

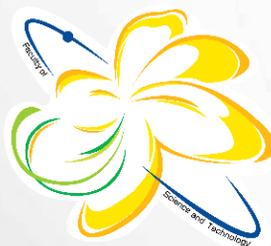


PBRU Science Journal

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน 2566

Volume 20 Number 1 January - June 2023

ISSN 2773-9716 (online)



PBRU

Faculty of Science and Technology
Phetchaburi Rajabhat University



Tel. 0 3270 8633 Fax. 0 3270 8661

Website: <http://sciencejournal.pbru.ac.th>

E-mail: sciencejournal@mail.pbru.ac.th



PBRU Science Journal

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2566

Volume 20 Number 1 January - June 2023

ISSN 2773-9716 (online)

การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับ แปลงผักกาดโต๊ะ.....	1
อัฐภาพ มณีเต็ม* และ ศิริวรรณ แดงน้า	
ผลของแป้งสูกในแป้งโดที่มีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส สี และลักษณะเนื้อสัมผัสของ ผลิตภัณฑ์ลอดช่องสิงคโปร์ใบเตย.....	19
สรสรณีย์ เต็มเปี่ยม, วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์ และ ศุภักษร มาแสง*	
การพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน.....	34
มริษา สุตอุดม และ ภัทรา สวนโสภะเชือก*	
The Analytical Solutions of Bateman-Burgers Equation.....	48
Watsapon Saengcharoenthaworn* และ Settapat Chinviriyasit	
การกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วยพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอน จากการผลิตน้ำประปา.....	54
สุนันท์ ทนสมัย, ผ่องศรี เผ่าภูรี และ มัลลิกา ปัญญาคะโป*	
ผลของแป้งจากข้าวหอมนิลโม้แห้ง โม้เปียก และเอ็กซ์ทราคตคุณภาพของบราวนี่ปราศจาก กลูเตน.....	70
กัญฐิกา แสงสายัณห์, ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์, สุพัสชา ชักกล่อมส่ง และ ศรชัย สินสุวรรณ*	
A Simple Discrete-Weighted Exponential Distribution and Applications.....	85
Chadarat Tapan	
Simulating Network Management System for Quantum Key Distribution based on on rural and remote broadband in Thailand.....	97
Piya Techateerawat	



PBRU Science Journal

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2566

Volume 20 Number 1 January - June 2023

ISSN 2773-9716 (online)

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสนาะ กลิ่นงาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ ไกรเนตร์

อธิการบดี

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

บรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ ทวีเชื้อ

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษกร อู่ยงษ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกรัตน์ จิรสังจานุกูล

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมษิยา แยมเจริญกิจ

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

อาจารย์ ดร.สมิตานันท์ จันทะบุรี

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวอรุณี แก้วบริสุทธิ

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญนันท์ นิลสุข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ภูวไพโรศิรศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ภก.ดร.ปิติ จันทรวโรชิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.สุนิตย์ สุขสำราญ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.โกมล ไพศาล

มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

รองศาสตราจารย์ ดร.จินตนา วิบูลย์ศิริกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนันท์ หงส์วิทธิ์ธร

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

รองศาสตราจารย์ ดร.บัญญัติ ยี่งาม

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณชัย ขาแท่น

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

รองศาสตราจารย์ ดร.สิริธร สโมสร

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.อำไพศักดิ์ ทีบุญญา

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิสรา ศรีวัฒนาวรัญญู

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรานุ สืบเจริญ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานิศา แก้วสวัสดิ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินันท์ แก่นทอง

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภลักษณ์ โพธิ์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

อาจารย์ ดร.อภิรดา สถาปัตยกรรมานนท์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



PBRU Science Journal

ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน 2566

Volume 20 Number 1 January - June 2023

ISSN 2773-9716 (online)

สำนักงานกองบรรณาธิการ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

โทรศัพท์ 0 3270 8633 โทรสาร 0 3270 8661

เว็บไซต์ <http://sciencejournal.pbru.ac.th>

อีเมล sciencejournal@mail.pbru.ac.th

ข้อมูลผู้พิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

โทรศัพท์ 0 3270 8633 โทรสาร 0 3270 8661

วัตถุประสงค์ และขอบเขตของวารสาร

PBRU Science Journal เป็นวารสารที่จัดทำโดย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณค่า และเพื่อนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ใหม่และนวัตกรรมที่ทันสมัย ซึ่งผลงานที่สามารถเผยแพร่ในวารสารมีทั้งบทความวิจัย (research article) ทางด้านวิทยาศาสตร์ เช่น ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา จุลชีววิทยา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณิตศาสตร์ สถิติ คอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ โดยบทความที่จะขอรับการตีพิมพ์ ต้องเป็นผลงานที่ไม่ได้ทำการคัดลอกจากผลงานของผู้อื่น ต้องไม่เคยเผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่น โดยทุกบทความต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการจากคณะผู้เชี่ยวชาญในแต่ละสาขาที่เกี่ยวข้อง

กำหนดการตีพิมพ์

ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน

ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม

-บทความทุกเรื่องในวารสารฉบับนี้ ได้รับพิจารณาประเมินคุณภาพทางวิชาการก่อนการตีพิมพ์ โดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ตามสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากภายใน หรือภายนอกมหาวิทยาลัยจำนวน 3 ท่านต่อ 1 บทความ

-บทความและแนวคิดใด ๆ ที่พิมพ์ใน PBRU Science Journal เป็นความรับผิดชอบของผู้แต่ง

-กองบรรณาธิการวารสารไม่สงวนสิทธิ์ ในการคัดลอกเพื่อการพัฒนาเชิงวิชาการ แต่ต้องได้รับการอ้างอิงอย่างถูกต้อง

-ไม่มีการเรียกเก็บค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์ในวารสาร PBRU Science Journal

การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง สำหรับแปลงผักกาดโต๊ะ

Development of a Prototype of IoT Sensing System Using Solar Energy for Vegetable Plots

อัททภาพ มณีเต็ม¹ และ ศิริวรรณ แดงขำ²

Attapap Maneetoem¹ and Siriwan Dangcham²

¹สาขาวิชาการจัดการสารสนเทศทางธุรกิจ คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

²สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

¹ Business Information Management, Faculty of Management Science.

² Agricultural, Faculty of Agricultural Technology.

*Corresponding author; E-mail: attapap.man@mail.pbru.ac.th

Received: 05 April 2022 /Revised: 19 May 2022 /Accepted: 15 June 2022

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1). เพื่อพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักกาดโต๊ะ 2). เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการใช้ชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักกาดโต๊ะ เครื่องมือและวิธีการพัฒนาประกอบด้วย 1). ไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer) ชุดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro controller unit: MCU) และเซนเซอร์พืช (Plant sensor) 2). แบบประเมินประสิทธิภาพชุดต้นแบบระบบตรวจวัดแสง อุณหภูมิ ความชื้นแปลงผักกาดโต๊ะผ่านอินเทอร์เน็ตและการพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชัน (Web application) ใช้เวลาการทดลอง 1 รอบการปลูก กลุ่มผู้ทดลองใช้ชุดต้นแบบระบบฯ ประกอบด้วยผู้เชี่ยวชาญสาขาวิชาเกษตรศาสตร์และผู้เชี่ยวชาญสาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน นักศึกษาสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ และเกษตรกรผู้เข้าศึกษาฐานฐานการเรียนรู้แปลงผักกาดโต๊ะกางมุ้ง ศูนย์เรียนรู้การเกษตรตามปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เป็นพื้นที่ทดสอบระบบตรวจวัดฯ ผลการวิจัยพบว่า 1) การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ควบคุมการทำงานผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักกาดโต๊ะสามารถใช้งานได้ตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ทั้ง 5 ชุด 2) ประสิทธิภาพการใช้ชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักกาดโต๊ะของผู้ใช้ในระดับมากที่สุด ($\bar{X} = 4.61$ S.D. = 0.50) สามารถนำค่าที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์แต่ละรอบการปลูกไปใช้ตัดสินใจในการเพาะปลูกผักกาดโต๊ะ ช่วยลดต้นทุนในการเพาะปลูก และควรนำต้นแบบที่ได้พัฒนาไปดำเนินการถ่ายทอดสู่กลุ่มเกษตรกรให้เพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: ระบบตรวจวัดพลังงานแสงอาทิตย์ เซนเซอร์พืช แปลงผักกาดโต๊ะ อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง

Abstract

This research aimed to develop and test the efficiency of a prototype of the IoT sensing system using solar energy for vegetable plots. Development tools and methods consisted of 1) Microcomputer Microcontroller Circuit (MCU) and Plant Sensor. 2) Evaluation form for the prototype of the IoT sensing system using solar energy for vegetable plots through the internet and web application development. One crop cycle plant was evaluated. The system was used by experts in agricultural science, energy engineering farmer fields and person who visited the vegetable plot learning base, Phetchaburi Rajabhat University. The research results were as follows: 1) Developing a prototype of the IoT sensing system using solar energy for vegetable plots could be used to perform the functions specified in all 5 sets. 2) The efficiency of the IoT sensing system using solar energy for vegetable plots of users is at the highest level ($\bar{X} = 4.61$ S.D. = 0.50). The values measured by the sensor can be used to make decisions in the cultivation of table vegetables. In addition, it can reduce the cost of cultivation. This system should be promoted to more farmers.

Keywords: Sensing system using solar energy, Plant sensor, Vegetable plots, Internet of Thing

บทนำ

อาหารเป็นสิ่งที่มนุษย์ทุกคนจำเป็นต้องบริโภคในการดำรงชีวิต การผลิตอาหารเพื่อการบริโภคสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ในการพัฒนาประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม การจะให้บรรลุตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ที่จะทำให้คนในประเทศมีความเป็นอยู่ที่ดี สุขภาพกายแข็งแรง สุขภาพจิตดี และมีความสุข ได้นั้น เกษตรกรคือประชากรกลุ่มใหญ่ของประเทศ ผู้เป็นฝ่ายผลิตอาหารให้คนทั้งประเทศบริโภค ตั้งแต่การเพาะปลูก (ต้นน้ำ) แปรรูป (กลางน้ำ) และขาย/ส่งมอบ (ปลายน้ำ)

พืชผักต้องอาศัยปัจจัยในการเจริญเติบโต คือ ดิน น้ำ แสง อากาศ ความชื้น ธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง สภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่เป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตของพืชผัก สภาพปัญหาปัจจุบัน

เกษตรกรไทยยังขาดเครื่องมือตรวจวัด ปัจจัยการเพาะปลูกพืช การบันทึกการเจริญเติบโตของพืชที่แม่นยำและง่ายต่อการเฝ้าดูการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของพืชขาดเครื่องมือในการตรวจดูการเจริญเติบโต ขาดเครื่องมือการเฝ้าระวังโรคพืชศัตรูพืช ปัญหาดังกล่าวทำให้เกษตรกรไม่สามารถรู้ถึงสาเหตุของสภาพแวดล้อมของแปลงเพาะปลูก เพื่อนำไปวางแผนป้องกันหรือแก้ไขความเสียหายที่อาจจะขึ้นในการเพาะปลูก

อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง หรือ อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things) หรือ ไอโอที (IoT) หมายถึง เครือข่ายของวัตถุ อุปกรณ์ พาหนะ สิ่งปลูกสร้าง และสิ่งของอื่น ๆ ที่มีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซอฟต์แวร์ เซ็นเซอร์ และการเชื่อมต่อกับเครือข่ายฝังตัวอยู่¹ และทำให้วัตถุเหล่านั้นสามารถเก็บบันทึก

และแลกเปลี่ยนข้อมูลได้ จึงสรุปได้ว่าอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (Internet of Things: IoT) (บางที่เรียก IoE: Internet of Everything) หมายถึง การที่สิ่งต่าง ๆ ถูกเชื่อมโยงทุกสิ่งทุกอย่างสู่โลกอินเทอร์เน็ต ทำให้มนุษย์สามารถสั่งการควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น การเปิด-ปิด อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ โทรศัพท์มือถือ

ภาค การเกษตร ปัจจุบัน ได้สร้างสถาปัตยกรรมแพลตฟอร์มที่ใช้งานผ่าน IoT² เพื่อการเกษตรที่แม่นยำและการตรวจสอบระบบนิเวศน์³ การทำฟาร์มอัจฉริยะด้วยการประมวลผลแบบเอจ (Edge Computing) และ ประมวลผลแบบคลาวด์ (Cloud Computing)⁴ การใช้อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) และเซนเซอร์ระยะไกล (Remote Sens) ในการตรวจสอบการเจริญเติบโตความสูงของต้นแอปเปิ้ลที่แม่นยำ โดยการวัดระยะในภาพถ่าย⁵ วิธีการประมวลผลที่มีประสิทธิภาพเพื่อหาปริมาณความเข้มของจุดสีของใบต้นกล้าผ่านคลาวด์ (Cloud) และเซนเซอร์ระยะไกล (Remote Sens) และในภาคการเกษตรของประเทศไทยอำเภอหนองสูงศรีจังหวัดกาฬสินธุ์ Saiysing⁶ ได้พัฒนาระบบจัดการฐานข้อมูลผู้ปลูกมะม่วงสายรุ้งโดยใช้อาร์เอฟไอดีแท็ก (RFID Tag) ในการบริหารจัดการผลผลิตสินค้ากับกลุ่มผู้ประกอบการ คลาวด์ อีกทั้งอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ Ongate⁷ ได้มีพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมความชื้นการปลูกผักโดยใช้พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ คลาวด์ และ อำเภอท่ายาง จังหวัดเพชรบุรี อัทภาพ มณีตัน และคณะ⁸ ได้พัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ แหล่ง

เพาะปลูกพืชและไม้ผลเพื่อการผลิตอาหารและการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดเพชรบุรี

เพื่อช่วยเหลือเกษตรกรในการทำเกษตรรูปแบบใหม่ที่มีความแม่นยำ ลดต้นทุน ทำงานสะดวกสบายมากขึ้น และมีการแจ้งเตือน/เฝ้าดูแลผลผลิต ณ ศูนย์เรียนรู้การเกษตรตามปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ซึ่งเป็นแหล่งเรียนรู้ ผู้ประกอบการ ศึกษาดูงานของอาจารย์ นักศึกษา เกษตรกร กลุ่มเกษตรกรและผู้สนใจในการเพาะปลูกผักอินทรีย์ยังขาดระบบการตรวจวัดที่ช่วยตัดสินใจปัจจัยการเพาะปลูกพืชผักและจำเป็นต้องมีการเก็บสถิติของปัจจัยการเพาะปลูก เพื่อหาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในตัดสินใจเพาะปลูกผักต่อไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผัก ก ไท่ ะ (Smart System Vegetable Plots: SMVP) ในการเฝ้าดูปัจจัยการเพาะปลูกผักก ไท่ ะ คือ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นในอากาศ อุณหภูมิในดิน ความชื้นในดิน แสงแดด เพื่อให้ได้ชุดตรวจวัดค่าที่เหมาะสมของพืชผักแต่ละชนิดให้กับเกษตรกร/กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกผักอินทรีย์ในจังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดใกล้เคียง

ขอบเขตการวิจัย

1. ขอบเขตด้านตัวแปรและเนื้อหา การวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยใช้การวิจัยแบบการทดลองและประเมินประสิทธิภาพของการพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักก ไท่ ะ ดังแสดงใน Figure 1.

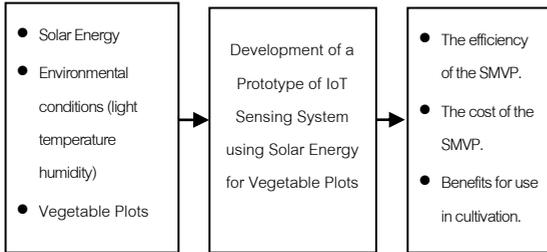


Figure 1. Conceptual framework for the development of a Prototype of IoT Sensing System using solar energy for vegetable plots

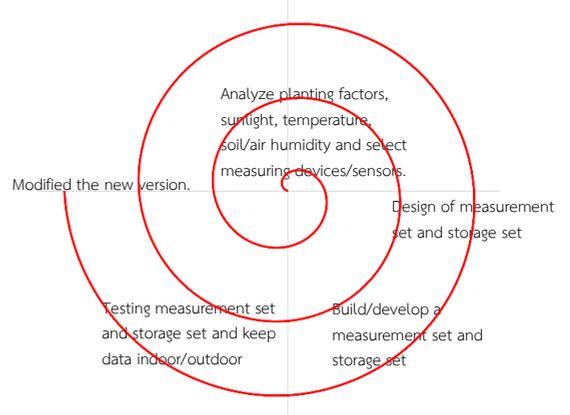


Figure 2. Research and development of a Prototype of IoT sensing system using solar energy for vegetable plots, according to the system development life cycle (SDLC) spiral

2. ขอบเขตด้านประชากร ได้แก่ อาจารย์สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ นักศึกษาด้านวิชาเกษตรศาสตร์ และเกษตรกรผู้ศึกษาดูงาน รวมจำนวน 30 คน

3. ขอบเขตด้านสถานที่วิจัย เป็นการสำรวจเก็บข้อมูล หาความต้องการของระบบ และการพัฒนาชุดต้นแบบฯ ที่ศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

4. ขอบเขตด้านระยะเวลาที่วิจัยใช้เวลาในการวิจัยมีขั้นตอนการวิจัยที่ประยุกต์ตามวงจรพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) แบบเกลียว (Spiral) ซึ่งมีการวนการวิจัยพัฒนา และทดสอบคุณภาพของระบบสารสนเทศฯ อยู่ 4 ขั้นตอน คือ 1) วิเคราะห์ระบบ (Analysis) 2) ออกแบบ (Design) 3) พัฒนาระบบ (Construction) และติดตั้งระบบ (Installation) 4) ทดลอง (Experimental) และทดสอบระบบ (Testing) ดังแสดงใน Figure 2.

วิธีการวิจัย

การวิจัยพัฒนาต้นแบบระบบตรวจวัดแปลงผักกโต๊ะ ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่ง (IoT) ใช้ขั้นตอนการพัฒนาาระบบสารสนเทศ (SDLC) แบบเกลียว (Spiral) ซึ่งมีการออกแบบพัฒนาทดลองใช้งาน และทดสอบคุณภาพของระบบตรวจวัดแสง อุณหภูมิ ความชื้น แปลงผักกโต๊ะ ดังนี้

1. ขั้นวิเคราะห์และออกแบบระบบ (Analysis and Design System) ศึกษาความเป็นไปได้ (Feasibility Study) ในการออกแบบเพื่อนำไปพัฒนาแบบการติดตั้งจริงในขั้นต่อไป ดังแสดงใน Figure 3.

Prototype of Light, Temperature, and Humidity Sensing System for Vegetable Plots with Solar Energy, Controlled via Internet of Thing (IoT) version 3

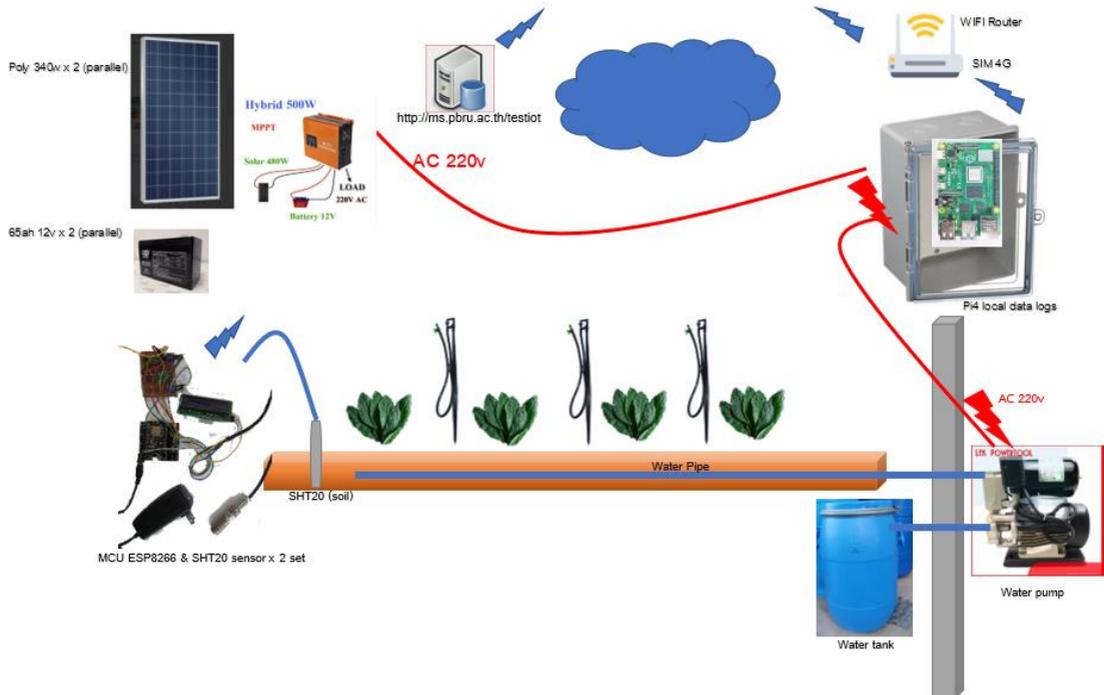


Figure 3. The prototype of IoT sensing system using solar energy for vegetable plots (SMVP Model)

1.1 กำหนดคุณลักษณะการทำงาน
คุณสมบัติ ของชุดเครื่องมือ และจัดหาอุปกรณ์ของ
ชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP) ทั้งระบบ
ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดแสง (GY-30 BH1750FVI)
ให้ช่วงข้อมูลตั้งแต่ 1-65535 lx เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ
และความชื้น (SHT20) ให้ช่วงข้อมูล ตั้งแต่
-40 - 125 องศาเซลเซียส ความชื้นให้ช่วงข้อมูล
ตั้งแต่ 0-100%RH และชุดเก็บข้อมูล สำหรับเก็บค่า
จากเซนเซอร์ลงฐานข้อมูล (Data logger)
ระบบปฏิบัติการ OS Raspbian Ubuntu 18.04
สามารถเรียกดูกราฟย้อนหลังในช่วง 24 ชั่วโมง
ควบคุมการเปิด/ปิดปั้มน้ำอัตโนมัติ (Automatic)
ตามเงื่อนไขของอุณหภูมิ/ความชื้น และแบบควบคุม
เองได้ (Manual) ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ ควบคุมการ

เปิด/ปิดหลอดไฟอัตโนมัติ (Automatic) ตามเงื่อนไข
ของแสงสว่าง และแบบควบคุมเองได้ (Manual)
ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ สามารถเฝ้าดูการเติบโตของ
แปลงผักยกโต๊ะผ่านสมาร์ตโฟนได้

1.2 ประมาณการราคารายการอุปกรณ์
ทั้งระบบฯ มูลค่ารวม 45,000 บาท (ไม่รวมแปลงผัก
ยกโต๊ะ) แบ่งเป็น 5 ชุด ประกอบด้วย (1) ชุดจ่าย
พลังงานไฟฟ้า (2) ชุดตรวจวัด/เก็บข้อมูล แผงวงจร
เซนเซอร์ 2 ชุด (3) ชุดจ่ายน้ำ (4) ชุดเครือข่าย
สัญญาณอินเทอร์เน็ต (5) ชุดโครงสร้างหลังคา

1.3 ดำเนินการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน
โดยสำรวจราคาทางเว็บไซต์ของอุปกรณ์แต่ละชิ้น
และค่าการติดตั้งสถานี รวมมูลค่าชุดต้นแบบระบบ
ตรวจวัดฯ 45,000 บาท (ไม่รวมค่าโต๊ะปลูก) ซึ่งจะใช้

สำหรับแปลงผักยกโต๊ะขนาด 2 x 7 เมตร ที่ฐานการเรียนรู้แปรรูปผักยกโต๊ะกางมุ้ง ศูนย์เรียนรู้การเกษตรตามปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี กับชนิดของผัก 7 ชนิด คือ ต้นหอม ผักขึ้นฉ่าย ผักชี ผักสลัด (กรีนโอ๊ค เรดโอ๊ค) คอสดักกาดหอม ผักกวางตุ้ง ประมาณผลผลิตที่ได้ใน 1 โต๊ะปลูก และสำรวจราคาตลาด จากนั้นคำนวณรายได้การเพาะปลูกที่ราคาสูงเพื่อหาจุดคุ้มทุนให้เร็วที่สุด ลำดับสุดท้ายคำนวณจุดคุ้มทุน โดยนำมาคูณค่า

รวมชุดต้นแบบขารด้วยรายได้ต่อ 1 โต๊ะปลูก ได้จำนวนปีและวันในการลงทุนติดตั้งระบบตรวจวัดฯ ตัวอย่างการคำนวณต้นทุนหอม ผลผลิตได้ 15 กิโลกรัม ต่อ 1 โต๊ะปลูก x 70 บาท/กิโลกรัม = 1,050 บาท คำนวณ 45,000 บาท / 1,050 บาท = 42.88 รอบปลูก คำนวณ 45 วัน x 42.86 รอบปลูก = 1,928.7 วัน คำนวณ 1,928.7 วัน / 365 วัน = 4 ปี 104 วัน จึงถึงจุดคุ้มทุน ดังแสดงใน Table 1.

Table 1. Estimated Cultivation/Production/Income and calculate the break-even point of SMVP Model

No.	Plant type	Estimated Cultivation/Production/Income 1 plot				Calculate break-even point (45,000 baht) ** (year and day)
		Cultivation period	Yield (Kg)	Price per kilogram (Baht)*	Total income per 1 planting cycle *	
1	Spring onion	40-45 day	15	60-70	1,050	45,000/1,050 = 42.86 planting cycle break-even point 5 year 104 day
2	Celery	70-80 day	20	120-130	2,600	45,000/2,600 = 17.30 planting cycle break-even point 2 year 46 day
3	Coriander	40-45 day	2	150-200	400	45,000/400 = 112.50 planting cycle break-even point 255 day
4	Green oak/ Red oak	30-35 day	15	100-120	1,800	45,000/1,800 = 25 planting cycle break-even point 2 year 34 day
5	Cos	25-30 day	20	100-120	2,400	45,000/2,400 = 18.75 planting cycle break-even point 2 year 34 day
6	Lettuce	30-35 day	15	60-80	1,200	45,000/1,200 = 37.5 planting cycle break-even point 2 year 34 day
7	Cantonese	35-45 day	20	30-40	800	45,000/800 = 56.25 planting cycle break-even point 2 year 34 day

* The quoted price is the price of organic produce, calculated at a high price, in order to find the break-even point as quickly as possible.

** Total value of the prototype set does not include the cost of building a vegetable plot

1.4 ดำเนินการออกแบบกิจกรรมการทำงานของชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ SMVP มีแอกเตอร์ (Actor) ผู้ใช้/เกษตรกร ชุดตรวจวัดดิน ชุดตรวจวัดอากาศ ชุดตรวจวัดแสง กล้องถ่ายภาพ และชุดเก็บข้อมูล ไมโครคอมพิวเตอร์ (Raspberry Pi 4) มีหน้าที่การทำงาน (Function) ฟังก์ชันอ่านค่าจากเซนเซอร์ (SHT20) ส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ ไปยังชุดเก็บข้อมูลที่เป็นไมโครคอมพิวเตอร์ (Raspberry Pi 4) ตามรอบเวลาที่ระบบ SMVP กำหนด ฟังก์ชันอ่านค่าจากเซนเซอร์

(SHT20) ส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นในอากาศไปยังชุดเก็บข้อมูลฯ ฟังก์ชันอ่านข้อมูลจากเซนเซอร์วัดแสง (GY-30 BH1750FVI) ส่งค่าแสง ไปยังชุดเก็บข้อมูลฯ ฟังก์ชันรับ/ส่งภาพจากกล้องไปยังชุดเก็บข้อมูลฯ ฟังก์ชันแสดงกราฟและสถานะของค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้น และค่าแสงไปยังผู้ใช้/เกษตรกร ฟังก์ชันควบคุมการปิด/เปิดปั๊มน้ำ และหลอดไฟ ฟังก์ชันแสดงภาพและวีดีโอไปยังผู้ใช้/เกษตรกร ดังแสดงใน Figure 4.

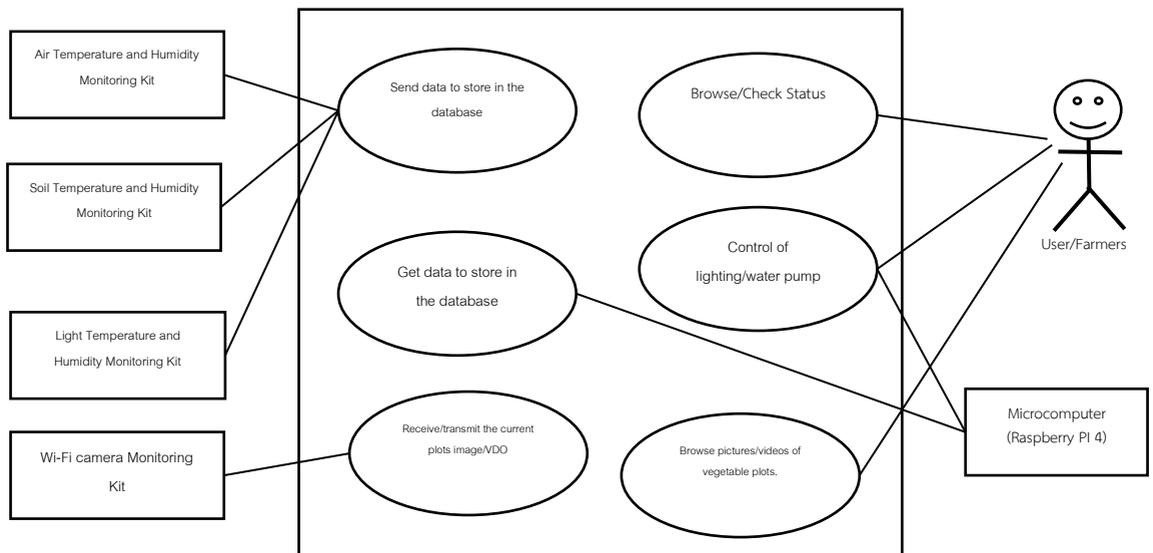


Figure 4. User case Diagram; The prototype of IoT sensing system using solar energy for vegetable plots

1.5 ดำเนินการออกแบบฐานข้อมูลชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP) โดยใช้ฐานข้อมูล MySQL ในการเก็บบันทึกข้อมูลและวันเวลา มาตรฐานยูทีซี (Universal Time Coordinated: UTC) ซึ่งมี 3 ตารางในการเก็บค่า คือ เซนเซอร์แสง

เซนเซอร์อากาศ และเซนเซอร์ดิน ตารางเก็บค่ารวมทั้ง 3 เซนเซอร์ และตารางเก็บค่าระดับสูง กลางต่ำ เพื่อใช้เป็นกฎเกณฑ์การตัดสินใจ (Decision rules) ของระบบตรวจวัดฯ ดังแสดงใน Figure 5.

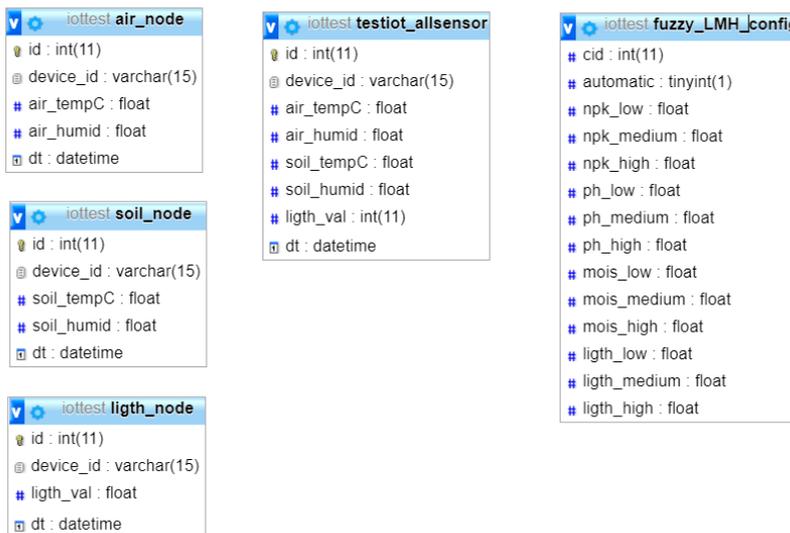


Figure 5. Class diagram; Prototype of IoT sensing system using solar energy for vegetable plots

2. ^๕ขั้นพัฒนาระบบ (Construction) ผู้พัฒนาได้สรุปชุดเครื่องมือ อุปกรณ์ คุณลักษณะหน้าที่การทำงาน และซอฟต์แวร์ที่ใช้ ดัง Table 2

Table 2. Work characteristics, tool properties of SMVP Model

Tool Kit/Equipment	Feature/Function	Software/Library
Air Temperature and Humidity Monitoring Kit <ul style="list-style-type: none"> Microcontroller Node MCU ESP 8266 v3 SHT-20 Sensor i2c LCD Display 1602 i2c 	<ul style="list-style-type: none"> Measure temperature and humidity in the air Measure the temperature in the air. Air temperature range 0-50 degrees Celsius Measure the humidity in the air, showing 0-100% Show messages on the LCD 1602 screen. Send http request JSON data with POST method to Pi 4 	<ul style="list-style-type: none"> Arduino IDE 1.812 ESP8266WiFi.h ESP8266HTTPClient.h Wire.h DFRobot_SHT20.h LiquidCrystal_I2C.h
Soil Temperature and Humidity Monitoring Kit <ul style="list-style-type: none"> Microcontroller Node MCU ESP 8266 v3 STH-20 Sensor i2c LCD Display 1602 i2c 	<ul style="list-style-type: none"> Measure temperature and humidity in the air. Measure the temperature in the air. Air temperature range 0-50 degrees Celsius. Measure the humidity in the air, showing 0-100%. Show messages on the LCD 1602 screen. Send http request JSON data with POST method to Pi 4. 	<ul style="list-style-type: none"> Arduino IDE 1.812 ESP8266WiFi.h ESP8266HTTPClient.h Wire.h DFRobot_SHT20.h LiquidCrystal_I2C.h

Table 2. Work characteristics, tool properties of SMVP Model (continue)

Tool Kit/Equipment	Feature/Function	Software/Library
Light Monitoring Kit and Data logger <ul style="list-style-type: none"> ● Microcomputer PI 4 8GB ● GY-30 BH1750FVI Sensor (digital light intensity light module) i2c ● LCD Display 2004 i2c 	<ul style="list-style-type: none"> ● WWW port 80 service. ● RDBMS port 3306 service. ● SSH SFTP port 22 service. ● Node-Red NodeJS port 1880 service. ● PHP Interpreter. ● http request JSON date service. ● Light sensor range 0-65535 (lux). ● Show Light (lux) Temperature (C) and Humidity (%rh) at LCD 2004. ● Send http request JSON data with POST method to Pi 4. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Raspbian GNU/Linux 10.9 ● Thonny Python IDE 1.812 ● VNC Server/Viewer ● Bitvise SSH Client ● Apache 2 service ● MySQL Database service & phpmyadmin ● PHP 5 interpreter ● JpGraph 4.28 ● SHT20.py (lib) ● bh1750.py (lib) ● RPi_I2C_driver.py (lib) ● Smbus (lib) ● Mysql (lib)

2.1 พัฒนาชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ (Node MCU ESP-8266 v3) อ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นในดินและอากาศ โดยใช้โปรแกรม Arduino IDE ซึ่งเป็นโปรแกรมเปิดเผยแพร่ (Open source) ในการเขียนคำสั่งภาษา C++ และเรียกใช้ไลบรารี (Library) ของเซนเซอร์แสงเซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้น

2.2 ชุดตรวจวัดความเข้มแสง/ชุดเก็บข้อมูล (Data logger) ไมโครคอมพิวเตอร์ Raspberry Pi 4 หน่วยความจำ 4GB เพื่อทำหน้าที่เก็บข้อมูล (Data logger) แสงแดด อุณหภูมิ ความชื้น โดยติดตั้งระบบปฏิบัติการ Raspbian GNU/Linux 10.9

2.3 ใช้โปรแกรม Bitvise SSH Client เชื่อมไปยัง Pi 4 data logger server โดยเชื่อมต่อ

แบบ sftp ผ่าน port 22 เพื่อเข้าไปติดตั้ง Apache 2 web service, MySQL DB service, PHP interpreter และ phpMyAdmin ที่ Pi 4 Data logger Server

2.4 ใช้โปรแกรม phpMyAdmin เรียกผ่าน http://localhost/phpmyadmin เข้าไปที่ Pi 4 Data logger สร้างฐานข้อมูลตามคลาสไดอะแกรม ดังรูป Figure 5. ที่ได้ออกแบบไว้

2.5 เชื่อมต่อจอคอมพิวเตอร์ทาง HDMI หรือใช้โปรแกรม VNC Viewer เชื่อมต่อเข้าไปที่ Pi 4 Data logger จากนั้นเรียกใช้โปรแกรม Thonny Python IDE เขียนภาษา Python ฟังก์ชันอ่านค่าแสงจาก GY-30 BH1750FVI Sensor ฟังก์ชันอ่านค่าอุณหภูมิ และความชื้นจาก STH-20 Sensor และเขียนฟังก์ชันเก็บค่าแสง ค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้นลงในฐานข้อมูล MySQL ดังแสดงใน Figure 6.

