเนิดจากประเทศอิตาลี มีส่วนประกอบหลัก คือ แป้งสาลี ไข่ น้ำมันมะกอกและเกลือ[1] โดยในแป้งสาลีซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของสเปกเกตตี้ มีโปรตีนกลูเตนที่เป็นสารก่อภูมิแพ้ ทำให้ผู้ป่วยที่แพ้กลูเตน (Celiac disease) ซึ่งผู้ป่วยที่เป็นโรคนี้อาจมีอาการอักเสบและมีผลต่อเนื้อเยื่อบริเวณผนังลำไส้เล็กทำให้พื้นที่ดูดซึมอาหารลดลง โดยมีอาการท้องบวมและอาการท้องร่วงเรื้อรัง น้ำหนักลด เป็นตะคริว ปวดกระดูกและข้อ เป็นต้น [2] ผู้ป่วยโรคนี้ไม่สามารถบริโภคอาหารที่มีส่วนประกอบของกลูเตนได้ตลอดชีวิต จึงทำให้อาหารที่ปราศจากกลูเตนเป็นที่นิยมเพิ่มมากขึ้นในยุโรป และประเทศอื่น ๆ ทั่วโลก ปัจจุบันจึงมีการศึกษาเกี่ยวกับการลดปริมาณกลูเตน หรือพัฒนาเส้นจากแป้งชนิดอื่น ๆ ที่ลดหรือปราศจากกลูเตนตลอดจนมีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ด้วยการเสริมสารอาหารต่าง ๆ เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าสดจากแป้งข้าวกล้อง [3] การใช้แป้งข้าวฟ่างแทนเซโมลินาบางส่วนเพื่อใช้ในการผลิตพาสต้า [4] พาสต้าข้าวเจ้าเสริมแป้งถั่ว [5] สเปกเกตตี้สดเสริมไบโอะคราม [6] อย่างไรก็ตามการทดแทนแป้งชนิดต่าง ๆ ในแป้งสาลีจะส่งผลต่อคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส และคุณภาพของเส้นได้ ทำให้ไม่สามารถทดแทนได้ทั้งหมด หรือจำเป็นต้องใช้สารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ ที่มีสมบัติเพิ่มความคงตัว ปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส ปัจจุบันมีการใช้แทนแทนกัม ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของวิสโคอีลาสติกของกลูเตนในแป้งสาลี โดยนำมาผสมกับแป้งชนิดอื่น และรีดเป็นเส้นพาสต้า [7] แต่ยังไม่มีการนำมาผสมเพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นกลมแบบสเปกเกตตี้ได้ เนื่องจากเส้นจะขาด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำเส้นสเปกเกตตี้ที่ปราศจากกลูเตนจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ ซึ่งข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นพันธุ์ข้าวสี

ที่ได้รับความนิยมปลูกในประเทศไทย เนื่องจากเป็นแหล่งของสารอาหารต่าง ๆ และมีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ประกอบด้วย แกรมมา-โอโรซานอล 462 ug/g , เบต้าแคโรทีน 63 mg/100 g, โพลีฟีนอล 113.5 mg/100g และ แทนนิน 89.33 mg/100 g [8] ตลอดจนมีการเสริมงาดำในเส้นสปาเก็ตตี้ เพื่อเพิ่มใยอาหารและแคลเซียม โดยนำหลักการทางวิทยาศาสตร์ เข้ามาช่วยแก้ปัญหาในการขึ้นรูปเส้นสปาเก็ตตี้ที่ไม่มีโปรตีนกลูเตนในโครงสร้าง ด้วยการอาศัยกระบวนการเกิดเจลของสารไฮโดรคอลลอยด์อัลจิเนต ในสภาพที่มีเกลือแคลเซียม เจลที่ได้จึงมีความกรอบ และแน่น โดยสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิห้อง เจลที่ได้จะสมบูรณ์มากขึ้นเมื่อแช่น้ำ และเก็บไว้ที่อุณหภูมิเย็น [9] และทำให้ขึ้นรูปเป็นเส้นหรือที่เรียกว่า spaghetti molecular [10] ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของโมเลกุลคูลาร์แกสโตรโนมี (Molecular gastronomy) นำมาประยุกต์ให้เกิดเป็นรูปแบบเส้นสปาเก็ตตี้จากน้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำ โดยงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาเส้นสปาเก็ตตี้จากข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำ โดยใช้เทคนิคโมเลกุลคูลาร์แกสโตรโนมีแบบเส้น เพื่อเป็นการเพิ่มผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ เพิ่มความหลากหลายในการใช้ประโยชน์จากแป้งปราศจากกลูเตนชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นวัตถุดิบภายในประเทศ นอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับเส้นสปาเก็ตตี้ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกหนึ่ง ของผู้ที่มีอาการแพ้โปรตีนกลูเตนต่อไป

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาหารโมเลกุล (Molecular Gastronomy) คือ ศาสตร์ที่นำเอาหลักการทางวิทยาศาสตร์ เคมีและฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการประกอบอาหารเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุดิบ [11] โดยมีเทคนิคการปรุงหรือการประกอบอาหารหลากหลายรูปแบบ เพื่อสร้างอาหารรูปแบบแปลกใหม่ ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคยุคใหม่ที่ต้องการรับประทานอาหารที่ทั้งอร่อยและแปลกตา ซึ่งมีหลายเทคนิควิธี และวิธีที่นิยมใช้วิธีหนึ่งคือเทคนิคการทำให้เกิดเม็ดเจล Faux Caviar หรือเทคนิคการทำ Spherical หรือเทคนิคการทำให้เป็นเม็ดเจล ซึ่งเม็ดเจลนี้จะห่อหุ้มของเหลวชนิดต่าง ๆ ไว้ข้างใน เมื่อรับประทานเม็ดเจลนี้เข้าไปจะแตกหรือละลายในปาก โดยวัตถุดิบที่สำคัญในการทำเม็ดเจล คือ โซเดียมอัลจิเนต และสารละลายแคลเซียม วิธีการทำเริ่มจากนำโซเดียมอัลจิเนตมาละลายในอาหารเหลว และนำอาหารเหลวที่ผสมโซเดียมอัลจิเนต ค่อยๆ หยดลงไปลงในน้ำที่มีแคลเซียมละลายอยู่ จากนั้นค่อยๆ ซ้อนเม็ดเจลที่ได้ขึ้นจากน้ำ โดยความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมจะส่งผลต่อลักษณะของเม็ดเจล เช่น ขนาดและความกลมของเม็ดเจล นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาโดยการทำให้เป็นเส้น คล้ายเส้นสปาเก็ตตี้จากน้ำผักชนิดต่าง ๆ [12] หรือที่เรียกว่า spaghetti molecular ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้มีการดัดแปลงจากน้ำผักชนิดต่าง ๆ เป็นแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมงาดำ และปล่อยสารที่ต้องการให้เกิดเจลผ่านหลอดฉีดยา (Syringe) ที่ต่อกับสายยางเพื่อให้เกิดรูปร่างที่เป็นเส้นแทนรูปร่างที่เป็นทรงกลมแทนการใช้น้ำผัก

วรรณวิมล [13] ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลม โดยเริ่มจากการศึกษาระยะเวลาการแช่ในน้ำเย็น พบว่า ระยะเวลาในการแช่น้ำเย็น 12 ชั่วโมงเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ทรงกลม ในขณะที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเต้าหู้ทรงกลม คือ ใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.96 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.59 โดยคะแนนความชอบอยู่ในช่วงชอบปานกลาง ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 15 วัน

ญาดาวิ [14] ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของข้าวหุงสุก และน้ำในการเตรียมน้ำข้าวไรซ์เบอร์รี่ นอกจากนี้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมคลอไรด์ และศึกษาผลของเวลาในการแช่น้ำต่อการเกิดเจลของ “ไข่มุกข้าว” ผลการ ศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของข้าวหุงสุก และน้ำ

คือ 1:4 โดยน้ำหนัก ใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.25 และแคลเซียมคลอไรด์ร้อยละ 1.31 และพบว่าเมื่อระยะเวลาในการแช่น้ำเพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนัก ขนาด ค่าสี และค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้

อัจฉรา และวรรณวิมล [15] ได้ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์หัตถ์หิมกรอบ โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปทรงกลมแบบแช่แข็งย้อนกลับ ทำการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายโซเดียมอัลจิเนต และแคลเซียมแลคเตต ด้วยการทดลองแบบพหุคูณที่ผิวตอบสนอง จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนตและแคลเซียมแลคเตตที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของหัตถ์หิมกรอบทรงกลมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตหัตถ์หิมกรอบทรงกลม คือ การใช้โซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.05 และแคลเซียมแลคเตตร้อยละ 0.77 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคะแนนความชอบด้านสี ความสามารถในการแตก รูปร่างทรงกลม และความชอบโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ชอบปานกลาง

3. วิธีการวิจัย

วัตถุดิบ และสารเคมี

ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ตราหงส์ทอง บริษัทเจียแม็งมาร์เก็ต ประเทศไทย, งาคั่วบด ตราเพียวเกรน ห้างหุ้นส่วนจำกัด ชิน อกริฟู๊ดส์, สารโซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) food grade บริษัท ยูเนี่ยนชาเยน จำกัด และแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) food grade บริษัท ยูเนี่ยนชาเยน จำกัด, ประเทศไทย

เตรียมน้ำแบ่งข้าวไรซ์เบอร์รี่

เตรียมน้ำแบ่งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ดัดแปลงมาจากการเตรียมไข่มุกข้าวไรซ์เบอร์รี่ [14] โดยนำข้าวไรซ์เบอร์รี่หุงสุก 60 กรัม (ข้าวสารต่อน้ำ 1:2 โดยน้ำหนัก) ผสมกับน้ำ 186 กรัม (ข้าวสุกต่อน้ำที่ใช้ปั่น 1 : 3.1) ปั่นด้วยเครื่องปั่นผสม (Tefal รุ่น MF805 บริษัท กรู๊ป เอส อี บี, ประเทศไทย) ด้วยความเร็วสูงสุดเป็นเวลา 30 วินาที 3 รอบ จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน กรองส่วนผสมน้ำแบ่งด้วยที่ร่อนแปง (ความละเอียด 80 เมส) นำน้ำแบ่งที่ได้มาชั่งน้ำหนัก 82.15 กรัม สำหรับทำเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ 1 ส่วน

การเตรียมขึ้นรูปเส้นโดยใช้เทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมี

การเตรียมเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ โดยใช้เทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมีแบบเส้น (Molecular gastronomy) ดัดแปลงจากเทคนิคการขึ้นรูปทรงกลม [14, 15] นำมาขึ้นรูปให้เป็นเส้นแทน โดยนำน้ำแบ่งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เตรียมไว้ ผสมลงในสารละลายโซเดียมอัลจิเนตที่มีความเข้มข้น 1.25 ปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นมือถือ จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน นำส่วนผสมที่ได้ใส่หลอดฉีดยา (Syringe) ขนาด 20 มิลลิลิตร ต่อกับสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตร ยาว 25 เซนติเมตร เพื่อช่วยในการขึ้นรูปให้เป็นเส้น และปล่อยลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.31 แช่ทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที เก็บรักษาในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ได้เป็นผลิตภัณฑ์ “เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่”

ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของงาดำผงเสริมในเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่

เตรียมนตัวอย่างผลิตภัณฑ์เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ตามวิธีการข้างต้น โดยทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของงาดำผงร้อยละ 6, 8, 10 และ 12 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด นำมาผสมกับสารละลายโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้นร้อยละ 1.25 ปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นมือถือ และปล่อยลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความ

เข้มข้นร้อยละ 1.31 ส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 แช่ทิ้งไว้นาน 3 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที เก็บรักษาในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเพื่อการศึกษาคุณลักษณะของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำในแต่ละอัตราส่วนต่อไป

ตารางที่ 1 วัตถุดิบและปริมาณส่วนผสมเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำในแต่ละอัตราส่วน

ส่วนผสม	อัตราส่วนเส้นจากข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำ (ร้อยละ)			
	6	8	10	12
น้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่	76.15	74.15	72.15	70.15
โซเดียมอัลจิเนต	1.25	1.25	1.25	1.25
น้ำละลายสารโซเดียมอัลจิเนต	16.6	16.6	16.6	16.6
งาดำผง	6	8	10	12

ศึกษาคุณภาพของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมี

นำเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงที่ขึ้นรูปเส้นด้วยเทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมี ในแต่ละอัตราส่วนมาทำการวิเคราะห์คุณภาพในด้านต่าง ๆ ดังนี้

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

- วิเคราะห์ค่าสีของผลิตภัณฑ์เส้นข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงในแต่ละอัตราส่วน โดยใช้เครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น MiniScan EZ Manual Version 1.2 ซึ่งแสดงผลในรูปของค่าสว่าง (L *) ค่าสีแดง (a *) และค่าสีน้ำเงิน (b*)

- วิเคราะห์หาเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper รุ่น 150 มิลลิเมตร 0.02 มิลลิเมตร/6" x 1/128 นิ้ว)

- วิเคราะห์หาความหนืดของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง โดยการวัดการกระจายตัวของเนื้ออาหาร ด้วยการวัดความหนืดแบบแผ่นเป็นรัศมีวงกลมที่ตัดแปลงจากวิธีของ Mc William [16] โดยใช้พิมพ์วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ใช้แป้งปริมาณ 40 มิลลิกรัม ปล่อยลงในพิมพ์ จับเวลา 1 นาที วัดค่าการกระจาย 4 จุด

- การตรวจสอบลักษณะรูปร่าง (Morphology) ของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Light microscope) กำลังขยาย 3 ระดับ คือ 60X , 100X , และ 500X นำตัวอย่างเส้นมาผ่าตัดขวางตามยาว 1 นิ้ว แล้วใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องเพื่อลักษณะรูปร่างและลักษณะภายในของเส้นบันทึกผลแสดงข้อมูลเป็นภาพถ่ายแต่ละกำลังขยาย

การทดสอบทางประสาทสัมผัส นำเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงทั้ง 4 ระดับ มาทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัส ความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน (n=30) ด้วยวิธี 9 - point hedonic scale และคัดเลือกอัตราส่วนงาดำผง ที่ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบมากที่สุด มาทำการศึกษาในขั้นต่อไป

การวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง ที่ผ่านการคัดเลือก มาคำนวณหาคุณค่าทางโภชนาการ เปรียบเทียบกับตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย [17] และนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับเส้นสปาเก็ตตี้สดทั่วไป

การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ในทุกชุดการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ทางกายภาพวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) และการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส ใช้การวางแผนแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Completely Block Design; RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ ANOVA ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธีของ Scheffe

4. ผลการวิจัย

ผลศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของงาดำผงเสริมในเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่

จากผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของงาดำผง 4 ระดับ คือ ร้อยละ 6, 8, 10 และ 12 โดยน้ำหนักของน้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ แล้วนำมาขึ้นรูปแบบเส้นด้วยเทคนิคโมเลกุลาร์แกสโครโนมี กำหนดความเข้มข้นของโซเดียมอัลจิเนต 1.25 และแคลเซียมคลอไรด์ ร้อยละ 1.31 โดยน้ำหนัก และนำมาตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส ได้ผลการทดลองดังนี้

ผลการวิเคราะห์ค่าสี เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงทั้ง 4 ระดับ พบว่า มีความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเมื่อปริมาณงาดำผงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง ค่าสีเหลืองมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าสีแดงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2) ทั้งนี้เนื่องจากงาดำผงจะมีสีที่เป็นส่วนเปลือกสีดำ เมื่อเพิ่มลงในส่วนผสมของน้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่มีสีน้ำตาลออกแดง และนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นจะทำให้มีลักษณะเป็นจุดสีดำ จากเปลือกงาดำผง กระจายเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าสีแดงเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสว่างและค่าสีเหลืองของเส้นลดลงตามอัตราส่วนของงาดำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของงาดำที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการทดสอบทางกายภาพของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง

ร้อยละของงาดำ	ความหนืด	เส้นผ่าศูนย์กลาง ^{ns}	ค่าสีเส้น		
			L	a	b
6	2.59±0.16 ^b	3.42±0.21	25.82±0.05 ^d	2.67±0.04 ^a	2.69±0.06 ^b
8	2.30±0.14 ^{ab}	3.57±0.13	24.94±0.15 ^c	3.12±0.14 ^b	2.57±0.08 ^b
10	2.12±0.16 ^a	3.30±0.13	24.32±0.06 ^b	3.29±0.03 ^b	2.52±0.08 ^b
12	1.91±0.12 ^a	3.25±0.30	23.02±0.14 ^a	3.77±0.06 ^c	2.28±0.07 ^a

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และตัวอักษรที่ต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

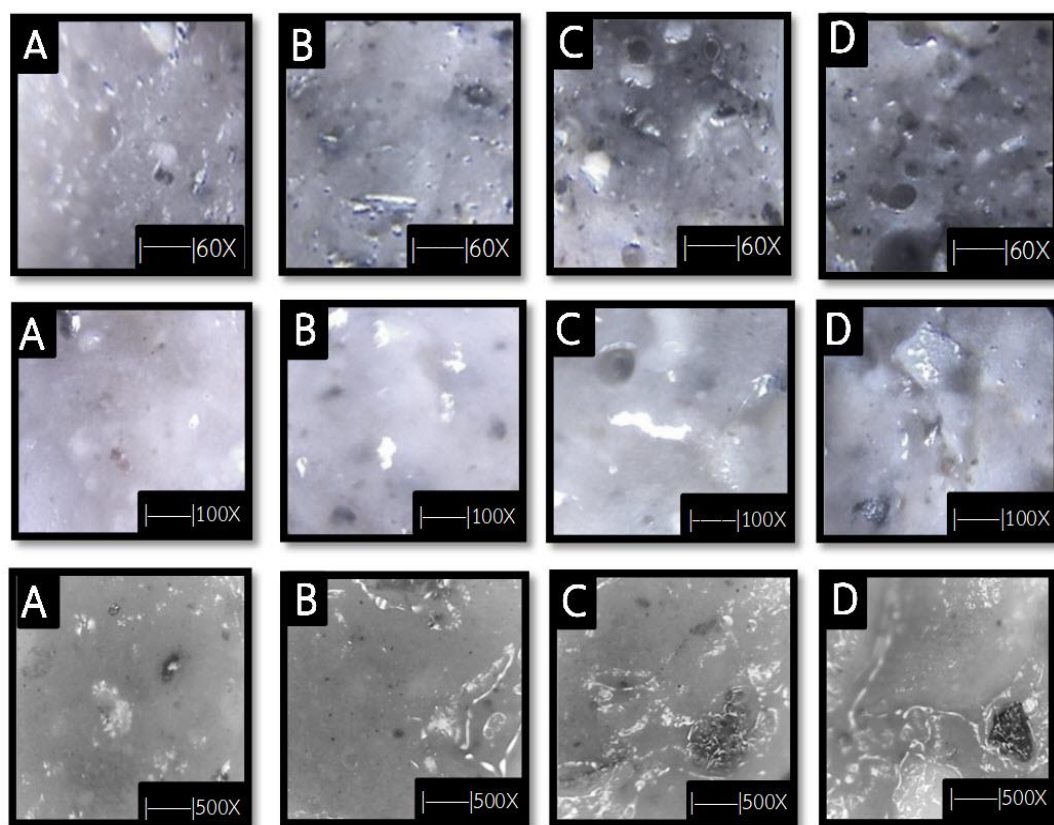


ภาพที่ 1 เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง 4 ระดับที่ขึ้นรูปเส้นด้วยเทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมี

ผลการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงทั้ง 4 ระดับ พบว่าแต่ละอัตราส่วนของงาดำที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ฯ ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมของน้ำแป้งที่ผสมสารละลายโซเดียมอัลจิเนตในสภาวะที่เหมาะสม เมื่อปล่อยผ่านท่อสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตร ยาว 25 เซนติเมตร และแช่ลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะเกิดการพอร์มเจลขึ้นทันที ทำให้ขึ้นรูปเป็นเส้นได้ [15,18] ซึ่งการเกิดเจลเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอัลจิเนต และสารละลายเกลือแคลเซียม เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมอัลจิเนต กับแคลเซียมไอออนเกิดการก่อเจล และไขว้เชื่อมกลายเป็นแคลเซียมอัลจิเนต ซึ่งโครงสร้างภายในของเจลจะมีลักษณะคล้ายกล่องบรรจุไข่ (egg box) แคลเซียมอัลจิเนตที่ได้จะไม่ละลายน้ำ และเจลจะมีลักษณะเนื้อแข็งทนต่อการกั๊กกร่อน และทำหน้าที่กักขวาง และควบคุมการแพร่ของอนุภาคที่ถูกกักเก็บได้ดี [14] ทำให้เส้นที่ปล่อยออกมามีขนาดใกล้เคียงกัน โดยทั้ง 4 ระดับจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 3.25 - 3.57 มิลลิเมตร

ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด โดยวัดจากการกระจายตัวของน้ำข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำทั้ง 4 ระดับจะอยู่ในช่วง 1.93-2.59 มิลลิเมตร (ตารางที่ 2) พบว่า น้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นสปาเก็ตตี้ มีแนวโน้มหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อระดับงาดำผงเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากปริมาณงาดำผงที่เพิ่มขึ้นจะดูดซับน้ำในน้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่มีอัตราส่วนคงที่ ทำให้ความหนืดของน้ำแป้งเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของงาดำผงที่เพิ่มขึ้น การปล่อยผ่านท่อสายยางเพื่อขึ้นรูปจะทำได้ยากเพิ่มขึ้น

ผลการตรวจสอบลักษณะรูปร่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 3 ระดับ คือ 60X, 100X, และ 500X พบว่า การเพิ่มปริมาณงาดำผงส่งผลให้เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่มีส่วนของเปลือกงาดำกระจายเพิ่มขึ้นและมีฟองอากาศเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่เสริมงาดำร้อยละ 6 จะการกระจายตัวของเปลือกงาดำน้อยที่สุดและมีผิวเนื้อสัมผัสเรียบ เนื่องจากมีปริมาณน้ำแป้งข้าวมากและเนื้องาแน่น สอดคล้องกับปริมาณอัตราส่วนของน้ำแป้งกับงาดำผงดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเมื่อปริมาณงาดำผงเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำแป้งจะลดลง ส่งผลให้น้ำแป้งมีความข้นหนืดเมื่ออัตราส่วนของงาดำผงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 2) เมื่อนำไปปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นมือถึงจึงมีฟองอากาศกระจายตัวเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปฉีดปล่อยในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพื่อขึ้นรูปเป็นเส้นจะเกิดการพอร์มเจลทันที ทำให้เส้นที่ได้มีรูปทรงตามความหนืดที่เพิ่มขึ้นจากปริมาณงาดำที่เพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวของงาดำเพิ่มขึ้น ในร้อยละ 8, 10 และ 12 ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างภายในของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง โดยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 60x, 100x, และ 500x (A) เสริมงาดำร้อยละ6, (B) ร้อยละ8, (C) ร้อยละ10, (D) และร้อยละ12 ตามลำดับ

ผลการทดสอบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส ของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง 4 ระดับ โดยใช้เทคนิคโมเลกุลาร์แกสโตรโนมีแบบเส้น ด้วยการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ พบว่า การเสริมงาดำผงทั้ง 4 ระดับมีคะแนนลักษณะปรากฏด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัสและความชอบรวมของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) อย่างไรก็ตามเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงร้อยละ 10 มีแนวโน้มคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด โดยมีคะแนนลักษณะปรากฏแต่ละด้านอยู่ในระดับชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง (6.17-6.93) ดังแสดงในตารางที่ 3 จึงนำอัตราส่วนดังกล่าวไปการคำนวณคุณค่าทางโภชนาการต่อไป

ตารางที่ 3 คะแนนประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผง 4 ระดับ

ร้อยละของงาดำ	คะแนนทดสอบทางประสาทสัมผัส			
	สี ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	ความชอบรวม ^{ns}
6	6.37±1.52	6.83±1.21	6.80±1.27	6.23±2.14
8	5.93±1.55	6.63±1.27	6.50±1.31	6.10±2.09
10	6.17±1.72	6.60±1.20	6.93±1.23	6.43±2.05
12	6.17±1.64	6.93±1.25	6.60±1.63	6.17±2.26

หมายเหตุ: ns: ค่าเฉลี่ยของแนวตั้ง หมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.5

การคำนวณคุณค่าทางโภชนาการ

เมื่อนำเส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงร้อยละ 10 ที่ผ่านการคัดเลือกมาคำนวณคุณค่าทางโภชนาการเทียบกับตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย [17] พบว่า เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำผงร้อยละ 10 ปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงานดังแสดงในตารางที่ 4 และเมื่อนำมาเทียบกับเส้นสปาเก็ตตี้สุกทั่วไป พบว่า เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่พัฒนาขึ้นจะให้พลังงานเพิ่มขึ้น 2.08 เท่าในน้ำหนักที่เท่ากัน เนื่องจากในผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบของงาดำที่มีปริมาณไขมันสูงจึงให้พลังงานมาก [19] ทั้งในรูปแคลอรี ไขมันและคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังให้ใยอาหารเพิ่มขึ้น 39 เท่าและแคลเซียม 13.75 เท่า จากส่วนประกอบของข้าวไรซ์เบอร์รี่และงาดำผงที่เสริมเข้าไป ตลอดจนมีสารอาหารอื่น ๆ เพิ่มขึ้นจากส่วนประกอบดังกล่าว (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์เส้นข้าวไรซ์เบอร์รี่เสริมงาดำ 10 %

สารอาหาร	เส้นสปาเก็ตตี้สุก	เส้นสปาเก็ตตี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ เสริมงาดำ 10%	จำนวนสารอาหารที่เพิ่มขึ้น (เท่า)
พลังงาน	111 กรัม	231 กรัม	2.08
โปรตีน	3.4 กรัม	6.07 กรัม	1.78
ไขมัน	0.4 กรัม	5.26 กรัม	13.15
คาร์โบไฮเดรต	23 กรัม	40 กรัม	1.74
ใยอาหาร	0.1 กรัม	3.9 กรัม	39
แคลเซียม	8 มิลลิกรัม	110 มิลลิกรัม	13.75
วิตามินบี1	0.01 กรัม	0.4 กรัม	40
วิตามินบี2	0.01 กรัม	0.26 กรัม	26

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

จากการศึกษาพัฒนาเส้นสปาเก็ตตี้จากข้าวไรซ์เบอร์รี่ผสมงาคำ โดยใช้เทคนิคโมเลกุลคิวลาร์แกสโตรโนมีแบบเส้น พบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแบบเส้น คือ น้ำแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ร้อยละ 72.15 (ข้าวหุงสุกต่อ น้ำ 1 : 3.1) สารละลายโซเดียมอัลจิเนตร้อยละ 1.25 น้ำที่ใช้ละลายสารร้อยละ 16.6 และงาคำผงร้อยละ 10 และปล่อยลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 1.31 แช่นาน 3 นาที เพื่อให้เกิดการขึ้นรูปเป็นเส้นได้ โดยลักษณะเส้นที่ได้มีลักษณะสีคล้ำมีจุดดำของงากระจายอยู่ทั่วทั้งเส้นที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.3 มิลลิเมตร มีระดับคะแนนความชอบอยู่ในเกณฑ์ชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง และมีคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากการคำนวณมากกว่าเมื่อเทียบกับเส้นสปาเก็ตตี้ทั่วไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] จรินาถ ทิพย์รักษา และ สุภัทธร นุตวงแก้ว. พาสต้าเสริมเส้นใยจากแป้งถั่วแดงหลวง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2552, 4(1), หน้า 16 – 22.
- [2] Rubio-Tapia, A., Hill, I. D., Kelly, C.P., et al. **ACG clinical guidelines: diagnosis and management of celiac disease.** American College of Gastroenterology. 2013, 108(5), หน้า 656-676.
- [3] หทัยชนก ศรีประไพ, ฉัตรชนก บุญไชย และยศสินี หัวดวง. การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าสดจากแป้งข้าวกล้อง. Thai Journal of Science and Technology. 2561, 7(1), หน้า 58 – 69.
- [4] จรินาถ บุญคง, และสุกัญญา ส่งแสง. การใช้แป้งข้าวฟ่างแทนเซโมลินาบางส่วนเพื่อใช้ในการผลิตพาสต้า. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2559, 42(2), หน้า 281 – 284.
- [5] กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, อโนชา สุขสมบูรณ์ และอาภัสรา แสงนาค. การพัฒนาผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้าเพื่อสุขภาพเสริมแป้งถั่ว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์; มหาวิทยาลัยบูรพา, 2558.
- [6] ญาณิ ไชยบุราณนนท์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นสปาเก็ตตี้สดเสริมไบโอะคราม. [วิทยานิพนธ์คหกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2560.
- [7] ชนิษฐา หมวดเอียด. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นพาสต้าปราศจากกลูเตนอบแห้งจากแป้งข้าวสังข์หยด. วารสารวิจัยราชมงคลกรุงเทพ. 2561, 12(2), หน้า 91 – 102.
- [8] นฤมล ธรรมทันตา และบรรณสรณ์ วิภูษิตวรกุล. การพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำสลัดลดพลังงานจากข้าวหักไรซ์เบอร์รี่. [โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต] กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2559.
- [9] Herrea M.G, Lozano-Esquivel I.E, Ponce de León - Ramírez Y.R, Martinez-Padilla L.P. **Effect of added calcium chloride on the physicochemical and rheological properties of aqueous mixtures of sodium caseinate / sodium aldinat and respective oil-in-water emulsions.** Food Hydrocolloids. 2012, 29, p.p. 175 - 184.

- [10] Głuchowski A, Czarniecka-Skubina E, Pielak M, et al. **Sensory quality of molecular dishes and consumers' attitudes towards them.** Italian Journal of Food Science. 2019, 31(3), p.p. 501 – 513.
- [11] Navarro, V., Gema, S., Dani, et al. **Cooking and nutritional science: Gastronomy goes further.** International Journal of Gastronomy and Food Science. 2012, 1, p.p. 37-45.
- [12] This, H. **Food for tomorrow? How the scientific discipline of molecular gastronomy could change the way we eat.** EMBO reports. 2006, 7(11), p.p. 1062 - 1066.
- [13] วรณวิมล พุ่มโพธิ์ . **การผลิตเต้าหู้โดยใช้ เทคนิคการขึ้นรูปแบบทรงกลม.** [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
- [14] ญาดาวิ ลิขิตสมบุรณ์ และ ประพันธ์ ปิ่นศิริโรตม. **การเตรียมไข่มุกข้าวไรซ์เบอร์รี่โดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปทรงกลม.** การประชุมวิชาการงานเกษตรนเรศวร ครั้งที่ 14, มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก, 2559.
- [15] อัจฉรา ดลวิทยาคุณ และวรณวิมล พุ่มโพธิ์. **การผลิตทับทิมกรอบโดยใช้เทคนิคการขึ้นรูปทรงกลมแบบแช่แข็งย้อนกลับ.** วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2561, 13(2), หน้า 49-59.
- [16] Mc Milliam, M. **Food: Experimental prepective.** 3rd edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [17] สถาบันวิจัยโภชนาการ. **Food composition database ND.3 for INMUCAL program.** นครปฐม : มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- [18] Lee P. and Rogers M.A. **Effect of calcium source and exposure-time on basic caviar spherification using sodium alginate.** International Journal of Gastronomy and Food Science. 2012; 1, p.p. 96-100.
- [19] กาญจนา บันสิทธิ์ และธีระพล บันสิทธิ์. **คุณค่าของกากงาดำดิบ.** วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2557, 16(2), หน้า 47–54.

วิธีทดสอบหาปริมาณคอลลาเจนในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส
ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนส์

METHODS FOR THE ANALYSIS OF COLLAGEN IN FORTIFIED BEVERAGES WITH
COLLAGEN HYDROLYSATED USING HIGH-PERFORMANCE LIQUID
CHROMATOGRAPHY WITH FLUORESCENCE DETECTOR

จรรยา แสงเขียว*¹

JANYA SANGKHIAW *¹

¹ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*j.agroin@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบหาปริมาณคอลลาเจนในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส โดยใช้สารก่อนอนุพันธ์ชนิด FMOC-Cl และตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนส์ และคูณด้วยปัจจัย (conversion factor) เท่ากับ 7.25 เพื่อให้ได้ค่าปริมาณคอลลาเจนในตัวอย่าง พบว่าผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีวางขายในท้องตลาดมีปริมาณคอลลาเจนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1-25.0% ทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณคอลลาเจนให้ครอบคลุมกับกลุ่มตัวอย่างดังกล่าว พบว่าสารมาตรฐานมีช่วงการใช้งานที่เป็นเส้นตรงความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5-50 mg/L มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.996 ขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณได้ เท่ากับ 0.004% และ 0.013% ตามลำดับ และความเที่ยงของการทดสอบซ้ำในวันเดียวกันและต่างวัน โดยพิจารณาจากค่า %RPD มีค่าเท่ากับ 8.16% และ 7.48% ตามลำดับ ส่วนความแม่นยำของการทดสอบมีค่าการคืนกลับอยู่ในช่วง 80-110% ที่ระดับของสารที่สนใจไม่เกิน 10 mg/L และมีค่า Horwitz ratio น้อยกว่า 2 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซสดังกล่าว มีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการปฏิบัติงานประจำต่อไป

คำสำคัญ: คอลลาเจนไฮโดรไลเซส, โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง, การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี

ABSTRACT

This research aimed to study methods for determination of the collagen content of beverage products containing hydrolyzed collagen. The use of FMOC-Cl derivatives and high performance liquid chromatography was analyzed with a fluorescence detector and multiplied by a conversion factor of 7.25 to obtain the amount of collagen in the sample. It was found that beverage products commercially available had collagen content in the range from 0.1-25.0%. A method was validated for the collagen content had the calibration curve for 4-Hydroxy-L-proline was found to be linear in the concentrations ranging from 0.5-50 mg/L, with a correlation coefficient (R^2) of 0.996. The value of LOD and LOQ were 0.004% and 0.013%, respectively. The repeatability (use as a precision) of the method was observed and the standard deviation of concentration (%RSD) for Intra-day and Inter-day was 8.16% and 7.48%, respectively. The accuracy determined from the percentage of return ranged from 80-110% at the level of the substance of interest not more than 10 mg/L and the Horwitz ratio of less than 2. It was shown that the method for determining of the collagen content in beverage products containing collagen hydrolyzes was accurate and they are appropriate to be used in routine operations and comply with laboratory standards.

Keywords: Collagen hydrolysates, High-Performance Liquid Chromatography, Method validation

1. บทนำ

จากกระแสผู้บริโภคที่รักสุขภาพและความงามที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้มีผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับความสวยความงามของผิวพรรณวางจำหน่ายหลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่มีส่วนผสมของคอลลาเจน ซึ่งมีผลช่วยบรรเทาอาการปวดในผู้ป่วยโรคข้อเข่าเสื่อม [1] หลากหลายรูปแบบทั้งชนิดผงขี้ผึ้ง และเครื่องดื่มผสมคอลลาเจน เป็นต้น ส่งผลให้มีผลิตภัณฑ์ออกมาแข่งขันกันเพิ่มขึ้น และยังมีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยคอลลาเจนที่นำมาเป็นส่วนผสมในเครื่องดื่มจะอยู่ในรูปที่ผ่านกระบวนการสกัดและทำให้บริสุทธิ์แล้ว (collagen hydrolysate) มาใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ยา และอาหารเสริมต่าง ๆ เพิ่มขึ้นเอง องค์กรที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการคุ้มครองผู้บริโภค จึงให้มีการตรวจสอบปริมาณคอลลาเจนที่เหมาะสมต่อผู้บริโภค รวมถึงข้อมูลวัตถุดิบที่นำมาสกัดเป็นคอลลาเจน เนื่องจากคอลลาเจนสกัดบางชนิดอาจทำให้เกิดอาการของโรคภูมิแพ้ได้ ฉะนั้นการตรวจวัดปริมาณคอลลาเจนที่เป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการเติมสารดังกล่าวมีข้อจำกัดตามประกาศของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความมั่นใจให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิต และที่สำคัญผู้บริโภคได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือ และเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาเลือกซื้อ

ปัจจุบันวิธีที่ได้รับการยอมรับตามมาตรฐานสากลที่ใช้ในการทดสอบปริมาณคอลลาเจน คือการทดสอบด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ หรือเทคนิคที่เรียกว่า colorimetric method [2] ซึ่งเป็นการทดสอบปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนในเนื้อหยาและผลิตภัณฑ์ ซึ่งวิธีดังกล่าวอาจยังไม่ครอบคลุมตัวอย่างในกลุ่มเครื่องดื่มและผลิตภัณฑ์

ที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส นอกจากนี้พบการทดสอบหาปริมาณคอลลาเจนโดยใช้เทคนิคการย่อยโปรตีนด้วยเครื่องไมโครเวฟ (microwave digestion) และตรวจสอบด้วยกรดอะมิโน hydroxyproline ด้วยเทคนิคเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง ชนิดเฟสคงที่แบบ Anion Exchange [3] ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย แต่มีข้อจำกัดคือใช้เครื่องมือที่มีราคาแพงได้แก่เครื่องย่อยไมโครเวฟ และเฟสคงที่แบบ anion exchange แต่การใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนซ์ (HPLC-FLD) นั้นเป็นเครื่องมือที่มีใช้งานในห้องปฏิบัติการทดสอบทั่วไป โดยพบว่าใช้ร่วมกับสารก่ออนุพันธ์ 9-Fluorenylmethyl chloroformate (FMOC-Cl) เพื่อติดฉลากกรดอะมิโน ทำให้การทดสอบด้วยวิธีการนี้มีความจำเพาะต่อ hydroxyproline ทำให้ผลการทดสอบแม่นยำมากขึ้น [4] เทคนิคดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาวิธีทดสอบปริมาณคอลลาเจนในเครื่องต้มและผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส นอกจากนี้ทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ได้วิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนที่ถูกต้อง แม่นยำ สอดคล้องกับมาตรฐานห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025 : 2017 และเพื่อเพิ่มศักยภาพของห้องปฏิบัติการศูนย์บริการประกันคุณภาพอาหาร ให้เป็นที่ยอมรับต่อไป

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คอลลาเจน (collagen) เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) พบในร่างกาย 20-30 % [5] มีโครงสร้างทั่วไปโดยภายในสายโพลีเปปไทด์แต่ละสายเกิดจากการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของกรดอะมิโน (G-X-Y)_n โดย G คือ ไกลซีน (Glycine : Gly) เป็นองค์ประกอบ 33%, X คือโพรลีน (Proline : Pro) ประมาณ 10% และ Y คือไฮดรอกซีโพรลีน (Hydroxyproline : Hyp) มีประมาณ 14% [6] คอลลาเจนสามารถจำแนกได้หลายชนิดชนิดที่พบมากคือ คอลลาเจนชนิดที่ 1 (Type I) พบในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ผิวหนัง เส้นเอ็น กระดูก กระดูกอ่อน [7] และคอลลาเจนชนิดที่ 3 (Type III) พบได้กระดูก ผิวหนังชั้นนอกสุด เอ็นกล้ามเนื้อและผนังหลอดเลือด [8] ซึ่งคอลลาเจนเป็นโปรตีนชนิดเดียวที่อุดมไปด้วยไฮดรอกซีโพรลีนมีมากถึง 14% ของคอลลาเจนในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และไฮดรอกซีโพรลีนเองจะไม่พบในโปรตีนชนิดอื่น ๆ ดังนั้น ไฮดรอกซีโพรลีนจึงมักเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณคอลลาเจนในตัวอย่างอาหาร

ปัจจุบันคอลลาเจนถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น ผสมในเครื่องดื่ม หรือผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่น ๆ เพื่อเป็นอาหารเสริมผสมคอลลาเจน เนื่องจากต้องการสรรพคุณในการเสริมความงามของผิวพรรณ โดยคอลลาเจนถูกแปรรูปให้อยู่ในรูปคอลลาเจนไฮโดรไลเซส ที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย และดูดซึมเข้าร่างกายได้รวดเร็ว เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค จากการนำคอลลาเจนไฮโดรไลเซสมาเป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่มมากขึ้น ทำให้มีการตรวจสอบปริมาณคอลลาเจนที่เหมาะสมต่อผู้บริโภค รวมถึงข้อมูลวัตถุดิบที่นำมาสกัดเป็นคอลลาเจน ฉะนั้นการตรวจวัดปริมาณคอลลาเจนที่เป็นส่วนผสมในอาหารและเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการเติมสารดังกล่าวมีข้อจำกัดตามประกาศของสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มความมั่นใจให้กับอุตสาหกรรมผู้ผลิต และที่สำคัญผู้บริโภคได้รับข้อมูลที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือ และเป็นประโยชน์ต่อการพิจารณาเลือกซื้อ

วิธีการตรวจวัดปริมาณคอลลาเจนสามารถทำได้หลายวิธี [9] ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared Spectroscopy : NIRS) ในการติดตามปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนในไส้กรอกหมู และไส้กรอกวัว ซึ่งไฮดรอกซีโพรลีนถูกใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินปริมาณคอลลาเจน แต่การใช้เทคนิค NIRS นั้น ต้องใช้เครื่องมือ

ที่มีราคาแพง ผู้ใช้งานต้องมีความชำนาญในการตรวจสอบ [10] ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีที่อาศัยการวัดปริมาณของไฮดรอกซีโพรลีน เนื่องจากคอลลาเจนมีองค์ประกอบของไฮดรอกซีโพรลีนในปริมาณสูง แตกต่างจากโปรตีนส่วนอื่น โดยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) เปลี่ยนรูปไฮดรอกซีโพรลีนเป็น Pyrrole-2-carboxylic acid [11] และใช้ p-dimethylaminobenzaldehyde (DMBA) เป็นตัวติดฉลากเปปไทด์ที่ปลายสายกรดอะมิโนที่สนใจ ซึ่งจะสามารถตรวจวัดปริมาณของสีที่เกิดขึ้นได้ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ซึ่งจะคล้ายกับการวิเคราะห์หาปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนที่เป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานสากลปัจจุบัน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปริมาณคอลลาเจนเฉพาะในเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ซึ่งจะต้องย่อยตัวอย่างให้อยู่ในรูปกรดอะมิโน คือสารไฮดรอกซีโพรลีนด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นหรือซัลฟูริกเข้มข้น ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง นำไปทำปฏิกิริยากับสารคลอรามินที (Chloramine-T) จะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสีม่วงแดง จากนั้นวัดปริมาณสีที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไฮดรอกซีโพรลีน ซึ่งเรียกเทคนิคนี้ว่า colorimetric method แต่วิธีการนี้ยังมีข้อจำกัดด้านเวลาในการเตรียมตัวอย่างต้องใช้เวลานานและการควบคุมสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้คงที่ได้ยาก โดยวิธีการตรวจวัดปริมาณคอลลาเจนมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง พบว่าการประยุกต์ใช้สารก่ออนุพันธ์ (derivative agent) เพื่อติดฉลากเปปไทด์ที่ปลายสายกรดอะมิโน หลังจากโปรตีนถูกย่อยด้วยกรดเข้มข้นนั้น มีผลต่อการแยกกรดอะมิโนที่สนใจโดยสารก่ออนุพันธ์แต่ละชนิดจะมีความจำเพาะแตกต่างกันออกไป ทำให้สามารถแยกกรดอะมิโนที่ต้องการตรวจสอบออกจากกรดอะมิโนตัวอื่นได้ [12] ได้วิเคราะห์ปริมาณคอลลาเจนโดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดอัลตราไวโอเล็ต (UV detector) ด้วยการย่อยตัวอย่างด้วยกรดและทำปฏิกิริยาอนุพันธ์ด้วย 4-Chloro-7-nitrobenzofurazan (NBD-Cl) ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตามจากการศึกษา [13] พบว่าการใช้สารก่ออนุพันธ์ 9-Fluorenylmethyl chloroformate (FMOC-Cl) เพื่อติดฉลากกรดอะมิโน เนื่องจากมีความจำเพาะต่อไฮดรอกซีโพรลีน ซึ่งเป็น secondary amino acid ทำให้ไม่ถูกรบกวนจากกรดอะมิโนชนิดอื่น และทดสอบด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงชนิดร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนส์ (fluorescence detector) ที่ให้ค่า sensitivity สูง สามารถทดสอบได้ในระดับความเข้มข้นต่ำสุด (detection limit) เท่ากับ 0.90 ug/ml

ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้สารก่ออนุพันธ์ชนิด FMOC-Cl เพื่อติดฉลากกรดอะมิโนชนิดไฮดรอกซีโพรลีน และตรวจวิเคราะห์ด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนส์ (HPLC-FLD) เพื่อทดสอบปริมาณคอลลาเจนในเครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส โดยเปรียบเทียบปริมาณไฮดรอกซีโพรลีนที่ได้จากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-FLD จากนั้นนำมาคูณด้วยปัจจัย (conversion factor) เพื่อให้ได้เป็นค่าปริมาณคอลลาเจนในตัวอย่าง และทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่าวิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนดังกล่าวมีความถูกต้อง รวดเร็วและแม่นยำ สอดคล้องกับมาตรฐานห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025 : 2017

3. วิธีการวิจัย

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่าง สามารถแบ่งตัวอย่างเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มวัตถุดิบ กลุ่มอาหารทั่วไปพร้อมบริโภค กลุ่มเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิท และกลุ่มอาหารเสริม เพื่อนำมาทดสอบหาปริมาณคอลลาเจน