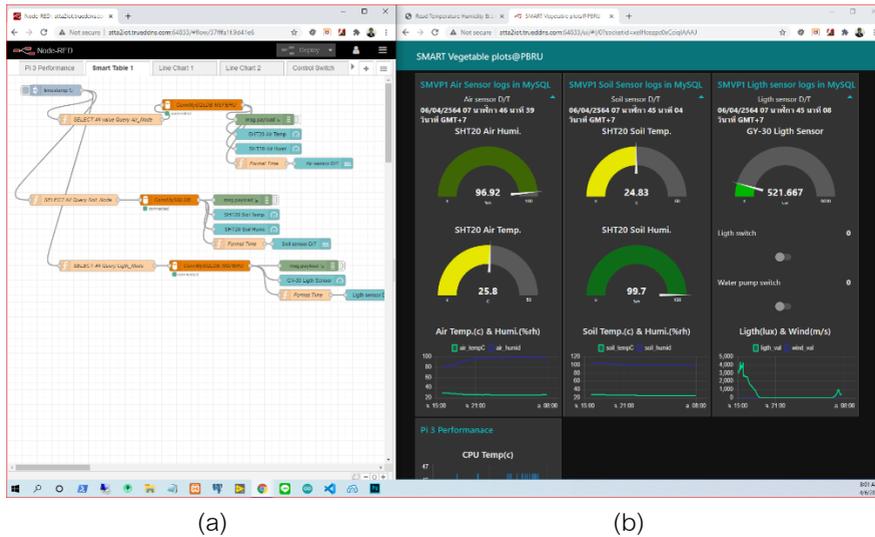


Figure 8. (a) Node-Red flow and (b) dashboard page for show air, soil, light data, control manual light switch(on/off) and water pump switch(on/off)

3. ขั้นตอนการติดตั้งระบบ (Installation)
 ผู้พัฒนาได้ดำเนินการติดตั้งชุดต้นแบบระบบตรวจวัดแสง อุณหภูมิ ความชื้น แปลงผักกาดใต้ดินติดตั้งตัวแบบระบบตรวจวัดฯ ที่ฐานการเรียนรู้แปลงผักกาดใต้ดิน ศูนย์เรียนรู้เกษตรอินทรีย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ดังแสดงใน Figure 9

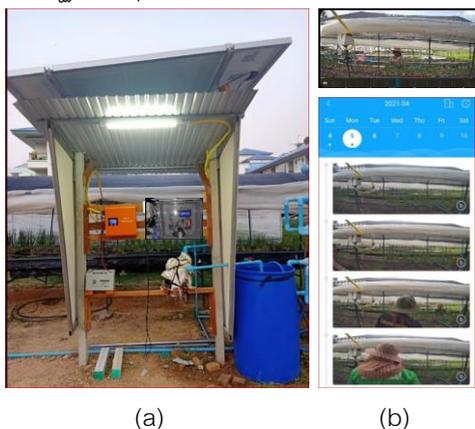


Figure 9. (a) The station of IoT sensing system using solar energy for vegetable plots., (b) Wi-Fi camera from smartphone

3.1 ติดตั้งโครงสร้างเป็นสถานีตรวจวัดประกอบด้วยเสาปูนระยะห่าง 2 เมตร ด้านบนหลังคาติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 340 วัตต์ (W) x 2 แผง แบบขนาน มีหลังคาทรงลาดเอียง และติดตั้งแผงทั้ง 2 ด้าน เพื่อกันน้ำฝน

3.2 ติดตั้งชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าโดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบผสม (Hybrid inverter) ขนาด 500 W 220 VAC 50Hz 30A MPPT 12VDC 1 ตัว และแบตเตอรี่สำรองไฟ 65 Ah 12 Volt x 2 ตัว เท่ากับ 130Ah (Ampere-Hour) ซึ่งแอมแปร์-ชั่วโมง คือความจุของแบตเตอรี่ในการบรรจพลังงาน

3.3 ติดตั้งชุดจ่ายน้ำโดยใช้ปั๊มอัตโนมัติ 1 ตัว ถังเก็บน้ำ 200 ลิตร ท่อขนาด 0.5 นิ้ว มินิสปริงเกอร์แบบแปลง 4 ตัว สปริงเกอร์ใต้หลังคา 4 ตัว

3.4 ติดตั้งชุดตรวจวัดความเข้มแสง/ชุดเก็บข้อมูล (Pi 4 Data logger) ชุดตรวจวัดอุณหภูมิ

และความชื้นในดิน ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ

3.5 ชุดเครือข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ต (Wi-Fi Access Point) โดยใช้อินเทอร์เน็ตเราท์เตอร์แบบใส่ซิม (SIM Router)

3.6 ติดตั้งกล่องวงจรปิดไร้สาย (Wi-Fi Camara) เชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เน็ตเราท์เตอร์

4. ขั้นตอนทดสอบระบบ (System Testing) และ ปรับปรุง (Maintenance) ชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP) ที่ฐานการเรียนรู้แปลงผักกาดใต้ ตามคุณลักษณะและคุณสมบัติที่กำหนดไว้ โดยใช้เวลาในการทดสอบ/ทดลองปลูกกรีนโอ๊คและเรดโอ๊ค 1 รอบการเพาะปลูก

4.1 ทดสอบตามคุณลักษณะและคุณสมบัติ โดยคำนวณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแสงอาทิตย์ของชุดจ่ายกระแสไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์แบบผสม (Hybrid inverter) ในเวลากลางวันชุดต้นแบบระบบตัวตรวจวัดฯ จะใช้พลังงานไฟฟ้าตรงจากแสงอาทิตย์ และในกลางคืนหรือไม่มีแสงอาทิตย์ จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่สำรองไฟ โดยคำนวณปริมาณการจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดตรวจวัดแสง/เก็บข้อมูลใช้แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ (Volt) คุณด้วยกระแสไฟฟ้า 3 แอมป์ (Amp) ($5\text{ V} \times 3\text{ A} = 15\text{ W}$) คิดเป็นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ 15 วัตต์ (Watt)

คำนวณปริมาณการจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดจ่ายน้ำ (ในเวลากลางวัน) ใช้กำลังไฟฟ้า 370 วัตต์ หารด้วยแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ (Volt) ($370\text{ W} / 220\text{ V} = 1.68\text{ A}$) คิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 1.68 แอมป์

คำนวณปริมาณการจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในดินใช้แรงดันไฟฟ้า 3.6 โวลต์ คุณด้วยกระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ (mA) ($3.6\text{ V} \times 0.012\text{ A} = 43.2\text{ W}$) คิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 43.2 วัตต์

คำนวณปริมาณการจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศใช้แรงดันไฟฟ้า 3.6 โวลต์ คุณด้วยกระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ (mA) ($3.6\text{ V} \times 0.012\text{ A} = 43.2\text{ W}$) คิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 43.2 วัตต์

คำนวณปริมาณการจ่ายไฟฟ้าให้กับชุดกล่องวงจรปิดไร้สาย ใช้กำลังไฟฟ้า 11 วัตต์ หารด้วยแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ($11\text{ W} / 12\text{ V} = 0.92\text{ A}$) คิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 0.92 แอมป์

คำนวณไฟฟ้าส่องสว่างฟลูออเรสเซนต์ มีบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ในตัว 1 ดวง ขนาดกำลังไฟฟ้า 20 วัตต์ หารด้วยแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ($20\text{ W} / 220\text{ V} = 0.09\text{ A}$) คิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ 0.09 แอมป์

ดังนั้นกำลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเวลากลางคืน 6 ชั่วโมง เท่ากับ $\{(15\text{ วัตต์}) \times 6\text{ ชม.}\} + \{(43.2\text{ วัตต์}) \times 2\text{ ชุด เซนเซอร์ (ดิน/อากาศ)} \times 6\text{ ชั่วโมง}\} + \{(11\text{ วัตต์}) \times 6\text{ ชม.}\} / [\text{แรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่} \times 0.6 (\% \text{ การใช้งานกระแสไฟฟ้าที่อยู่ในแบตเตอรี่}) \times 0.85 (\text{ประสิทธิภาพของ Inverter})]$ คิดเป็น 110.20 Ah ซึ่งเพียงพอต่อการใช้พลังงานแบตเตอรี่ที่เก็บไว้ 130 Ah สำหรับในตอนกลางคืน ทั้งนี้เงื่อนไขการของโปรแกรมระบบตรวจวัดฯ ไม่ได้ให้รดน้ำสปริงเกอร์ในช่วงเวลากลางคืนจึงไม่ได้นำคำนวณด้วย ดังแสดงใน Table 3

Table 3. Energy used and test results, characteristics and qualifications of the tool kit/equipment

Tool kit/Equipment and Feature/Function	Energy used	Function Test Results
<p>Solar, inverter, and solar panels kit</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Able to supply electricity during the day during the time of sunlight. ● Able to supply electricity at night During the time when there is no sunlight, all night. 	<p>Battery</p> <p>65 Ah 12 Volt x 2 set = 130Ah</p>	<p>✓ match attributes/functions</p>
<p>Air temperature and humidity monitoring kit</p> <ul style="list-style-type: none"> ● The sensor can measure air temperature. Air temperature range 0-50 degrees Celsius and air humidity display value 0-100%, display text on the LCD 1602. ● Able to send http request JSON data with POST method to Pi 4. 	<p>Air sensor kit</p> <p>3.6 V x 0.012 A = 43.2 W</p>	<p>✓ match attributes/functions</p>
<p>Soil temperature and humidity monitoring kit</p> <ul style="list-style-type: none"> ● The sensor can measure air temperature. Air temperature range 0-50 degrees Celsius and air humidity display value 0-100%, display text on the LCD 1602. ● Able to send http request JSON data with POST method to Pi 4 	<p>Soil sensor kit</p> <p>3.6 V x 0.012 A = 43.2 W</p>	<p>✓ match attributes/functions</p>
<p>Light monitoring kit and PI4 data logger</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Able to store values from light sensor 0-65535 (lux) into database ● The data logger can store values from the sensors, enter the database, and retrieve the historical values as an optical graph with browsers ● Able to view the statistics of the sun, temperature and humidity in the past as a light graph with browser 	<p>PI4 Data logger</p> <p>5 V x 3 A = 15 W</p> <p>Electric lamp</p> <p>20 W / 220 V = 0.09 A</p>	<p>✓ match attributes/functions</p>
<p>Dashboard monitor and planting grow camera</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Able to control on/off Automatic water pump according to conditions, Temperature/Humidity/Light ● Able to manually control the water on/off (manual) with a browser via IP address ● Able to watch the growth of table vegetable plots via phone/smartphone 	<p>Water pump</p> <p>370 W / 220 V = 1.68 A</p> <p>IP Camera</p> <p>11 W / 12 V = 0.92 A</p>	<p>✓ match attributes/functions</p>

4.2 ทดสอบจากกลุ่มผู้ใช้อาจารย์
สาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสาขาวิชาวิศวกรรม
พลังงาน นักศึกษาสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ และ
เกษตรกรผู้เข้าศึกษาดูงาน ด้วยแบบประเมิน

5 ระดับ จำนวน 30 คน เป็นอาจารย์และนักศึกษา
12 คน เป็นเกษตรกร/ผู้ศึกษาดูงาน 30 คนใน 3 ด้าน
ดังแสดงใน Table 4

Table 4. Performance results of the SMVP model

Assessment issues	Result	
	Mean (\bar{X})	Standardization (S.D.)
1. The efficiency of the SMVP model		
1.1 Solar power supply unit: Able to supply electricity during the day throughout the time of sunlight and can supply electric power at night during the time when there is no sunlight all night. Available all day (24 hours)	4.66	0.47
1.2 Air Temperature and Humidity Monitoring Kit: The sensor can measure air temperature. Air temperature range 0-50 degrees Celsius, air humidity display 0-100%, display the message on the LCD 1602, and send the data to Pi 4 data logger. Available all day (24 hours)	4.53	0.62
1.3 Soil Temperature and Humidity Monitoring Kit: The sensor can measure air temperature. Air temperature range 0-50 degrees Celsius, air humidity display 0-100%, display the message on the LCD 1602, and send the data to Pi 4 Data logger. Available all day (24 hours)	4.44	0.72
1.4 Light Monitoring Kit and PI4 Data logger: Able to store values from light sensor 0-65535 (lux) into database, and show the statistics graph in the past of the light, temperature, and humidity with browser. Available all day (24 hours)	4.66	0.47
1.5 Dashboard Monitor and Planting grow camera		
1.5.1 Data logger able to store values from sensors into database and retrieve historical values as graphs through a browser. Available all day (24 hours)	4.83	0.37
1.5.2 Data logger able to control on/off, Automatic water pump according to conditions, temperature/humidity/light	4.50	0.50
1.5.3 Users can control the water on/off manually with a browser.	4.66	0.47
1.5.4 Users can watch the growth of the table vegetable plot through the phone/smartphone. Available all day (24 hours)	4.83	0.37
Average efficiency of the SMVP Model	4.64	0.50

Table 4. Performance results of the SMVP model (continue)

Assessment issues	Result	
	Mean (\bar{X})	Standardization (S.D.)
2. The cost of the SMVP Model.		
2.1 SMVP budget for design/build/installation with a budget of 45,000 baht which consists of: 1) Solar power supply unit 2) Air temperature and humidity monitoring kit 3) Soil temperature and humidity monitoring kit 4) Light monitoring kit and PI4 data logger and 5) Dashboard monitor and planting grow camera is appropriate in the budget.	4.50	0.51
2.2 SMVP budget for design/build/installation with a budget of 45,000 baht which estimated cultivation/production/income and calculate the break-even point (Table 2) to be appropriate.	4.36	0.61
Average cost of the SMVP Model	4.33	0.56
3. Benefits for use in cultivation of the SMVP Model		
3.1 The SMVP model can be installed and used with vegetable plantations, raised tables and other areas.	4.83	0.37
3.2 The SMVP model is useful for monitoring the growth of vegetable plots leading to public relations for sales through online and offline markets.	4.86	0.50
3.3 The SMVP model is useful to use statistics that are the factors of vegetable cultivation, light value, temperature and humidity accuracy of each vegetable. as information for the next cultivation.	4.66	0.47
Average benefits for use in cultivation of the SMVP model	4.78	0.45
Average of all aspects	4.61	0.50

4.3 ปรับปรุงแก้ไข (Maintenance)
หลายรอบ เพื่อหาความเหมาะสมตาม
สภาพแวดล้อมจริงของพื้นที่แปลง ดังนี้

4.3.1 ปรับการหนดวงเวลาในการ
เขียน/อ่าน ข้อมูลลงฐานข้อมูลแต่ละชุดเซนเซอร์โดย
การสุ่มเวลา 5 นาทีเพื่อลดการชนกันในการเขียน

ข้อมูลลงฐานข้อมูล พร้อมใส่บล็อกคำสั่งภาษา
Python “try: except as e.” เพื่อตรวจสอบ
ข้อผิดพลาด error กรณีอ่าน/เขียนข้อมูลจาก
ฐานข้อมูลไม่ได้

4.3.2 ปรับระยะ/ตำแหน่งการวาง
เสาเพื่อเชื่อมต่อสัญญาณ Wi-Fi ของชุด

เซนเซอร์ให้สัญญาณมีความเสถียรมากขึ้น โดยให้รัศมีของสัญญาณ Wi-Fi ไม่ควรเกิน 80 เมตร

4.3.3 ป้องกันน้ำจากสปริงเกอร์ไม่ให้หยดน้ำโดนเซนเซอร์โดยใช้กล่องกันน้ำ

4.3.4 ปรับปรุง Node-Red UI Flow ให้สามารถเรียกดูได้แบบสาธารณะ โดยเขียนคำสั่งภาษา Python ฟังก์ชันที่ Pi 4 Data logger ให้ส่งค่าทั้งหมดมาเก็บไว้ยังฐานข้อมูลที่เป็นโดเมนสาธารณะ (Public Domain) ที่ URL <http://ms.pbru.ac.th:1880/ui>

ผลการวิจัย

การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักยกโต๊ะ (SMVP Model) มีผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ สามารถใช้ทำงานตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ทั้ง 5 ชุด 1) ชุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ของอินเวอร์เตอร์ และแผงโซลาร์เซลล์ 2) ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ 3) ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในดิน 4) ชุดตรวจวัดความเข้มแสง/ชุดเก็บข้อมูล (Data logger) และ 5) ชุดแสดงสถิติผ่านอินเทอร์เน็ต และแสดงภาพแปลงปลูกผ่านทางคอมพิวเตอร์ทางบราวเซอร์และสมาร์ทโฟน สามารถเฝ้าดูการเติบโตของแปลงผักยกโต๊ะ โดยเรียกดูค่าสถิติบน Dashboard ผ่านอินเทอร์เน็ตได้ทุกที่ทุกเวลา

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ โดยรวมที่ค่าเฉลี่ย 4.61 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 ผลการประเมินประสิทธิภาพโดย

การทดสอบจากผู้ใช้ ทั้ง 3 ด้าน ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1) ด้านประสิทธิภาพของระบบตรวจวัดฯ ชุดจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์และแผงโซลาร์เซลล์ค่าเฉลี่ย 4.66 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.47 ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศค่าเฉลี่ย 4.53 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.62 ชุดตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในดินค่าเฉลี่ย 4.44 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.72 ชุดตรวจวัดความเข้มแสงและชุดเก็บข้อมูลค่าเฉลี่ย 4.66 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.47 ชุดแสดงสถิติ และแสดงภาพแปลงปลูก เพื่อเฝ้าดูการเติบโตค่าเฉลี่ย 4.71 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.43 รวมทั้ง 5 ชุดได้ค่าเฉลี่ย 4.64 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50

2) ด้านต้นทุนแปลงเพาะปลูกผักยกโต๊ะมีความเหมาะสมในด้านงบประมาณ และคำนวณจุดคุ้มทุนที่ค่าเฉลี่ย 4.33 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.56

3) ด้านประโยชน์ต่อการนำไปใช้เพาะปลูกชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ สามารถนำไปติดตั้งและใช้กับแปลงเพาะปลูกผักยกโต๊ะพื้นที่อื่น ๆ ที่ค่าเฉลี่ย 4.83 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.37 ชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ มีประโยชน์ต่อการเฝ้าดูการเจริญเติบโตของแปลงผัก ที่ค่าเฉลี่ย 4.86 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 และชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ มีประโยชน์ต่อการใช้สถิติที่เป็นปัจจัยการเพาะปลูกผัก ค่าแสง อุณหภูมิ ความชื้น ที่แม่นยำของผักแต่ละชนิด มาเป็นข้อมูลในการเพาะปลูกครั้งต่อไป ที่ค่าเฉลี่ย 4.66 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.47 ประโยชน์โดยรวมค่าเฉลี่ยอยู่ระดับมากที่สุดที่ค่าเฉลี่ย 4.78 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.45

โดยผู้ใช้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติม คือ ควรมีการขยายผลงานวิจัยสู่กลุ่มเกษตรกรเพิ่มขึ้นเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

อภิปรายผล

การวิจัยการพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักยกโต๊ะ (SMVP Model) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกพืชผักให้คุ้มกับต้นทุนที่ใช้ไป มีการตัดสินใจการให้น้ำหรือให้สารละลายชีวภัณฑ์โดยอัตโนมัติตามชนิดของพืชผัก กรณีที่อุณหภูมิในดินหรือในอากาศเพิ่มสูงกว่าค่าที่ผู้ใช้ตั้งไว้ในระบบ SMVP Model จะตัดสินใจปั้มน้ำสปริงเกอร์ เพื่อเพิ่มความชื้นในดินและช่วยลดอุณหภูมิ ให้มีระดับสภาพแวดล้อมที่คงที่สอดคล้องกับ Popovic et al.² ที่สร้างสถาปัตยกรรมแพลตฟอร์มที่เปิดใช้งาน IoT เพื่อการเกษตรที่แม่นยำและการตรวจสอบระบบนิเวศน์ Zamora-Izquierdo et al.³ ที่การทำฟาร์มอัจฉริยะด้วยการประมวลผลแบบเซกซ์และคลาวด์

ชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP model) เป็นเครื่องมือที่แม่นยำในการควบคุมปัจจัยในการเจริญเติบโตของพืชผักในแปลงผักยกโต๊ะของเกษตรกร รวมทั้งช่วยลดเวลาในการจัดเก็บข้อมูลสถิติการเพาะปลูก เพื่อให้ได้ค่าของอุณหภูมิ ค่าความชื้นที่เหมาะสมของพืชผักแต่ละชนิดเป็นสูตรสำเร็จของการเพาะปลูกพืชผักแต่ละชนิดให้แก่เกษตรกร/กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกผักอินทรีย์ในจังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดใกล้เคียง สอดคล้องกับ Sgiysing⁶ ที่พัฒนาระบบจัดการฐานข้อมูลผู้ปลูกมะม่วงสายรุ้งโดยใช้อาร์เอฟไอดีแท็ก (RFID Tag)

ในการบริหารจัดการผลิตสินค้าและ Ong-art⁷ ที่พัฒนาต้นแบบระบบควบคุมความชื้นการปลูกผักโดยใช้พลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ อีกทั้งระบบตรวจวัดฯ ยังสามารถส่งข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นแสงแดด ให้กับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์แหล่งเพาะปลูกพืชและไม้ผล เพื่อการผลิตอาหารและการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดเพชรบุรีของอัตราภาพ มณีเดิม และคณะ⁸ ที่มีฐานข้อมูลรวบรวมไว้แล้ว

อนาคตชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP Model) สามารถเพิ่มเซนเซอร์การตรวจวัดปัจจัยการเพาะปลูก เช่น เซนเซอร์ลม เซนเซอร์ธาตุอาหารในดิน เซนเซอร์ธาตุอาหารในน้ำ เพื่อให้ตรงตามความต้องการของพืชแต่ละชนิด ยังต้องพัฒนาเรื่องการประมวลผลด้วยภาพถ่ายแปลงผักยกโต๊ะ ให้ได้ใกล้เคียงกับ Hobart et al.⁴ ใช้การวัดระยะในภาพถ่ายจากการใช้อากาศยานไร้คนขับในการตรวจสอบการเจริญเติบโตความสูงของต้นแอปเปิ้ลที่แม่นยำ และ Yang et al.⁵ โดยวิธีการประมวลผลภาพเพื่อหาปริมาณความเข้มของจุดสีของใบต้นกล้าผ่านคลาวด์ และเซนเซอร์ระยะไกล

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาชุดต้นแบบระบบตรวจวัดแสงอุณหภูมิ และความชื้น จากพลังงานแสงอาทิตย์ควบคุมการทำงานผ่านอินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งสำหรับแปลงผักยกโต๊ะ สามารถใช้ทำงานตามคุณลักษณะที่กำหนดไว้ทั้ง 5 ชุด ผลการประเมินประสิทธิภาพชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP Model) โดยรวมที่ค่าเฉลี่ย 4.61 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 ระดับมากที่สุด ซึ่งควรมีการขยายผลงานวิจัยสู่กลุ่มเกษตรกรเพิ่มขึ้น เพื่อนำผลของการวิจัยไปใช้



ประโยชน์ เพื่อให้ชุดตรวจวัดในการตัดสินใจการให้น้ำ การพนหมอกเพื่อลดอุณหภูมิ ให้มีระดับสภาพแวดล้อมซึ่งเป็นเครื่องมือที่แม่นยำในการเฝ้าดูการเจริญเติบโตของพืชผักในแปลงผักยกโต๊ะของเกษตรกรรวมทั้งช่วยลดเวลาในการจัดเก็บข้อมูลสถิติการเพาะปลูก เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิ ความชื้น และแสงแดด ที่เหมาะสมของพืชผักแต่ละชนิดให้กับเกษตรกร/กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกผักอินทรีย์ในจังหวัดเพชรบุรีและจังหวัดใกล้เคียง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ศิริวรรณแดงฉ่ำ สันับสนุนทุนในการสร้างชุดต้นแบบระบบตรวจวัดฯ (SMVP Model) พร้อมสถานที่ทดลองและนักศึกษาศาखाวิชาเกษตรศาสตร์ และอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี และเกษตรกรผู้เข้าศึกษาดูงานที่เป็นผู้ใช้และผู้ทดสอบระบบ

เอกสารอ้างอิง

1. Zanella A, Bui N, Castellani A, Vangelista L, Zorzi M. Internet of Things for Smart Cities. *EEE Internet Things J* 2014;1:22-32.
2. Popovic T, Latinovic N, Pesic N, Zecevic Z, Krstajic B, Djukanovic S. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. *Comput Electron Agric* 2017;140:255-265.
3. Zamora-Izquierdo MA, Santa J, Martınez JA, Martinez M, Skarmeta AF. Smart farming IoT platform based on edge and

cloud computing. *Biosyst Eng* 2019;177:4-7.

4. Hobart M, Pflanz M, Weltzien C, Schirrmann M. Growth height determination of tree walls for precise monitoring in apple fruit production using UAV photogrammetry. *Remote Sens* 2020;12:1656:1-17. doi.org/10.3390/rs12101656.
5. Yang S, Zheng L, Gao W, Wang, Hao X, Mi J, Wang M. An efficient processing approach for colored point cloud-based high-throughput seedling phenotyping. *Remote Sens* 2020;12:1540:1-21. doi.org/10.3390/rs12101540.
6. Saiysing J. The development of smart farm solution machine in a community enterprise: A group of growers and the rainbow mango processing, Ban Nong Bua Chum, Tambon Nong Hin, Nong Kung Sri district, Kalasin province. *SNRUJST* 2021;13:11-9.
7. Ongate N. Prototype design of solar soil moisture controller to be used as an alternative energy for agriculture against the growth of vegetables in Khao Kho district, Phetchabun province. *SNRUJST* 2021;13:20-8.
8. อัดภาพ มณีเต็ม, นวรัตน์ ประทุมตา, วชิรย์ กิ่งทอง. การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์แหล่งเพาะปลูกพืชและไม้ผล เพื่อการผลิตอาหารและการท่องเที่ยวเชิงเกษตร จังหวัดเพชรบุรี. *JIT* 2563;2:1-18. doi.org/10.14456/jait.2020.1.

ผลของแป้งสุกในแป้งโดที่มีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส สี และลักษณะเนื้อสัมผัส ของผลิตภัณฑ์ลอดช่องสิงคโปร์ใบเตย

Influence of Cooked Flour in Dough Mixing on Sensorial Attributes, Color and Texture Properties of Pandan Lod Chong Singapore Product

สรรรชนี เต็มเปี่ยม, วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงศ์ และ ศุภักษร มาแสวง

Sansanee Tempiam, Woraluk Panyathitipong, Supuksorn Masavang

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตดุสิต
กรุงเทพมหานคร 10300

Department of Food Science and Technology, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon, Dusit, Bangkok 10300, Thailand

*Corresponding author; E-mail: supuksorn.m@rmutp.ac.th

Received: 27 April 2022 /Revised: 17 May 2022 /Accepted: 15 June 2022

บทคัดย่อ

ผลิตภัณฑ์ลอดช่องสิงคโปร์เป็นขนมหวานที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังที่สุกบางส่วน เพื่อให้แป้งโดยมีลักษณะเหนียวนุ่ม ดังนั้นปริมาณของแป้งสุกในโดจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของแป้งสุกและแป้งดิบที่มีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส ลักษณะเนื้อสัมผัส และค่าสีในผลิตภัณฑ์ลอดช่องสิงคโปร์ใบเตย 3 สูตร ที่เตรียมแป้งสุกด้วยแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30, 35, และ 40 กวนด้วยน้ำใบเตยที่ใช้น้ำปูนใสอิมตัว จากนั้นนำไปนวดผสมกับแป้งดิบร้อยละ 70, 65 และ 60 ตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าสูตรที่ 1 ซึ่งมีส่วนผสมของแป้งสุกและแป้งดิบเท่ากับร้อยละ 30 และ 70 ตามลำดับ ได้รับคะแนนการยอมรับด้านลักษณะปรากฏ, สี, กลิ่น, ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมมากที่สุด ($P < 0.05$) การตรวจค่าสีพบว่าค่าสว่าง (L^*) ค่าสีเหลือง (b^*) และค่าสีเขียว (a^*) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสุกลดลงและแป้งดิบเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าสีเขียวจากใบเตยมีความคงตัวมากที่สุดในเส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรที่ 1 ส่วนการตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแสดงให้เห็นว่าเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่มีปริมาณแป้งสุกน้อยและแป้งดิบมากในแป้งโดส่งผลให้เส้นมีค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความยืดหยุ่น (Elasticity) เพิ่มขึ้นจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการผลิตลอดช่องสิงคโปร์สูตรที่ 1 ซึ่งมีส่วนผสมของแป้งสุกและแป้งดิบเท่ากับร้อยละ 30 และ 70 เป็นสูตรที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพทางกายภาพที่เหมาะสมและส่งผลให้ได้รับได้รับการยอมรับทุกด้านมากที่สุด

คำสำคัญ: ลอดช่องสิงคโปร์ แป้งสุก แป้งมันสำปะหลัง สีเขียวจากใบเตย

Abstract

Lod Chong Singapore is a dessert made from partially cooked cassava flour to soften the dough. Therefore, the cooked flour content in dough is an important factor for product quality. The objective of this research was to study the effect of cooked flour level in dough mixing on the sensorial attributions, color and texture characteristics in different 3 formulas of Pandan Lod Chong Singapore. Each dough was prepared by mixing the cooked flour paste with 30%, 35% and 40% cassava flour with pandan juice extracted with saturated limewater. Then, it was kneaded with 70%, 65 and 60 percent of raw flour. They were called sample recipes no. 1, 2 and 3, respectively. Sensory evaluation results revealed that recipe no. 1, which contained 30% and 70% of cooked and uncooked flour, respectively, showed the highest acceptance score in terms of appearance, color, odor, texture and overall liking ($p < 0.05$). Color values revealed that the brightness (L^*), yellowness (b^*) and green color value (a^*) increased with a decrease in cooked flour level and an increase in the raw flour in flour dough. This indicated that the green color from the pandan leaves was the most stable in the Lod Chong Singapore recipe no. 1. Texture analysis result was shown that Lod Chong Singapore noodles contained low cooked flour and high raw flour level in dough mixture, resulting in the tensile strength and elasticity increased. This study demonstrates that Singapore Lod Chong recipe no. 1, containing cooked flour 30% and raw flour 70%, is a formulation that ensures the product has an appropriate physical quality and thus received the most sensory acceptance scores in all aspects.

Keywords: Lod Chong Singapore, Cooked flour, Cassava flour, Pandan-leaf green color

บทนำ

ลวดชองสิงคโปร์ (Cassava flour jelly หรือ Lod Chong Singapore) เป็นขนมไทยที่มีส่วนผสมหลักคือ แป้งมันสำปะหลัง ขึ้นรูปเป็นเส้นหรือรูปแท่ง และทำให้มีสีเขียวจากน้ำคั้นใบเตย เส้นลวดชองสิงคโปร์ที่จำหน่ายทั่วไปผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง นวดกับน้ำร้อนจัดทำให้แป้งสุกบางส่วนผสมกับแป้งมันสำปะหลังดิบจนแป้งเหนียว จับตัวเป็นก้อน และเนียนเป็นเนื้อเดียวกันเพื่อนำไปรีดและตัดเป็นเส้น จากนั้นนำไปต้มให้สุกในน้ำเดือด สามารถ

รับประทานโดยใส่น้ำกะทิ น้ำเชื่อมและน้ำแข็งทุบ¹ ในอุตสาหกรรมผลิตสามารถใช้น้ำใบเตยแทนน้ำเปล่าเพื่อเพิ่มสีเขียวได้ แต่การเติมน้ำสกัดจากใบเตยเพื่อให้สีเขียวในอาหารต้องหลีกเลี่ยงความร้อนที่สูงเกินไป เพราะความร้อนสูงจะทำให้สารสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์จากใบเตยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีเขียวเป็นสีเขียวมะกอกหรือสีเหลือง^{2,3} ระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรเจนไอออน (H^+) สามารถเปลี่ยนรูปของคลอโรฟิลล์ไปเป็นฟีโอฟทินโดยการแทนที่แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในวงแหวนพอร์ไฟริน

(Porphyrin ring)⁴ ในการผลิตขนมไทยบางชนิดมีการใช้น้ำปูนใสในการคั้นน้ำใบเตยแทนการใช้น้ำเปล่าเพื่อทำให้เกิดความคงตัวของสีเขียวในผลิตภัณฑ์ เช่น ขนมเปียกปูนใบเตย⁵ ขนมลอดช่องใบเตย⁶ เป็นต้น เนื่องจากความเหนียวนุ่มและสีเป็นลักษณะที่สำคัญที่ใช้ในการตัดสินคุณภาพของเส้นลอดช่องลิงคโพร สิ่งสำคัญคือต้องป้องกันการสลายตัวของสารสีเขียวและการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสขณะให้ความร้อน การผลิตลอดช่องลิงคโพรต้องทำให้แป้งสุกบางส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นและนวดผสมกับแป้งดิบเพื่อให้ความแข็งแรงกับเส้นลอดช่องลิงคโพร ก่อนหน้านี้นี้มีการศึกษาของ Sharma และคณะ⁷ ได้รายงานผลของการใช้แป้งสุกที่คืนตัวแล้ว (Gelatinized-retrograded starches, GRS) ทดแทนแป้งสาลีที่ร้อยละ 0, 10 และ 20 ที่มีต่อคุณภาพของเส้นบะหมี่ ซึ่งเส้นบะหมี่ที่มีปริมาณของ GRS สูงจะทำคุณภาพด้านลักษณะเนื้อสัมผัส (Hardness, Cohesiveness, Gumminess, Springiness และ Adhesiveness) มีค่าต่ำกว่าเส้นบะหมี่ที่ผลิตแป้งสาลีล้วน ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณโปรตีนที่สูงในสูตรปกติที่ถูกเจือจางด้วยแป้งสุกในสูตรที่เติม GRS ทำให้โครงสร้างของกลูเตนลดลงส่งผลให้เส้นบะหมี่มีเนื้อสัมผัสที่นิ่ม แต่ทำให้เส้นมีความแน่นเนื้อ (Firmness) สูงขึ้น อีกทั้งมีค่าคะแนนการยอมรับด้านลักษณะปรากฏและการยอมรับโดยรวมไม่ต่างจากสูตรปกติ แสดงให้เห็นว่าการเติม GRS ช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่ได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส นอกจากนี้แป้งสุกยังถูกใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของขนมปังขาวโดยใช้แป้งสุกของแป้งสาลีชนิดแข็ง (Hard wheat flour) ร้อยละ 20 ทดแทนแป้งสาลีใน

สูตรการผลิต จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) พบว่าแป้งสุกทำให้ขนมปังมีรูพรุนขนาดใหญ่และกลมขึ้น ในขนมปังสูตรควบคุมพบเม็ดแป้งอยู่บนผิวของผนังรูพรุน ในขณะที่ขนมปังที่เติมแป้งสุกจะมีเจลแป้งที่เชื่อมระหว่างเม็ดแป้ง อีกทั้งตาข่ายกลูเตนมีความหนาและหยาบขึ้นในขนมปังที่เติมแป้งสุกซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกลูเตนทำให้ขยายตัวและเก็บกักก๊าซในระหว่างการอบได้ดีขึ้น ส่งผลให้ขนมปังไม่ยุบจนเกินไปและยังคงความยืดหยุ่นได้ดี⁸ จากงานวิจัยที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าการใช้แป้งสุกบางส่วนในผลิตภัณฑ์อาหารสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของอาหารได้ การใช้สัดส่วนของแป้งที่สุกแล้วหรือแป้งสุก (Cooked flour) ที่ต้มด้วยน้ำใบเตยกับแป้งดิบ (Raw flour) ที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลต่อคุณภาพของเส้นลอดช่องลิงคโพร รวมถึงความคงตัวของสีเขียวจากใบเตย

ใบเตย (*Pandanus amaryllifolius*) เป็นพืชเมืองร้อนพบได้ทั่วไปในประเทศเขตร้อนรวมถึงประเทศไทย มักถูกใช้เป็นสารให้สีเขียวในอาหารเนื่องจากมีปริมาณคลอโรฟิลล์สูง⁹ และสารให้กลิ่นธรรมชาติในการแปรรูปอาหารและเครื่องดื่ม เนื่องจากในใบเตยมีสาร 2-acetyl-1-pyrroline ซึ่งเป็นเป็นสารประกอบที่ระเหยได้¹⁰ การใช้ใบเตยเป็นสารสีจากธรรมชาติ ถูกทำโดยการผสมน้ำสกัดจากใบเตยกับส่วนผสมของอาหารระหว่างการเตรียมอาหารหรือการแปรรูป¹¹ แต่อย่างไรก็ดีความเข้มของสารสีเขียวจากธรรมชาติหรือคลอโรฟิลล์มักอยู่ในรูปแบบที่ไม่คงตัวเนื่องจากการสลายตัวอย่างรวดเร็วด้วยปัจจัย เช่น ปฏิกิริยาของเอนไซม์

ความเป็นกรด การสัมผัสกับอากาศ แสง และความชื้น ในระหว่างการแปรรูป⁹ มีหลากหลายวิธีที่ถูกใช้รักษาสารสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์ระหว่างการให้ความร้อนโดยการควบคุมความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยปรับสภาวะขณะหุงต้มให้เป็นด่างหรือแอลคาไลน์ (Alkaline treatment) เป็นวิธีหนึ่ง que เพิ่มความคงตัวของสีเขียวจากรธรรมชาติด้วยการเติมสารกลุ่มแอลคาไลน์ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH_2), แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MgOH_2), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น โดยการในของเหลวที่ใช้สกัดสารสีเขียวจากพืช สารเคมีดังกล่าวช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทำให้คงความเป็นสีเขียวของคลอโรฟิลล์ได้¹²

ในขนมไทยที่ใช้ที่มีแป้งเป็นวัตถุดิบ (Starch-based dessert) น้ำปูนใสอิมิตัว หรือสารละลาย CaOH_2 ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 12.2 ถูกใช้เป็นส่วนผสมในของหวาน เช่น ขนมเปียกปูน⁵ ลอดช่องพื้นเมือง⁶ เป็นต้น เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ให้คงตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยรักษากลิ่นและสีเขียวของไบเตยอีกด้วย มีงานวิจัยที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งที่เติมสารละลาย CaOH_2 ระหว่างการให้ความร้อนพบว่าในสภาวะที่ CaOH_2 มีความเข้มข้นต่ำบริเวณที่เป็นผลึก (Crystalline) มีแนวโน้มที่จะถูกทำลายโดยแอลคาไลน์^{3, 14} เมตริกซ์ของเม็ดแป้งจะถูกยึดออกโดยการแทนที่ของโปรตอน, Ca^+ หรือ CaOH^+ เมื่อ CaOH_2 มีความเข้มข้นสูงจะเกิดพันธะเชื่อมข้าม (Cross-linking) ของโครงสร้างเชิงซ้อนระหว่าง CaOH_2 และแป้งสุกทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรงส่งผลให้แป้งมีความหนืดสูงขึ้น ทำให้

เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น¹⁵ และโครงสร้างของแป้งเปียกและ CaOH_2 ยังสามารถเก็บกักสารให้กลิ่นไว้ในแป้งที่สุกแล้วได้อีกด้วย¹⁶

ดังนั้นในการทำวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ลอดช่องสิงคโปร์โดยใช้ปริมาณของแป้งสุกหรือแป้งเปียกที่เตรียมด้วยน้ำปูนใสอิมิตัวในการเตรียมน้ำไบเตยขนาดผสมกับแป้งดิบเพื่อเตรียมแป้งโดสำหรับผลิตเส้นลอดช่องสิงคโปร์ในระดับที่แตกต่างกัน และทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส เปรียบเทียบค่าสี และลักษณะเนื้อสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่เป็นผลจากการใช้ปริมาณของแป้งสุกที่ใช้ขนาดผสมกับแป้งมันสำปะหลังดิบที่แตกต่างกันในการผลิตเส้นลอดช่องสิงคโปร์

วิธีการวิจัย

1. วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

แป้งมันสำปะหลัง ขนาด 450 กรัม น้ำปูนใส (CaOH_2) ความเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร โดยชั่งปูนแดง 5 กรัม ผสมน้ำสะอาด 100 กรัม แล้วคนให้เข้ากัน ปล่อยให้ทิ้งไว้ 1 คืน⁶ น้ำไบเตยเตรียมจากไบเตยที่หั่นเป็นชิ้นขนาดเล็กต่อน้ำปูนใสอิมิตัวด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ปั่นผสมกันด้วยเครื่องปั่น กำลัง 250 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที ด้วยความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที นำมากรองด้วยผ้าขาวบาง 2 ชั้น เก็บน้ำปูนใสและน้ำไบเตยที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และทำการเตรียมวัตถุดิบเพื่อใช้ในการเตรียมน้ำสำหรับทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ น้ำกะทิแบบยูเอชที ขนาด 250 มิลลิลิตร และน้ำตาลทรายขาว ใช้ในการเชื่อมโดยชั่งน้ำตาลทราย 500 กรัม น้ำเปล่า 1,000 มิลลิลิตร

ต้มไฟอ่อน เคี้ยวจนได้น้ำเชื่อมที่มีความหวาน
สุดท้าย 32 องศาบริกซ์ แล้วพักไว้ให้เย็น

2. การเตรียมเส้นสิงคโปร์ใบเตย

การศึกษาผลของสัดส่วนแป้งสุกและแป้งมัน
สำปะหลังดิบในแป้งโด โดยการเตรียมเส้นลอดช่อง
สิงคโปร์ 3 สูตร โดยมีส่วนผสมหลัก ได้แก่ แป้งมัน
สำปะหลัง ซึ่งเป็นแป้งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกใช้
เตรียมแป้งสุกร้อยละ 30, 35 และ 40 (Table 1)
และนำไปผสมกับน้ำใบเตยที่สกัดด้วยน้ำปูนใส
อิมตัวหรือสารละลาย CaOH_2 ที่เตรียมไว้ปริมาตร
100 มิลลิลิตร กวนให้สุกเป็นเนื้อเดียวกันด้วย
ไฟกลางเป็นเวลา 2 นาที เมื่อครบเวลาให้นำไปนวด

ผสมกับแป้งมันสำปะหลังดิบส่วนที่เหลือร้อยละ 70,
65 และ 60 ตามลำดับ ขณะร่อนให้เข้ากันดีเป็นเวลา
5 นาที นำแป้งโดที่นวดเสร็จแล้วมารีดให้เป็นแผ่น
หนา 4 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องทำเส้นบะหมี่ โรยแป้ง
นวลเล็กน้อยเพื่อไม่ให้ตัวเส้นติดกัน แล้วตัดให้เป็น
เส้นขนาด $0.5 \times 18.0 \times 0.4$ เซนติเมตร นำไปต้มในน้ำ
เดือดโดยใช้อัตราส่วนของลอดช่องและน้ำเย็น 1:5
เป็นเวลา 2 นาที เมื่อเส้นลอดช่องสิงคโปร์สุกก็นำลง
ไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนของเส้น
ลอดช่องสิงคโปร์และน้ำเย็น 1:5 เป็นเวลา 40 นาที
และสะเด็ดน้ำเป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปทำการ
วิเคราะห์คุณภาพ

Table 1. Formulation of Lod Chong Singapore recipe No. 1, 2, and 3, containing different cooked flour to raw flour ratio for dough

Recipe No.	Percentage of cooked flour (%)	Percentage of raw flour (%)	Volume of pandan juice (ml)
1	30	70	100
2	35	65	100
3	40	60	100

3. การประเมินคุณภาพด้านประสาทสัมผัสโดย
วิธีการให้คะแนนความชอบที่มีต่อเนื้อสัมผัสของเส้น
ลอดช่องสิงคโปร์ที่มีสูตรส่วนผสมต่างกัน

นำเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่ได้จากการเตรียม
ในข้อ 2 ปริมาณ 30 กรัม ไปผสมกับน้ำเชื่อม 2 ช้อน
โต๊ะ และน้ำกะทิ 1 ช้อนโต๊ะ ตักใส่ถ้วยพลาสติกแล้ว
ให้ผู้ทำการประเมินคุณภาพด้านประสาทสัมผัสหรือ
ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จากบุคคลทั่วไป
ในคณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เป็นจำนวน 50 คน

โดยใช้วิธี 9-point hedonic scale (ระดับคะแนน
1=ไม่ชอบมากที่สุด, 9=ชอบมากที่สุด)¹⁷ โดย
ประเมินทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ
สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส และ
ความชอบโดยรวม เพื่อคัดเลือกสูตรการผลิตเส้น
ลอดช่องสิงคโปร์ที่มีคะแนนทดสอบทางประสาท
สัมผัสที่เหมาะสมที่สุด

4. วิเคราะห์ทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ลอดช่อง
สิงคโปร์ ได้แก่

4.1 ค่าสี

นำเส้นลวดของสิ่งคอปรีที่ต้มสุกแล้วมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Chroma meter (Konoca Minota รุ่น CR-400) แสดงผลค่าสีที่วัดได้ด้วยค่า L^* , a^* , และ b^* โดยที่ค่าสี L^* แสดงค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (ดำ) จนถึง 100 (ขาว) ค่าสี a^* แสดงค่าความเป็นสีแดงและสีเขียว (ค่า + จะแสดงค่าสีแดง และค่า - จะแสดงค่าสีเขียว) ส่วนค่าสี b^* แสดงค่าความเป็นสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ค่า + จะแสดง ค่าสีเหลือง และค่า - จะแสดงค่าสีน้ำเงิน) โดยสุ่มตำแหน่งบนผิวของเส้นลวดของสิ่งคอปรีเพื่อวัดค่า 5 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

4.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส

ทำการวัดค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความยืดหยุ่น (Elasticity) ของเส้นลวดของสิ่งคอปรีขนาด 0.5x18.0x0.4 เซนติเมตร ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, TA-XT2i, Stable micro systems) พร้อมหัววัดแรงดึง (Tension) รหัส A/SPR กำหนดสภาวะในการทำงานของเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ได้แก่ Pre-test speed 1.0 มิลลิเมตร/วินาที, Test speed 15.0 มิลลิเมตร/วินาที, Post-test speed 10.0 มิลลิเมตร/วินาที, Distance 15 มิลลิเมตร/วินาที, Trigger type 5 กรัม (ดัดแปลงจากวิธีของ Shan et al.)¹⁸ ทำการรายงานผลค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเส้นลวดของสิ่งคอปรีจำนวน 50 ซ้ำ

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติสำหรับผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส ค่าสี และค่าลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์แบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized complete

block design; RCBD) ทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) ของเส้นลวดของสิ่งคอปรี

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นลวดของสิ่งคอปรี 3 สูตร ที่มีการใช้ปริมาณของแป้งสุก (ร้อยละ 30, 35 และ 40) และแป้งดิบ (ร้อยละ 70, 65 และ 60) ในแป้งโด พบว่าคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของสูตรที่ 1 ต่างจากสูตรที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ซึ่งเกิดจากการใช้ส่วนผสมของแป้งสุกและแป้งดิบที่แตกต่างกันส่งผลต่อคะแนนการทดสอบที่แตกต่างกัน โดยเส้นลวดของสิ่งคอปรีสูตรที่ 1 มีคะแนนด้านความชอบโดยรวมสูงกว่าสูตรอื่น (Table 2) ขณะที่การทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่น และรสชาติไม่มีความแตกต่างกัน ($P > 0.05$) เนื่องจากมีการใช้ส่วนผสมของน้ำไปเตยเท่ากันในการเตรียมเส้น และการเตรียมตัวอย่างลวดของเพื่อทดสอบมีการเติมน้ำเชื่อมและกะทิด้วยปริมาณเท่ากัน ส่งผลให้ผู้ทดสอบไม่สามารถแยกกลิ่น และรสชาติได้

ผลิตภัณฑ์ลวดของสิ่งคอปรีสูตรที่ 1 มีลักษณะที่นุ่มและแน่น ไม่ร่วน จากใช้ส่วนผสมของแป้งสุกร้อยละ 30 และแป้งดิบร้อยละ 70 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณแป้งสุกส่งผลต่อเนื้อสัมผัสนุ่มจนเกินไป ขณะที่การเพิ่มปริมาณแป้ง

ดิบทำให้เนื้อสัมผัสของเส้นลอดช่องสิงคโปร์มีความเหนียวหนึบคล้ายยางมากขึ้น ดังนั้นแป้งทั้ง 2 ชนิดต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดการยึดเกาะและมีความนุ่มของเจลในเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่เหมาะสม เนื่องจากในแป้งสุก (Cooked flour) ที่เตรียมจากการนำแป้งมันสำปะหลังดิบ (Raw cassava flour) ที่เหมาะสมก่อให้เกิดเจลเมื่อผ่านการให้ความร้อน แป้งสุกหรืออาหารที่มีแป้งในน้ำร้อนทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากเม็ดแป้งดูดซับน้ำเข้าไปและลดปริมาณน้ำในระบบของสารละลาย อุณหภูมิที่ทำให้แป้งเกิดเจลตาในเซชันขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้ง เมื่อแป้งถูกให้ความร้อนจึงเลยจุดการเกิดเจลตาในเซชันแป้งจะกลายเป็นแป้งเปียกเมื่อทิ้งให้เย็นแป้งจะเกิดเจล¹⁹ โดยที่เนื้อลอดช่องสิงคโปร์มีการเกิดเจลตาในเซชันเมื่อแป้งโดนดูดซับในน้ำเดือด ดังนั้นเมื่อใช้ส่วนผสม

ที่แตกต่างกันจึงส่งผลต่อลักษณะเจลที่แตกต่างกันไปด้วย ซึ่งส่วนผลต่อการให้คะแนนของผู้ทดสอบชิมด้านลักษณะเนื้อสัมผัส สีเขียวของเส้นลอดช่องสิงคโปร์ที่สกัดจากใบเตยด้วยน้ำปูนใสอิมิตัวทั้ง 3 สูตร ยังคงมีสีเขียวเข้ม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำปูนใสหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อความคงตัวของสารสีเขียวจากใบเตยหรือคลอโรฟิลล์ในผลิตภัณฑ์^{5, 12} ตามปกติการเปลี่ยนสีของผักใบเขียวระหว่างการแปรรูปจากการเปลี่ยนจากสารคลอโรฟิลล์ไปเป็นฟิโอฟิตินด้วยอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซึ่งสีเขียวของพืชผักจะเปลี่ยนไปเป็นสีเขียวมะกอกเมื่อถูกให้ความร้อนในสภาวะที่เป็นกรด ดังนั้นการปรับค่า pH ให้้อย่างในช่วงต่างด้วยสารโลหะแอลคาไล เช่น CaOH_2 , Na_2CO_3 และ MgOH_2 เป็นต้น มักถูกใช้ในการเพิ่มค่า pH ของผักใบเขียวและรักษาคลอโรฟิลล์หลังกระบวนการแปรรูปได้³

Table 2. Sensorial attribution scores of Lod Chong Singapore recipes containing different cooked flour to raw flour ratio for dough

Sensorial attribution	Recipe No. 1	Recipe No. 2	Recipe No. 3
Appearance	7.97±0.91 ^a	7.11±1.17 ^b	7.11±1.30 ^b
Color	7.86±0.99 ^a	7.42±1.05 ^b	7.47±1.06 ^b
Odor	7.47±1.30 ^a	7.28±1.14 ^{ab}	6.97±1.46 ^b
Flavor	7.50±1.18 ^{ns}	7.00±1.41 ^{ns}	6.97±1.54 ^{ns}
Taste	7.03±1.76 ^{ns}	6.75±1.81 ^{ns}	6.72±1.70 ^{ns}
Texture	7.61±0.99 ^a	7.19±1.21 ^b	7.08±1.00 ^b
Overall acceptance	7.86±1.07 ^a	7.06±1.17 ^b	7.28±0.97 ^b

Note: Values are prepared as mean±S.D. Values with different superscripts in the same row are significant differences ($p < 0.05$). ns is presented that there was no statistically significant difference.