วัสดุและอุปกรณ์

ทดสอบปริมาณคอลลาเจนด้วยเทคนิค pre-column reverse phase High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ด้วยตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนซ์ (FLD) โดยเครื่อง HPLC รุ่น HP 1260 บริษัท Agilent Technologies, เครื่อง Block Heater ยี่ห้อ Stuart รุ่น SBH 200D, สารมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline $\geq 99\%$, 9-Fluorenylmethyl chloroformate $\geq 99\%$ (FMOC-Cl) จาก Sigma-Aldrich, Hydrochloric acid, Methanol และ Acetonitrile (HPLC grade) จาก Labscan

การเตรียมสารละลายมาตรฐานและตัวอย่าง

เตรียมสารละลายมาตรฐานประมาณ 0.1 g ละลายด้วย 0.1 N HCl ให้ได้ความเข้มข้น 1,000 mg/L และเตรียมสารมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ อย่างน้อย 5 ระดับความเข้มข้น เพื่อทำการหาปริมาณสำหรับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบปริมาณคอลลาเจน โดยชั่งตัวอย่างน้ำหนักที่แน่นอน ใส่ในหลอดสำหรับย่อยตัวอย่างที่มีฝาปิด เพื่อป้องกันการสัมผัสกับอากาศ จากนั้นเติม 6 M HCl 5 ml เขย่าเบา ๆ ให้เข้ากัน แล้วนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อย (block digestion) ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [4] นำสารละลายตัวอย่างที่ผ่านการย่อยมาเจือจางด้วยน้ำกลั่น (distilled water) ให้ได้ปริมาตรที่ต้องการ เก็บส่วนใสของตัวอย่างไว้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป โดยนำสารละลายส่วนใสจากข้างต้น 250 μ l เติมสารละลาย 0.4 M borate buffer pH 10.4 ปริมาณ 1 ml และทำอนุพันธ์ด้วยการเติมสาร 50% FMOC-Cl ปริมาตร 250 μ l ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 1 นาที กรองสารละลายด้วย nylon syringe filter ใส่ขวด vial สีชาขนาด 1.5 ml นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC

การทดสอบปริมาณคอลลาเจนด้วยเทคนิค HPLC จะใช้คอลัมน์ C18 (4.6 x 150 mm, 5 μ m diameter) และใช้เฟสเคลื่อนที่แบบผสม (Gradient) โดยใช้เฟสเคลื่อนที่ A เป็น sodium dihydrogen phosphate pH 7.8 และเฟสเคลื่อนที่ B เป็น methanol : acetonitrile : DI water ในอัตราส่วน 45 : 40 : 15 (v/v/v) โดยมีสภาวะของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ (program gradient) ตามตารางที่ 1 อุณหภูมิคอลัมน์ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 0.7 ml/min โดยมีความยาวคลื่นที่ให้พลังงานกับสาร (excitation wavelengths) ที่ 270 nm และความยาวคลื่นที่สารดูดกลืน (emission wavelengths) ที่ 316 nm ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 45 นาทีต่อตัวอย่าง ตรวจสอบค่า retention time ของ 4-Hydroxy-L-proline และคำนวณปริมาณคอลลาเจนโดยคูณด้วยปัจจัย (conversion factor) 7.25 ตามวิธี [14] ดังสมการ

$$\text{Collagen content (\%)} = \frac{\text{Hydroxyproline, mg/L} \times \text{CF}}{\text{weight of test portion, g} \times 100} \quad (1)$$

ตารางที่ 1 สภาวะของอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ในช่วงเวลาต่าง ๆ (program gradient)

เวลา (นาที)	เฟสเคลื่อนที่ A	เฟสเคลื่อนที่ B
0	60	40
15	45	55
45	35	65

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบ (Method validation)

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวิธีการทดสอบที่เลือกใช้มีความถูกต้อง เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบปริมาณคอลลาเจนต่อไป และเพื่อให้สอดคล้องตามระบบมาตรฐานห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025 : 2017 ซึ่งประกอบด้วย การพิสูจน์ช่วงของการวัด (working rang) ความเป็นเส้นตรง (Linearity) ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of Detection : LOD) และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณได้ (Limit of Quantitation : LOQ) ความเที่ยง (precision) และความสามารถในการทดสอบซ้ำในช่วงเวลาต่างกัน (reproducibility) และความแม่นยำ (trueness) โดยมีขั้นตอนดังนี้

พิสูจน์ช่วงของการวัด และความเป็นเส้นตรง โดยเตรียมสารละลายมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline ความเข้มข้นอย่างน้อย 5 ระดับ ๆ ละ 3 ซ้ำ ประเมินความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานโดยหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (แกน X) และพื้นที่ใต้กราฟ (แกน Y) พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R^2) โดยค่าที่ได้ควรมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง และมากกว่าหรือเท่ากับ 0.995 ถือว่ากราฟมาตรฐานดังกล่าว มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ

พิสูจน์ขีดจำกัดของการตรวจพบ และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณได้ โดยเลือกตัวอย่างในกลุ่มเครื่องดื่มในภาวะปิดสนิท และเติมสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 0.05 mg/L ลงในตัวอย่าง ทำการทดสอบ 10 ซ้ำ คำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยขีดจำกัดของการตรวจพบเท่ากับ 3SD และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 10SD

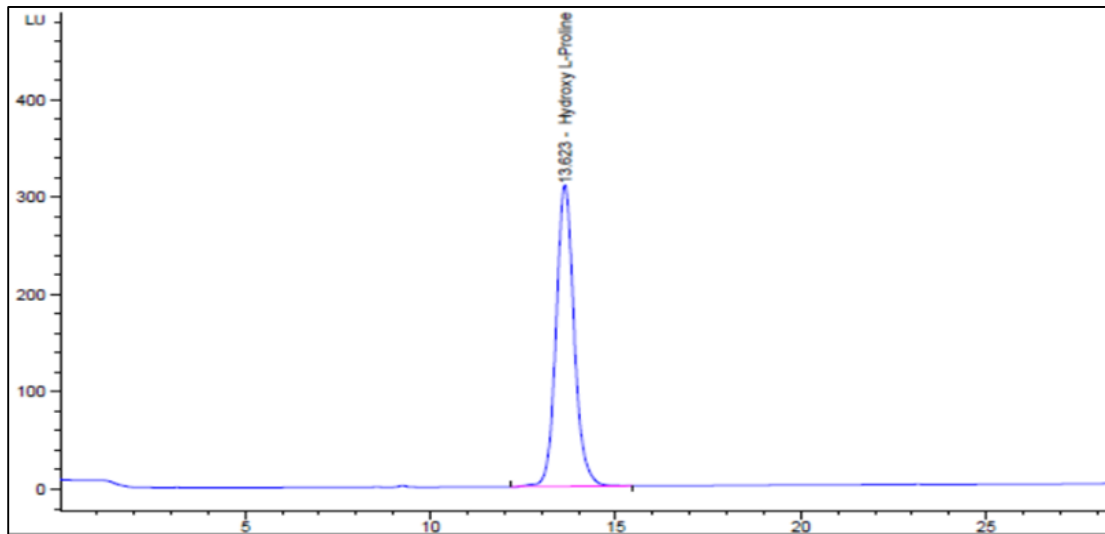
พิสูจน์ความเที่ยงและความแม่นยำของวิธี โดยเติมสารมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline ลงในตัวอย่าง 3 ระดับความเข้มข้น ๆ ละ 10 ซ้ำ คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) และความเที่ยงในการทำซ้ำจากค่า Horwitz ratio พิสูจน์ความแม่นยำของวิธี โดยคำนวณการคืนกลับของสารมาตรฐาน (% recovery) ตามเกณฑ์มาตรฐาน [15]

พิสูจน์ความสามารถในการทดสอบซ้ำในช่วงเวลาต่างกัน โดยทดสอบปริมาณคอลลาเจนในตัวอย่างจำนวน 10 ครั้ง ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบทางสถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

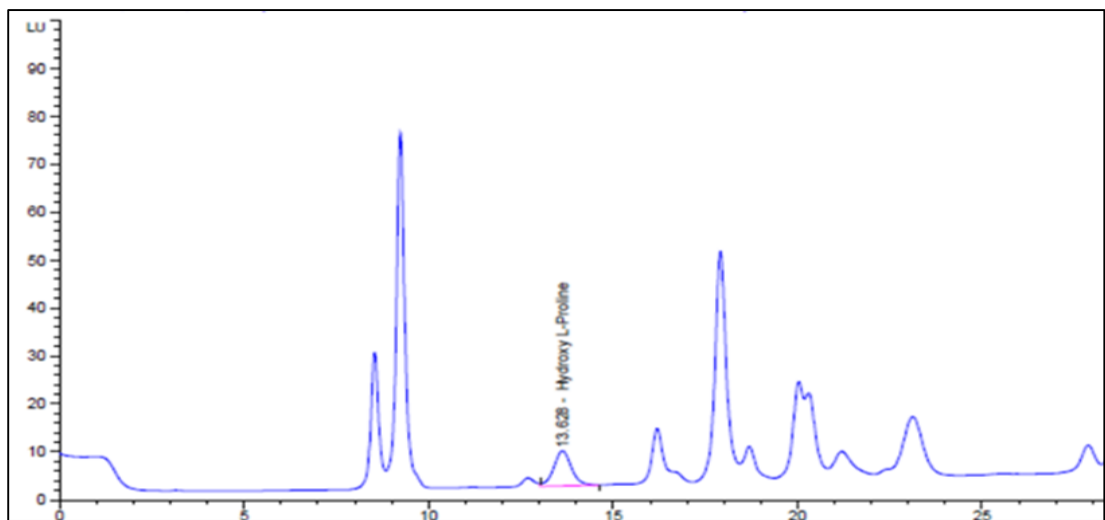
4. ผลการวิจัย

จากสภาวะในการทดสอบปริมาณ 4-Hydroxy-L-proline ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนส์ พบว่าเป็นวิธีที่มีความจำเพาะ สามารถแยกสารที่ต้องการได้

อย่างชัดเจน โดยสาร 4-Hydroxy-L-proline จะถูกชะออกจากคอลัมน์ประมาณเวลาที่ 13.62 (retention time) แสดงโครมาโทแกรมของสาร 4-Hydroxy-L-proline ของตัวอย่างเครื่องดื่ม ตามภาพที่ 2



ภาพที่ 1 โครมาโทแกรมของสารมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline ความเข้มข้น 50 mg/L



ภาพที่ 2 โครมาโทแกรมของสาร 4-Hydroxy-L-proline ในตัวอย่างเครื่องดื่ม

จากเก็บรวบรวมข้อมูลตัวอย่างเพื่อนำมาทดสอบหาปริมาณคอลลาเจน จำนวน 113 ตัวอย่าง สามารถแบ่งตัวอย่างเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มวัตถุดิบ กลุ่มอาหารทั่วไปพร้อมบริโภค กลุ่มเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิท และกลุ่มอาหารเสริม โดยมีรายละเอียดดังนี้ กลุ่มวัตถุดิบ ได้แก่ เนื้อไก่ เนื้อกุ้ง เนื้อปลา เป็นต้น กลุ่มอาหารทั่วไปพร้อมบริโภค ได้แก่ หนัปลาทอดกรอบ กาแฟสำเร็จรูปชนิดผง แหนม เป็นต้น กลุ่มเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิทได้น้ำผลไม้ เครื่องดื่มรังก ขนมะลีสี่ เครื่องดื่มประเภทผลิตภัณฑ์จากนมต่าง ๆ ซึ่งมีการเติมคอลลาเจนในปริมาณที่มีการควบคุม และกลุ่มอาหารเสริม ได้แก่ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารเสริมคอลลาเจนชนิดน้ำ ชนิดผง เป็นต้น โดยตัวอย่างแต่ละประเภทนำมาตรวจสอบปริมาณคอลลาเจนด้วยโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงร่วมกับตัวตรวจวัดชนิดฟลูออเรสเซนส์

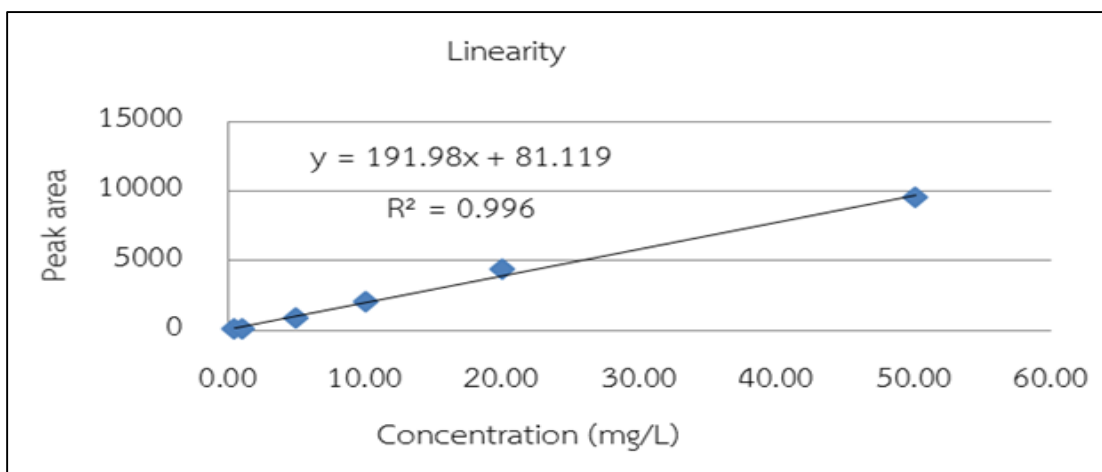
ตารางที่ 2 ปริมาณคอลลาเจนที่พบในตัวอย่าง

ลำดับ	ชนิดกลุ่มตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง	คิดเป็นสัดส่วนจากตัวอย่างทั้งหมด (%)	ปริมาณคอลลาเจน (%)
1	วัตถุดิบ	31	27	0.3 - 99.0
2	อาหารทั่วไปพร้อมบริโภค	11	10	0.2 - 30.0
3	เครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิท	54	48	0.1 - 25.0
4	ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม collagen hydrolysate	17	15	1.0 - 20.0

จากตารางที่ 2 พบว่าตัวอย่างกลุ่มเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิท เป็นกลุ่มที่ได้รับความสนใจของผู้ผลิตที่นิยมนำคอลลาเจนมาเติมเป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ เมื่อนำมาทดสอบหาปริมาณคอลลาเจน พบว่ามีปริมาณคอลลาเจน ตั้งแต่ 0.1-25.0% คิดเป็น 48% จากตัวอย่างทั้งหมด รองมาคือกลุ่มวัตถุดิบ 27% ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม 15% และอาหารทั่วไปพร้อมบริโภค 10% เป็นลำดับสุดท้าย โดยมีปริมาณคอลลาเจนอยู่ในช่วง 0.3-99.0% และในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาวิธีการทดสอบและความใช้ได้ของวิธีการทดสอบหาปริมาณคอลลาเจนในตัวอย่างเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิทที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส

การตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Method validation)

เพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีที่ใช้ในการทดสอบปริมาณคอลลาเจนนั้นเหมาะสม โดยการพิสูจน์ช่วงของการวัด และความเป็นเส้นตรง โดยสร้างกราฟมาตรฐานและหาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน (แกน X) และพื้นที่ใต้กราฟ (แกน Y) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R^2) เท่ากับ 0.996 ดังภาพที่ 3 และมีช่วงการใช้งานที่เป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5-50 mg/L และเพื่อยืนยันว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน ทำการทดสอบความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ เปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟในเวลาที่พบสาร (retention time) พบว่ามีค่าความเที่ยงของการทดสอบซ้ำของพื้นที่ใต้กราฟ (%RSD) มีค่าน้อยกว่า 10 ตามเกณฑ์ที่กำหนด [15] ดังกล่าวมีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ แสดงดังตารางที่ 3



ภาพที่ 3 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างความเข้มข้นสารมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline กับพื้นที่ใต้กราฟ

ตารางที่ 3 พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline

Concentration (mg/L)	Peak area			Peak area (mean)	% RSD
	1	2	3		
0.50	91.45077	105.05761	96.06548	96.06548	7.20
1.00	163.0345	169.25786	167.35297	167.35297	1.91
5.01	922.92798	916.39423	927.02075	927.02075	0.58
10.03	2126.1177	2100.1948	2031.2581	2031.25806	2.41
20.06	4322.4395	4461.7881	4381.7383	4381.73828	1.60
50.14	9691.3897	9507.1943	9537.5693	9537.56934	1.04

พิสูจน์ขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณได้ โดยทำการทดสอบ 10 ซ้ำ พบว่ามีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) เท่ากับ 0.0013 มีขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 0.004% และขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.013%

ตารางที่ 4 ผลการพิสูจน์ความเที่ยง (precision) และความแม่นยำ (% recovery) n=10

Concentration (mg/L)	% Recovery	% RSD	Horwitz	Horwitz ratio
1.00	93.27	6.43	3.25	1.98
5.01	99.07	2.18	2.55	0.85
10.03	105.11	1.45	2.28	0.63

พิสูจน์ความเที่ยงของการทดสอบซ้ำ ที่ระดับความเข้มข้น 1.00, 5.01 และ 10.03 mg/L มีค่า Horwitz ratio เท่ากับ 1.98, 0.85 และ 0.63 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับ คือมีค่าน้อยกว่า 2 และจากการพิสูจน์ความแม่นยำของวิธีโดยคำนวณการคืนกลับของสารมาตรฐาน 4-Hydroxy-L-proline พบว่ามีค่าการคืนกลับเฉลี่ยเท่ากับ 93.27%, 99.07% และ 105.11% ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงเกณฑ์การยอมรับ คือ 80-110% ที่ระดับของสารที่สนใจไม่เกิน 10 mg/L [15]

ตารางที่ 5 ปริมาณคอลลาเจนในเครื่องต้มที่ทดสอบซ้ำในวันเดียวกันและในช่วงเวลาต่างวัน (reproducibility)

Collagen content (%)		
	Mean $\pm$ SD	% RSD
Intra-day (n=10)	0.17 $\pm$ 0.01	8.16
Inter-day (n=10)	0.18 $\pm$ 0.01	7.48

พิสูจน์ความสามารถในการทดสอบซ้ำในช่วงเวลาที่ต่างกันโดยพิจารณาค่า Relative Standard Deviation (%RSD_R) พบว่ามีค่าเฉลี่ยของปริมาณคอลลาเจนและค่า %RSD_R เท่ากับ 0.17 $\pm$ 0.01% และ

$0.18 \pm 0.01\%$ ตามลำดับ เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ t-test พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่าง มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

จากการเก็บข้อมูลตัวอย่างที่นิยมใช้คอลลาเจนเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) คือกลุ่มเครื่องดื่มในภาชนะปิดสนิท โดยมีปริมาณคอลลาเจนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1-25.0% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นตัวอย่างที่ได้รับความนิยมของผู้ผลิตเป็นอย่างมาก ผู้วิจัยจึงเลือกทำการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณคอลลาเจนให้ครอบคลุมกับกลุ่มตัวอย่างดังกล่าว เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคเพื่อให้มั่นใจในผลิตภัณฑ์ก่อนนำมาบริโภค โดยพบว่าในช่วงการใช้งานของสารมาตรฐานที่เป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.5-50 mg/L มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.996 มีขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณได้ เท่ากับ 0.004% และ 0.013% ตามลำดับ มีความเที่ยงโดยพิจารณาค่า Horwitz ratio มีน้อยกว่า 2 และความแม่นยำจากการคืนกลับอยู่ในช่วง 80-110% ที่ระดับของสารที่สนใจไม่เกิน 10 mg/L และเมื่อทำการทดสอบในเวลาที่แตกต่างกันพบว่าปริมาณคอลลาเจนที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการทดสอบความใช้ได้ของวิธีทดสอบปริมาณคอลลาเจนในเครื่องดื่ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซส ดังกล่าวมีความถูกต้อง เหมาะสม ที่จะนำมาใช้ในการปฏิบัติงานประจำของห้องปฏิบัติการ โดยพบว่าวิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนดังกล่าวยังไม่สามารถจำแนกประเภทของคอลลาเจนที่เติมลงในผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งการใช้ตัวคูณปัจจัย (conversion factor) เป็นการแสดงผลแห่งที่มาของโปรตีนที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตคอลลาเจน โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำตัวคูณปัจจัยสำหรับการคำนวณปริมาณคอลลาเจนที่แท้จริง เช่น คอลลาเจนที่มาจากเนื้อสัตว์จะใช้ตัวคูณปัจจัย เท่ากับ 8 [2] ซึ่งในการศึกษาตัวเลขของตัวคูณปัจจัยนี้ ยังมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องและยังไม่มีการระบุตัวเลขที่แน่นอน

ในปัจจุบันพบวิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนในเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ [2] เท่านั้น ที่เป็นวิธีมาตรฐานสากล ซึ่งยังไม่ครอบคลุมกับตัวอย่างเครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซสที่กำลังได้รับความนิยมในท้องตลาด และเพื่อสนองความต้องการของลูกค้าหรือผู้บริโภค ทางห้องปฏิบัติการจึงได้พัฒนาวิธีทดสอบและทำการยืนยันว่าวิธีการทดสอบปริมาณคอลลาเจนในเครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของคอลลาเจนไฮโดรไลเซสดังกล่าว มีความเหมาะสม ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้อง เพื่อให้ทันต่อสถานการณ์ปัจจุบัน และสามารถแข่งขันกับห้องปฏิบัติการอื่นได้ อย่างไรก็ตามในการทดสอบปริมาณคอลลาเจนด้วยวิธีการย่อยตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อตัดสายพันธะเปปไทด์ของโปรตีนให้อยู่ในรูปกรดอะมิโนและใช้สารอนุพันธ์ FMOC-Cl เพื่อแสดงความจำเพาะเจาะจงของสาร hydroxyproline ทดสอบปริมาณด้วยเครื่อง HPLC ที่มีความไวสูง มีการแยกที่ดี เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยม เนื่องจากเครื่อง HPLC เป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ห้องปฏิบัติการทั่วไปมีใช้งาน นอกจากนี้ยังเป็นวิธีทดสอบที่ง่าย รวดเร็ว เหมาะสมกับการทดสอบในงานประจำ และสามารถนำไปยื่นขอการรับรองวิธีการทดสอบตามระบบมาตรฐาน ISO/IEC 17025 ต่อไปได้

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี จากการอนุเคราะห์ของหัวหน้าศูนย์บริการประกันคุณภาพอาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ที่สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ อีกทั้งยังให้การสนับสนุนบุคลากรพัฒนาความรู้ต่อยอดจากงานประจำสู่งานวิจัย เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการของห้องปฏิบัติการศูนย์บริการประกันคุณภาพอาหาร ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Moskowitz RW. **Role of collagen hydrolysate in bone and joint disease.** Seminars in Arthritis and Rheumatism, 2000, 30(2) p. 87-99.
- [2] AOAC Official method 990.26, **official methods of analysis**, 17th edition. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, 2000.
- [3] Messia MC, Di Falco T, Panfili G, Marconi E. **Rapid determination of collagen in meat-based foods by microwave hydrolysis of proteins and HPAEC-PAD analysis of 4-hydroxyproline.** Meat Science, 2008, 80(2), p. 401-409.
- [4] Green, G.D., Reagan, K. **Determination of hydroxyproline by high pressure liquid chromatography.** Analytical Biochemistry, 1992, (201) P. 265-269.
- [5] Lareu, R.R., Zeugolis, D.I., Abu-Rub, M., Pandit, A., and Raghunath, M. **Essential modification of the Sircol Collagen Assay for the accurate quantification of collagen content in complex protein solutions.** Acta Biomaterialia, 2010, p. 3146–3151.
- [6] Lin, Y.K., and Kuan, C.Y. **Development of 4-hydroxyproline analysis kit and its application to collagen quantification.** Food Chemistry. 2010, p. 1271-1277.
- [7] Taskiran, D., Taskiran, E., Yercan, H., and Kutay, F.Z. **Quantification of total collagen in rabbit tendon by the Sirius Red Method.** Turkish Journal of Medical Sciences, 1997, p. 7-9.
- [8] Gelse, K., Poschl, E. and Aigner, T. **Collagens-structure, function and biosynthesis.** Advanced Drug Delivery Reviews, 2003, 55(12) p. 1531-1546.
- [9] González-Martín, M.I., Bermejo, C.F., Hierro, J.M.H. and Sánchez González, C.I. **Determination of hydroxyproline in cured pork sausages and dry cured beef products by NIRS technology employing a fibre-optic probe.** Food Control, 2009, (20) p. 752–755.
- [10] Colgrave, M.L., Allingham, P.G. and Jones, A. **Hydroxyproline quantification for the estimation of collagen in tissue using multiple reaction monitoring mass spectrometry.** Journal of Chromatography A. 2008, (1212) p.150–153.

- [11] Hofman, K., Hall, B., Cleaver, H. and Marshall, S. **High-throughput quantification of hydroxyproline for determination of collagen.** Analytical Biochemistry, 2011, (417) p. 289–291.
- [12] Dai, Z., Wu, Z., Jia, S. and Wu, G. **Analysis of amino acid composition in proteins of animal tissues and foods as pre-column o-phthaldialdehyde derivatives by HPLC with fluorescence detection.** Journal of Chromatography B, 2014, (964) p. 116-127.
- [13] Aditya A. **Isolation, Purification, and Collagen Characterization from Pig Skin, and Glisin, Prolin, and Hydroxyproline Analysis in Characterization of High Performance Liquid Chromatography-Fluorescence.** Depok, Thesis. Faculty of Pharmacy, Universitas Indonesia, 2017.
- [14] Paul R., Hutson Mark E. Crawford, Ronald L., Sorkness. **Liquid chromatographic determination of hydroxyproline in tissue samples.** Journal of Chromatography B, 2003, (791) P. 427-430.
- [15] AOAC Peer Verified methods Program. **Manual on policies and procrdures.** Arlington, VA, Nov.1993.

แผนที่ออนไลน์เพื่อการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่ม ในตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน

ONLINE MAPPING FOR LANDSLIDE DISASTER PREPAEDNESS IN BO KLUEA NUEA SUBDISTRICT BO KLUEA DISTRICT, NAN

นันทน์ภัส หาญยุทธ^{1*}, จุฑาศินี ธัญปรานีตกุล¹, บัณฑิต อนรรักษ์¹ และ ปันทิตา ตันวัฒนะ²
Nannapat Hanyuth^{1*}, Juthasinee Thanyapraneedkul¹, Bundit Anurugsa¹ and Puntita Tanwattana²

¹วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

²สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* E-mail: titikron-face@hotmail.com

บทคัดย่อ

ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่านเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยดินถล่มสูง ดังนั้นการเตรียมความพร้อมเพื่อลดความเสี่ยงจึงมีความสำคัญอย่างมาก การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแผนที่ออนไลน์เพื่อเป็นฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ในการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มและเพื่อให้ประชาชนในชุมชน จิตอาสา และเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยตำบลนำแผนที่ออนไลน์ ไปใช้ประโยชน์ มีการแสดงข้อมูลความเปราะบางรายครัวเรือน และจุดสำคัญต่าง ๆ เช่น จุดรวมพล ศูนย์พักพิงชั่วคราว จุดแจ้งเตือนภัย จุดวัดปริมาณน้ำฝน เป็นต้น โดยแผนที่ออนไลน์นี้ สามารถเข้าถึงได้จาก QR code ผลจากการนำแผนที่ออนไลน์ ไปให้กลุ่มตัวอย่างใช้งาน และประเมินความสามารถทั้งก่อนและหลังใช้งาน กำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างสุ่มโดยใช้สูตร ทาร์โร ยามาเน่ ที่ระดับความมั่นใจ 95% และความคลาดเคลื่อนที่ 0.05 ขนาดกลุ่มตัวอย่าง 1,488 คน จาก 2,591 คน (ประชาชนที่มีอายุมากกว่า 12 ปี) พบว่า ประชาชนในชุมชนสามารถใช้งานแผนที่ออนไลน์ก่อนใช้อยู่ในระดับน้อย ($\bar{X}=1.62$, S.D.= 1.18) ในขณะที่หลังใช้อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}=4.74$, S.D. = 0.49) จะเห็นว่าประชาชนส่วนใหญ่สามารถใช้แผนที่และรู้ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เป็นข้อมูลในแผนที่เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับจิตอาสาที่ผลการประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ก่อนใช้ พบว่า อยู่ในระดับปานกลาง ($\bar{X}=2.48$, S.D. = 1.19) และหลังใช้อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}=4.81$, S.D. = 0.28) ส่วนเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พบว่า ผลการประเมินความคิดเห็นในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ ก่อนใช้อยู่ในระดับปานกลาง ($\bar{X}=3.25$, S.D.= 0.48) และหลังใช้อยู่ในระดับมาก ($\bar{X}=4.08$, S.D.= 0.82) โดยยังพบว่าหลังใช้แผนที่ออนไลน์เจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยมีความคิดเห็นต่อการนำแผนที่ออนไลน์ไปใช้ประโยชน์ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}=4.50$, S.D. = 0.50) แสดงให้เห็นว่าจำ

วันที่รับบทความ 28 กุมภาพันธ์ 2564

วันแก้ไขบทความ 15 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 22 มีนาคม 2564

หน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยได้เล็งเห็นถึงประโยชน์ของแผนที่ออนไลน์ และงานวิจัยนี้ได้แผนที่ออนไลน์ที่สามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ในการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มในตำบลบ่อเกลือเหนือต่อไป

คำสำคัญ: ภัยพิบัติดินถล่ม, การเตรียมความพร้อม, ความเปราะบางรายครัวเรือน, แผนที่ออนไลน์

ABSTRACT

Bo Kluea Nuea is a subdistrict prone to landslides due to heavy rainfall and steep slope, thus objectives of this study are to develop online map for landslide disaster preparedness and to disseminate online map to villagers, volunteers and disaster prevention and mitigation officers. Online map shows vulnerable household, evacuation sites and shelters, temporary collective centers, village broadcasts and rain gauges stations. By this online map can be accessed from the QR code. Local communities, volunteers and disaster prevention and mitigation officer's disaster preparedness knowledge were surveyed before and after using the online map by questionnaires. Sample size were determined using Taro Yamane formula at 95% confident level and error at 0.05, The sample size were 1,488 people from 2,591 (villagers that more than 12 years old). Result showed that villagers' ability, before use online map, were low level ($\bar{X} = 1.62$, S.D. = 1.18), while after using online maps were highest level ($\bar{X} = 4.74$, SD = 0.49). Similarity with volunteers' ability, before use online map, were moderate level ($\bar{X} = 2.48$, S.D. = 1.19) and after using online map were highest level ($\bar{X} = 4.81$, S.D. = 0.28). For the result of disaster prevention and mitigation officers's opinion of map using, before use online map, were moderate level ($\bar{X} = 3.25$, S.D.= 0.48) and after using online map were high level ($\bar{X} = 4.08$, S.D.= 0.82). Moreover, the opinion about online map's utilization after using online map, were the highest level ($\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50). These results showed that disaster prevention and mitigation officers realized that online map can be a spatial database for landslide disaster preparedness in Bo Kluea Nuea subdistrict.

Keywords: Landslide Disaster, Preparedness, Vulnerable household, Online map

1. บทนำ

พื้นที่ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน มีสภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงประมาณร้อยละ 90 เป็นพื้นที่ราบหุบเขาร้อยละ 10 มีความลาดชันร้อยละ 8 – 16 ของพื้นที่ทั้งหมด และเป็นพื้นที่ตั้งของหมู่บ้านตามแนวจากเหนือจดใต้เป็นหอย่อมหมู่บ้าน มีแม่น้ำน่านและแม่น้ำว้าเป็นแม่น้ำสายหลัก ใช้ในการอุปโภคบริโภคและทำการเกษตร มีโครงสร้างประชากรที่ประกอบด้วย ชาย หญิง ผู้สูงอายุ เด็ก คนพิการ ผู้ป่วยติดเตียง และหญิงตั้งครรภ์ ซึ่งจัดเป็นความเปราะบางทางสังคม (มนุษย์) ภายใต้ข้อเท็จจริงที่ว่าลักษณะโครงสร้าง รูปแบบของบ้านเรือนและสภาพเศรษฐกิจนั้นใกล้เคียงกันในทุกหมู่บ้าน ส่วนในด้านมนุษย์นั้นมีความแตกต่างกันด้วยวัย ด้วยสถานภาพในส่วนบุคคลเรื่องการเคลื่อนไหวและการเคลื่อนย้ายลำบากอย่างเห็นได้ชัด

ภัยพิบัติดินถล่มที่ตำบลบ่อเกลือเหนือภัยพิบัติดินถล่มที่ตำบลบ่อเกลือเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2561 ที่ผ่านมาที่บ้านห้วยขาบ หมู่ที่ 7 ซึ่งเป็นหมู่บ้านในหุบเขา ดินถล่มทับบ้านเรือนประชาชน จำนวน 4 หลังคาเรือน มีผู้เสียชีวิต 8 ราย^[2] สร้างความสูญเสียให้แก่ชีวิตและทรัพย์สินเป็นมูลค่าหลายล้านบาทต่อครั้งที่เกิดภัยพิบัติ^[3] ทำให้ประชาชนกว่า 60 ครอบครัว จำนวน 247 คน ต้องอพยพย้ายถิ่นฐานไปอยู่ในพื้นที่ตำบลคงพญา หน่วยป้องกันและพัฒนาป่าไม้บ่อเกลือ ได้จัดสรรที่ดินให้ 176 ไร่ 3 งาน 38 ตารางวา โดยผ่านคณะกรรมการนโยบายที่ดินแห่งชาติ เพื่อให้แต่ละครัวเรือนถือครองกรรมสิทธิ์ได้ถูกต้องตามกฎหมาย โดยหน่วยงานหน่วยป้องกันและพัฒนาป่าไม้บ่อเกลือ^[4] ซึ่งในความคิดเห็นของชาวบ้านในชุมชนไม่มีใครอยากย้ายออกจากถิ่นฐานเดิม เพราะความรักบ้านเกิดถิ่นฐานเดิมและเป็นพื้นที่ทำกินแห่งเดียวของครอบครัว สัตว์เลี้ยงไม่ได้อพยพตามมา เนื่องจากไม่มีพื้นที่ให้แก่สัตว์เลี้ยงของแต่ละครัวเรือน จึงทำให้ทุกวันนี้ชาวบ้านต้องเดินทางออกไปทำกินและดูแลสัตว์เลี้ยงในถิ่นฐานเดิม ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ส่วนผู้ที่ไม่มีรถจักรยานยนต์ใช้ ต้องเดินเท้าไปเป็นระยะทางกว่า 3 กิโลเมตร ซึ่งสร้างความยากลำบากให้แก่ชาวบ้านในเรื่องของการดำรงชีวิตประจำวัน^[5]

ดังนั้น การเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มจึงมีความจำเป็นและมีความสำคัญในการลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติ โดยการศึกษาครั้งนี้เน้นศึกษาทางด้านความเปราะบางทางสังคมรายครัวเรือนโดยเฉพาะกลุ่มประชากรเด็ก ผู้สูงอายุ ผู้พิการ ผู้ป่วยติดเตียง และหญิงตั้งครรภ์ เพื่อลดการสูญเสียชีวิต ซึ่งต้องการความช่วยเหลืออย่างเร่งด่วนจากหน่วยงานที่เข้าช่วยเหลือขณะเกิดภัย ซึ่งความเปราะบางรายครัวเรือนนี้จะช่วยระบุถึงความจำเป็นก่อน – หลัง ได้อย่างชัดเจน

ผู้วิจัยจึงเห็นถึงความสำคัญของการจัดการเพื่อลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติดินถล่ม ในการดำเนินงานและเตรียมความพร้อมเพื่อลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติดินถล่มของส่วนราชการ เจ้าหน้าที่ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับประชาชนในชุมชน เพื่อติดตามและจัดลำดับความสำคัญของการเข้าช่วยเหลือผู้ประสบภัย ในการบรรเทาความเดือดร้อนอย่างเป็นระบบ รวดเร็วและปลอดภัย โดยใช้แผนที่ออนไลน์เพื่อการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มในการปฏิบัติการกิจต่าง ๆ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภูษณิศ มินาเขตร และคณะ. (2557)^[23] ศึกษาคุณภาพและความพึงพอใจของการประยุกต์ใช้ Google My Maps ในการเยี่ยมบ้านของนักศึกษาพยาบาล ชั้นปีที่ 3 ปีการศึกษา 2560 คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยเลือกแบบเจาะจง คือนักศึกษาพยาบาลชั้นปีที่ 3 ที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชาปฏิบัติการพยาบาลอนามัยชุมชน ในภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2560 จำนวน 85 คน โดยใช้แบบสอบถามคุณภาพของการประยุกต์ใช้ Google My Maps ในการเยี่ยมบ้าน และแบบสอบถามความพึงพอใจในการประยุกต์ใช้ Google My Maps ในการเยี่ยมบ้านของนักศึกษาพยาบาล ที่ความเชื่อมั่น 0.96 และ 0.94 วิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละด้าน ผลปรากฏว่า คุณภาพของการประยุกต์ใช้ Google My Maps ในการเยี่ยมบ้านของนักศึกษาพยาบาล อยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.30$, S.D. = 0.47) และทุกด้านอยู่ในระดับมาก ส่วนความพึงพอใจในการประยุกต์ใช้ Google My Maps ในการเยี่ยมบ้านของนักศึกษาพยาบาล อยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.32$, S.D. = 0.52) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แบบสอบถามทั้ง 2 แบบจากงานวิจัยนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเยี่ยมบ้านของนักศึกษาพยาบาลและเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในชุมชน สามารถนำไปใช้ในการวางแผนการให้บริการด้านสุขภาพในระดับปฐมภูมิให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

สายฝน แสงหิรัญ ทองประเสริฐ และชนิษฐา ชูสุข (2558) ^[24] ศึกษากระบวนการจัดการภัยพิบัติร่วมกันระหว่างองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและเครือข่ายองค์กรชุมชน พบว่าองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและองค์กรชุมชนในพื้นที่สามารถทำงานร่วมและเสริมซึ่งกันและกัน ในลักษณะการเป็นเครือข่ายการดำเนินงานในการจัดการภัยพิบัติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ ทั้งองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นและองค์กรชุมชนนอกจากจะมีลักษณะการทำงานเป็นเครือข่ายภายในพื้นที่ของตนเองแล้วยังได้ประสานงานกับองค์กรชุมชน เพื่อให้ความช่วยเหลือผู้ประสบภัย

กันต์ เอี่ยมอินทรา (2558) ^[25] ศึกษาทฤษฎีและแนวคิดของการบริหารจัดการและการรับมือภัยพิบัติในพื้นที่เกาะสมุย จังหวัดสุราษฎร์ธานี ผลปรากฏว่า ช่องว่างประการสำคัญของแผนรับมือภัยพิบัติของเทศบาลนครเกาะสมุย คือ การละเลยการดูแลนักท่องเที่ยวในฐานะผู้ประสบภัย และการขาดตัวชี้วัดในการวัดผลของแผน ซึ่งงานการค้นคว้าอิสระก็ได้ค้นพบและมุ่งตอบสนองในการเพิ่มความสมบูรณ์ให้แก่ เทศบาลนครเกาะสมุย เพื่อความบูรณาการในการดูแลผู้ประสบภัยจากภัยพิบัติในอนาคตต่อไป

นรเทพ ศักดิ์เพชร และคณะ (2559) ^[26] ศึกษาการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนเว็บเชิงพื้นที่เพื่อสนับสนุนการเตือนภัยพิบัติน้ำท่วมเมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยใช้โปรแกรมประยุกต์บนเว็บเชิงพื้นที่สำหรับการทดสอบในพื้นที่โดยการพัฒนาต่อยอดจาก Google Maps API เป็นแกนหลักในการพัฒนาโปรแกรมด้านเชิงพื้นที่ทำให้ระบบมีความถูกต้องและบอกสถานที่ผ่านทาง KML File ที่ได้บันทึกค่าละติจูดและลองจิจูดไว้ในระบบ ทำให้ตำแหน่งของสถานที่ต่าง ๆ มีความถูกต้องและยังมีการแนะนำสถานที่ ข้อมูล จุดเสี่ยงภัยน้ำท่วม และสถานการณ์ต่าง ๆ ไว้ในระบบ ผลปรากฏว่า โปรแกรมสามารถแสดงตำแหน่งของผู้ใช้งานและเก็บข้อมูล ตำแหน่ง พิกัด รูปภาพ และข้อความ รายงานสถานการณ์เชิงพื้นที่แบบเรียลไทม์ ทำให้ผู้ที่สนใจและเห็นประโยชน์สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้

รณณภัทร พันโกฏี (2560) ^[27] ศึกษาการเตรียมความพร้อมขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นจังหวัดกระบี่ จังหวัดพังงาและจังหวัดภูเก็ตในปัจจุบันต่อการรับมือกับสึนามิ ผลการศึกษาพบว่า ด้านการเตรียมความพร้อมในการรับมือกับภัยสึนามิคล้ายคลึงกัน แต่จะมีความแตกต่างกันบ้างในด้านวิธีการในการจัดการตามศักยภาพ ขนาดลักษณะขององค์กรและระดับชื่อเสียงของความเป็นเมืองท่องเที่ยวของแต่ละเมือง

ธนาภรณ์ ปานรังศรี (2561) ^[28] ศึกษาการจัดการข้อมูลภายในองค์กรด้านภัยพิบัติ ได้มีการจัดเก็บข้อมูลพบว่า ข้อมูลเป็นฐานสนับสนุนการตัดสินใจ การวางแผน การติดตาม และการวิเคราะห์ข้อมูลด้านภัยพิบัติในจังหวัดภูเก็ตรวมทั้งแนะนำแนวทางสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติ สามารถสรุปได้ว่า การเตรียมความพร้อมไม่จำเป็นจะเป็นการจัดการหรือการจัดทำเครื่องมือเพื่อช่วยในการแจ้งเตือน การวางแผนและการช่วยเหลือทั้งก่อนเกิดเหตุ ช่วงเกิดเหตุและหลังเกิดเหตุ (ช่วยเหลือและฟื้นฟู) นั้น เป็นวิธีการและเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพต่อการช่วยเหลือผู้ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยและผู้ประสบภัย และงานวิจัยนี้เป็นการจัดทำแผนที่ออนไลน์เพื่อเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ในการเตรียมความพร้อม เพราะในแผนที่ออนไลน์มีตำแหน่งสถานที่ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มในตำบลบ่อเกลือ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนา ^[23] เป็นงานวิจัยประเภทสำรวจ เพื่อการจัดทำแผนที่ออนไลน์เพื่อการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่ม มีขั้นตอนดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูล

1.1 ลงพื้นที่เก็บรวบรวมข้อมูลปฐมภูมิตำแหน่งที่สำคัญต่าง ๆ ได้แก่ ตำแหน่งครัวเรือนที่เปราะบาง จุดวัดปริมาณน้ำฝน จุดรวมพล จุดแจ้งเตือนภัย วัด/สำนักสงฆ์ โรงเรียน ศูนย์พัฒนาเด็กเล็ก โดยใช้เครื่อง GPS และกล้องถ่ายรูป

1.2 เก็บรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่ ข้อมูลจำนวนเด็ก^[9] ผู้สูงอายุ^[10] ผู้พิการ^[11] ผู้ป่วยติดเตียง^[12] และหญิงตั้งครรภ์^[13] สืบหาโดยหน่วยงานพัฒนาชุมชน ตำบลบ่อเกลือเหนือ ปี 2562 โดยลงพื้นที่สำรวจจำนวนกลุ่มเปราะบางอีกครั้ง แล้วปรับแก้ให้เป็นปัจจุบัน และศูนย์พักพิงชั่วคราว สืบหาโดยหน่วยงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อเกลือเหนือ ข้อมูลเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2562 ได้แก่ 1) ศูนย์พักพิงชั่วคราวสำนักสงฆ์บ้านนาถิ่น หมู่ที่ 5 2) สำนักงานองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อเกลือเหนือ 3) ศูนย์พักพิงชั่วคราววัดบ้านบ่อหยวก หมู่ที่ 3 และ 4) ศูนย์ที่พักพิงชั่วคราวสำนักสงฆ์บ้านบ่อหยวกใต้ หมู่ที่ 9 บันทึกพิกัดตำแหน่งพร้อมระบุรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

1) จุดพิกัดสำนักงานองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อเกลือเหนือ หมู่ที่ 5 ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ รองรับผู้อพยพได้ 1,000 คน รับผิดชอบโดยนายกองค์การบริหารส่วนตำบล

2) จุดพิกัดสำนักสงฆ์บ้านนาถิ่น หมู่ที่ 5 ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ รองรับผู้อพยพได้ 500 คน รับผิดชอบโดยผู้ใหญ่บ้าน

3) จุดพิกัดวัดบ้านบ่อหยวก หมู่ที่ 3 ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ รองรับผู้อพยพได้ 500 คน รับผิดชอบโดยผู้ใหญ่บ้าน

4) จุดพิกัดสำนักสงฆ์บ้านบ่อหยวกใต้ หมู่ที่ 9 ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ รองรับผู้อพยพได้ 500 คน รับผิดชอบโดยผู้ใหญ่บ้าน

2 วิเคราะห์ข้อมูล

2.1 วิเคราะห์ระดับความเปราะบางรายครัวเรือน โดยจัดให้ เด็ก ผู้สูงอายุ ผู้พิการ ผู้ป่วยติดเตียง และหญิงตั้งครรภ์ ในกรณีที่มีความเปราะบาง 2 ด้านในคนคนเดียวกันให้นับเป็น 2 และจัดลำดับความสำคัญของแต่ละครัวเรือน โดยหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนเด็ก ผู้สูงอายุ ผู้พิการ ผู้ป่วยติดเตียงและหญิงตั้งครรภ์ รายครัวเรือนต่อจำนวนคนทั้งหมดในครัวเรือน ดังสมการที่ 1

$$V = \frac{Nf}{Nh} \quad (1)$$

โดย V = ความเปราะบางรายครัวเรือน

Nf = จำนวนเด็ก ผู้สูงอายุ ผู้พิการ ผู้ป่วยติดเตียง และหญิงตั้งครรภ์ รายครัวเรือน (คน)

Nh = จำนวนคนทั้งหมดในครัวเรือน (คน)