2. ค่าสี (Color) ของเส้นลอดช่องสิงคโปร์

การศึกษาผลของสัดส่วนระหว่างแป้งสุกและแป้งดิบที่นวดผสมแป้งโดในขั้นตอนการเตรียมเส้น

(Table 1) ที่มีต่อค่าสีของเส้นลอดสิงคโปร์ พบว่าเส้นลอดสิงคโปร์สูตรที่ 1 มีสีเขียวเข้มสม่ำเสมอ ในขณะที่เส้นลอดสิงคโปร์สูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 สี

เขียวที่อ่อนกว่าตามลำดับ และมีการกระจายของจุดสีเขียวนบนเส้นที่ไม่สม่ำเสมอ (Figure 1) ซึ่งจุดสีเขียวนี้สามารถพบได้เมื่อให้ความร้อนน้ำสกัดไบเตยซึ่งเมื่ออุณหภูมิในการให้ความร้อนสูงขึ้นตะกอนเปียกของสารสกัดไบเตยจะมีปริมาณมากขึ้น ทั้งนี้ อาจเป็นสาเหตุจากความร้อนที่สูงขึ้นมีในการทำให้โปรตีนที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอโรฟิลล์ในเนื้อเยื่อพืชตามธรรมชาติเกิดการเสียสภาพธรรมชาติและตกตะกอนออกมาได้ดีขึ้น^{20, 21} ซึ่งลักษณะปรากฏนี้สอดคล้องกับผลการวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี (Chroma meter) ที่แสดงใน Table 3 โดยเส้นลวดสังคิปรีมีค่าสว่าง (L^*), ค่าสีเหลือง (b^*) และค่าสีเขียว (a^*) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแป้งสุก ลดลงและแป้งดิบเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าสารสีเขียวจากไบเตยมีความคงตัวมากที่สุด在线ลวดของสังคิปรีสูตรที่ 1

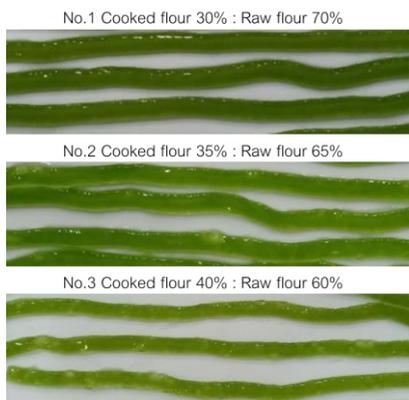


Figure 1. The appearance of Lod Chong Singapore recipes containing different cooked flour to raw flour ratios for dough

การใช้น้ำปูนใสอิมตัวสกัดสารสีเขียวจากไบเตยสดและใช้เป็นของเหลวแทนน้ำเปล่าในขั้นตอนการต้มแป้งสุกช่วยรักษาสารคลอโรฟิลล์ที่

เป็นรงควัตถุในไบเตยที่ให้สีเขียวในเส้นลวดสังคิปรีได้ ซึ่งเป็นวิธีเพิ่มความคงตัวของคลอโรฟิลล์ด้วยการปรับสภาพเป็นด่างหรือแอลคาไลน์ (Alkaline treatment)¹² เมื่อระดับการของแป้งสุกเพิ่มขึ้นค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเหลือง (b^*) และค่าสีเขียว (a^*) ตีลดบเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแป้งที่ใช้เตรียมแป้งสุก ลดลง แสดงให้เห็นว่าเส้นลวดของสังคิปรีสูตรที่ 1 ซึ่งใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ในการเตรียมแป้งสุกมีสีเขียวที่เข้มกว่าสูตรอื่น ระหว่างการแปรรูปด้วยความร้อน (Heat treatment) สารสีเขียวหรือคลอโรฟิลล์จากพืชจะเปลี่ยนจากสีเขียวสดไปเป็นสีเขียวมะกอกหรือสีเหลือง การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ โดยไฮโดรเจนไอออน (H^+) สามารถเปลี่ยนคลอโรฟิลล์ไปเป็นฟิโอฟิตินด้วยการแทนที่แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในวงแหวนพอร์ไฟริน⁴ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีนี้เกิดขึ้นพร้อมกับการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ซึ่งมักส่งผลต่อค่า a^* ที่แสดงถึงสีเขียว ดังนั้นอาจมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีปริมาณของคลอโรฟิลล์ในพืช²² สีเขียวของพืชผักใบเขียวประกอบด้วยคลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a) ที่ให้น้ำเงิน-เขียว และคลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll b) ให้เป็นสีเหลือง-เขียว²³ การหุงต้มทำให้เกิดการสูญเสียได้ทั้ง Chlorophyll a และ Chlorophyll b ในระดับต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของวิธีการให้ความร้อนและชนิดของพืชผัก อย่างไรก็ตาม Chlorophyll a สลายตัวได้เร็วกว่าคลอโรฟิลล์ บี เมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นอัตราส่วนของ Chlorophyll a ต่อ Chlorophyll b จะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และสีเขียวของผักใบเขียว เช่น ถั่วดินเตา ผักโขม บร็อคโคลี่ เป็นต้น จะค่อยๆ กลายเป็นสีเหลือง ดังนั้นค่าสี $-a^*$ มักลดลง

อันเป็นผลมาจากการสูญเสียความเข้มของสีเขียว²³ นอกจากนี้ค่า L* ของเส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรที่ 1 มีค่าสูงกว่าสูตรอื่น อาจเป็นผลจากการคงตัวของสารสีเขียวเนื่องจากเป็นสูตรที่ 1 ซึ่งใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ในการเตรียมแป้งสุกซึ่งเป็นปริมาณน้อยที่สุดและมีปริมาณของแป้งดิบในสูตรการผลิตสูงที่สุด ทำให้การถ่ายเทความร้อนขณะต้มเส้นในน้ำเดือดเกิดขึ้นช้ากว่าสูตรอื่นที่มีการผสมแป้งดิบด้วยปริมาณที่ต่ำกว่าในขั้นตอนการนวดแป้ง (Table 1) เนื่องจากค่าการนำความร้อนของสารละลายแป้งสำปะหลัง (Cassava starch solution, CSS) กับน้ำลดลงตามอุณหภูมิและความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น เป็นไปได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของ CSS เพิ่มขึ้น อัตราส่วนของมวลแป้งแห้งต่อปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้นโดยสิ่งนี้จำกัดการเคลื่อนที่ของสารละลายแป้งและน้ำ ดังนั้นความสามารถของเม็ดแป้งและน้ำในการนำความร้อนระหว่างโมเลกุลจึงลดลง²⁴ จึงอาจทำให้สารสีเขียวในลอดช่องสูตรที่ 1 ถูกทำลายด้วยความร้อนน้อยกว่าสูตรอื่น นอกจากนี้ Sharma et al.⁷ ได้รายงานผลการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งสุกในผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่พบว่าเส้นบะหมี่ที่เติมแป้งสุกใช้เวลาในการต้มให้สุกในน้ำเดือด (Cooking time) ต่ำกว่าบะหมี่สูตรปกติ ซึ่ง

อาจเป็นผลจากการเจือจางปริมาณของโปรตีนในแป้งสาลีด้วยแป้งสุก อีกทั้งแกรนูลแป้งที่แตกเสียหายและเกิดเจลตีโนซีในแป้งสุกอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าเวลาการต้มให้เส้นบะหมี่สุกลดลงได้ และมีการสูญเสียของแข็งระหว่างการต้มเส้นที่มาก สูตรปกติเนื่องจากขณะต้มเส้นในน้ำเดือดอะมิโลสจะพองตัวเนื่องจากการดูดน้ำของส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) ทำให้พันธะของอะมิโลสถูกทำลายได้ง่ายและมีอะมิโลสหลุดออกมาถึงน้ำที่ใช้ต้มทำให้บะหมี่ที่เติมแป้งสุกจะมีการสูญเสียขณะต้มมากขึ้น²⁵ ดังนั้นในกระบวนการกวนแป้งเปียกเพื่อเตรียมโดและการกลวงเส้นลอดช่องสิงคโปร์ได้ทำถูกคุมสภาวะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาเท่ากัน เส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรที่ 2 และ 3 ที่มีปริมาณปริมาณของแป้งสุกมากอาจได้รับผลกระทบจากความร้อนสูงกว่าสูตรที่ 1 โดยความร้อนทำให้แกรนูลแป้งเสียหายหรือมีระดับการเกิดเจลตีโนซีชันที่มากกว่าเกิดการสูญเสียของแข็งในผลิตภัณฑ์ระหว่างการต้มสูงขึ้น และอาจส่งผลให้คอลโรฟิลล์ในเส้นลอดช่องสิงคโปร์เสียสภาพธรรมชาติมากขึ้นได้และละลายอยู่ในน้ำที่ใช้ต้มเส้น ดังนั้นเส้นลอดช่องสิงคโปร์สูตรที่ 2 และ 3 จึงมีสีเขียวที่ชัดเจนกว่าผลิตภัณฑ์สูตรที่ 1 (Figure 1)

Table 3. Color values of Lod Chong Singapore recipes containing different cooked flour to raw flour ratios for dough

Color value	Recipe No. 1	Recipe No. 2	Recipe No. 3
L*	48.26±0.92 ^a	47.75±2.58 ^{ab}	47.26±1.48 ^b
a*	-19.01±0.86 ^a	-18.32±0.97 ^b	-17.90±1.21 ^c
b*	44.42±0.91 ^a	42.70±1.62 ^b	42.21±1.58 ^c

Note: Values are prepared as mean±S.D. Values with different superscripts in the same row are significant differences (P<0.05).

3. ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analysis)

การเติมน้ำปูนใสหรือสารละลาย CaOH_2 มีผลต่อ ค่าแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และ ค่าความยืดหยุ่น (Elasticity) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยค่าแรงดึงสูงสุดแสดงถึงอาหารมีแรงต้านทานการยืดได้สูงสุด²⁶ ค่าแรงดึงสูงสุดของเส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรที่ 1 ซึ่งใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ในการเตรียมแป้งสุกมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่สูตรที่ 3 ซึ่งใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 40 ในการเตรียมแป้งสุกมีค่าต่ำที่สุด จะเห็นว่าความเข้มข้นของ CaOH_2 ในน้ำไบเตยที่ใช้ต้มแป้งลดลงเมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังในแป้งสุกเพิ่มขึ้น (Table 4)^{27, 14} ได้รายงานเกี่ยวกับผลการพองตัวของแป้งว่าไอออนของโลหะแอลคาไล (Alkali metal ions) และ หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมีปฏิสัมพันธ์กันเกิดโครงสร้างเชิงซ้อน ที่ความเข้มข้นของ CaOH_2 ต่ำ (pH 6-8) บริเวณผลึกมีแนวโน้มที่จะถูกทำลายโดยอัลคาไล โครงสร้างของแกรนูลจะถูกยืดออกโดยการแทนที่โปรตอนด้วยไอออนบวก ช่วยเร่งการปล่อยอะมิโลสออกมาจากเม็ดแป้งและหมู่ไฮดรอกซิลจากสายโพลีเมอร์แป้ง ซึ่งอาจทำให้เกิดการแทนที่ของโปรตอนด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และ Ca(OH)^+ โดยพันธะระหว่าง Ca^{2+} กับแป้ง และ Ca(OH)^+ กับแป้งจะทำให้เม็ดแป้งขยายตัวและพองตัวได้มากขึ้น ในขณะที่ในสภาวะที่มีความเข้มข้น CaOH_2 สูงขึ้น (pH 10-12 หรือ $>0.2\%$) ไอออน Ca^{2+} จะทำหน้าที่ทำให้แกรนูลแป้งคงตัวและเพิ่มความแข็ง (Rigidity) ของเม็ดแป้งโดยลดปริมาตร ดังนั้นระดับการทำลายเม็ดแป้งอาจถูกจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pineda-Gomez et al.¹³ และ Pedcharat et al.²⁸

การเตรียมแป้งโดสำหรับผลิตเส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรมีส่วนประกอบของแป้งสุกที่กลายเป็นเจลเพื่อให้แป้งโดจับตัวกันได้ อีกทั้งช่วยเพิ่มความนุ่มและยืดหยุ่นให้กับแป้งโด เมื่อนวดผสมกับแป้งดิบที่ทำให้เส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรมีความแข็งแรง สามารถรีดเป็นแผ่นและตัดเป็นเส้นได้ ซึ่งเส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรที่ 1 ใช้แป้งมันสำปะหลังร้อยละ 30 ในการเตรียมแป้งสุกด้วยน้ำไบเตย ซึ่งเป็นปริมาณแป้งสุกที่น้อยที่สุดและนวดผสมกับแป้งดิบซึ่งมีปริมาณสูงที่สุด (ร้อยละ 70) เป็นสูตรที่ทำให้เส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความยืดหยุ่น (Elasticity) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตเส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่าการใช้แป้งสุกหรือแป้งเปียกในสูตรการผลิตเส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรในปริมาณร้อยละ 30 จะทำเส้นมีความลักษณะเส้นที่เรียบและยืดหยุ่นที่ดี ในทางกลับกัน หากสัดส่วนของแป้งสุกมีปริมาณสูงขึ้นไปจะส่งผลให้เส้นลวดของสังคโปรัดมัสสุตรที่ไม่เรียบและขาดง่ายขึ้น เพื่อให้คำอธิบายที่เป็นไปได้เกี่ยวกับพฤติกรรมนี้อาจต้องกล่าวถึงระดับของการเกิดเจลในเซชันของแป้งขณะได้รับความร้อนและการคืนตัวเมื่อเจลแป้งเย็นตัวลง โดยแป้งสุกที่ใช้ในการเตรียมแป้งโดเกิดจากกระบวนการเจลลิตในเซชัน ซึ่งจะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีปริมาณน้ำที่เพียงพอและอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้งในสภาวะดังกล่าวพันธะระหว่างโมเลกุลที่รักษาโครงสร้างผลึกของแกรนูลแป้งจะอ่อนแอลง และน้ำที่อยู่รอบเม็ดแป้งสามารถทะลุผ่านเข้าไปในโครงสร้างแกรนูลแป้งได้ ในขั้นตอนนี้เม็ดแป้งจะพองตัวแบบย้อนกลับไม่ได้และสูญเสียการหักเหของแสง

(Birefringence)²⁹ ส่วนใหญ่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสายโพลิเมอร์แบ้งที่จุดศูนย์กลางของเม็ดแบ้งที่เพิ่มขึ้นหลังการให้ความร้อนขณะที่มีน้ำเพียงพอพลังงานความร้อนที่สูงขึ้นถูกส่งไปยังโพลิเมอร์แบ้งในระหว่างการให้ความร้อนและส่งผลให้เกิดการทำลายโครงสร้างเกลียวคู่ของโมเลกุลแบ้งมากขึ้น ดังนั้นหากการเติมแบ้งสูงในสูตรการผลิตเส้นลวดของสังคโปร์สูงขึ้นไปในสูตรที่ 2 และสูตรที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแกรนูลแบ้งมีโครงสร้างถูกทำลายจากกระบวนการเกิดเจลลิตไนเซชันที่กล่าวมาข้างต้น จึงส่งผลให้เส้นมีความเหนียวหนึบลดลงและขาดง่ายขึ้น ซึ่งการศึกษาของ Castanha et al.³⁰ รายงานว่าความแข็งแรงของเจล (Gel strength) แบ้งมันสำปะหลัง แบ้งข้าวโพด และแบ้งมันฝรั่ง

แสดงแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแบ้งต่อน้ำเพิ่มสูงขึ้นจากความเข้มข้นของแบ้งที่ร้อยละ 3.6-14.3 โดยทั่วไปความแข็งแรงของเจลแบ้งขึ้นอยู่กับการโครงสร้างที่ซับซ้อนระหว่างโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่หลุดออกมาจากแกรนูลแบ้งในระหว่างการเกิดเจลลิตไนเซชัน³¹ โดยที่แบ้งมันสำปะหลังมีเจลที่เรียบและยืดหยุ่น โดยมีความแข็งแรงของเจลต่ำกว่าแบ้งมันฝรั่งและแบ้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงกว่า อย่างไรก็ตามอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ความยาวของสายโซ่อะมิโลเพกตินที่สูงของแบ้งมันสำปะหลังสามารถลดการเชื่อมโยงโมเลกุลอะมิโลสระหว่างการทำให้เจลของแบ้งเย็นลงได้³⁰

Table 4. Textural properties of various Lod Chong Singapore recipes containing different cooked flour to raw flour ratios for dough

Textural properties	Recipe No. 1	Recipe No. 2	Recipe No. 3
Tensile strength (ค่าแรงสูงสุด, g)	17.71±1.87 ^a	16.85±1.69 ^{ab}	16.57±1.55 ^b
Elasticity (ค่าความยืดหยุ่น, mm)	62.11±9.93 ^a	57.83±7.86 ^{ab}	55.44±7.54 ^b

Note: Values are prepared as mean±S.D. Values with different superscripts in the same row are significant differences (P<0.05).

การคืนตัวของแบ้งส่งผลอย่างมากต่อการยอมรับทางประสาทสัมผัสและอายุการเก็บรักษาของอาหารที่มีแบ้งเป็นส่วนประกอบ เช่น ความกระด้างของขนมปัง และความแข็งของข้าวสุก เป็นต้น สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด เช่น เส้นหมี่และขนมขบเคี้ยวที่มีการใช้แบ้งที่ยังไม่สุกบางส่วนในส่วนผสมซึ่งมักส่งผลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส แต่อย่างไรก็ตามการคืนตัวของแบ้งส่งผลดีต่อ

ผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น เส้นก๋วยเตี๋ยว เนื่องจากในผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้ไม่มีโปรตีนกลูเตนดังนั้นการคืนตัวที่เกิดจากการเปลี่ยนของโครงสร้างอะมิโลสจึงเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดโครงสร้างของผลิตภัณฑ์³² เมื่อแกรนูลแบ้งถูกเจลลิตไนเซชันระหว่างการให้ความร้อน โครงสร้างของเม็ดแบ้งจะถูกรบกวนและเปลี่ยนเป็นโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous structure) ซึ่งไวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์และ

ความร้อน³³ ซึ่งเส้นลวดของสังคโปรที่ผลิตด้วยแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีโปรตีนกลูเตนเช่นเดียวกับเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นอะไมโลสที่หลุดออกมาจากแกรนูลแป้งเมื่อเกิดเจลาติไนเซชันและเกิดการคืนตัวของแป้งที่เพิ่มขึ้นได้เมื่อเส้นสุกและเย็นตัวลง ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นลดลงเมื่อมีปริมาณแป้งสูงในสูตรการผลิตที่มากขึ้น ซึ่ง Chatakanonda et al.³⁴ ได้รายงานว่แป้งมันสำปะหลังเกิดเจลาติไนเซชันที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น และแป้งมีแนวโน้มการเกิดการคืนตัวค่อนข้างต่ำ โดยพบว่าแป้งมันสำปะหลังเกิดการคืนตัวได้สูงสุดเมื่อทำการเก็บแป้งเปียกที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ การเก็บเจลแป้งเปียกที่อุณหภูมิ -18 และ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองที่อาจแตกต่างจากคุณภาพทางเนื้อสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ศึกษาโดย Satmalee et al.³⁵ ซึ่งได้รายงานว่ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) ของผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวเพิ่มขึ้นนั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการบ่ม (Ageing step) เนื่องจากการคืนตัวของแป้งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Yu et al.³⁶ ที่รายงานการเพิ่มการคืนตัวของแป้งมีความสอดคล้องเชิงบวกกับเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งสูงในเส้นก๋วยเตี๋ยวเช่นกัน อย่างไรก็ตามข้อขัดแย้งนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าชนิดของแป้ง กระบวนการผลิต และสภาวะในการเก็บรักษาสามารถทำให้การเกิดเจลาติไนเซชันและการคืนตัวของแป้งมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันได้ ดังนั้นการศึกษาระดับการเกิดเจลาติไนเซชันและ

การคืนตัวของแป้งระหว่างกระบวนการให้ความร้อนและการทำให้เย็นตัวลงจึงเป็นสิ่งสำคัญ

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ลวดของสังคโปรโดยศึกษาผลของสัดส่วนของแป้งสูงและแป้งมันสำปะหลังดิบในแป้งโดที่มีต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสลักษณะเนื้อสัมผัส ความคงตัวของสีเขียวจากไบเตยในผลิตภัณฑ์ลวดของสังคโปรไบเตย โดยเส้นลวดของสังคโปรสูตรที่ 1 ซึ่งมีส่วนผสมของแป้งสูงที่กวนด้วยน้ำไบเตยสกัดด้วยน้ำปูนใสอิมตัวร้อยละ 30 และแป้งมันสำปะหลังดิบร้อยละ 70 ในการเตรียมแป้งโดมีคะแนนการยอมรับของผู้ทดสอบชิมสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ลักษณะเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวม นอกจากนี้เส้นลวดของสังคโปรสูตรที่ 1 มีความคงตัวของสีเขียวจากไบเตยสูงที่สุด อีกทั้งยังมีลักษณะเนื้อสัมผัสด้านความทนต่อแรงดึง และความยืดหยุ่นสูงกว่าเส้นลวดของสังคโปรสูตรอื่นอีกด้วย ซึ่งคุณภาพของเส้นลวดของสังคโปรที่กล่าวมาอาจสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในน้ำปูนใสซึ่งควรเป็นปัจจัยที่ต้องทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย



เอกสารอ้างอิง

1. อัมพร แซ่เอียว. ผลิตภัณฑ์เส้นลวดของสังคโปรี ผสมชาเขียว [อินเทอร์เน็ท]. 2556. [เข้าถึงเมื่อ 15 ก.พ. 2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://ip.kku.ac.th/catagories/image/Food/Detail/11.%20ลวดของสังคโปรี.pdf>.
2. Gunawan MI, Barringer SA. Green color degradation of blanched broccoli (*Brassica Oleracea*) due to acid and microbial growth. *J Food Process Preserv* 2000;24:253-63.
3. Koca N, Karadeniz F, Burdurlu HS. Effect of pH on chlorophyll degradation and colour loss in blanched green peas. *Food Chem* 2007;100:609-15.
4. Minguez-Mosquera MI, Garrido-Fernandez J, Gandul-Rojas B. Pigment changes in olives during fermentation and brine storage. *J Agric Food Chem* 1989;37:8-11.
5. เอกพล อ่อนน้อมพันธุ์, ปวีตวิภา ภาสุรกุล. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมเปียกปูนใบเตยเสริมน้ำใบย่านาง. *SDU Res J* 2559;10:159-70.
6. รอมลี เจะดอเลาะ, ชูไฮมิน เจ๊ะมะลี, ตอยียะห์ รอยิง. การพัฒนาและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ลวดช่องพื้นเมืองในพื้นที่ 3 จังหวัดชายแดนภาคใต้ของประเทศไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มรย* 2561;3:120-8.
7. Sharma S, Singh N, Katyal M. Effect of gelatinized-retrograded and extruded starches on characteristics of cookies, muffins and noodles. *J Food Sci Technol* 2016;53:2482-94.
8. Naito S, Fukami S, Mizokami Y, Hirose R, Kawashima K, Takano H, Ishida N, Koizumi M, Kano H. The effect of gelatinized starch on baking bread. *Food Sci Technol Res* 2005;11:194-201.
9. Porrarud S, Pranee A. Microencapsulation of Zn-chlorophyll pigment from Pandan leaf by spray drying and its characteristic. *Int Food Res J* 2010;17:1031-42.
10. Wakte KV, Thengane RJ, Jawali N, Nadaf AB. Optimization of HS-SPME conditions for quantification of 2-acetyl-1-pyrroline and study of other volatiles in *Pandanus amaryllifolius* Roxb. *Food Chem* 2010;121:595-600.
11. Suryani CLS, Wahyuningsih TD, Supriyadi, Santoso U. The potential of mature pandan leaves as a source of chlorophyll for natural food colorants. *J Teknol dan Industri Pangan* 2020;31:127-37.
12. Ngamwonglumlert L, Devahastin S, Chiewchan N. Natural colorants: Pigment stability and extraction yield enhancement via utilization of appropriate pretreatment and extraction methods. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2015;57:3243-59.
13. Pineda-Gomez P, Coral DF, Ramos-Rivera D, Rosales-Rivera A, Rodriguze-Garcia M.

- Thermo-alkaline treatment. A process that changes the thermal properties of corn starch. *Procedia Food Sci* 2011;1:370-8.
14. Han L, Lu Z, Hao X, Cheng, Y, Li L. Impact of calcium hydroxide on the textural properties of buckwheat noodles. *J Texture Stud* 2012;43:227-34.
 15. Bryant CM, Hamaker BR. Effect of lime on gelatinization of corn flour and starch. *Cereal Chem* 1997;74:171-5.
 16. วรธนมณฑน์ ชาญจารุจิตร, สิริ ชัยเสรี. ผลของสภาวะต่างต่อความสามารถในการกักเก็บลินาโลออลในเมทริกซ์สตาร์ชที่ผ่านการทำแห้ง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม 2561;13:36-48.
 17. ไพโรจน์ วิริยจारी. การประเมินทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation). เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. Chang Mai University Press; 2561.
 18. Shan S, Zhu K-X, Peng W, Zhuu HM. Physicochemical properties and salted noodle-making quality of purple sweet potato flour and wheat flour blends. *J Food Process Preserv* 2012;37:709-16.
 19. Hosney RC. Chemical changes in carbohydrates produced by thermal processing. *J Chem Educ* 1984;61:308-12.
 20. Francis FJ. 1985. Pigments and other colorants. In *Food chemistry*, 2nd ed. Fennema OR. ed. New York. Marcel Dekker, Inc; 1985.
 21. ประพันธ์ ปิ่นศิริโรตม. ผลของอุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง และเกลือสังกะสีคลอไรด์ต่อความคงตัวของสีเขียวของสารสกัดใบเตย. *อาหาร* 2546;33:277-82.
 22. Lien DTP. Kinetic of chlorophyll degradation and color change in bitter gourd during heat treatment. *Int J Eng Sci Res Technol* 2016;5:616-22.
 23. Erge HS, Karadeniz F, Koca N, Soyer Y. Effect of heat treatment on chlorophyll degradation and color loss in green peas. *Gida* 2008;33:225-33.
 24. Cansee S, Watyotha C, Thivavarnvongs T, Uriyapongson J, Varith J. Effects of temperature and concentration on thermal properties of cassava starch solutions. *Warasan Songkhla Nakharin* 2008;30:405-11.
 25. Wang N, Warkentin TD, Vandenberg B, Bing DJ. Physicochemical properties of starches from various pea and lentil varieties, and characteristics of their noodles prepared by high temperature extrusion. *Food Res Int* 2014;55:119-27.
 26. Smewing J. Analyzing the texture of pasta for quality control. *Cereal Foods World* 1997;42:8-12.
 27. Jane J. ¹³C-NMR study of interactions between amylopectin and neutral salts. *Starch-Starke* 1993;45:172-5.



28. Pedcharat K, Jangchud K, Prinyawiwatkul W. Physicochemical properties of rice flour as affected by alkaline soaking and washing treatments. *Int J Food Sci Technol* 2021;56:2539-47.
29. Xie F, Liu H, Chen P, Xue T, Chen L, Yu L, Corrigan P. Starch gelatinization under shearless and shear conditions. *Int J Food Eng* 2006;2:6-1-6-31.
30. Castanha N, Rojas ML, Augusto PDE. An insight into the pasting properties and gel strength of starches from different sources: effect of starch concentration. *Sci Agropecu* 2021;12:203-12.
31. Ai Y, Jane J-I. Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch – Stärke* 2015;67:213-24.
32. Denchai N, Suwannaporn P, Lin J, Soontaranon S, Kiatpongklarp W, Huang T-C. Retrogradation and digestibility of rice starch gels: The joint effect of degree of gelatinization and storage. *J Food Sci* 2019;0:1-11.
33. Zhou X, Baik B, Wang R, Lim ST. Retrogradation of waxy and normal corn starch gels by temperature cycling. *J Cereal Sci* 2010;51:57-65.
34. Chatakanonda P, Wongprayoon S, Sriroth K. Gelatinization and retrogradation of cassava starch in the presence of NaCl and sucrose. *Starch Update: The 3rd Conference on Starch Technology*. 2005 Nov 4-5; National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC). Bangkok, Thailand. 2005;275-9.
35. Satmalee P, Charoenrein S. Acceleration of ageing in rice stick noodles sheets using low temperature. *Int J Food Sci Technol* 2009;44:1367-72.
36. Sangpring Y, Fukuoka M, Ratanasumawong S. The effect of sodium chloride on microstructure, water migration, and texture of rice noodle. *LWT-Food Sci Technol* 2015;64:1107-13.

การพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน

The Development of a Waste Bank Application to Waste Management in Community

มริษา สูดุดม และ ภัทรา สวนโสภเชือก

Marisa Sududom and Pattha Suansokchuaik

สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

Department of Information Technology, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University.

*Corresponding author; E-mail: pattra.s@ubru.ac.th

Received: 26 May 2022 /Revised: 17 September 2022 /Accepted: 17 September 2022

บทคัดย่อ

การพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน 2) เพื่อประเมินคุณภาพแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน พัฒนาแอปพลิเคชันตามวงจรการพัฒนาระบบ SDLC โดยใช้ภาษาพีเอชพี ในการเขียนโปรแกรม เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย 1) แอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน 2) แบบประเมินคุณภาพ 3) แบบสอบถามความพึงพอใจ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการพัฒนาได้แอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน ประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประเมิน 5 ด้าน คือ ด้านความสามารถตรงตามความต้องการของผู้ใช้ ด้านความถูกต้องในการทำงานตามหน้าที่ของระบบ ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ด้านความรวดเร็วในการทำงาน และด้านการรักษาความปลอดภัย พบว่าโดยรวมอยู่ในระดับมีคุณภาพดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.59 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.46 จากนั้นศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างเป็นคนในชุมชน จำนวน 100 คน พบว่าผลประเมินอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.71

คำสำคัญ: แอปพลิเคชัน ธนาคารขยะ ชยะชุมชน

Abstract

The objectives of this research were to: 1) develop the waste bank application to manage community waste 2) evaluate the performance of a waste bank application to manage community waste and 3) evaluate the usage of satisfaction of the waste bank application to manage community waste. Application development with the SDLC system development cycle by using PHP language for programming. The research instruments utilized in this study were 1) the application of a waste bank to manage community waste 2) the performance questionnaire 3) the satisfaction questionnaire. The statistics used for data analysis were mean and standard deviation. The development result was a waste bank application to manage community waste. The application effectiveness was evaluated by 5 experts. The assessment was divided into 5 areas: 1) Functional requirement test 2) Functional test 3) Usability test 4) Performance test and 5) Security test. The result showed that the application efficiency was at a very good level, the mean was 4.59 and the standard deviation was 0.46. The application was evaluated for satisfaction by 100 samples. The satisfaction evaluation result showed that the samples were satisfied at a good level, the mean was 4.26 and the standard deviation was 0.71.

Keywords: Application, Waste bank, Waste community

บทนำ

ปริมาณของขยะที่มีเพิ่มมากขึ้นในแต่ละพื้นที่ก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิต ดิน น้ำ อากาศ และมีผลเสียต่อสุขภาพอนามัยของคน ปัจจุบันหลาย ๆ แห่งทั่วโลกเริ่มตระหนักถึงปัญหาและดำเนินการบริหารจัดการขยะเพื่อลดปัญหาเหล่านี้ ประเทศไทยก็มีแนวทางการบริหารจัดการขยะเช่นกัน รัฐบาลมีนโยบายในการเร่งรัดแก้ไขปัญหามลพิษจากการจัดการขยะเป็นวาระแห่งชาติ ที่ต้องได้รับการแก้ไขเป็นลำดับแรก¹ ซึ่งสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่มุ่งจัดทำโครงการประเทศไทย

ไร้ขยะ (Zero waste Thailand) ที่มุ่งพัฒนาให้เกิดประสิทธิผลในการจัดการขยะที่ได้จากงานวิจัยและนวัตกรรมเข้ามาช่วยหมุนเวียนขยะกลับมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด และจากนโยบายของรัฐบาลเหล่านี้จึงเกิดการผลักดันให้แต่ละชุมชนมีการบริหารจัดการขยะและกิจกรรมชุมชนเพื่อคัดกรองคัดแยกขยะ การหมุนเวียนใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และมีศักยภาพที่จะขยายองค์ความรู้ให้ชุมชนอื่น ๆ เพื่อให้เป็นชุมชนที่ไม่มีขยะ (Zero waste) ที่มีการบริหารจัดการขยะในชุมชนตามทฤษฎี 3R ด้วยการนำขยะมาลดการใช้ (Reduce) ใช้ใหม่หรือใช้ซ้ำ (Reuse) หรือนำไปแปรรูปใช้ใหม่ (Recycle)

เพื่อการจัดการขยะด้วยวิธีง่าย ๆ ซึ่งมีการคัดแยกประเภทขยะแต่ละประเภท และนำไปขายให้กับกลุ่มพ่อค้าขยะรีไซเคิล² เมื่อนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ จะช่วยให้ระบบการจัดการขยะได้ดีขึ้น ตามผลการศึกษาพบว่า³ ระบบบริหารจัดการขยะด้วยแนวคิดขยะเหลือศูนย์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการบริหารจัดการขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในชุมชน การพัฒนาระบบโดยโรงพยาบาลสรรพสิทธิประสงค์ เป็นกรณีศึกษา ระบบสามารถรับสมัครสมาชิกทำบัญชีฝากเงิน ถอนเงิน การตรวจสอบราคาซื้อขายขยะโดยการมีส่วนร่วมของโรงงานรับซื้อขยะ รวมทั้งการรายงานผลต่าง ๆ ผลประเมินการใช้งานระบบอยู่ในระบบดี

ชุมชนตำบลขามใหญ่ เป็นชุมชนหนึ่งในเขตอำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี มีประชากรจำนวนมากถึง 9,077คน และมีแนวโน้มประชากรเพิ่มอีกอย่างต่อเนื่องและกำลังเผชิญกับปัญหาการจัดการขยะ จากการรายงานพบว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นใหม่ต่อวัน ในปี พ.ศ. 2558 ที่มีปริมาณ 10.60 ตันต่อวัน พ.ศ. 2559 จำนวน 15.74 ตันต่อวัน และใน พ.ศ. 2560 ปริมาณขยะที่เก็บขนได้เดือนละประมาณ 604 ตัน⁴ จากปริมาณขยะจำนวนมากนี้ ส่งผลให้เกิดการหมักหมมเน่าเปื่อยส่งกลิ่นเหม็น หรือกองขยะเป็นแหล่งชุมนุมของสัตว์นำโรค สารพัดชนิด เมื่อฝนตกลงมาในฤดูฝนก็ชะเอาสิ่งสกปรกเน่าเหม็นในกองขยะไหลไปยังพื้นที่ใกล้เคียงและอาจไหลลงท่อระบายน้ำอีกด้วย จากปัญหาเหล่านี้สมาชิกชุมชนได้นำนโยบายของรัฐบาลมาใช้ในการบริหารจัดการขยะในชุมชนเกิดเป็นโครงการชุมชนต้านพรีโมเดล กำจัดขยะล้นเมืองด้วยตนเอง โดยได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานกองทุน

สนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.) ชุมชนช่วยกันวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา และลงมือร่วมกันว่าจะจะเป็นชุมชนจัดการขยะ ปัจจุบันสมาชิกในหมู่บ้านมีวินัยในการจัดการขยะ เห็นถึงความสำคัญและให้ความร่วมมือคัดแยกขยะมากขึ้น ส่งผลให้เกิดธนาคารขยะ ที่ดำเนินงานโดยคณะกรรมการในชุมชน เปิดรับซื้อขยะจากชาวบ้านทุกวันเสาร์ที่สองของเดือน ความสำเร็จที่เกิดขึ้นคือขยะลดลงจากการคัดแยกอย่างถูกวิธี ขยะเปียกถูกฝังกลบหรือทำปุ๋ยหมัก ขยะทั่วไปเก็บลงถังเพื่อให้รถขยะจากเทศบาลมารับ ส่วนขยะที่เป็นเศษเหล็กพลาสติก ก็นำมาขายเพื่อเป็นรายได้ในครัวเรือน เรื่องสิ่งแวดล้อมและขยะเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อสุขภาพของประชาชน การที่ชุมชนได้ลุกขึ้นมากำจัดขยะในชุมชนของตัวเอง เป็นจุดเริ่มต้นของการมีส่วนร่วมดูแลสุขภาพตัวเองที่ประสบความสำเร็จอย่างยั่งยืน การกำจัดขยะในเขตเทศบาลตำบลขามใหญ่ใช้งบประมาณสูงมาก จึงพยายามอย่างยิ่งที่จะแก้ปัญหาที่ต้นเหตุ คือ ให้ปริมาณขยะในชุมชนลดลง การที่ชุมชนมีความรู้ เห็นความสำคัญมีส่วนร่วมดูแลชุมชนของตัวเองเป็นการแก้ไขปัญหอยั่งยืน

จากความเป็นมาและความสำคัญดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนานวัตกรรมที่ช่วยหมุนเวียนขยะกลับมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุดผ่านระบบเทคโนโลยีในปัจจุบันในรูปแบบการบริหารจัดการขยะที่เรียกว่า แอปพลิเคชันธนาคารขยะ โดยมุ่งเน้นให้ชุมชนเกิดแรงกระตุ้นให้รู้จักการจัดการกับขยะแต่ละประเภทเพื่อนำมาสร้างมูลค่า สามารถคัดแยกขยะได้ถูกวิธี รู้จักออมเงินจากการขายขยะติดตามผลการซื้อขายขยะของชุมชนได้จาก

แอปพลิเคชัน รวมถึงการติดตามราคาซื้อขายในปัจจุบัน โดยใช้รูปแบบการบริหารจัดการขยะจากแบบจำลองบ้านด้ามพรำโมเดล มาเป็นกรณีศึกษาในการพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะในครั้งนี้ เพื่อประโยชน์ในการนำระบบไปใช้และเผยแพร่ให้ชุมชนเครือข่ายได้ใช้ในการบริหารจัดการขยะชุมชนต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน
2. เพื่อประเมินคุณภาพแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน
3. เพื่อศึกษาความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน

วิธีการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การกำหนดปัญหา ศึกษาปัญหาความเป็นไปได้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะชุมชน โดยใช้กรณีศึกษาชุมชนบ้านด้ามพรำเป็นชุมชนต้นแบบในการพัฒนาแอปพลิเคชัน ศึกษาองค์ประกอบของการนำเทคโนโลยีมาใช้ร่วมกับการบริหารจัดการขยะในชุมชน เกิดแรงกระตุ้นในการตระหนักถึงการแยกขยะในครัวเรือน รวมถึงหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถติดตามผลการดำเนินงานของชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม

ธนาคารขยะ⁵ คือ รูปแบบการดำเนินงานเพื่อส่งเสริม การคัดแยกขยะ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการคัดแยกขยะ โดยอาศัยหลักการของธนาคารมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้สมาชิกของธนาคารนำขยะมาฝากที่ธนาคารคำนวณเป็นมูลค่าเงินและบันทึกลงสมุดคู่ฝาก โดยใช้ราคาที่ทางธนาคารประสานงานกับร้านรับซื้อของเก่าเป็นเกณฑ์ในการกำหนดราคา

2. วิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้ระบบ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย

2.1 ส่วนของประชาชนผู้อยู่อาศัยในชุมชน เป็นบุคคลที่มีบทบาทในการจัดการขยะในบ้าน เกี่ยวข้องกับการคัดแยกขยะเพื่อนำไปขายให้แก่ร้านค้าที่รับซื้อขยะชุมชน

2.2 ส่วนของผู้ดูแลระบบ จัดการผู้รับซื้อขยะชุมชน เป็นบุคคลที่มีบทบาทหน้าที่ในการรับซื้อ และให้ข้อมูลราคาขยะ การคัดแยกขยะเพื่อขาย

3. การออกแบบแอปพลิเคชันธนาคารขยะชุมชน นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษา รวบรวมความต้องการมาวิเคราะห์ออกแบบระบบเพื่อให้ตรงความต้องการของผู้ใช้งาน

3.1 แผนภาพบริบท (Context diagram)

แผนภาพบริบท (Context diagram)

แอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน เพื่อแสดงขอบเขตของระบบงานทั้งหมดว่ามีการเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับองค์ประกอบใดบ้างแสดงข้อมูลหลักๆ ที่ไหลเวียนเข้าสู่ระบบ และแสดงผลลัพธ์ที่สำคัญของระบบ ดังนี้

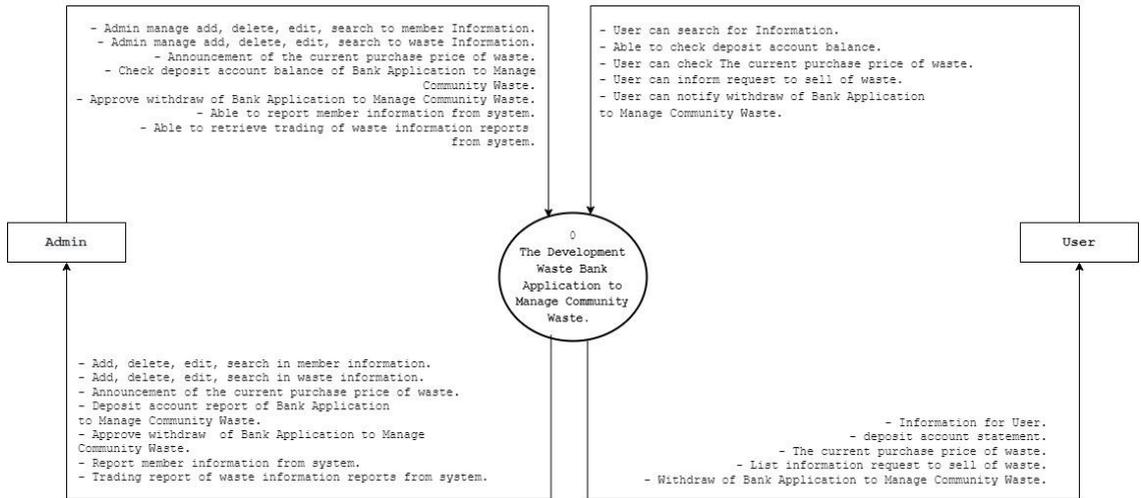


Figure 1. Context diagram of bank application to manage community waste.

3.2 การวิเคราะห์ระบบ Use case diagram

การวิเคราะห์ระบบ Use case diagram แผนภาพแสดงการทำงานของผู้ใช้ระบบ (User) และความสัมพันธ์กับระบบย่อย ภาพรวมของการทำงานระบบแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับบุคคลในระบบ ดังขั้นตอนการทำงานต่อไปนี้

ระบบสมาชิก เป็นส่วนที่ใช้บริหารจัดการสมาชิก ผู้ดูแลระบบสามารถทำการเพิ่ม ลบ แก้ไข ค้นหา ส่วนผู้ใช้งานสามารถเรียกดูข้อมูลของตนเอง ได้ ดังแสดงใน Figure 2.

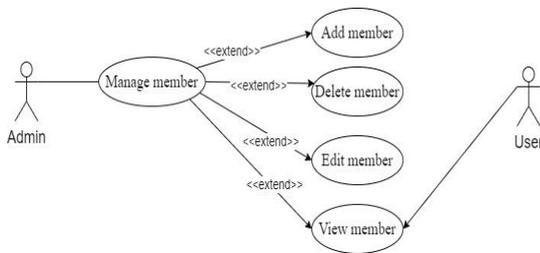


Figure 2. Use case manage member

ระบบจัดการขยะ เป็นส่วนที่ใช้บริหารจัดการข้อมูลขยะ ผู้ดูแลระบบสามารถทำการเพิ่ม ลบ แก้ไข ค้นหา ข้อมูลขยะในระบบได้ ดังแสดงใน Figure 3.

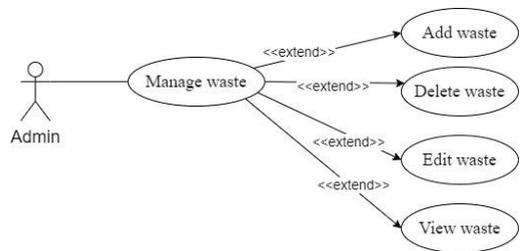


Figure 3. Use case manage waste

ระบบจัดการซื้อขยะ เป็นส่วนที่ใช้บริหารจัดการข้อมูลการซื้อขยะ ผู้ดูแลระบบสามารถทำการเพิ่ม ลบ แก้ไข ค้นหา ข้อมูลการซื้อขยะในระบบ ผู้ใช้สามารถดูผลการรับซื้อขยะและยอดเงินที่ได้รับ ดังแสดงใน Figure 4.

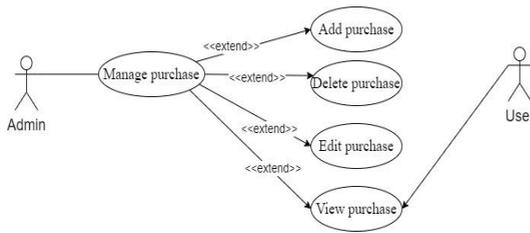


Figure 4. Use case manage purchase

4. พัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะชุมชน พัฒนาโปรแกรมตามที่ได้ออกแบบระบบไว้โดยแบ่งการทำงานของระบบเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

4.1 ระบบสำหรับสมาชิก ผู้ขายขยะชุมชน เป็นระบบที่ใช้อำนวยความสะดวกเกี่ยวกับข้อมูลของสมาชิกในชุมชน ข้อมูลการรับซื้อขยะในชุมชนตามแต่ละประเภทของขยะ ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการสะสมยอดขายและการบริหารยอดขายขยะของผู้ใช้ระบบ

4.2 ระบบสำหรับผู้ดูแลระบบ จัดการผู้ซื้อขยะชุมชน เป็นระบบที่ใช้บริหารจัดการข้อมูลการรับซื้อขยะของผู้ซื้อ โดยสามารถแยกประเภทรายการขยะที่รับซื้อ ราคาที่มีการปรับเปลี่ยนตามตลาดบันทึกการรับซื้อขยะของสมาชิกในชุมชน และข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ขายในการนำขยะมาขาย

5. การทดสอบ ดำเนินการทดสอบแอปพลิเคชันธนาคารขยะชุมชนกับกลุ่มตัวอย่างหากพบข้อผิดพลาดดำเนินการปรับปรุงแก้ไขให้ถูกต้อง การทดสอบระบบจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของรายงานจากระบบและตรวจสอบระบบตรงกับความต้องการของผู้ใช้

6. ประเมินคุณภาพแอปพลิเคชันธนาคารขยะ โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน และประเมินความพึงพอใจจากการใช้แอปพลิเคชันธนาคารขยะ

โดยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน และสรุปผลการวิจัย

7. เผยแพร่ และประชาสัมพันธ์การใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะให้แก่ชุมชนและผู้ซื้อขยะในชุมชน เพื่อประโยชน์ในชุมชนต่อไป

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัย ประชากรบ้านด้ามพริก ตำบลขามใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย กลุ่มตัวอย่างจำนวน 100 คน คัดเลือกแบบเจาะจงเป็นคนในชุมชนบ้านด้ามพริก ตำบลขามใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ประเมินความพึงพอใจจากการใช้แอปพลิเคชันธนาคารขยะ และประเมินคุณภาพของแอปพลิเคชัน โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. แอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน
2. แบบประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ การพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน
3. แบบสอบถามความพึงพอใจโดยกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน

การสร้างและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. แบบประเมินคุณภาพของแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน โดยผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน แบ่งรายการประเมินระบบเป็น 5 ด้าน ประกอบด้วย 1) ด้านความสามารถตรงตามความ

ต้องการของผู้ใช้ 2) ด้านความถูกต้องในการทำงานตามหน้าที่ของระบบ 3) ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน 4) ด้านความรวดเร็วในการทำงาน 5) ด้านการรักษาความปลอดภัย โดยแบ่งระดับของการให้คะแนนออกเป็น 5 ระดับ ตามมาตรวัดลิเคิร์ต (Likert scale) แล้วแปลผลประสิทธิภาพอยู่ในระดับใดเมื่อผู้เชี่ยวชาญได้ประเมินแล้ว ผู้วิจัยใช้กระบวนการทางสถิติในการประมวลผลและสรุปผล

2. แบบประเมินความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน โดยแบ่งระดับการให้คะแนนแบบมาตราส่วนประเมินค่า 5 ระดับ ตามแนวคิดของลิเคิร์ต ตามเกณฑ์ 5 ระดับ มีรายการประเมินความพึงพอใจ 20 ข้อย่อย แบ่งเป็นรายการประเมิน 4 ด้าน คือ 1) ด้านข้อมูล 2) ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน 3) ด้านการออกแบบ และ 4) ด้านการนำไปใช้ประโยชน์ แปลผลความพึงพอใจโดยการใช้ค่าเฉลี่ยในแต่ละด้าน ผู้วิจัยใช้กระบวนการทางสถิติในการประมวลผลและสรุปผล

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามที่สมบูรณ์แล้วดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล ลงพื้นที่เก็บข้อมูลที่บ้านด้ามพรำ ตำบลขามใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการนำเสนอแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชนให้กับผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญทดลองใช้และประเมินคุณภาพตามแบบประเมินที่ผู้วิจัยได้สร้างไว้

2. ผู้วิจัยทำการสาธิตการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน อธิบายวิธีตอบ

แบบสอบถาม พร้อมทั้งบอกวัตถุประสงค์ของการวิจัยให้กับกลุ่มตัวอย่าง เพื่อให้กลุ่มตัวอย่างทำการทดลองใช้และประเมินความพึงพอใจตามแบบประเมินที่ผู้วิจัยได้สร้างไว้

3. นำแบบสอบถามที่ได้รับกลับคืนมาทั้งหมดตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบสอบถาม ความถูกต้องของคำตอบในแบบสอบถาม แยกแบบสอบถามที่ไม่สมบูรณ์ออก

4. ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามที่สมบูรณ์มาแจกแจงความถี่ของคำตอบ ด้วยการลงรหัสคำตอบในแต่ละข้อให้เป็นตัวเลขประจำแบบสอบถามสามารถนำไปลงในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อเตรียมนำไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

5. การประมวลผลข้อมูลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ

การสร้างและตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ผู้วิจัยจะทำการประเมินคุณภาพของแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการประเมินซึ่งแบบสอบถามดังกล่าวจะทำการประเมินความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับจุดประสงค์ (Index of Item Objective Congruence: IOC) และให้ค่าคะแนนดังนี้ ใช้ได้ให้ค่าคะแนนเป็น 1 ไม่แน่ใจให้ค่าคะแนนเป็น 0 และใช้ไม่ได้ให้ค่าคะแนนเป็น -1 หลังจากนั้นคำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้องของข้อคำถามแต่ละข้อ ถ้าข้อคำถามใดมีค่า IOC > 0.50 ถือว่า

ข้อคำถามนั้นวัดได้สอดคล้องกับเนื้อหาและวัตถุประสงค์⁶ ประเมินคุณภาพ 5 ด้าน คือ ด้านความสามารถตรงตามความต้องการของผู้ใช้ ด้านความถูกต้องในการทำงานตามหน้าที่ของระบบ ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ด้านความรวดเร็วในการทำงาน และด้านการรักษาความปลอดภัย

สำหรับเกณฑ์การให้คะแนนเพื่อประเมินคุณภาพของแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน เป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า (Rating scale) ใน 5 ระดับตามแนวคิดของลิเคิร์ต (Likert's scale)⁷ กำหนดระดับการประเมิน ดังนี้

- 5 หมายถึง มีระดับความคิดเห็น
อยู่ในระดับมากที่สุด
- 4 หมายถึง มีระดับความคิดเห็น
อยู่ในระดับมาก
- 3 หมายถึง มีระดับความคิดเห็น
อยู่ในระดับปานกลาง
- 2 หมายถึง มีระดับความคิดเห็น
อยู่ในระดับน้อย
- 1 หมายถึง มีระดับความคิดเห็น
อยู่ในระดับน้อยที่สุด

การแปลผลของความคิดเห็นพิจารณาจากค่าเฉลี่ยโดยใช้เกณฑ์ของเบสท์⁸ มีรายละเอียดดังนี้
ค่าเฉลี่ย 4.50 -5.00 หมายถึง เห็นด้วยมากที่สุด
ค่าเฉลี่ย 3.50 -4.49 หมายถึง เห็นด้วยมาก
ค่าเฉลี่ย 2.50 -3.49 หมายถึง เห็นด้วยปานกลาง
ค่าเฉลี่ย 1.50 -2.49 หมายถึง เห็นด้วยน้อย
ค่าเฉลี่ย 1.00 -1.49 หมายถึง เห็นด้วยน้อยที่สุด

2. การประเมินความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน กลุ่มตัวอย่างเป็นชาวบ้านในชุมชน จำนวน 100 คน โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการประเมินซึ่งแบบสอบถามดังกล่าวจะทำการประเมินความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับจุดประสงค์ (Index of Item Objective Congruence: IOC) สำหรับรายละเอียดของแบบสอบถามจะเป็นข้อคำถามเกี่ยวกับความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน เกณฑ์การให้คะแนนเพื่อประเมินความพึงพอใจ เป็นแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า (Rating scale) ใน 5 ระดับตามแนวคิดของลิเคิร์ต (Likert's scale) จากนั้นผู้วิจัยจะให้หลักทางสถิติช่วยในการสรุปผล โดยการคำนวณหาค่าเฉลี่ยซึ่งผลที่ได้จะช่วยให้สามารถพิจารณาความพึงพอใจในการใช้งานแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชนที่พัฒนาขึ้นว่าอยู่ในระดับใด โดยในส่วนของ การพิจารณาคะแนนเฉลี่ยที่ได้จากการประเมินความพึงพอใจ ผู้วิจัยได้ทำการแปลผลของความพึงพอใจพิจารณาจากค่าเฉลี่ยโดยใช้เกณฑ์ของเบสท์

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่รวบรวมได้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) ค่าสถิติที่ใช้ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่าร้อยละ (Percentage)⁹

ผลการวิจัย

ผลการพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะ เพื่อจัดการขยะชุมชน การบริหารจัดการระบบการ ขายขยะในชุมชนด้วยแอปพลิเคชันที่สามารถ แสดงผลผ่านคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถือแบบ ออนไลน์ ผู้ดูแลระบบสามารถบริหารจัดการข้อมูล

ซึ่งประกอบด้วยทำให้บริการข้อมูลสมาชิก ยอดการ ซื้อขายขยะของแต่ละคน ยอดรวมของขยะแต่ละ ประเภทที่ขายไป ราคาซื้อขายขยะในปัจจุบัน รายงานการซื้อขายขยะตามนโยบายของชุมชนและ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงใน Figure 5.

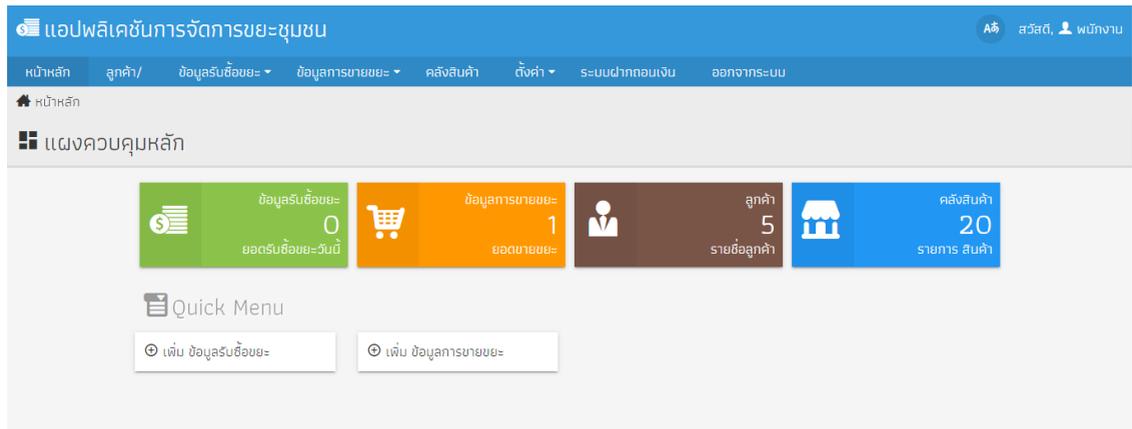
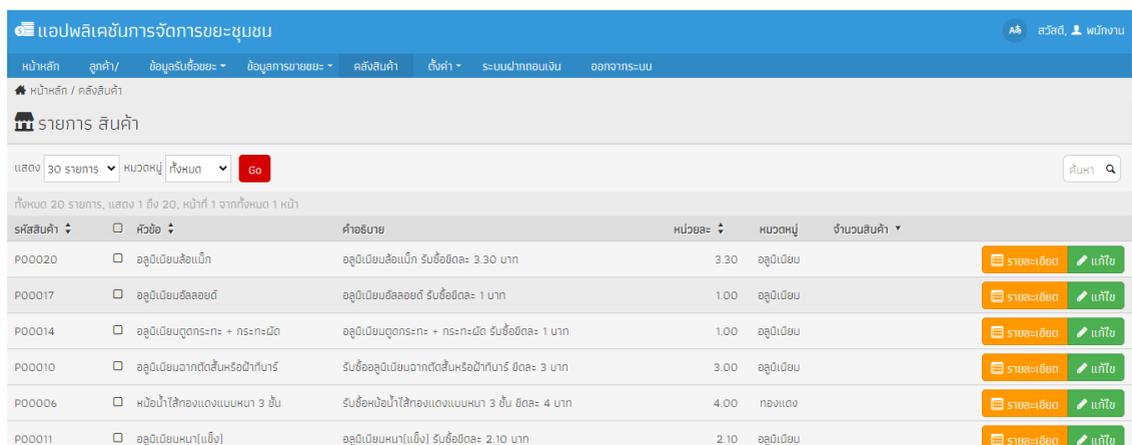


Figure 5. The main page of bank application to manage community waste

ผู้ดูแลระบบ สามารถดูรายละเอียดรายการ รับซื้อขยะ เพิ่ม ลบ แก้ไข ค้นหา ผ่านแอปพลิเคชัน ธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน ระบบแสดง

ประเภทขยะ รายการรับซื้อขยะ โดยแสดงรหัส หัวข้อ คำอธิบาย ราคาที่รับซื้อ ดังแสดงใน Figure 6.

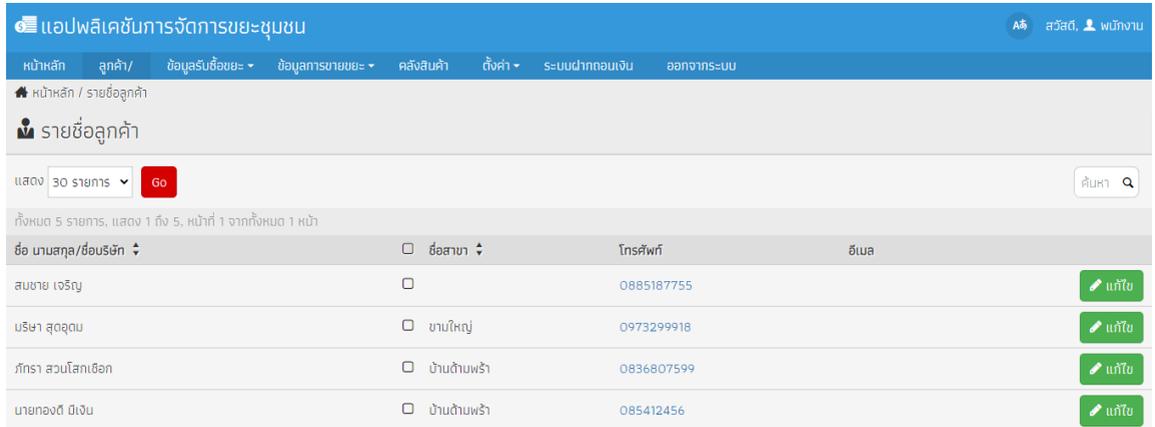


รหัสสินค้า	หมวด	คำอธิบาย	หน่วย	หมวดหมู่	จำนวนสินค้า	รายละเอียด	แก้ไข
PO0020	อู๊ดเยี่ยมสีแฉก	อู๊ดเยี่ยมสีแฉก รับซื้อยี่ดละ 3.30 บาท	3.30	อู๊ดเยี่ยม		รายละเอียด	แก้ไข
PO0017	อู๊ดเยี่ยมสีลอสยด์	อู๊ดเยี่ยมสีลอสยด์ รับซื้อยี่ดละ 1 บาท	1.00	อู๊ดเยี่ยม		รายละเอียด	แก้ไข
PO0014	อู๊ดเยี่ยมดูดกระกะ + กระกะเม็ด	อู๊ดเยี่ยมดูดกระกะ + กระกะเม็ด รับซื้อยี่ดละ 1 บาท	1.00	อู๊ดเยี่ยม		รายละเอียด	แก้ไข
PO0010	อู๊ดเยี่ยมจากตัดสีหรือผ้าขาว	รับซื้ออู๊ดเยี่ยมจากตัดสีหรือผ้าขาว ยี่ดละ 3 บาท	3.00	อู๊ดเยี่ยม		รายละเอียด	แก้ไข
PO0006	หมอน้ำใส่กองแดงแบบหนา 3 ชั้น	รับซื้อหมอน้ำใส่กองแดงแบบหนา 3 ชั้น ยี่ดละ 4 บาท	4.00	กองแดง		รายละเอียด	แก้ไข
PO0011	อู๊ดเยี่ยมหนา(แข็ง)	อู๊ดเยี่ยมหนา(แข็ง) รับซื้อยี่ดละ 2.10 บาท	2.10	อู๊ดเยี่ยม		รายละเอียด	แก้ไข

Figure 6. List of waste management in the application

ผู้ดูแลระบบ สามารถดูรายการสมาชิก
ธนาคารขยะผ่านแอปพลิเคชันธนาคารขยะ
เพื่อจัดการขยะชุมชน ระบบแสดงรายการสมาชิก

ชื่อ นามสกุล ที่อยู่ โดยผู้ดูแลระบบสามารถเพิ่ม ลบ
แก้ไข ค้นหาสมาชิกได้ ดังแสดงใน Figure 7.

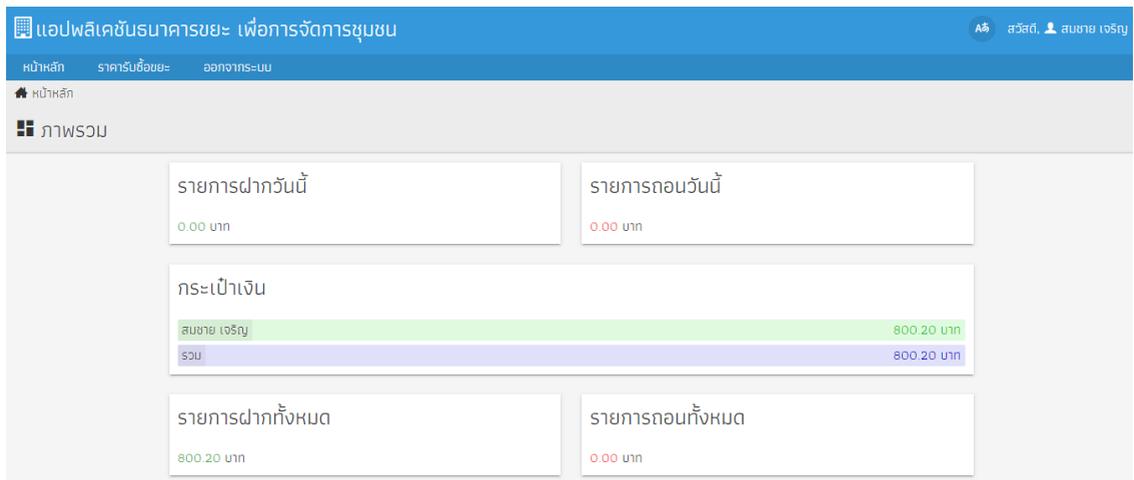


ชื่อ นามสกุล/ชื่อบริษัท	ชื่อสาขา	โทรศัพท์	อีเมล
สมชาย เจริญ	<input type="checkbox"/>	0885187755	แก้ไข
บริษัท สุดอุดม	<input type="checkbox"/> ขามใหญ่	0973299918	แก้ไข
ภัทรา สอนโสเชือก	<input type="checkbox"/> บ้านต้นพรา	0836807599	แก้ไข
นายทองดี มีเงิน	<input type="checkbox"/> บ้านต้นพรา	085412456	แก้ไข

Figure 7. List of members in bank application to manage community waste

สมาชิก สามารถตรวจสอบกระเป๋าสเงินของ
ตนเอง รายการฝาก รายการถอน รายงานสรุปผล
การฝากและการถอนเงินของสมาชิก โดยผู้ดูแล

ระบบเป็นผู้ทำรายการผ่านแอปพลิเคชันธนาคาร
ขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน ดังแสดงใน Figure 8.



รายการฝากวันนี้	รายการถอนวันนี้
0.00 บาท	0.00 บาท

กระเป๋าเงิน	
สมชาย เจริญ	800.20 บาท
รวม	800.20 บาท

รายการฝากทั้งหมด	รายการถอนทั้งหมด
800.20 บาท	0.00 บาท

Figure 8. Deposit / withdrawal lists

3.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน จากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน

5 ท่านที่มีต่อแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน ดังนี้

Table 1. The application effectiveness was evaluated by 5 experts

Evaluation list	\bar{X}	S.D.	Meaning
1. Functional Requirement Test	4.72	0.49	Very good
2. Functional Test	4.87	0.26	Very good
3. Usability Test	4.29	0.61	good
4. Performance Test	4.24	0.70	good
5. Security Test	4.85	0.25	Very good
Total	4.59	0.46	Very good

จาก (Table 1.) สรุปผลประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ที่ใช้แอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน พบว่าโดยรวมอยู่ในระดับมีคุณภาพดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.59 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.46 ข้อที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรก คือ ด้านความถูกต้องในการทำงานตามหน้าที่ของระบบ อยู่ในระดับมีคุณภาพดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.87 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.26 รองลงมา คือ ด้านการรักษาความปลอดภัย อยู่ใน

ระดับมีคุณภาพดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.85 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.25 และด้านความสามารถตรงตามความต้องการของผู้ใช้ อยู่ในระดับมีคุณภาพดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.72 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.49 ผลประเมินตามลำดับ

3.2 ผลประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน

Table 2. The application was evaluated for satisfaction by 100 samples

Evaluation list	\bar{X}	S.D.	Meaning
1. Information	4.14	0.68	good
2. Usability Test	4.29	0.75	good
3. Design	4.23	0.72	good
4. Utilization	4.41	0.70	good
Total	4.26	0.71	good

จาก (Table 2.) ผลประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน จำนวน 100 คน พบว่าโดยรวมอยู่ในระดับ พึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.71 ข้อที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุด 3 อันดับแรก คือ ด้านการนำไปใช้ประโยชน์อยู่ในระดับพึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.41 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.70 รองลงมา คือ ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน อยู่ในระดับพึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.29 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.75 และ ด้านการออกแบบ อยู่ในระดับ พึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.23 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.72 ผลประเมินตามลำดับ

อภิปรายผล

พัฒนาแอปพลิเคชันดำเนินการตามหลักการและทฤษฎีวงจรการพัฒนาระบบ SDLC (System Development Life Cycle) ประกอบด้วย 7 กิจกรรม¹⁰ ดังนี้ การกำหนดความต้องการ การวิเคราะห์ระบบ การออกแบบระบบ การพัฒนาระบบ การทดสอบระบบ การติดตั้งระบบ การบำรุงรักษาระบบ เมื่อนำแอปพลิเคชันมาใช้ในการจัดการธนาคารขยะ ช่วยยกระดับการทำงานได้ดียิ่งขึ้น สอดคล้องกับโอบาส เอียมลิวทิง¹¹ ที่กล่าวว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประกอบกับการพัฒนาของเทคโนโลยี ได้ทวีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น จึงนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีสารสนเทศถูกนำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนและมีอิทธิพลต่อการทำงานเป็นอย่างมาก ด้านประสิทธิภาพแอปพลิเคชันธนาคารขยะเพื่อจัดการขยะชุมชน ในภาพรวมอยู่ในระดับดีมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.59 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.46 แอปพลิเคชันสามารถตอบสนองความต้องการ

ของผู้ใช้ระบบได้ทั้งส่วนของชุมชนและผู้รับซื้อขยะชุมชนเกิดแรงกระตุ้นให้รู้จักการจัดการกับขยะเพื่อนำมาสร้างมูลค่า รั้งักออมเงินจากการขายขยะติดตามผลการซื้อขายขยะของชุมชนได้จากแอปพลิเคชัน เกิดประโยชน์แก่ชุมชนต้นแบบและนำไปเผยแพร่ให้ชุมชนเครือข่ายได้ใช้ในการบริหารจัดการขยะชุมชนต่อไป และสอดคล้องกับ พัชรภรณ์ หงษ์สิบลอง และคณะ¹² ที่ศึกษาการการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการจัดการข้อมูลธนาคารขยะ โดยการมีส่วนร่วมของชุมชนมหาโพธิ์ อำเภอเมืองจังหวัดน่าน ซึ่งผลการวิจัยพบว่า เว็บแอปพลิเคชันเพื่อการจัดการข้อมูลธนาคารขยะ เพิ่มความสะดวกให้แก่คณะกรรมการของชุมชนในด้านการจัดเก็บข้อมูล และทำให้การเก็บข้อมูลเป็นระบบมากขึ้น และยังขึ้น และผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการพัฒนาระบบเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการจัดการข้อมูลธนาคารขยะจากผู้เชี่ยวชาญด้านการพัฒนาระบบภาพรวมอยู่ในระดับมาก

ด้านความพึงพอใจในการใช้แอปพลิเคชันธนาคารขยะ ผลการประเมินความพึงพอใจพบว่าอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.26 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.71 แอปพลิเคชันออกแบบได้สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน สามารถเข้าใช้งานผ่านคอมพิวเตอร์และโทรศัพท์มือถือ มีความทันสมัยเกิดประโยชน์ต่อชุมชนทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการจัดการกับขยะแต่ละประเภทเพื่อนำมาสร้างมูลค่า สอดคล้องกับงานวิจัยของวันดี พิษิต และคณะ¹³ เรื่องการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อการบริหารจัดการขยะแบบครบวงจรผ่านระบบ คิวอาร์โค้ด ขององค์การบริหารส่วนตำบลบ้านยาง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ โดยพบว่าความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อแอปพลิเคชัน

ชั้นอยู่ในระดับมาก แอปพลิเคชันช่วยบริหารจัดการ
ขยะแบบครบวงจร ทำให้ผู้ใช้งานสามารถลดขั้นตอน
ในการจัดการขยะในครัวเรือนได้สะดวกยิ่งขึ้นสร้าง
เจตคติที่ดีในการนำขยะมาสร้างมูลค่าผ่านการ
ทำงานของกลุ่มในชุมชน ดังนั้นแอปพลิเคชันที่
พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้งานตรงตามความ
ต้องการของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ให้บริการ
ธนาคารขยะชุมชนและผู้รับบริการมีความคิดเห็น
สอดคล้องกัน

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะ
เพื่อจัดการขยะชุมชน นำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้
มุ่งเน้นให้ชุมชนเกิดแรงกระตุ้นในการจัดการขยะ
รู้จักออมเงินจากการขายขยะ เพื่อนำมาสร้างมูลค่า
ช่วยหมุนเวียนขยะกลับมาใช้ประโยชน์ ระบบช่วย
จัดการข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ การพัฒนา
ชุมชนด้วยนวัตกรรมที่เหมาะสมกับบริบทนั้น ๆ
สามารถนำเทคโนโลยีไปบริหารการจัดการชุมชน
อย่างสร้างสรรค์ ส่งผลให้ชุมชนมีความเข้มแข็งสู่การ
พัฒนาคุณภาพชีวิต รวมถึงสามารถถ่ายทอดความรู้
ไปสู่ชุมชนอื่น หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถติดตาม
ผลการดำเนินงานของชุมชนได้อย่างเป็นรูปธรรม
ผลการพัฒนาได้แอปพลิเคชันธนาคารขยะ
เพื่อจัดการขยะชุมชน ประเมินคุณภาพโดย
ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน ประเมิน 5 ด้าน คือ ด้าน
ความสามารถตรงตามความต้องการของผู้ใช้
ด้านความถูกต้องในการทำงานตามหน้าที่ของระบบ
ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ด้าน
ความเร็วในการทำงาน และด้านการรักษา
ความปลอดภัย พบว่าโดยรวมอยู่ในระดับมีคุณภาพดี
มาก จากนั้นศึกษาความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่าง

เป็นคนในชุมชน จำนวน 100 คน พบว่าผลประเมิน
อยู่ในระดับพึงพอใจมาก

ข้อเสนอแนะ

1 ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้ประโยชน์

จากผลการวิจัยได้นำนวัตกรรมมาใช้บริหาร
จัดการชุมชน โดยใช้รูปแบบการบริหารจัดการขยะ
จากแบบจำลองบ้านด้ามพร้าวโมเดลมาเป็น
กรณีศึกษา แอปพลิเคชันธนาคารขยะเป็นศูนย์รวม
การสื่อสารเชื่อมโยงกระบวนการบริหารจัดการขยะ
ชุมชน ทั้งประกาศราคารับซื้อขยะปัจจุบัน
การสมัครสมาชิก การเบิกถอนเงิน รายงานผลการ
ซื้อขายขยะ แอปพลิเคชันสามารถนำไปเผยแพร่
ให้กับชุมชนอื่น ๆ ได้ โดยช่วงก่อนเริ่มใช้งานควรมี
การจัดอบรมเชิงปฏิบัติการ การใช้งานแอปพลิเคชัน
เพื่อเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับชุมชนได้
นำไปใช้ได้อย่างถูกต้องและเกิดประโยชน์สูงสุด

2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

การพัฒนาแอปพลิเคชันธนาคารขยะ
เพื่อจัดการขยะชุมชน มีระบบทำรายการเบิกถอน
เงินโดยระบบออกแบบให้ทำรายการโดยผู้ดูแลระบบ
และรับเงินเป็นเงินสดเท่านั้น เพื่อให้ระบบมีระบบ
สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ควรเพิ่มในส่วนของการคำนวณ
ดอกเบี้ยจากการฝากเงินที่ได้รับจากการขายขยะ
และพัฒนาให้ระบบเชื่อมต่อไปยังระบบธนาคาร
พาณิชย์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี โดยใช้
ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ในการทำวิจัย ผู้วิจัย
ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2559. กรุงเทพมหานคร; 2560.
2. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานศูนย์เรียนรู้ชุมชนที่ปลอดภัย. กรุงเทพมหานคร: กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม; 2559.
3. เศรษฐ อุปมา. การพัฒนาระบบบริหารจัดการขยะด้วยแนวคิดขยะเหลือศูนย์: กรณีศึกษาโรงพยาบาลสรรพสิทธิประสงค์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี; 2559.
4. สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12 อุบลราชธานี. รายงานฐานข้อมูลขยะมูลฝอย ประกอบด้วย 5 จังหวัด จังหวัดยโสธร มุกดาหาร ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด และ อุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ 2560. [อินเทอร์เน็ต]. 2560. [เข้าถึงเมื่อ 22 ธ.ค. 2560]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mnre.go.th/ckeditor/upload/files/id164/pdf/garbage2560.pdf>
5. นิตินร วรณกถิต. การประเมินโครงการธนาคารขยะรีไซเคิล บริษัทหาดทิพย์ จำกัด (มหาชน) ตามแนวทางการประเมินเชิงสมดุล [วิทยานิพนธ์ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ; 2553.
6. ถานินทร์ ศิลป์จาร. การวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย SPSS. พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น; 2549.
7. ศิริวรรณ เสรีรัตน์, ปริญ ลักขิตานนท์, ศุภร เสรีรัตน์, อองอาจ ปทะวานิช. การบริหารการตลาดยุคใหม่. กรุงเทพฯ: บริษัทวีระฟิล์มและโซเท็กซ์ จำกัด; 2541.
8. Best JW. Research in education (4th ed.). New Jersey: Prentice Hall; 1981.
9. ชูศรี วงศ์รัตน์. เทคนิคการใช้สถิติเพื่องานวิจัย. กรุงเทพฯ: เทพณภูมิตรการพิมพ์; 2541.
10. โอบาส เอี่ยมสิริวงศ์. การวิเคราะห์และออกแบบระบบ (ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น; 2555.
11. โอบาส เอี่ยมสิริวงศ์. การวิเคราะห์และออกแบบระบบ. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น; 2560.
12. พัชราภรณ์ หงษ์สิบลอง, ภัทธีรา อูระยศ, พลิษฐ์ กันละนนท์. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อการจัดการข้อมูลธนาคารขยะ โดยมีส่วนร่วมของชุมชนมหาโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดน่าน. วารสารวิชาการ การจัดการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม 2564;18:73-86.
13. วันดี พิษิต, บุญขง สกรณณ์, ดวงคำ เสกสิทธิ์. การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อการบริหารจัดการขยะแบบครบวงจรผ่านระบบ คิวอาร์โค้ด ขององค์การบริหารส่วนตำบลบ้านยาง อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์. มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์; 2562. เลขที่รายงาน 2016-09-30.