จัดลำดับเริ่มจากความเปราะบางต่ำ (ค่าศูนย์) ไปหาความเปราะบางสูง (ค่า V ที่เพิ่มขึ้น) (อนุสรณ์ โพธิ์ศรี)^[30]

โดยค่า $V = 0.60$ ขึ้นไป คือ ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับสูง

$V = 0.50 - 0.59$ คือ ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับปานกลาง

$V = 0.00 - 0.49$ คือ ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับต่ำ

2.2 นำเข้าข้อมูลตำแหน่งสำคัญต่าง ๆ และความเปราะบางรายครัวเรือน ใช้โปรแกรม QGIS และ Google map พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งต่างๆ โดยปรับจุดที่ได้จาก GPS ให้ตรงกับแผนที่ฐานของกูเกิ้ล (Google satellite base map)

2.3 คำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดโดยใช้ Google map เริ่มเดินทางโดยรถยนต์จากที่ว่าการอำเภอ บ่อเกลือจนถึงทางเข้าของแต่ละหมู่บ้าน พร้อมบันทึกผล เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการเดินทางเข้าช่วยเหลือ

2.4 นำเสนอข้อมูลผ่าน Google Map และ สร้าง QR code แพร่เฉพาะกลุ่ม แผนที่ออนไลน์นี้ จะมีรายละเอียดและอีเมลของผู้จัดทำแผนที่ รับฟังความคิดเห็นจากผู้ที่สามารถเข้าใช้งานแผนที่ เพื่อที่จะนำมา ประเมินผลความถูกต้องของการใช้ข้อมูลต่อไป

2.5 วิเคราะห์ผลการประเมินก่อนใช้และหลังใช้ประโยชน์จากแผนที่ออนไลน์

ประเมินความสามารถในการใช้แผนที่ออนไลน์ เพื่อการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่ม ในตำบลบ่อเกลือ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน ดังนี้

2.5.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ประชากรในตำบลบ่อเกลือ เหนือ (10 หมู่บ้าน) ที่มีอายุมากกว่า 12 ปีขึ้นไป จำนวนทั้งหมด 2,591 คน โดยเลือกแบบเจาะจง ^[23] (purposive sampling) ศึกษาสุ่มกลุ่มตัวอย่างที่ละหมู่บ้าน โดยแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ประชาชนในชุมชน จิตอาสา ทำแบบประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ก่อนใช้และหลังใช้ ส่วนเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย ทำแบบประเมินความคิดเห็นในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ Google Map (ก่อน – หลัง) โดยทำการสุ่มกลุ่มตัวอย่างของประชากรที่อายุมากกว่า 12 ปีขึ้นไป จากประชากรในแต่ละหมู่บ้านโดยใช้สูตรทาร์โรว์ ยามาเน่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความคลาดเคลื่อน 0.05 เพื่อนำมาวิเคราะห์โดยใช้วิธีเชิงคุณภาพ ดำเนินการดังต่อไปนี้

2.5.2 สุ่มตัวอย่างประชากรตามสูตรทาร์โรว์ ยามาเน่ ดังสมการที่ 2

$$n = \frac{N}{1 + (Ne^2)} \quad (2)$$

โดยที่ n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

N = ขนาดของประชากรอายุมากกว่า 12 ปีขึ้นไป ในแต่ละหมู่บ้าน

e = ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้ คือ 0.05

2.5.3 เมื่อได้จำนวนของกลุ่มตัวอย่างประชากรที่ต้องการในแต่ละหมู่บ้านแล้ว ให้ทำการ แจกแบบประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ (ก่อน-หลัง) เรื่อง การใช้แผนที่ออนไลน์เพื่อการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มในตำบลบ่อเกลือเหนือ โดยกระจายให้ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างให้ทั่วทุกกลุ่มบ้านในหมู่บ้านนั้น ๆ เพื่อเลี้ยงการกระจุกตัวของแบบประเมิน

2.5.4 หลังจากกลุ่มตัวอย่างได้ทำแบบประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ แล้วจึงเพิ่มเติมด้วยคำถามของจิตอาสา (จำนวน 3 ข้อ) คือ 1) แผนที่ออนไลน์มีประโยชน์ต่อท่านและผู้อื่นหรือไม่ 2) ท่านคิดว่าจะนำแผนที่ออนไลน์ ไปใช้หรือสอนให้ผู้อื่นต่อไปหรือไม่ และ 3) ท่านเห็นถึงความจำเป็นของแผนที่ออนไลน์ มากน้อยเพียงใด ในกรณีที่มีความประสงค์เข้าร่วมเป็นจิตอาสา

2.5.5 ในส่วนของเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยตำบลตำบล ให้ทำแบบประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ ทุกคน (จำนวน 4 คน)

2.5.6 นำแบบประเมินความสามารถหลังใช้งานแผนที่ออนไลน์ โดยสอบถามบุคคลชุดเดียวกันกับที่ทำแบบประเมินก่อนใช้แผนที่ออนไลน์

2.5.7 นำข้อมูลจากแบบประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ กำหนดเกณฑ์การแปลผลค่าเฉลี่ยแบบสอบถามความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ แบ่งเป็น 5 ระดับ โดยประยุกต์จาก บุญชม ศรีสะอาด^[31] ดังนี้

คะแนนเฉลี่ย 4.50 - 5.00	หมายถึง ระดับความสามารถมากที่สุด
คะแนนเฉลี่ย 3.50 - 4.49	หมายถึง ระดับความสามารถมาก
คะแนนเฉลี่ย 2.50 - 3.49	หมายถึง ระดับความสามารถปานกลาง
คะแนนเฉลี่ย 1.50 - 2.49	หมายถึง ระดับความสามารถน้อย
คะแนนเฉลี่ย 0.00 - 1.49	หมายถึง ระดับความสามารถน้อยที่สุด

4. ผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้จัดทำแผนที่ภูมิประเทศและที่ตั้งหมู่บ้านและแผนที่ความเปราะบางรายครัวเรือนทั้ง 10 หมู่บ้านในตำบลบ่อเกลือเหนือ เพื่อให้เห็นเส้นทางเข้า – ออกของแต่ละหมู่บ้าน บ้านที่มีความเปราะบางรายครัวเรือนในแต่ละระดับ เช่น ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับสูง (ตำแหน่งบ้านสีแดง) ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับปานกลาง (ตำแหน่งบ้านสีเหลือง) และความเปราะบางรายครัวเรือนระดับต่ำ (ตำแหน่งบ้านสีเขียว) แล้วนำข้อมูลเหล่านี้แสดงผ่าน Google map และสร้าง QR code เพื่อให้ประชาชนในชุมชนจิตอาสา และเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยตำบลในตำบลบ่อเกลือเหนือได้นำไปใช้ประโยชน์ หลังจากนั้นจึงได้ทำการประเมินก่อนและหลังใช้แผนที่ออนไลน์เพื่อเพิ่มศักยภาพในการรับมือภัยพิบัติดินถล่ม ได้ผลดังนี้

1. แผนที่ภูมิประเทศและที่ตั้งหมู่บ้าน ตำบลบ่อเกลือเหนือ

จากการศึกษา พบว่าพื้นที่ตั้งของหมู่บ้านในตำบลบ่อเกลือเหนือจะตั้งตามแนวจากเหนือจดใต้ เป็นห้อยหมู่บ้านจำนวน 10 หมู่บ้าน มีถนนทางหลวงหมายเลข 1081 เป็นถนนสายหลักใช้ในการคมนาคมระหว่างอำเภอและการสัญจรระหว่างตำบล ซึ่งมีหมู่บ้านที่ตั้งอยู่ติดกับถนนทางหลวงหมายเลข 1081 ดังภาพที่ 1 ได้แก่ หมู่ 1 หมู่ 3 หมู่ 5 หมู่ 9 และหมู่ 10 หมู่บ้านที่ตั้งอยู่ห่างจากถนนทางหลวงหมายเลข 1081 ได้แก่ หมู่ 2 อยู่ห่างประมาณ 2 – 6 กิโลเมตร หมู่ 4 อยู่ห่างประมาณ 4 – 6 กิโลเมตร หมู่ 6 อยู่ห่างประมาณ 3.5 – 6 กิโลเมตร และหมู่ 8 อยู่ห่างประมาณ 4 – 8 กิโลเมตร ถนนส่วนใหญ่จะเป็นถนนลูกรัง ส่วนหมู่ 7 (บ้านห้วยขาบ) ได้อพยพย้ายถิ่นฐานไปตั้งหมู่บ้านอยู่ในตำบลดงพญา อำเภอบ่อเกลือ เมื่อปี พ.ศ. 2562^[2]



ภาพที่ 1 แผนที่ภูมิประเทศและที่ตั้งหมู่บ้าน ตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ

2. ความแปรปรวนรายครัวเรือน

จากการศึกษาวิจัย พบว่า หมู่ 10 (บ้านสะละ) หมู่ 4 (บ้านน้ำจุน) และหมู่ 2 (บ้านสะไล) มีเปอร์เซ็นต์ ครัวเรือนที่แปรปรวนมากที่สุด คือ 50.00%, 36.36% และ 36.18% ตามลำดับ และพบว่า หมู่ 3 (บ้านบ่อหยวก) หมู่ 9 (บ้านบ่อหยวกใต้) และ หมู่ 11 (บ้านห้วยขาก) มีเปอร์เซ็นต์ครัวเรือนที่มีความแปรปรวนระดับสูง คือ 45.45%, 36.00% และ 35.00% ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

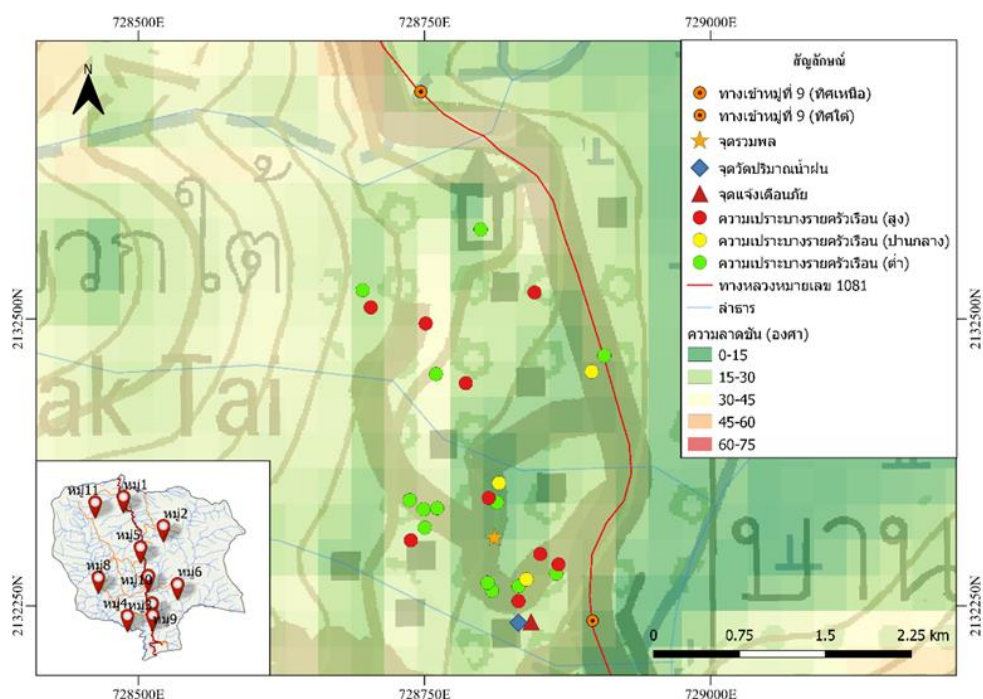
ตารางที่ 1 แสดงระยะทางจากที่ว่าการอำเภอบ่อเกลือถึงหมู่บ้าน จำนวนครัวเรือน จำนวนครัวเรือนที่แปรปรวน จำนวนครัวเรือนที่แปรปรวนในแต่ละระดับ

หมู่ ที่	ชื่อบ้าน	ระยะทาง จากที่ว่าการ อำเภอบ่อเกลือ ถึงหมู่บ้าน (กิโลเมตร)	จำนวน ครัวเรือน (ครัวเรือน)	จำนวน ครัวเรือนที่ แปรปรวน (ครัวเรือน)	เปอร์เซ็นต์ ครัวเรือนที่ แปรปรวน (ครัวเรือน)	จำนวนครัวเรือนที่แปรปรวน ในแต่ละระดับ (ครัวเรือน)		
						สูง	ปานกลาง	ต่ำ
1	ขุนน้ำน่าน	44	134	42	31.34	14(33.33%)	13(30.95%)	15(35.71%)
2	สะไล	43	152	55	36.18	9(16.36%)	8(14.54%)	38(69.09%)
3	บ่อหยวก	35	38	11	28.94	5(45.45%)	1(9.09%)	5(45.45%)

4	น้ำจุน	37	88	32	36.36	5(15.62%)	7(21.87%)	18(56.25%)
5	นากีน	40	65	15	23.07	5(33.33%)	4(26.66%)	7(46.66%)
6	น้ำว่า	44	42	12	28.57	2(16.66%)	5(41.66%)	5(41.66%)
8	ห้วยป้อ	40	83	13	15.66	3(23.07%)	3(23.07%)	7(53.84%)
9	บ่อหยวกใต้	32	83	25	30.12	9(36.00%)	3(12.00%)	12(48.00%)
10	สะละ	36	114	57	50.00	17(29.82%)	6(10.52%)	34(59.64%)
11	ห้วยขวาก	47	133	20	15.00	7(35.00%)	5(25.00%)	8(40.00%)
รวม			932	287	30.79	77(26.82%)	55(19.16%)	155(54.00%)

3. นำเสนอข้อมูลผ่าน Google Maps และ สร้าง QR code

แผนที่ออนไลน์ แสดงตำแหน่งครัวเรือน ได้แก่ ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับสูง (สีแดง) ความเปราะบางรายครัวเรือนระดับปานกลาง (สีเหลือง) และความเปราะบางรายครัวเรือนระดับต่ำ (สีเขียว) โดยมีเกณฑ์การแบ่งจากการคำนวณในสมการที่ 1 ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนที่แสดงตำแหน่งครัวเรือนที่มีความเปราะบางระดับสูง (สีแดง) ระดับปานกลาง (สีเหลือง) และระดับต่ำ (สีเขียว) จุดรวมพล จุดแจ้งเตือนภัย จุดวัดปริมาณน้ำฝน จุดทางเข้าหมู่บ้านทิศเหนือและทิศใต้ของหมู่ 9 (บ้านบ่อหยวกใต้)

นอกจากนั้นการเดินทางไปยังจุดสำคัญต่าง ๆ ในแต่ละหมู่บ้านเพื่อการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่ม เช่น จุดรวมพล จุดแจ้งเตือนภัย จุดวัดปริมาณน้ำฝน และจุดศูนย์พักพิงชั่วคราว สามารถเข้าถึงได้โดยการสแกนคิวอาร์โค้ด ดังภาพที่ 3



แผนที่ออนไลน์

กลุ่มเปราะบาง
รายครัวเรือนระดับสูง

จุดศูนย์พักพิงชั่วคราว



จตุรรวมพล



จุดแจ้งเตือนภัย



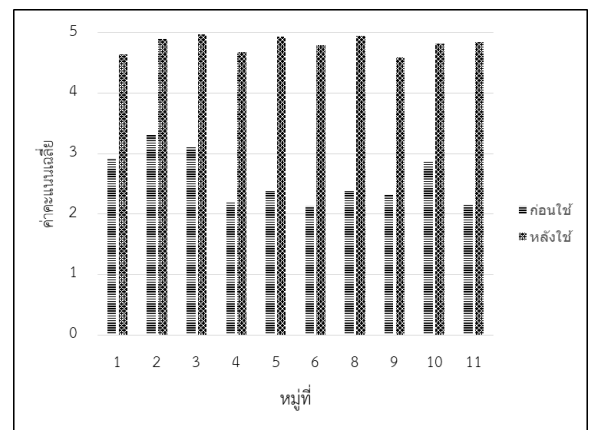
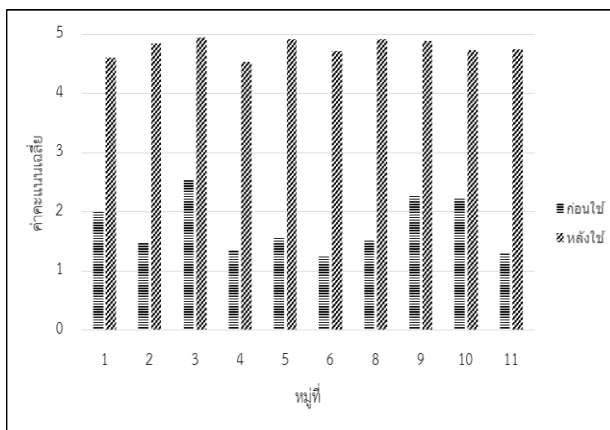
จุดวัดปริมาณน้ำฝน

ภาพที่ 3 คิวอาร์โค้ดแผนที่ออนไลน์ กลุ่มเปราะบางรายครัวเรือนระดับสูง จุดศูนย์พักพิงชั่วคราว จตุรรวมพล
จุดแจ้งเตือนภัย และจุดวัดปริมาณน้ำฝน

4. ผลการทำแบบประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ก่อนและหลังใช้ของประชาชนในชุมชน
จิตอาสา และเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยตำบล

4.1 ความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ก่อนและหลังใช้ของประชาชนในชุมชน และจิตอาสา
ได้ผลดังนี้

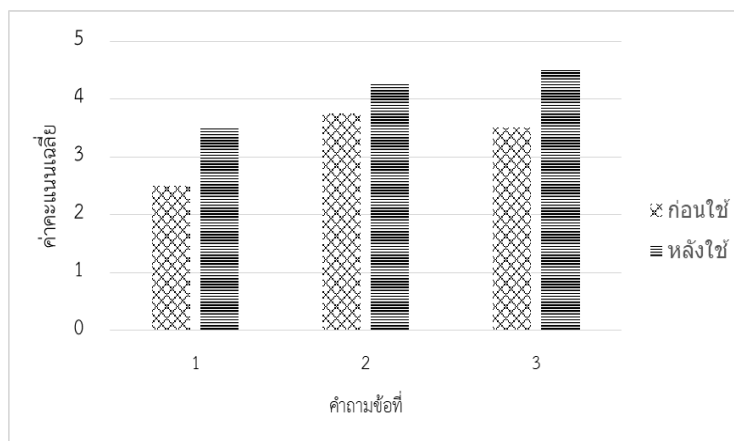
ประชาชนในชุมชนก่อนใช้ พบว่า ความสามารถในการใช้แผนที่ออนไลน์ อยู่ในเกณฑ์ระดับน้อย
($\bar{X} = 1.62$, S.D. = 1.18) หลังใช้อยู่ในเกณฑ์ระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.74$, S.D. = 0.49) จิตอาสา ก่อนใช้ พบว่า อยู่ใน
ระดับปานกลาง ($\bar{X} = 2.48$, S.D. = 1.19) และหลังใช้ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.81$, S.D. = 0.28) ดังภาพ ที่ 4



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบคะแนนการประเมินความสามารถก่อนและหลังใช้งานแผนที่ออนไลน์ของประชาชนในชุมชน
และจิตอาสาของแต่ละหมู่บ้าน (10 หมู่บ้าน)

4.2 ประเมินความคิดเห็นต่อการนำแผนที่ออนไลน์มาใช้ประโยชน์ก่อนใช้และหลังใช้ของเจ้าหน้าที่ป้องกัน
และบรรเทาสาธารณภัยตำบล ได้ผลดังนี้

การประเมินความคิดเห็นในการนำแผนที่ออนไลน์มาใช้ประโยชน์ก่อนใช้และหลังใช้สำหรับเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยไม่ต้องสวมตัวอย่าง เนื่องจากมีเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยตำบลองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อเกลือเหนือประจำอยู่ 1 คน ร่วมกับทีมกู้ชีพกู้ภัยอีก 3 คน รวมเป็น 4 คน พบว่า ก่อนใช้อยู่ในเกณฑ์ระดับปานกลาง ($\bar{X} = 3.25$, S.D.= 0.48) ส่วนหลังใช้อยู่ในเกณฑ์ระดับมาก ($\bar{X} = 4.08$, S.D.= 0.82) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปรียบเทียบคะแนนการประเมินมีความคิดเห็นต่อการนำแผนที่ออนไลน์มาใช้ประโยชน์ของเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อเกลือเหนือรายข้อ

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

1 อภิปรายผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ศึกษาความเปราะบางรายครัวเรือนเพื่อเตรียมความพร้อมในการรับมือภัยพิบัติดินถล่มในตำบลบ่อเกลือเหนือ อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน จากการสำรวจประชากรในแต่ละหมู่บ้าน (10 หมู่บ้าน) พบว่า หมู่บ้านที่มีเปอร์เซ็นต์ครัวเรือนที่เปราะบางเรียงจากมากไปน้อย คือ หมู่ 10 (บ้านสะละ) คิดเป็นร้อยละ 50.00 ของจำนวนครัวเรือนทั้งหมด รองลงมา ได้แก่ หมู่ 4 (น้ำจุน) ร้อยละ 36.36 และหมู่ 2 (บ้านสะโล) ร้อยละ 36.18 และหมู่บ้านที่มีเปอร์เซ็นต์ครัวเรือนที่มีความเปราะบางระดับสูงเรียงจากมากไปน้อย คือ หมู่ 3 (บ้านบ่อหยวก) คิดเป็นร้อยละ 45.50 (5 ครัวเรือนจาก 11 ครัวเรือนที่เปราะบาง) เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่เป็นเด็กและผู้สูงอายุ คิดเป็นร้อยละ 50.00 ซึ่งมากกว่าหมู่บ้านต่าง ๆ รองลงมา คือ หมู่ 9 (บ้านบ่อหยวกใต้) คิดเป็นร้อยละ 36.00 (9 ครัวเรือนจาก 25 ครัวเรือนที่เปราะบาง) และหมู่ที่ 11 (บ้านห้วยขวก) คิดเป็นร้อยละ 35.00 (7 ครัวเรือนจาก 20 ครัวเรือนที่เปราะบาง) และจากการสำรวจระยะทางจากที่ว่าการอำเภอบ่อเกลือถึงหมู่บ้านต่าง ๆ พบว่า หมู่ 11 (บ้านห้วยขวก) อยู่ห่างไกลมากที่สุดเป็นระยะทาง 47 กิโลเมตร รองลงมา คือ หมู่ 1 (บ้านขุนน้ำน่าน) และหมู่ 6 (บ้านน้ำว้า) เป็นระยะทาง 44 กิโลเมตร หมู่บ้านที่ตั้งห่างจากถนนทางหลวงหมายเลข 1081 นั้น จัดเป็นหมู่บ้านที่การเดินทางเข้าถึงได้ยากต้องใช้รถจักรยานยนต์และรถปิกอัพยกสูงเท่านั้น เนื่องจากถนนเป็นทางลูกรังและมีความลาดชันสูง ชาวบ้านส่วนใหญ่จะใช้รถจักรยานยนต์ในการสัญจร ซึ่งได้แก่ หมู่ 2 หมู่ 4 หมู่ 6 หมู่ 8 หมู่ 11 ดังนั้น ควรมีการจัดการวางแผนในการเตรียมยานพาหนะให้เหมาะสมในการเข้าช่วยเหลือ

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการประเมินความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ก่อนใช้และหลังใช้ ในส่วนของประชาชนในชุมชนทุกหมู่บ้าน (10 หมู่บ้าน) พบว่า ก่อนใช้ ความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ อยู่ในระดับน้อย ($\bar{X} = 1.62$, S.D. = 1.18) ประชาชนในชุมชนส่วนใหญ่ยังไม่รู้ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เป็นข้อมูลในแผนที่หลังใช้ความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.74$, S.D. = 0.49) จะเห็นว่าประชาชนส่วนใหญ่รู้ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เป็นข้อมูลในแผนที่ออนไลน์เพิ่มมากขึ้น และยังพบว่าก่อนใช้แผนที่ออนไลน์นั้น หมู่ที่ 3 (บ้านบ่อหยวก) มีความสามารถอยู่ในระดับปานกลาง ($\bar{X} = 4.72$, S.D. = 0.41) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าหมู่บ้านอื่น ๆ เนื่องจากเป็นหมู่บ้านที่ตั้งอยู่ติดกับถนนทางหลวงและมีจำนวนครัวเรือนน้อยที่สุด (38 ครัวเรือน) สะดวกในเรื่องการรับข่าวสาร เพราะมีศูนย์รวมแหล่งเรียนรู้ต่าง ๆ ประจำตำบล เช่น โรงเรียนระดับประถมศึกษาขนาดกลาง และวิทยาลัยเทคนิคปัว (สาขา) เป็นต้น

จิตอาสา ซึ่งเป็นกลุ่มตัวอย่างจากประชาชนในชุมชนที่มีความประสงค์ร่วมเป็นจิตอาสาในการเฝ้าระวังภัยพิบัติดินถล่มในตำบลคิดเป็น 80% ของประชากรที่สุ่มทั้งหมด 10 หมู่บ้าน พบว่า ก่อนใช้ ความสามารถในการใช้งานแผนที่ออนไลน์ อยู่ในระดับปานกลาง ($\bar{X} = 2.48$, S.D. = 1.19) หลังใช้ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.81$, S.D. = 0.28) ซึ่งจัดได้ว่ามีค่าเฉลี่ยที่สูงกว่ากลุ่มอื่น ๆ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในระดับต่ำเนื่องจากส่วนใหญ่เป็นกลุ่มคนที่เป็จิตอาสาพระราชทานและเป็นกลุ่มผู้นำหมู่บ้าน ซึ่งเป็นตัวแทนของประชาชนในชุมชนในการเข้าร่วมกิจกรรมต่าง ๆ อย่างสม่ำเสมอ เช่น เป็นตัวแทนในการฝึกอบรมสาธารณสุขที่ทางจังหวัด อำเภอ หรือ องค์การบริหารส่วนท้องถิ่นจัดขึ้น เป็นต้น

เจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย พบว่า ก่อนใช้ ความคิดเห็นในการใช้งานแผนที่ออนไลน์อยู่ในระดับปานกลาง ($\bar{X} = 3.25$, S.D. = 0.48) และหลังใช้อยู่ในระดับมาก ($\bar{X} = 4.08$, S.D. = 0.82) โดยเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ ข้อ 1 เจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยให้ความคิดเห็นต่อการมีแผนที่ไว้ใช้ มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าข้ออื่น ๆ ($\bar{X} = 2.50$, S.D. = 0.50) ซึ่งอาจเป็นเพราะว่ามีความกังวลในการที่จะนำแผนที่ออนไลน์มาใช้ ซึ่งอาจเจอข้อจำกัดหรือมีวิธีการใช้ที่ยุ่งยากต่อการฝึกอบรม และข้อที่ 3 พบว่า หลังใช้แผนที่ออนไลน์เจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยมีความคิดเห็นต่อการนำแผนที่ออนไลน์ไปใช้ประโยชน์ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.50$, S.D. = 0.50) แสดงให้เห็นว่าเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยได้เล็งเห็นถึงประโยชน์และการนำไปประยุกต์ใช้ของแผนที่ออนไลน์ในการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติได้ในอนาคต

2. สรุปผลการวิจัย

ประชาชนในชุมชน จิตอาสาและเจ้าหน้าที่ป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย สามารถนำแผนที่ออนไลน์ไปใช้เป็นฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ในการช่วยเพิ่มศักยภาพในการเตรียมความพร้อมรับมือภัยพิบัติดินถล่มในตำบลบ่อเกลือเหนือได้

3. ข้อเสนอแนะการวิจัย

3.1 ควรมีผู้รับผิดชอบและดูแลฐานข้อมูลของแผนที่ออนไลน์ ประจำตำบลที่สามารถอัปเดตข้อมูล และรับฟังความคิดเห็นของผู้ใช้อื่นๆจากการแชร์เฉพาะกลุ่ม เพื่อมาปรับปรุงแผนที่ให้เป็นปัจจุบันและถูกต้องมากยิ่งขึ้นเพื่อนำไปใช้ต่อไป

3.2 ควรนำข้อมูลการประเมินความเปราะบางรายครัวเรือนนี้ไปใช้ร่วมกับการประเมินภัย ความ ล่อแหลมและศักยภาพในการรับมือกับภัยพิบัติ เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงและการจัดการลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติ ต่าง ๆ ต่อไปในอนาคต

3.3 ควรมีขอบเขตหมู่บ้านให้ชัดเจนเพื่อเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องจะได้วางแผนเข้าช่วยเหลือแต่ละหมู่บ้านได้ อย่างรวดเร็ว

5. คำขอบคุณ

ขอแสดงความขอบคุณต่อ ผศ.ดร.จุฑาธิณี ธัญปรางนิติกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.บัณฑิต อนรรักษ์ และ อาจารย์ ดร.ปณิตตา ตันวัฒนะ ที่ได้ให้ความรู้พร้อมทั้งข้อคิด คำปรึกษา คำแนะนำและชี้แนะแนวทางการคิด ตลอดถึงตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องในการศึกษาและสิ่งสำคัญที่สุดอาจารย์ได้ให้ข้อคิด คติเตือนใจและยังเป็น แบบอย่างที่ดีในการเสียสละตนเพื่อประโยชน์ของการศึกษา และอาจารย์ทุก ๆ ท่าน ในภาควิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม ตลอดจนเพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาทุกคน เจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้กำลังใจและ อำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ จึงทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สำเร็จไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [2] ข่าวสด.2561.บ่อเกลือร้อน! สั่งอพยพชาวบ้านหลังดินถล่มทับชาวบ้าน 7 ศพ ยังไม่พบร่างอีก 1 ราย. สืบค้นเมื่อ 26 เมษายน 2562. จาก https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_1383945
- [3] สำนักปลัด. (2562). **แผนปฏิบัติการในการป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยองค์การบริหารส่วนตำบลบ่อเกลือเหนือ**. งานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. น่าน
- [4] กรมป่าไม้. หน่วยป้องกันและพัฒนาป่าไม้บ่อเกลือ. 2562. เลขที่ 126. หนังสืออนุญาตให้เข้าทำประโยชน์หรืออยู่อาศัยในเขตป่าสงวนแห่งชาติ.
- [5] สมศักดิ์ ใจปิง, ผู้ให้สัมภาษณ์, 15 ตุลาคม 2562.
- [9] สำนักคณะกรรมการศึกษาขั้นพื้นฐาน. 2556. **แนวทางการดำเนินงานรับนักเรียนสังกัดสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน**. กรุงเทพมหานคร. กระทรวงศึกษาธิการ.
- [10] กระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์. 2553. **กำหนดเกณฑ์ตามพระราชบัญญัติผู้สูงอายุ พ.ศ. 2546 ฉบับแก้ไข พ.ศ. 2553**. กรุงเทพมหานคร.
- [11] วชิร ศิริ. **ความหมายคนพิการ**. สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2562. จาก: <http://www.satun.m-society.go.th/>
- [12] ดือรามัน บินสะมะแอ และคณะ. **ระบบข้อมูลผู้ป่วยติดเตียง**. สืบค้นเมื่อ 19 ธันวาคม 2562. จาก http://k4ds.psu.ac.th/dhssouth/download/files/DHIS/DHIS_3/
- [13] อรพิน จิตคุณธรรมกุล และคณะ. **การกำหนดอายุครรภ์**, 2557 สืบค้นจาก [https://w1.med.cmu.ac.th/obgyn/index.\)](https://w1.med.cmu.ac.th/obgyn/index.)
- [23] ภูษณิศรา มีนาเขตร. (2562). การประเมินคุณภาพของการประยุกต์ใช้ Google My Maps ในการเยี่ยมชมบ้านของนักศึกษาศึกษาพยาบาล. คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ม.ป.ป. 51 – 63.
- [24] สายฝน แสงศิริธร ทองประเสริฐและชนิษฐา ชุสุช. (2558). **การจัดการภัยพิบัติขององค์กรปกครองส่วน**

ท้องถิ่นและเครือข่ายองค์กรชุมชน, วารสารการบริหารท้องถิ่น. 8(4), 113 – 123.

- [25] กันต์ เลี่ยมอินทรา. (2558). แผนรับมือภัยพิบัติ เทศบาลนครเกาะสมุย, (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).
- [26] นรเทพ ศักดิ์เพชร และคณะ (2559). การพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนเว็บเชิงพื้นที่เพื่อสนับสนุนการเตือนภัยพิบัติน้ำท่วม เมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. วารสารการศึกษา. มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์. 11(2). 102 – 116.
- [27] รณณภัทร พันโกฏี. (2560). การจัดการภัยพิบัติลิมาในเมืองท่องเที่ยวภาคใต้ฝั่งทะเลอันดามัน : ศึกษาเปรียบเทียบองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นในพื้นที่เสี่ยงภัย, (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์).
- [28] ธนาภรณ์ ปานรังศรี. (2561). การจัดการข้อมูลภัยพิบัติด้วยระบบธุรกิจอัจฉริยะ : กรณีศึกษาผลกระทบระดับความรุนแรงจากภัยแล้ง อุทกภัย และดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต, (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์).
- [30] อนุสรณ์ โพธิ์ศรี และผกามาศ ถิ่นพั่งงาน. (ม.ป.ป.). ความเปราะบางต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. สืบค้นเมื่อ วันที่ 21 ธันวาคม 2563 จาก <http://www.tei.or.th/thaicityclimate/public/research-45.pdf>
- [31] บุญชม ศรีสะอาด. (2550). ทิศทางและพื้นที่ของการประเมินผล. พิมพ์ครั้งที่ 2. วีพริ้นท์. กรุงเทพมหานคร.

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบจากมันฝรั่งต้มที่เหลือในกระบวนการเพาะเลี้ยงเชื้อเห็ด

THE DEVELOPMENT OF CRISPY SNACK FROM BOILED POTATOES REMAIN IN
CORDYCEPS MILITARIS CULTURE PROCESSINGพิชญ์ ตั้งสมบัติวิจิตร^{1*}, กานดาวดี โนชัย¹, ดารานัย รบเมือง¹, อุทาน บูรณศักดิ์ศรี²Pitchya Tangsombatvichit^{1*}, Kandawadee Nochai¹, Daranai Robmuang¹, Utharn Buranasaksee²¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ² สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

*Corresponding Author email: chalineebct@gmail.com

บทคัดย่อ

มันฝรั่งต้มเป็นวัตถุดิบหนึ่งในกระบวนการเพาะเลี้ยงเชื้อเห็ด โดยนำต้มมันฝรั่งใช้ในการเตรียมอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงเชื้อ ดังนั้นมันฝรั่งต้มจึงเป็นของเหลือทิ้งในกระบวนการ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือนำมันฝรั่งต้มมาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบ เพื่อเพิ่มมูลค่าและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เริ่มต้นด้วยมันฝรั่งต้มถูกนำไปตรวจสอบคุณค่าของสารอาหาร ผลการทดลองพบว่า มันฝรั่งต้มมีโปรตีน 2.06 ± 0.09 กรัม/100กรัม คาร์โบไฮเดรต 14.81 ± 0.33 กรัม/100กรัม ไขมัน 0.07 ± 0.03 กรัม/100กรัม พลังงานจากไขมัน 0.41 ± 0.05 กิโลแคลอรี/100กรัม พลังงานทั้งหมด 66.54 ± 0.85 กิโลแคลอรี/100กรัม และใยอาหาร 1.99 ± 0.10 กรัม/100กรัม จากนั้นมันฝรั่งต้มถูกนำมาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบ ผลการทดลองพบว่า ข้าวเกรียบสูตรที่ 3 คือ มีอัตราส่วนของมันฝรั่งต้ม : แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 1:1 เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุด ข้าวเกรียบสูตรที่ 3 มีปริมาณโปรตีนสูงถึง 2 เปอร์เซ็นต์ และใยอาหารสูงถึง 4 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นข้าวเกรียบจากมันฝรั่งต้มในการทดลองนี้ สามารถเป็นอาหารว่างทางเลือกสำหรับผู้บริโภค การทดลองนี้ยังช่วยลดมันฝรั่งต้มที่เหลือเป็นการจัดการขยะเป็นศูนย์ในกระบวนการเพาะเลี้ยงเชื้อเห็ดด้วย

คำสำคัญ: ข้าวเกรียบ มันฝรั่งต้ม การเพาะเลี้ยงเชื้อเห็ด

ABSTRACT

Boiled potatoes are one of the materials for *Cordyceps militaris* culture processing that water of boiled potatoes was used in *Cordyceps militaris* culture medium preparation. Hence, boiled potatoes were waste in this process. The objective of this experiment was to utilize boiled

วันที่รับบทความ 2 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 14 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 22 มีนาคม 2564

potatoes to make a crispy snack, added value and quality of nutrient value. Start with boiled potatoes was investigated nutrient content. The results showed that boiled potatoes had protein 2.06 ± 0.09 g/100g, carbohydrate 14.81 ± 0.33 g/100g, fat 0.07 ± 0.03 g/100g, Calories from fat 0.41 ± 0.05 Kcal/100g, Calories 66.54 ± 0.85 Kcal/100g and dietary fiber 1.99 ± 0.10 g/100g. After that boiled potatoes were made a crispy snack. For most consumer acceptance, the results indicated that crispy snack treatment of 3 had the ratio of boiled potatoes to cassava starch as 1:1. This crispy snack treatment of 3 shown high protein content as 2% and dietary fiber as 4%. Therefore, crispy boiled potatoes snack in this experiment could be an alternative snack for consumers. This experiment also reduces boiled potatoes waste as zero waste management in *Cordyceps militaris* culture processing.

Keywords: Crispy snack, Boiled potatoes, *Cordyceps militaris* culture

1. บทนำ

ถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps militaris*) ในประเทศไทยนิยมเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทองและมีการศึกษาสารออกฤทธิ์อย่างกว้างขวาง สารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา สารสำคัญทางชีวภาพที่หลากหลายและเป็นประโยชน์ในการรักษาโรคหลายชนิด ซึ่งสารสำคัญที่พบได้แก่ สารกลุ่มที่มีฤทธิ์ยับยั้งการอักเสบ (anti-inflammatory) คือ คอร์ดิเซปิน (cordycepin) และ อะดีโนซีน (adenosine) สารกลุ่มนี้ยังมีคุณสมบัติช่วยลดอัตราการเกิดเนื้องอก หรือยับยั้งการเกิดมะเร็ง (anti-cancer) รวมทั้งช่วยต้านอนุมูลอิสระ (anti-oxidant) ช่วยชะลอความชรา (anti-aging) ด้วยคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายของถั่งเช่าสีทอง ทำให้ถั่งเช่าชนิดนี้เป็นที่น่าสนใจในการเพาะเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ และออกวางจำหน่ายในรูปแบบผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ ในประเทศไทยการผลิตและจำหน่ายถั่งเช่าที่ขายในรูปแบบผลิตภัณฑ์ถั่งเช่าสีทองอบแห้งและผงในแคปซูล โดยมีราคาอยู่ที่กิโลกรัมละ 10,000 บาท [3] ในกระบวนการเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง ขั้นตอนการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยง ต้องใช้มันฝรั่งต้ม นำส่วนของน้ำต้มไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารเพาะเลี้ยง ดังนั้นจึงมีมันฝรั่งต้มสุกเหลือเป็นปริมาณมาก ซึ่งมันฝรั่งเป็นอาหารที่ให้พลังงานในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับอาหารที่ทำจากแป้งประเภทอื่น เนื่องจากแป้งมันฝรั่งเป็นแป้งชนิดที่ทนต่อการถูกย่อยได้ในกระเพาะอาหาร (resistant starch) ยังมีเยื่อใย (fiber) สูง รวมทั้ง มีวิตามินซี วิตามินบี6 แคลเซียม และโฟเลตสูง

ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงสนใจนำมันฝรั่งต้มที่เหลือจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง มาแปรรูปเป็นข้าวเกรียบ เพื่อเพิ่มมูลค่าของส่วนเหลือทิ้งจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถั่งเช่าสีทอง ข้าวเกรียบเป็นขนมขบเคี้ยวที่เป็นที่นิยมของบุคคลทุกเพศทุกวัย จัดเป็นอาหารว่าง และหาซื้อเป็นของฝากได้ง่าย แต่เดิมข้าวเกรียบมีวัตถุดิบหลักในส่วนผสมคือแป้งมันสำปะหลัง หรือแป้งสาลี เติมน้ำมันปรุงรสต่างๆผสมให้เข้ากัน อาจทอดหรือไม่ทอดก่อนบรรจุก็ได้ สำหรับแป้งสาลีมีงานวิจัยพบว่า ในแป้งสาลีมีโปรตีนกลูเตนที่ส่งผลกระทบต่อภูมิแพ้ของคน จึงเป็นข้อจำกัดในการบริโภคสำหรับคนบางกลุ่ม การทำข้าวเกรียบจากมันฝรั่งจะช่วยเพิ่มโปรตีนและคุณค่าทางโภชนาการ และยังไม่พบงานวิจัยว่า มีการแปรรูปมันฝรั่ง ซึ่งมันฝรั่งสดมีการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการพบว่า ให้พลังงานต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง 2 เท่า มีปริมาณโปรตีน 2% มีใยอาหาร 0.4% และมีไขมันต่ำ สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค

ส่วนใหญ่ในปัจจุบันหันมาใส่ใจเรื่องสุขภาพมากยิ่งขึ้น จึงเป็นที่มาในการทำข้าวเกรียบด้วยมันฝรั่งต้มให้มีคุณค่าทางโภชนาการสำหรับผู้บริโภค มีกรรมวิธีทำที่ง่ายสำหรับผู้ผลิตด้วย รวมทั้งสร้างกระบวนการกำจัดส่วนเหลือทิ้งให้เป็นศูนย์ (zero waste) ในกระบวนการผลิต

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถั่งเช่า (*Cordyceps*) จัดอยู่ในกลุ่มฟังไจ เป็นที่รู้จักกันดีในการนำมาเป็นยาสมุนไพรรักษาโรคต่างๆทาง การแพทย์ที่มีการศึกษาสารออกฤทธิ์ โดยชาวจีนเป็นชาติแรก ถั่งเช่าที่นิยมเพาะเลี้ยงมีดังนี้ คือ ถั่งเช่าทิเบต (*Cordyceps sinensis*) ถั่งเช่าหิมะ (*Isaria japonica*) และถั่งเช่าสีทอง (*Cordyceps militaris*) โดยถั่งเช่าสีทองมีการ ศึกษากันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถบริโภคได้ และมีการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา พบว่ามี สารสำคัญทางชีวภาพที่หลากหลายและเป็นประโยชน์ในการรักษาโรคหลายชนิด ซึ่งสารสำคัญที่พบได้แก่ สารที่มีสรรพคุณเพิ่มสมรรถนะทางเพศ กระตุ้นการทำงานของ sexual potentiator ส่งเสริมการสร้างฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (testosterone) ทำให้ผลิตสเปิร์มที่แข็งแรง และส่งเสริมการไหลเวียนเลือด สารกลุ่มที่มีฤทธิ์ยังยั้งการอักเสบ (anti-inflammatory) เช่น คอร์ดิเซปิน (cordycepin) และ อะดีโนซีน (adenosine) เป็นต้น สารกลุ่มนี้ยังมีความสามารถยับยั้งการเกิดเนื้องอก หรือยับยั้งการเกิดมะเร็ง (anti-cancer) รวมทั้งช่วยต้านอนุมูลอิสระ (anti-oxidant) ช่วยชะลอความชรา (anti-aging) [1, 2, 3] ด้วยคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายของเห็ดถั่งเช่าสีทอง และมีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ที่มากกว่าเห็ดชนิดอื่นๆในตระกูลเดียวกัน [1] ทำให้ฟังไจชนิดนี้เป็นที่สนใจในการเพาะเลี้ยงในเชิงพาณิชย์ และออกวางจำหน่ายในรูปแบบผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ

ขั้นตอนการเพาะถั่งเช่าสีทองนั้น เริ่มจากการเตรียมอาหารเลี้ยงก่อนโดยมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ มันฝรั่งต้มสุก ส่วนน้ำต้มเป็นส่วนที่นำไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงถั่งเช่า ในอาหารสำหรับเลี้ยงรา ที่เรียกว่า potato dextrose agar (PDA) มันฝรั่งเป็นอาหารที่ให้พลังงานในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับอาหารที่เป็นแป้งประเภทอื่น เช่น แป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น รวมทั้งเป็นอาหารที่มีโปรตีน มีเยื่อใยสูง มีวิตามินซี วิตามินบี 6 แคลเซียม และโพแทสเซียม [4] นอกจากนี้ มันฝรั่งเป็นวัตถุดิบที่มีคุณค่าทางโภชนาการอาหาร นิยมนำมารับประทาน และผลิตเป็นอาหารหลากหลายเมนู เนื่องจากมันฝรั่งมีสารชีวโมเลกุลที่สำคัญต่อการสร้างองค์ประกอบสำคัญภายในเซลล์ มันฝรั่งมีแป้งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ที่เป็น resistant starch เกิดกระบวนการย่อยได้น้อยภายในร่างกายเนื่องจาก แป้งประเภทนี้ ทนต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหาร ไม่สามารถดูดซึมผ่านลำไส้ได้ จัดเป็นอาหารที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมันฝรั่งยังมีโปรตีนที่มีคุณค่าทางโภชนาการเทียบเท่าแล้ว โดยโปรตีนในมันฝรั่งนั้นมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย 9 ชนิด รวมทั้งมีแคลเซียม ซึ่งช่วยในกระบวนการสร้างกระดูกให้แข็งแรง [5, 6]