The Analytical Solutions of Bateman-Burgers Equation

Watsapon Saengcharoenthaworn^{*} and Settapat Chinviriyasit

Department of Mathematics, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 10140

**Corresponding author; E-mail: watsapon4@hotmail.com*

Received: 06 July 2022 /Revised: 09 August 2022 /Accepted: 23 August 2022

Abstract

The objective of this study is to find the new method to get the analytical solutions of nonlinear partial differential equation, namely Bateman-Burgers equation which have the form $u_t + uu_x = \nu u_{xx}$. The simple equation method is chosen to find the answer. The results of the study show that this method is effective at achieving the solutions of the Bateman-Burgers equation with both Bernoulli equation and Riccati equation.

Keywords: Simple equation method, Nonlinear partial differential equation, Bernoulli equation, Riccati equation

Introduction

Nonlinear partial differential equations are very important in both mathematics and physics. They describe a lot of systems in terms of mathematics equation. In 1915, Harry Bateman proposed the equation which is well-known in many areas of applied mathematics such as gas dynamics, fluid mechanics and traffic flow. The equation was studied later in 1948 by Jan Burgers¹. So, we got the Bateman-Burgers equation in the following form

$$u_t + uu_x = \nu u_{xx}, \quad (1)$$

where u is a function of variables x and t , ν is the viscosity of a fluid².

The research objective is to use the simple equation method (SE method) with both the Bernoulli equation and the Riccati equation to solve the analytical solutions of the Bateman-Burgers equation. Next, we will introduce the simple equation method.

Simple Equation Method

In this section, the process of simple equation method will be shown³⁻⁵.

Step 1: Given the nonlinear partial differential equation in the form

$$P(u, u_t, u_x, u_{xx}, u_{xt}, \dots) = 0, \quad (2)$$

where u is the function of x and t .

Step 2: To transform $u(x, t) = U(\xi)$ we set $\xi = x - bt$ and use this to transform equation (2) into an ordinary differential equation

$$G(U, U_\xi, U_{\xi\xi}, U_{\xi\xi\xi}, \dots) = 0, \quad (3)$$

where b is nonzero constant of wave velocity and G is a polynomial of $U(\xi)$ and its derivatives.

Step 3: The solution of equation (3) can be express in the form

$$U(\xi) = \sum_{i=0}^N a_i F^i, \quad (4)$$

where $F = F(\xi)$, a_i are constant and $a_N \neq 0$.

Step 4: Find the value of N by balancing between the highest order derivative and the nonlinear terms.

Step 5: For Bernoulli equation we use

$$F_\xi = cF(\xi) + dF^2(\xi), \quad (5)$$

where c and d are nonzero constant.

For Riccati equation we use

$$F_\xi = \alpha F^2(\xi) + \beta, \quad (6)$$

where α and β are nonzero constant.

Step 6: Substituting N from step 4 into equation (4) and then collect all terms which have the same power of F and set them to zero, the solution of equation (5) and equation (6) are described in two cases.

For equation (5) Bernoulli equation

Case 1: $c > 0$, $d < 0$, ξ_0 and v are constant,

$$F(\xi) = \frac{ce^{[c(\xi+\xi_0)]}}{1 - de^{[c(\xi+\xi_0)]}}. \quad (7)$$

Case 2: $c < 0$, $d > 0$, ξ_0 and v are constant,

$$F(\xi) = -\frac{ce^{[c(\xi+\xi_0)]}}{1 + de^{[c(\xi+\xi_0)]}}. \quad (8)$$

For equation (6) Riccati equation

Case 1: $\alpha\beta < 0$, $\xi_0 > 0$ and $v = \pm 1$,

$$F(\xi) = \frac{-\sqrt{-\alpha\beta}}{\alpha} \tanh\left(\sqrt{-\alpha\beta}\xi - \frac{v \ln(\xi_0)}{2}\right). \quad (9)$$

Case 2: $\alpha\beta > 0$ and ξ_0 is a constant,

$$F(\xi) = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha} \tan(\sqrt{\alpha\beta}(\xi + \xi_0)). \quad (10)$$

Solutions of Bateman-Burgers equation with Bernoulli equation case

To transform equation (1) into ordinary differential equation (ODE) we set the wave variable $\xi = x - bt$ where b is nonzero constant of wave ⁶⁻⁸ velocity so we get

$$-bU_\xi + UU_\xi - vU_{\xi\xi} = 0, \quad (11)$$

the solution of equation (11) is defined by equation (4).

Find N by balancing between the highest order derivative and the nonlinear terms

$$N + 2 = N + N + 1$$

$$N = 1$$

there for equation (4) will be

$$U(\xi) = a_0 + a_1 F. \tag{12}$$

Differentiating

$$U_\xi = a_1 c F + a_1 d F^2, \tag{13}$$

$$U_{\xi\xi} = a_1 c^2 F + 3a_1 c d F^2 + 2a_1 d^2 F^3, \tag{14}$$

$$U U_\xi = a_0 a_1 c F + a_0 a_1 d F^2 + a_1^2 c F^2 + a_1^2 d F^3. \tag{15}$$

Substituting equations (13), (14) and (15) into equation (11), we obtain

$$\begin{aligned} & -ba_1 c F - ba_1 d F^2 + a_0 a_1 c F + a_0 a_1 d F^2 \\ & + a_1^2 c F^2 + a_1^2 d F^3 - \nu a_1 c^2 F \\ & - 3\nu a_1 c d F^2 - 2\nu a_1 d^2 F^3 = 0. \end{aligned} \tag{16}$$

Collect all terms which have the same power of F and set to zero

$$F^1: -ba_1 c + a_0 a_1 c - \nu a_1 c^2 = 0, \tag{17}$$

$$F^2: -ba_1 d + a_0 a_1 d + a_1^2 c - 3\nu a_1 c d = 0, \tag{18}$$

$$F^3: a_1^2 d - 2\nu a_1 d^2 = 0. \tag{19}$$

Solving the system of equations (17), (18) and (19), we get

$$a_1 = 2\nu d, \quad b = a_0 - \nu c. \tag{20}$$

Substituting equations (7), (8) and (20) into equation (12), the solutions of the Bateman-Burgers equation may be considered as,

Case 1: $c > 0, d < 0$,

$$u(x,t) = a_0 + \frac{2\nu d c e^{[c(x-(a_0-\nu c)t+\xi_0)]}}{1 - d e^{[c(x-(a_0-\nu c)t+\xi_0)]}}. \tag{21}$$

Case 2: $c < 0, d > 0$,

$$u(x,t) = a_0 - \frac{2\nu d c e^{[c(x-(a_0-\nu c)t+\xi_0)]}}{1 + d e^{[c(x-(a_0-\nu c)t+\xi_0)]}}. \tag{22}$$

For case 1, using parameters

$c = 1, d = -1, 1 \leq x \leq 15, 1 \leq t \leq 15, \xi_0 = 0, a_0 = 0$

and $\nu = 1$ the solutions of the Bateman-Burgers equation can be demonstrated as in figure 1.

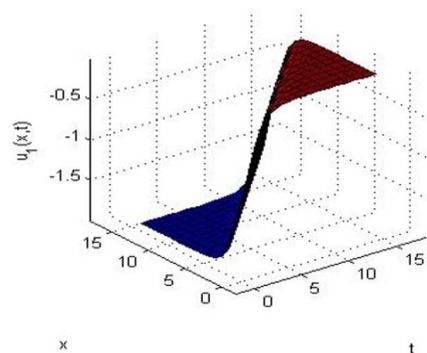


Figure 1. The solutions by the SE method with Bernoulli equation in case 1.

In the second case, using parameters

$c = -10, d = 10, 1 \leq x \leq 15, 1 \leq t \leq 15, \xi_0 = 0, a_0 = 0$

and $\nu = 1$ the solutions of the Bateman-

Burgers equation can be demonstrated as in figure 2.

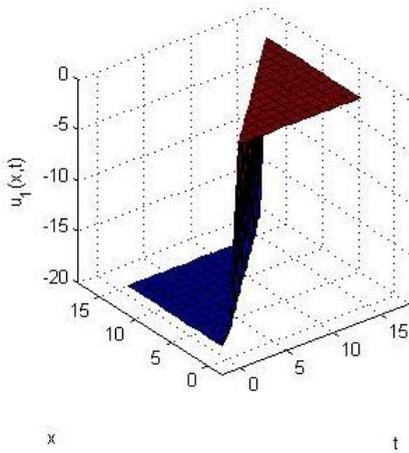


Figure 2. The solutions by the SE method with Bernoulli equation in case 2.

Solutions of Bateman-Burgers equation with Riccati equation case

For Riccati equation, we use F_ξ from equation (6), since we consider the same equation then $N = 1$ and $U(\xi)$ is the same as equation (12).

Differentiating

$$U_\xi = a_1 \alpha F^2 + a_1 \beta, \tag{23}$$

$$U_{\xi\xi} = 2a_1 \alpha^2 F^3 + 2a_1 \alpha \beta F, \tag{24}$$

$$UU_\xi = a_0 a_1 \alpha F^2 + a_0 a_1 \beta + a_1^2 \alpha F^3 + a_1^2 \beta F. \tag{25}$$

Substituting equations (23), (24) and (25) into equation (11), we obtain

$$\begin{aligned} & -ba_1 \alpha F^2 - ba_1 \beta + a_0 a_1 \alpha F^2 \\ & + a_0 a_1 \beta + a_1^2 \alpha F^3 + a_1^2 \beta F \\ & - 2va_1 \alpha^2 F^3 - 2va_1 \alpha \beta F = 0. \end{aligned} \tag{26}$$

Collect all terms which have the same power of F and set to zero

$$F^0 : -ba_1 \beta + a_0 a_1 \beta = 0, \tag{27}$$

$$F^1 : a_1^2 \beta - 2va_1 \alpha \beta = 0, \tag{28}$$

$$F^2 : -ba_1 \alpha + a_0 a_1 \alpha = 0, \tag{29}$$

$$F^3 : a_1^2 \alpha - 2va_1 \alpha^2 = 0. \tag{30}$$

Solving the system of equations (27), (28), (29) and (30), we get

$$a_1 = 2v\alpha, \quad b = a_0. \tag{31}$$

Substituting equations (9), (10) and (31) into equation (12), the solutions of the Bateman-Burgers equation may be considered as,

Case 1 : $\alpha\beta < 0$, $\xi_0 > 0$ and $v = \pm 1$,

$$u(x,t) = b - 2v\sqrt{-\alpha\beta} \tanh(\sqrt{-\alpha\beta}(x-bt) - \frac{v \ln(\xi_0)}{2}). \tag{32}$$

Case 2 : $\alpha\beta > 0$ and ξ_0 is a constant,

$$u(x,t) = b + 2v\sqrt{\alpha\beta} \tan(\sqrt{\alpha\beta}(x-bt + \xi_0)). \tag{33}$$

For case 1, using parameters

$$\alpha = 1, \beta = -1, 1 \leq x \leq 15, 1 \leq t \leq 15, \xi_0 = 1, b = 1$$

and $v = 1$ the solutions of the Bateman-Burgers equation can be demonstrated as in figure 3.

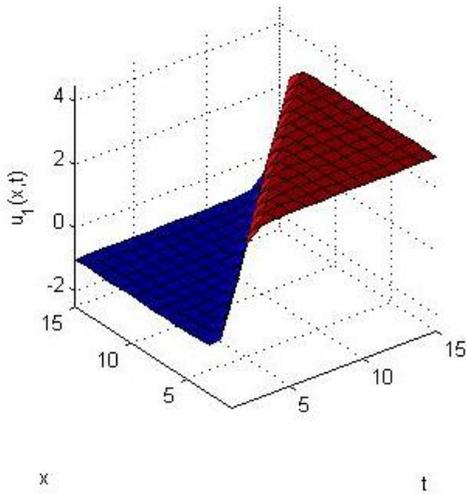


Figure 3. The solutions by the SE method with Riccati equation in case 1.

In the second case, using parameters $\alpha = 1, \beta = 1, 1 \leq x \leq 15, 1 \leq t \leq 15, \xi_0 = 1, b = 1$ and $\nu = 1$ the solutions of the Bateman-Burgers equation can be demonstrated as in figure 4.

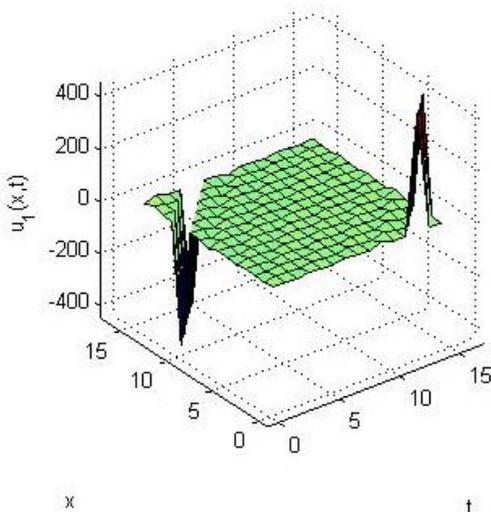


Figure 4. The solutions by the SE method with Riccati equation in case 2.

Conclusions

The simple equation method is applied to solve the Bateman-Burgers equation with the wave variable $\xi = x - bt$ in both Bernoulli equation and Riccati equation. The solutions may be defined in equation (4) along with the help from equation (5), (7) and (8) for Bernoulli equation and equation (6), (9) and (10) for Riccati equation. After some balancing and calculating, the solutions are achieved in equation (21) and (22) for Bernoulli equation and equation (32) and (33) for Riccati equation. The simple equation in both Bernoulli equation and Riccati equation shows that this method in both cases is effective for solving Bateman-Burgers equation.

References

1. Burgers, JM. A mathematical model illustrating the theory of turbulence. *Adv Appl Mech* 1948;1:171-99.
2. Bateman H. Some recent researches on the motion of fluids. *Mon Weather Rev* 1915;43:163-70.
3. Boateng K, Yang W, Otoo M, Yaro D. Dispersive traveling wave solution for non-linear waves dynamical models. *J appl math phys* 2019;7:2467-80.
4. Vitanov N, Dimitrova Z, Vitanov K. Simple Equations Method (SEsM): Algorithm, connection with Hirota method, inverse



- scattering transform method, and several other methods. *Entropy* 2021;23:1-36.
5. Nofal A. Simple equation method for nonlinear partial differential equations and its applications. *J Egyptian Math Soc* 2015;24:204-9.
 6. Ablowitz J, Clarkson A. Soliton, nonlinear evolution equations and inverse scattering. London Mathematical Society Lecture Note Series 149. 1st ed. Cambridge University Press; 1991.
 7. Kudryashov A. Exact soliton solutions of the generalized evolution equation of wave dynamics. *J Appl Math Mech* 1988;52:361-5.
 8. Dechanubeksa C, Chinviriyasit S. New analytical solutions of (1+1) dimension Chaffee-Infante equation using modified simple equation method. Proceedings of the 14th IMT-GT ICMSA; 2018 Dec 8-10; Songkhla, Thailand. Thaksin University; 2018.

การกำจัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นจากน้ำเสียชุมชนด้วยพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์และตะกอนจากการผลิตน้ำประปา

Removal of Orthophosphate and Turbidity from Municipal Wastewater by Polyaluminium Chloride and Water Treatment Sludge

สุวนันท์ ทันสมัย ผ่องศรี เป่าภูรี และ มัลลิกา ปัญญาคะโป

Suwanan Tansamai Pongsri Paopuree and Mallika Panyakapo

ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

Department Environmental Science, Faculty of Science, Silpakom University

*Corresponding author; E-mail: mpanyakapo@gmail.com

Received: 15 July 2022 /Revised: 05 August 2022 /Accepted: 19 October 2022

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของฟอสเฟตในน้ำเสียชุมชนส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กระบวนการผลิตน้ำประปาทำให้เกิดตะกอนประปาเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ตะกอนเหล่านี้ยังคงมีสารพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตหลงเหลืออยู่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการนำสาร PACI และตะกอนประปามาใช้ในการบำบัดออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate, OP) และความขุ่นจากน้ำเสียชุมชน โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัด OP และความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสาร PACI ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน ผลการทดลองพบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ 1) การใช้สาร PACI ที่ความเข้มข้น 30 มก./ล. โดยทำการกวนเร็ว 1 นาที และกวนช้า 10 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 96.06 และ 96.03 ตามลำดับ 2) การใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา ที่ความเข้มข้นของสาร PACI 10 มก./ล. ร่วมกับตะกอนประปา 6 ก./ล. โดยทำการกวนเร็ว 1 นาที และกวนช้า 15 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 93.43 และ 84.95 ตามลำดับ และ 3) การใช้ตะกอนประปา ที่ปริมาณ 15 ก./ล. โดยทำการกวนเร็ว 20 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 81.12 และ 80.47 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัด ค่าสารเคมีและการใช้ประโยชน์ของเสีย สรุปได้ว่าการใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปาเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ผลการวิจัยยังพบว่าการใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา สามารถบำบัดค่า COD ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) และฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ในน้ำเสียให้คุณภาพน้ำที่ผ่านค่ามาตรฐานของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553 ด้วย งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าตะกอนประปาสามารถนำกลับมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของตะกอนประปาและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนอีกด้วย

คำสำคัญ: น้ำเสียชุมชน ฟอสเฟต การสร้างและรวมตะกอนทางเคมี การตกตะกอนทางเคมี ตะกอนประปา

Abstract

Phosphate in municipal wastewater affects water quality and aquatic organisms. Therefore, wastewater must be treated before being discharged into water resources. The water treatment process of tap water production produces large amounts of water treatment sludge (WTS) containing polyaluminium chloride (PACl) used in the process. Therefore, this research studied on the removal of orthophosphate (OP) and turbidity from municipal wastewater by using PACl and WTS. Various factors such as PACl concentration, WTS dosage, reaction time and settling time were studied. The results showed that the optimum conditions were as follows: 1) OP and turbidity removal under the condition of PACl 30 mg/L by 1 min rapid mixing and 10 min slow mixing were 96.06% and 96.03%, respectively, 2) OP and turbidity removal by using PACl 10 mg/L and WTS 6 g/L with 1 min rapid mixing and 15 min slow mixing were 93.43% and 84.95%, respectively, and 3) OP and turbidity removal under the condition of WTS at 15 g/L by 20 min rapid mixing were 81.12% and 80.47% respectively. When considering the treatment efficiency, the chemical cost and the utilization of waste, it can be concluded that the use of PACl with WTS is the most appropriate condition. Moreover, this condition could be applied to treat COD, total suspended solids (TSS) and total phosphorus (TP) in wastewater to produce water that quality is conforming to the effluent standards by the Ministry of Natural Resources and Environment (2010). This research indicates that WTS can be recycled for municipal wastewater treatments increasing the value of WTS and to reducing sludge disposal costs.

Keywords: Municipal wastewater, Phosphate, Chemical coagulation and flocculation, Chemical precipitation, Water treatment sludge

บทนำ

น้ำเสียชุมชนเกิดจากกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ได้แก่ น้ำทิ้งจากการประกอบอาหาร น้ำทิ้งจากการชำระล้างสิ่งสกปรกในครัวเรือนและอาคารประเภทต่าง ๆ¹ ทำให้เกิดปัญหาการปนเปื้อนของฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำ ส่งผลให้วัชพืชน้ำหรือแพลงก์ตอนพืชเกิดการเจริญเติบโต

อย่างรวดเร็ว ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่ายูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากในหลายพื้นที่ของประเทศ² วิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการบำบัดฟอสเฟต ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี การใช้ตัวดูดซับ และการบำบัดด้วยวิธีทางชีวภาพ³ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย โดยเติมสารเคมีที่เป็นเกลือโลหะที่มีค่าประจุตรงข้าม

เพื่อจับกับฟอสเฟตที่ละลายน้ำแล้วทำให้เกิดการตกตะกอน (Chemical precipitation)⁴ เช่น สารส้ม สารพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride, PACI) สารเฟอร์ริคคลอไรด์

ตะกอนประปาเกิดจากขั้นตอนการสร้างและรวมตะกอน (Chemical coagulation and flocculation) ในกระบวนการผลิตน้ำประปา โดยมีการใช้สารเคมีต่าง ๆ เพื่อให้สารที่ปนเปื้อนในน้ำเกิดการจับตัวกันจนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย โรงงานผลิตน้ำบางเขนเกิดตะกอนประปาเฉลี่ย 350 ตันต่อวัน ซึ่งเป็นภาระในการนำไปกำจัด⁵ โดยพบว่าตะกอนประปามีธาตุอาหารพืชโดยทั่วไปอยู่ในระดับปานกลางถึงดี มีประจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูงซึ่งเป็นผลมาจากสารเคมีที่เติมลงในน้ำดิบเพื่อการตกตะกอน⁶ และองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนประปามีปริมาณของซิลิกาและอลูมิเนียมมากที่สุด ตามลำดับ⁷ ซึ่งจากสมบัติดังกล่าว จึงทำให้มีผู้ที่สนใจศึกษานำตะกอนประปามาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เช่น Wei et al.⁸ ซึ่งพบว่าตะกอนสามารถใช้ในการบำบัดฟอสฟอรัสได้ร้อยละ 98 และ Georgantas and Grigoropoulou⁹ ได้ศึกษานำบำบัดฟอสฟอรัสด้วยตะกอนประปา พบว่าตะกอนมีประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย อีกทั้งสามารถบำบัดความขุ่นและ COD ได้ และ Nair and Ahammed¹⁰ ได้ศึกษานำ PACI และตะกอนประปา มาใช้ในการบำบัด OP ได้ร้อยละ 87 อีกทั้งสามารถบำบัดของแข็งแขวนลอย BOD และ COD ได้ กลไกการบำบัดมลสารมี 2 กระบวนการ ได้แก่ 1) กระบวนการตกตะกอน ซึ่งเป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำ เพื่อทำปฏิกิริยากับสารที่ละลายน้ำ¹¹ เช่น OP

โดยทำการกวนเร็ว เพื่อให้เกิดเป็นตะกอนตกลงสู่ด้านล่างได้ และ 2) กระบวนการสร้างและรวมตะกอน ซึ่งมี 2 ขั้นตอน ขั้นแรกเป็นการเติมสารเคมีที่มีประจุบวก เพื่อทำปฏิกิริยากับประจุที่ผิวของสารแขวนลอยซึ่งก่อให้เกิดความขุ่น โดยทำการกวนเร็วด้วยเวลาสั้น และขั้นที่ 2 เป็นการกวนช้าในเวลานานกว่า เพื่อทำให้อนุภาคแขวนลอยรวมตัวกันและเกิดเป็นตะกอนที่มีลักษณะเป็นเมือกขุ่น (Floc) ตกตะกอนได้ง่ายขึ้น^{11,12} การกวนเร็วเพียงขั้นตอนเดียวทำให้เกิดกระบวนการบำบัดแบบการตกตะกอน แต่การกวนเร็วตามด้วยการกวนช้าทำให้เกิดกระบวนการบำบัดแบบการตกตะกอนร่วมกับการสร้างและรวมตะกอนด้วย¹¹

มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ก่อให้เกิดน้ำเสียชุมชนจากกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งปนเปื้อนด้วยมลสารต่าง ๆ เช่น สารอินทรีย์ของแข็งแขวนลอย และ OP ส่งผลให้แหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยและบริเวณใกล้เคียงเกิดการเน่าเสีย ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษานำสาร PACI และตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครนครปฐม ซึ่งตั้งอยู่ใกล้กับมหาวิทยาลัยมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัย โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นในน้ำเสียชุมชน ระหว่างการใช้สาร PACI ตะกอนประปา และสาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา รวมทั้งศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัด OP และความขุ่น ได้แก่ ความเข้มข้นของสาร PACI ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน เพื่อให้ได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัด จากนั้นจึงทำการศึกษานำบำบัดมลสารชนิดอื่น ๆ

ในน้ำเสียชุมชน ได้แก่ COD ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solid, TSS) และ ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus, TP) การนำตะกอนจากระบบการผลิตน้ำประปามาใช้ประโยชน์ในการบำบัดมลสารในน้ำเสีย เป็นการเพิ่มมูลค่าของตะกอนที่เหลือทิ้ง อีกทั้งยังลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนด้วย

วิธีการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

สารสร้างตะกอนที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ สาร PACI ความเข้มข้น 10% W/V ดัง Figure 1 (a) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากโรงผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม



Figure 1. Materials (a) 10% W/V Polyaluminium chloride (PACI) (b) Water treatment sludge

2. พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ OP ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Jasco รุ่น V530 ความขุ่นวัดด้วยเครื่องวัดความขุ่นยี่ห้อ HACH รุ่น 2100P, COD วิเคราะห์ด้วยวิธี Closed reflux, TSS วิเคราะห์โดยการกรองน้ำ

ตะกอนประปาที่ใช้ในการศึกษา เป็นตะกอนที่เก็บจากบ่อทิ้งตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม แสดงดัง Figure 1 (b) โรงผลิตน้ำประปาของเทศบาลนครนครปฐมมีการใช้สาร PACI เป็นสารสร้างและรวมตะกอนทางเคมีจึงทำให้ตะกอนประปายังคงมีสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนหลงเหลืออยู่

น้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการศึกษา เป็นน้ำเสียชุมชนที่เก็บมาจากบ่อสูบน้ำเสียรวมจากกลุ่มหอพักเพชรรัตน์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

ตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง GF/C แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C, และ TP วิเคราะห์โดยย่อน้ำตัวอย่างด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก และวิเคราะห์ด้วยวิธี Colorimetric โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Jasco รุ่น V530 ทุกพารามิเตอร์วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ APHA, AWWA, and WEF¹³

3. ศึกษาการบำบัดน้ำเสียด้วยสาร PACI และ ตะกอนประปา

3.1 ภาพรวมของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการบำบัด OP และความขุ่นในน้ำเสียชุมชน โดยการใช้สาร PACI และตะกอนประปา ซึ่งได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัด ได้แก่ ความเข้มข้นของสาร PACI ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียตัวอย่างนั้น ๆ ซึ่งจะมี pH อยู่ในช่วง 5.5 – 9.0 ตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งน้ำเสียชุมชน¹⁴ โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียชุมชนมาวิเคราะห์ค่า pH เริ่มต้น ค่าความเข้มข้นของ OP และค่าความขุ่น (ก่อนการบำบัด) จากนั้นการทดลองด้วย Jar Test เป็น 2 แบบ ได้แก่ 1) แบบกวนเร็วเพื่อศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอน และ 2) แบบกวนเร็วตามด้วยการกวนช้า เพื่อศึกษาการบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนร่วมกับกระบวนการสร้างและรวมตะกอน

วิธีการทดลองเริ่มจากการตวงน้ำเสียปริมาตร 500 มล. ใส่บีกเกอร์ ขนาด 1,000 มล.

เติมสาร PACI หรือตะกอนประปา (แบบเปียก) ตามปริมาณที่กำหนดในแต่ละการทดลอง นำบีกเกอร์วางในเครื่อง Jar Test จุ่มใบพัดลงในบีกเกอร์ โดยมีการกวนเร็ว ที่ 120 รอบต่อนาที และกวนช้า ที่ 30 รอบต่อนาที ซึ่งมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาตามที่กำหนด เมื่อครบระยะเวลา หยุดกวน ยกใบพัดขึ้น ปล่อยให้มีการตกตะกอนตามระยะเวลาในการตกตะกอนที่กำหนด นำน้ำที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความขุ่น จากนั้นนำน้ำที่เหลือมากรองด้วยกระดาษกรอง Whatman no.42 แล้วนำน้ำที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ OP (หลังบำบัด) เมื่อได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมแล้ว จึงนำไปทำการทดลองบำบัดพารามิเตอร์อื่น ๆ ได้แก่ COD, TSS และ TP จากนั้นทำการสรุปผลการวิจัย

3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่น

สภาวะการทดลองที่ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ในการบำบัดด้วยสาร PACI ตะกอนประปา และ สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา แสดงดัง Table 1 - 3 ตามลำดับ

Table 1. Experimental conditions of OP and turbidity removal by PACI

	PACI conc. (mg/L)	Time for Rapid Mixing at 120 rpm (min)	Time for Slow Mixing at 30 rpm (min)	Settling time (min)
Rapid mixing	5-120	5-30	-	10-35
Rapid and slow mixing	5-120	1	5-30	10-35

Table 2. Experimental conditions of OP and turbidity removal by water treatment sludge

	Sludge dosage (g/L)	Time for Rapid Mixing at 120 rpm (min)	Time for Slow Mixing at 30 rpm (min)	Settling time (min)
Rapid mixing	1.0-35.0	5-30	-	10-35
Rapid and slow mixing	1.0-35.0	1	5-30	10-35

Table 3. Experimental conditions of OP and turbidity removal by PACI and water treatment sludge

	PACI conc. (mg/L)	Sludge dosage (g/L)	Time for Rapid Mixing at 120 rpm (min)	Time for Slow Mixing at 30 rpm (min)	Settling time (min)
Rapid mixing	10-35	5.0-10.0	5-30	-	10-35
Rapid and slow mixing	5-30	2.0-13.0	1	5-30	10-35

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่างๆ

เมื่อได้สภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการศึกษาในข้อ 3.2 แล้วจึงนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารชนิดต่าง ๆ ได้แก่ COD TSS และ TP

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ลักษณะของตะกอนประปาและน้ำเสียชุมชนที่ใช้ในการวิจัย

ตะกอนประปาที่เก็บตัวอย่างมาจากบ่อทิ้งตะกอนของโรงผลิตน้ำประปาเทศบาลนครนครปฐม อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัดนครปฐม มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 7.5-8.4 และความเข้มข้นเฉลี่ยร้อยละ 91.92 สำหรับน้ำเสียชุมชนที่เก็บตัวอย่างมาจากบ่อสูบน้ำเสียรวมจากกลุ่มหอพักเพชรรัตน์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐมพบว่าลักษณะของน้ำเสียก่อนการบำบัดมีดังนี้ pH อยู่ในช่วง 7.3-7.9 ความขุ่นอยู่ในช่วง 15.6

- 58.1 NTU COD อยู่ในช่วง 45.33 – 48.00 มก./ล. TSS อยู่ใน ช่วง 6.67 – 7.33 มก./ล. OP อยู่ในช่วง 0.71 – 1.27 มก./ล. และ TP อยู่ในช่วง 3.17 – 6.29 มก./ล.

2. ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดออร์โธฟอสเฟตและความขุ่นด้วยสาร PACI

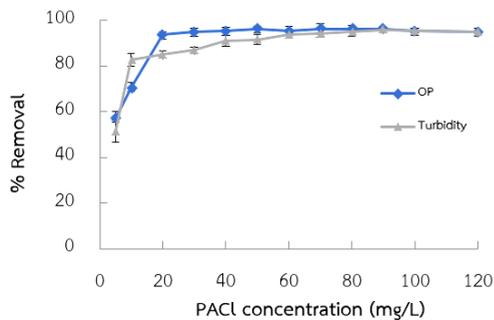
2.1 ผลของความเข้มข้นของสาร PACI

ผลของความเข้มข้นของสาร PACI ที่สภาวะการทดลองของน้ำเสียมี pH เริ่มต้น 7 เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และเวลาตกตะกอน 30 นาที สำหรับการกวนเร็ว พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสาร PACI เพิ่มขึ้นจาก 5 มก./ล. เป็น 40 มก./ล. สามารถบำบัด OP และความขุ่นได้เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 57.04 เป็นร้อยละ 95.19 และจากร้อยละ 51.28 เป็นร้อยละ 91.03 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้น 40-120 มก./ล. ปฏิกิริยาการบำบัดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าคงที่ ดัง Figure 2 (a) ดังนั้นจึงเลือกใช้ใช้ความเข้มข้นของสาร PACI ที่ 40 มก./ล. บำบัด OP และ

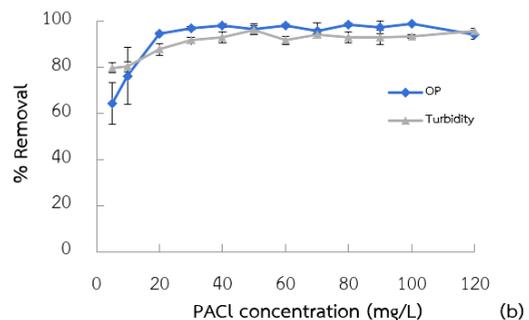
ความขุ่น ได้ร้อยละ 95.19 และร้อยละ 91.03 ตามลำดับ เพื่อทำการทดลองต่อไป และสำหรับการกวนเร็ว-กวนช้า พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสาร PACI เพิ่มขึ้นจาก 5 มก./ล. เป็น 30 มก./ล. สามารถบำบัด OP และความขุ่นได้เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 64.37 เป็นร้อยละ 96.93 และจากร้อยละ 79.69 เป็นร้อยละ 91.56 ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ชัดว่าที่ความเข้มข้น 30 – 120 มก./ล. ปฏิบัติการบำบัดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุล ประสิทธิภาพการบำบัดมีค่าคงที่ ดัง Figure 2 (b) ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของสาร PACI ที่ 30 มก./ล. บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 96.93 และร้อยละ 91.56 ตามลำดับ เพื่อทำการทดลองต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่น พบว่าวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า

มีการใช้สาร PACI ในปริมาณที่น้อยกว่าและยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าการบำบัดด้วยวิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการกวนเร็ว-กวนช้า ทำให้อนุภาคสัมผัสกันมากเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ เกิดเป็นตะกอนเมือกขุ่น สามารถกวาดอนุภาคขนาดเล็กที่แขวนลอยอยู่ด้านบน ทำให้ตกตะกอนลงสู่ด้านล่างได้มากขึ้น และจากผลการทดลองทั้ง 2 วิธี พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสาร PACI มากขึ้น จะสามารถบำบัด OP และความขุ่นได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Georgantas and Grigoropoulou⁹ ที่ทำการศึกษการบำบัด OP โดยใช้สารส้มและสารอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารที่ช่วยในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น



(a)



(b)

Figure 2. Effect of PACI concentration on OP and turbidity removal at pH 7. (a) Rapid mixing at 120 rpm, 30 min (b) Rapid mixing at 120 rpm, 1 min and Slow mixing at 30 rpm, 30 min

2.2 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาและเวลาตกตะกอน

สำหรับวิธีการกวนเร็ว ที่ความเข้มข้นของสาร PACI 40 มก./ล. และวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า ที่ความเข้มข้นของสาร PACI 30 มก./ล. มีประสิทธิภาพใน

การบำบัดสูง และไปในแนวทางเดียวกัน คือที่ระยะเวลา 5-30 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยทั้ง 2 วิธี เลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมเหมือนกัน คือ 10 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาตกตะกอนต่อไป

โดยวิธีกวนเร็ว บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 97.89 และร้อยละ 97.30 ตามลำดับ และวิธีกวนเร็ว-กวนช้า บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 96.59 และร้อยละ 94.94 ตามลำดับ สำหรับผลของเวลาตกตะกอนในช่วง 10 – 35 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการกวนทั้ง 2 วิธี มีเวลาตกตะกอนที่เหมาะสมเหมือนกัน คือ 15 นาที โดยวิธีกวนเร็ว บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 97.54 และร้อยละ 96.10 ตามลำดับ และวิธีกวนเร็ว-กวนช้า บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 96.06 และร้อยละ 96.03 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammed and Shanshool¹⁵ ที่ศึกษาการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งด้วยสารส้มและแคลเซียมคลอไรด์ ที่เวลาทำปฏิกิริยา 5-10 นาที พบว่าเวลาการทำปฏิกิริยาในช่วงแรก ความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากไอออนของฟอสเฟตและอลูมิเนียมสามารถสัมผัสกันมาก และเมื่อถึงจุดสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดฟอสเฟตจะลดลงหรือคงที่ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ebeling et al.¹⁶ ที่ศึกษาการบำบัดของแข็งและฟอสฟอรัสโดยใช้สารส้มและเพอร์ริกคลอไรด์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการตกตะกอนมากขึ้นทำให้อนุภาคสามารถตกลงสู่ด้านล่างได้มากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสเฟตจึงมีค่าน้อยลง แต่เมื่อถึง ณ เวลานั้น ความเข้มข้นฟอสเฟตจะเปลี่ยนแปลงที่ละน้อยจนคงที่

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด OP และความขุ่นด้วยตะกอนประปา

3.1 ผลของปริมาณตะกอนประปา

ที่สภาวะการทดลองของน้ำเสียมี pH เริ่มต้น 7 เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และเวลาตกตะกอน 30 นาที สำหรับการกวนเร็ว พบว่า เมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จาก 1 ก./ล. เป็น 35 ก./ล. ความสามารถในการบำบัด OP จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 26.51 เป็นร้อยละ 95.77 แต่การบำบัดความขุ่นจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนประปาจาก 1 ก./ล. เป็น 10 ก./ล. สามารถบำบัดความขุ่นได้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.66 เป็นร้อยละ 66.49 และที่ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จาก 12 ก./ล. เป็น 35 ก./ล. การบำบัดความขุ่นจะค่อย ๆ ลดลงดัง Figure 3 (a) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสมที่ 15 ก./ล. บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 81.53 และร้อยละ 65.76 ตามลำดับ สำหรับการทดลองต่อไป และสำหรับการกวนเร็ว-กวนช้า พบว่า เมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จาก 1 ก./ล. เป็น 35 ก./ล. ความสามารถในการบำบัด OP และความขุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.32 เป็นร้อยละ 91.87 และจากร้อยละ 26.84 เป็นร้อยละ 83.01 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณ 20 ก./ล. ถึง 35 ก./ล. ค่าการบำบัดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นดัง Figure 3 (b) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสมที่ 20 ก./ล. บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 81.30 และร้อยละ 74.24 ตามลำดับ สำหรับการทดลองต่อไป

จากผลการทดลองการกวนทั้ง 2 วิธี พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้นจะสามารถบำบัด OP ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรุ่งระวี มาจิต และคณะ⁶ ที่ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียชุมชนโดยใช้ตะกอนประปา พบว่าเมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น จะสามารถบำบัด

OP ได้มากขึ้น เพราะตะกอนประปามีความจุ แลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง เนื่องจากสาร อลูมิเนียมออกไซด์และซิลิกา สำหรับกรณีการกวน เร็ว เมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อการ บำบัดความขุ่น เนื่องจากตะกอนประปามี ลักษณะเป็นเลนละเอียดสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากของแข็ง

แขวนลอยที่กำจัดออกจากน้ำประปา ดัง Figure 1 (b) ดังนั้นเมื่อใช้ตะกอนประปาในปริมาณมาก ประกอบกับการกวนเร็ว จึงทำให้เลนสีน้ำตาลหลุด จากตะกอนออกมาปะปนกับน้ำเสียทำให้ความขุ่น ในน้ำเสียสูงขึ้น

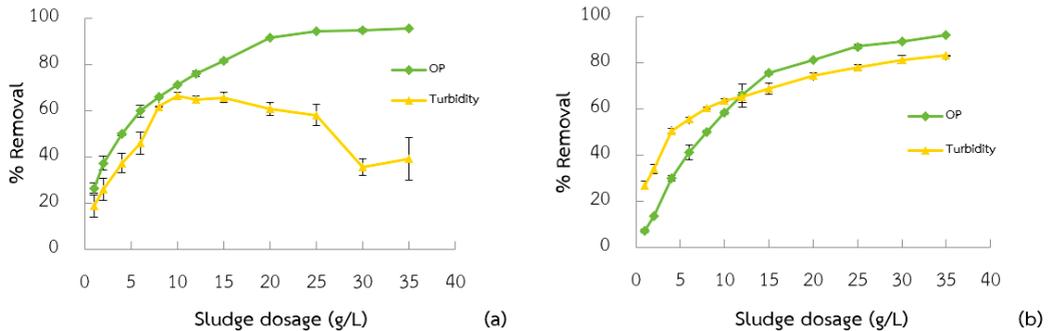


Figure 3. Effect of sludge dosage on OP and turbidity removal at pH 7. (a) Rapid mixing at 120 rpm, 30 min (b) Rapid mixing at 120 rpm, 1 min and Slow mixing at 30 rpm, 30 min

3.2 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาและเวลาดกตะกอน

สำหรับการกวนเร็ว ผลของเวลาทำปฏิกิริยา ที่ปริมาณตะกอนประปา 15.0 ก./ล. และกวนด้วยความเร็ว 120 rpm พบว่า การบำบัด OP และความขุ่นด้วยตะกอนประปามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาจาก 5 นาที เป็น 30 นาที โดยที่เวลา 5 – 15 นาที ความเข้มข้นของสารจะลดลงอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นเมื่อถึงจุดสมดุลจะเริ่มคงที่ ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 20 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาดกตะกอนต่อไป โดยบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 81.12 และร้อยละ 77.18 ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาดกตะกอน 10-35 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน จึงเลือกเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ

20 นาที บำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 81.12 และร้อยละ 80.47 ตามลำดับ

สำหรับการกวนเร็ว-กวนช้า ผลของเวลาทำปฏิกิริยาที่ปริมาณตะกอนประปา 20.0 ก./ล. และกวนด้วยความเร็ว 120 rpm เวลา 1 นาที และกวนช้า 30 rpm พบว่า การบำบัด OP ของตะกอนประปามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยาจาก 5 นาที เป็น 30 นาที และสามารถบำบัดความขุ่นได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 15 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาดกตะกอนต่อไป โดยบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 81.23 และร้อยละ 63.88 ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด ที่เวลาดกตะกอน 10 – 35 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน จึงเลือกเวลา

ตกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 นาที บำบัด OP และ ความขุ่น ได้ร้อยละ 79.55 และร้อยละ 60.30 ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าการบำบัด OP และความขุ่นด้วยตะกอนประปา โดยวิธีการ กวนเร็ว และวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า ที่เวลาทำ ปฏิบัติการและเวลาดตกตะกอนต่าง ๆ มีประสิทธิภาพ ในการบำบัดไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Maqbool et al.¹⁷ ซึ่งศึกษาการใช้กาก ตะกอนประปาในการบำบัดฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย เทศบาล พบว่าที่เวลาการทำปฏิบัติการในระยะแรก ความเข้มข้นของฟอสเฟตจะลดลงอย่างรวดเร็ว และ เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการ บำบัดฟอสเฟตจะเริ่มคงที่ และพบว่าการบำบัด OP และความขุ่นโดยวิธีการกวนเร็ว ที่เวลาทำปฏิบัติการ ต่าง ๆ มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากกว่าการใช้ วิธีการกวนเร็ว-กวนช้า

4. ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัด OP และความขุ่น ด้วยสาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา

4.1 ผลของความเข้มข้นของสาร PACI

สำหรับการกวนเร็ว ผลของความเข้มข้นของ สาร PACI ที่สภาวะการทดลองของน้ำเสียมี pH เริ่มต้น 7 ที่เวลาทำปฏิบัติการ 30 นาที และเวลา ตกตะกอน 30 นาที โดยใช้ปริมาณตะกอนประปา 15 ก./ล. ซึ่งได้มาจากผลการทดลองที่เหมาะสมของ วิธีการกวนเร็วในข้อ 3.1 พบว่า ความเข้มข้นของสาร PACI ที่ 10-30 มก./ล. ประสิทธิภาพการบำบัด OP มีค่าสูงถึงร้อยละ 91.45-96.87 และบำบัดความขุ่น ได้ร้อยละ 79.45-80.65 แต่การบำบัดความขุ่นมี แนวโน้มลดลงที่ 35 มก./ล. ดัง Figure 4 (a) ดังนั้น จึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ PACI ที่ 10 มก./ล.