ข้าวเกรียบเป็นอาหารว่างที่คนทั่วไปนิยมบริโภคโดยผลิตจากแป้งผสมกับวัตถุดิบอื่นที่ให้สีหรือกลิ่น เพื่อให้รับประทานยิ่งขึ้นซึ่งมีการเรียกชื่อต่างๆกันไปตามชนิดของวัตถุดิบที่ให้สีหรือกลิ่น เช่น ข้าวเกรียบกุ้งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีกุ้งเป็นส่วนผสมและได้รับความนิยมสูงสุด ข้าวเกรียบเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีกรรมวิธีผลิตไม่ยุ่งยาก ขนมอบเคี้ยวชนิดนี้เป็นที่นิยมบริโภคของบุคคลทุกเพศทุกวัย จัดเป็นอาหารว่างที่รับประทาน (snack food) ได้ทุกช่วงเวลา และยังเป็นของฝากได้ด้วย ข้าวเกรียบมีวัตถุดิบหลักในส่วนผสมคือแป้งมันสำปะหลัง ผสมด้วยเครื่องปรุงรสต่างๆผสมให้เข้ากัน แล้วทำให้สุกด้วยการนึ่ง จากนั้นนำมาหั่นเป็นชิ้นขนาดเล็กพอคำ ตากหรืออบให้แห้ง อาจทอดหรือไม่ทอดก่อนบรรจุก็ได้ [7] ในปัจจุบันผู้บริโภคส่วนใหญ่หันมาใส่ใจเรื่องสุขภาพมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการเลือกรับประทานอาหารผู้บริโภคจะเลือกรับประทานอาหารที่มีไขมันต่ำและมีประโยชน์ต่อสุขภาพซึ่ง

ข้าวเกรียบจัดเป็นอาหารที่มีไขมันทำให้ปัจจุบันมีการคัดเลือกวัตถุดิบอื่นทดแทนส่วนประกอบหลักของข้าวเกรียบ เช่น ทดแทนแป้งมันสำปะหลัง ในขณะที่เดียวกันก็ศึกษาและวิจัยส่วนผสมอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับข้าวเกรียบเช่นการใช้แป้งถั่วเหลืองทดแทนแป้งมันสำปะหลังในการทำข้าวเกรียบ การใช้ส่วนผสมจากผักตำลึงเป็นส่วนผสมในการทำข้าวเกรียบเพื่อเพิ่มวิตามินเอ [8] ทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคโดยวัตถุดิบที่นำมาทดแทนนั้นจะเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์ต่อร่างกายและหาได้ง่ายในท้องถิ่น

3. วิธีการวิจัย

ทำการสอบถามข้อมูลส่วนเหลือทิ้งที่สามารถรับประทานได้จากกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้องจากเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงจากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า สร้างกระบวนการกำจัดส่วนเหลือทิ้งให้เป็นศูนย์ (zero waste) โดยข้อมูลส่วนเหลือทิ้งเบื้องต้น จากการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง แบบมีส่วนร่วมกับเกษตรกรผู้เพาะเลี้ยง พบว่า การเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง 150 ขวด มีมันฝรั่งต้มเหลือทิ้งจากการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง 1,000 กรัม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ คือแปรรูปมันฝรั่งต้มให้เป็นข้าวเกรียบ

3.1 ตรวจสอบคุณค่าทางโภชนาการของมันฝรั่งต้ม

นำเนื้อมันฝรั่งต้มที่เหลือจากการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง มาวิเคราะห์องค์ประกอบคุณค่าทางโภชนาการโดยประมาณ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ความชื้น เถ้า และใยอาหาร ตามวิธีการของ AOAC [9]

3.2 กำหนดสูตรและศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของข้าวเกรียบ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมในการทำข้าวเกรียบจากมันฝรั่งต้มเหลือทิ้งจากการเตรียมอาหารเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง

จากนั้นแต่ละสูตร นำส่วนผสมมาผสมให้เข้ากัน ปั้นเป็นแท่งยาว มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ห่อด้วยฟิล์มใส ถนอมอาหาร แล้วจึงนำไปนึ่งผ่านความร้อนขึ้นด้วยลังถึง เป็นเวลา 30 นาที นำออกมาวางไว้ให้เย็น แล้วจึงหั่นเป็นชิ้นขนาดเท่าๆกัน แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำข้าวเกรียบดิบแต่ละสูตร มาวิเคราะห์องค์ประกอบคุณค่าทางโภชนาการโดยประมาณ ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน ความชื้น เถ้า และใยอาหาร รวมทั้งค่าคอเลสเตอรอลที่วัด (a_w) ที่ 25 องศาเซลเซียส ตามวิธีการของ AOAC [9] และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค โดยวิธี 9-Point Hedonic scale ทำการประเมินคุณภาพด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่น ความกรอบ และความชอบโดยรวม ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน

4. ผลการวิจัย

ส่วนผสม	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
1. แป้งมันสำปะหลัง	1000 กรัม	250 กรัม	500 กรัม	750 กรัม	0 กรัม
2. เนื้อมันฝรั่งต้มสุก	0 กรัม	750 กรัม	500 กรัม	250 กรัม	1000 กรัม
3. น้ำตาล	15 กรัม	15 กรัม	15 กรัม	15 กรัม	15 กรัม
4. เกลือเสริมไอโอดีน	15 กรัม	15 กรัม	15 กรัม	15 กรัม	15 กรัม
5. พริกไทย	5 กรัม	5 กรัม	5 กรัม	5 กรัม	5 กรัม
6. น้ำมันรำข้าว (คิง)	40 มิลลิลิตร	40 มิลลิลิตร	40 มิลลิลิตร	40 มิลลิลิตร	40 มิลลิลิตร

7. น้ำดื่มสะอาด	650 มิลลิลิตร	0 มิลลิลิตร	200 มิลลิลิตร	300 มิลลิลิตร	0 มิลลิลิตร
-----------------	---------------	-------------	---------------	---------------	-------------

เมื่อน้ำมันฝรั่งต้มเหลือทิ้งจากกระบวนการเตรียมอาหารเพื่อเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้องมาวิเคราะห์คุณค่าทางอาหาร คือ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เถ้า ความชื้น เยื่อใย พลังงาน และพลังงานจากไขมัน ผลการทดลองพบว่า น้ำมันฝรั่งต้มสุก มีโปรตีน เยื่อใยละลายน้ำได้ และความชื้น ใกล้เคียงกับมันฝรั่งสด (ตารางที่ 2) ส่วนคาร์โบไฮเดรต ไขมัน เถ้า และพลังงานทั้งหมด ของมันฝรั่งต้มสุกน้อยกว่ามันฝรั่งสด จะเห็นได้ว่า น้ำมันฝรั่งต้มที่เหลือจากกระบวนการเตรียมอาหารเพื่อเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้องยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการ มีโปรตีนถึง 2% และมีใยอาหารประมาณ 2% ในขณะที่ไขมันต่ำมาก (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 คุณค่าทางโภชนาการของน้ำมันฝรั่งต้มที่เหลือจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง และมันฝรั่งสด

พารามิเตอร์	มันฝรั่งต้มที่เหลือจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง	มันฝรั่งสด [6]
ความชื้น (กรัม/100กรัม)	83.16±0.34	82.0
เถ้า (กรัม/100กรัม)	0.68±0.03	1.2
โปรตีน (กรัม/100กรัม)	2.06±0.09	2.5
คาร์โบไฮเดรต (กรัม/100กรัม)	14.81±0.33	33.0
ไขมัน (กรัม/100กรัม)	0.07±0.03	0.2
พลังงานจากไขมัน (กิโลแคลอรี/100กรัม)	0.41±0.05	-
พลังงานทั้งหมด (กิโลแคลอรี/100กรัม)	66.54±0.85	73
เยื่อใยละลายน้ำได้ (กรัม/100กรัม)	1.99±0.10	2.1

- หมายถึง ไม่มีรายงาน



ภาพที่ 1 ข้าวเกรียบทอดที่มีส่วนผสมของน้ำมันฝรั่งต้มที่เหลือจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ห้อง (ก) สูตร 1 แบ่งมันสำปะหลังอย่างเดียวย (ข) สูตร 2 แบ่งมันสำปะหลัง 1 ส่วน น้ำมันฝรั่งต้ม 3 ส่วน (ค) สูตร 3 แบ่งมันสำปะหลัง 1 ส่วน น้ำมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน (ง) สูตร 4 แบ่งมันสำปะหลัง 3 ส่วน น้ำมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน และ (จ) สูตร 5 มันฝรั่งต้มอย่างเดียวย

เมื่อได้ข้าวเกรียบดิบทั้ง 5 สูตร แล้วนำไปตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ ผลการทดลองพบว่า ข้าวเกรียบสูตรที่มีปริมาณโปรตีนมากที่สุด คือข้าวเกรียบสูตรที่ 5 คือ มีเนื้อมันฝรั่งต้ม 100% ในขณะที่ข้าวเกรียบสูตรที่ 1 คือ มีแบ่งมันสำปะหลัง 100% มีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด (ตารางที่ 3) สำหรับคาร์โบไฮเดรต ข้าวเกรียบสูตรที่ไม่มี

ส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยที่สุด คือข้าวเกรียบสูตรที่มีน้ำมันฝรั่งต้ม 100% ไขมัน ข้าวเกรียบสูตรที่มีแป้งมันสำปะหลัง 100% มีปริมาณไขมันน้อยที่สุด สำหรับโยอาหาร ข้าวเกรียบสูตรที่ 5 มีน้ำมัน ฝรั่งต้ม 100% มีโยอาหารมากที่สุด (ตารางที่ 3) ในขณะที่ข้าวเกรียบสูตรที่ 1 คือ มีแป้งมันสำปะหลัง 100% มีโย อาหารน้อยที่สุด (ตารางที่ 3) สำหรับค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ (a_w) ข้าวเกรียบสูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 5 ผ่านเกณฑ์ มาตรฐาน (ตารางที่ 3) ข้าวเกรียบสูตรที่ 1 ถึง สูตรที่ 5 แสดงดังภาพที่ 1

ตารางที่ 3 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวเกรียบดิบ 5 สูตร ที่มีส่วนผสมของน้ำมันฝรั่งต้ม สูตร 1 แป้งมันสำปะหลัง อย่างเดียว สูตร 2 แป้งมันสำปะหลัง 1 ส่วน ไขมันฝรั่งต้ม 3 ส่วน สูตร 3 แป้งมันสำปะหลัง 1 ส่วน ไขมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน สูตร 4 แป้งมันสำปะหลัง 3 ส่วน ไขมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน และ สูตร 5 ไขมันฝรั่งต้มอย่างเดียว ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

พารามิเตอร์	ข้าวเกรียบดิบ				
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5
ความชื้น (กรัม/100กรัม)	13.78±0.75	8.02±0.47	11.78±0.14	14.03±0.20	8.47±0.45
เถ้า (กรัม/100กรัม)	1.93±0.07	5.70±0.30	3.56±0.15	2.36±0.06	10.23±0.36
โปรตีน (กรัม/100กรัม)	1.03±0.08	3.98±0.24	1.91±0.14	1.31±0.07	6.30±0.39
คาร์โบไฮเดรต (กรัม/100กรัม)	80.51±0.86	74.63±0.48	76.79±0.34	79.44±0.83	57.94±0.90
ไขมัน(กรัม/100กรัม)	3.62±0.08	8.97±0.22	5.84±0.08	4.46±0.24	15.13±0.24
พลังงานจากไขมัน (กิโลแคลอรี/100กรัม)	33.72±0.41	80.30±1.11	53.06±0.36	38.29±0.42	135.47±0.74
พลังงานทั้งหมด (กิโลแคลอรี/100กรัม)	359.89±1.38	392.20±0.52	357.53±2.72	357.47±1.02	394.11±3.81
เยื่อใยละลายน้ำได้ (กรัม/100กรัม)	1.73±0.05	6.87±0.17	4.02±0.24	2.26±0.06	7.72±0.08
วอเตอร์แอกทีวิตี้ (25°C)*	0.61±0.03	0.37±0.03	0.53±0.04	0.67±0.03	0.38±0.03

* ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ (a_w) ต้องไม่เกิน 0.6

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวเกรียบทอดแต่ละสูตร สูตร 1 แป้งมันสำปะหลังอย่างเดียว สูตร 2 แป้งมันสำปะหลัง 1 ส่วน ไขมันฝรั่งต้ม 3 ส่วน สูตร 3 แป้งมันสำปะหลัง 1 ส่วน ไขมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน สูตร 4 แป้ง มันสำปะหลัง 3 ส่วน ไขมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน สูตร 5 ไขมันฝรั่งต้มอย่างเดียว และ ข้าวเกรียบที่วางจำหน่ายทางการค้า

ผลทางประสาทสัมผัส	ข้าวเกรียบทอด					
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	ทางการค้า
ลักษณะปรากฏ	1.43±0.50	6.10±0.70	8.07±0.57	6.70±0.94	1.47±0.67	7.07±0.68
สี	1.40±0.49	6.37±0.66	7.73±0.44	6.03±0.60	1.57±0.88	6.67±0.47
เนื้อสัมผัส	1.23±0.42	5.97±0.80	7.53±0.50	6.10±0.79	1.47±0.72	6.47±0.76
รสชาติ	1.27±0.44	4.27±0.63	7.90±0.54	6.87±0.67	3.90±0.60	7.00±0.63
กลิ่น	4.17±1.49	5.90±0.70	7.33±0.47	6.67±0.54	3.73±1.67	6.73±0.51
ความกรอบ	2.57±1.76	5.60±0.92	7.53±0.50	6.43±0.50	1.63±0.84	7.27±0.63
ความชอบโดยรวม	1.67±0.47	5.70±0.46	7.50±0.50	6.37±0.66	1.60±0.84	7.20±0.65

จากนั้น นำข้าวเกรียบทั้ง 5 สูตรและข้าวเกรียบที่มีจำหน่ายทางการค้า ไปให้ผู้บริโภคประเมินทางประสาทสัมผัส ผลการประเมิน ผู้บริโภคให้การยอมรับข้าวเกรียบทอดสูตรที่ 3 มากที่สุด ระดับความชอบอยู่ที่ระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (ตารางที่ 4) เมื่อเทียบกับข้าวเกรียบทางการค้า ซึ่งผู้บริโภคให้การยอมรับ โดยมีระดับความชอบอยู่ที่ชอบเล็กน้อยจนถึงชอบปานกลาง รองลงมาคือ ข้าวเกรียบทอดสูตรที่ 4 โดยระดับความชอบอยู่ที่ระดับชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง ส่วนข้าวเกรียบทอดสูตรที่ 2 ผู้บริโภคเฉยๆจนถึงชอบเล็กน้อย ในขณะที่ข้าวเกรียบทอดสูตรที่ 1 และ สูตรที่ 5 ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (ตารางที่ 4)

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

จากผลการทดลอง เห็นได้ว่า มันฝรั่งที่เหลือจากกระบวนการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ท้อง ยังคงมีคุณค่าทางอาหารอยู่ ทั้งโปรตีน เยื่อใยละลายน้ำได้ มีไขมันต่ำ พลังงานน้อย มันฝรั่งจึงเป็นอาหารที่ให้พลังงานในปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับอาหารที่ทำจากแป้งประเภทอื่น คุณสมบัติที่สำคัญของแป้งมันฝรั่งคือ เป็นแป้งชนิดทนการย่อยด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารและไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์ (resistant starch) แป้งชนิดนี้มีคุณสมบัติเป็น พรีไบโอติก (prebiotic) อาหารของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในลำไส้ใหญ่ ช่วยระบบการขับถ่าย รวมทั้งมันฝรั่งยังมีคุณค่าทางโภชนาการหลากหลาย คือ มีเยื่อใยสูง รวมทั้ง วิตามินซี วิตามินบี 6 แคลเซียม และโฟเลตสูง [4] เมื่อนำมันฝรั่งมาผ่านกระบวนการทำข้าวเกรียบที่ได้รับการผสมเข้ากับส่วนผสมอื่นๆ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น และเมื่อนำไปผ่านความร้อนขึ้นจากการนึ่งในลังถึง ทำให้โครงสร้างทางชีวเคมีของแป้งมันฝรั่งมีการเปลี่ยนแปลงจนเพิ่มคุณสมบัติของแป้งให้มีความต้านทานการย่อยเพิ่มขึ้น [10] เห็นได้จากข้าวเกรียบสูตรที่ 5 ที่ใช้มันฝรั่งต้มอย่างเดียวในการทำข้าวเกรียบ มีเยื่อใยละลายน้ำได้เพิ่มขึ้น 3.5 เท่า และยังมีโปรตีนสูงขึ้น 3 เท่า เมื่อเทียบกับมันฝรั่งต้มแต่อย่างไรก็ตาม จากผลการประเมินทางประสาทสัมผัส ข้าวเกรียบสูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากที่สุด คือ ข้าวเกรียบสูตรที่ 3 คือ แป้งมันสำปะหลัง 1 ส่วน และมันฝรั่งต้ม 1 ส่วน ซึ่งข้าวเกรียบสูตรนี้มีโปรตีน 2% และ เยื่อใยละลายน้ำได้ 4% ข้าวเกรียบที่ผลิตขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน มผช.กำหนด [7] เช่นเดียวกันกับงานวิจัยในปัจจุบันที่มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบให้มีคุณค่าทางโภชนาการ และเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ให้กับข้าวเกรียบ เช่น การใช้แป้งถั่วเหลืองทดแทนแป้งมันสำปะหลังในการทำข้าวเกรียบ การใช้น้ำต้มจากผักตำลึงเป็นส่วนผสมในการทำข้าวเกรียบเพื่อเพิ่มวิตามินเอ [8] เป็นต้น ในงานวิจัยนี้มันฝรั่งต้มที่เหลือจากการเพาะเลี้ยงถึงเข้าสู่ท้องสามารถแปรรูป

เป็นข้าวเกรียบที่มีคุณค่าทางโภชนาการอาหาร สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับมันฝรั่งต้ม รวมทั้งผลิตเป็นขนมทางเลือกให้กับผู้บริโภค รวมทั้งลดของเสียในกระบวนการได้อีกด้วย

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัย จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ผ่านทุนงบประมาณการวิจัยและนวัตกรรมปี 2563 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Huang L., Li Q., Chen Y. Wang X. and Zhou X. **Determination and analysis of cordycepin and adenosine in the products of *Cordyceps* spp.** African Journal of Microbiololgy Research, 2009, 3 (12): 957-961.
- [2] Shrestha B., Zhang W., Zhang Y and Liu X. **The medicinal fungus *Cordyceps militaris*: research and development.** Mycological Progress, 2012, 11 (3): 599-614.
- [3] วิโรจน์ แก้วเรือง. **ถั่งเช่าไหมไทย สมุนไพรทองคำ.** น.ส.พ. กลสิกร, 2556, 86(5): 18-22.
- [4] Beals, K. A. **A review of potatoes and their role in global health,** 2018. สืบค้นจาก <https://www.potatogoodness.com/wp-content/uploads/2016/09/Potato-nutrition-white-paper.pdf>
- [5] Thorpe M. P. and Evans E. M. **Dietary protein and bone health: harmonizing conflicting theories.** Nutrition Reviews, 2011, 69(4): 215-230.
- [6] กรมอนามัย. **ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย.** กองโภชนาการ. กระทรวงสาธารณสุข. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์องค์การพิเคราะห์อาหาร, 2544.
- [7] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. **ข้าวเกรียบ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน / มพช. 107/2554,** 2554 สืบค้นจาก http://tcps.tisi.go.th/pub/tcps107_54.pdf
- [8] สุดารัตน์ พริกบุญจันทร์. **การพัฒนาคุณภาพข้าวเกรียบปลา.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, 2547.
- [9] A.O.A.C. **Official methods of analysis of association of official analytical chemists(16thed).** The Association of Official Analytical Chemists Inc, Washinton DC., 2000.
- [10] Stute R. **Hydrothermal Modification of Starches : The Difference between Annealing and Heat/Moisture –Treatment.** Starch, 1992, 44 (6): 205-214.

ผลของสารสกัดจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดต่อการเจริญเติบโตและความเข้มสีของกุ้งขาวแวนนาไม

EFFECT OF FRESHWATER RED ALGAE (*Caloglossa beccarii*) EXTRACT ON GROWTH AND PIGMENTATION OF PACIFIC WHITE SHRIMP (*Litopenaeus vannamei*)

วัฒนา วัฒนกุล^{*1} อุไรวรรณ วัฒนกุล¹

Wattana Wattanakul^{*1}, Uraiwan Wattanakul¹

^{*1} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

* Corresponding Author E-mail: wattanakul67@gmail.com

บทคัดย่อ

สาหร่ายสีแดงน้ำจืด (*Caloglossa beccarii* DeToni) มีรงควัตถุให้สีอยู่ในกลุ่มของแคโรทีนอยด์อย่างเด่นชัด มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเร่งสีในสัตว์น้ำ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทดลองใช้สารสกัดจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดในการปรับปรุงสีของกุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดต่อการเจริญเติบโตและความเข้มสีของกุ้งขาว ที่เลี้ยงด้วยอาหารสำเร็จรูปผสมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดที่สกัดโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ที่ระดับแตกต่างกันคือ 0 (ชุดควบคุม), 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (mg/kg) ทำการเลี้ยงเป็นเวลา 4 เดือน ในตู้กระจก และวัดสีผิวของกุ้งโดยใช้เครื่องวัดสีระบบ CIE ($L^*a^*b^*$) พบว่า ทุกระดับของการผสมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดในอาหารไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตายของกุ้งขาวแวนนาไม ($P>0.05$) และกุ้งขาวที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสารสกัดหยาบจากสาหร่าย (100-300 mg/kg) มีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำกว่ากุ้งขาวในชุดควบคุมที่ไม่เสริมสารสกัดจากสาหร่าย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยกุ้งขาวชุดควบคุม มีค่าเฉลี่ยความสว่างสูงที่สุด เท่ากับ 35.71 ± 1.14 และค่าเฉลี่ยของสีแดง (a^*) มีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่ 6 (250 mg/kg) มีค่าเท่ากับ 7.86 ± 1.72 สูงกว่ากุ้งขาวในชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนค่าเฉลี่ยสีเหลือง (b^*) พบว่า ทุกระดับของการผสมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดในอาหารไม่มีผลต่อค่าสีเหลือง ($P>0.05$)

คำสำคัญ: สาหร่ายสีแดงน้ำจืด สารสี กุ้งขาวแวนนาไม

วันที่รับบทความ 5 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 17 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 20 มีนาคม 2564

ABSTRACT

Freshwater red alga (*Caloglossa beccarii* DeToni) are predominantly colored in the carotenoids. It is suitable for applies as a colorant in ornamental aquatic animals. Thus, the using freshwater red algae crude extracts to improve the color of pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) was used in this experiment. This research aimed to study the effect of crude extracts from red algae extracted with absolute ethanol on growth performance and skin color of shrimps with commercial diets containing freshwater red alga crude extracts at seven inclusion levels (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 mg/kg). The diets were given to shrimps for 4 months period and the skin color of shrimp was measured by using a colorimeter with the system CIE ($L^*a^*b^*$). The results showed that all levels of concentrations crude extracts were not effect on growth performance and survival rate ($P>0.05$). The lightness value (L^*) was highest in white shrimp fed by diet control group (0 mg/kg) with the lightness value of 35.71 ± 1.14 ($P<0.05$). The redness (a^*) was highest in white shrimp fed by diet supplement with 250 mg/kg crude extracts (7.86 ± 1.72) and higher than white shrimp in control group ($P<0.05$). All levels of concentrations crude extracts supplement in diet were not effect on yellowness (b^*) ($P>0.05$).

Keywords: Freshwater Red Alga (*Caloglossa beccarii* DeToni), Pigments, Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)

1. บทนำ

กุ้งขาวแวนนาไม (*Litopenaeus vannamei*) เป็นกุ้งทะเลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ และมีการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของประเทศไทยในปัจจุบัน [1] ซึ่งตลอดช่วงปี พ.ศ. 2563 ที่ผ่านมาได้มีการแพร่ระบาดของโรคไวรัสโคโรนา-19 ไปทั่วโลก ส่งผลให้ธุรกิจการเลี้ยงกุ้งทะเลประสบปัญหาไปด้วย เป็นต้นว่า ปัญหาการส่งออกตลอดจนปัญหาเรื่องราคาที่ตกต่ำลงอย่างมาก ปัญหาสำคัญประการหนึ่งที่เป็นสาเหตุที่กุ้งขาวแวนนาไมราคาคงต่ำลง ได้แก่ ปัญหาในด้านคุณภาพที่ตลาดต้องการ คือ สีของกุ้งขาวหลังการต้ม เพราะกุ้งขาวที่เกษตรกรเลี้ยงนั้นมีสีหลังจากการต้มไม่เป็นสีแดงเข้มตามที่ตลาดต้องการ ทำให้ห้องเย็นรับซื้อกุ้งในราคาลดลง ซึ่งการที่จะเพิ่มระดับสีของกุ้งขาวแวนนาไมนั้นสามารถทำได้โดยการเสริมสารสีแคโรทีนอยด์ลงในอาหารกุ้ง เพื่อให้กุ้งมีปริมาณสารสีซึ่งเป็นสารประกอบแคโรทีนอยด์สะสมในตัวมากขึ้น ทำให้สีของตัวกุ้งเข้มขึ้น และเมื่อผ่านการต้มในกระบวนการแปรรูปจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีแดงเข้มตรงกับความต้องการของผู้บริโภค วิธีการเพิ่มสารสีในอาหารถือเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งวิธีการเสริมสารสีในอาหารเพื่อการเร่งสีนั้นเป็นวิธีการที่นิยมทำกันมากในการเลี้ยงปลาสวยงามที่ต้องการเร่งสีเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับปลาสวยงาม และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มระดับสีในกุ้งขาวแวนนาไมได้ แต่ก็เป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตกุ้งขาวตามไปด้วย เพราะสารประกอบแคโรทีนอยด์ในห้องตลาดมีราคาแพง ซึ่งถ้าหากใช้สารสีที่เป็นแหล่งสารสีก็อาจช่วยลดต้นทุนในการใช้สารสีที่มีราคาแพงได้

คณะผู้วิจัย เล็งเห็นความสำคัญที่โครงการวิจัยดังกล่าว ในการแก้ไขปัญหากุ้งขาวแวนนาไมสีแดงเข้มให้กับเกษตรกร โดยให้ความสนใจในประเด็นของการใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสีแดงน้ำจืด (*Caloglossa beccarii*)

DeToni) ซึ่งมีอยู่ตามน้ำตกของจังหวัดนครศรีธรรมราช ในการปรับปรุงคุณภาพสีของกุ้งขาวแวนนาไม เนื่องจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดนี้เป็นสาหร่ายที่สามารถสร้าง และสะสมแคโรทีนอยด์ได้ในปริมาณมากเมื่อเทียบกับพืชและสัตว์อื่น ๆ [2] ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้ เป็นการประยุกต์ใช้แคโรทีนอยด์จากสาหร่ายน้ำจืด เพื่อใช้เป็นแหล่งของสารสีที่มีประสิทธิภาพในอาหารกุ้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้สารสกัดหยาบ (crude extract) จากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดเสริมในอาหารสำเร็จรูปเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม ทั้งในแง่การเพิ่มการเจริญเติบโต และเพิ่มระดับสีของกุ้ง ให้ตรงตามความต้องการของตลาด เป็นการปรับปรุงคุณภาพผลผลิต และเพิ่มมูลค่ากุ้งขาวเพื่อการส่งออกได้เป็นอย่างดี

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันกุ้งขาวแวนนาไม เป็นกุ้งทะเลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ และมีการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของประเทศไทย โดยผลจากการสำรวจผลผลิตของฟาร์มเลี้ยงกุ้งทะเลปี 2561 [1] แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมปัจจุบัน ได้แก่ ปัญหาเรื่องราคาที่ตกต่ำลงจากเดิมเป็นอย่างมาก ซึ่งสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้ราคาตกต่ำในการเลี้ยงกุ้งทะเล ได้แก่ ปัญหาในด้านคุณภาพที่ตลาดต้องการ คือ สีของกุ้ง ซึ่งมักพบว่ากุ้งที่ได้รับอาหารที่มีสารสีแคโรทีนอยด์ไม่เพียงพอจะมีสีซีด (สีฟ้า) เมื่อนำไปผ่านการต้มในกระบวนการแปรรูป จะได้ผลิตภัณฑ์กุ้งต้มที่มีสีเหลืองส้ม ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของตลาด ถ้าหากมีสีไม่แดงเข้ม ทำให้ห้องเย็นรับซื้อกุ้งในราคาลดลง จึงเป็นสาเหตุที่กุ้งขาวแวนนาไมราคาตกต่ำ [3] การเสริมสารประกอบแคโรทีนอยด์ลงในอาหารกุ้ง ถือเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจาก สารประกอบแคโรทีนอยด์มีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสะสมแอสด้าแซนทินของกุ้ง เมื่อกุ้งกินอาหารที่มีแคโรทีนอยด์เข้าไปจะเกิดการสะสมในร่างกายเป็นเหตุให้สีของตัวกุ้งเข้มขึ้นเมื่อผ่านการต้มในกระบวนการแปรรูป จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีแดงส้มที่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค แต่ก็เป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตไปด้วย เพราะสารประกอบแคโรทีนอยด์ในท้องตลาดมีราคาแพง ในขณะที่ราคาขายกุ้งขาวแวนนาไมค่อนข้างจะต่ำ [3]

แคโรทีนอยด์เป็นสารสีที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยเฉพาะการทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ตลอดจนมีส่วนสำคัญในการเกิดสี ซึ่งสีจากแคโรทีนอยด์จะแสดงออกในเนื้อสีของสีเหลือง ส้ม และแดง โดยการแสดงออกของสีแดงเป็นแคโรทีนอยด์ ชนิดแอสด้าแซนทิน (astaxanthin) แคโรทีนอยด์ที่ใช้เสริมในอาหารสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นสารสังเคราะห์ เช่น บีต้าแคโรทีน และแอสด้าแซนทิน ซึ่งมีราคาแพง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น นักวิจัยทางด้านอาหารได้มีการศึกษาการใช้สาหร่ายผสมในอาหารสัตว์น้ำ เนื่องจากสาหร่ายมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง นอกจากนั้นยังมีกรดอะมิโน กรดอินทรีย์ นอกจากนั้นสาหร่ายบางชนิดสามารถใช้เร่งสีในสัตว์น้ำอีกด้วย [4] เช่นในสาหร่ายสีแดงน้ำจืด (*C.beccarii*) ซึ่งมีปริมาณสารสีแคโรทีนอยด์ [2] โดย [5] ได้ทำการทดลองใช้สารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดเสริมในอาหาร (ที่ระดับ 25-100 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กิโลกรัม) เพื่อเพิ่มความเข้มของสีผิวปลาทอง พบว่า ค่าสี a^* และ b^* มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการเสริมในอาหารทดลอง และสามารถปรับปรุงสีของปลาทองได้

3. วิธีการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (CRD) [6] โดยศึกษาระดับความเข้มข้นของสารสกัดหยาบ (crude extract) จากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดเสริมในอาหารเม็ดกุ้งขาวแวนนาไมสำเร็จรูป (โปรตีน 32%) ที่ต่างกัน 7 ระดับ (7 ชุดการทดลอง) ระดับละ 3 ซ้ำ คือ 0, 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มก.ต่ออาหาร 1 กก. (mg/kg)

3.2 การเตรียมระบบเลี้ยง

ทดลองเลี้ยงในตู้กระจกขนาด 50x100x50 ซม. เติมน้ำทะเลสะอาดที่ผ่านการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน 25 ppm [7] 150 ลิตร แต่ละตู้ทดลองมีระบบน้ำหมุนเวียนภายใน และให้อากาศตลอดเวลาโดยใช้สายยาง และหัวทราย

3.3 การเตรียมสาหร่ายสีแดงน้ำจืด (*C. beccarii*)

เก็บสาหร่ายจากน้ำตกในเตา จ.นครราชสีมา (N 07° 57.515; E 099° 46.474) โดย [2] นำสาหร่ายสดที่ได้มาล้างทำความสะอาด ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 50-60 °C และเก็บในตู้เย็น ตามวิธีการของ [5]

3.4 การเตรียมสารสกัดหยาบของ carotenoid จากสาหร่าย

ทำการสกัดสาหร่ายด้วยการดัดแปลงตามวิธีของ [8] โดยนำสาหร่ายอบแห้ง 25 กรัม มาบดให้ละเอียด ใส่ในขวดสีชา จากนั้นเติมเอทานอล 95% v/v 500 มิลลิลิตร นำไปทำให้เซลล์แตกด้วยคลื่นความถี่สูงนาน 5 นาที และแช่ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง 3 วัน แล้วนำสารละลายไปปั่นแยกเซลล์ที่ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เก็บสารละลายที่ได้นำไปกลั่นระเหยสุญญากาศจนได้สารสกัดอยู่ในรูป crude extract นำไปชั่งน้ำหนักและเก็บไว้ในขวดสีชาเพื่อทำการทดลองต่อไป

3.5 การเตรียมกุ้งทดลอง

นำลูกกุ้งขาวแวนนาไม ระยะ P15 จากฟาร์มเพาะฟักลูกกุ้งของเอกชน มาอนุบาลในบ่อซีเมนต์ขนาด 1.5X4 X1 เมตร ให้อาหารสำเร็จรูปทางการค้าวันละ 2 ครั้ง จนกระทั่งลูกกุ้งเคยชินกับอาหารเม็ด อนุบาลจนได้ลูกกุ้งหนักประมาณ 3-5 กรัม หรือขนาด 5-7.5 เซนติเมตร หลังจากนั้นสุ่มกุ้งไปเลี้ยงในตู้กระจกทดลอง จำนวน 30 ตัว/ตู้ ทำการชั่งน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นของกุ้งในทุกชุดการทดลอง

3.6 การเตรียมอาหารทดลอง

อาหารทดลองใช้อาหารเม็ดสำเร็จรูปกุ้งขาวแวนนาไม มีระดับโปรตีนไม่ต่ำกว่า 40% ไขมันไม่ต่ำกว่า 3% นำสารสกัดหยาบจากสาหร่ายมาละลายใน absolute ethanol ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันตามแผนการทดลอง แล้วไปสเปรย์ให้ทั่วเม็ดอาหาร ผึ่งลมให้แห้ง อาหารที่ผลิตแล้วเก็บในถุงสีดำเพื่อป้องกันแสง เก็บในตู้เย็น

3.7 อาหารและการให้อาหาร

ให้อาหารทุกวัน ๆ ละ 2 ครั้ง (เช้า-เย็น) ไม่เกิน 10% ของน้ำหนักตัวต่อวัน ให้จนถึงกินอิ่ม (Satiation) ไม่ให้เผื่อเหลือ เพื่อให้ค่าที่ได้ใกล้เคียงความเป็นจริง บันทึกน้ำหนักอาหารที่กิน เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่าอัตราการแลกเนื้อ (FCR) และปรับปริมาณอาหารตามปริมาณการกินอาหารของกุ้ง

3.8 การเก็บข้อมูล และขอบเขตการศึกษา ดังนี้

3.8.1 การศึกษาการเจริญเติบโต

ทำการสุ่มตัวอย่างกุ้งจากทุกชุดการทดลอง จำนวน 15 ตัว/ตู้ เพื่อชั่งน้ำหนักทุก ๆ เดือน ทำการทดลองเลี้ยง 4 เดือน และนำมาศึกษาการเจริญเติบโต (ในรูปค่าเฉลี่ยของข้อมูล) โดยใช้สูตรคำนวณ ดังนี้

1. น้ำหนักเฉลี่ย (Average Weight, กรัม) = (น้ำหนักกุ้งทั้งหมด/จำนวนกุ้งทั้งหมด)

2. เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเพิ่ม (WG, %) = $100 \times (\text{น้ำหนักกุ้งเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง} - \text{น้ำหนักกุ้งเริ่มต้น}) / \text{น้ำหนักกุ้งเริ่มต้น}$
3. อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate: SGR, % ต่อวัน)

$$= 100 \times (\ln \text{ น.น. กุ้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \ln \text{ น.น. กุ้งเมื่อเริ่มต้นการทดลอง}) / \text{จำนวนวันที่ทดลอง}$$
4. อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่อวัน (Average Diary Growth : ADG, กรัมต่อวัน)

$$= (\text{น้ำหนักกุ้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} - \text{น้ำหนักกุ้งเมื่อเริ่มต้นการทดลอง}) / \text{จำนวนวันที่ทดลอง}$$
5. อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) = $\text{น้ำหนักอาหารที่กินทั้งหมด (ก.)} / \text{น้ำหนักกุ้งทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น (ก.)}$
6. อัตรารอดตาย (Survival Rate: SR, %) = $(\text{จำนวนกุ้งเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} / \text{จำนวนกุ้งเริ่มการทดลอง}) \times 100$

3.8.2 การศึกษาความเข้มของสีกุ้ง

สุ่มเลือกกุ้งจากทุกชุดการทดลองจำนวนข้างละ 5 ตัว นำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 3 นาที เพื่อวัดสีกุ้งทั้งเปลือกในระบบ CIE LAB ($L^*a^*b^*$) ด้วยเครื่องวัดสีมาตรฐานทางวิทยาศาสตร์ (Hunter lab Colorimeter) ช่องเปิดขนาด 8.00 มิลลิเมตร นำตัวอย่างกุ้งวางให้ตรงบริเวณข้อที่ 2 นับจากหัวตรงกับช่องเปิด ปิดด้วยกลองสีดำ เพื่อป้องกันแสงจากภายนอก วัดค่าสีเฉลี่ย 3 จุดในการวัด 1 ครั้ง โดยที่ L^* เป็นผลการวัดค่าความสว่าง a^* เป็นค่าของสีแดงและสีเขียว และ b^* เป็นค่าของสีเหลืองและสีน้ำเงิน [9]

3.8.3 การศึกษาคุณภาพน้ำ

ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำทุก ๆ 2 สัปดาห์ ตลอดการทดลอง โดยดัชนีที่จะใช้วิเคราะห์คุณภาพน้ำประกอบด้วย อุณหภูมิน้ำวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท ความเค็มวัดด้วย Salino meter ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ (pH) ด้วย pH meter (Clean รุ่น pH 500B) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (วัดด้วยเครื่องวัดคุณภาพน้ำแบบดิจิตอล YSI Model 650 MDS) ความเป็นต่างของน้ำ (ด้วยวิธีการ Titration) แอมโมเนียรวม และไนไตรท์

3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำการหาค่าการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และความเข้มของสีกุ้ง ทำการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลอง ด้วยวิธี Duncan's New multiple range test : DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

4. ผลการวิจัย

ผลการทดลองเสริมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดที่ระดับความเข้มข้น 0, 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 mg/kg ใช้เลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 2.64 ± 0.21 กรัม เป็นเวลา 4 เดือน ดังนี้

4.1 การเจริญเติบโต อัตราการแลกเนื้อ และอัตราการรอดตาย

เมื่อสิ้นสุดการทดลองในเดือนที่ 4 พบว่า อัตราการเจริญเติบโต ทางด้านน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (WG) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) และอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ADG) ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารทั้ง 5 ชุดการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างชุดการทดลอง ($P > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 972.40 ± 36.81 - $1,079.47 \pm 70.73$ เปอร์เซ็นต์, 1.98 ± 0.03 - 2.05 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน และ 0.22 ± 0.01 - 0.24 ± 0.01 กรัมต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 1)

อัตราการแลกเนื้อ (FCR) ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารเม็ดกุ้งขาวแวนนาไมสำเร็จรูปที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน พบว่า กุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารเสริมสารสกัดจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดในชุดการทดลองที่ 6

(250 mg/kg) มีค่าอัตราแลกเนื้อ 1.64 ± 0.08 ต่ำกว่ากึ่งในชุดการทดลองที่ 7 ($P < 0.05$) ซึ่งมีอัตราแลกเนื้อสูงสุดเท่ากับ 1.97 ± 0.08 แต่ไม่แตกต่างกับกึ่งในชุดการทดลองที่ 4, 5, 1, 3 และ 2 ตามลำดับ ($P > 0.05$) (ตารางที่ 1)

อัตราการตายของกุ้งขาวที่ได้รับอาหารทดลองทั้ง 7 ชุดการทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยอัตราการตายเฉลี่ย มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 84.45 ± 6.94 ถึง 90.00 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1)

4.2 ระดับสีของกุ้งขาวแวนนาไม

หลังสิ้นสุดการทดลอง นำกุ้งไปต้มในน้ำเดือด 3 นาที วัดสีกุ้งทั้งเปลือกตรงบริเวณข้อที่ 2 นับจากหัวในระบบ CIE ($L^*a^*b^*$) พบว่า ค่า L^* (ค่าความสว่าง) ของกุ้งที่เลี้ยง มีค่าอยู่ในช่วง 33.37 ± 1.58 ถึง 35.71 ± 1.14 ซึ่งกุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารไม่ผสมสารสกัดในทุกควบคุม มีค่า L^* สูงที่สุด สูงกว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายในชุดการทดลอง 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งมีค่า L^* เท่ากับ 33.87 ± 1.28 , 33.75 ± 1.22 , 33.51 ± 1.56 , 33.48 ± 1.33 และ 33.37 ± 1.58 ตามลำดับ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 1 และภาพที่ 4)

ค่า a^* (ค่าสีแดง) พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 6.64 ± 1.53 ถึง 7.86 ± 1.72 โดยกุ้งขาวที่ได้รับอาหารชุดการทดลองที่ 6 (250 mg/kg) มีค่าสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 7.86 ± 1.72 สูงกว่ากุ้งขาวในชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) ซึ่งมีค่า a^* ต่ำที่สุด เท่ากับ 6.64 ± 1.53 ($P < 0.05$) แต่ค่า a^* ของกุ้งที่ได้รับอาหารทดลองที่ผสมสารสกัดหยาบในทุกชุดการทดลอง (ชุดการทดลองที่ 2-7) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) (ภาพที่ 2 และภาพที่ 4)

ส่วนค่า b^* (ค่าสีเหลือง) ของกุ้งขาวแวนนาไม พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 11.25 ± 1.40 ถึง 11.68 ± 1.55 ซึ่งกุ้งขาวที่ได้รับอาหารเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายในทุกชุดการทดลอง และชุดควบคุม (ชุดการทดลองที่ 1-7) มีค่า b^* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$) (ภาพที่ 3 และภาพที่ 4)

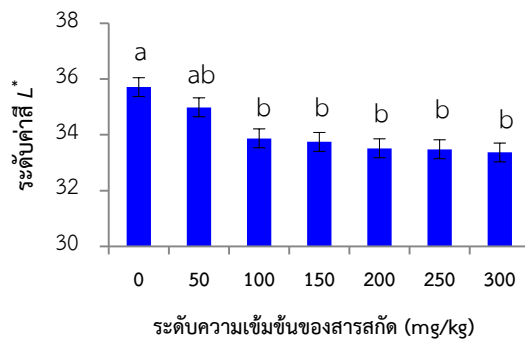
ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเฉลี่ยตลอดการทดลองเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม 4 เดือน พบว่า ความเค็มมีค่าอยู่ระหว่าง 25.00-29.50 ppt, อุณหภูมิของน้ำ 28.75 - 29.23 °C, ความเป็นกรด-ด่าง 7.50-8.30, ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ 6.10-7.35 mg/L, ความเป็นด่างอยู่ระหว่าง 101.45-128.30 mg/L, แอมโมเนีย 0.30-0.58 mg/L, และไนไตรท์ 0.20-0.80 mg/L ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงที่กุ้งขาวแวนนาไมสามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติ

ตารางที่ 1 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (WG) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ADG) อัตราแลกเนื้อ (FCR) และอัตราการตาย (SR) ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารสำเร็จรูปเสริมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดระดับต่าง ๆ กัน เป็นเวลา 4 เดือน

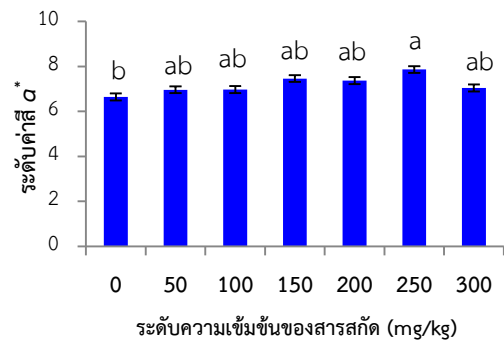
ชุดการทดลอง	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (WG)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ADG)	อัตราแลกเนื้อ (FCR)	อัตราการตาย (SR)
1 (0 mg/kg)	972.40 ± 36.81^a	1.98 ± 0.03^a	0.22 ± 0.01^a	1.68 ± 0.13^a	85.56 ± 9.62^a
2 (50 mg/kg)	$1,015.09 \pm 34.91^a$	2.01 ± 0.03^a	0.22 ± 0.01^a	1.89 ± 0.19^{ab}	88.89 ± 6.94^a
3 (100 mg/kg)	$1,038.35 \pm 57.77^a$	2.02 ± 0.04^a	0.22 ± 0.01^a	1.81 ± 0.06^{ab}	84.45 ± 6.94^a
4 (150 mg/kg)	$1,061.52 \pm 65.08^a$	2.04 ± 0.05^a	0.23 ± 0.02^a	1.66 ± 0.14^a	88.89 ± 6.94^a
5 (200 mg/kg)	$1,075.52 \pm 55.88^a$	2.05 ± 0.09^a	0.23 ± 0.02^a	1.68 ± 0.25^a	86.66 ± 5.77^a
6 (250 mg/kg)	$1,079.47 \pm 70.73^a$	2.05 ± 0.05^a	0.24 ± 0.01^a	1.64 ± 0.08^a	86.67 ± 3.34^a
7 (300 mg/kg)	$1,062.04 \pm 74.82^a$	2.04 ± 0.05^a	0.23 ± 0.01^a	1.97 ± 0.08^b	90.00 ± 0.00^a

หมายเหตุ : - ในวงเล็บของชุดการทดลอง คือระดับความเข้มข้นของการเสริมสารสกัดจากสาหร่ายในอาหารทดลอง