บำบัด OP และความขุ่น ได้ร้อยละ 91.45 และ ร้อยละ 80.65 ตามลำดับ สำหรับการทดลองต่อไป

สำหรับการกวนเร็ว-กวนช้า ผลของความ เข้มข้นของสาร PACI ที่สภาวะการทดลองของน้ำ เสีย pH เริ่มต้น 7 ที่เวลาทำปฏิบัติการ 30 นาที และ เวลาดตกตะกอน 30 นาที โดยใช้ปริมาณตะกอน ประปา 20 ก./ล. ซึ่งได้มาจากผลการทดลอง ที่เหมาะสมของวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า ในข้อ 3.1 พบว่า ความเข้มข้นของสาร PACI 5-30 มก./ล. ประสิทธิภาพการบำบัด OP และความขุ่นมีค่าสูง และใกล้เคียงกัน คือร้อยละ 91.04-97.20 และ ร้อยละ 84.98-87.56 ตามลำดับ ดัง Figure 4 (b) ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ PACI ที่ 10 มก./ล. บำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 93.00 และ ร้อยละ 86.50 ตามลำดับ สำหรับการทดลองต่อไป

จากผลการทดลองการกวนทั้ง 2 วิธี พบว่า การบำบัด OP และความขุ่นด้วยสาร PACI ในปริมาณที่เท่ากัน โดยวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า สามารถบำบัดได้ดีกว่าวิธีการกวนเร็วเพียง อย่างเดียว เนื่องจากวิธีการกวนเร็ว-กวนช้าเกิดกลไก การบำบัดร่วมกันระหว่างการตกตะกอนร่วมกับการ สร้งและรวมตะกอน ขณะที่การกวนเร็วเกิดเพียง กลไกการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว และพบว่าการ ใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา ในการบำบัด OP และความขุ่น ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดมี ค่าสูง โดยที่มีการใช้สาร PACI ในปริมาณที่ลดลง มากเมื่อเทียบกับการทดลองใช้สาร PACI เพียง อย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nair and Ahammed¹⁰ ที่ศึกษาการใช้สาร PACI ร่วมกับ ตะกอนประปา ในการบำบัด OP ซึ่งมีประสิทธิภาพ ในการบำบัดร้อยละ 87

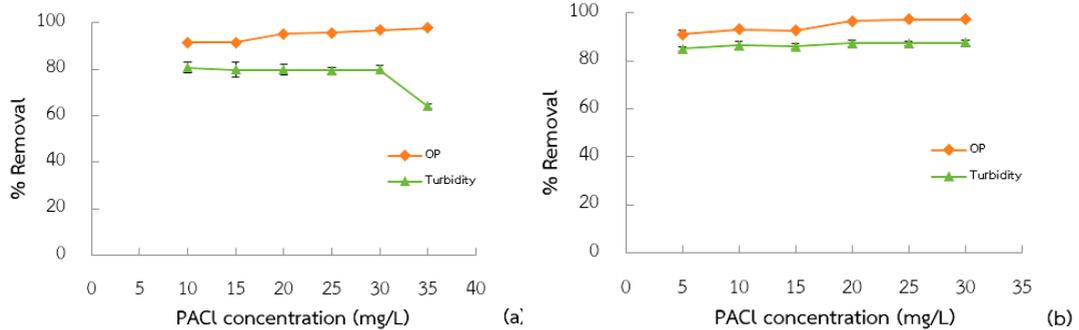


Figure 4. Effect of PACl concentration on OP and turbidity removal at pH 7. (a) sludge dosage 15 g/L, Rapid mixing at 120 rpm, 30 min (b) sludge dosage 20 g/L Rapid mixing at 120 rpm, 1 min and Slow mixing at 30 rpm, 30 min

4.2 ผลของปริมาณตะกอนประปา

การทดลองนี้ได้เลือกใช้ความเข้มข้นของ PACl 10 มก./ล. มาศึกษาผลของปริมาณตะกอนประปา ที่สภาวะการทดลองของน้ำเสียมี pH เริ่มต้น 7 ที่เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที และเวลาดตกตะกอน 30 นาที โดยใช้ 2 สภาวะการทดลอง คือ การกวนเร็ว และการกวนเร็วตามด้วยการกวนช้า

สำหรับการกวนเร็วพบว่าเมื่อปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการบำบัด OP และความขุ่นจะเพิ่มขึ้น ดัง Figure 5 (a) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสม คือ 7 ก./ล. ซึ่งบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 82.51 และร้อยละ 83.27 ตามลำดับ

สำหรับการกวนเร็ว-กวนช้าพบว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการบำบัด OP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเมื่อถึงจุดสมดุลจะเริ่มคงที่ และประสิทธิภาพการบำบัดความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกันดัง Figure 5 (b) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณตะกอนประปาที่เหมาะสม คือ 6 ก./ล.

ซึ่งสามารถบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 86.04 และร้อยละ 87.46 ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกอนประปาเพิ่มขึ้นจะสามารถบำบัด OP และความขุ่นได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nair and Ahammed¹⁰ ที่ทำการศึกษาการใช้กากตะกอนบำบัดฟอสเฟตในน้ำทิ้งจากถัง UASB ที่บำบัดน้ำเสียชุมชน พบว่าเมื่อใช้สาร PACl ร่วมกับตะกอนประปา จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด OP ได้มากขึ้น เนื่องจากความสามารถในการทำให้ประจุเป็นกลาง เมื่อเติมกากตะกอนในน้ำทิ้งแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของโลหะแล้วถูกไฮโดรไลซิสให้เป็นสารซึ่งมีประจุบวก แล้วทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตที่มีประจุลบ จึงทำให้เกิดการตกตะกอนได้ และจะเห็นได้ว่าการบำบัด OP และความขุ่น โดยวิธีการกวนเร็ว-กวนช้ามีประสิทธิภาพบำบัดได้ดีกว่าและใช้ตะกอนประปาในปริมาณที่น้อยกว่าวิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว

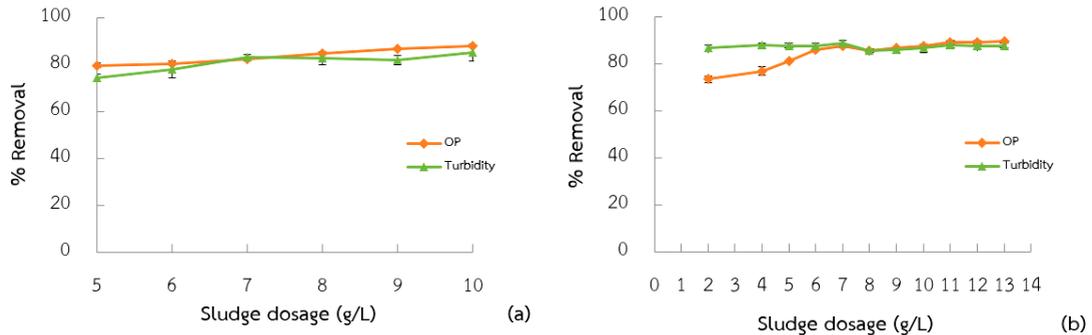


Figure 5. Effect of sludge dosage on OP and turbidity removal at pH 7. (a) PACl concentration 10 mg/L, Rapid mixing at 120 rpm, 30 min (b) PACl concentration 10 mg/L, Rapid mixing at 120 rpm, 1 min and Slow mixing at 30 rpm, 30 min

4.3 ผลของเวลาทำปฏิกิริยาและเวลาดกตะกอน

สำหรับการกวนเร็ว ผลของเวลาทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสาร PACl 10 มก./ล. ร่วมกับตะกอนประปา 7 ก./ล. และกวนด้วยความเร็ว 120 rpm พบว่า เมื่อเวลาทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 30 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด OP และความขุ่นเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 67.81 เป็นร้อยละ 80.88 และจากร้อยละ 55.20 เป็น 86.69 ตามลำดับ โดยในช่วงแรกของปฏิกิริยาที่เวลา 5 นาทีความสามารถในการบำบัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงจุดสมดุลจะเริ่มคงที่ จึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือเวลา 20 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาดกตะกอนต่อไป โดยสามารถบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 75.49 และร้อยละ 83.64 ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดที่เวลาดกตะกอน 10-35 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 นาที บำบัด OP

และความขุ่น ได้ร้อยละ 79.41 และร้อยละ 77.05 ตามลำดับ

สำหรับการกวนเร็ว-กวนช้า ผลของเวลาทำปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นของสาร PACl 10 มก./ล. ร่วมกับตะกอนประปา 6 ก./ล. กวนด้วยความเร็ว 120 rpm เวลา 1 นาที และกวนช้า 30 rpm พบว่าที่เวลาทำปฏิกิริยา 5-30 นาที ประสิทธิภาพการบำบัด OP และความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 90.14-94.37 และร้อยละ 78.20-89.45 ตามลำดับ จึงเลือกใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือเวลา 15 นาที เพื่อศึกษาผลของเวลาดกตะกอนต่อไป โดยสามารถบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 93.43 และร้อยละ 87.48 ตามลำดับ และพบว่าประสิทธิภาพการบำบัด ที่เวลาดกตะกอน 10-35 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีเวลาดกตะกอนที่เหมาะสมคือ 15 นาที บำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 93.43 และร้อยละ 84.95 ตามลำดับ

จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าการบำบัด OP และความขุ่นด้วยสาร PACl ร่วมกับตะกอน

ประปา ที่เวลาทำปฏิกิริยาและเวลาดตกตะกอนต่าง ๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดไปในแนวทางเดียวกัน คือ ในระยะแรกความเข้มข้นของสารจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วประสิทธิภาพในการบำบัดจะเริ่มคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammed and Shanshool¹⁵ และพบว่า การบำบัด OP และความขุ่นโดยวิธีการกวนเร็ว-กวนช้า ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่ามากกว่าการใช้วิธีการกวนเร็วเพียงอย่างเดียว

สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดออร์โทฟอสเฟตและความขุ่นในน้ำเสียชุมชนของ 3 การทดลอง แสดงดัง Table 4 ซึ่งสรุปได้ดังนี้

- 1) สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสาร PACI คือ การใช้สาร PACI 30 มก./ล. ที่เวลาทำปฏิกิริยา 10 นาที และเวลาดตกตะกอน 15 นาที โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ซึ่งอาศัยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จะเห็นได้ว่านอกจากบำบัด OP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังสามารถบำบัดความขุ่น

ได้ดีอีกด้วย 2) สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยตะกอนประปา คือ การใช้ปริมาณตะกอนประปา 15 ก./ล. ที่เวลาทำปฏิกิริยา 20 นาที และเวลาดตกตะกอน 20 นาที โดยวิธีการกวนเร็วอาศัยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และ 3) สภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยสาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา คือ การใช้สาร PACI 10 มก./ล. ร่วมกับตะกอนประปา 6 ก./ล. เวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที และเวลาดตกตะกอน 15 นาที โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ด้วยกระบวนการสร้างและรวมตะกอนทางเคมีร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี จากทั้ง 3 สภาวะการทดลองเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดรวมกับการใช้สารเคมี สรุปได้ว่า การใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปาเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่น เนื่องจากมีการใช้สาร PACI และปริมาณตะกอนประปาในปริมาณน้อยลง แต่ยังมีค่าประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นสูง ซึ่งจะเป็นการประหยัดค่าสารเคมีและค่าขนส่งตะกอนประปาด้วย

Table 4. The Optimum conditions for OP and turbidity removal

Materials	Method	PACI conc.	Sludge dosage	Reaction time	Settling time	Orthophosphate removal	Turbidity removal
PACI	Rapid mixing - slow mixing	30 mg/L	-	10 min	15 min	96.06%	96.03%
Sludge	Rapid mixing	-	15 g/L	20 min	20 min	81.12%	80.47%
PACI and sludge	Rapid mixing - Slow mixing	10 mg/L	6 g/L	15 min	15 min	93.43%	84.95%

5. ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสีย

ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด OP และความขุ่นด้วยสารเคมีต่าง ๆ ดัง Table 4 เมื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารชนิดต่าง ๆ ในน้ำเสีย พบว่า สามารถบำบัดค่า COD, TSS, OP และ TP ได้ดัง Table 5 มลสารต่าง ๆ ที่เหลืออยู่หลังการบำบัดเป็นไปตามค่ามาตรฐานของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553¹⁴ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nair

and Ahammed¹⁰ ที่ได้มีการศึกษาการใช้กากตะกอนในการบำบัดมลสารในน้ำทิ้งชุมชน ได้แก่ การบำบัด TSS, BOD และ COD ได้ร้อยละ 80, 67 และ 61 ตามลำดับ และงานวิจัยของ Guan et al.¹⁸ ที่ศึกษาการใช้ตะกอนประปาบำบัดมลสารในน้ำเสีย ได้แก่ การบำบัดของ TSS และ COD ได้ร้อยละ 20 และ 15 ตามลำดับ โดยตะกอนประปาที่ผ่านการบำบัดมลสารในน้ำเสียมาแล้วนั้น พบว่าปริมาณธาตุอาหารต่าง ๆ ในตะกอน มีปริมาณเพิ่มขึ้น สามารถนำไปใช้ในการเพาะปลูก ซึ่งจะทำให้ลดการใช้ปุ๋ยได้⁶

Table 5. Removal efficiencies of Pollutants

Parameter	Std.	PACI			Sludge			PACI and Sludge		
		before	after	% removal	before	after	% removal	before	after	% removal
COD (mg/L)	-	48.00	10.67	77.78	48.00	34.67	27.78	48.00	4.62	72.22
TSS (mg/L)	≤ 30	7.33	3.33	54.55	7.33	4.67	36.36	7.33	2.00	72.73
OP (mg/L)	-	1.27	0.05	96.06	0.83	0.16	81.12	0.71	0.05	93.43
TP (mg/L)	≤ 2	6.29	0.29	90.96	6.29	0.19	93.90	6.29	0.07	97.90

หมายเหตุ: ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ OP แตกต่างกัน เนื่องจากมีการวิเคราะห์ค่า OP เป็นพารามิเตอร์แรกเพื่อหาสภาวะ การทดลองที่เหมาะสมที่สุด จึงมีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาทำการทดลองหลายครั้งในช่วงเวลาต่างกัน

สรุปผลการวิจัย

ตะกอนประปาที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำประปามีธาตุอาหารพืชอยู่ในระดับปานกลางถึงสูง มีประจุแลกเปลี่ยนไอออนบวกสูง เป็นผลมาจากสารเคมีที่เติมลงในน้ำดิบเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำสาร PACI และตะกอนประปามาใช้ในการบำบัด OP และความขุ่นในน้ำเสียชุมชน โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการบำบัด OP และความขุ่น

ได้แก่ ความเข้มข้นของสาร PACI ปริมาณตะกอนประปา เวลาในการทำปฏิกิริยา และเวลาในการตกตะกอน ผลการทดลองพบว่าสภาวะการทดลองที่เหมาะสม 3 สภาวะ ได้แก่ 1) การใช้สาร PACI ที่ความเข้มข้น 30 มก./ล. โดยวิธีการกวนเร็วและกวนช้า ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 96.06 และ 96.03 ตามลำดับ รองลงมาคือ 2) การใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา ที่ความเข้มข้นของสาร PACI 10 มก./ล.

ร่วมกับตะกอนประปา 6 ก./ล. โดยวิธีการกวนเร็ว และกวนช้า ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นได้สูงถึงร้อยละ 93.43 และ 84.95 ตามลำดับ และ 3) การใช้ตะกอนประปาปริมาณ 15 ก./ล. โดยวิธีการกวนเร็ว มีประสิทธิภาพในการบำบัด OP และความขุ่นได้ร้อยละ 81.12 และ 80.47 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดร่วมกับการใช้สารเคมี สรุปได้ว่าการใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปาเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

นอกจากการบำบัด OP และความขุ่นแล้ว ผลการวิจัยยังพบว่าการใช้สาร PACI ร่วมกับตะกอนประปา สามารถบำบัดค่า COD TSS และ TP ในน้ำเสียได้ตามค่ามาตรฐานของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553 ด้วย งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าตะกอนประปาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าของตะกอนประปา และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ตามสัญญาเลขที่ SRIF-JRG-2564-29 ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณครอบครัว ที่ได้สนับสนุนและคอยให้กำลังใจ จนทำให้การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน. [อินเทอร์เน็ต]. 2560. [เข้าถึงเมื่อ 3 ก.ย. 2564] เข้าถึงได้จาก: <http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER3/DRAWER056/GENERAL/00000973.PDF>
2. นรุตตม์ สหนาวิน, จิรวรรณ ตอฤทธิ. ปรากฎการณ์ยูโทรฟิเคชัน EUTROPHICATION. วารสารคณะพลศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2555;15:154-9.
3. วสันต์ ธีระพิทยานนท์. ผลกระทบของฟอสฟอรัสต่อสิ่งแวดล้อม. [อินเทอร์เน็ต]. 2556. [เข้าถึงเมื่อ 3 ก.ย. 2564] เข้าถึงได้จาก: <http://www.dss.go.th/images/st-article/pep-12-2556-impact-envi.pdf>.
4. เสาวภา ยอดสูงเนิน. การนำกลับฟอสเฟตโดยใช้โครมาโทกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออนและการตกตะกอนทางเคมี. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2553.
5. พิมพ์ปี จันทร์ประเสริฐ. การศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังอัดของตะกอนดินประปา-แฉ่ำลอยจีโอโพลีเมอร์. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2556.
6. รุ่งระวี มาจิต, คณิดา ตังคณานุรักษ์, วัชรพงษ์ วาระรัมย์. ศักยภาพของตะกอนดินจากการผลิตน้ำประปาในการบำบัดน้ำเสียชุมชน. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2560;3:45-56.



7. ดวงกมล สุริยจักร, ภาสสันต์ วิชิตอมรพันธ์, วรวรรษะ เรืองสำเร็จ. การประยุกต์ใช้ตะกอนดินจากน้ำประปา. กรุงเทพฯ: สำนักอุตสาหกรรมพื้นฐาน กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่; 2547. รายงานวิชาการ สอพ. 16/2547.
8. Wei X, Viadero RC, Bhojappa S. Phosphorus removal by acid mine drainage sludge from secondary effluents of municipal wastewater treatment plants. *Water res* 2008;42:3275-84.
9. Georgantas DA, Grigoropoulou HP. Orthophosphate and metaphosphate ion removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide. *J Colloid Interface Sci* 2007;1:70-9.
10. Nair AT, Ahammed MM. Water treatment sludge for phosphate removal from the effluent of UASB reactor treating municipal wastewater. *Process Saf Environ Prot* 2015;94:105-12.
11. มัลลิกา ปัญญาคะโป. การบำบัดน้ำและน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 2. นครปฐม: คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2561.
12. ธมลวรรณ ชูประจง. การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปาล้อมกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นสารช่วยสร้างตะกอนและลดการใช้ปริมาณสารส้ม. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2555.
13. APHA, AWWA, and WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd ed. Washington DC: American Public Health Association; 2012.
14. ศูนย์ช่วยเหลือให้ปฏิบัติตามกฎหมายสิ่งแวดล้อม. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากระบบน้ำเสียรวมของชุมชน. [อินเทอร์เน็ต]. 2565. [เข้าถึงเมื่อ 4 เม.ย. 2565]. เข้าถึงได้จาก: <http://cac.pcd.go.th/index.php/ourservices/knowledgebased-law/2017-08-08-03-37-21/268-2535-43>
15. Mohammed SAM, Shanshool HA. Phosphorus removal from water and waste water by chemical precipitation using alum and calcium chloride. *Iraqi J Chem Pet Eng* 2009;10:35-42.
16. Ebeling JM, Sibrell PL, Ogden SR, Summerfelt ST. Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. *Aquac Eng* 2003;29:23-42.
17. Maqbool N, Khan Z, Asghar A. Reuse of alum sludge for phosphorus removal from municipal wastewater. *Desalin Water Treat* 2016;57:13246-54.
18. Guan XH, Chen GH, Shang C. Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage. *Water Res* 2005;39:3433-40.

ผลของแป้งจากข้าวหอมนิลไม่แห้ง ไม่เปียก และเอ็กซ์ทรูดต่อคุณภาพของบราวนี่ปราศจากกลูเตน

Effect of Dry-Milled, Wet-Milled, and Extruded Hom-Nin Rice Flours on the Quality of Gluten-Free Brownies

กัญจิกา แสงสายัณห์¹, ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์², สุพัชชา ชักกล่อมสง¹ และ ศรชัย สิ้นสุวรรณ^{1*}

Kantika Sangsayunh¹, Parisut Chalermchaiwat², Supatcha Kubglomsong¹ and Sornchai Sinuwan^{1*}

¹ สาขาวิชามนุษยนิเวศศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120

² สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

¹School of Human Ecology, Sukhothai Thammathirat Open University, Nonthaburi 11120

² Food and Nutrition Program, Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

*Corresponding author; E-mail: sornchai.sin@stou.ac.th

Received: 15 July 2022 /Revised: 22 October 2022 /Accepted: 03 September 2022

บทคัดย่อ

วิธีการเตรียมแป้งจากข้าวมีความสำคัญอย่างมากต่อการผลิตเบเกอรี่ งานวิจัยนี้ได้เตรียมแป้งจากข้าวหอมนิลด้วยวิธีการไม่แห้ง ไม่เปียก และเอ็กซ์ทรูดขึ้นเพื่อศึกษาผลต่อคุณภาพของบราวนี่ปราศจากกลูเตน ผลการวิจัยพบว่าวิธีการเตรียมแป้งที่แตกต่างกันมีผลต่อสีของผิวหน้า สีของเนื้อ ปริมาตรจำเพาะ คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสและลักษณะทางประสาทสัมผัสของบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิล การตรวจวัดค่าสีพบว่าสีของผิวน้ำบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลไม่เปียกมีค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลไม่แห้งและเอ็กซ์ทรูด ($p \leq 0.05$) ขณะที่สีของเนื้อบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลไม่แห้งมีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มากกว่าบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลที่เตรียมด้วยวิธีอื่น ($p \leq 0.05$) บราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลไม่แห้งมีปริมาตรจำเพาะสูงเมื่อเทียบกับบราวนี่จากแป้งหอมนิลที่เตรียมด้วยวิธีอื่น ($p \leq 0.05$) คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง ความยืดหยุ่น ความสามารถเกาะรวมตัวกัน ความเหนียวเป็นยางหรือการความทนต่อการเคี้ยว) ระหว่างบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลไม่เปียกและบราวนี่จากแป้งสาลี (ตัวอย่างควบคุม) ไม่มี ความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) การประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสพบว่า รสชาติ เนื้อสัมผัส ความชอบโดยรวมของบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลไม่เปียกได้คะแนนใกล้เคียงกับบราวนี่จากแป้งสาลี ($p > 0.05$) คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ตรวจวัดด้วยจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และปริมาณยีสต์และราพบว่าตัวอย่างทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) 459/2555

คำสำคัญ: บราวนี่ปราศจากกลูเตน แป้งข้าวหอมนิล ไม่แห้ง ไม่เปียก เอ็กซ์ทรูด



Abstract

The preparation methods of rice flours are very important for making bakeries. Hom-nin rice flour was prepared by dry-milling, wet-milling, and extrusion methods to determine the effect on the quality of gluten-free brownies. The result showed that different flour preparation methods significantly affected the crust color, crumb color, specific volume, texture properties, and sensory attributes of Hom-nin rice flour brownies. Color measurements revealed that the crust color of the wet-milled Hom-nin rice flour brownie exhibited a higher a^* value and b^* value, compared to those prepared from dry-milled and extruded flours ($p \leq 0.05$), while the crumb color of the brownies made from dry-milled rice flour showed higher L^* value and b^* value than that of the others ($p \leq 0.05$). Brownies made from dry-milled Hom-nin rice flour showed a greater specific volume than those made with the other flours ($p \leq 0.05$). Texture properties (hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness) between brownies made from wet-milled Hom-nin rice and wheat flours (control) were not significantly different ($p > 0.05$). Sensory evaluation showed that taste, texture, and overall acceptance of brownies made from wet-milled Hom-nin rice flour were similar to the wheat flour brownie ($p > 0.05$). The microbial quality determined by aerobic plate count and yeast and mold count in all samples complied with Thai Community Product Standard (TCPS) 459/2555.

Keywords: Gluten-free brownie, Hom-nin rice flour, Dry-milling, Wet-milling, Extrusion

บทนำ

บราวนี่ (brownies) เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคทุกวัย นิยมบริโภคเป็นอาหารว่างหรือรับประทานร่วมกับเครื่องดื่มชนิดต่าง ๆ เช่น กาแฟ น้ำชา นมสด เป็นต้น เนื้อสัมผัสของบราวนี่มีลักษณะคล้ายเค้ก และ คุกกี้ ขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต อาจมีลักษณะเนื้อแน่นหนึบหรืออ่อนนุ่มก็ได้ ขึ้นอยู่กับประเภทของบราวนี่ซึ่งมีหลากหลายชนิด เช่น ฟัดจ์บราวนี่ (Fudgy brownies) บราวนี่เค้ก (Cakey brownies) ชิววีบราวนี่ (Chewy brownies) และบราวนี่กรอบ (Cracker brownies) เป็นต้น

แป้งที่ใช้ในการผลิตบราวนี่คือ แป้งจากข้าวสาลี ซึ่งมีโปรตีนกลูเตน (Gluten) ที่ทำหน้าที่ช่วยให้บราวนี่ขึ้นฟูและมีเนื้อสัมผัสนุ่ม แม้ว่าโปรตีนกลูเตนจะมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่สำคัญ^{1,2} แต่ในผู้บริโภคบางกลุ่มพบว่า โปรตีนกลูเตนเป็นสาเหตุของอาการแพ้ได้หรือเรียกว่า โรคซีลีแอค (Celiac disease) โดยโปรตีนกลูเตนมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันตอบสนองทำให้ระบบภูมิคุ้มกันทำลายผนังลำไส้ เป็นผลทำให้ลำไส้ไม่สามารถดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ ได้ จึงมีผลต่อระบบขับถ่าย เช่น ปวดท้อง ท้องร่วง ท้องอืด เป็นต้น

หากพบอาการแพ้ในเด็กอาจมีผลต่อพัฒนาการของเด็กได้

แป้ง (Flour) เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการประกอบอาหารและขนมชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอาหารจานหลัก ขนมไทย ขนมนานาชาติ แป้งสามารถผลิตได้จากธัญชาติและพืชหัวหลากหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า มันสำปะหลัง และมันฝรั่ง เป็นต้น แป้งมีประโยชน์ต่ออาหารและขนม เช่น การเพิ่มความหนืด การพองตัว การเกิดเจล และการให้คุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสของอาหาร โดยส่วนมากแป้งนิยมนผลิตจากข้าวหรือธัญชาติที่มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนสูง โดยเฉพาะแป้งจากข้าวสาลี เป็นที่นิยมมากที่สุดในการนำมาใช้ จะเห็นได้ว่าในปี ค.ศ. 2020-2021 ข้าวสาลีมีปริมาณการผลิตทั่วโลก 775.8 ล้านตัน นับเป็นเมล็ดธัญพืชที่มีปริมาณการผลิตสูงรองจากข้าวโพดที่มีปริมาณการผลิตทั่วโลก 1,125 ล้านตัน³ และพบว่าข้าวสาลีมีโปรตีนกลูเตนสูง ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีคุณสมบัติที่มีประโยชน์มากในการนำมาประกอบอาหารหรือขนมทำให้ขนมขึ้นฟู เนื้อสัมผัสนุ่ม แต่เนื่องจากอาการแพ้โปรตีนกลูเตนในผู้บริโภคบางกลุ่ม ในปัจจุบันจึงมีการศึกษาวิจัยการใช้แป้งจากธัญชาติชนิดต่าง ๆ เพื่อทดแทนการใช้แป้งข้าวสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ขนมปังแผ่นขาวนุ่ม⁴ คุกกี้⁵ แครกเกอร์⁶ เค้กกล้วยหอม⁷ มัฟฟิน⁸ บัตเตอร์เค้ก⁹ เค้ก¹⁰ ขนมปังหวาน¹¹ ขนมไข่¹² และบราวนี่ และเนื่องจากในประเทศไทยสามารถปลูกข้าวได้หลากหลายสายพันธุ์ ซึ่งข้าวแต่ละสายพันธุ์มีลักษณะทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และคุณค่าทางโภชนาการที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาแป้งจากข้าวหอมชนิดยังไม่มากนัก ดังนั้นแป้งจากข้าวหอมชนิดจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจและจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคที่มีอาการแพ้กลูเตนได้

ข้าวหอมชนิด (*Oryza sativa*) เป็นข้าวไม่ขัดสี เมล็ดสีม่วงเข้มจนถึงสีดำ มีเส้นใยอาหารสูง เป็นพันธุ์ข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index : GI) ต่ำตามรายงานใน International tables of glycemic index and glycemic load values 2021 พบว่า rice porridge, made from black rice มีค่าเท่ากับ 42 ± 3 นอกจากนี้ยังช่วยลดการดูดซึมคาร์โบไฮเดรตโดยการยับยั้งเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารที่เปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเป็นน้ำตาล¹³ จึงเหมาะสำหรับผู้ที่เป็โรคเบาหวานหรือต้องการควบคุมน้ำหนัก การนำข้าวหอมชนิดมาแปรรูปเป็นแป้งข้าวหอมชนิดเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารจึงช่วยเพิ่มคุณค่าต่อสุขภาพและมูลค่า ทั้งเป็นทางเลือกในการบริโภคให้กับข้าวหอมชนิด นอกเหนือจากการบริโภคเป็นข้าวสวยเพื่อรับประทานในมื้ออาหารเท่านั้น

วิธีการเตรียมแป้งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมีผลต่อคุณสมบัติเคมี-กายภาพของแป้ง วิธีการเตรียมแป้งที่นิยมกัน คือ การไม่แห้ง (Dry milling) และการไม่เปียก (Wet milling) การไม่แห้งแบบแห้งเป็นการนำเมล็ดข้าวมาบดเป็นแป้งผง จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงร่อน แป้งที่ได้จะยังเต็มไปด้วยไขมันหรือเรียกว่า full-fat flour¹⁴ ในประเทศไทยพบแป้งข้าวที่เตรียมจากการไม่แห้งแบบแห้ง คือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว ส่วนการไม่เปียกเป็นการนำเมล็ดข้าวเข้าเครื่องโม่ข้าวหรือโม่หิน ทับน้ำเพื่อแยกตัวแป้งและน้ำออกจากกัน อบแห้ง บดละเอียดและนำมาร่อนผ่านตะแกรงร่อน¹⁵ นอกจากนั้นพบว่า

ยังมีวิธีการเตรียมแป้งด้วยวิธีการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง มีความรวดเร็ว ต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพสูง ได้แป้งที่มีคุณสมบัติแตกต่างจากการไม่แห้งและไม่เปียก¹⁶ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณภาพของบรวนนี่ที่ผลิตจากแป้งข้าวหอมชนิดที่เตรียมด้วยวิธีไม่แห้ง ไม่เปียก และเอ็กซ์ทรูชัน

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมแป้งจากข้าวหอมชนิด

ข้าวหอมชนิด จากแหล่งเพาะปลูกในจังหวัดเพชรบุรี และเก็บเกี่ยวในฤดูกาล ปี 2561 ทำการเตรียมเป็นแป้งด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้ 1) การไม่แห้ง ดัดแปลงจากวิธีการของวชิรพงศ์ เขียวฤทธิกร และคณะ¹⁵ นำเมล็ดข้าวหอมชนิดบดด้วยเครื่องบด และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช (Mesh) นำส่วนที่ผ่านตะแกรงร่อนใช้เป็นแป้งข้าวหอมชนิดแบบไม่แห้ง (ในที่นี้ใช้คำว่า DMF แทน แป้งข้าวหอมชนิดแบบไม่แห้ง) 2) การไม่เปียก ดัดแปลงจากวิธีการของวชิรพงศ์ เขียวฤทธิกร และคณะ¹⁵ นำเมล็ดข้าวหอมชนิดแช่น้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราส่วนเมล็ดข้าวต่อน้ำ 1 : 1.5 จากนั้นผ่านเครื่องโม่หิน โดยนำน้ำแป้งที่ได้จากการโม่ห่อด้วยผ้าขาวบางหนา 3 ชั้น มัดให้แน่นไม่มีส่วนที่แป้งจะสามารถไหลออกมาได้ จากนั้นนำครกหิน ทับไว้ด้านบนเพื่อรีดน้ำออกจากตัวแป้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30-45 นาที หรือจนกว่าจะไม่มีส่วนน้ำไหลออกมาจากเนื้อแป้งข้าว นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดและนำผงแป้งที่ได้ร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช นำส่วนที่ผ่าน

ตะแกรงร่อนใช้เป็นแป้งข้าวหอมชนิดแบบไม่เปียก (ในที่นี้ใช้คำว่า WMF แทน แป้งข้าวหอมชนิดแบบไม่เปียก) และ 3) เอ็กซ์ทรูชัน ดัดแปลงจากวิธีการของ Diez-Sancheza et al.¹⁷ โดยนำเมล็ดข้าวที่มีความชื้นน้อยกว่า 14% เข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) (รุ่น LT70 L Twin Screw Extruder, Shandong Light M&E Co., Ltd, China) โดยอุณหภูมิที่ใช้ใน 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนนำเข้า (Feed section) ส่วนกดอัด (Transition section) และส่วนอัดรีด (Metering section) อุณหภูมิที่ใช้ คือ 60, 110 และ 125 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วของส่วนป้อน (Feeder speed) และความเร็วใบตัด (Cutter speed) คือ 15 และ 40 รอบต่อนาที ตามลำดับ นำส่วนที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ไปบดด้วยเครื่องบด และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช ส่วนที่ผ่านตะแกรงร่อนใช้เป็นแป้งข้าวหอมชนิดแบบเอ็กซ์ทรูชัน (ในที่นี้ใช้คำว่า EF แทน แป้งข้าวหอมชนิดแบบเอ็กซ์ทรูชัน) นำแป้งข้าวหอมชนิดที่เตรียมจากทั้งสามวิธีบรรจุในถุงซิปลอสมิเนียมฟอยล์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการผลิตบรวนนี่ต่อไป

2. การเตรียมและคัดเลือกบรวนนี่สูตรพื้นฐาน

นำส่วนผสมที่เป็นสูตรพื้นฐานจำนวน 3 สูตร (F1, F2 และ F3) (Table 1) เตรียมเป็นบรวนนี่โดยนำเนยจืด ช็อกโกแลตแท่ง และผงโกโก้ หลอมละลายในหม้อสองใบที่วางซ้อนกัน (Double boiler) ที่หม้อด้านบนมีน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส กวนผสมให้เข้ากัน ยกเว้นสูตร F1 ที่ละลายเฉพาะเนยจืด น้ำตาลทรายขาวและเกลือแกงเข้าด้วยกันก่อน จากนั้นเติมส่วนผสมที่เหลือยกเว้น

แป้งสาลี ได้แก่ ผงโกโก้ ไข่ไก่ (ไข่แดงและไข่ขาวที่ผสมกันแล้ว) น้ำตาลทรายขาว เกลือแกง และกลิ่นวานิลลา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่เหลือที่ยังไม่ได้ใช้ในแต่ละสูตร ตีให้เข้ากันด้วยตะกร้อมือ จากนั้นเติมแป้งสาลีที่ร่อนแล้ว ผสมให้เข้ากัน เทส่วนผสมลงถาดขนาด 25 x 25 เซนติเมตร นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที, 170 องศาเซลเซียส นาน 35 นาที และ 175 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที สำหรับสูตร F1 F2 และ F3 ตามลำดับ

นำบราวนี่สูตร F1 F2 และ F3 ประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธี 9-point hedonic scale เพื่อประเมินคุณลักษณะด้าน

ลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และ ความชอบโดยรวม กำหนดให้คะแนนเท่ากับ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด จนถึงคะแนนเท่ากับ 9 หมายถึง ชอบมากที่สุด ทดสอบกับผู้ทดสอบที่มีอายุระหว่าง 18-45 ปีและไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน โดยการสุ่มแบบบังเอิญ ณ ศูนย์ประเมินกลางชุมชนในสถานศึกษาพื้นที่กรุงเทพมหานคร ให้ผู้ทดสอบดื่มน้ำหรือบ้วนปากทุกครั้งก่อนการทดสอบตัวอย่างต่อไป จากนั้นเลือกสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบสูงที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาสูตรบราวนี่ด้วยแป้งจากข้าวหอมนิล โดยการนำแป้งข้าวหอมนิลที่ผ่านกระบวนการเตรียมที่แตกต่างกันมาทดแทนในสูตรร้อยละ 100

Table 1. Basic Recipes for Brownie Production

Ingredients (% w/w)	F1 ¹⁸	F2 ¹⁹	F3*
All-purpose wheat flour	11	15	6
Unsalted butter	22	17	27
Sugar	38	32	26
Fresh whole egg	18	16	18
Cocoa powder	10	-	7
Chocolate bar	-	20	15
Salt	0.4	-	0.5
Vanilla flavor	0.6	-	0.5

* สูตร F3 ได้จากการสำรวจร้านเบเกอรี่ที่ได้รับความนิยมแห่งหนึ่งในตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี

3. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัสของบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิล

3.1 ค่าสี ดัดแปลงจากวิธีการของศรีนวล จันทไทย และคณะ²⁰ นำชิ้นบราวนี่ขนาด 6 x 6

เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น สุ่มวัดค่าสีที่ผิวด้านนอก (Crush color) และค่าสีเนื้อใน (Crumb color) ของชิ้นบราวนี่ จำนวน 3 จุดต่อชิ้น ด้วยการวัดค่าสีในระบบ CIELAB color scale (L*, a* และ b*) ด้วยเครื่องวัดสี (Color Flex 4 5 1 0, HunterLab

ColorFlex, Hunter Associates Laboratory, Inc., Virginia, USA) รายงานค่าสีเป็นค่าเฉลี่ยของค่า L* (ค่าความสว่าง) a* (-a* = ค่าความเป็นสีเขียว และ +a* = ค่าความเป็นสีแดง) และ b* (-b* = ค่าความเป็นสีน้ำเงิน และ +b* = ค่าความเป็นสีเหลือง)

3.2 การวัดค่าวอเตอร์แอกทิวิตี้ (a_w)
ดัดแปลงจากวิธีการของ Sandulachi et al.²¹ โดยใช้เครื่องวัดวอเตอร์แอกทิวิตี้ (Water activity meter) (4 TE, AQUA LAB, meter group, USA) โดยนำตัวอย่างบรรจุลงในถ้วยวิเคราะห์และวัดค่าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3.3 ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume)
ดัดแปลงจากวิธีการของ Feili et al.²² นำชิ้นบราวน์ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร ทำการชั่งน้ำหนักแล้วนำไปกระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นเติมเมล็ดงาจนถึงขีดบอกปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำเมล็ดงาที่ใช้ชั่งและวัดปริมาตรของเมล็ดงาอีกครั้ง คำนวณปริมาตรจำเพาะดังสมการ ปริมาตรจำเพาะของบราวน์ (ml/g) = (ปริมาตรของกระบอกตวง (มิลลิลิตร) - ปริมาตรเมล็ดงาที่เติมในบราวน์ (มิลลิลิตร)) / น้ำหนักของบราวน์ (กรัม)

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) และค่าพลังงาน (Caloric value) การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (Moisture content) ปริมาณเถ้า (Ash content) ปริมาณไขมัน (Fat content) ปริมาณโปรตีน (protein content) ตามวิธีการของ AOAC²³ โดยใช้แฟกเตอร์เท่ากับ 5.95 (ข้าวเจ้าและผลิตภัณฑ์) ปริมาณใยอาหารหยาบ (Crude fiber content) ตามวิธีการ AACC²⁴ ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด (Total carbohydrate content) ตามวิธีการของ AOAC²⁵ และค่าพลังงาน

ใช้วิธีการคำนวณและรายงานค่าเป็นกิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม โดยนำปริมาณโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต (ไม่รวมใยอาหารหยาบ) คูณด้วยค่าแฟกเตอร์ 4, 9, และ 4 ตามลำดับ

3.5 คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (TA XT plus, Stable Micro System Ltd., United Kingdom) ที่อุณหภูมิห้อง ประกอบด้วยค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความยืดหยุ่น (springiness) ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ค่าความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess) และค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) โดยวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) เป็นการกดหัวลงบนตัวอย่าง 2 ครั้ง (เป็นการเลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์) หัววัด P35 ทรงกระบอก หน้าตัดรูปวงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร และกดลงขึ้นบราวน์ที่มีขนาด 3 x 3 เซนติเมตร ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความลึก 0.5-10 มิลลิเมตร หรือไม่เกิน 50% ของความสูงขึ้นบราวน์ ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสเชื่อมต่อกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Texture Expert® for Windows® v.1.11 จากนั้นเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล

3.6 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Aerobic plate count) และปริมาณยีสต์และเชื้อรา (Yeast and mold count) ตามวิธีการของ FDA BAM²⁶ และ AOAC²⁷ตามลำดับ

3.7 คุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้วยวิธีตามที่ระบุในข้อ 2. ด้วยวิธี 9-point hedonic scale เพื่อประเมินคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

โดยทดสอบกับผู้ทดสอบที่มีอายุระหว่าง 18-45 ปี และไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 100 คน โดยการสุ่มแบบบังเอิญ ณ ศูนย์ประเมินกลางชุมชนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ประกอบด้วยสถานศึกษาและสถานที่ทำงาน

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ยกเว้นการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Completely Block Design: RCBD) แสดงข้อมูลในรูปแบบของค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance: ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

95 และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรในการทดลองโดยใช้ Duncan's new multiple range test (DMRT) ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติ Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) version 17

ผลการวิจัย

1. การคัดเลือกสูตรบราวนี่พื้นฐาน

สูตรบราวนี่พื้นฐานจำนวน 3 สูตรได้นำมาทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale เพื่อคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมบราวนี่จากแป้งข้าวหอมนิลต่อไป พบว่าบราวนี่ที่เตรียมจากสูตร F3 ได้รับคะแนนสูงสุดทั้งลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ($p \leq 0.05$) (Table 2)

Table 2. Sensory scores of brownie prepared from basic recipes

Sample	F1	F2	F3
Appearance	6.56 \pm 1.73 ^b	5.64 \pm 1.82 ^c	7.38 \pm 1.35 ^a
Color	6.52 \pm 1.72 ^b	5.50 \pm 1.58 ^c	7.58 \pm 0.95 ^a
Flavor	6.38 \pm 1.96 ^b	6.16 \pm 1.82 ^b	7.58 \pm 1.23 ^a
Taste	6.38 \pm 2.00 ^b	5.42 \pm 2.07 ^c	7.22 \pm 1.43 ^a
Texture	6.04 \pm 1.90 ^b	5.24 \pm 2.05 ^c	7.20 \pm 1.63 ^a
Overall acceptance	5.74 \pm 1.69 ^b	5.44 \pm 1.95 ^b	7.72 \pm 1.03 ^a

Means within the same row bearing the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

2. องค์ประกอบทางเคมี

บราวนี่จากแป้งสาลีมีค่าความชื้นต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) ค่าเถ้าของบราวนี่ที่เตรียมจากแป้งสาลีและแป้งข้าวหอมนิลมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.56-1.80 ค่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 53-56 ปริมาณไขมันทั้งหมดของบราวนี่ทั้ง

จากแป้งสาลีและแป้งข้าวหอมนิลมีค่าใกล้เคียงกัน อยู่ระหว่างร้อยละ 34-38 ส่วนปริมาณโปรตีนทั้งหมดพบว่าบราวนี่จาก EF และ WMF มีค่าสูงกว่าบราวนี่จากแป้งสาลีและ DMF ($p \leq 0.05$) ส่วนใยอาหารหยาบพบว่าบราวนี่จากแป้งสาลีมีค่าต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) (Table 3)

Table 3. Proximate compositions (g/100g) and caloric value (kcal/100g) of wheat flour brownies and brownies prepared from dry-milled, wet- milled and extruded Hom-nin rice flours

Sample	Moisture	Ash	Protein	Fat	Fiber	Carbo- hydrate	Calorie
All-purpose wheat flour	13.89±0.39 ^c	1.56±0.04 ^b	6.73±0.09 ^c	37.60±0.42 ^a	0.28±0.01 ^d	53.03±0.35 ^b	579.48±1.25 ^c
Dry Milled Hom-Nin rice flour (DMF)	15.74±0.25 ^a	1.62±0.08 ^b	6.96±0.24 ^c	34.09±0.47 ^c	0.91±0.04 ^a	56.43±0.21 ^a	556.72±1.52 ^a
Wet Milled Hom-Nin rice flour (WMF)	14.54±0.05 ^b	1.78±0.07 ^a	7.53±0.13 ^b	36.21±1.81 ^{ab}	0.59±0.05 ^c	54.69±1.70 ^b	569.24±5.33 ^{ab}
Extruded Hom-Nin rice flour (EF)	14.44±0.90 ^b	1.80±0.10 ^a	8.46±0.32 ^a	35.63±0.40 ^{bc}	0.76±0.04 ^b	53.35±0.30 ^b	564.87±1.05 ^b

Means within the same column bearing the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

3. ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ ลักษณะปรากฏ ค่าสี ปริมาตรจำเพาะ และคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส

ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ของบราวนี่จากแป้งข้าวหอมชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.76-0.80 สีผิวและสีเนื้อบราวนี่ที่เตรียมจาก EF มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ต่ำที่สุด (Table 4) ขณะที่สีของผิวบราวนี่ที่เตรียมจาก WMF มีค่าความสว่าง (L^*) สูงกว่าบราวนี่จากแป้งสาลี (Table 4) ซึ่งสอดคล้องดังแสดงในภาพถ่าย (Figure 1)

เมื่อพิจารณาค่าปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) พบว่าบราวนี่จาก DMF มีค่าใกล้เคียงกับบราวนี่จากแป้งสาลีและมีค่าสูงกว่าบราวนี่จากแป้งข้าวหอมชนิดอื่น ๆ สอดคล้องกับลักษณะปรากฏ (Figure 1) บราวนี่จาก DMF มีความสูง หรือการ

ขยายตัวของบราวนี่ใกล้เคียงกับบราวนี่จากแป้งสาลี บราวนี่จากแป้งสาลีมีค่าปริมาตรจำเพาะสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) บราวนี่จาก EF มีค่าปริมาตรจำเพาะต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส พบว่าบราวนี่จาก EF มีค่าความแข็ง (hardness) ค่าความเหนียวเป็นยางหรือการ (Gumminess) และค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) สูงสุด ($p \leq 0.05$) (Table 5) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างบราวนี่จาก DMF และ WMF กับบราวนี่จากแป้งสาลี พบว่าบราวนี่จากแป้งข้าวหอมชนิดไม่เปียกจะมีค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ค่าความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) และค่าความเหนียวเป็นยางหรือการ (Gumminess) ไม่แตกต่างจากบราวนี่จากแป้งสาลี ($p \leq 0.05$)

Table 4. Water activity, specific volume, and color of brownies made from wheat flour and Hom-nin rice flours prepared by dry milling, wet milling and extraction methods

Sample	Crust color			Crumb color			Water activity (a_w)	Specific volume (ml/g)
	L*	a*	b*	L*	a*	b*		
All-purpose wheat flour	14.73±0.05 ^b	7.76±0.16 ^a	5.42±0.17 ^a	17.87±0.12 ^a	7.94±0.33 ^a	8.35±0.21 ^a	0.76±0.00 ^b	1.21±0.06 ^a
Dry Milled Hom-Nin rice flour (DMF)	13.61±0.23 ^c	5.38±0.40 ^b	2.21±0.22 ^b	14.85±0.04 ^b	5.85±1.01 ^{bc}	6.59±0.30 ^b	0.80±0.00 ^a	0.95±0.08 ^b
Wet Milled Hom-Nin rice flour (WMF)	15.25±0.15 ^a	5.62±0.24 ^b	2.59±0.50 ^b	13.46±0.15 ^d	5.28±0.68 ^{bcd}	5.72±0.73 ^c	0.77±0.00 ^b	0.53±0.11 ^c
Extruded Hom-Nin rice flour (EF)	12.25±0.32 ^d	3.88±0.32 ^c	0.96±0.61 ^c	13.77±0.22 ^c	4.20±0.32 ^{cd}	3.76±0.38 ^d	0.76±0.02 ^b	0.24±0.02 ^d

Means within the same column bearing the same letter are not significantly different ($p>0.05$).

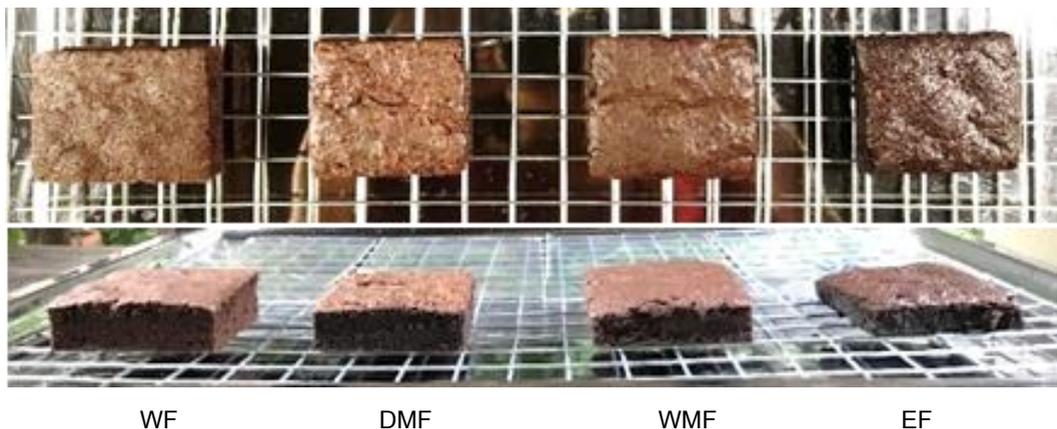


Figure 1. Brownies prepared with wheat flour (WF), dry-milled (DMF), wet-milled (WMF), and extruded flours (EF)

Table 5 Texture properties of brownies made from wheat flour and Hom-nin rice flours prepared by dry milling, wet milling and extraction methods

Sample	hardness (g)	springiness	cohesiveness	gumminess	chewiness
All-purpose wheat flour	4,152±638.36 ^c	0.78±0.05 ^a	0.46±0.03 ^a	1,916±317.36 ^b	1,501±305.28 ^{ab}
Dry Milled Hom-Nin rice flour (DMF)	5,505±924.81 ^b	0.48±0.06 ^c	0.23±0.04 ^b	1,263±167.72 ^b	602±131.62 ^c
Wet Milled Hom-Nin rice flour (WMF)	3,106±328.53 ^c	0.82±0.08 ^a	0.42±0.02 ^a	1,294±133.45 ^b	1,064±195.79 ^{bc}
Extruded Hom-Nin rice flour (EF)	7,932±656.01 ^a	0.64±0.08 ^b	0.39±0.09 ^a	3,052±643.39 ^a	1,998±648.86 ^a

Means within the same column bearing the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

4. คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของบราวนี่จากแป้งข้าวหอมมะลิ

บราวนี่ที่เตรียมจาก WMF มีคะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่าง จากบราวนี่จากแป้งสาลี ($p > 0.05$) แต่มี

ค่าความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี และกลิ่นที่ต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) และมีคะแนนความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากบราวนี่จากแป้งสาลี (Table 6)

Table 6. Sensory evaluation of brownies made from wheat flour and Hom-nin rice flours prepared by dry milling, wet milling and extraction methods

Sample	Appearance	Color	Flavor	Taste	Texture	Overall acceptance
All-purpose wheat flour	8.32±0.89 ^a	8.30±0.78 ^a	8.36±0.94 ^a	7.84±1.30 ^a	8.18±1.36 ^a	8.08±1.21 ^a
Dry Milled Hom-Nin rice flour (DMF)	7.70±0.65 ^b	7.62±0.65 ^b	7.57±0.56 ^b	6.12±0.74 ^b	5.46±0.56 ^b	6.40±0.40 ^b
Wet Milled Hom-Nin rice flour (WMF)	7.75±1.01 ^b	7.70±1.02 ^b	7.73±1.10 ^b	7.89±0.98 ^a	7.81±1.14 ^a	7.87±0.73 ^a
Extruded Hom-Nin rice flour (EF)	6.25±1.50 ^c	6.16±1.45 ^c	5.96±1.56 ^c	5.26±1.94 ^c	5.00±1.99 ^c	5.44±1.66 ^c

Means within the same column bearing the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

5. คุณภาพทางจุลินทรีย์ของบรารนี้จากแป้งข้าวหอมนิล

คุณภาพทางจุลินทรีย์ของบรารนี้จาก Wheat flour, DMF, WMF, และ EF พบว่าทุกตัวอย่างมีการตรวจนับจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 2.5×10^2 โคโลนีต่อกรัม ยีสต์และรามีค่าน้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม

อภิปรายผล

1. การคัดเลือกสูตรบรารนี้พื้นฐาน

บรารนี้ที่เตรียมจากสูตร F3 ได้รับคะแนนสูงสุดทั้งลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม (Table 2) เนื่องจากมีปริมาณเนยชนิดจืด (27%) ซึ่งไขมันมีส่วนช่วยหล่อลื่นส่วนผสมอื่น ๆ ไม่ให้จับตัวกันแน่นโดยเฉพาะโปรตีนกลูเตนทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม สูตร F3 ยังมีส่วนผสมของซ็อกโกแลต ผงโกโก้ เกลือแคง และกลิ่นวานิลลา ซึ่งกลิ่นรสของซ็อกโกแลตที่ละมุนกว่าการเติมเฉพาะผงโกโก้ และมีรสเค็มช่วยลดความหวานของบรารนี้ลง นอกจากนี้สูตร F3 มีปริมาณน้ำตาลทรายที่น้อยกว่าสูตรอื่น ๆ โดยจากข้อเสนอแนะของผู้ทดสอบพบว่า F1 มีรสชาติหวานเกินไป โดยสูตร F1 มีสัดส่วนของน้ำตาลสูง (38%) และ F2 มีรสชาติหวานเกินไปและไม่มีการหอม โดยสูตร F2 มีสัดส่วนของน้ำตาลสูง (32%) และไม่มีส่วนผสมของโกโก้และวานิลลา ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์บรารนี้มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว

2. องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมี-กายภาพ และคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสของบรารนี้

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของบรารนี้คือ คาร์โบไฮเดรต (53-56%) และไขมัน (34-37%) (Table 3) เนื่องจากวัตถุดิบหลักที่ใช้คือ น้ำตาล และเนยจืด โดยมีการใช้แป้งและไข่ไก่ทั้งฟองจึงทำให้พบโปรตีนประมาณ (7-8%) (Table 3) โดยปริมาณโปรตีนทั้งหมดพบว่าบรารนี้จาก EF และ WMF มีค่าสูงกว่าบรารนี้จากแป้งสาลีและ DMF ($p \leq 0.05$) แม้ว่าโดยทั่วไปแป้งสาลีมีค่าโปรตีนสูง แต่เนื่องจากสูตร F3 มีปริมาณแป้งในส่วนผสมทั้งหมดเพียงร้อยละ 6 และมีการเติมส่วนผสมอื่น ๆ เช่น ไข่ไก่ ไขมันเนยจืด และอื่น ๆ ทำให้แป้งเป็นส่วนผสมที่มีบทบาทในเชิงหน้าที่มากกว่าคุณค่าทางโภชนาการ

ค่าความชื้นของบรารนี้อยู่ระหว่าง 14-16% (Table 3) และค่าวอเตอร์แอกทีวิตี้ของบรารนี้จากแป้งข้าวหอมนิลมีค่าใกล้เคียงกัน (ประมาณ 0.7-0.8) (Table 4) ซึ่งเป็นช่วงของการเจริญของราและยีสต์ จึงจำเป็นต้องเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา

สีผิวและสีเนื้อบรารนี้ที่เตรียมจาก EF ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ต่ำที่สุด (Table 4) เนื่องจากการเตรียมแป้งด้วยวิธีเอ็กซ์ทรูชันมีการใช้อุณหภูมิที่สูงจึงมีแนวโน้มทำให้สารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ในข้าวสีถูกทำลายได้จากความร้อน เป็นผลทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลง หากสังเกตจากภาพถ่าย (Figure 1)

เห็นได้ว่าบราวน์ที่เตรียมจากแป้งข้าวหอมนิลเอ็กซ์ทราดมีสีคล้ำกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ขณะที่เนื้อบราวน์ที่เตรียมจากแป้งข้าวหอมไม่แห้งและไม่เปียกมีลักษณะของสีที่ใกล้เคียงกับบราวน์จากแป้งสาลีมากกว่า ทั้งนี้แม้ว่าส่วนผสมของ F3 จะมีทั้งผงโกโก้และช็อกโกแลตทำให้สีของบราวน์มีลักษณะใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาค่าปริมาตรจำเพาะ บราวน์จาก EF มีค่าปริมาตรจำเพาะต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) (Table 4) อาจเนื่องจากสมบัติของแป้งที่เตรียมจากวีธีเอ็กซ์ทราดชันจะมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำและละลายน้ำสูง²⁹ จึงมีผลต่อปริมาตรจำเพาะของบราวน์ ซึ่งสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส (Table 5) บราวน์จาก EF มีค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความเหนียวเป็นยางหรือการ (Gumminess) และค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) สูงสุด ($p \leq 0.05$) จากการที่แป้งเอ็กซ์ทราดมีลักษณะการเกิดเจลแล้วในขั้นตอนการเตรียมแป้ง จึงส่งผลต่อการดูดซับน้ำได้ดีและการยึดเกาะกันของพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของสายโมเลกุลแป้งจำนวนมาก เป็นผลทำให้มีบราวน์มีลักษณะเนื้อแน่นและเหนียว

3. คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของบราวน์จากแป้งข้าวหอมนิล

บราวน์ที่เตรียมจาก WMF มีคะแนนความชอบด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจาก บราวน์จากแป้งสาลี ($p > 0.05$) แต่มีค่าความชอบด้านลักษณะปรากฏสี และกลิ่นที่ต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับธรรมชาติของแป้งจากข้าวหอมนิลที่มีกลิ่นเฉพาะที่เข้ม และลักษณะการพองตัวที่ต่ำกว่าบราวน์จาก

แป้งสาลี แต่ให้รสชาติและเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับบราวน์จากแป้งสาลี จึงเป็นที่ยอมรับและมีคะแนนความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจาก บราวน์จากแป้งสาลี

4. คุณภาพทางจุลินทรีย์ของบราวน์จากแป้งข้าวหอมนิล

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเค้ก (มผช. 459/2555)²⁹ ระบุว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องน้อยกว่า 1×10^6 โคโลนีต่อกรัม และปริมาณยีสต์และราต้องน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อกรัม ดังนั้นจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์และราของบราวน์จาก DMF, WMF, และ EF จึงเป็นไปตามมาตรฐาน

สรุปผลการวิจัย

บราวน์จากข้าวหอมนิลไม่เปียกมีคุณลักษณะคุณภาพทั้งค่าสี (L^* , a^* , b^*) ที่ผิวหน้าและเนื้อ คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (ความแข็ง ความเหนียว ความสามารถเกาะรวมตัวกัน ความเหนียวเป็นยางหรือการ ความทนต่อการเคี้ยว) และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ใกล้เคียงกับบราวน์จากแป้งสาลีมากกว่า บราวน์จากข้าวหอมนิลไม่แห้งและเอ็กซ์ทราด คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของบราวน์จากแป้งข้าวหอมนิลไม่แห้ง ไม่เปียก และเอ็กซ์ทราดชันทั้งปริมาณจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด และจำนวนยีสต์และราเป็นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.459/2555)²⁹ ดังนั้นแป้งข้าวหอมนิลที่ผ่านการไม่เปียกเป็นแป้งที่เหมาะสมต่อการใช้ในผลิตภัณฑ์บราวน์มากที่สุด



ข้อเสนอแนะ

แป้งข้าวหอมชนิดสามารถใช้ผลิตบราวนี่ปราศจากกลูเตนได้ ตามธรรมชาติของข้าวหอมชนิดมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จึงควรศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งหอมชนิดที่เตรียมด้วยวิธีการต่าง ๆ และบราวนี่ที่ผลิตจากข้าวหอมชนิด

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณธนัชชา กุญแจทอง นักวิทยาศาสตร์สาขาอาหารและโภชนาการ ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือเกี่ยวกับการใช้งาน การดูแลรักษา เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ ภายในห้องปฏิบัติการ, คุณชिरพงษ์ เยาว์ฤทธิกร ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการผลิตแป้งข้าวเพื่อนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัย, คุณทิพย์อรุณ บุญเทียม ที่ให้ความช่วยเหลือการผลิตแป้งข้าวในกระบวนการเอ็กซ์ทรูดเพื่อนำมาใช้ในการดำเนินงานวิจัย และคุณปณณดา อ่อนน้อม ผู้ช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยและให้คำปรึกษาด้านการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส

เอกสารอ้างอิง

1. นิพาดา ศิริภักดิ์, นิสา ยศสมบัติ, สุภารัตน์ พุ่มชื่น, ทรงพรรณ สังข์ทรัพย์, อุทัยวรรณ ฉัตรธง. ผลของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ต่อคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพและทางประสาทสัมผัสของบราวนี่. การประชุมวิชาการระดับชาติ นวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ 2017 วิจัยจากองค์ความรู้สู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน; มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. พิษณุโลก; 2560;หน้า 757-64.

2. ธนิษฐนันท์ บุญศรีชนะ, สุนันท์ บุตรศาสตร์. ผลของการใช้ใยเกี๋ยทดแทนเนยสดต่อคุณลักษณะและการยอมรับของบราวนี่กรอบ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม; 2562.
3. Statista [Internet]. Worldwide production of grain in 2020/21 [cited 2021 Feb 26]. Available from: <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>. 2021.
4. วิมล วรณูวาศ, ณีฐฐา คงโนนกกอก, อโนชา สุขสมบุรณ์. ผลของการใช้แป้งมันเทศสีม่วงทดแทนแป้งสาลีที่มีต่อคุณลักษณะของขนมปัง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 2556;44:421-4.
5. อริสรา รอดอุ้มย, อรอุมา จิตรวโรภาส. การผลิตคุกกี้โดยใช้แป้งข้าวหอมชนิดทดแทนแป้งสาลีบางส่วน. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร 2550;3:37-43.
6. ศนันธร พิชัย, ปาริชาติ ราชมณี. การพัฒนาผลิตภัณฑ์แครกเกอร์ปราศจากกลูเตน. วารสารเกษตรพระวรุณ 2561;15:289-96.
7. จารุวรรณ นามวัฒน์, จันท์ฉัตรฉาย สังเกตกิจ. การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวกล้องในเค้กกล้วยหอม. การประชุมวิชาการระดับชาติ “นวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ 2017” “วิจัยจากองค์ความรู้สู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์. สุรินทร์; 2560;หน้า 493-9.
8. ศรีนวล จันทไทย, นิจฉา ทูลธรรม, ภาวิดา กลิ่นเทศ, ชนัญชิตา โพธิ์กิ่ง. ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งเผือกแป้งมันเลือดนกและแป้งมัน



- เทศสีม่วงร่วมกับแป้งข้าวเหนียวดำต่อคุณภาพของมัฟฟินและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค. การประชุมวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 13”. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม; 2560; หน้า 650-6.
9. สุภาวิณี แสนทวีสุข, มาลีน้ำ สันเต๊ะ. ผลของการใช้กากถั่วเหลืองทดแทนแป้งสาลีต่อคุณภาพของบัตเตอร์เค้ก. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 2557;45:453-6.
 10. ผาณิต รุจิรพิสิฐ, อารีวรรณ สุขวิสัย. ผลของการใช้แป้งฟลาวัวร์จากแห้วจินทดแทนแป้งสาลีในการผลิตเค้กชนิดส่วนผสมชั้น. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร 2561;49:45-8.
 11. กฤติมา นพกรมงคล, ปิยนันท์ แสนกล้า, ปวีณา เฉลียวไวย. การใช้แป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลีในขนมปังหวาน. [โครงการงานพิเศษหลักสูตรคหกรรมศาสตรบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2557.
 12. จุรีมาศ ดีอำมาตย์, เจมห์จิรา ไวยโกคา, ดุจเดือน เขม้นเขตกิจ, ศุภรัตน์ ฮวบเจริญ. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมไข่ด้วยฟักทองผง. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. กำแพงเพชร; 2558; หน้า 787-92.
 13. เนตรนภา จิตตะระ. การศึกษาเปรียบเทียบผลของการรับประทานข้าวกล้องหอมนิลกับข้าวขาวหอมมะลิต่อการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำตาลในเลือดผู้ที่เป็นโรคเบาหวานชนิดที่ 2. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์; 2561.
 14. Eckhoff SR. Maize Dry Milling. In Wrigley C, Editor, The Encyclopedia of Grain Science; 2004. p. 216-25.
 15. วชิรพงศ์ เขียวฤทธิกร, ปาริสุทธิ เฉลิมชัยวัฒน์, อบเชย วงศ์ทอง. สมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งข้าวเหนียวลิ้มม่วงอกและไม่ผ่านการเพาะงอก จากวิธีการใหม่ที่แตกต่างกัน. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 57. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร; 2562; หน้า 470-8.
 16. อากัสรา แสงนาค, อัญชลี เรืองเดช, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, วิษมณี ยืนยงพุทธกาล, อุบลรัตน์ สิริภัทรวารรณ. โครงการการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันจากข้าวหอมนิล. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กลุ่มเรื่องการเพิ่มมูลค่าสินค้าเกษตรเพื่อการส่งออกและลดการนำเข้า (โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา); 2554. เลขที่รายงาน 2554A16662004.
 17. Diez-Sancheza E, Quilesa A, Llorcaa E, Reibnerb AM, Struckb S, Rohm H, Hernando I. Extruded flour as techno-functional ingredient in muffins with berry pomace. Food Sci Technol 2019;113:1-8.
 18. ไชยสิทธิ์ พันธุ์พูนจินดา, เลอลักษณ์ เสถียรรัตน์, อรวัดภ์ อุบัติ์ภานนท์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์บราวนี่โดยใช้แป้งข้าวเหนียวดำทดแทนแป้งสาลี.



- วารสารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 2559;10:106-19.
19. พรรัตน์ สิ้นชัยพานิช, กุศลภัส บัตรพษ์, ศศิพินท์ ดิษนิล, เรณู ทวีชาติวิทยากุล. ผลของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีในบราวนี่: เนื้อสัมผัสและลักษณะคุณภาพ. การประชุมวิชาการระดับชาติ นวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ 2017 วิจัยจากองค์ความรู้สู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน .มหาวิทยาลัยมหิดล.นครปฐม; 2560;หน้า 757-64.
 20. ศรีนวล จันทไทย, นิจฉรา ทูลธรรม, ภาวิตา กลิ่นเทศ, ชนัญชิตา โพธิ์กิ่ง. ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งเผือกแป้งมันเลือดนกและแป้งมันเทศสีม่วงร่วมกับแป้งข้าวเหนียวต่อคุณภาพของมัฟฟินและการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค. การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 13. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม; 2560;หน้า 650-6.
 21. Sandulachi EI, Tatarov PG. Water activity concept and its role in strawberries food. Chem J Mold 2012;7:103-15.
 22. Feili R, Zzaman W, Abdullah WNW, Yang TA. Physical and sensory analysis of high fiber bread incorporated with jackfruit rind flour. Food Sci Technol 2013;1:30-6.
 23. AOAC. Official Method of Analysis of AOAC International. USA; 2016.
 24. AACC. Method of Crude Fiber in Flours Feeds and Feedstuffs. ISO 6568: 2000 Animal feeding stuffs. Determination of crude fiber content, REG CE152/ 2009, AOAC 978.10. USA; 2018.
 25. AOAC. Official Method of Analysis of AOAC International. Official Method of Carbohydrates in soluble (instant) coffee. Anion-exchange chromate graphic method with pulsed amperometric detection. USA;2000.
 26. FDA BAM [Internet] . USA. Chapter 3 Aerobic Plate Count. [update 2001; cited 2021 Oct 31]. available from <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-3-aerobic-plate-count>
 27. AOAC. Official Method of Analysis of AOAC International. Official Method of Yeast and Mold Count in Foods. USA;2019.
 28. Kadan RS, Bryant RJ, Pepperman AB. Functional properties of extruded rice flours. J Food Sci 2003;68:1669-72.
 29. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. [อินเทอร์เน็ต]. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (Thai Community Product Standard): เค้ก (cakes). กรุงเทพฯ: [เข้าถึงเมื่อ 14 เม.ย 2564]. เข้าถึงจาก <https://tcps.tisi.go.th/public/StandardList.aspx>

A Simple Discrete-Weighted Exponential Distribution and Applications

Chadarat Tapan

Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University

Corresponding author; E-mail: chadarat@psru.ac.th

Received: 02 September 2022 /Revised: 17 October 2022 /Accepted: 11 November 2022

Abstract

A discrete distribution has been widely used for count data. This study aimed to present a simple discrete-weighted exponential distribution and some statistical properties, such as the cumulative distribution function, probability generating function, expected, variance, moment generating function, survival function, index of dispersion and coefficient of variation. The method of estimation of the parameters was maximum likelihood estimation. Furthermore, the simple discrete-weighted exponential distribution was applied and compared to other distributions on over-dispersion data sets. The results indicated that the simple discrete-weighted exponential distribution could be used as an alternative to over-dispersion data.

Keywords: Discrete distribution, Probability mass function, Survival function, Exponential distribution

Introduction

Lifetime data is the time of occurrence based on a topic of interest for endurance, such as the period from epidemic beginning to illness recovery, mobile lifetime, the light bulb time period for use, and time of death in cancer patients. Lifetimes are sometimes referred to as "survival times" or "failure periods" depending on the event of interest. Popular distributions for lifetime data, such as Weibull, exponential, Pareto, and Lindley distributions, are commonly used to generate

modeling data for lifetime data. In many cases, data contains the frequency of an event of interest at the time of occurrence or count data, such as the number of coronavirus infections in a month, accidents, and consumers. So, count data is a data type that describes the frequency of events or items that occur within a fixed period of time¹. For modeling count data, the Poisson distribution is the most widely utilized. The conditional mean of occurrence is equal to the variance in the Poisson distribution assumptions, which is

known as equi-dispersion. In most situations, however, the variance is larger than its mean, which is referred to as over-dispersion². The discrete distributions are utilized for over-dispersion count data.

A variety of studies have been conducted to deal with the discrete distribution of count data. In 2015, Nekoukhou and Bidram³ introduced the exponentiated discrete Weibull distribution and presented some basic distributional properties, moments, and order statistics. In addition, the exponentiated discrete Weibull distribution was applied to a real data set. In 2017, Borah⁴ used the general approach of compounding for quasi-Poisson Lindley distribution. The result showed the properties of the quasi-Poisson Lindley distribution such as moment, skewness, and Kurtosis. In 2018, Mahdi et al.⁵ suggested and evaluated parameters for a discrete weighted exponential distribution. The discrete exponential distribution, developed by Chakraborty⁶, was a generalization of this distribution. The discrete weighted exponential distribution exceeded the exponentiated geometric and generalized geometric distributions. Khongthip et al.⁷ proposed a discrete weighted exponential distribution. A discrete distribution was generated from a corresponding continuous distribution by applying Roy's method for discretization. In 2020, Diandarma et al.⁸ presented a discrete Lindley distribution which was generated from the

discretization method. The result found that a discrete Lindley distribution could be used as an alternative to the Poisson distribution in modeling over-dispersion data.

The aims of this paper were to present a simple discrete-weighted exponential distribution and to describe some properties of the simple discrete-weighted exponential distribution. For the rest of this paper, the second section presented methods and materials. In the third section, results such as the simple discrete-weighted exponential distribution, some statistical properties, parameter estimation, and the application of two data sets were shown. Finally, the last section provided a conclusion.

Materials and Methods

This section presents the discretization method for generating new discrete distributions and the weighted exponential distribution.

1. Discretization method

A discrete probability distribution function can be generated from a continuous probability distribution function using the discrete technique. Methods for producing discrete probability distribution functions from continuous probability distribution functions were demonstrated by Chakraborty⁶. In this paper, the method based on the continuous

survival function was used.⁶ The probability mass function (pmf) of discrete distributions is $f(y) = S_X(y) - S_X(y+1)$, (1) where $y = 0, 1, 2, \dots$ and $S_X(y)$ is the survival function.

2. Weighted exponential distribution

In 2016, Bashir and Naqvi⁹ derived a weighted exponential distribution. The probability distribution function (pdf) of the weighted exponential distribution was given by

$$f(x; \lambda, \omega) = (\lambda - \omega)e^{-(\lambda - \omega)x}, \quad (2)$$

where $x > 0, \lambda > 0, \lambda > \omega$, and $0 < \omega < 1$.

The survival function (sf) of a weighted exponential distribution was given by

$$S(x) = e^{-(\lambda - \omega)x}. \quad (3)$$

Results

In this section, the pmf, cumulative distribution function, and some statistical properties of a simple discrete weighted exponential distribution and parameter estimation are presented.

1. A simple discrete-weighted exponential distribution

Theorem 1: If Y be random variable of a simple discrete-weighted exponential distribution with parameters λ and ω are scale and shape parameters respectively. The pmf of the simple discrete-weighted exponential distribution is

$$f(y) = e^{-y(\lambda - \omega)} [1 - e^{-(\lambda - \omega)}], \quad (4)$$

where $y = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0, \lambda > \omega$ and $0 < \omega < 1$.

Proof: Equation (2) shows the pdf of a weighted exponential distribution when Y is a random variable. The survival function is

$$S(y) = e^{-(\lambda - \omega)y} \quad (5)$$

$$\text{and } S(y+1) = e^{-(\lambda - \omega)(y+1)} \quad (6)$$

From the discretization method, the Equations (5) and (6) are plugged into the Equation (1). We will obtain

$$\begin{aligned} f(y) &= S(y) - S(y+1) \\ &= e^{-(\lambda - \omega)y} - e^{-(\lambda - \omega)(y+1)} \\ &= e^{-y(\lambda - \omega)} [1 - e^{-(\lambda - \omega)}]. \end{aligned}$$

The properties of probability function are

$$f(y) \geq 0 \text{ for all } y \text{ and } \sum_{\forall y} f(y) = 1.$$

$$\begin{aligned} \sum_{\forall y} f(y) &= \sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda - \omega)} [1 - e^{-(\lambda - \omega)}] \\ &= [1 - e^{-(\lambda - \omega)}] \sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda - \omega)} \\ &= [1 - e^{-(\lambda - \omega)}] \left[\frac{1}{1 - e^{-(\lambda - \omega)}} \right] \\ &= 1 \end{aligned}$$

Thus, the pmf has the properties of a probability function.

The cdf of the simple discrete-weighted exponential distribution is

$$F(y) = 1 - e^{-(\lambda - \omega)(y+1)}, \quad (7)$$

where $y = 0, 1, 2, \dots, \lambda > 0, \lambda > \omega$ and $0 < \omega < 1$.

The cdf of the simple discrete-weighted exponential distribution is the following:

$$\begin{aligned}
 F_Y(t) &= \sum_{t=0}^y f(t) \\
 &= \sum_{t=0}^y e^{-t(\lambda-\omega)} \left[1 - e^{-(\lambda-\omega)} \right] \\
 &= \left[1 - e^{-(\lambda-\omega)} \right] \left[\frac{1 - e^{-(\lambda-\omega)(y+1)}}{1 - e^{-(\lambda-\omega)}} \right] \\
 &= 1 - e^{-(\lambda-\omega)(y+1)}
 \end{aligned}$$

Figure 1 and Figure 2 provide some possible plots for the pmf and cdf of the simple discrete-weighted exponential distribution.

Figure 1 presents the pmf plots of the simple discrete-weighted exponential distribution for different values of λ and ω , and the distribution is skewed to the right. Obviously, the scale parameter λ varies with the shape parameter ω . The pmf decreases as the shape parameter ω increases. Figure 2 presents the cdf of the simple discrete-weighted exponential distribution for different values of λ and ω , and it is increasing function.

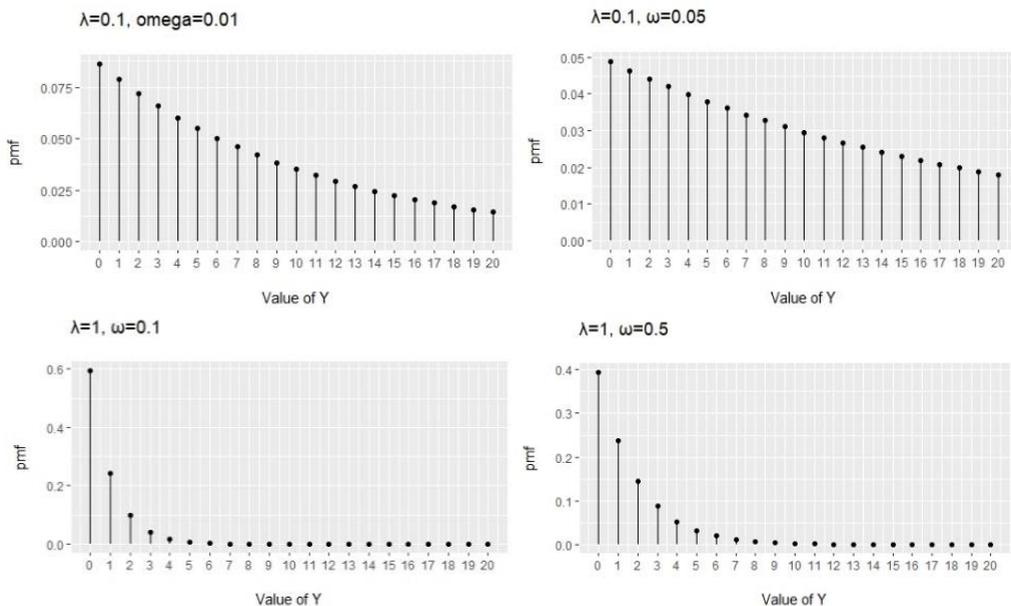


Figure1. The pmf plots of the simple discrete weighted-exponential distribution

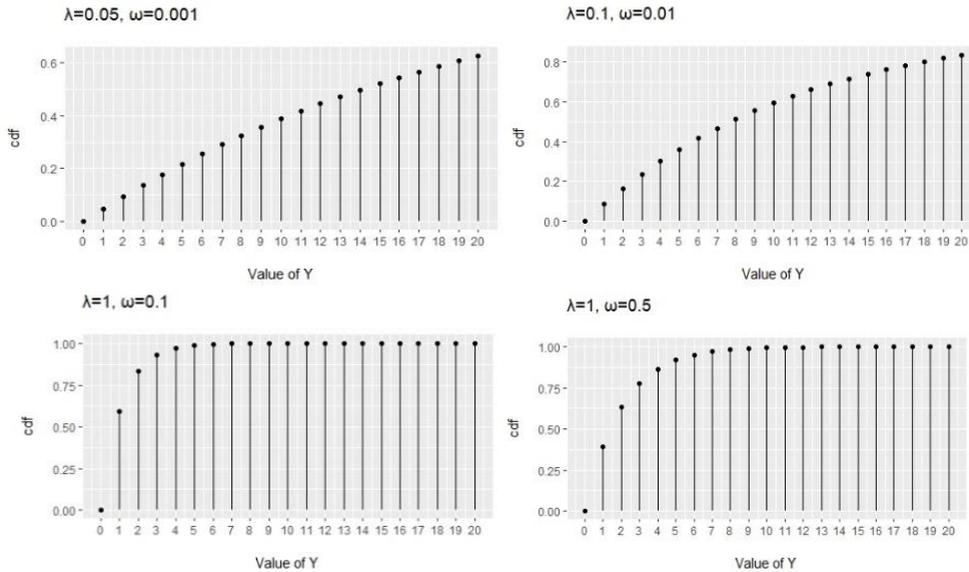


Figure2. The cdf plots of the simple discrete weighted-exponential distribution

2. Statistics properties

This section showed the probability generating function (pgf), expectation, variance, and moment generating function (mgf), survival function (sf), index of dispersion (ID), and coefficient of variation (CV).

2.1 Probability generating function

In statistical theory, the pgf is more important. This function can also find the expectation and variance of a random variable.

Theorem 2: Let Z be a random variable with a simple discrete-weighted exponential distribution, then the pgf is given by

$$G(z) = \frac{1 - e^{-(\lambda-\omega)}}{1 - ze^{-(\lambda-\omega)}}, \quad (8)$$

where $y = 0, 1, 2, \dots$, $\lambda > 0$, $\lambda > \omega$, $0 < \omega < 1$ and z is a real number.

Proof: The pgf of the simple discrete-weighted exponential distribution can be shown as follows:

$$\begin{aligned} G(z) &= \sum_{y=0}^{\infty} f(y) z^y \\ &= \sum_{y=0}^{\infty} e^{-y(\lambda-\omega)} (1 - e^{-(\lambda-\omega)}) z^y \\ &= \frac{1 - e^{-(\lambda-\omega)}}{1 - z \cdot e^{-(\lambda-\omega)}} \end{aligned}$$

2.2 Expectation, Variance and Moment Generating Function

From Theorem 2, the expectation of Y is

$$E(y) = G'(1) = \frac{e^{-(\lambda-\omega)}}{1 - e^{-(\lambda-\omega)}}. \quad (9)$$

The variance of Y can be derived from Theorem 2. We obtain

$$\begin{aligned} \text{Var}(Y) &= G''(1) + G'(1) - (G'(1))^2 \\ &= \frac{2e^{-2(\lambda-\omega)}}{(1-e^{-(\lambda-\omega)})^2} + \frac{e^{-(\lambda-\omega)}}{1-e^{-(\lambda-\omega)}} - \frac{e^{-2(\lambda-\omega)}}{(1-e^{-(\lambda-\omega)})^2} \\ &= \frac{e^{-(\lambda-\omega)}}{(1-e^{-(\lambda-\omega)})^2} \end{aligned} \tag{10}$$

So, the variance of Y is $\frac{e^{-(\lambda-\omega)}}{(1-e^{-(\lambda-\omega)})^2}$.