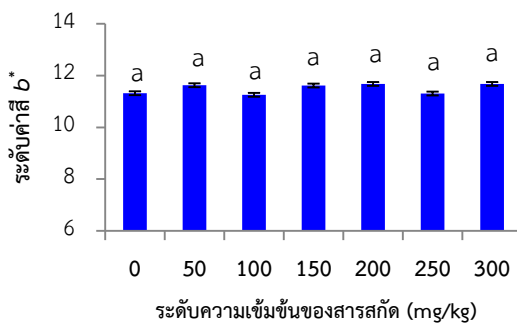
- เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งโดยใช้ตัวอักษร อักษรเหมือนกันไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$)



ภาพที่ 1 ระดับค่าสี L* ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ทดลอง



ภาพที่ 2 ระดับค่าสี a* ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ทดลอง



ภาพที่ 3 ระดับค่าสี b* ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ทดลอง



ภาพที่ 4 ระดับความเข้มสีของกุ้งขาวแวนนาไม

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

จากการศึกษาการเจริญเติบโตเมื่อสิ้นสุดการทดลอง อัตราน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโต อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการรอดตาย ของกุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารที่ผสมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดทั้ง 6 ชุดการทดลอง ไม่แตกต่างจากกุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารในชุดควบคุมซึ่งไม่ได้ผสมสารสกัดจากสาหร่าย แสดงให้เห็นว่าระดับของการใช้สารสกัดจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดเป็นแหล่งของสารสีในอาหารตั้งแต่ 50-300 mg/kg ไม่มีผลในการเร่งการเจริญเติบโตของกุ้งขาว และไม่มีผลต่ออัตราการรอดตาย สอดคล้องกับการทดลองของ [5] ในการใช้สารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืดชนิดเดียวกันนี้ เสริมในอาหารเลี้ยงปลาทอง พบว่า การเสริมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืด ตั้งแต่ที่ระดับความเข้มข้น 25-100 mg/kg ไม่มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโต อัตราแลกเนื้อ และอัตราการรอดตายของปลาทองแตกต่างกัน และไม่แตกต่างกับปลาทองในชุดควบคุม ทั้งนี้ เนื่องจากการเสริมสารสกัดที่ระดับความเข้มข้นดังกล่าวในอาหารสำเร็จรูปกุ้งขาวนั้น ไม่ได้ส่งผลให้อาหารทดลองมีระดับโปรตีนสูงขึ้น เพราะระดับโปรตีนในอาหารนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของกุ้งโดยตรง [10] อาหารที่มีระดับโปรตีนสูงจะส่งผลให้กุ้งมีการเจริญเติบโตสูงขึ้นตามไปด้วย และสอดคล้องกับผลการทดลองเสริมสารสีเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ สารสกัดแคโรทีนอยด์จากพืชและสาหร่ายในธรรมชาติ เช่น สาหร่ายสไปรูลีนา และสารสกัดแคโรทีนอยด์จากพริกหวาน ที่ระดับความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ในกุ้งขาวแวนนาไมของ [11] รายงานว่า แหล่งของสารสีที่ได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ หรือจากการสังเคราะห์ไม่มีผลในการเร่งการเจริญเติบโตของกุ้งขาวได้ เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาของ [12] ที่ไม่พบความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำกลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรควบคุม และอาหารที่ผสมสารสี Astaxanthin และจากการศึกษาของ [13] ที่พบว่าการผสมเบต้าแคโรทีนที่เป็นรงควัตถุหลักของสาหร่ายดูนาลิเอลาเข้มข้น 125 และ 175 พีพีเอ็ม ในอาหารให้กุ้งกุลาดำกินติดต่อกันนาน 10 สัปดาห์ ไม่มีผล

ไปเร่งการเจริญเติบโตเมื่อเทียบกับอาหารชุดควบคุม จากรายละเอียดข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเสริมแคโรทีนอยด์จากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดจากการทดลองครั้งนี้ ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการตายของกุ้งขาว

การเสริมสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดในอาหาร เลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไม ส่งผลให้มีค่าความสว่าง (L^*) ของกุ้งที่เลี้ยงด้วยอาหารทดลองเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืดทั้ง 6 ชุดการทดลอง (50-300 มิลลิกรัม/อาหาร 1 กิโลกรัม) มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมที่ไม่เสริมสารสกัดหยาบของสาหร่าย พบว่า ค่าความสว่าง (L^*) มีแนวโน้มที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าความสว่างของสีลดลง เนื่องจากในสาหร่ายสีแดงน้ำจืดมีสารสีแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารที่ช่วยกระตุ้นในการเกิดสีของสัตว์น้ำ โดยเฉพาะในสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชียนที่ต้องอาศัยสารเร่งสีจากอาหารที่กินเข้าไปภายนอก และทำให้เกิดสีปรากฏในสัตว์น้ำที่มีลักษณะสีเข้มขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ [11] ที่ทดสอบผลของแหล่งสารสีธรรมชาติต่อการเร่งสีในกุ้งขาว พบว่า กุ้งขาวที่ได้รับสารสีสังเคราะห์ แลสารสีที่สกัดจากพืชธรรมชาติ มีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำกว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารชุดควบคุม

ผลของค่าความเข้มสีแดง (a^*) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ของกุ้งขาวในชุดการทดลองที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืด 250 mg/kg ให้ค่าสีแดง (a^*) สูงที่สุด สูงกว่ากุ้งขาวในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับอาหารเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งเมื่อคิดปริมาณสารสีแดงที่เพิ่มขึ้น พบว่า มีปริมาณสารสีแดงเพิ่มขึ้น 18.37 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกุ้งขาวในชุดควบคุม สอดคล้องกับการทดลองของ [5] ในการใช้สารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืดชนิดเดียวกันนี้ เสริมในอาหารเลี้ยงปลาทอง พบว่า ปลาทองในชุดการทดลองที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืด 100 mg/kg ให้ค่าสีแดง (a^*) สูงที่สุด สูงกว่าปลาทองในชุดควบคุมที่ไม่ได้รับอาหารเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งเมื่อคิดปริมาณสารสีแดงที่เพิ่มขึ้นในปลาทอง พบว่า มีปริมาณสารสีแดงเพิ่มขึ้น 19.41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับปลาในชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของแคโรทีนอยด์ในสารสกัดจากสาหร่ายที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าสีแดง (a^*) เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในสาหร่ายสีแดงน้ำจืดมีสารสีแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารที่ช่วยกระตุ้นในการเกิดสีของสัตว์น้ำ โดยเฉพาะในสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชียนที่ต้องอาศัยสารเร่งสีจากอาหารที่กินเข้าไปภายนอก และทำให้เกิดสีปรากฏในสัตว์น้ำที่มีลักษณะสีแดงเข้มขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ [11] ที่ทดสอบผลของแหล่งสารสีธรรมชาติต่อการเร่งสีในกุ้งขาว พบว่า กุ้งขาวแวนนาไมที่ได้รับอาหารทุกชุดการทดลองที่ผสมสารสี มีลำตัวแดง (a^*) เข้มกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุมอย่างชัดเจน และสอดคล้องกับผลการทดลองในกุ้งเครย์ฟิชของ [14] พบว่า ค่าสีแดง (a^*) ในชุดการทดลองที่ให้อาหารเสริมสารสีจากผงพริกหยวกแดงที่ระดับต่างกัน สามารถทำให้กุ้งเครย์ฟิชมีค่าสีแดง (a^*) ที่เพิ่มขึ้น แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) กับชุดควบคุม ส่วนค่าสีเหลือง (b^*) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า กุ้งขาวแวนนาไมในชุดการทดลองที่เลี้ยงด้วยอาหารเสริมสารสกัดหยาบของสาหร่ายสีแดงน้ำจืด 50-300 mg/kg ให้ระดับค่าสีเหลือง (b^*) ไม่แตกต่างกัน และไม่แตกต่างกับชุดควบคุมที่ไม่ได้เสริมสารสกัดจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืด แสดงให้เห็นว่าสารสีแคโรทีนอยด์จากสารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดที่เสริมในอาหารไม่ได้ส่งผลให้ระดับค่าสีเหลือง (b^*) เพิ่มสูงขึ้นแต่อย่างใด

จากผลการศึกษาดังกล่าวสรุปได้ว่า การใช้สารสกัดหยาบจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดเสริมในอาหารเลี้ยงกุ้งขาวแวนนาไมที่ระดับตั้งแต่ 50-300 mg/kg ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและอัตราการตายของกุ้งขาวแวนนาไม แต่ที่ระดับความเข้มข้น 250 mg/kg สามารถเพิ่มระดับสีแดง (a^*) ในกุ้งขาวแวนนาไมให้เพิ่มสูงขึ้นได้ ดังนั้น จึงได้

ข้อเสนอแนะจากการวิจัยครั้งนี้ว่า ควรมีการศึกษาระดับและชนิดของสารสีที่แน่นอนในสาหร่ายสีแดงน้ำจืดเพื่อการใช้ประโยชน์ในการเพิ่มระดับสีแดงของกุ้งขาวแวนนาไมและกุ้งเศรษฐกิจชนิดอื่น ๆ ต่อไป

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งบรายได้ประจำปีงบประมาณ 2563

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมประมง. สถิติผลผลิตการเลี้ยงกุ้งทะเลประจำปี 2561. เอกสารฉบับที่ 2/2563. กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง. กรมประมง. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ, 2563.
- [2] วรณิณี จันทระแก้ว และชยากร ภูมาศ. ปริมาณรงควัตถุในสาหร่ายสีแดงน้ำจืดบางชนิดจากจังหวัดนครศรีธรรมราช. วารสารเทคโนโลยีการประมง, 2556, 7(S1), หน้า 61-70.
- [3] ชลอ ลีสมุวรรณ และคณะ. ผลของการแช่กุ้งขาวแวนนาไมในถังที่มีสีแตกต่างกันต่อคุณภาพสีของกุ้งต้ม. เอกสารเผยแพร่ ศูนย์วิจัยธุรกิจเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.
- [4] ธัชศักดิ์ พร้อมคุ้ม และคณะ. ผลของสาหร่ายสไปรูลิน่า สาหร่ายไก่อ ต่อการกระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกันและปรับปรุงสีของปลาทอง. การประชุมวิชาการสาหร่ายและแพลงก์ตอนแห่งชาติ ครั้งที่ 5, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2554.
- [5] วัฒนา วัฒนกุล และอุไรวรรณ วัฒนกุล. ผลของสารสกัดจากสาหร่ายสีแดงน้ำจืดต่อสีผิวและการเจริญเติบโตของปลาทอง. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 30 ประจำปี 2563 และการประชุมวิชาการระดับชาติคณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ ครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยทักษิณ, สงขลา, 2563, หน้า 1112-1118.
- [6] จริญญา จันทลักขณา. สถิติวิธีวิเคราะห์และวางแผนวิจัย. ภาควิชาสัตวบาล, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2540.
- [7] สุปราณี ชินบุตร และคณะ. ยาและสารเคมีเพื่อป้องกันและรักษาโรคสัตว์น้ำ. เอกสารเผยแพร่ กรมประมง, สถาบันวิจัยสุขภาพสัตว์น้ำ, กรมประมง, กรุงเทพฯ, 2543.
- [8] de Quirós and Costa. Analysis of carotenoids in vegetable and plasma samples: A Review. J. Food Compos. Anal., 2006, (19), p.p. 97–111.
- [9] ชลอ ลีสมุวรรณ และคณะ. การเพิ่มความเข้มของสีเปลือกและลดปัญหาหัวแตกหลังจากต้มกุ้งขาวแวนนาไม. เอกสารเผยแพร่สำหรับเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้ง ป.พ.ศ. 2550, ศูนย์วิจัยธุรกิจเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ, คณะประมง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, 2550.
- [10] เวียง เชื้อโพธิ์หัก. โภชนศาสตร์สัตว์น้ำและการให้อาหารสัตว์น้ำ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2543.
- [11] กิจการ ศุภมาตย์ และคณะ. รายงานโครงการวิจัยผลของแหล่งสารสีธรรมชาติต่อการเร่งสีและความต้านทานความเครียดในกุ้งขาว. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2549.

- [12] Pan *et al.* Effects of light regime, algae in the water and dietary astaxanthin on pigmentation, growth, and survival of black tiger prawn *Penaeus monodon* post-larvae. Zoological studies, 2001, 40(4), p.p. 371-382.
- [13] Boonyaratpalin *et al.* Effects of β -carotene source, *Dunaliella salina*, and astaxanthin on pigmentation, growth, survival and health of *Penaeus monodon*. Aqua Res., 2001, (31), p.p. 182-190.
- [14] ทนงค์ดี สัสดีแพง และสุริวัณย์ ชุ่มแก้ว. การเสริมพริกหยวกสีแดง พริกหยวกสีเหลือง และแครอทเพื่อเพิ่มสีเปลือกกุ้งสวยงาม. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา, ลำปาง, 2560.

การควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

SPEED CONTROL OF DC SERVO MOTOR WITH PID CONTROLLER BY USING PIC MICROCONTROLLER

กำจัด ใจตรง*¹ สงกรานต์ ภารกุล² และ ณรงค์ฤทธิ์ ยิ้มเจริญพรสกุล³

Kumjat Jitrong*¹, Songkran Parakul², Narongrid Yimcharoenpornsakul³

¹⁻²สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าและระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

³สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

*ผู้ติดต่อ: E-mail : kumjat_jitrong@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงแบบวงปิดโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตตระกูล PIC รุ่น 18F4431 เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวประมวลผลด้านการควบคุม โดยการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงจะใช้วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์แบบวงปิดเพื่อสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดี ผลจากการทดลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงแบบพีไอดีที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC รุ่น 18F4431 สามารถควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่าความผิดพลาดของความเร็วยังคงต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 1 วินาที ทั้งในกรณีที่ไม่มีภาระและมีภาระ

คำสำคัญ: ตัวควบคุมแบบพีไอดี, การควบคุมความเร็วแบบวงปิด, เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง, ไมโครคอนโทรลเลอร์

ABSTRACT

The objective of this research is to a PID controller design for closed-loop DC servo motor speed control by using the 8-bit PIC18F4431 microcontroller to apply as a control processor. The DC servo motor controlling is using Ziegler-Nichols closed-loop method for creating a PID controller. The experimental results show that the PID DC servo motor speed controller built with

วันที่รับบทความ 6 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 19 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

the PIC microcontroller 18F4431 can precisely control the speed of the DC servo motor. The steady-state speed error is less than one percent and takes about one second to reach steady-state, both at no load and under load.

Keywords: PID Controller, Closed-loop Speed Control, DC Servo Motor, Microcontroller

1. บทนำ

สถานการณ์ในโลกปัจจุบันเป็นยุคที่ก้าวล้ำทางเทคโนโลยี ทำให้เกิดนวัตกรรมที่มีขนาดเล็ก ซึ่งนวัตกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรง และมีความแม่นยำในการผลิตเป็นอย่างมาก ส่งผลให้เทคโนโลยีด้านการควบคุมมีความก้าวหน้า อาทิ เช่น เทคโนโลยีด้านการควบคุมความเร็ว เทคโนโลยีด้านการควบคุมตำแหน่ง และเทคโนโลยีด้านการตรวจวัด เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมภายในประเทศจำเป็นต้องพึ่งพาอาศัยเทคโนโลยีเหล่านี้เป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและมูลค่าของสินค้าที่ส่งออกทั้งภายในและภายนอกประเทศ ในปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ด้วยความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีทางอิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเรื่องง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งพบเห็นได้ตั้งแต่การใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน การใช้ในหุ่นยนต์ตลอดจนเครื่องจักรกลที่ทำงานแบบอัตโนมัติในอุตสาหกรรมต่างๆ และด้วยความก้าวหน้าของไมโครคอนโทรลเลอร์ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในกระบวนการผลิต ระบบควบคุมจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยตัวควบคุมแบบป้อนกลับแบบพีไอดีเป็นที่นิยมใช้งาน ซึ่งตัวควบคุมดังกล่าวจะถูกประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ สมองกลฝังตัว เป็นต้น โดยจะออกแบบให้เหมาะสมกับการควบคุมในงานแต่ละประเภท จากข้อมูลที่กำลังกล่าวมาข้างต้นทำให้การเลือกใช้ตัวประมวลผลมีความเหมาะสม ดังนั้นบทความนี้จะได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงวงปิดโดยใช้การส่งการไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC รุ่น 18F4431 เพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวประมวลผลด้านการควบคุมระบบ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็กกะทัดรัดและยังมีฟังก์ชันการใช้งานที่หลากหลาย และยังสามารถควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างแม่นยำทั้งในขณะที่ไม่มีการและมีการะ

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

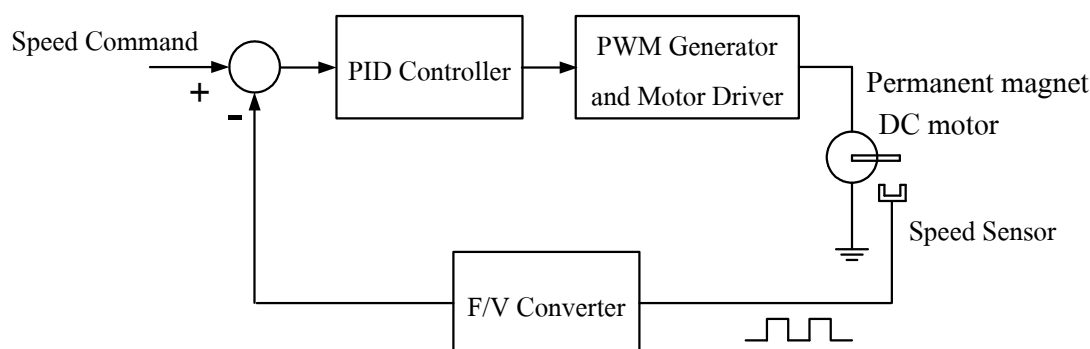
2.1 การทบทวนวรรณกรรม

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนิยมใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่สร้างจากไอซีออปแอมป์เพื่อควบคุมแบบวงปิด โดยใช้ตัวตรวจจับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ [1] การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ซึ่งการปรับค่า K_p , K_i , K_d ที่เหมาะสมมาจากอัลกอริทึมหึ่งห้อย เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ไปควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง [2] ส่วนการจำลองการทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมี

แรงบิดโหลด การเพิ่มขึ้นของตัวควบคุมแบบพีไอดีได้รับการปรับแต่งด้วยเทคนิคตัวควบคุมแบบกำลังสองเชิงเส้น สำหรับการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในโปรแกรมโปรโตส ได้สร้างคุณสมบัติการเพิ่มโหลดแรงบิดไปยังมอเตอร์กระแสตรง [3] การปรับแต่งพารามิเตอร์พีไอดีได้มีการพัฒนาวิธีการปรับแต่งอัตโนมัติหลายวิธี โดยวิธีการปรับอัตโนมัติด้วย Astrom และ Hagglund ถูกนำไปใช้กับระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พารามิเตอร์พีไอดีที่ได้รับจากการทดลองผิดพลาดและวิธีการปรับแต่งอัตโนมัติ โดยทั้งสองแบบนี้ได้ทดสอบในระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ผลการวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ปรับด้วยวิธีการปรับแต่งอัตโนมัติของ LABVIEW นั้นดีกว่าตัวอื่นๆ [4] การสร้างแบบจำลองพลวัตของระบบโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ/ซิมูลิงค์ เพื่อใช้ออกแบบและจำลองระบบควบคุมใหม่ให้รักษาความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยอัตโนมัติขึ้นอยู่กับตัวควบคุมแบบพีไอดี [5] การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้วิธี PI, PID, Ziegler Nichols และตัวควบคุม IMC-PID เพื่อให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุม จากผลการจำลองพลวัตของระบบโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ/ซิมูลิงค์ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวควบคุม IMC-PID สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้อย่างรวดเร็วและไม่เกิดโอเวอร์ชูตขึ้น เมื่อเทียบกับวิธีอื่นๆ [6] การออกแบบตัวควบคุมพีไอผ่าน Genetic algorithm สำหรับการระบุพารามิเตอร์ของโมเดลและค้นหาค่าพีไอที่เหมาะสมเพื่อใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ โดยผลที่ได้การทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบจีเอพีไอสามารถเพิ่มเสถียรภาพด้านความเร็วเชิงมุมและการตอบสนองต่อการควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบพีไอ [7] การปรับแต่งตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้อัลกอริธึมเมตาฮิวริสติก สามารถควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดีกว่าเทคนิคคลาสสิกมาก โดยอัลกอริธึมเมตาฮิวริสติกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาที่ซับซ้อนเช่นการปรับตัวควบคุมแบบพีไอดี [8]

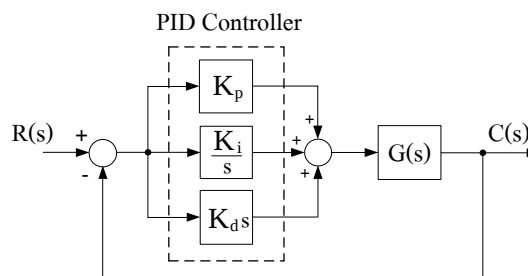
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในภาพที่ 1 และมี การพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด โดยการใช้การสั่งการไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC รุ่น 18F4431



ภาพที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด

ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่ทำงานโดยการนำค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับค่าปัจจุบันที่ได้จากกระบวนการ (process) มาสร้างสัญญาณเอาต์พุตใหม่ ด้วยการขยายความผิดพลาดของสัญญาณดังกล่าวด้วยค่าเกน(gain) โครงสร้างการทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังแสดงในภาพที่ 2 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เอาต์พุตของตัวควบคุม จะเกิดจากสามองค์ประกอบ คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (K_p : Proportional Control) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (K_i : Integral Control) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (K_d : Derivative Control) ซึ่งทั้ง 3 ส่วนของตัวควบคุมจะนำค่าเอาต์พุตไปคูณกับค่าเกนของตัวควบคุมแต่ละชนิด โดยค่าเกนดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดผลตอบสนองของระบบ โดยรูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดีจะเป็นไปตามสมการที่ (1)



ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอดี

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

การหาค่าเกนที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมใดๆ มีวิธีการหาค่อนข้างยาก ในปัจจุบันได้มีการทดสอบระบบเพื่อหาค่าเกนที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งมีหลายวิธี เช่น วิธีการของซีเกลอร์-นิโคล (Ziegler-Nichols Compensation) วิธีการของเซน-ฮรอน-เรสวิก หรือ ซีเฮสอาร์ (Chien-Hrones-Reswick or CHR) เป็นต้น โดยในการออกแบบตัวควบคุมจะใช้วิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ใช้สำหรับปรับค่าอัตราขยายแบบพีไอดี เป็นวิธีการสำหรับปรับปรุงหรือพัฒนาตัวควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมมีผลการตอบสนองช่วงชั่วคราวและผลการตอบสนองในสถานะอยู่ตัวตามที่ต้องการ ซึ่งวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับผู้ที่มีความชำนาญและอาศัยประสบการณ์และการสังเกตเป็นวิธีที่ใช้กันมานาน แต่บางครั้งไม่สามารถหาเหตุผลมาอธิบายในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมได้ดี ในการออกแบบระบบควบคุมจำเป็นต้องเลือกรูปแบบของตัวควบคุมและคำนวณหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุม ดังนั้นจึงมีการออกแบบสูตรสำเร็จที่ใช้เป็นกฎพื้นฐานเพื่อเป็นแนวทางในการปรับค่าอัตราขยายของตัวระบบควบคุม โดยรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 [9]

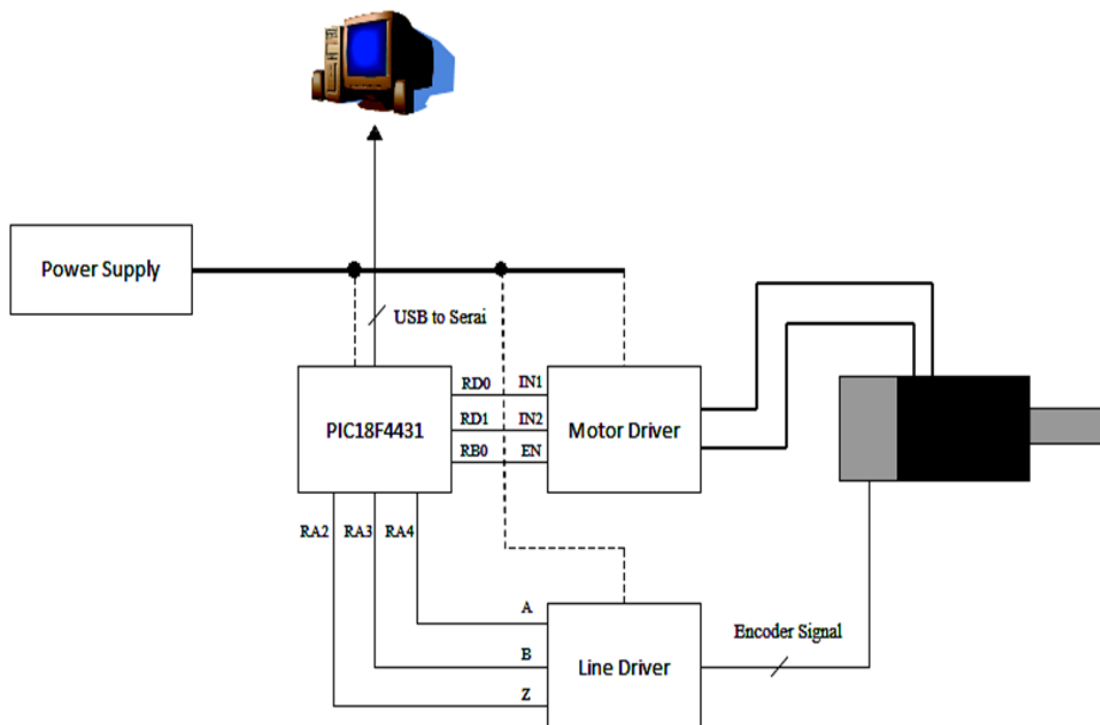
ตารางที่ 1 สรุปตัวแปรการปรับแต่งค่าอัตราขยายสำหรับวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์แบบวงปิด

รูปแบบการควบคุม	ตัวแปรการปรับแต่งค่าอัตราขยายสำหรับวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์แบบวงปิด
ตัวควบคุมแบบพี	$K_p = 0.5 * K_u$
ตัวควบคุมแบบพีไอ	$K_p = 0.45 * K_u$, $K_i = 1.2 / T_u$
ตัวควบคุมแบบพีไอดี	$K_p = 0.6 * K_u$, $K_i = 2 / T_u$, $K_d = T_u / 8$

3. วิธีการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตตระกูล PIC รุ่น 18F4431 โดยทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีการติดตั้งโปรแกรม CCS C Compiler ซึ่งแผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่ใช้แสดงในภาพที่ 3 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. บอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบบมัลติ-คอนโทรลเลอร์

เป็นบอร์ดทดลองไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ที่ใช้งานกับไอซี PIC18F4431 เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ ตามคำสั่งที่เขียนในโปรแกรม CCS C Compiler

2. บอร์ดขับเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นบอร์ดขับเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รุ่น EVO24V9.2 ใช้ไอซีเบอร์ VNH3SP30 จาก ST Microelectronic สามารถขับกระแสสูงสุดได้ 30 A รองรับแรงดันสูงสุดได้ที่ 28 V มีวงจรป้องกันการรบกวนจากมอเตอร์ด้วย Opto-Isolator มีวงจรป้องกันการต่อไฟเลี้ยงกลับขั้ว สามารถต่อควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้โดยตรง เพื่อควบคุมทิศทางหมุนของมอเตอร์และควบคุมความเร็วของมอเตอร์ด้วยสัญญาณพัลส์บลิวเอ็ม

3. เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 200 W ที่แรงดัน 24 V

4. เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง ขนาด 200 W ที่แรงดัน 24 V ที่ติดตั้งกับเพลลาของเซอร์โวมอเตอร์
กระแสตรง

5. วงจรแปลงสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์

เป็นวงจรที่ใช้แปลงสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ให้เป็นสัญญาณพัลส์ เพื่อป้อนกลับไปยังบอร์ดทดลอง
ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อนำสัญญาณไปคำนวณหาความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

6. เครื่องโปรแกรม PICkit 3

เป็นเครื่องโปรแกรมและดีบั๊กไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC, dsPIC, PIC24 และ PIC32 แบบในวงจรหรือ
ICSP(in-Circuit System Programming) ของ Microchip เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ผู้ใช้งาน
สามารถนำ PICkit3 โปรแกรมข้อมูลลงในไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ดทดลอง

7. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบ โดยทำหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าจาก 220 V เป็น 24 V

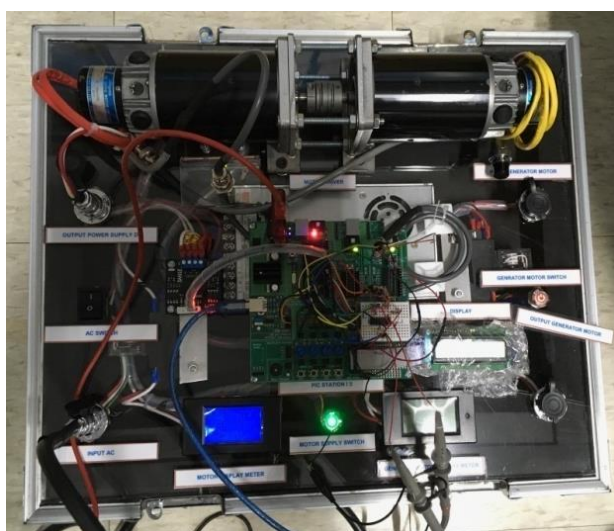
8. เครื่องคอมพิวเตอร์

ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ โดยใช้โปรแกรม CCS C Compiler เพื่อเขียนคำสั่งในการรับค่า
สัญญาณต่างๆ เช่น เชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรม รับค่าความเร็วรอบจากเอ็นโค้ดเดอร์ สร้างสัญญาณพีดับบลิวเอ็มให้
สอดคล้องกับความเร็วรอบและกำหนดขอบเขตของดูตัสเซลล์

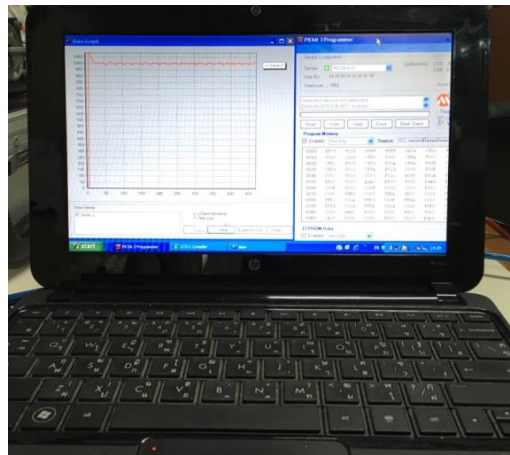
9. โหลดทางไฟฟ้า

ใช้ในการทดสอบโดยจะต่อโหลดทางไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้สร้างโหลดทางกล
ไปดำเนินการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อนำอุปกรณ์ต่างๆ มาประกอบเป็นชุดทดลองที่สมบูรณ์ รายละเอียดดังแสดงในภาพที่ 4 ถึง ภาพที่ 6



ภาพที่ 4 ชุดทดลองการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดโดยใช้
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC รุ่น 18F4431



ภาพที่ 5 คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน แสดงรูปคลื่นสัญญาณ และเก็บข้อมูลความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 6 ชุดโหนดที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการทดสอบ

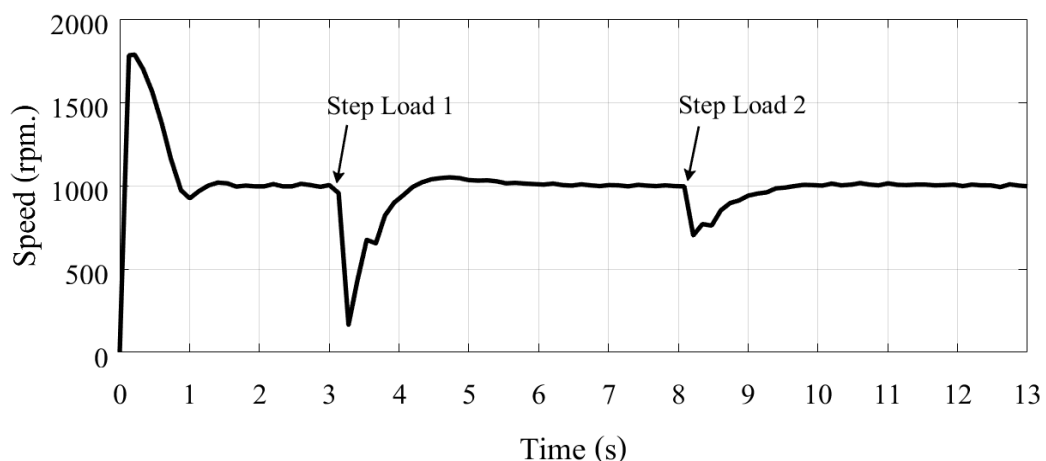
1. เขียนคำสั่งในการควบคุมมอเตอร์ด้วยโปรแกรม CCS C Compiler
2. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าอัตราขยาย K_p , K_i , K_d กำหนดค่าความเร็วที่ต้องการให้มอเตอร์
3. บันทึกความเร็วรอบของมอเตอร์จากโปรแกรมที่ป้อนกลับมาจากตัวนับรอบ ติดตั้งกับตัวมอเตอร์
4. นำค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จากโปรแกรมมาพล็อตกราฟด้วยโปรแกรมแม็ตแล็บเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของมอเตอร์ที่มีต่อตัวควบคุมแบบพีไอดี

4. ผลการวิจัย

ในการทดลองจะทำการทดสอบผลตอบสนองของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์แบบวงปิดดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความเร็วรอบคงที่ 1,000 รอบต่อนาที โดยจะใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมของระบบในตารางที่ 2 และทดสอบผลตอบสนองของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสถานะที่มีการเพิ่มโหลดเข้าไป 2 ชุด โดยแต่ละชุดมีขนาด 50 วัตต์ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับระบบ

รูปแบบการควบคุม	K_p	K_i	K_d
ตัวควบคุมแบบพีไอดี	0.25	0.5	0.0001



ภาพที่ 7 ผลตอบสนองของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อต่อกับโหลด

จากผลการทดลองในภาพที่ 7 เมื่อเปิดโหลดชุดที่ 1 จะเห็นว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ตัวควบคุมแบบพีไอดีจะควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วรอบที่อ้างอิง จากนั้นเมื่อเพิ่มโหลดชุดที่ 2 ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงอีกตัวควบคุมแบบพีไอดียังสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วรอบที่อ้างอิงได้เช่นเดิม ซึ่งการบันทึกผลการทดลองจากโปรแกรม CCS C Compiler ที่มีการป้อนกลับความเร็วรอบมอเตอร์ จะทำการพล็อตกราฟด้วยโปรแกรมแม็ตแล็บ ผลปรากฏว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถแก้ไขค่าผลตอบสนองความไว(sensitivity) ให้แก่ระบบได้ดี

5. อภิปรายผล

จากการออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการควบคุมความเร็วรอบเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด โดยใช้การสั่งการไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิตตระกูล PIC รุ่น 18F4431 สามารถควบคุมความเร็วรอบเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้อย่างแม่นยำทั้งในกรณีที่ไม่มีภาระและมีภาระตามทฤษฎีของซีเกลอร์-นิโคลส์แบบวงปิดที่ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยผลตอบสนองของระบบควบคุมความเร็วรอบ

ของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงที่ได้มีค่าโอเวอร์ชูตประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ค่าความผิดพลาดของความเร็รรอบที่สถานะคงตัวน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัวประมาณ 1 วินาที

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bhagat, Nikunj A., Bhaganagare, Mahesh, & Pandey, P. C. **DC motor speed control using PID controllers.** In EE 616 electronic system design course project, EE Dept, IIT Bombay, November 2009 (Online).
Available: bhagatnikunj.weebly.com/uploads/1/0/4/6/10469153/esd_report.pdf [2014, July 27].
- [2] S. Reeba Rex, Mary Synthia Regis Prabha. **A speed control of DC motor with PWM using microcontroller in hardware in loop,** International Journal of Engineering & Technology, 2018, pp.116-119
- [3] Sohaib Aslam, Sundas Hannan, Umar Sajjad, Waheed Zafar. **Implementation of PID on pic24f series microcontroller for speed control of a dc motor using mlab and proteus,** Advances in Science and Technology – Research Journal, Vol. 10, No.31, 2016, pp.40-50
- [4] Said Mahmut Cinar, Zekeriya Balci, Ismail Yabanova. **Performing speed control of a DC motor with auto-tuning PID,** Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 2019, pp.690-696
- [5] Salman Jasim Hammoodi, Kareem Sayegh Flayyih, Ahmed Refaat Hamad. **Design and implementation speed control system of DC motor based on PID control and matlab simulink,** International Journal of Power Electronics and Drive System, Vol. 11, No.1, 2020, pp.127-134
- [6] Amarapini Divya, Prasadaraobobbili. **Comparison and speed control of DC motor and DC servomotor using IMC based PID controller,** International Journal for Modern Trends in Science and Technology, 2020, pp.493-501
- [7] Hamza Alzarok, Aiyoub H. Musbah. **Tuning of a speed control system for DC servo motor using genetic algorithm,** The international journal of engineering and information technology, Vol. 6, No. 2, 2020, pp.141-150
- [8] Mirza Muhammad Sabir, Junaid Ali Khan. **Optimal design of PID controller for the speed control of DC motor by using metaheuristic techniques,** Advances in Artificial Neural Systems, Vol 2014, pp.1-8
- [9] Katsuhiko Ogata. **Modern control engineering,** Prentice-Hall International, United Kingdom, 1997, pp.672-673

อิทธิพลของความลาดชันบนทางหลวงต่ออุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ

INFLUENCE OF HIGHWAY DRIVING TERRAIN TO HUB-MOTOR TEMPERATURE

ธเนศ วิลาสมงคลชัย^{*1} ณรงค์ฤทธิ์ ยิ้มเจริญพรสกุล²Thanet Vilasmongkolchai¹, Narongrit Yimcharoenpornsakul²^{*1} คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม² สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

*thanetv@siamtechno.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการทดสอบปัจจัยด้านความลาดชันของพื้นถนนต่ออุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ โดยทำการบันทึกผลระหว่างการแข่งขันในรายการ Bridge Stone World Solar Challenge 2019 โดยมีระยะในการแข่งขันทั้งสิ้น 3,022 กิโลเมตร ซึ่งผ่านภูมิประเทศและสภาพอากาศที่แตกต่างกัน ให้ผลการกระจายตัวของความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชันที่เปลี่ยนแปลง พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในช่วงผลต่างของอุณหภูมิที่ 28°C ทั้งนี้ไม่สามารถเห็นผลเชิงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความลาดชันมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิอาจมีการสะสมจากการเปลี่ยนแปลงของความลาดชันในสภาพภูมิประเทศแบบเนินเขา ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลรวมกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดช่วงระยะทาง พบว่าหากอุณหภูมิของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นมากกว่างานการทำงานในสภาวะปกติก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าลดต่ำลง

คำสำคัญ: มอเตอร์แบบดุมล้อ, อุณหภูมิ, สภาพทาง

ABSTRACT

This research aims to test the effect of road terrain on the temperature of BLDC hub motor. The data has been collected during Bridgestone World Solar Challenge 2019, over 3,022 km route through difference terrain and difference ambient temperature. The results shown the relationship between the different of motor temperature and ambient temperature on the road terrain mostly distributed on 28 °C but it is not clearly present as the trend. That because the cumulative heat in the motor's cover during drive through the change of road slope as hill shaped terrain.

วันที่รับบทความ 6 มีนาคม 2564

วันที่แก้ไขบทความ 19 มีนาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

On the consideration of energy consuming along the route, found that the motor's temperature can be degrade the driving efficiency whenever the motor's temp exceeds the working temperature range.

Keywords: BLDC Hub-motor, Temperature, Road Terrain

1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันไม่เพียงแต่ปัญหาด้านพลังงานที่สร้างความตื่นตัวให้กับประชากรโลก แต่สถานการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทุกคนให้ความสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานในภาคการขนส่งที่ทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ และยิ่งในพื้นที่เมืองที่มีการจราจรที่ติดขัดย่อมเกิดมลภาวะทางอากาศจากแก๊สที่เป็นผลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเป็นทวีคูณ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวทำให้ช่วง 10 ปีที่ผ่านมา เทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีจุดเด่นด้านการใช้พลังงานสะอาด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีการขับเคลื่อนนี้สามารถจำแนกกลุ่มวิจัยได้หลากหลาย ทั้งในส่วนของมอเตอร์ ส่วนควบคุม และส่วนของการส่งถ่ายกำลัง ทั้งนี้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบดุมล้อ ถือเป็นตัวเลือกสำคัญตัวเลือกหนึ่งของยานยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีการส่งถ่ายกำลังจากชุดเกียร์ทำให้ไม่เกิดการสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้น แต่ต้องแลกมาด้วยความต้องการแรงบิดจากมอเตอร์ที่ต้องสร้างแรงขับที่ล้อโดยตรง ซึ่งมอเตอร์แบบดุมล้อนี้สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปในรถจักรยานไฟฟ้า จักรยานยนต์ไฟฟ้า ตลอดจนรถยนต์ไฟฟ้าขนาดเล็ก แต่อาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์แบบดุมล้อนี้จะระบบขับเคลื่อนสำหรับยานยนต์ไฟฟ้าสมัยใหม่ในอนาคตอันใกล้ ซึ่งสามารถพบเห็นเทคโนโลยีนี้ใช้งานจริงแล้วในรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar EV) ตลอดจนชุดรองรับรถยนต์ไฟฟ้า (EV platform)

ปัญหาสำคัญประการหนึ่งของระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าคืออุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าจะลดต่ำลงโดยอัตโนมัติ และเนื่องจากการใช้งานทำให้ปัญหาด้านอุณหภูมิไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การขับเคลื่อนบนทางชันจะทำให้มีความต้องการกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นและส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้นตามไปด้วย และขณะเดียวกันเมื่อรถมีอัตราหน่วงจะเกิดกระแสไฟฟ้าย้อนกลับ (regenerative) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้มอเตอร์และกล่องควบคุมมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์แบบดุมล้อที่รับภาระโดยตรงจากล้อ ดังนั้นแล้วการทดลองการขับขึ้นถนนจริงจึงเป็นข้อมูลสำคัญต่อการพัฒนาเทคโนโลยีการขับเคลื่อน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของสภาพการขับขึ้นทางหลวงต่ออุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ โดยทำการทดสอบการวิ่งจริงบนถนน Stuart Highway ซึ่งเป็นทางหลวงเส้นหลักของประเทศออสเตรเลีย ทำให้สามารถบันทึกผลต่อภูมิประเทศที่แตกต่างกัน รวมถึงอุณหภูมิของบรรยากาศที่แตกต่างกันด้วย

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาของระบบสะสมพลังงานอย่างแบตเตอรี่ที่ประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนผ่านเทคโนโลยีจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน ไปสู่การใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นระบบขับเคลื่อน เนื่องด้วยข้อได้เปรียบของมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหนือกว่าทั้งในเชิงสมรรถนะ ประสิทธิภาพ การบำรุงรักษา ตลอดจนด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเมื่อ

พิจารณาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องยนต์สันดาปภายในและมอเตอร์ไฟฟ้าแล้ว ปัญหาหลักที่ยังคงต้องคำนึงถึงอยู่ตลอดคือความร้อนจากการใช้งาน โดยการแก้ปัญหาโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการหล่อเย็นหรือการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อน

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อความเข้มของสนามแม่เหล็กและทำให้แรงบิดลดลงไปด้วย [1, 2] ทั้งนี้ได้มีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบไร้แปรงถ่านกับประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า โดยตั้งข้อสังเกตถึงบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่มีการผลิตในประเทศที่ไม่ใช่เขตร้อน แต่เมื่อมีการใช้งานในเขตร้อนประสิทธิภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งผลการทดสอบพบว่าความต้านทานของขดลวดที่เพิ่มขึ้นจากผลของอุณหภูมิทำให้แรงบิดลดลงแต่ความเร็วรอบสูงขึ้น [3]

นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้าไม่เพียงแต่อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นจากความต้องการกระแสไฟฟ้าในการทำงานเท่านั้น การที่รถยนต์ไฟฟ้ามีการหน่วงความเร็วลง มอเตอร์จะกระทำหน้าที่เสมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟกลับให้แบตเตอรี่ (regenerative braking) กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถลดการใช้พลังงานได้ 8-25% [4] ดังนั้นแล้วการเกิดกระแสไฟย้อนกลับย่อมทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นแล้วสภาพภูมิประเทศและความลาดชันของผิวนถนนจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นต่อมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมอเตอร์แบบดุมล้อที่ทำการขับเคลื่อนโดยตรงที่ล้อโดยไม่ผ่านการทดด้วยกล่องเกียร์ ซึ่งแม้ว่าจะมีการโต้เถียงกันเรื่องการทดเกียร์เพื่อเพิ่มแรงบิดด้วยกล่องเกียร์ หรือลดการสูญเสียจากกล่องเกียร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของรถยนต์ไฟฟ้า [5-7] แต่ด้วยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้ามากขึ้นของมอเตอร์ไฟฟ้าผนวกกับการติดตั้งเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นต่อพื้นที่ใช้สอย [7] จึงอาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์แบบดุมล้อจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคตอันใกล้ ทั้งนี้สิ่งหนึ่งที่พึงระวังสำหรับมอเตอร์แบบดุมล้อคือความผันผวนของแรงบิดซึ่งเป็นผลมาจากการไม่มีกล่องเกียร์เพื่อทดเกียร์ ดังนั้นความต้องการกระแสไฟฟ้าเพื่อตอบสนองต่อโหลดหรือกล่าวคือ สภาพผิวการจราจรและสภาพภูมิประเทศจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ขึ้นตรงกับอุณหภูมิของมอเตอร์แบบดุมล้อ

สำหรับปัจจัยภายนอก อาทิ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ก็มีการส่งผลกระทบต่อศักยภาพในการระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า นอกจากนี้อุณหภูมิของผิวนถนนที่มีการแผ่รังสีมายังมอเตอร์แบบดุมล้อนั้นเป็นปัจจัยเสริมให้อุณหภูมิในการทำงานของมอเตอร์แบบดุมล้อสูงขึ้นไปอีก จากงานวิจัยพบว่าในช่วงอุณหภูมิสูงสุด ผิวนถนนชนิดยางมะตอยจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศถึง 20.96°C [8]

3. วิธีการวิจัย

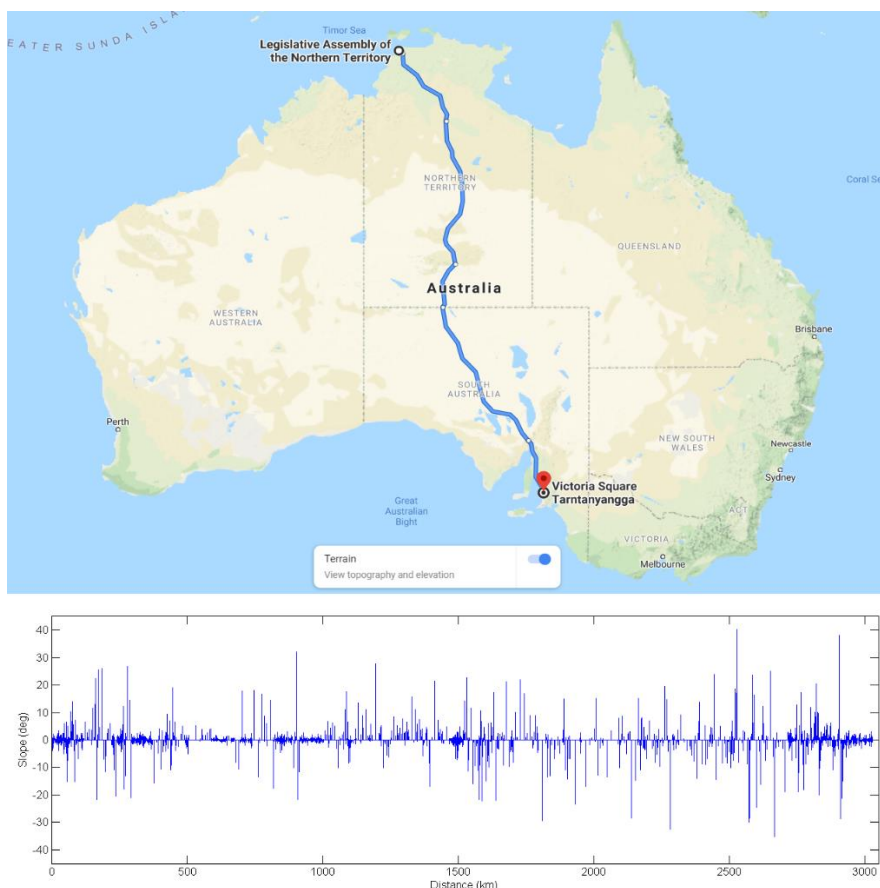
งานวิจัยนี้ได้ทำการบันทึกผลระหว่างการแข่งขันในรายการ Bridge Stone World Solar Challenge 2019 ณ ประเทศออสเตรเลีย โดยมีระยะในการแข่งขันทั้งสิ้น 3,022 กิโลเมตร ตลอดเส้นทางจากเหนือสุดของทวีปไปยังใต้สุดของทวีป ซึ่งทำให้ผ่านภูมิประเทศและสภาพอากาศที่แตกต่างกันอย่างมาก ดังนั้นแล้วการแปลผลที่ได้จากการแข่งขันจึงไม่อาจสามารถทำการแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลแบบต่อเนื่องได้ จึงมีความจำเป็นต้องจำแนกข้อมูลออกเป็น ด้านภูมิประเทศ ซึ่งประกอบด้วยเส้นทางชันและเส้นทางลาด และด้านอุณหภูมิของบรรยากาศโดยทำการติดตั้งให้เครื่องมือวัดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับมอเตอร์ เพื่อรวมผลกระทบจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดจากการแผ่รังสีของผิวนถนนด้วย ซึ่งสามารถแสดงตารางแสดงตัวแปรได้ดังตารางที่ 1 นอกจากนี้เพื่อลดผลกระทบจาก

การสะสมของอุณหภูมิ วัสดุห่อหุ้มมอเตอร์ทำจากอลูมิเนียม และระบายความร้อนด้วยอากาศโดยผ่านอากาศจากช่องด้านข้างของตัวรถ ทั้งนี้ทุกค่าการทดลองจะถูกเก็บจากมอเตอร์แบบคูลล์ที่ใช้ขับเคลื่อนล้อหลังจำนวน 2 ตัว (ซ้าย-ขวา) ซึ่งทำงานอย่างอิสระต่อกันด้วยวงจรเพื่อง่ายอิเล็กทรอนิกส์ (electronics differential gear) และหาค่าเฉลี่ย และเพื่อให้การวัดค่าอุณหภูมิสอดคล้องกับพฤติกรรมเชิงไฟฟ้าของมอเตอร์ จะทำการวัดค่าอุณหภูมิภายในมอเตอร์หลังจากค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากกล่องควบคุมอยู่ในสภาวะคงตัว (steady-state) ทั้งนี้ความเร็วในการขับจะปรับตั้งให้อยู่ที่ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสภาพเส้นทางไม่เกินร้อยละ 5

ในส่วนของการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพด้านพลังงาน จะทำการพิจารณาในภาพรวมตลอดเส้นทางการแข่งขันโดยสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วง ซึ่งเป็นการแบ่งระยะตามระเบียบของการแข่งขัน ซึ่งอนุญาตให้ประจุไฟฟ้าจากสถานีชาร์จเพิ่มได้

ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวแปรและการบันทึกผลการวิจัย

ตัวแปร	ช่วงตัวแปร	ค่าข้อมูล
น้ำหนักของรถยนต์ไฟฟ้ารวมผู้โดยสาร	1	705kg
ความเร็วเฉลี่ย	1	80kph $\pm$ 5%
อุณหภูมิบรรยากาศ	3	5-19°C 20-34°C 35-49°C
ความลาดชันของผิวถนน	n/a	ตรวจวัด
อุณหภูมิกล่องควบคุม	n/a	ตรวจวัด
อุณหภูมิมอเตอร์	n/a	ตรวจวัด

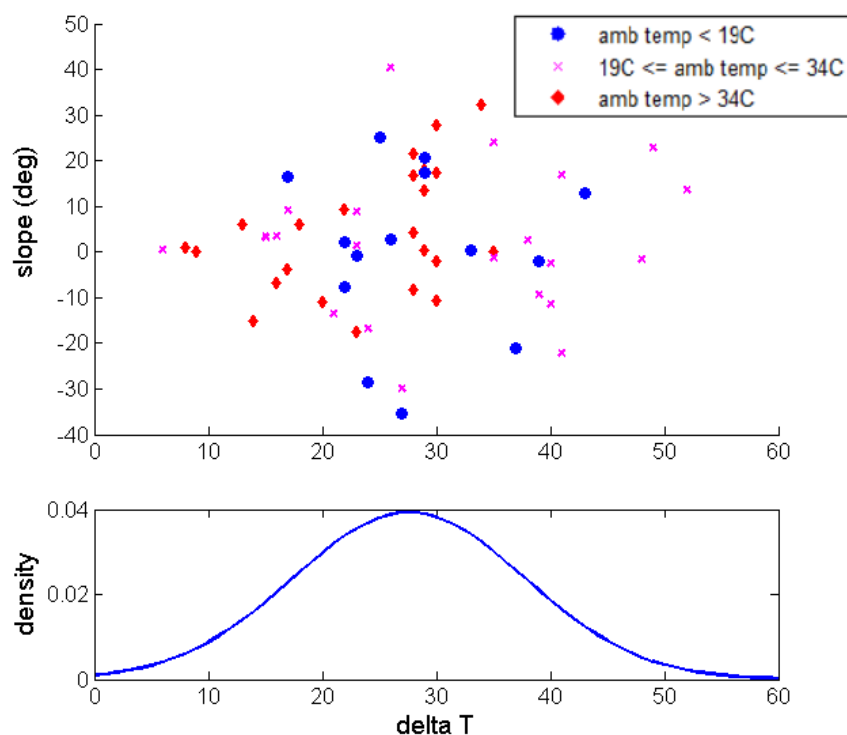


ภาพที่ 1 เส้นทางการแข่งขัน 3,022 กิโลเมตร และความชันตลอดเส้นทาง

4. ผลการวิจัย

การแข่งขันในรายการ Bridge Stone World Solar Challenge 2019 ณ ประเทศออสเตรเลีย บนถนน Stuart Highway โดยมีระยะทางรวม 3,022 กิโลเมตร สามารถแสดงความลาดชันของผิวการจราจรตลอดเส้นทางได้ดังภาพที่ 1 ซึ่งสามารถเห็นสภาพถนนตามภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นพื้นราบ (ความชัน=0) รวมทั้งมีส่วนพื้นที่ลาดชันสูง ตลอดจนภูมิประเทศแบบเนินเขา (ความถี่ของการเปลี่ยนแปลงความลาดชันสูง) ทั้งนี้ผลการวิจัยจะนำค่าที่ตรวจวัดได้โดยสุ่มจากสภาพพื้นถนน โดยมีช่วงเวลาเก็บผลแตกต่างกันตลอดวัน ตั้งแต่ 08:00น. ถึง 17:00 น. ตามเวลาท้องถิ่น ซึ่งสามารถแสดงผลการตรวจวัดในเชิงของผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์ไฟฟ้าและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ต่อการเปลี่ยนแปลงความลาดชันของพื้นถนน (องศา) ได้ดังภาพที่ 2 ทั้งนี้สามารถแจกแจงข้อมูลตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

- อุณหภูมิต่ำกว่า 19°C (จุดกลมสีน้ำเงิน)
- อุณหภูมิตั้งแต่ 19°C ถึง 34°C (กากบาทสีม่วง)
- อุณหภูมิสูงกว่า 34°C (จุดข้าวหลามตัดสีแดง)



ภาพที่ 2 ผลต่างของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิของมอเตอร์แบบคูลล์ ต่อความลาดชันเฉลี่ยของผิวจราจร

ผลการกระจายตัวของชุดข้อมูลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชันที่เปลี่ยนแปลง สามารถแปรผลได้ตามการกระจายตัวเส้นโค้งมาตรฐาน (ภาพที่ 2 ล่าง) พบว่าการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในช่วงผลต่างของอุณหภูมิที่ 28°C ทั้งนี้ไม่สามารถเห็นผลเชิงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความลาดชันมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิอาจมีการสะสมจากการเปลี่ยนแปลงของความลาดชันในสภาพภูมิประเทศแบบเนินเขา ซึ่งมีการขึ้นทางชันและต้องการกระแสไฟฟ้ามากขึ้นและในแนวทางเดียวกันเมื่อลงทางลาดและกำเนิดกระแสย้อนกลับ ส่งผลให้อุณหภูมิของมอเตอร์สูงขึ้นตามปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด

นอกจากนี้จากการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่ในช่วงผลต่างของอุณหภูมิที่ 28°C สามารถแปลผลในเชิงของการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบคูลล์ และสามารถประเมินประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าได้ โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบเชิงพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [9] (ตารางที่ 2) พบว่าเมื่อพิจารณาในส่วนของพลังงานที่ใช้ไป โดยอ้างอิงจากแบบจำลองที่คำนวณจากเส้นทางและสภาพการขับขี่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน น้ำหนักรถและผู้โดยสาร ตลอดจนปัจจัยทางกายภาพอื่นที่อาจเกิดขึ้น พบว่ามีการใช้พลังงานจริงมากกว่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองยกเว้นระยะทางระหว่าง Coober Pedy ไปยัง Adelaide ซึ่งมีอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำจึงอาจสรุปได้ว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานของการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบคูลล์ ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการกระจายตัวของระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชันที่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 2) มีการกระจายตัวเป็นวงกว้างหรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านพลังงานอย่างไม่มีนัยสำคัญมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของมอเตอร์อยู่ในสภาพแวดล้อมในการทำงานที่ยอมรับได้ แต่เมื่อพิจารณาในช่วงเส้นทางจาก Tennant Creek ไป

ยัง Coober Pedy พบว่ามีความคลาดเคลื่อนด้านความต้องการใช้พลังงานค่อนข้างสูงกว่าเส้นทางอื่น ซึ่งเมื่อพิจารณาประกอบกับการกระจายตัวของระหว่างผลต่างของอุณหภูมิต่อความชื้นที่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 2) พบว่าการกระจายของข้อมูลที่แตกต่างกันของอุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมากกว่า 45°C อยู่ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการตอบสนองต่อโหลดด้านความลาดชันของเส้นทาง อยู่สูงกว่าย่านสภาวะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า (อุณหภูมิมอเตอร์ไฟฟ้าสูงสุดที่ตรวจวัดได้ที่ 81°C) จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานจริงมากกว่าแบบจำลอง

ตารางที่ 2 รายละเอียดการใช้พลังงานที่ตรวจวัดได้จากการแข่งขัน

เส้นทางการแข่งขัน	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	พลังงานที่ใช้ตลอดระยะทาง (kWh)		
		Model	Actual	R^2
Darwin to Tennant Creek	43.2	96.25	97.93	0.983
Tennant Creek to Coober Pedy	31.5	94.63	97.71	0.968
Coober Pedy to Adelaide	18.4	65.23	65.08	0.997

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดเด่นจากการทดสอบวิ่งจริงบนถนนหลวงซึ่งเป็นข้อได้เปรียบที่แบบต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ซึ่งให้ข้อมูลในสภาวะงานจริงต่อการแปลผลด้านสภาพทาง แต่ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถทำการเก็บผลโดยควบคุมตัวแปรต่างๆได้โดยสมบูรณ์ อาทิ ไม่สามารถทิ้งระยะเวลายืนตัวของมอเตอร์ไฟฟ้าก่อนทำการทดลองซ้ำ ตลอดจนมีการเก็บผลโดยสุ่มช่วงเวลา ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงอาจเกิดปัจจัยส่งเสริมได้แก่ ความร้อนสะสม และความร้อนจากการแผ่รังสีของผิวถนนด้วย ผลการวิจัยจึงไม่สามารถแสดงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่อความลาดชันมากนัก ทั้งนี้หากสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆได้ดีขึ้นจะสามารถความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของมอเตอร์ต่อความลาดชันได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามความลาดชันของทางจะส่งผลต่ออุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการตอบสนองต่อโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้หากอุณหภูมิของมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าย่านการทำงานในสภาวะปกติก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าลดต่ำลง ซึ่งสามารถเห็นพฤติกรรมได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาผลรวมกับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดช่วงระยะทาง

ทั้งนี้สามารถนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบระบายความร้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบคูลลิ่งแบบแอคทีฟ ซึ่งอาจใช้ระบบควบคุมร่วมด้วยเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดทั้งด้านพลังงานและประสิทธิภาพ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทีมงานรถพลังงานแสงอาทิตย์ STC-3 วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม พร้อมทั้งผู้สนับสนุนการเข้าร่วมแข่งขันทุกท่านทั้งในนามองค์กร และนามบุคคล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Sebastian. **Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets**. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, Vol. 31, No. 2, pp. 353-357.
- [2] Carmen Lungoci and Dan Stoia. **Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of Motors with NdFeB**, Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg 2008., Vol. 53, No. 4, pp. 445–454.
- [3] Garniwa et. al. **Analysis of the Effect of the Motor Temperature to Brushless Direct Current Motor Performance on KARLING Electric Vehicle**. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. No. 1376.
- [4] Z. F. Bai, S. X. Li, and B. G. Cao, **H^∞ Control Applied to Electric Torque Control for Regenerative Braking of an Electric Vehicle**, 2005, Asian Network for Scientific Information, vol. 5.
- [5] Polychronis Spanoudakis et. al. **Experimental Research of Transmissions on Electric Vehicles' Energy Consumption**. 2019, Energies, Vol. 12, No. 388.
- [6] Polychronis Spanoudakis et. al. **Efficient Gear Ratio Selection of a Single-Speed Drivetrain for Improved Electric Vehicle Energy Consumption**. 2020, Sustainability, Vol. 12, No. 9254.
- [7] Yuechao Sun, Man Li and Cong Liao. **Analysis of Wheel Hub Motor Drive Application in Electric Vehicles**. 2016, Global Congress in Manufacturing and Management (GCMM 2016), MATEC Web of Conferences, Vol. 100.
- [8] Peng Yang et. al. **Study on Temperature Field Distribution of Asphalt Overlay on Existing Cement Pavement**. 2017, Advances in Engineering Research (AER), vol. 143, pp.196-203.
- [9] Thanet Vilasmongkolchai, Rattapol Phosri, Pinitnai Sittithai, and Thichakorn Visansakon, **Efficiency Test of Solar Vehicle Towards Australia's Terrain on Stuart Highway 1 Road**, 2020, The 4th International Symposium Bangkokthonburi University, pp. 483-490.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยวัสดุดูดซับ

COMPARISON OF THE FLUORIDE ADSORPTION PERFORMANCE OF ADSORBENT

ปาจริย์ บุญทวี¹ วณิดา ชูอักษร ^{*2}Pajaree Boonthawee¹, Wanida Chooaksorn²^{1,2} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์^{*} chooaksorn@hotmail.com (Corresponding Author)

บทคัดย่อ

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับฟลูออไรด์ของถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน เป็นการทดลองดูดซับแบบแบทช์ ควบคุมความเป็นกรดต่าง 6.7 และความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยศึกษาระยะเวลาสมดุล จำนวนรอบสมดุลของการเขย่า ประสิทธิภาพการดูดซับและไอโซเทอมของการดูดซับ ที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษา พบว่า ไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุด ที่ระยะเวลาการดูดซับ 20 นาที ลดฟลูออไรด์ได้ร้อยละ 50 ส่วนถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 40 ไคโตซานมีจำนวนรอบสมดุลของการเขย่า คือ 100 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ถึงร้อยละ 70 ส่วนถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีจำนวนรอบที่เหมาะสมคือ 0 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ร้อยละ 40 ปริมาณของวัสดุดูดซับที่เหมาะสมของทั้ง 3 ชนิด คือ 5 กรัมต่อลิตร โดยไคโตซาน สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงที่สุดร้อยละ 80 ส่วนถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซานสามารถดูดซับได้ ร้อยละ 40 นอกจากนี้จากการศึกษาเปรียบเทียบไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงก์เมียร์ และฟรอนดิชของตัวดูดซับทุกชนิด พบว่า มีกลไกการดูดซับสอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของฟรอนดิช โดยมีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9887, 0.9860 และ 0.9889 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ฟลูออไรด์, กระบวนการดูดซับ, ถ่านกัมมันต์, ไคโตซาน

ABSTRACT

The comparative in fluoride adsorption with activated carbon (AC), chitosan (CTS) and activated carbon coated chitosan (AC-CTS) were studied in batch experiment. The experiments were controlled pH 6.7 and 5.0 mg/l of initial concentration. The influence of various operational

วันที่รับบทความ 2 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 19 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

parameters i.e., contact time, agitation speed, and effect of adsorbent dose were studied by a series of batch adsorption experiments at room temperature. The result showed that CTS had highest capacity in fluoride adsorption at 20 minutes which could be decreased fluoride to 50 percent. The removal was 40% in case of AC and AC-CTS. CTS could be seen that the maximum removal of 70% occurred at the speed of 100 rpm. At 0 rpm, AC and AC-CTS could be decreased fluoride to 40%. The response of adsorbent dose on fluoride removal was showed that highest capacity in fluoride adsorption in 5 g/L dosage. The removal at this dose was 80% in case of CTS and 40% for AC and AC-CTS, respectively. In addition, the study of comparing isotherm between Langmuir and Freundlich of all adsorbents showed that had fix well with Freundlich isotherm. The values of correlation coefficient for Freundlich isotherms were 0.9887, 0.9860 and 0.9889 for AC, CTS and AC-CTS, respectively.

Keywords: Fluoride, Adsorption, Activated carbon, Chitosan

1. บทนำ

สถานการณ์การปนเปื้อนของฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลของประเทศไทยยังคงเป็นปัญหา จากรายงานผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำจากระบบประปาหมู่บ้าน พบว่า หลายพื้นที่คุณภาพน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำบริโภคในชนบท และคุณภาพน้ำประปาของกรมอนามัย โดยเฉพาะปริมาณของฟลูออไรด์ ซึ่งมีรายงานการเฝ้าระวังในน้ำบริโภคชุมชนของกรมอนามัยตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 - พ.ศ.2556 ดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำจาก 1,912 ตำบล ใน 18 จังหวัดกระจายทั่วประเทศ จำนวน 30,213 ตัวอย่าง พบว่า ร้อยละ 14.6 มีฟลูออไรด์เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และแหล่งน้ำบริโภคของชุมชนประมาณร้อยละ 3 มีฟลูออไรด์เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร [1] โดยหากได้รับฟลูออไรด์เกินมาตรฐานก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพฟันและกระดูก เช่น เกิดฟันตกกระ (Dental Fluorosis) และการผิดรูปของกระดูก (Skeletal Fluorosis) เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นจึงมีการศึกษาวิธีการกำจัดฟลูออไรด์ที่มีการปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟลูออไรด์สามารถกำจัดได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสแบบผันกลับ (Reverse osmosis) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีราคาแพงไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ในชนบท ในขณะที่กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฟลูออไรด์เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูงเช่นเดียวกัน โดยอาศัยวัสดุดูดซับ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) [2] ส่วนไคโตซาน (Chitosan) เป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สกัดได้จากเปลือกกุ้ง มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนบวกของหมู่เอมีน [3] ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนทำให้สามารถดูดซับฟลูออไรด์ที่เป็นประจุลบได้ดี [4] การนำถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อหาวัสดุดูดซับที่เหมาะสมที่สุด ในการลดปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำ ทำให้สามารถนำวัสดุดูดซับดังกล่าวไปใช้กับแหล่งน้ำที่มีฟลูออไรด์ปริมาณสูงเกินมาตรฐาน และเพื่อลดความเสี่ยงอันตรายจากฟลูออไรด์ต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำบาดาล เป็นน้ำที่ถูกกักเก็บหรือสะสมอยู่ใต้ดิน อาจสะสมอยู่ตามรอยแตก รอยแยกของชั้นหิน หรือสะสมอยู่ในช่องว่างของเม็ดกรวด น้ำบาดาลอาจมีโอกาสปนเปื้อนจากฟลูออไรด์ เนื่องจากแร่ฟลูออไรด์ในธรรมชาติสามารถละลายน้ำได้ เมื่อน้ำใต้ดินไหลผ่านแหล่งแร่ฟลูออไรด์ ทำให้มีแร่ฟลูออไรด์เจือปนอยู่ในน้ำด้วย ฟลูออไรด์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่มีผลต่อฟันและกระดูก แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ฟันตกกระและเป็นจุดดำ [5] เมื่อร่างกายได้รับฟลูออไรด์เข้าสู่ร่างกายมากเกินไปติดต่อกันในระยะที่ร่างกายกำลังสร้างฟันอยู่ คือช่วงเวลาตั้งแต่แรกเกิดจนถึงอายุประมาณ 12 ปี จะเกิดความผิดปกติกับผิวเคลือบฟันของฟันแท้ เรียกว่า ฟันตกกระ การเกิดพิษของฟลูออไรด์ต่อกระดูกในระยะแรกๆ จะมีการปวดตามข้อ ไปจนถึงปวดหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าในพื้นที่ที่ประชากรได้รับฟลูออไรด์มากเกินไป ส่งผลให้เด็ก ๆ มีระดับของ IQ โดยเฉลี่ยต่ำกว่าชุมชนที่ได้รับฟลูออไรด์ในปริมาณต่ำ [6] การกำจัดสามารถทำได้โดยกระบวนการดูดซับ ซึ่งถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับ สามารถกักเก็บโมเลกุลต่างๆ ในพื้นผิวภายในได้ จึงทำให้มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย [4] นอกจากนี้ไคโตซานซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนบวกของหมู่เอมีน จะสามารถดูดซับไอออนลบของฟลูออไรด์ ด้วยประจุที่ตรงกันข้ามกัน (Electrostatic attraction) ได้ [7] โดยจากการศึกษาการใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์แสดงพื้นที่เสี่ยงจากปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจังหวัดลำพูน พบพื้นที่ที่กำลังประสบปัญหาของพิษฟลูออไรด์ (Fluorosis) ของจังหวัดลำพูน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการดื่มน้ำที่มีปริมาณฟลูออไรด์มากเกินไปมาตรฐานน้ำดื่มติดต่อกันเป็นเวลานาน ซึ่งสาเหตุที่น้ำบาดาลมีปริมาณฟลูออไรด์สูงเนื่องจากการปนเปื้อนของน้ำร้อนใต้ผิวดินที่แทรกซึมขึ้นมาเป็นครั้งคราวในช่วงเวลาที่เกิดแผ่นดินไหวตามแนวรอยเลื่อนย่อยที่ถูกปิดทับ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับรอยเลื่อนใหญ่แม่ทา ทำให้สามารถนำมาใช้ในการวางแผนและแก้ไขปัญหาของพิษฟลูออไรด์ได้อย่างตรงจุด [8] และจากการวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบริโภคของจังหวัดพะเยาในปี พ.ศ.2554 มีตัวอย่างน้ำที่มีปริมาณเกินค่ามาตรฐานของกรมอนามัย จำนวน 36 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 27.90 ของจำนวนตัวอย่างที่ตรวจวิเคราะห์ [9] นอกจากนี้ จากการศึกษาการปรับปรุงวัสดุดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดฟลูออไรด์ พบว่า วัสดุดูดซับจากโรงผลิตน้ำประปาที่เคลือบด้วยสารไคโตซานนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ได้เคลือบด้วยสารไคโตซาน [4] และจากงานศึกษาวิจัยของมหาวิทยาลัยในประเทศอินเดีย พบว่า ร้อยละของการกำจัดฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น และตัวดูดซับมีปริมาณที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมจากการกระตุ้นของกรดไนตริก มีประสิทธิภาพพอที่จะสามารถดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำได้ [10]

การศึกษาวิจัยเพื่อประเมินความสามารถของไคโตซานในน้ำยาบ้วนปากฟลูออไรด์ในการเพิ่มการคงอยู่ของฟลูออไรด์ในช่องปาก พบว่า ไคโตซานในน้ำยาบ้วนปากไม่มีผลต่อความคงอยู่ของฟลูออไรด์ในช่องปาก แต่มีผลต่อความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำลายในช่วงเวลาต่างๆ แสดงว่าไคโตซานสามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ [11] และการศึกษาสมมูลของการดูดซับไอออนเงินโดยใช้ไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน พบว่า การเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับและความเข้มข้นของไอออนเงิน มีผลทำให้ร้อยละการดูดซับและความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เพราะตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นและเกิดแรงผลักดันเพิ่มสูงขึ้น [12] สอดคล้องกับการศึกษาของ Chooaksorn et al [13] ซึ่งพบว่าการนำนาโนไคโตซานเคลือบบนผิวของถ่านกัมมันต์สามารถลดปริมาณของโครเมียมได้ดี โดยมีประสิทธิภาพสูงขึ้นถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีการเคลือบ หรือไคโตซาน รวมทั้งเมื่อนำนาโนไคโตซานมาเคลือบกับไส้กรองประเภทเซรามิคสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงได้มากกว่าการใช้ไคโตซานในการดูดซับ [14]

กระบวนการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับของแข็ง การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งในการวิเคราะห์การดูดซับมักนิยมใช้วิธีของ Langmuir Isotherm และวิธีของ Freundlich Isotherm โดยมีรายละเอียดดังนี้ [15]

1) Langmuir Isotherm จะใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน ซึ่งในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ และโมเลกุลที่จะถูกดูดซับจะไม่สามารถย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้ แต่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน คือ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น ดังสมการที่ (1)

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

2) Freundlich Isotherm มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) การดูดซับแบบฟรุนดิชสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2) โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad (2)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_F คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

3.1.1 นำถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon; AC) ล้างด้วยน้ำสะอาด จนน้ำเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีใส ตากให้แห้ง เก็บไว้ในโถดูดความชื้น

3.1.2 นำเกล็ดไคโตซาน (Chitosan; CTS) (85% Deacetylation) ละลายในกรดอะซิติก ให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.1.3 การเคลือบวัสดุดูดซับถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน (Activated Carbon Coated Chitosan; AC-CTS) นำถ่านกัมมันต์แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และแช่ลงในสารละลายไคโตซานในอัตราส่วนของวัสดุดูดซับต่อสารไคโตซาน เท่ากับ 2:1 โดยน้ำหนัก เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แยกเอาส่วนของวัสดุดูดซับมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จนวัสดุดูดซับแห้งสนิท นำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เพื่อล้างกรดส่วนเกินออก จนกระทั่งค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำไม่เปลี่ยนแปลงและนำวัสดุดูดซับมาผึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

3.1.4 ตรวจสอบการเคลือบไคโตซานบนถ่านกัมมันต์โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (Hitachi Model S-3400N)

3.2 การเตรียมน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์

เตรียมน้ำฟลูออไรด์สังเคราะห์ ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร จากสารละลายมาตรฐานฟลูออไรด์ความเข้มข้น (Sodium fluoride) และปรับค่า pH ที่ เท่ากับ 6.7 เพราะเป็นค่า pH ที่มีการดูดซึมของฟลูออไรด์สูงสุด [16]

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การศึกษาเวลาสมมูลในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำ โดยกำหนดให้ปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน) อย่างละ 1 กรัม ฟลูออไรด์ในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีวัสดุดูดซับ เขย่า 50 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง กำหนดเวลาที่ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที

3.3.2 การศึกษาจำนวนรอบสมมูลในการดูดซับฟลูออไรด์ในน้ำ โดยกำหนดให้ปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน) อย่างละ 1 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และกำหนดเวลาสมมูลจากผลการศึกษาในข้อ 3.3.1 นำไปเขย่าโดยกำหนดที่ความเร็วรอบ 0, 50, 100 และ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง

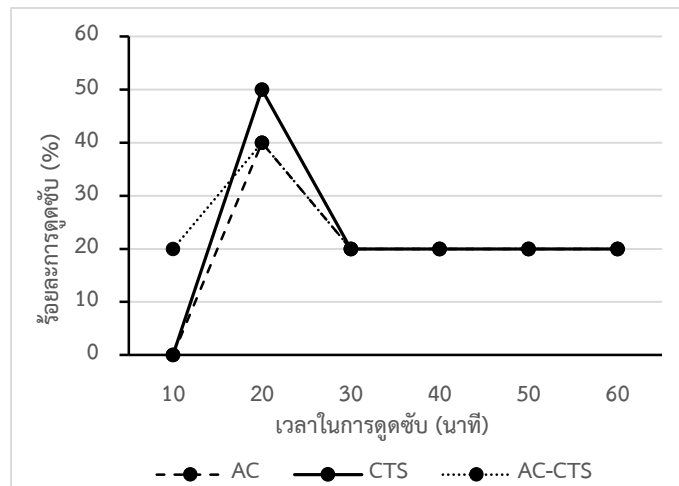
3.3.3 การศึกษาผลของปริมาณวัสดุดูดซับในการดูดซับฟลูออไรด์ โดยกำหนดให้ปริมาณวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด (ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน) มีปริมาณ 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของฟลูออไรด์ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร เทใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีวัสดุดูดซับ กำหนดเวลา และรอบสมมูลจากผลการศึกษาในข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ

3.3.4 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์ โดยฟลูออไรด์ในน้ำเสียความเข้มข้น 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 40 มิลลิลิตร และปรับ pH 6.7 น้ำหนักของวัสดุดูดซับ 1 กรัมต่อลิตร โดยใช้เวลาสมดุล และจำนวนรอบสมดุล ที่อุณหภูมิห้อง ในการวิเคราะห์การดูดซับใช้วิธีของ Langmuir Isotherm และวิธีของ Freundlich Isotherm

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาเวลาสมดุลของการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเกิดสมดุลของการดูดซับ พบว่า ระยะเวลา 20 นาที ปริมาณของฟลูออไรด์ลดลงมากที่สุด โดยไคโตซาน มีประสิทธิภาพในการลดฟลูออไรด์ร้อยละ 50 ส่วนถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีประสิทธิภาพร้อยละ 40 ซึ่งเป็นกลไกการแพร่ภายในของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับจึงเกิดการดูดซับขึ้น และหลังจากระยะเวลา 30 นาที (ภาพที่ 1) เป็นกลไกที่ตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ [17] ทำให้ถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้น้อยลงและคงที่ไปจนถึงเวลา 60 นาที เนื่องจากถ่านกัมมันต์ ไคโตซาน และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้ค่าการดูดซับคงที่และสามารถดูดซับย้อนกลับได้ [18] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [19] พบว่าการดูดซับคงที่ และลดลงเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล

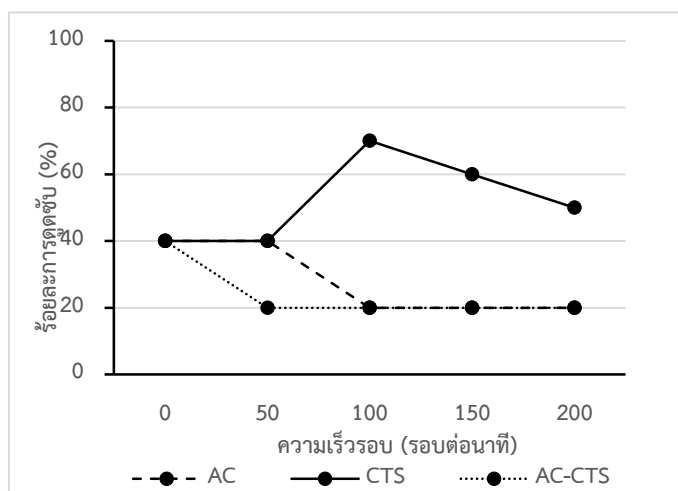


ภาพที่ 1 ร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์ที่ระยะเวลาต่างกัน

4.2 ผลการศึกษาจำนวนรอบสมดุลในการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาน้ำวนรอบที่เหมาะสมสำหรับการเกิดสมดุลของการดูดซับ (ภาพที่ 2) พบว่า เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน ทำให้ปริมาณของฟลูออไรด์ลดลงมากที่สุดที่ 0 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพในการลดร้อยละ 40 เพราะถ่านกัมมันต์มีจำนวนรูพรุนจำนวนมากแต่ไม่มีไอออนที่สามารถจับกับ

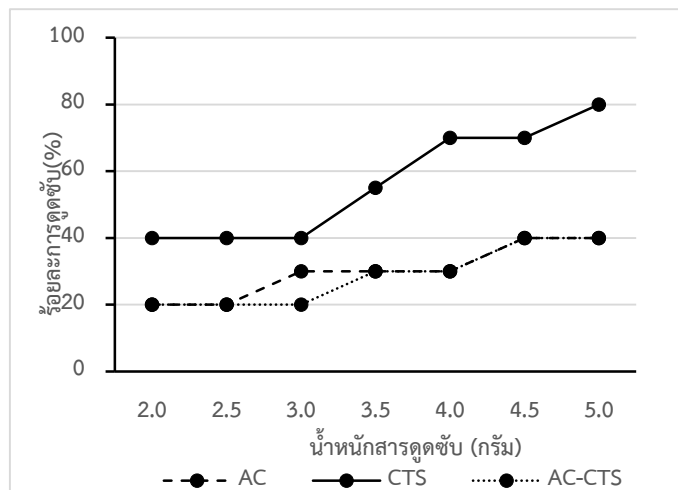
ไอออนลบของฟลูออไรด์ได้โดยตรงและอาศัยเพียงแรงดึงดูดจากกรุพุนในการดูดฟลูออไรด์เข้าไปในกรุพุนเท่านั้น เมื่อมีการเขย่าด้วยความเร็วต่างๆ จึงเป็นการกระตุ้นหรือช่วยให้ฟลูออไรด์หลุดออกมาจากกรุพุนของถ่านกัมมันต์ ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซานนั้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีอะตอมอิสระจึงไปจับกับไนโตรเจนในหมู่เอมีนของไคโตซาน เมื่อเคลือบสารละลายไคโตซานจึงเป็นการปิดรูพุนของถ่านกัมมันต์และหมู่เอมีนกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีประจุบวกจึงไม่สามารถจับกับฟลูออไรด์ที่เป็นไอออนลบได้ เมื่อมีการเขย่าจึงไม่มีผลต่อการดูดซับฟลูออไรด์ และไคโตซานมีปริมาณของฟลูออไรด์ลดลงมากที่สุดที่ 100 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 70 เนื่องจากไคโตซานมีหมู่เอมีนอยู่มากในสายโพลิเมอร์ เมื่ออยู่ในน้ำที่มีสภาวะที่เป็นกรดหมู่เอมีนจะกลายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วและมีประจุบวก ทำให้สามารถจับกับไอออนลบของฟลูออไรด์ได้ดีเมื่อมีการเขย่าจึงไม่มีการหลุดของฟลูออไรด์และยังเป็นการกระตุ้นให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้น [20]



ภาพที่ 2 ร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์จำนวนรอบการเขย่าต่างกัน

4.3 ผลการศึกษาผลของปริมาณของวัสดุดูดซับในการดูดซับฟลูออไรด์

การศึกษาค่าผลของปริมาณของวัสดุดูดซับ เพื่อหาร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์ (ภาพที่ 3) พบว่าน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ และถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน 5 กรัม สามารถดูดซับได้ ร้อยละ 40 เนื่องจากถ่านกัมมันต์จะอาศัยแรงดึงดูดจากกรุพุนเพื่อเพิ่มโอกาสให้ฟลูออไรด์หลุดเข้าไปเท่านั้น ส่วนถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน จะเกิดฟิล์มบางๆ ที่มาจากสารละลายไคโตซานปิดรูพุนของถ่านกัมมันต์และเมื่อไนโตรเจนของหมู่เอมีนจับกับถ่านกัมมันต์ จึงไม่มีการจับกับฟลูออไรด์ ทำให้วัสดุดูดซับ 2 ชนิดเสียประสิทธิภาพไป และไคโตซานที่มีน้ำหนักหนัก 5 กรัม สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้สูงที่สุดร้อยละ 80 เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน จะเห็นว่าหมู่เอมีนอยู่เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเกล็ดไคโตซานที่ใช้มี % Deacetylation สูงถึง 85% หมายความว่า จะมีการเพิ่มขึ้นของหมู่เอมีนของกลูโคซามีน (Glucosamine) ทำให้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายได้เพิ่มขึ้นเพราะไคโตซานมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น [21]



ภาพที่ 3 ร้อยละของการดูดซับฟลูออไรด์ที่ปริมาณตัวดูดซับต่างกัน

4.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์

4.4.1 ถ่านกัมมันต์

จากการศึกษา พบว่า สมการแลงเมียร์ไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ มีค่าความเชื่อมั่น (R^2) ค่าปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับแบบชั้นเดียว (Q_0) และค่าคงที่ของการดูดซับ (K_L) มีค่าเท่ากับ 0.9779, 3.49 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.08 ลิตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับค่า R^2 กับสมการฟรุนด์ลิชไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์ พบว่ามีค่า R^2 K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.9887, 0.22 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 1.77 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่ไม่จำกัดในการดูดซับ ดังนั้นการดูดซับของถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายตามสมการฟรุนด์ลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ สอดคล้องกับการศึกษาของซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [19]

4.4.2 ไคโตซาน

จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์ด้วยไคโตซาน พบว่ามีค่า R^2 , Q_0 และ K_L เท่ากับ 0.9733, 4.24 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.06 ลิตรต่อกรัมตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 นำมาเปรียบเทียบกับสมการฟรุนด์ลิชไอโซเทอมของไคโตซาน พบว่ามีค่า R^2 , K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.9860, 0.21 ลิตรต่อกรัม และ 1.69 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีมีค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่ไม่จำกัดในการดูดซับ ทำให้การดูดซับของไคโตซานสามารถอธิบายด้วยสมการฟรุนด์ลิชได้ดีกว่าสมการแลงเมียร์

4.4.3 ถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน

จากการศึกษา พบว่า มีค่า R^2 , Q_0 และ K_L มีค่าเท่ากับ 0.9784, 3.46 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.08 ลิตรต่อกรัมตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 นำมาเปรียบเทียบกับสมการฟรุนด์ลิชไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์เคลือบสารละลายไคโตซาน พบว่ามีค่า R^2 , K_F และ $1/n$ เท่ากับ 0.9889, 0.22 ลิตรต่อกรัม และ 1.77 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีมีค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณที่ไม่จำกัดในการดูดซับ ทำให้การดูดซับของไคโตซานสามารถอธิบายด้วยสมการฟรุนด์ลิชได้ดีกว่าสมการแลงเมียร์เนื่องจากสมการฟรุนด์ลิชสามารถอธิบายได้ว่า

เป็นการดูดซับที่พื้นที่ของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีพื้นผิวที่ขรุขระทำให้มีการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) [13, 17]

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับฟลูออไรด์ พบว่า ไคโตซานมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยระยะเวลาการดูดซับ 20 นาที มีประสิทธิภาพร้อยละ 50 แต่เมื่อระยะเวลานานขึ้น ตัวดูดซับทุกชนิดมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากกลไกที่ตัวดูดซับติดอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ [17] ความพรุนบริเวณผิวน้ำมีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้ค่าการดูดซับคงที่และสามารถดูดซับย้อนกลับได้ [18] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [19] จำนวนรอบที่เหมาะสมคือ 100 รอบต่อนาที การเขย่าจึงไม่ผลต่อฟลูออไรด์และยังเป็นการกระตุ้นให้มีการดูดซับเพิ่มขึ้น [17] และปริมาณวัสดุดูดซับในการดูดซับมากที่สุด มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากที่สุดเช่นเดียวกัน เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน มีหมู่เอมีนอยู่เป็นจำนวนมาก มีการเพิ่มขึ้นของหมู่เอมีนของกลูโคซามีน (glucosamine) ทำให้มีความสามารถในการรับโปรตรอนจากสารละลายได้เพิ่มขึ้นเพราะไคโตซานมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น [21] ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับฟลูออไรด์ ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดสามารถอธิบายตามสมการฟรุนดลิชมากกว่าสมการแลงเมียร์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Poudyal and Babel [16] เนื่องจากสมการฟรุนดลิชสามารถอธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับที่พื้นที่ของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีพื้นผิวที่ขรุขระทำให้มีการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) [13, 17] จึงแสดงให้เห็นว่าการเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานไม่มีผลต่อระยะเวลาสมดุล จำนวนรอบสมดุล และปริมาณของวัสดุดูดซับฟลูออไรด์ เนื่องจากฟิล์มบางที่เกิดจากการเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานทำให้ปิดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้วัสดุดูดซับเสียประสิทธิภาพ ดังนั้นการนำไคโตซานไปทดแทนวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่มีราคาแพง จึงมีความเหมาะสม เพราะเป็นการลดต้นทุนในการบำบัดและนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ และที่สำคัญสามารถกำจัดฟลูออไรด์ที่ปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากไคโตซานเป็นวัสดุดูดซับที่ดีที่สุดและมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการกรองเพื่อลดปริมาณของฟลูออไรด์เบื้องต้นในพื้นที่ที่ประสบปัญหาฟลูออไรด์เกินมาตรฐาน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอนามัย. (2557). กรมอนามัยหนุน พื้นที่เสี่ยงฟลูออไรด์ในน้ำสูง เร่งส่งน้ำตรวจป้องกันฟันตกกระ ลดค่าใช้จ่าย ครอบฟันกว่า 10,000 บาทต่อคน. สืบค้น 30 มิถุนายน พ.ศ. 2563, จาก http://www.anamai.moph.go.th/ewt_news.php?nid=7341
- [2] สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2558). คาร์บอนกัมมันต์. พิมพ์ครั้งที่ 1. พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [3] วรณิ ศรีนุตตระกูล. (2553). จากเปลือกกุ้งและกระดองปูสู่ไคโตซาน. สืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2563, จาก <http://www0.tint.or.th/>
- [4] ศรีวิไล โฆษิตชัยยงค์, สิริลักษณ์ เจียรกร และสร้อยดาว วินิจนันท์. (2551). การปรับปรุงวัสดุดูดซับจากตะกอนโรงผลิตน้ำประปาเพื่อกำจัดฟลูออไรด์. รายงานการประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ. 31 สิงหาคม 2550 โรงแรมเดอะทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร.