Set $z = e^t$ and we will obtain the mgf.

$$G(e^t) = E(e^{ty}) = M_Y t$$

Thus,

$$M_Y(t) = \frac{1 - e^{-(\lambda-\omega)}}{1 - e^{-t(\lambda-\omega)}} \tag{11}$$

2.3 Survival function

The sf of the simple discrete-weighted exponential distribution is the following:

$S(y) = 1 - F(y)$, then the sf¹⁰ is

$$S(y) = e^{-(\lambda-\omega)(y+1)} \tag{12}$$

Figure 3 shows some possible plots for the sf of the simple discrete weighted-exponential distribution. It can be seen that the sf function could be decreasing with respect to the value of Y based on the different parameter values.

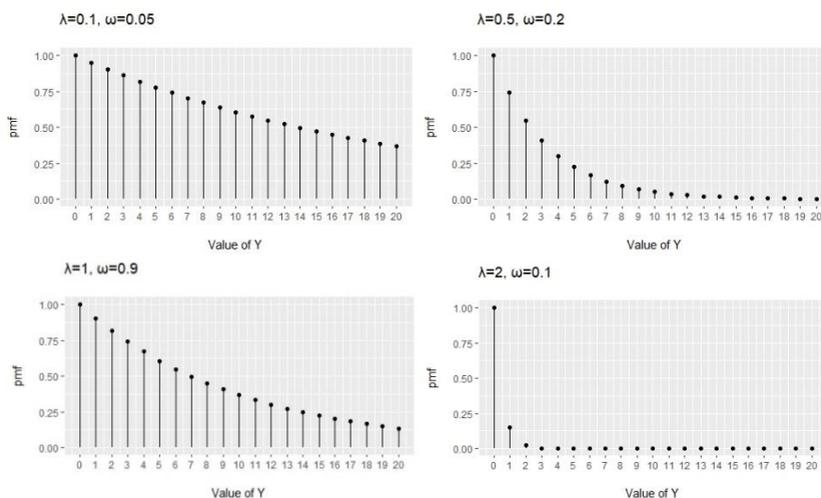


Figure 3. The sf of the simple discrete weighted exponential distribution

2.4 Index of dispersion and coefficient of variation

The ID is a measure of dispersion (over-dispersion, under-dispersion and equidispersion)¹¹. The variance to mean ratio is the most basic definition. The ID of the simple discrete-weighted exponential distribution given as

$$ID = \frac{1}{1 - e^{-(\lambda - \omega)}}. \quad (13)$$

$$ID > 1, \text{ for } \lambda > 0, \lambda > \omega, 0 < \omega < 1.$$

Therefore, it follows that the simple discrete-weighted exponential distribution is over-dispersion.

The CV is expressed as the ratio of standard deviation to the mean. The CV of the simple discrete-weighted exponential distribution is given as

$$CV = \frac{1}{\sqrt{e^{-(\lambda - \omega)}}}. \quad (14)$$

3. Parameter estimation

This paper will discuss parameter estimation based on the maximum likelihood estimation (MLE) method. Let $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ denote random samples drawn from the simple discrete-weighted exponential distribution with parameters λ and ω . The log likelihood function $L(y; \lambda, \omega)$ is given by:

$$\ln L(y; \lambda, \omega) = -(\lambda - \omega) \sum_{i=1}^n y_i + n \ln(1 - e^{-(\lambda - \omega)}) \quad (15)$$

We cannot obtain explicit expressions of estimations, so numerical analysis, such as the Newton-Raphson algorithm, can be used to estimate the value of parameters.

4. Applications

In this section, the simple discrete-weighted exponential (DWE) distribution will be examined for two real data sets and compared with the Poisson, negative binomial (NB), and discrete Lindley (DL) distributions. The analysis involved in this research was performed with the R program and estimated the parameters using the package's name "maxLik"¹². The criteria for comparing models were the log-likelihood (LL) and the Akaike information criterion (AIC). The log-likelihood is calculated as; $LL = 2(\ln L_1 - \ln L_0)$ ¹³. Where L_1 and L_0 are the log-likelihood under the respective hypothesis. The AIC is the most used fit statistic. Let L be the model likelihood, p is the number of parameters. The AIC is $AIC = -2\ln(L) + 2p^2$. In addition, we compute the expected frequencies for fitted DWE, Poisson, NB, DL distribution.

The StrikeNb dataset, which is included in the Ecdat R package (Website data: <http://CRAN.R-project.org/package=Ecdat>), is the first data set. The number of contract strikes in US industry was reported

monthly from January 1968 to December 1976, which included 108 observations. The sample mean of the data is 6.75, the variance is 21.93, and the ID is 3.25. The variance is greater than

the mean, indicating that there is overdispersion. Table 1 shows the estimated parameters, LL, and AIC of the StrikeNb data set.

Table 1. The number of contracts strikes in the US manufacturing observed data set and its expected frequencies, estimated parameters, LL, and AIC

Count	Frequency	Expected frequencies			
		DWE	Poisson	NB	DL
0	5	14.1	0.6	5.0	5.6
1	12	12.3	3.2	9.3	8.7
2	14	10.7	8.3	11.5	10.1
3	11	9.3	14.3	11.8	10.4
4	9	8.1	18.4	10.9	10.0
5	14	7.0	18.9	9.4	9.2
6	9	6.1	16.2	7.8	8.3
7	4	5.3	11.9	6.2	7.3
8	7	4.6	7.7	4.7	6.4
9	10	4.0	4.4	3.6	5.5
10	6	3.5	2.3	2.6	4.6
11	1	3.0	1.1	1.9	3.9
13	3	2.3	0.5	1.0	2.7
15	1	1.7	0.2	0.5	1.8
16	1	1.5	0.1	0.3	1.5
18	1	1.1	0.0	0.2	1.0
Estimated		$\hat{\lambda} = 0.87$	$\hat{\lambda} = 5.15$	$\hat{r} = 3.20$	$\hat{\theta} = 0.26$
Parameters		$\hat{\omega} = 0.73$		$\hat{p} = 0.28$	
LL		-47.68	-309.26	-279.97	-59.20
AIC		99.36	620.58	563.94	120.40

Table 1 shows the first data set and the expected frequencies of DWE, Poisson, NB, and DL distributions. The comparison between the DWE distribution and other distributions based on AIC values for the StrikeNb data set. In the set of competing distributions, a distribution is selected as the best fitted distribution to the data that has the smallest AIC values. We observe that the AIC and LL values of DWE are 99.36 and -47.68, respectively, and the AIC value is the smallest. The DWE distribution is a better

distribution. The MLE of the parameters of the DWE distribution fitted to the data are $\hat{\lambda} = 0.87$ and $\hat{\omega} = 0.73$.

The second set of data is the number of fires in Greece from 1 July 1998 to 31 August of the same year³. The sample mean of the data set is 8.20, the variance is 19.03, and the ID is 2.32. Since the sample variance is larger than the sample mean, this data set has over-dispersion. Table 2 shows the estimated parameters, LL, and AIC of the second data set.

Table 2. The number of fires in Greece data set and its expected frequencies, estimated parameters, LL, and AIC

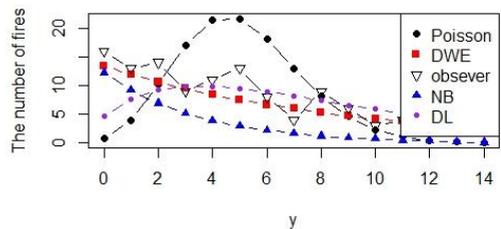
Count	Frequency	Expected frequencies			
		DWE	Poisson	NB	DL
0	16	13.4	0.8	12.2	4.7
1	13	11.9	4.0	9.2	7.6
2	14	10.6	10.2	6.9	9.2
3	9	9.5	17.0	5.2	9.8
4	11	8.4	21.4	3.9	9.9
5	13	7.5	21.6	2.9	9.5
6	8	6.7	18.1	2.2	8.9
7	4	6.0	13.0	1.7	8.2
8	9	5.3	8.2	1.2	7.4
9	6	4.7	4.6	0.9	6.6
10	3	4.2	2.3	0.7	5.9
11	4	3.8	1.1	0.5	5.1
12	6	3.4	0.4	0.4	4.5
15	4	2.4	0.2	0.2	2.9
≥ 16	3	2.1	0.1	0.1	2.4

Table 2: The number of fires in Greece data set and its expected frequencies, estimated parameters, LL, and AIC (cont.)

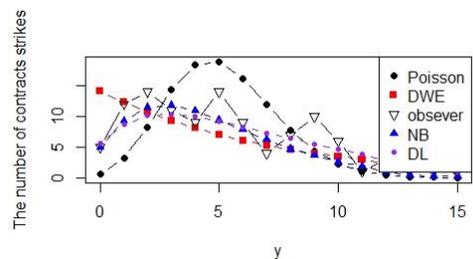
Count	Frequency	Expected frequencies			
		DWE	Poisson	NB	DL
Estimated Parameters		$\hat{\lambda} = 0.66$	$\hat{\lambda} = 5.03$	$\hat{r} = 1.66$	$\hat{\theta} = 0.22$
		$\hat{\omega} = 0.54$		$\hat{p} = 0.25$	
LL		-47.44	-401.79	-329.41	-51.95
AIC		98.88	804.57	662.82	105.90

Table 2 shows the second data set and the expected frequencies of DWE, Poisson, NB, and DL distributions. The comparison between the DWE distribution and other distributions based on AIC values. We found that the AIC and LL values of DWE are 98.88 and -47.44, respectively and the AIC value is the smallest. The DWE distribution is a better model. The MLE of the parameters of the DWE distribution fitted to the data are $\hat{\lambda} = 0.66$ and $\hat{\omega} = 0.54$.

Figure 4 displays a comparison of observed and expected frequencies in a fitted distribution; Figure (4a) shows the fitted distribution of the StrikeNb data set, while Figure (4b) shows the fitted distribution of the number of fires in the Greece data set.



(a)



(b)

Figure 4. Data and expected frequencies of fitted distribution with difference distribution

Conclusion

The discretization method is used in this paper to create a simple discrete-weighted exponential distribution. The pmf and cdf of the simple discrete-weighted exponential distribution



are obtained, some statistical properties are presented, and the index of dispersion and coefficient of variation are included. Furthermore, the simple discrete-weighted exponential distribution is applied to and compared to the Poisson, NB, and DL based on maximum likelihood estimation for two over-dispersion data sets. The result, based on AIC and LL values, is that the AIC value of the DWE distribution is the smallest. From this paper, we can conclude that the DWE distribution is better fitted to the data than the Poisson, NB, and DL distributions. So, the DWE distribution can be used as an alternative to the over-dispersion data.

References

- Hilbe JM. Modeling count data. 3rd. Cambridge University Press; 2014.
- Cameron AC, Trivedi PK. Regression analysis of count data. Cambridge. 2nd. New York: The United States of America; 2013.
- Nekoukhou V, Bidram H. The exponentiated discrete Weibull distribution. SORT 2017;1:127-46.
- Borah M. A new quasi poisson-lindley distribution: porperies and applications. J Stat Sci Appl 2017;16:576-88.
- Rasekhi M, Chatrabgounand O, Daneshkhah A. Discrete weighted exponential distribution: properties and applications. Filomat 2018;32:3043-56. Doi:10.2298/FIL1808043R
- Chakraborty S. Generating discrete analogues of continuous probability distribution-A survey of methods and constructions. J Stat Distrib 2015;2:1-30. Doi:10.1186/s40488-015-0028-6.
- Khongthip P, Patummasut M, Bodhisuwan W. The discrete weighted exponential distribution and its applications. Songklanakarin J Sci Technol 2018;40:1105-14.
- Diandarma R, Nurrohmah S, Fithrianai I. Discrete Lindley distribution. Proceedings of the 5th International Symposium on Current Progress in Mathematics and Sciences (ISCPMS2019); 2019 July 9-10; Depok, Indonesia. AIP Conference Proceedings 2242, 030024; 2020.
- Bashir S, Naqvi IB. A new weighted exponential distribution and its applications on waiting time data. Int J Sci Res Publ 2016;6:698-702.
- Rinne H. The Hazard Rete: Theory and Inference (with supplementary MATLAB-Programs). Department of Economics and Management Science, Justus-Liebig-University, Germany; 2014.



11. Norman JL, Kemp AW, Kotz S. Univariate Discrete Distribution. 3rd A John Wiley & Sons, INC.; 2005.
12. Henningsen A, Toomet O. maxLik: A package for maximum likelihood estimation in R. Comput Stat 2011;26:443-58.

13. Montgomery DC, Peck EA, Vining GG. Introduction linear regression analysis. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey; 2012.



Simulating Network Management System for Quantum Key Distribution Based on Rural and Remote Broadband in Thailand

Piya Techateerawat

Department of Electrical and Computer Engineering Faculty of Engineering, Thammasat University Khlongluang, Pathumthani, Thailand

*Corresponding author; E-mail :tpiya@engr.tu.ac.th

Received: 14 November 2022 /Revised: 10 January 2023 /Accepted: 11 January 2023

Abstract

Quantum Key Distribution (QKD) is developed to improve the security network in key exchange field. There is several success network equipment in implement QKD. However, the key distribution is limited to use in point-to-point scope. In this paper, a network in quantum cryptography network is simulated based on actual Thailand broadband services that will extend the ability of number of users in present quantum cryptography network from point-to-point to multi-user network and sustain the security of the network. The developed system is implemented based on the existing quantum cryptography by managing the pairs joining of QKD system and real data of last-mile infrastructure and services of rural and remote broadband development in Thailand. The result of simulation is proven the feasibility to implement the proposed concept in real implementation.

Keywords: Quantum Key Distribution, QKD, Network Management, Network Management Simulation, Cryptography and Security, Thailand broadband.

Introduction

The key distribution is an initial step in several security protocols that provide the key to the specific host securely. Currently, cryptography is used to assure the confidentiality and integrity of key distribution. Therefore, all key distribution is based on mathematical cryptography¹. However, there is a proposed alternative key distribution

by using quantum cryptography. This can ensure the confidentiality in transmitted key by relying on the properties of quantum. Since quantum information cannot be sniffed nor recreated, key distribution adapted this feature to develop Quantum Key Distribution (QKD)^{2,3}

The quantum communication network system's channel is divided into two channels:

the public channel and the quantum channel. The public channel is used to exchange the encrypted data, and the quantum channel is used to transmit the keys, or QKD, as shown in Figure 1. The limitation of QKD is strictly transferred only two nodes or point-to-point connection. Currently, there is research that offers several methods but mainly focuses on the physical layer, for example, a quantum router, which can route the quantum signal but has challenges with data loss, connectivity, and distance.^{4,5}

Hence, our objective is to develop a network management system for QKD based on the actual infrastructure that provides the extended ability of using QKD as a network as well as convenient management and relatively low cost.

Background

a) Quantum Cryptography

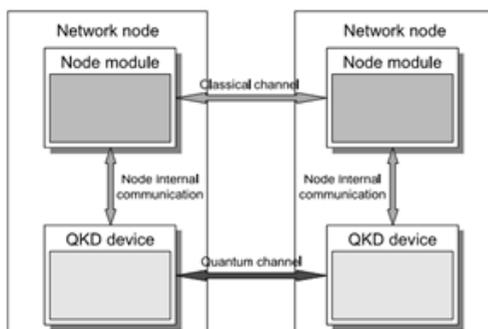


Figure 1. Data Communication in QKD System.

Quantum cryptography contains a key distribution system that uses the laws of

quantum mechanics to guarantee secure communication. The crucial element of quantum mechanics, such as Heisenberg's uncertainty principle prevents anyone from directly measuring the bit value without introducing errors that can be detected. A single photon is indivisible which means that an eavesdropper cannot split the quantum signal to make measurements covertly. Quantum cryptography has a quantum no-cloning theory. This theory shows that it is not possible to receive a single photon and duplicate the photon without giving notice to others. There are two dominant schemes for quantum key distribution protocols which are the BB84 protocol and the B92 protocol⁶⁻⁸.

BB84 protocol is the first quantum cryptography protocol which was proposed by Bennett and Brassard in 1984². This protocol employs two polarization bases for a single photon; rectilinear basis and diagonal basis. The single photon may be polarized in four states: horizontal $|h\rangle$, vertical $|v\rangle$, left circle polarized $|lcp\rangle$, and right circle polarized $|rcp\rangle$. Polarization state horizontal $|h\rangle$ and left circle polarized $|lcp\rangle$ represent a '0'. The polarization states of vertical $|v\rangle$ and right circle polarized $|rcp\rangle$ represent a '1'.

B92 protocol is proposed by Bennett and Brassard in 1992⁹, similar to BB84 protocol but uses only two non-orthogonal quantum state $|h\rangle$

represent a '0' and $|rcp\rangle$ represent a '1', half of the BB84 protocol to transmit the key.

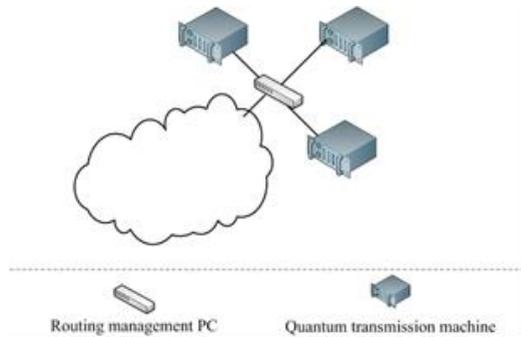


Figure 2. System Design

b) Rural and remote broadband in Thailand

In this paper, simulation is based on the real infrastructure of rural broadband in Thailand providing last-mile technologies for 15,732 rural villages (Zone C) and 3,920 remote villages (Zone C+) implemented by National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC). This paper illustrates new tailored last-mile technologies that are suitable for these types of areas. The technologies are aimed to be the base on which to construct a regional system for distribution of broadband accesses at 15,732 rural villages and broadband/mobile accesses at 3,920 remote sites locating around the country as shown in Figure 3. It is noted that Ministry of Digital Economy and Society (MDES) is

responsible for the broadband implementation of remaining rural villages (24,700 rural villages).

The broadband data presented in this paper is the last-mile implementation for the 3,920 remote villages in Thailand served by NBTC. This broadband development and implementation are to: 1) provide high-speed broadband internet services in the areas; 2) extend infrastructures and services to the areas so that remote people will have equal access to digital technology and information; 3) create the so-called "digital economy and society" in the areas; and 4) leverage digital technologies and services for the areas. The 3,920 remote villages implemented are in all remote areas of Thailand, as shown in Figure 3. Most of them are in the north of Thailand, a mountainous area where there are parallel high mountains with steep river valleys and high-hill areas that surround the central plain. While the 15,732 rural villages (details are shown in Table 1) are more widely distributed nationwide and most of them are easier to access compared to the remote areas, However, approximately 20–30% of the areas have the same constraints as the remote.

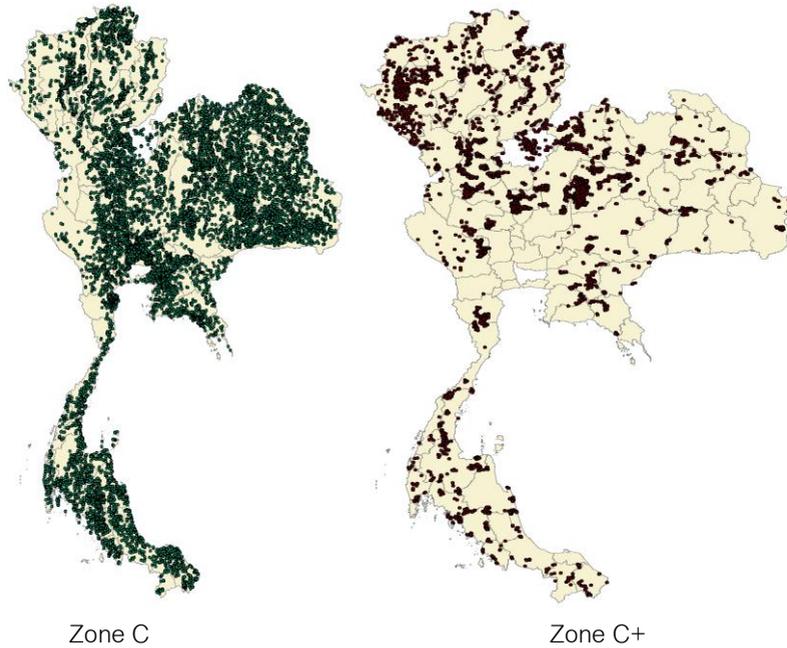


Figure 3. Broadband infrastructure (color dots): rural villages (Zone C) and remote villages (Zone C+)

Table 1. Descriptive Information of the rural villages in Thailand (Archived from NBTC survey information)

Area: Zone C	Targeted villages	Approximate population	Average population per village	no. of Teachers	no. of Students
North	4,140	2,460,432	594	19,716	241,340
South	2,052	1,713,722	835	14,288	182,610
Central and East	3,367	2,202,084	654	18,489	239,028
North-East	6,173	3,823,091	619	29,559	392,074
Total	15,732	10,199,329	648	82,052	1,055,052
North	2,027	868,041	428	11,351	148,760
South	459	239,526	522	2,757	33,919
Central and East	349	182,122	522	1,755	27,237
North-East	1,085	534,209	492	5,120	66,473
Total	3,920	1,823,898	465	20,983	276,389

Management system for quantum distribution (QKD)

Our system is designed at application layer to support connectivity, convenience, and cost. We assume that each QKD machine is a trusted host and our system has physical protection from anonymous which is based on structured network^{10,11}. Quantum transmission machine uses BB84 for default protocol.

A. Hardware

From the physical connection, there are 3 main parts: 1.) Group of Network; 2.) Routing Management PC; 3.) Data Transmission Machine, as shown in Figure 2. In our system, we use encryption hardware and a quantum key distribution hardware, so each group of networks is connected to Routing Management PC then connected to Data Transmission Machine as shown in the Figure 4. For packet routing part, we design and develop our system by using open-source software and necessary library and install to Routing Management PC.

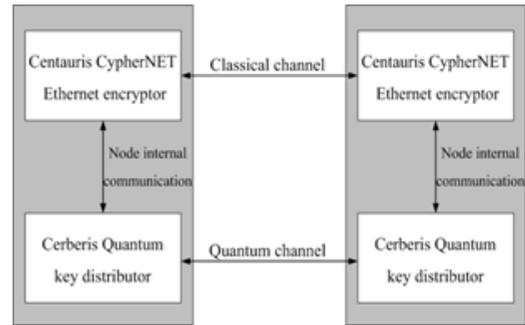
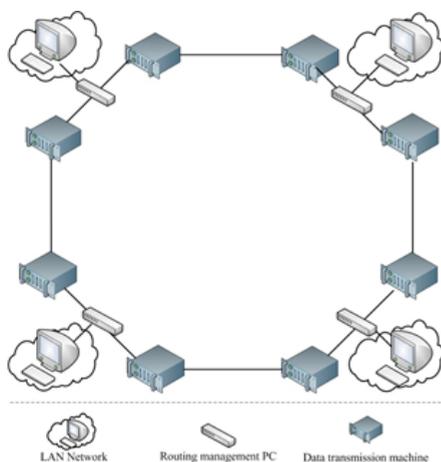


Figure 4. Network Connectivity in Testing & Structure of Data Transmission path.

B. Software

In our system, management software is deployed on Routing Management PC. The routing decision software is developed on Linux Ubuntu 9.04, Netbeans IDE 6.7.1, JNetPCap library and iproute2.

There are two main parts of the control software: 1.) Path selection software; 2.) routing software the path selection software is the first part where packets are filtered. It screens only secured packets are travelled through the QKD system and also verifies that secured packets are passed from the appropriated interface. The key method is to split secured packets to the QKD system and let the non-secure packets go to the general network, as shown in Figure 6. The routing software is the inner part of the QKD system. This is involved only selected secured packets which travelled in QKD system. The main

operation is to route secured packets and manage the queue and buffer.

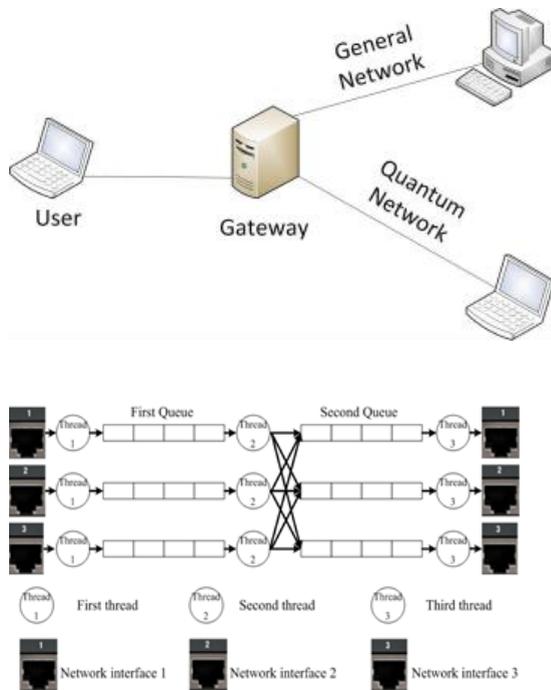


Figure 5 Packet Screening for QKD System & Queuing and Buffer System.

C. Operation

The operation of system on Routing Management PC is filtering and routing packet to the appropriated destination. In the system, each job is separated into threads. In each thread, queues are created to support storing and queuing with First-in First-out System

(FIFO) as shown in figure 6 and the pseudo code is shown in figure 7.

This system requires the packet to encapsulate with a new header for two main benefits in our QKD system. The first benefit is to use this new header for support our QKD network, routing can redirect quicker in our designated network. The second benefit is to guarantee that the secured packets are only travelled in our secured QKD network.

Queues are created to support each interface separately. There are two parts of queue in our system and each queue has its own duty. The first queue is the buffer for receiving packets. The second queue is the buffer for sending packets.

The thread of the management system is separated into three parts based on the job. The first thread handles incoming packets from its own interface and puts captured packets into the first queue. The second thread removes packets from the first queue, finds their destination, and then replaces the Ethernet header with an appropriate header and inserts the modified packet into the second queue. The third thread removes packets from the second queue and transmits the packets to the corresponding interface.

Broadband Implementation and services

For the remote villages, most of the villages are on the mountains or surrounded by mountains. From Table 1, there are approximately the total of 1,823,898 populations with the average of 465 people per village. Household locations are scattered and unevenly. Some of them can be found as a group of 20 to 30 average households. In the rural area, as shown in Table 1, there are approximately 10,199,329 populations, with an average of 648 people per village. In summary, the remote villages are the areas with very low density, while the rural villages are the areas with sparse residential density, as shown in figures 7 and 8, respectively. In the last mile of implementation for both types of areas, descriptive rural and remote locations can have a relatively higher total cost of ownership in terms of transportation and maintenance, including labour and construction costs, even though prices for hardware and software are dropping.



Figure 7. A remote village in the north of Thailand

Non-availability of reliable power supply

The reliable grid power supply in Thailand has not been developed as fast as the spread of telecommunication and broadband infrastructure, especially in the remote areas. About 5-10% of the 3,920 villages do not have any electricity or do have insufficient power source. In this case, optional power supply such as solar power is considered to be a self-sustainable and capable power to broadband and mobile equipment. Nonetheless, according to our survey information, there is only 1-2% of the rural area with such power constraints.

Infrastructure issues

As seen, the growth of broadband penetration in remote areas is one of the challenges since there is insufficient infrastructure or backhaul. Implementing a broadband or



mobile infrastructure in the remote area needs more specialists and higher cost of ownership for which private network operators find it unlikely to justify the investment over that long-distance network with low population density¹². Therefore, last-mile implementation should be reliable, affordable, scalable and financial viability. Various technologies may be suitable for last-mile broadband implementation as the backhaul in the remote areas such as fiber (Passive Optical network: GPON), satellite or microwave. Each of these technologies has its benefits and drawbacks in terms of affordability, performance and total cost of ownership (TCO). As a result, no single technology solution can fit all scenarios in remote areas. About 60% of the 3,920 villages do not have any existing internet access (no available network connectivity previously). However, according to our survey information, there are no such obstacle for most of the rural area where internet accesses thru public and/or private network providers already exist.

Broadband model in simulation

With the mentioned technical constraints in the previous section, for broadband implementation, there are two main considerations needed to find solutions for the remote area. Since in the rural area there already has been existing network infrastructure and access, the second solution is the only aware. The use of geographical distribution is derived into a development plan with clustering techniques such as K-means Clustering or Self-Organizing Map¹³. With these clustering approaches, the broadband infrastructure can divide the remote villages into several clusters in terms of infrastructure issues and a lack of knowledge. In order to achieve economic constraint, an optimal location in a cluster is determined by solving an optimization problem:

Maximize utility functions $U = \text{Sum}(w^*f(x))$,

Subject to $g(x) \leq 0$,

$h(x) = 0, (1)$,

where x = considered factors shown in Table 2, $g(x)$ is inequality constraints and $h(x)$ is equality constraints.

Table 2. Considered factors in the optimization problem

Factors	Description
Users	Stakeholders, Gender, Age, Internet experience, Self-efficacy, Education
Physical	Location, geographic limitation, Accessibility, Landmarks) School, Temple, Hospital, etc
Social	Usages, Activities, federal, state, and local agencies
Facility	Electricity, Water, Energy
Infrastructure and Communication	Current Broadband and mobile service
Cost	Implementation and Maintenance

As a result, the broadband implementation solution provides two layers of services: 1) network infrastructure (backhaul) and 2) digital services and applications via Wi-Fi technology and a learning center. For the remote villages, first, if applicable, the fiber (Passive Optical Network: GPON) technology is exploited with an optical line termination (OLT) that is installed at the optimal location in a cluster as shown in Figure 8. There are a total of 881 OLTs to support 4,760 services (customer-premises equipment (CPE) or optical network units (ONUs)) in the 1,909 remote villages

(previously, there was no existing internet infrastructure). This technology can support high-speed internet access with more than 30/10 Mbps data rate (download/upload) per service point (ONU). In case of geographic limitation over too long distance for the fiber technology in terms of technical and cost limitations, the broadband satellite capacity can be exploited to provide an internet backhaul for broadband services with more than 30/5 Mbps data rate (Download/Upload) per a service point (CPE) at remote sites.

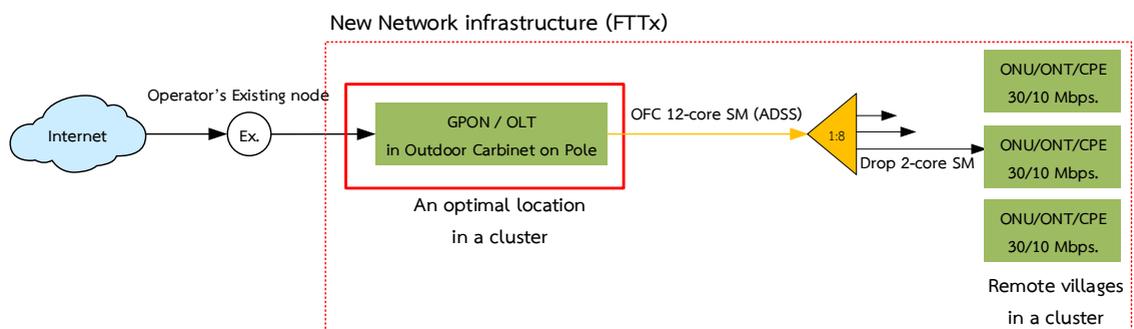


Figure 8. GPON network infrastructure (backhaul)

Discussion

The simulation is to verify the concept algorithm from three main perspectives: 1.) Data Transmission: To verify an end-to-end connection is feasible for the actual implementation.

2.) Security: to verify that system does not expose the information to the outside network.
3.) Performance: to compare with general Ethernet network in high and low traffic scenarios.

```
Construct Thread1, Thread2, Thread3
Construct Queue1[ ], Queue2[ ]
THREAD1( )
int_Name ← get available interface number
Pkt_cap ← capture packets from int_Name
Insert pkt_cap to Queue1[int_Name]
THREAD2( )
REPEAT WHILE true
IF Queue1 is not empty
THEN
Pkt_Queue1 ← packet removed from Queue1
Proper_Int ← find proper interface for send
packet from Queue1
pkt_Edited ← replace a new Ethernet header
of pkt_Queue1
put pkt_Edited into Queue2[Proper_Int]
ENDIF
END REPEAT
THREAD3( )
REPEAT WHILE true
IF Queue2 is not null
THEN IF Queue2 is not empty
THEN
Remove packet from Queue2
Send the packet off
ENDIF
ENDIF
END REPEAT
```

Figure 9. Algorithm of Queuing System for QKD system

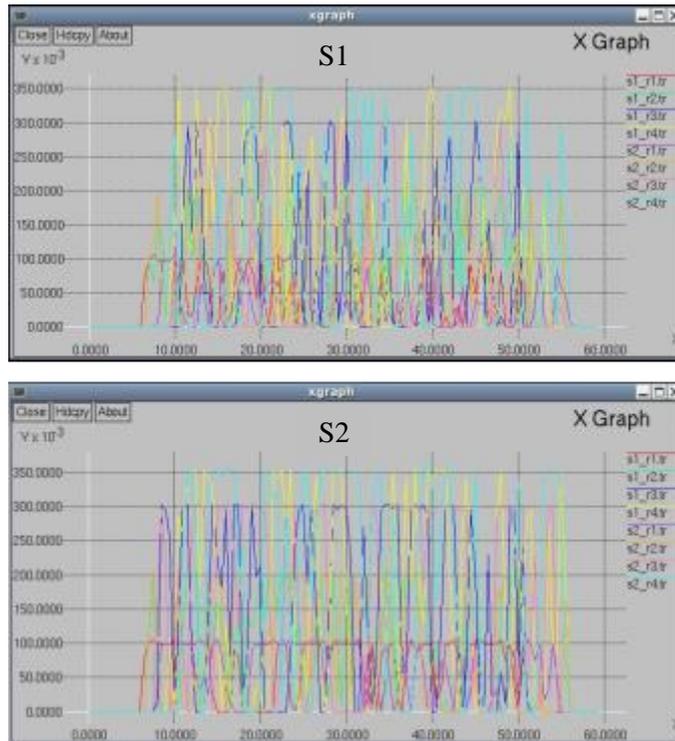


Figure 10. Graphs show a comparison of network throughput between the QKD system (s1) and normal traffic (s2) in high traffic situation

A. Data Transmission

The result from the system is shown that all connected QKD system is able to exchange the data in the shortest path appropriately. The queue is required to be prepared on a large scale in case high traffic is generated; otherwise, it may cause packet loss. During the simulation on a large scale, at least 100 MB is recommended for a buffer in case high traffic occurs.

B. Security

Key is relied on QKD system which is

distributed by Quantum channel so sniffer cannot trap the distributed key. In the case that the sniffer traps the key, the QKD system is detected, and the key is ignored and resent. If the attacker attempts to trap and recreate the key, QKD can detect this key as an error because of the quantum property in BB84. Therefore, the key transmission can be trusted with the system. However, the transmission and queuing system is required to be trusted; otherwise, it can be manipulated or attacked by the intruder.

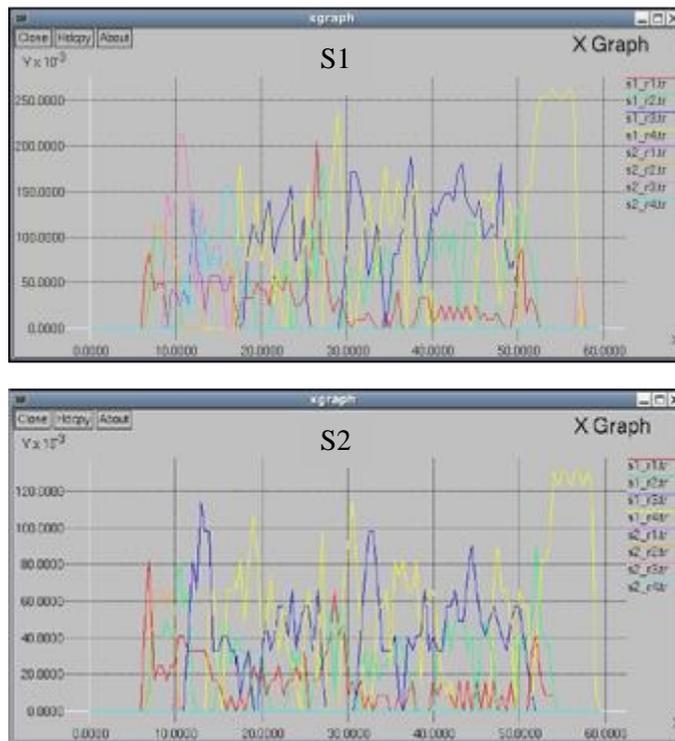


Figure 11. The comparison of network throughput between QKD system (s1) and normal traffic (s2) in low traffic situation

C. Performance

We compare the general network using Ethernet LAN and our QKD system by using NS-2 simulation. The simulation uses the actual delay and behaviour that has been recorded from the real hardware (Ceberis) as well as the packet encrypter (Centauris CypherNet).

Figure 10 shows the comparison of network throughput between QKD system (s1) and normal LAN (s2) in high traffic situation. The raw data result shows that QKD system has lower throughput than general normal

network approximately 12%. This is caused by the delay of key distribution and packet application (e.g., video conference), which impacts to the total time of large file transfers (e.g., 4 GB file size). As a result, a complex network structure with high traffic may need an improved concept of QKD system.

Figure 11 shows the comparison of network throughput between QKD system (s1) and Ethernet LAN (s2) in low traffic situation. The raw data result shows that QKD system does not has lower throughput than general



normal network on average. As a result, the QKD system with mixed contents in low volume does not impact the throughput performance when compared with normal network. Therefore, as a secure channel with low volume, QKD system has a sufficient performance to operate.

Conclusion

In this article, we propose a network management system for QKD. This system is using the high security of a point-to-point quantum channel to connect a network based on actual broadband infrastructure in Thailand. The objective of the system is to provide connectivity, convenience, and low cost at the application level.

Since the quantum protocol can provide the strong security shown in BB84 and B92, key distribution is used in this secured channel. Quantum cryptography can provide the feature that guarantees no sniffer. Once the sniffer traps the quantum message, the QKD system can be detected. Also, the recreated or cloned quantum message is infeasible with current technology. Then, quantum channel provides the strong security for our QKD system.

Our QKD system is designed by using routing management PC and data transmission machine. The design is based on the assumption

that quantum channels are trusted hosts and physical protection is provided for the machine. These two devices are designed to connect the quantum channel as a network as well as filter and routing packet.

The simulation in our system uses the actual data from Ceberis and Centauris CypherNet and actual infrastructure of Thailand's broadband infrastructure. The result shows that QKD system provides connectivity, security and performance in low volume scenarios. However, during the high traffic is generated the delay from encrypter and key distribution is impacted the result by approximately 12% compared to normal network and recommend at least 100 MB channel for QKD system. Therefore, QKD system is acceptable and feasible in secure network for low volume from our simulation. In case of high usage, the results are recommended for at least 100 MB bandwidth channel for QKD specifically.

Acknowledgment

For this paper, we would like to thank faculty of Engineering Thammasat University, Thammasat University.

This research was based on by the National Broadcasting and Telecommunications Commission (NBTC) project consulted by Thammasat University. The authors gratefully acknowledged the support of NBTC. Any opinions,



findings, and conclusions or recommendations expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the view of NBTC.

Reference

1. Denning DE. Cryptography and Data Security. Purdue University. USA: Addison-Wesley Publisher Company; 1945.
2. Bennett CH, Brassard G. Quantum cryptography. Public key distribution and coin tossing. Proceedings of IEEE Int. Conf. Computers, Systems, and Signal Processing; Dec 91-2, Bangalore, India; 1984. p.175-9.
3. Elliott C, Pearson D, Troxel G. Quantum cryptography in practice. Proceedings of ACM SIGCOMM 2003; Karlsruhe. Germany. Aug. 2003:227-38.
4. Norbert L. Quantum key distribution, Institute for Quantum Computing University of Waterloo:1-10.
5. Zhang T, Aheng-Fu H, Xiao-Fan M, Guang-Can-G. Extensible router for multi-user quantum key distribution network. arXiv:quant-ph/0608238 2006;1-3.
6. Heisenberg W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. Zeitschrift für Physik 1927;43:172-98.
7. Eli B, Shamir A. Differential cryptanalysis of the data encryption standard. Springer Verlag;1993.
8. Ferguson N, Schroeppel R, Whiting D. A simple algebraic representation of Rijndael. Proceedings of Selected Areas in Cryptography. Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag. 2001:103-11.
9. Simple algebraic representation of Rijndael. In Selected areas in cryptography SAC 01, LNCS 2259 (pp. 103-111)
9. Bennet H, Brassard G. Quantum cryptography using any two non-orthogonal states. Phys Rev Lett 1992;68:3121-4.
10. Gisin N, Ribordy G, Tittel W, Zbinden H. Quantum cryptography. Rev Mod Phys. 2002;74:145-95
11. Steenstrup E. Routing in communications networks. Englewood. United State: Prentice Hall; 1995:1-399.
12. Hollifield A, Donnermeyer F. Creating demand: Influencing information technology diffusion in rural communities. Gov Inf Q 2003;20:135-50.
13. Kanungo T, Mount M, Netanyahu S, Piatko D, Silverman R, Wu Y. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation. IEEE Trans. Pattern Anal Mach Intell 2002;24:881-92.