-
- [5] กรมทรัพยากรน้ำบาดาลกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2555). โครงการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำบาดาล (รายงานฉบับสุดท้าย). สืบค้น 14 พฤษภาคม 2563, จาก www.dgr.go.th
- [6] กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. (ม.ป.ป.). แผนที่ฟลูออไรด์ในน้ำบาดาล. สืบค้น 11 เมษายน 2563, จาก [icoh.anamai.moph.go.th > article_20190226100753](http://icoh.anamai.moph.go.th/article_20190226100753)
- [7] ชนิสา หงสวรรณ. (2548). การดูดซับสีย้อมสีแอฟทีฟ และสีย้อมเบสิกโดยใช้กากตะกอนของเสีย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2548.
- [8] จิราภรณ์ ผิดน้อย. (2540). การใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์แสดงพื้นที่เสี่ยงจากปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบาดาลจังหวัดลำพูน (รายงานวิจัย). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [9] สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดพะเยา. (2554). ผลการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟลูออไรด์ในน้ำบริโภค 2554.
- [10] Emmanuel, K.A., Ramaraju, K.A., Rambabu, G., Veerabhadra, A. (2008) Removal of Fluoride from Drinking Water with Activated Carbons Prepared from NHO_3 Activation-A Comparative Study. *Rasayan Journal of Chemistry*, 1(4), 802-818.
- [11] ณัฐิกา โภชนกุล, ปิยาภรณ์ คู่ศรีสมทรัพย์, พาเตีย หะยิอิสมาแอ, สกรรัตน์ เจียวีกัก, และเอกพงศ์ วาติมานนท์. (ม.ป.ป.). ผลของไคโตซานต่อการคงอยู่ของฟลูออไรด์ในช่องปาก (รายงานการวิจัย). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [12] อุษณีย์ รักษ์ไชยวรรณ, ยุพดี กุลรัตน์กิตติวงศ์ และโกวิท ยะมะมงคล. (2557). สมดุลและจลศาสตร์การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เรซิน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 9(2), 12-22.
- [13] Chooaksorn, W., Nitisoravut, R., Polprasert, C., Babel, S., Laohasurayotin, K., Kangwansupamonkon, W. (2016). Enhancement of Cr (VI) ion Removal Using Nanochitosan Coated on Bituminous Activated Carbon. *Water Environment Research*, 88(11), 2150-2158.
- [14] Chooaksorn, W., Nitisoravut, R. Development of New Hybrid Nanosorption/Ceramic Microfiltration for Cu (II) Removal. , 63 (2017), 135-144.
- [15] กิตติศักดิ์ เสพศิริสุข, วิทยา ปั่นสุวรรณ และนิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. (2552). การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารพิษฟลูออโรโบลเอสเทอร์ในน้ำมันสบู่ดำโดยใช้เบนโทไนต์ชนิดต่างๆ.การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47: สาขาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพมหานคร, 17-20 มีนาคม 2552, 327-334.
- [16] Kamble, S.P., Jagtap, S., Labhsetwar, N.K., Thakare, D., Godfrey, S., Devotta, S., Sadhana, S.R. (2007). Defluoridation of Drinking Water Using Chitin Chitosan and Lanthanum-Modified Chitosan. *Chemical Engineering Journal*, 129(1-3), 173-180.
- [17] ปราโมช เขียวชาญ. (ม.ป.ป.). การปรับปรุงคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ตอนที่ 2 กระบวนการดูดซับ. สืบค้น 9 เมษายน 2563, จาก www.วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ.com > 2436

-
- [18] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. (2555). หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [19] Poudyal, M., Babel, S. (2015). Removal of Fluoride using Granular Activated Carbon and Domestic Sewage Sludge. Proceedings of the 4th International Conference on Informatics, Environment, Energy and Applications, Pattaya, 28 March 2015, 139-143.
- [20] Geethamani, C.K., Ramesh, S.T, Grandhimathi R. Nidheesh, P.V. (2013). Alkali-treated fly ash for the removal of fluoride from aqueous solutions. Desalination and Water Treatment, 52(19-21), 3466-3476.
- [21] Harikumar, P.S.P., Jaseela, C., Megha, T. (2012). Defluoridation of Water Using Biosorbents. Natural Science, 4(4),245-251.

ผลเฉลยโซลิตอนของสมการ KORTEWEG-DE VRIES แบบปรับปรุงโดยวิธีการกระจาย SINE-GORDON

SOLITON SOLUTION TO THE MODIFIED KORTEWEG-DE VRIES EQUATION USING SINE-GORDON EXPANSION METHOD

ศรัณย์ ภิบาลชนม์^{*1} ทนงศักดิ์ ประสบกิตติคุณ²
Sarun Phibanchon¹, Tanongsak Prasopkittikun²

^{*1}คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
²โรงเรียนสาธิตพิบูลบำเพ็ญ มหาวิทยาลัยบูรพา
^{*}sarunp@go.buu.ac.th

บทคัดย่อ

ผลเฉลยโซลิตอนของสมการ sine-Gordon จะถูกเขียนในรูปของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก ซึ่งจะมีรูปของโซลิตอนทั้งสองแบบ ทำให้สามารถใช้เป็นผลเฉลยของโซลิตอนของสมการไม่เชิงเส้นในรูปอื่นๆ ที่หาผลเฉลยโซลิตอน ดังนั้นแนวคิดนี้จะนำมาใช้หาผลเฉลยโซลิตอนของสมการ Korteweg-de Vries ที่มีเทอมไม่เชิงเส้น 2 ตัว โดยจะเขียนในรูปของการกระจายตัวของฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก และทำการหาสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับผลเฉลยของสมการ นอกจากนี้จะแสดงผลการวิวัฒนาการตามเวลาของผลเฉลยดังกล่าว รวมถึงแสดงผลการชนกันระหว่าง โซลิตอนสองตัวที่ได้จากคำนวณ

คำสำคัญ: โซลิตอน การคำนวณเชิงสัญลักษณ์ การกระจายไซน์ กอร์ดอน

ABSTRACT

The soliton solution of sine-Gordon equation will be determined. These solutions are written in terms of hyperbolic functions which are expressed in two types of the solitons. It can be used for the soliton solutions for the others nonlinear equations for two possible types of solitons. For this idea, we will take the soliton solution of the sine-Gordon equation to obtain the soliton solution of the Korteweg-de Vries equation with two nonlinear terms. The solution will be written in terms of the series of hyperbolic functions. The coefficients of this series will be determined to

วันที่รับบทความ 1 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 18 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

with the suitable condition. Time evolution of the solution will be presented as well as the two solitons collision.

Keywords: soliton, symbolic computing, sine-Gordon expansion

1. Introduction

Solitary wave [1, 2] is the phenomena that wave travels on the continuum media without changing its amplitude. This result was first described mathematically by Korteweg and de Vries [3, 4] which is known as KdV equation,

$$u_t + uu_x + u_{xxx} = 0, \quad (1)$$

where u is described as the perturbation on media and subscripts x and t are partial derivatives with respect to spatial and temporal coordinates, respectively. The key idea of this phenomenon is the balance between dispersion and nonlinear effects which are the 3rd and 2nd terms on the left hand-side of eq. (1), respectively. However, eq. (1) can also be derived in the ion-acoustic waves in plasmas [5, 6]. To obtain the soliton solution of eq. (1), there are various methods to calculate such as the traveling wave solution [5], Lax-pair method [7] and inverse scattering method [8, 9], tanh method [10], G'/G-expansion method [11] sine-Gordon expansion (sGE) method [12, 13] and Exp-function method [14]. The advantage of the sGE is the combination between pulse and kink solitons in the series solution. We can definitely obtain soliton solution with various possible setting. The modified KdV which will be solved via sGE is KdV with two nonlinear terms [13, 15, 16], the dimensionless form can be written as

$$u_t + uu_x + u^2u_x + u_{xxx} = 0 \quad (2)$$

This equation is also derived in nonlinear optics, plasmas, fluid and some continuum media. The next section, we will find the sine-Gordon solution in order to use as the ansatz solution for the solution of eq. (2)

2. Sine-Gordon expansion method

Consider the sine-Gordon equation,

$$u_{xx} - u_{tt} = m^2 \sin u \quad (3)$$

where m is a constant. This equation is used to derived in many applications of physics [17]. The traveling wave solution can be determined with a new parameter,

$$\xi = \mu(x - ct)$$

in which c is the wave speed and ξ and μ are a constant. The equation will be rewritten as

$$\frac{d^2u}{d\xi^2} = \frac{m^2}{\mu^2(1-c^2)} \sin u.$$

Integrate both side with respect to u ,

$$\left(\frac{u_\xi}{2}\right)^2 = \frac{m^2}{\mu^2(1-c^2)} \sin^2\left(\frac{u}{2}\right) + d \quad (4)$$

where d is the integration constant. To find the soliton solution, the initial conditions will be found as $u(0) = 0, u_\xi(0) = 0$ and found that $d = 0$. The final step is to integrate eq. (4) with respect to ξ and it will be useful to redefine $z = \frac{u}{2}$

$$\sin z = \operatorname{sech} a(\xi - \xi_0) \quad (5)$$

and

$$\cos z = \tanh a(\xi - \xi_0) \quad (6)$$

where $a^2 = \frac{m^2}{\mu^2(1-c^2)}$. This implies that the trigonometric functions can be expressed in terms of hyperbolic functions which are the forms of soliton solution. The nonlinear evolution equation can be written as, in general,

$$P_N\left(u, u_t, \dots, \frac{\partial^l u}{\partial x^i \partial t^{l-i}}\right) = 0 \quad (7)$$

The solution of eq. (7) can be expressed as a series solution,

$$u(\xi) = \sum_{k=0}^n \tanh^{k-1} \xi (B_k \operatorname{sech}(\xi) + A_k \tanh(\xi)) + A_0 \quad (8)$$

or be written in terms of eqs. (5) and (6)

$$u(z) = \sum_{k=0}^n \cos^{k-1} z (B_k \sin(z) + A_k \cos(\xi)) + A_0 = P_n(\sin z, \cos z) \quad (9)$$

We will use eqs (8)-(9) as the ansatz solution for eq. (2)

3. Soliton solution to the modified KdV equation

From eq. (9), we will first determine what n will be used for finding the solution. The polynomial degree function, D , is introduced in which returning the degree of the polynomial, such that

$$D(\sin^2 z + 4 \cos z) = 2 \\ D(u(\xi)) = n, \quad D(u^m(\xi)) = m \times n$$

and

$$D\left(\frac{d^m}{d\xi^m} u(\xi)\right) = m + n$$

Eq. (2) with the traveling wave solution, $\xi = \mu(x - ct)$,

$$-cu_\xi + uu_\xi + u^2u_\xi + \mu^2u_{\xi\xi\xi} = 0 \quad (10)$$

The value of n can determine via comparing on the terms of dispersion and the highest degree for the nonlinear term,

$$D(u_{\xi\xi\xi}) = n + 3 \\ D(u^2u_{\xi\xi}) = \frac{1}{3}D\left(\frac{d}{d\xi}u^3\right) = 3n + 1$$

Therefore, we have $n = 1$ or the ansatz will be written by

$$u(z) = B_1 \sin z + A_1 \cos z + A_0 \quad (11)$$

where

$$\frac{dz}{d\xi} = \sin z \quad (12)$$

Substitute (11) and (12) into (10)

$$\begin{aligned} & A_0 A_1 - A_0^2 A_1 - A_1 B_1^2 + c A_1 + D A_0 A_1 + D A_0^2 A_1 - D A_1^3 + 4 D A_1 B_1^2 - c D A_1 + 2 F A_1 B_1 + \\ & 2 F A_1 B_1 + 4 F A_0 A_1 B_1 + G A_1^2 + 2 G A_0 A_1^2 - G B_1^2 - 2 G A_0 B_1^2 + 3 H A_1^2 B_1 - H B_1^3 + \\ & J A_1^3 - 3 J A_1 B_1^2 - M A_1^2 - 2 M A_0 A_1^2 + M B_1^2 + 2 M A_0 B_1^2 + P A_0 B_1 + P A_0^2 B_1 - 2 P A_1^2 B_1 + P B_1^3 \\ & - c P B_1 - Q A_1 B_1 - 2 Q A_0 A_1 B_1 + 2 \mu^2 A_1 - 8 D \mu^2 A_1 + 6 \mu^2 H B_1 + 6 \mu^2 J A_1 - 5 \mu^2 P B_1 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

where

$$D = \cos^2 z, F = \sin z * \cos^2 z, G = \cos^3 z, H = \sin z * \cos^3 z, J = \cos^4 z, M = \cos z$$

$$P = \sin z * \cos z \text{ and } Q = \sin z, \text{ To determine all unknown, we match all variables in eq. (13),}$$

$$\text{All constants: } -A_0 A_1 - A_0^2 A_1 - A_1 B_1^2 - c A_1 + 2 \mu^2 A_1$$

$$\text{Coefficient } M: -A_1^2 - 2 A_0 A_1^2 + B_1^2 - 2 A_0 B_1^2$$

$$\text{Coefficient } Q: -A_1 B_1 - 2 A_0 A_1 B_1$$

$$\text{Coefficient } P: A_0 B_1 + A_0^2 B_1 - 2 A_1^2 B_1 + B_1^3 - c B_1 - 5 \mu^2 B_1$$

$$\text{Coefficient } D: A_0 A_1 + A_0^2 A_1 - A_1^3 + 4 A_1 B_1^2 - c A_1 - 8 \mu^2 A_1$$

$$\text{Coefficient } F: 2 A_1 B_1 + 4 A_0 A_1 B_1$$

$$\text{Coefficient } G: A_1^2 + 2 A_0 A_1^2 - B_1^2 - 2 A_0 B_1^2$$

$$\text{Coefficient } H: 3 A_1^2 B_1 - B_1^3 + 6 \mu^2 B_1$$

$$\text{Coefficient } J: A_1^3 - 3 A_1 B_1^2 + 6 \mu^2 A_1$$

$$\text{Coefficient } K: 0$$

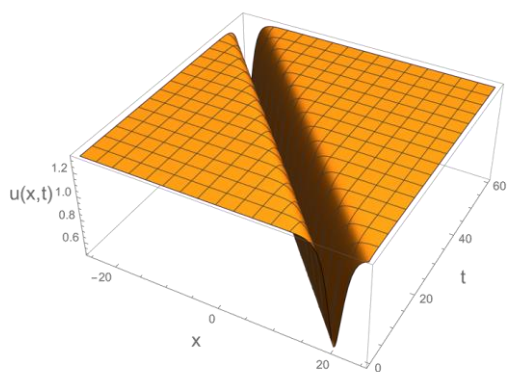
To obtain the kink solution, we will set $B_1 = 0$, all parameters are

$$A_0 = -\frac{1}{2}, c = -\frac{1+8\mu^2}{4}, A_1 = 0, A_1 = \pm i\mu\sqrt{6}$$

therefore, we have

$$\begin{aligned} \xi &= \mu \left(x + \frac{(1+8\mu^2)t}{4} \right) \\ u(\xi) &= -\frac{1}{2} + i\mu\sqrt{6} \tanh(\xi) \end{aligned} \quad (14)$$

The time evolution of eq. (14) can be shown in Figure 1.

Figure 1. shows the time evolution with $\mu = 0.5$

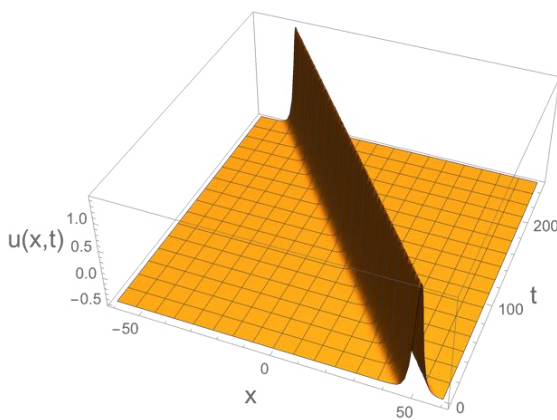
Another form of the soliton solution is known as the pulse form, this can be set as $A_1 = 0$. All parameters are

$$A_0 = -\frac{1}{2}, c = \frac{-1 + 4\mu^2}{4}, B_1 = \mu\sqrt{6}$$

The solution will be written as

$$\begin{aligned} \xi &= \mu \left(x + \frac{(-1 + 4\mu^2)t}{4} \right) \\ u(\xi) &= -\frac{1}{2} + \mu\sqrt{6} \operatorname{sech}(\xi) \end{aligned} \quad (14)$$

The time evolution can be shown in Figure. 2

Figure 2. shows the time evolution with $\mu = 0.79$

The head-on collision, where we start with two solutions in the opposite direction, will be shown in Figure 3.

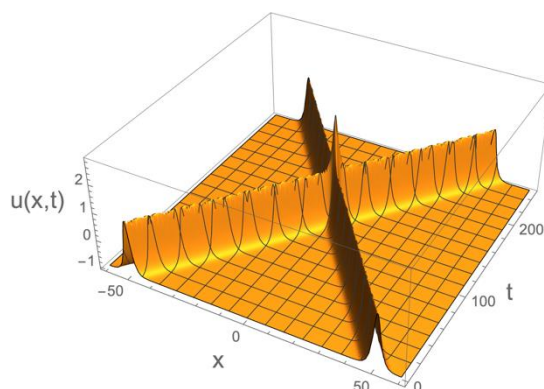


Figure 3. shows the head-on collision with both have the same $\mu = 0.79$

4. Conclusion

Sine-Gordon expansion method can be used for finding the soliton solutions which depends on a number of terms in the series solution. Both pulse and kink shapes are also found with this method. However, the stable solution will be next investigated via the time evolution where these solutions are chosen as the initial condition.

5. References

- [1] Infeld, E. and G. Rowlands, *Nonlinear Waves, Solitons and Chaos*. 2nd ed. 2012: Cambridge University Press.
- [2] Russell, J.S., *Report on waves*, in the *fourteenth meeting of the British Association for the Advancement of Science*. 1844: York. p. 311-90.
- [3] Korteweg, D.J. and G. de Vries, *On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves*. Phil. Mag., 1895. **39**(5): p. 422-43.
- [4] Korteweg, D.J. and G. de Vries, *On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2009. **39**(240): p. 422-443.
- [5] Washimi, H. and T. Taniuti, *Propagation of Ion-Acoustic Solitary Waves of Small Amplitude*. Physical Review Letters, 1966. **17**(19): p. 996-998.
- [6] Schamel, H., *A modified Korteweg-de Vries equation for ion acoustic waves due to resonant electrons*. Journal of Plasma Physics, 1973. **9**(3): p. 377-387.
- [7] Lax, P.D., *Integrals of nonlinear equations of evolution and solitary waves*. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1968. **21**(5): p. 467-490.

-
- [8] Gardner, C.S., et al., *Method for Solving the Korteweg-deVries Equation*. Physical Review Letters, 1967. **19**(19): p. 1095-1097.
- [9] Ablowitz, M.J. and H. Segur, *Solitons and the inverse scattering transform*. SIAM studies in applied mathematics. 1981, Philadelphia: SIAM. x, 425 p., 2 p. of plates.
- [10] Malfliet, W. and W. Hereman, *The tanh method: I. Exact solutions of nonlinear evolution and wave equations*. Physica Scripta, 1996. **54**(6): p. 563-568.
- [11] Wang, M., X. Li, and J. Zhang, *The (G'/G) -expansion method and travelling wave solutions of nonlinear evolution equations in mathematical physics*. Physics Letters A, 2008. **372**(4): p. 417-423.
- [12] Yan, C., *A simple transformation for nonlinear waves*. Physics Letters A, 1996. **224**(1-2): p. 77-84.
- [13] Bulut, H., T.A. Sulaiman, and H.M. Baskonus, *New solitary and optical wave structures to the Korteweg-de Vries equation with dual-power law nonlinearity*. Optical and Quantum Electronics, 2016. **48**(12).
- [14] Dehghan, M., J. Manafian, and A. Saadatmandi, *ANALYTICAL TREATMENT OF SOME PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS ARISING IN MATHEMATICAL PHYSICS BY USING THE EXP-FUNCTION METHOD*. International Journal of Modern Physics B, 2012. **25**(22): p. 2965-2981.
- [15] Djoudi, W., A. Zerarka, and C. Cattani, *Exact solutions for the KdV-mKdV equation with time-dependent coefficients using the modified functional variable method*. Cogent Mathematics, 2016. **3**(1).
- [16] Tang, B., et al., *Exact Solutions for a Generalized KdV-MKdV Equation with Variable Coefficients*. Mathematical Problems in Engineering, 2016. **2016**: p. 1-10.
- [17] Drazin, P.G. and R.S. Johnson, *Solitons : an introduction*. Cambridge texts in applied mathematics. 1989, Cambridge England ; New York: Cambridge University Press. xii, p. 226

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องต่อมูม กรณีกรณีศึกษา โรงงานผลิตขอบยางกระจกประตูรถยนต์

A STUDY OF OPTIMIZATION OF JOINT CORNOR MACHINE MAINTENANCE A CASE STUDY OF AUTOMOBILE DOOR GLASS

สมชาติ วงศ์เทพ ^{*1} ศักดิ์ชาย รักการ ² พจนีย์ ศรีวิเชียร ³

Somchat Wongthep ¹, Sakchai RakKan ², Podchanee Sriwichain ³

^{*1} นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

² ผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

³ อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

* e-mail: wongthep-somchat@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องต่อมูมด้วยการลดเวลาขัดข้องของเครื่องจักรได้ 60% เพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักร (Machine Availability) ได้ 10% โดยใช้โรงงานตัวอย่างซึ่งผลิตขอบยางกระจกประตูรถยนต์ในประเทศไทยเป็นกรณีศึกษา การศึกษาครั้งนี้เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วย แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) ,การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค 5 คำถาม (5 Why Analysis) ,แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) สำหรับการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาหาสาเหตุ การศึกษาเบื้องต้นพบว่า โรงงานตัวอย่างไม่มีระบบการจัดการการซ่อมบำรุง และคู่มือการทำงานโดยทำการซ่อมบำรุงรักษาที่ต่อเมื่อมีเครื่องจักรหยุดทำงานในหน้างานเท่านั้น การศึกษานี้จึงได้เสนอระบบการบำรุงเครื่องจักรแบบ Dynamic Pm โดยใช้โปรแกรม PLC นับจำนวนชั่วโมงการทำงานตามรอบเวลาการทำงานจริง โดยจัดทำเอกสารการควบคุมอะไหล่ (Spare Parts Report) แยกประเภทของอะไหล่แบบ Common Part และแบบ Non Part โดยใช้ จุดสั่งซื้อ ROP (Reorder Point) เป็นสูตรคำนวณการจัดซื้อและจัดเก็บ และเก็บข้อมูลการซ่อมบำรุงและประวัติการเปลี่ยนอะไหล่ ลงในฐานข้อมูลโปรแกรม Access เพื่อการวิเคราะห์การชำรุดเสียหายในภายหลัง จากการดำเนินงานได้นำระบบไปปฏิบัติและทำการเปรียบเทียบผลก่อนดำเนินการและหลังดำเนินการซึ่งสรุปผลได้ดังต่อไปนี้ โดยค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการขัดข้องของเครื่องจักร MTBF คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 86.21% ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม MTTR คิดเป็นอัตราการลดลงเท่ากับ 75% เปอร์เซ็นต์การหยุดซ่อมของเครื่องจักร คิดเป็นอัตราการลดลงเท่ากับ 79.68% อัตราความพร้อมของเครื่องจักร คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10.12%

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ การบำรุงรักษาเครื่องต่อมูม กระจกประตูรถยนต์

ABSTRACT

The objective of this study is to increase the efficiency of machine maintenance per corner by reducing machine downtime by 60%, increasing machine efficiency by 10% by using a sample factory that produces automotive glass door gasket in Thailand Applying the Pareto Diagram, 5 Why Analysis, Cause and Effect Diagram are to collect data and analyze problem. The problem analysis has found that a sample factory do not has the maintenance management system: and operation manual because a maintenance was operated only when the machines stopped working on site. This study therefore proposed a Dynamic Preventive Maintenance machine maintenance system by using PLC program to count the number of working hours according to the actual working time. Moreover, the inventory of Spare Parts have been created the reported of the common parts and the noncommon parts by using ROP (Reorder Point) as the formula for calculating procurement and storage. The system has been implemented and compared the results before and after operations, which are found that the average mean time between machine failures (MTBF) is an increase of 86.21%. The average repair time for (MTTR) is a 75% reduction rate. The machine readiness rate representing an increase of 10.12%

Keywords: Efficiency, Improving, Preventive Maintenance

1. บทนำ

จากภาวะการขยายตัวของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้มีความต้องการชิ้นส่วนยานยนต์เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดภาวะการแข่งขันอย่างรุนแรงภายในกลุ่มผู้ผลิตชิ้นส่วนที่ต้องพัฒนาสินค้าและเพิ่มขีดความสามารถทั้งในด้านการผลิตและการบริหาร เพื่อสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคซึ่งเป็นกลุ่มบริษัทผู้ผลิตรถยนต์ที่มีความต้องการทั้งในด้านมาตรฐานสินค้า การจัดส่งสินค้าที่ตรงเวลา และราคาของสินค้า ภายใต้กรอบต้นทุนที่ต่ำที่สุด ดังนั้นความสามารถในการควบคุมต้นทุนของการผลิตสินค้า และบริการให้ต่ำที่สุด เพื่อให้ผลกำไรที่ได้สูงสุดจึงเป็นสิ่งสำคัญ องค์กรต่าง ๆ จึงมีความพยายามที่จะลดต้นทุนเพื่อให้สามารถยืนหยัดและเป็นผู้นำของอุตสาหกรรมบนภาวะการแข่งขันได้ ในการลดต้นทุนบางองค์กรเลือกใช้นโยบายการลดต้นทุนในส่วนการบำรุงรักษาโดยมองว่าการซ่อมบำรุงเป็นงานที่ไม่เกิดประโยชน์ กล่าวคือ ไม่ส่งผลทางตรงแก่มูลค่าของสินค้า อีกทั้งยังส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยของสินค้าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นความเข้าใจที่ผิดจึงทำให้การลดต้นทุนในหน่วยซ่อมบำรุงโดยการตัดงบประมาณซ่อมบำรุง เช่น การลดแรงงานคน หรือการไม่เปลี่ยนชิ้นส่วนตามช่วงเวลาที่กำหนดโดยไม่มีการช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งการลดต้นทุนในรูปแบบนี้สามารถลดต้นทุนได้จริงแต่ในระยะสั้นเท่านั้น แต่จะส่งผลเสียในระยะยาวให้คุณภาพของสินค้าที่ส่งให้ลูกค้าลดลง ผลิตสินค้าได้ไม่ทันตามปริมาณที่ลูกค้ากำหนด ซึ่งส่งผลให้ความน่าเชื่อถือของลูกค้าที่มี

วันที่รับบทความ 1 มีนาคม 2564

วันแก้ไขบทความ 21 มีนาคม 2564

วันตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

องค์กรลดลง ซึ่งนำไปสู่คำสั่งการผลิตจากลูกค้าที่ลดลง องค์กรสูญเสียรายได้ สถานภาพทางการเงินตกต่ำ แต่ในทางกลับกันหากองค์กรทำการลดต้นทุนโดยการปรับปรุงระบบซ่อมบำรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยวิเคราะห์ถึงปัญหาและแก้ไขอย่างตรงจุด ก็จะส่งผลให้องค์กรมีประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้น การสูญเสียในด้านโอกาสทางการขายในกรณีที่ผลิตสินค้าไม่ทัน การสูญเสียต้นทุนต่อหน่วยของผลิตภัณฑ์ที่ลดลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่ายิ่งองค์กรมีความสามารถในการวิเคราะห์ถึงปัญหาและการปรับปรุงแก้ไขที่ตีมาเท่าใด ก็จะส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในส่วนการผลิตสินค้าได้มากเท่านั้น [1]

ในอุตสาหกรรมการผลิตขอยางกระจกประตูลอยนตก็เช่นเดียวกัน การซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรของบริษัทในปัจจุบัน จะทำการซ่อมบำรุงรักษาตามใบแจ้งซ่อมที่หน่วยงานผลิตต่าง ๆ ได้แจ้งเข้ามาตามที่เกิดเหตุขัดข้องเท่านั้น จึงทำให้เครื่องจักรทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพตามที่ต้องการ การบำรุงรักษาที่ไม่เป็นระบบ ไม่ได้วางแผนการซ่อมบำรุงที่ดี จึงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องจักรขัดข้อง ส่งผลกระทบต่อหน่วยงานผลิตขอยางกระจกประตูลอยนต ซึ่งไม่สามารถผลิตตามแผนที่วางไว้ได้ การศึกษาครั้งนี้จึงจัดทำโดยการเก็บข้อมูลปัญหาของเครื่องจักรที่ขัดข้องในกระบวนการผลิตขอยางกระจกประตูลอยนต ระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่โรงงานผลิตขอยางกระจกประตูลอยนตใช้ในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจะมีการแผนงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันแต่ยังมีการซ่อมบำรุงนอกแผนงานอยู่มาก เนื่องจากระบบรักษาที่ใช้ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีนัก

ดังนั้นผู้ศึกษาจึงได้สนใจปัญหาการซ่อมบำรุงที่มีค่า MTBF เท่ากับ 30 ชั่วโมง/ครั้ง และ MTTR ที่มีค่าเท่ากับ 3 ชั่วโมง/ครั้ง โดยทำการรวบรวมข้อมูลและทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างแผนงานซ่อมบำรุงใหม่ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผลที่คาดว่าจะได้รับจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องจักร (Machine Availability) ได้ 10% และลดเวลาขัดข้องเครื่องจักรได้ 60% และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพงานบำรุงรักษาเครื่องจักรในโรงงาน สามารถทำให้แผนกซ่อมบำรุงวางแผนการซ่อมบำรุงโดยไม่กระทบกับแผนการผลิตได้

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษากการปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของโรงงานผลิตเพลารยนต์ เพื่อลดความถี่การเสียของเครื่องจักร ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ในการช่วยวิเคราะห์ถึงสาเหตุและเก็บข้อมูลเพื่อคำนวณค่า MTBF และ MTTR ของเครื่องจักรโดยนำมาเปรียบเทียบกับตัวชี้วัดที่สร้างไว้ พบว่า หลังจากการใช้ระบบซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีการปรับปรุงส่งผลให้เครื่องจักรที่ปฏิบัติตามแผนมีค่า MTBF สูงขึ้นจากเดิม 83 ± 45 ชั่วโมงต่อครั้ง เป็น 87 ± 22 ชั่วโมงต่อครั้ง และค่า MTTR ที่ลดลง จาก 84.70 ± 32.57 นาทีต่อครั้ง เป็น 70.38 ± 33 ชั่วโมง ต่อครั้ง [1] การศึกษากการปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับแผนกพาเวอร์ซัพพลายของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเตรียมความพร้อมของเครื่องจักร หลังจากปรับปรุงพบว่าเปอร์เซ็นต์ Delay ลดลงจาก 3.27% เป็น 0.81% คิดเป็น 75.23% เมื่อเทียบกับก่อนการใช้ระบบ และเวลาสูญเสียเฉลี่ยจากการหยุดทำงานของเครื่องจักรลดลงจาก 16.16% เป็น 8.02% เมื่อเทียบกับเวลาสูญเสียทั้งหมด และจากเปอร์เซ็นต์ Machine Operation Ratio ของส่วน Insertion มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 1.93%-8.76% [2] การศึกษากการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรในอุตสาหกรรมรีเลย์ หลังดำเนินการ ซึ่งสรุปผลได้ดังต่อไปนี้ ค่า MTBF เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 215.42 เปอร์เซ็นต์จากเดิม ค่า MTTR ลดลงโดยเฉลี่ยเป็น 73.91 เปอร์เซ็นต์จากเดิม ค่าความพร้อมใช้งานของ

เครื่องจักรเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 18.67 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการชำรุดลดลง 35.89 เปอร์เซ็นต์ [3] การศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพด้วยการลดอัตราการเสียหายของเครื่องฆ่าเชื้อของบริษัท ฟรีสแลนด์คัมพิน่า ผลจากการปรับปรุงทำให้การเสียหายของเครื่องฆ่าเชื้อที่มีประวัติการเสียหายตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนพฤศจิกายน 2555 มีอัตราเสียหายเฉลี่ย ร้อยละ 1.45 ของเวลาการผลิต ลดลงเหลือร้อยละ 0 ในเดือนธันวาคม 2555 และจากผล การศึกษานี้นำไปสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของอุปกรณ์ควบคุมแรงดันระบบหล่อเย็น [4] การศึกษาการหา วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพเกี่ยวกับการดำเนินงานด้านเอกสารประกอบการเดินพิธีการกรมศุลกากร (ใบขนขาออก) กรณีศึกษา บริษัทตัวแทนส่งสินค้าทางอากาศแห่งหนึ่งหลังการปรับปรุง พบว่า สามารถลดเวลาเฉลี่ยได้ถึง 78.65 เปอร์เซ็นต์ และผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ต่อโดยใช้แผนภูมิพาเรโต พบว่า เกิดความผิดพลาดขึ้นอีก เช่นจำนวนหีบห่อ ชื่อเลขที่อินวอยซ์วันที่ในอินวอยซ์ปริมาณหน่วยสินค้า เป็นต้น ในข้อผิดพลาดนี้ทางบริษัทสามารถพัฒนาเพื่อลด ข้อผิดพลาดนี้ต่อไปได้อีก [5] การศึกษาการปรับปรุงประสิทธิผลโดยรวมของอุปกรณ์เครื่องจักรเพื่อให้เกิด ความสามารถในการผลิตสูงสุด โดยมีกรณีศึกษาเป็นโรงงานเครื่องตีหม้อ หลังจากดำเนินการกิจกรรมต่าง ๆ สำหรับ ปรับปรุงค่าประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร พบว่า ความถี่และเวลาสูญเสียจากการหยุดเครื่องจักรมีค่าลดลง อัตราการเดินเครื่องจักรมีค่าสูงขึ้น มีระบบบำรุงรักษาดีขึ้น พนักงานมีความรู้และทักษะสูงขึ้น ส่งผลให้ค่า ประสิทธิภาพโดยรวมของสายการผลิตมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 55.6 เป็นร้อยละ 72.2 [6] การศึกษาการวางแผน บำรุงรักษาเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมการผลิตเซรามิก หลังจากที่ได้ดำเนินการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน กับเครื่องจักรที่ทำการศึกษาแล้ว ผลที่ได้ คือ ระยะเวลาเฉลี่ยระหว่างการเกิดเหตุขัดข้องของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น 56.99% ,ระยะเวลาเฉลี่ยการซ่อมแซมของเครื่องจักรลดลง 48.77% และอัตราความพร้อมใช้งานเครื่องจักรเพิ่มขึ้น 1.66% [7]

3. วิธีการวิจัย

จากปัญหาที่ทำให้เครื่องจักรเสีย (Breakdown) ของเครื่องจักรภายในโรงงานผลิตขบอย่างกระจกประตุรณยนต์ที่เกิดขึ้น ไม่สามารถส่งมอบสินค้าได้ทันต่อความต้องการของลูกค้า สืบเนื่องมาจากการผลิตไม่เป็นไปตามแผนผลิตที่กำหนดไว้ สาเหตุหลัก ๆ มาจากเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตขัดข้อง และการเกิดของเสียในกระบวนการผลิต ผู้ศึกษาจึงได้นำปัญหาการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมาแก้ปัญหาเครื่องจักรขัดข้องเพื่อลดการสูญเสียเวลาในการผลิต โดยใช้หลักการจัดการเชิงวิศวกรรมเข้ามาทำการวิเคราะห์กระบวนการ ค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตขบอย่างกระจกประตุรณยนต์ในภาพรวม และสามารถส่งมอบสินค้าได้ทันต่อความต้องการของลูกค้า ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาปัญหาเครื่องจักรเสีย (Breakdown) โดยมีขั้นตอนดำเนินการศึกษา ดังนี้

3.1 สภาพปัญหาเครื่องจักร

เนื่องจากปัญหาเครื่องจักรขัดข้องจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการการผลิตและอาจรุนแรงถึงต้องหยุดสายการผลิต จึงได้เก็บรวบรวมข้อมูลเครื่องจักรที่ใช้ในกรณีศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เป็นเครื่องต่อมูมรุ่น Glass Run IMV640, Glass Run 640, Glass Run RT50 ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเฉลี่ยรวมที่เครื่องจักรหยุดซ่อม ตั้งแต่เดือน เมษายน - กันยายน 2562

No.	Machine No.	Product Time (Hour)	Cause	Breakdown Time (Hour)
1	W-DM-M29-04	1920	56	175
2	W-DM-M29-08	1920	67	139
3	W-DM-M38-A5	2304	63	152
4	W-DM-M38-A13	2304	70	225
5	W-JT2-M38-02	2304	66	166
6	W-JT2-M38-07	2304	75	147
Average		2176	66	167

จากตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการผลิตและเวลาหยุดซ่อมเครื่องจักรในการผลิต จะเห็นได้ว่ามีเครื่องจักรที่หยุดซ่อมมีเวลาที่สูงสุดอยู่ 6 เครื่อง มีค่าเฉลี่ยรวมที่เครื่องจักรหยุดซ่อม 167 ชั่วโมง

3.2 วิเคราะห์ปัญหา

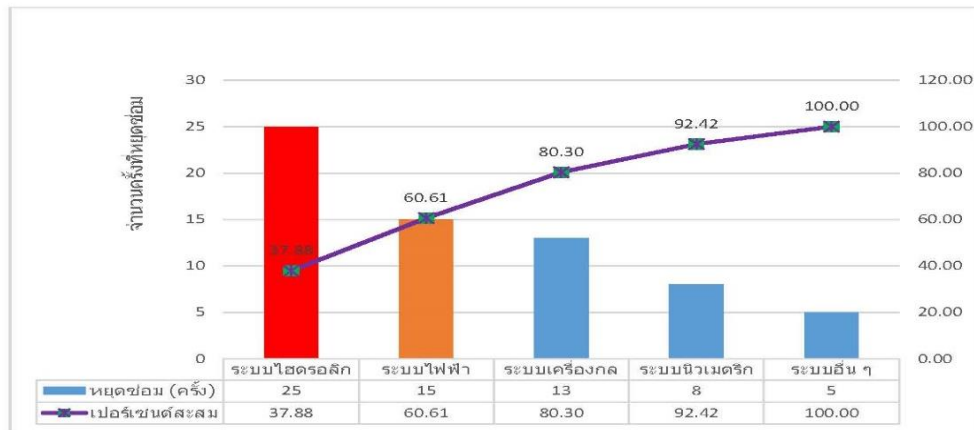
จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า ค่า MTBF ของแต่ละเครื่องจักร มีค่าเท่ากับ 30 ชั่วโมง/ครั้ง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยในการทำงานของเครื่องไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบค่า MTTR ของแต่ละเครื่องจักร มีค่าเท่ากับ 3 ชั่วโมง/ครั้ง ทำการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของปัญหา พบว่า มีการหยุดผลิตจากปัญหาเครื่องจักรหยุดซ่อม จากระบบไฟฟ้าที่ขาดการบำรุงรักษา ระบบขับเคลื่อน การขาดอะไหล่สำรอง และการเสื่อมสภาพของเครื่องจักร เพราะไม่มีมาตรฐานการบำรุงรักษา ทำให้ใช้เวลาในการซ่อมบำรุงเครื่องจักรนานกว่าปกติ

จากการวิเคราะห์พบปัญหาที่ต้องดำเนินการแก้ปัญหา คือ

1. ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic)
2. ระบบไฟฟ้า (Electrical)

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาหลักจากมากไปหาน้อยที่ทำให้เครื่องจักรหยุดซ่อม

ลำดับ	ปัญหาที่ทำให้เกิดการหยุดซ่อม	หยุดซ่อม (ครั้ง)
1	ระบบไฮดรอลิก	25
2	ระบบไฟฟ้า	15
3	ระบบเครื่องกล	13
4	ระบบนิวเมตริก	8
5	ระบบอื่น ๆ	5
รวม		66



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนชุดซ่อม และเปอร์เซ็นต์สะสม จากปัญหาที่ทำให้เครื่องจักรหยุดซ่อม เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย

3.3 กำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหา

1 การวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

1.1 จัดทำคู่มือเครื่องจักร

1.2 ควบคุมสเปร์พาร์ท

2 การซ่อมบำรุง

2.1 บันทึกข้อมูลการซ่อม

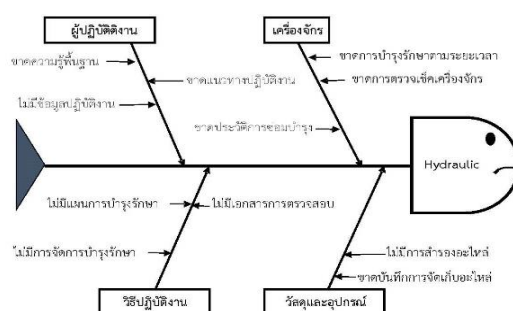
2.2 บันทึกการใช้สเปร์พาร์ท ลงในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Access เป็นข้อมูล Data base

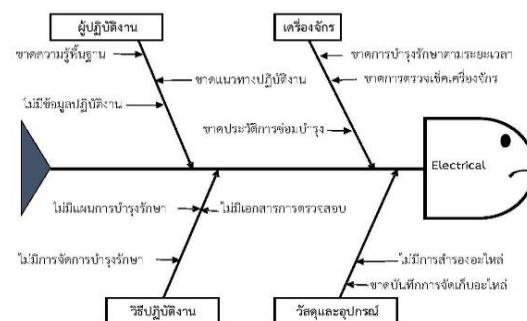
3 การบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบ Dynamic PM โดยใช้โปรแกรม PLC นับจำนวนชั่วโมงการทำงาน

ตามรอบเวลาการทำงานจริง

3.4 วิธีการแก้ปัญหา

การศึกษาเรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องต่อมูม โดยมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องต่อมูมในกระบวนการผลิตขอยางกระจกประตูลอยนต ด้วยการผลิตปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร ไม่รวมความเสียหายที่เกิดขึ้นจากพนักงานฝ่ายผลิต โดยใช้หลักการวิเคราะห์ปัญหา 4M กับแผนผังก้างปลา ดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3





ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์

ปัญหาที่เกิดจากระบบไฮดรอลิก

จากการวิเคราะห์ปัญหา 4M กับแผนผังกางปลา ดังภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงแผนผังกางปลาของ

นำมาสู่การดำเนินการวิธีการแก้ปัญหาต่างต่อไปนี้

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์

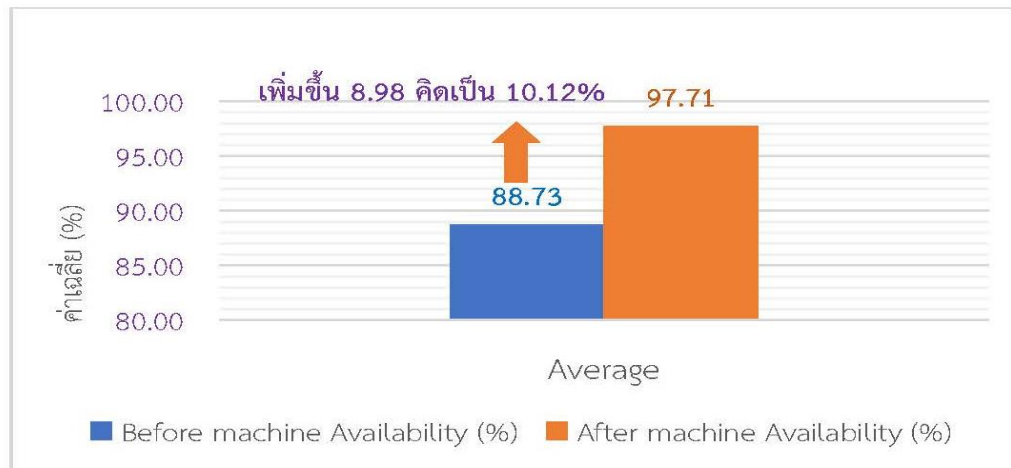
ปัญหาที่เกิดจากระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการแก้ไขปัญหาดังต่าง ๆ ของการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องจักรด้วยการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ปัญหา	สาเหตุ	วิธีการแก้ไข
คน	ขาดแนวทางปฏิบัติงาน	กำหนด Procedure
	ไม่มีข้อมูลปฏิบัติงาน	ทะเบียน แผนผังเครื่องจักร
M/C	ไม่มีแผนการบำรุงรักษาตามระยะเวลา	กำหนด Plan การตรวจเช็ค กำหนดแผน Overhaul เครื่องจักร
วิธีการ	ขาดเอกสารการตรวจเช็คเครื่องจักร	จัดทำเอกสาร Monthly 3 เดือน 6 เดือน 1 ปี Daily check sheet 5S
	ขาดประวัติซ่อมบำรุง	จัดทำเอกสาร Job Order, Maintenance Record
วัสดุ	ขาดบันทึกการจัดเก็บอะไหล่	Spare Part Report ใบเบิกจ่าย

4. ผลการวิจัย

หลังจากทราบปัญหาและมีการประชุม สรุปปัญหา สาเหตุกับหน่วยงานฝ่ายซ่อมบำรุง มีข้อสรุปเป็นอันเดียวกันว่าควรปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้กับเครื่องจักรต่อมัมทั้ง 6 เครื่อง เพื่อให้เครื่องจักรมีสมรรถนะการทำงานให้อยู่ในสภาพที่ดีพร้อมใช้งาน ประหยัดลดต้นทุน ลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพในการกิจกรรมการผลิต โดยมีการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เป็นเวลาการทำงานของเครื่องจักรและเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงแต่ละครั้ง ก่อนการดำเนินการระหว่างเดือนเมษายน 2562 – กันยายน 2562 และหลังการดำเนินงานระหว่างเดือน ตุลาคม 2562 – มีนาคม 2563



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ Loss rate from machine หลังดำเนินงานปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

จากภาพที่ 4 เห็นได้ว่ามีค่าเฉลี่ย ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงทำให้เครื่องจักรมีประสิทธิภาพ ดังนี้

- 1) MTBF ก่อนดำเนินการปรับปรุงอยู่ที่ 29 ชั่วโมง/ครั้ง และหลังดำเนินการปรับปรุงอยู่ที่ 54 ชั่วโมง/ครั้ง เพิ่มขึ้น 25 ชั่วโมง/ครั้ง การเปรียบเทียบค่า MTBF ระยะเวลาเฉลี่ยก่อนการเสียหายแต่ละครั้ง ก่อนและหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องจักรด้วยการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเมื่อคิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 86.21%
- 2) MTTR ก่อนการดำเนินงานปรับปรุงเท่ากับ 4 ชั่วโมง/ครั้ง และหลังการดำเนินงานปรับปรุงอยู่ที่ 1 ชั่วโมง/ครั้ง ลดลง 3 ชั่วโมง/ครั้ง MTTR ระยะเวลาเฉลี่ยตั้งแต่เสียหายจนใช้งานได้แต่ละครั้ง ก่อนและหลังการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องจักรด้วยการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เมื่อคิดเป็นอัตราการลดลงเท่ากับ 75%
- 3) การวัดเปอร์เซ็นต์เวลาที่เครื่องจักรหยุดซ่อม ก่อนดำเนินการปรับปรุง เมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.27% และหลังดำเนินการปรับปรุง เมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.29% การเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การหยุดซ่อมของเครื่องจักร ก่อนและหลังดำเนินการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน เมื่อคิดเป็นอัตราการลดลงเท่ากับ 79.68%
- 4) ค่าเฉลี่ยอัตราความพร้อมของเครื่องจักร ก่อนดำเนินการปรับปรุง เมื่อคำนวณหาค่าเท่ากับ 88.73% และหลังดำเนินการปรับปรุง เมื่อคำนวณหาค่าเท่ากับ 97.71% การเปรียบเทียบค่า อัตราความพร้อมของเครื่องจักร ก่อนและหลังดำเนินการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน คิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10.12%

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

การศึกษา เรื่อง การเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องต่อมูม กรณีศึกษา โรงงานผลิตขบอยางกระจกประตูลอยนต ทดลองค้นคว้าศึกษา โดยศึกษาถึงข้อมูลและปัญหาต่าง ๆ ของเครื่องจักรที่หยุดซ่อมมีเวลาเฉลี่ยนานที่สุดสูงถึง 6 เครื่อง โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องจักรด้วยการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ตามรายชื่อ

เครื่องจักรที่ใช้ในการศึกษาดังนี้ W-JT2-M29-04, W-JT2-M29-08, W-DM-M38-A5, W-DM-M38-A13, W-DM-M38-02 และ W-DM-M38-07 สาเหตุการขัดข้องของเครื่องจักร แบ่งเป็น 4 สาเหตุ ได้แก่

1. ปัญหาด้านคน เกิดจากสาเหตุจากขาดแนวทางและไม่มีข้อมูลปฏิบัติงาน การแก้ไขขาดแนวทางปฏิบัติงานโดยการกำหนดขั้นตอนการทำงานเป็นเอกสารรายละเอียด คือ 1. ประวัติการแก้ไขเอกสาร 2. ข้อกำหนดมาตรฐาน 3. วัตถุประสงค์ และการแก้ไขไม่มีข้อมูลปฏิบัติงานโดยจัดทำทะเบียนเครื่องจักรรายละเอียด คือ 1. ชื่อเครื่องจักร 2. ระบบการทำงาน 3. น้ำมันหล่อลื่นผลที่ได้สามารถทำงานได้ถูกต้องตามขั้นตอนสามารถทำงานทดแทนกันได้และมีการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรได้

2. ปัญหาด้านเครื่องจักร เกิดจากไม่มีแผนการบำรุงรักษา การแก้ไขไม่มีแผนการบำรุงรักษาโดยการกำหนดแผนเป็นเอกสารที่รายละเอียดแบบ Dynamic pm คือ 1. การตรวจเช็คประจำเดือน ปี ที่แปรผันตามชั่วโมงการทำงานจริง ผลที่ได้มีการกำหนดแผนการเปลี่ยนอะไหล่ตามระยะเวลาการทำงานจริง

3 ปัญหาด้านวิธีปฏิบัติงาน เกิดจากสาเหตุขาดเอกสารการตรวจเช็คและประวัติการซ่อมบำรุง การแก้ไขจัดทำเอกสารการตรวจเช็คเครื่องจักรประจำวัน เดือน แบบ Dynamic pm เช่นเครื่องจักรทำงานมากต้องบำรุงรักษาเร็วขึ้นไม่เกี่ยวกับระยะเวลาเท่านั้นต้องขึ้นกับ Utilization ของเครื่องจักร และการแก้ไขขาดประวัติซ่อมบำรุงโดยการทำให้ประวัติการบำรุงรักษาเป็นเอกสารแจ้งซ่อมและบันทึกข้อมูลที่ดำเนินการแก้ไขลงในฐานข้อมูล Database ในโปรแกรม Access ผลที่ได้มีการระบุรายละเอียดโครงสร้างของเครื่องจักรและสามารถสั่งอะไหล่ได้ถูกต้องและสามารถดูข้อมูลเครื่องจักรได้เร็วขึ้น

4 ปัญหาด้านวัสดุและอุปกรณ์ เกิดจากสาเหตุขาดการจัดการเก็บอะไหล่สำรอง การแก้ไขขาดการจัดเก็บอะไหล่สำรองโดยจัดทำเอกสารการควบคุมอะไหล่แยกประเภทของอะไหล่แบบ Common part และแบบ Non Common part และบันทึกลงในฐานข้อมูล Database ในโปรแกรม Access ผลที่ได้สามารถใช้อะไหล่ในการซ่อมหรือการบำรุงรักษาตามแผนได้ทันทีและใช้เวลาน้อยและตรวจสอบอะไหล่ได้อย่างรวดเร็ว

5.1 ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป

ควรมีการศึกษาต่อไปในเรื่อง การบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบ Dynamic PM โดยใช้โปรแกรม PLC นับจำนวนชั่วโมงการทำงานตามรอบเวลาการทำงานจริง ซึ่งจากเดิมใช้โปรแกรม PLC ควบคุมการทำงาน สามารถต่อยอดเพื่อเชื่อมโยงข้อมูลกับ IOT และสามารถทราบถึงปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการบำรุงรักษาเครื่องจักรเพื่อจะสนับสนุนกระบวนการผลิตได้

คำขอบคุณ (ถ้ามี)

การศึกษานี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ดร. ศักดิ์ชาย รักการ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาสละเวลาในการให้คำแนะนำ และแก้ไขข้อบกพร่องรวมถึงข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถกร กลั่นความดี ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยฤทธิ์ สัตยาประเสริฐ และอาจารย์ ดร. ธนาคม สกฤทัย คณะกรรมการสอบ เป็นการแสดงความขอบคุณสำหรับหน่วยงานที่ให้ทุนวิจัย และผู้ช่วยเหลืองานวิจัย (แต่ไม่ได้เป็นผู้ร่วมงานวิจัย) ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำงานวิจัยให้ถูกต้องสมบูรณ์ตามหลักวิชาการ รวมถึงคณะอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้มาตลอดหลักสูตรการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และร่วมเป็นกำลังใจในการจัดทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด รวมทั้งหน่วยงาน และบุคคลท่านอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ สำหรับความกรุณา และการให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพัฒน์ วงศ์จิรฐิติกาล. การปรับปรุงระบบบำรุงรักษาเชิงป้องกันของโรงงานผลิตเพลารถยนต์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555. สืบค้นจาก <https://www.thaiscience.info/journals/Article/TJKM/10963769.pdf>
- [2] ดวงตา ละเอียดดี. การจัดทำแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันให้สอดคล้องกับแผนการผลิตที่ไม่แน่นอน. กรณีศึกษา โรงงานผลิตอุปกรณ์พาวเวอร์ซัพพลาย. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549. สืบค้นจาก <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/12712>
- [3] เกษม รุ่งเรือง. การวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรในอุตสาหกรรมรีเลย์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2552. สืบค้นจาก <http://libdoc.dpu.ac.th/thesis/137806.pdf>
- [4] กษิรัช สนธิเปล่งศรี. การปรับปรุงประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องฆ่าเชื้อ. สารนิพนธ์บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการวิศวกรรมธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555. สืบค้นจาก <http://www.repository.rmutt.ac.th/dspace/bitstream/123456789/2424/1.pdf>
- [5] ลลิตดา ชมโณม. การศึกษาปัญหาและการหาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพเกี่ยวกับการดำเนินงาน ด้านเอกสารประกอบการเดินพิธีการกรมศุลกากร (ใบขนขาออก) กรณีศึกษา บริษัทตัวแทน ส่งออกสินค้าทางอากาศแห่งหนึ่ง. สารนิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน คณะโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2559. สืบค้นจาก http://digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files/56920268.pdf
- [6] อภิชาติ นาควิมล. การพัฒนาระบบการจัดการบำรุงรักษาเครื่องจักรเพื่อลดการสูญเสียและเพิ่มประสิทธิผลในสายการผลิต. สารนิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2560. สืบค้นจาก http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2017/TU_2017_5510037277_4058_7174.pdf
- [7] อธิป ขำวงศ์รัตนโยธิน. การวางแผนบำรุงรักษาเครื่องขึ้นรูปผลิตภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ บริษัทโรงงานอุตสาหกรรม เซรามิก สารนิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2553. สืบค้นจาก <http://uc.thailis.or.th/Catalog/BibItem.aspx?BibID=b00732884>

การเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรได้ด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล กรณีศึกษา เกษตรไผ่กิมซุง

INCREASING EFFICIENCY OF BAMBOO AGRICULTURE WITH DIGITAL TECHNOLOGY
: A STUDY OF BAMBOO (KIM – SUNG)สิทธิพงษ์ สถาปวิทย์¹, ศักดิ์ชัย รักการ², อรรถกร กลั่นความดี³, พจนีย์ ศรีวิเชียร⁴Sittipong Satapawit¹, Sakchai Rakkan², Attkorn Klunguarmdee³, Podchanee Sriwichian⁴¹นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต²ผู้อำนวยการหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต³อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต⁴อาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

Sittipong.satapawit@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีผู้ศึกษาสนใจศึกษาปัญหาการทำสวนไผ่แบบดั้งเดิม โดยใช้สวนไผ่กิมซุงในอำเภอบ่อทอง จังหวัดชลบุรีได้ศึกษาจำนวน 1 ไร่ สวนเกษตรแห่งนี้มีผลผลิตต่อไร่ต่ำ ประมาณ 4 ตัน ต่อไร่ ปัญหาที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ปริมาณมากแต่ผลผลิตต่อไร่ต่ำ สวนทางกลับความต้องการ ผลผลิตจะขึ้นอยู่กับน้ำที่ได้รับน้ำอย่างเหมาะสม เกษตรแบบดั้งเดิมพึ่งพาน้ำจากฝนเป็นส่วนมากทำให้สวนไผ่ประสบปัญหา ในการศึกษาจะนำหลักการจัดการงานวิศวกรรมร่วมกับเทคโนโลยีดิจิทัล เข้ามาควบคุม รวมถึงการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มค่า สามารถเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้นอย่างน้อย 50% การจัดการระบบน้ำ จัดวางระบบสปริงเกอร์ รวมทั้งการใช้เทคโนโลยี IoT มาควบคุมระบบน้ำและปุ๋ย รวมทั้งมีระบบเฝ้าติดตามผ่านสมาร์ต เข้ามาจัดการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุน ผลการศึกษาลงทุนวางระบบ 48,993 บาท เมื่อน้ำในปริมาณที่พอเหมาะและสม่ำเสมอ (10 ลิตร/กอ) ช่วงเวลา 7:00- 9:00 น. ความชื้นที่ระบบทำงานที่ 25% และหยุดการทำงานที่ 80% ส่งผลให้ไผ่มีการออกหน่อเพิ่มผลผลิต เพิ่มจาก 4 ตัน เป็น 6 ตันต่อไร่ต่อปี รวมถึงการใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ใช้เวลาคืนทุน 0.6 ปี นั่นจึงสรุปได้ว่าการลงทุนด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล เป็นการลงทุนที่คุ้มค่าจริง และควรมีการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง

คำสำคัญ: การเพิ่มประสิทธิภาพ เทคโนโลยีดิจิทัล เกษตรไผ่กิมซุง

วันที่รับบทความ 1 มีนาคม 2564

วันที่แก้ไขบทความ 21 มีนาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 29 มีนาคม 2564

ABSTRACT

This research studies, the researcher is interested in studying the problems of traditional Bamboo Plantation management by choosing to use Kim Sung Bamboo garden in the area of Bo Thong District, Chonburi Province. The study has covered the number of areas in a total of 1 rai. There is low productivity per rai, about 4 tons per rai at a time. Problems arising from large quantities of land but low product per rai. while the demand in the market is steadily increasing. productivity of garden depends on the proper water exposure. Traditional agriculture relies heavily on rainwater. Therefore, causing to encounter problems. In this study, the application of managing engineering work with digital technology that helps control. with cost and value analysis, it can increase productivity by at least 50% of the water management, installation sprinkler system, and using IoT technology to control water and fertilizer systems. The system was monitored via smartphones to manage, increase productivity, and reduce costs in order to increase income Based on the results of the study, we invested 48,993 baht into the system. when we watered in the right amount and regularly (10 liters/clump) at 7: 00-9:00 hrs, the control humidity 25 - 80% As a result, the product increased from 4 tons to 6 tons per rai per year. Including the efficient use of water, it takes 0.6 years to pay back on investment. Therefore, it can be concluded that investing in digital technology It is a real cost-effective investment. And continuous improvement.

Keywords: Optimization, digital technology, kim sung bamboo agriculture.

1. บทนำ

การจัดการด้านการเกษตรเป็นสิ่งสำคัญ เพราะปัจจุบันสถานการณ์เศรษฐกิจประเทศไทยมีฐานสำคัญมาจากภาคเกษตร การเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องปรับตัวเพื่อให้สอดคล้องกับการปรับเปลี่ยนโดยมุ่งเน้นการบริหารจัดการการผลิตที่มีประสิทธิภาพด้านการตลาด อุปสงค์ และอุปทาน และให้เหมาะสมกับพื้นที่ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [1] สภาพปัญหาของสวนไผ่กิมซุง ตั้งอยู่บ้านเลขที่ 8 ม.2 ต.บ่อทอง อ.บ่อทอง จ.ชลบุรี เริ่มปลูกเมื่อเดือนพฤศจิกายน 2560 ในเนื้อที่ 3 ไร่ ไร่ละ 134 ต้น รวมจำนวน 402 ต้น ปัญหาที่พบคือ ผลิตทางการเกษตรน้อย น้ำหนัก 1 หน่อ ควรจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.7 - 3.0 กิโลกรัม ในปี 2 จะให้ผลผลิต 5,000 กิโลกรัม/ไร่ ปีที่ 3 จะให้ผลผลิต 6,000 กิโลกรัม/ไร่ โดยค่าเฉลี่ยน้ำหนักต่อหน่อ จะอยู่ที่ 0.58 - 1.19 กิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าค่าเฉลี่ย ในเดือนพฤศจิกายน ปี 2562 ได้ผลผลิต 2,500 กิโลกรัม/ไร่ รวม 3 ไร่ ได้ผลผลิต 7,500 กิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าค่าที่ตั้งไว้ จากสภาพปัญหา ได้แก่ การผลิต การตลาด การลงทุน ความรู้ และเทคโนโลยี ปัญหาที่สำคัญ คือ การเกษตรนอกชลประทาน ทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องการไม่เพียงพอ ทำให้ผลผลิตที่ได้ต่อไร่ต่ำ รวมถึงการจัดการที่ไม่ดีพอ ขาดการดูแลดิน ใช้ปุ๋ยซึ่งไม่เหมาะสมกับพื้นที่ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาปัญหา เพื่อให้ได้ความรู้ที่จะทำให้เกิดการพัฒนาในเชิงเศรษฐกิจ สร้างมูลค่าเพิ่ม จึงต้องนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตในสวนไผ่

แนวทางที่จะใช้ในการจัดการด้วยเทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farming Technology) คือ การนำเอานวัตกรรม และเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาผสมผสานเข้ากับงานด้านเกษตร เพื่อจะนำมาช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว

ให้กับเกษตรกร ใช้เทคโนโลยีที่มีความแม่นยำสูงเป็นเครื่องมือช่วยในการทำการเกษตร รวมไปถึงดูแล และควบคุมการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ และยังสอดคล้องกับสังคมดิจิทัลของประเทศไทย [1] ส่วนการจัดการน้ำในเขตนอกพื้นที่ชลประทาน โดยการขุดสระน้ำ เพื่อจัดวางระบบสปริงเกอร์ การติดตั้งปั้มน้ำไฟฟ้า รวมทั้งการใช้เทคโนโลยี IoT การควบคุมระบบน้ำ และปุ๋ย ผ่านสมาร์ตโฟน การใช้ปุ๋ยน้ำอินทรีย์ผ่านระบบน้ำ เพื่อเข้ามาจัดการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนแรงงาน เพิ่มรายได้ในสวนไม้ และการทำไม้เอกนอกฤดู ดังนั้นผู้ศึกษาจึงสนใจศึกษาปัญหาการเพิ่มผลผลิตของไม้กิมซุง ที่มีอัตราผลผลิตทางการเกษตรที่สูงมากขึ้นกว่าเดิม ด้วยการใช้งานด้านการจัดการงานวิศวกรรมร่วมกับเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาช่วยในการควบคุมการเกษตร พร้อมการวิเคราะห์ต้นทุนและความคุ้มค่า ซึ่งผลที่คาดว่าจะได้รับสามารถเพิ่มผลผลิตได้มากขึ้นอย่างน้อย 50% และเพิ่มประสิทธิภาพสูงสุด

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไม้ตงลิ้มแล้ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Dendrocalamus asper* อยู่ในวงศ์ GRAMINEAE เป็นไม้ยืนต้นตระกูลหญ้า ลำต้นสูงกว่า 15 เมตร ลำโพงเขียวเข้ม ไม่มีขน เนื้อในต้น มอดไม่กิน จึงมีความทนทาน น้ำหนักเฉลี่ยของหน่ออยู่ที่ 1.5 -3.0 กิโลกรัม ออกหน่อตลอดทั้งปี และมีกรดยูริกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคเกาต์น้อย เป็นที่นิยมรับประทาน พันธุ์ไม้มาจากประเทศอินโดนีเซีย ชอบอากาศร้อนชื้น การดูแลรักษาง่ายปลูกได้ทุกพื้นที่ ทนต่อสภาวะแล้งและน้ำท่วม โรคและแมลงรบกวนน้อย ใช้เวลาตั้งแต่ปลูกจนเก็บเกี่ยวผลผลิตสั้น รายได้จากการจำหน่ายหน่อดีคืนทุนเร็ว [1] การศึกษาความต้องการน้ำของไม้ 10 พันธุ์ โดยวางแผนการทดลองที่ 1 คือ ระยะเวลาในการให้น้ำไม้ได้แก่ การให้น้ำทุก 2 และ 4 วัน/ครั้ง ในอัตราครั้งละ 10 ลิตร/ต้น ผลการศึกษาพบว่า มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน และการทดลองที่ 2 มีการเจริญเติบโตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ไม้กิมซุง สามารถเจริญเติบโตได้ดี [2] จากการวิจัย ไม้ ต้องการธาตุไนโตรเจนช่วยการเจริญเติบโตของกิ่ง ก้าน ใบ และระบบรากได้แก่ ปุ๋ย สูตร 46-0-0 หรือ สูตร 21-0-0 หรือปุ๋ยอินทรีย์แบบน้ำที่หมักจากเศษปลา ไม้ต้องการมากช่วงการให้ผลผลิต ช่วงมีการแตกกอ ควรใส่ปุ๋ย 20-30 กรัม/กอ ทำให้ผลผลิตดี ต้นไม้ไม่ควรใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมี ทำให้ไม้ได้รับธาตุอาหารครบถ้วน ออกหน่อได้ตลอด ลดการเกิดหน่อฝ่อ ออกหน่อจะงักไม่โต หลังการแตกกอให้ใส่ปุ๋ยอินทรีย์ กอละ 25 กิโลกรัม พื้นที่ 1 ไร่ 100 กอ ใส่ปุ๋ยคอกมูลสัตว์ 2,500 กิโลกรัม/ปี [3] ประสิทธิภาพการใช้น้ำจะเกิดสูงในช่วงเช้า (07.00-09.00 นาฬิกา) หลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่หรือลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงเย็นทั้งในช่วงแล้งและช่วงฝน [4] ผลของการให้น้ำชลประทานต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของไม้ตงลิ้มแล้ง (ปีที่ 3) โดยวางแผนการทดลองแบบความถี่ในการให้น้ำชลประทาน 3 ระดับ คือ ให้น้ำ 7, 14 และ 21 วัน/ครั้ง ผลการทดลองการให้น้ำที่ความถี่ 21 วันต่อครั้ง ให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำสูง และไม่กระทบต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต [5] ความชื้นที่ดินที่อยู่ในช่วง 75 เปอร์เซ็นต์แรกของความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินตั้งแต่ความจุความชื้นในสนามลงไปว่า “ความชื้นที่พร้อมจะเป็นประโยชน์ต่อพืช” (Readily Available Moisture) ดังนั้นในการควบคุมความชื้นในดินที่ใช้ปลูกพืช มักจะไม่ปล่อยให้ระดับ ความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชในดินต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ต่อพืชของดินนั้น [6] การศึกษาเปรียบเทียบผลจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักปลาและน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน มีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยปุ๋ยน้ำหมักมูลไส้เดือนดินแสดงสมบัติเป็นด่าง (pH 8.8) ในขณะที่ปุ๋ยน้ำหมักปลาแสดงสมบัติเป็นกรด (pH 5.44) ยังพบว่า ปริมาณไนโตรเจน (0.52%) และโพแทสเซียม (0.47%) ในน้ำหมักปลามีสูงกว่าน้ำหมักมูลไส้เดือนดิน [7] หลักการของการทำงานระบบฟาร์มอัจฉริยะ 5 ขั้นตอน การทำฟาร์มอัจฉริยะนอกจากต้องมีการกำหนดขั้นตอนการดำเนินงานที่ชัดเจน มีระบบและ

นำเอาเทคโนโลยีในมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด 1.การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data Collection) คือ การเก็บข้อมูลของดิน น้ำ ภูมิอากาศ ผลผลิต 2.การวินิจฉัยข้อมูล (Diagnostics) คือ การสร้างกรอง และเก็บข้อมูลที่เป็นประโยชน์ 3. การวิเคราะห์ข้อมูล (Analysis) คือ การวิเคราะห์ข้อมูล การวางแผนจัดการ 4. การดำเนินการตามแผนปฏิบัติงาน (Precision Field Operations) คือ การปฏิบัติการตามแผนที่วางไว้ เช่น การติดตั้งโปรแกรมการให้น้ำ การให้ปุ๋ย และ 5. การประเมินผล (Evaluation) คือ การประเมินผลการปฏิบัติงานว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด คำนวณค่าการลงทุน หรือไม่โดยใช้เทคโนโลยีด้านการเงิน และเศรษฐศาสตร์ อุตสาหกรรม [8] การประยุกต์ใช้ Internet of Things ในการจัดการการปลูกพืชโดยใช้เทคนิค Aquaponics (อควาโพนิกส์) ผ่านคอมพิวเตอร์ สมาร์ทโฟน โดยมีการเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต เข้ากับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องสั่งการต่อไป เชื่อมต่อผ่านระบบ IoT Cloud: Cayenne IoT Ready™ ซึ่งเป็น Server ให้บริการจัดเก็บข้อมูล รวมถึงการดูแลและการสั่งการต่าง ๆ ภายในระบบบ็อกซ์ สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งงานให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานได้ เช่น สั่งงานให้ Relay ทำงานตามเวลาที่กำหนด หรือ สั่ง ปิด-เปิด ปั๊มน้ำ ตามเวลาที่ต้องการ เป็นต้น [9]

3. วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรได้ด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล เพื่อกำหนดแนวทางการพัฒนาการเกษตรได้ด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และประยุกต์ใช้หลักการและทฤษฎีทางด้านการจัดการงานวิศวกรรม เพื่อศึกษาการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการสวนไม้

3.1 สภาพปัญหา

จากสภาพปัจจุบันผลผลิตต่อไร่ที่ได้ต่ำกว่ามาตรฐานมาก เพราะขาดแคลนแรงงาน ทั้งในเรื่องของทักษะและความรู้ ขาดแคลนเครื่องจักร และเทคโนโลยีที่ทันสมัย ทำให้กระบวนการผลิตล่าช้า สิ้นเปลืองวัตถุดิบ อีกทั้งการเกษตรส่วนใหญ่ต้องอาศัยฤดูกาล ทำให้ขาดความต่อเนื่อง/ไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะปัญหาทางด้านการจัดการทรัพยากรน้ำ เป็นต้น อีกทั้งยังขาดการจัดการที่ดีภายในสวนไม้ ทำให้ผลผลิตที่ได้ต่อรือน้อยกว่าที่ควรจะเป็น และต้นทุน (ค่าแรง ค่าปุ๋ย ค่าน้ำ) ในการผลิตต่อไร่ค่อนข้างสูงที่อื่น ๆ

ตารางที่ 1 น้ำหนักเฉลี่ยหน่อไม้ไผ่ตงต่อเดือน เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 – ปัจจุบัน

ปี/เดือน	ม.ค	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
2561	0	0	0	0	0	0	0	0	85	105	110	100	400
2562	90	100	180	230	400	420	520	550	500	400	310	300	4,000
2563	280	280	300	350	490	650	820	920	900	500	-	-	5,490

หมายเหตุ : ปีที่ 1 ประมาณ 500 กิโลกรัมต่อไร่ ส่วนปีที่ 2 ประมาณ 5,000 กิโลกรัมต่อไร่ และปีที่ 3 ขึ้นไปประมาณ 6,000 กิโลกรัมต่อไร่ [2] เดือนตุลาคม น้ำหนักรวมครึ่งเดือน และอีก 2 เดือนคาดว่า จะเหลือประมาณ 400 กิโลกรัมต่อเดือน เพราะมีการไถ่ใหม่เพื่อตัดลำแก่ทิ้ง เพื่อเพิ่มผลผลิตในปีถัดไป

3.2 วิเคราะห์ปัญหา

จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณน้ำและปุ๋ยไม่เพียงพอในช่วงออกผลผลิต ทำให้เกิดหน่อฝ่อแห้ง แห้งไม่ขึ้น ออกหน่อชะงักไม่โต ซึ่งทำให้ผลผลิตต่ำกว่าเกณฑ์

ตารางที่ 2 สาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ

ลำดับ	ปัจจัย	สาเหตุ/รายละเอียดของปัญหา
1	คน / M-Man	ขาดความรู้ความเข้าใจในการจัดการสวนไม้
		ขาดความรู้ความเข้าใจในการใช้เทคโนโลยี
		ขาดแคลนแรงงาน
2	เครื่องจักร / M - Machine	ไม่มีเครื่องตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้น ค่า pH
3	วิธีการ / Method	ไม่มีการตัดแต่งกิ่งไม้ สาบกอ
		ไม่มีมาตรฐานในการทำงาน การตัดแต่งกิ่งหรือตัดหน่อ ที่ไม่ถูกต้อง
		ไม่มีการใส่ปุ๋ยหรือใส่ในปริมาณที่ไม่เพียงพอ
		ไม่มีการจดบันทึก
4	วัตถุดิบ / M - Material	การเลือกกิ่งพันธุ์ที่ไม่ดี
		ดินที่ปลูกไม่ดี
5	สิ่งแวดล้อม / E - Environment	ปริมาณความชื้นในสวนน้อย
		ปริมาณน้ำฝนน้อย
		อากาศร้อน
		แหล่งน้ำไม่เพียงพอ

3.3 กำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหา

3.3.1 การจัดการปริมาณน้ำให้เพียงพอต่อการออกหน่อของไม้ โดยชุดขยายสระน้ำเก่าจากเดิม ขนาด 25 x 10 เมตร ลึก 5 เมตร เป็นขนาด 40 x 20 เมตร ลึก 15 เมตร ความจุสระประมาณ 12,000 ลูกบาศก์เมตร โดยสภาพพื้นที่เป็นที่ลุ่มสุดของพื้นที่โดยรอบ เหมาะแก่การเป็นศูนย์รวมน้ำเมื่อถึงฤดูฝน

3.3.2 การจัดการดินและปุ๋ยที่ไม้ต้องการในช่วงการเร่งการออกหน่อ โดยการจัดเก็บค่าความสมบูรณ์ของดิน อุณหภูมิ ความชื้น และค่า pH ในสวนที่ปลูก จำนวน 1 ไร่ ในระยะเวลา 2 เดือน

3.3.3 ออกแบบการทำงานของระบบควบคุม ระบบ PLC และบอร์ดไมโคร จอแสดงค่าการทำงาน ป้อนน้ำ หัวสปริงเกอร์ โซลินอยด์วาล์ว ตัวเซนเซอร์วัดความชื้นดิน และการควบคุมผ่านสมาร์ทโฟน เป็นต้น

4. ผลการวิจัย

วิธีการแก้ไขปัญหาด้านแนวทางการพัฒนาการเกษตรด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล จึงแบ่งผลการศึกษาได้ดังนี้

4.1 การตรวจสอบสภาพดินในสวนไผ่

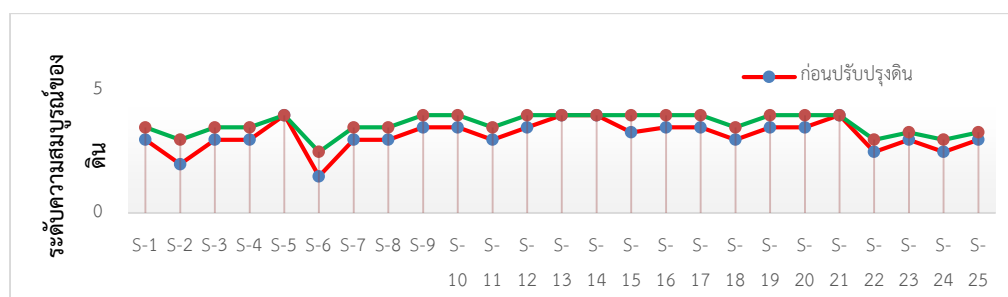
สภาพพื้นที่ดินในพื้นที่ 1 ไร่ ในระยะ 5x5 เมตร รวม 49 จุด ในสวนไผ่มีสภาพ ดินที่แตกต่างกันไปร้อยละ 50 จะเป็นดินร่วนปนทราย ร้อยละ 33 เป็นดินทราย และร้อยละ 17 เป็นดินเหนียว ซึ่งจากผลการเก็บตัวอย่างทำให้ต้องปรับปรุงดินที่เป็นดินทราย ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้นโดยการใส่ปุ๋ยบำรุงดิน

4.2 การจัดการแหล่งน้ำในสวนไผ่

หลังจากจัดการเพิ่มขนาดแหล่งน้ำเป็น 40 x 20 เมตร ลึก 15 เมตร ความจุประมาณ 12,000 ลูกบาศก์เมตร ทำให้มีน้ำใช้ในหน้าแล้ง ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน เพื่อเพิ่มผลผลิตนอกฤดู

4.3 การเก็บค่าดินเพื่อปรับสภาพดินให้มีความสมบูรณ์

ผลการทดลองวัดดิน 25 จุด ดังภาพที่ 1 ทำการปรับสภาพดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์และเคมี ทำให้ดินมีความสมบูรณ์มากขึ้น เนื่องจากใช้เครื่องตรวจวัดดินที่เป็นมาตรฐานสากล คือ มิเตอร์ รุ่น Rapitest Meter จึงทำให้สามารถเลือกปรับสภาพความสมบูรณ์ของดินได้ตามจุดประสงค์ จากการทดลองศึกษาเพื่อการเก็บข้อมูลในระยะเวลา 2 เดือน ในพื้นที่ 1 ไร่ ทำการเก็บค่าความสมบูรณ์ของดิน (NPK= ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม) เป็นจุดที่ค่อนข้างมีความสมบูรณ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ คือ ระดับ 4.5 - 5 ตรงจุดนี้ทำให้ไม่ต้องใส่ปุ๋ยบำรุงดิน มีค่าที่เท่ากัน คือ ระดับ 4 คือ อยู่ในระดับที่ดี ทำให้ลดค่าใช้จ่ายปุ๋ยลงไปได้ และจุดความสมบูรณ์ของดินค่อนข้างต่ำมาก จึงมีการใส่ปุ๋ยบำรุงดินมาก เพื่อให้ได้ค่าระดับความสมบูรณ์ของดินใกล้เคียง ระดับ 4.5 - 5 จุดความแตกต่างกันของสองจุดนี้ คือ มีเพียงพอ และไม่เพียงพอ ทำให้ทราบได้ว่าควรเพิ่มหรือลดจุดใดลง เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย เช่น ค่าปุ๋ย แรงงานคน ลดต้นทุนลงได้ประมาณ 20% และเป็นการใส่ปุ๋ยได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การปรับปรุงดินในระยะเวลา 2 เดือน อาจจะยังไม่เพียงพอเพื่อให้ดินมีความสมบูรณ์ ตามที่ตั้งเป้าไว้ที่ระดับ 4.5 - 5 เพื่อให้มีผลผลิตใกล้เคียงกันทั้งแปลงปลูก และการวัดค่าความชื้นในดิน ความชื้นของดินที่เหมาะสมของต้นไผ่ ประมาณ 60-80% ถ้าชื้นในดินมีเพียงพอถึงมากกว่าที่กำหนด ทำให้สามารถงดการให้น้ำแก่ไผ่ได้ เพราะระบบตั้งการทำงาน ถ้าเกิน 80% ระบบจะไม่สั่งการรดน้ำในพื้นที่ที่เกิน 80% ทำให้สามารถประหยัดน้ำเวลา ค่าไฟฟ้า เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการเกษตร



ภาพที่ 1 เปรียบเทียบค่าความสมบูรณ์ของดินก่อนและหลังปรับปรุงภายในระยะเวลา 2 เดือน

4.4 การออกแบบระบบควบคุมการให้น้ำในสวนไผ่

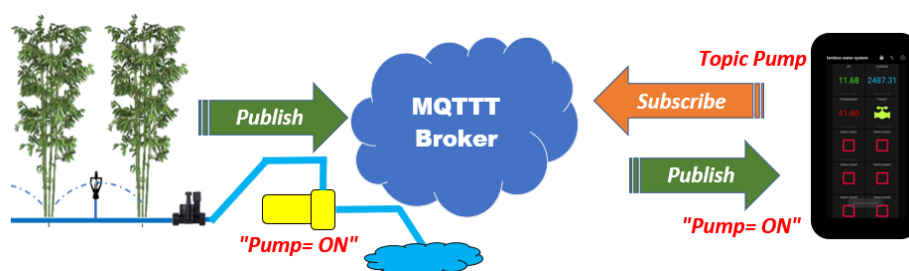
การใช้เทคโนโลยีดิจิทัล มาใช้ในการควบคุมใช้ PLC และเชื่อมต่อ CloudMQTT ด้วยบอร์ด Arduino เป็นระบบ IoT ในการควบคุมระบบรวมกัน และมี Monitoring ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานการให้น้ำของไผ่ผ่านระบบบนสมาร์ทโฟน เนื่องจากไผ่เป็นพืชที่ชอบน้ำมากพอสมควร ในปริมาณ 15-20 ลิตร/กอ/วัน ความชื้น อยู่ที่ 80-90%

การวางระบบน้ำบนพื้นที่ปลูกไผ่ จำนวน 1 ไร่ ผู้ศึกษาได้มีค่าความเฮดปั๊ม (H) > 20.9 m ปริมาณการจ่ายน้ำ (Q) > 11,000 ลิตร/ชั่วโมง ใช้ปั๊มหอยโข่ง รุ่น LUCKY PRO รุ่น MNF129A/2 เพราะใกล้เคียงกับที่คำนวณ H=20, 15m³/hr เลือกหัวจ่ายน้ำแบบสปริงเกอร์ รุ่น 303-L ประกอบด้วย หัวสปริงเกอร์ พร้อมท่อ PVC 18 มิลลิเมตร สูง 50 cm. และวาล์วปิด-เปิด ท่อแยกเป็นท่อ PVC 40 มิลลิเมตร หัวสปริงเกอร์แบบหมุนรอบตัว จ่ายน้ำ 550 ลิตร/ชั่วโมง (9.16 ลิตร/นาที่) รัศมี 2 เมตร ติดตั้งทั้งหมด 120 จุด สั่งเปิดทีละ 2 แถว เป็นจำนวน 24 หัวจ่าย เปิดน้ำเป็นเวลา 20 นาที ความต้องการน้ำ 9.16 ลิตร/นาที่ x 20 นาที x 24 จุด = 4,397 ลิตร (440 ลิตร/นาที่) ระบบควบคุมหลักด้วย PLC FX3n และมีเซ็นเซอร์วัดความชื้นตามแปลง เพื่อตรวจสอบความชื้นในแปลงปลูก การจ่ายน้ำและหยุดตามโซนโดย Solenoid valve โดยทำงานเมื่อมีความชื้นน้อยกว่า 25% ในช่วงเวลา 7:00 – 9:00 น. และหยุดทำงานเมื่อความชื้นที่ 80 % แต่ถ้าความชื้นเกิน 75-80 % ระบบจะไม่ทำงาน ดูระบบ ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การออกแบบระบบควบคุมการให้น้ำในสวนไผ่

ผู้ศึกษาได้สมัครสมาชิก CloudMQTT ทำการสร้าง Account สำเร็จ และขั้นต่อมาคือ การสร้าง MQTT Server เพื่อการเชื่อมต่อ Application "MQTT Dash" เข้ากับ CloudMQTT เพื่อส่งข้อมูลขึ้น CloudMQTT เรียบร้อย และขั้นต่อไป คือการนำข้อมูลของเซ็นเซอร์วัดค่า pH, วัดค่าความชื้นในน้ำ และวัดค่าอุณหภูมิความชื้นในดินตามลำดับ และปุ่มควบคุมการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว มาแสดงผลที่สมาร์ตโฟน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ทำส่งข้อมูล CloudMQTT กับ Application "MQTT Dash" [11]

5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรได้ด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล โดยการศึกษาได้เน้นศึกษาไปในด้านเฉพาะของการควบคุมการให้น้ำไฟเป็นหลักโดยการใช้เซนเซอร์จับความชื้นและอุณหภูมิ มาใช้ในการควบคุม เพราะน้ำเป็นปัจจัยสำคัญการเจริญเติบโต ทำให้ไม่แตกหน่อให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น โดยมีการให้น้ำกับไฟอย่างสม่ำเสมอ และทางผู้ศึกษายังเจอกับปัญหาหาคือ เรื่องดินที่ไม่มีความสมบูรณ์ในพื้นที่บางจุด รวมถึงค่าความชื้น อุณหภูมิ และค่า pH ที่แตกต่างกันไปในพื้นที่ 1 ไร่ ทางผู้ศึกษาจึงได้ทำการศึกษาการให้น้ำไฟด้วยเทคโนโลยีดิจิทัลแบบอัจฉริยะ มาใช้ในสวนไม้ สาเหตุที่เลือกใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาใช้ อย่างแรกคือ มีความแม่นยำ สะดวกรวดเร็ว การนำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาใช้จึงทำให้แก้ปัญหาได้ตรงจุดได้ดี เพราะมีเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ทำให้ในช่วงฤดูแล้งที่มีน้ำน้อย สามารถให้น้ำเฉพาะจุดทำให้ประหยัดน้ำ สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำได้คุ้มค่าที่สุด ช่วยลดการสูญเสียน้ำโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งในอดีตช่วงเวลาทางสวนได้ใช้ปั๊มเครื่องยนต์ในการให้น้ำไฟ น้ำนั้นมีราคาแพง การซ่อมบำรุงค่อนข้างบ่อย ทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างสูง และในอดีตยังเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูฝนเป็นหลัก ซึ่งผลผลิตราคาถูก ได้ผลผลิตเพียง 4 ต้นต่อ 1 ไร่ ซึ่งถือว่าน้อยมากในช่วง 1 ปี ถ้านำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาใช้ในสวนเกษตร ซึ่งคาดว่าจะมีผลผลิตเพิ่มมากขึ้น สามารถเก็บผลผลิตได้ตลอดทั้งปี ซึ่งตอบโจทย์ในการศึกษาในครั้งนี้ จากผลการทดลองต้องการศึกษาความเป็นไปได้โดยใช้วิธีการเทคโนโลยีดิจิทัลโดยในการศึกษาได้นำปั๊มน้ำ ตัววัดอุณหภูมิ ความชื้นในดิน เข้ามาใช้ในการพารมสวนเกษตรไม้ โดยได้งบประมาณในการลงทุนเพื่อวางระบบ 48,993 บาท ผลปรากฏว่า เมื่อได้ให้น้ำกับไฟในปริมาณที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ 10 ลิตร/กอ และรดน้ำช่วงเวลา 07:00- 09:00 น. ความชื้นที่ระบบทำงานอยู่ระหว่าง 25% และหยุดการทำงานที่ 80% ส่งผลให้ไม้มีการแตกหน่อเพิ่มผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ผลผลิตเพิ่มจาก 4 ต้น เป็น 6 ต้นต่อไร่ต่อปี รวมถึงการใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดและการให้ผลผลิตของหน่อไม้เพิ่มสูงขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการคืนทุนเป็นระยะเวลา 0.66 ปี

ตารางที่ 3 ข้อดี-ข้อเสียของระบบในสวนไม้

ข้อดี	ข้อเสีย
1. มีความแม่นยำสูง และตรงต่อความต้องการของไฟได้ตรงจุด	1. มีราคาสูง
2. ลดการสูญเสียทรัพยากรต่าง ๆ เช่น น้ำ ค่าไฟฟ้า	2. เกษตรกรขาดความรู้ด้านเทคโนโลยีสมัยใหม่
3. ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการจ้างคนงาน	3. เกษตรกร ค่อนข้างซับซ้อนในการดูแลหรือซ่อมบำรุง

จากปัญหาที่ได้ศึกษามา เช่น สภาพดินที่แตกต่างบางจุดมีความสมบูรณ์มากและน้อยไม่เท่ากัน ต้องใช้เครื่องมือในการวัดค่า เพื่อการแก้ไขปัญหาที่ถูกจุดและลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นในการบำรุงดิน สภาพอากาศส่งผลให้ผลผลิต และราคาหน่อไม้อาจจะแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล เช่น ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม ราคาอาจสูง 40-60 บาท/กิโลกรัม เพราะเป็นช่วงที่หน่อไม้ขาดแคลน รวมถึงงานวิจัยผลผลิตที่ อาจจะไม่มีความคลาดเคลื่อนไม่เป็นไปตามที่คาดไว้ อันเนื่องจากสภาพดินอาจแตกต่างกัน รวมไปถึงสภาพอากาศของแต่ละพื้นที่ด้วย

คำขอบคุณ

ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณ ดร. ศักดิ์ชาย รักการ อาจารย์ที่ปรึกษาการศึกษาค้นคว้าด้วยตัวเอง และอาจารย์พนีย์ ศรีวิเชียร ที่ได้กรุณาสละเวลาที่มีค่าให้ความรู้ค่าปรึกษาในเรื่องข้อมูลทางด้านวิชาการด้วยดีมา โดยตลอด และ กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และผู้มีพระคุณทุกท่าน ค่อยให้การสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้มาโดยตลอด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์. (2555). **สถานการณ์เฟอร์นิเจอร์ไทย ตัวเลขการส่งออกเฟอร์นิเจอร์**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.tfa.or.th/th/new1-thailand-furniture.php>. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 กุมภาพันธ์ 2563).
- [2] เสกสม พัฒนาพิชัย. (2555, กรกฎาคม - กันยายน). **การปลูกไม้ดงลิ้นแล้ง**. วารสารข่าวเกษตรชลประทาน ปีที่ 16, 9-19.
- [3] ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก. (2558). **การศึกษาการเจริญเติบโตและความต้องการน้ำของต้นไผ่ 10 พันธุ์**. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 23(1), 22-34.
- [4] ทรงยศ พุ่มทับทิม. (2562 มิถุนายน). **ไผ่ ต้องการปุ๋ยเมื่อใด? เราต้องให้ปุ๋ยไผ่ ตอนไหน? เทคโนโลยีการเกษตร** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [https://www. technologychaoban.com/bullet-news- today/article](https://www.technologychaoban.com/bullet-news- today/article). (วันที่ค้นข้อมูล: 15 กุมภาพันธ์ 2563).
- [5] เฉลิม เกรว่อง, ลดาวัลย์ พวงจิตร์. (2550). **ลักษณะทางนิเวศรีวิทยาบางประการของไผ่ 4 ชนิด “เทคโนโลยีวนวัฒนเพื่อจัดความยากจน” การสัมมนาทางวนวัฒนวิทยา** 8,121-133
- [6] เสกสม พัฒนาพิชัย และคณะ. (2558). **ผลของการให้น้ำชลประทานต่อการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของไม้ดงลิ้นแล้ง (ปีที่ 3)**. สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 7 (ปัตตานี)อ.เมือง จ.ยะลา.
- [7] จรินทร์ บุญญาภพ, ดร และคณะ (2558). **การประเมินความสมดุลของน้ำในระบบนิเวศแหล่งต้นน้ำและแนวทางการจัดการ ทรัพยากรน้ำแบบมีส่วนร่วมของภาคประชาชน ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และภัยพิบัติจากดินถล่ม**. โครงการวิจัย ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร, 16-18
- [8] วาสนา วิรุณรัตน์ และคณะ. (2557). **ศึกษาเปรียบเทียบผลจากการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและกายภาพบางประการของดินในระบบการปลูกผักอินทรีย์** รายงานผลการวิจัย คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 11-13.
- [9] จักรกฤษณ์ หมั่นวิชา. (2559). **เทคโนโลยีฟาร์มอัจฉริยะ Smart Farms Technology**. วารสารหาดใหญ่วิชาการ 14 (2), 202-210.
- [10] สุमित แซ่มประสิทธิ์. (2559). **เกษตรกรไทยยุค THAILAND 4.0**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.qmlcorp.com/content/เกษตรกรไทยยุค- thailand-4.0>. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 กุมภาพันธ์ 2563).
- [11] บริษัท วินัส ซัพพลาย จำกัด. (2019.). **ปฐมบท MQTT**. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <https://blog.thaieasyelec.com/ introduction-to-mqtt/>. (วันที่ค้นข้อมูล: 15 กุมภาพันธ์ 2563).