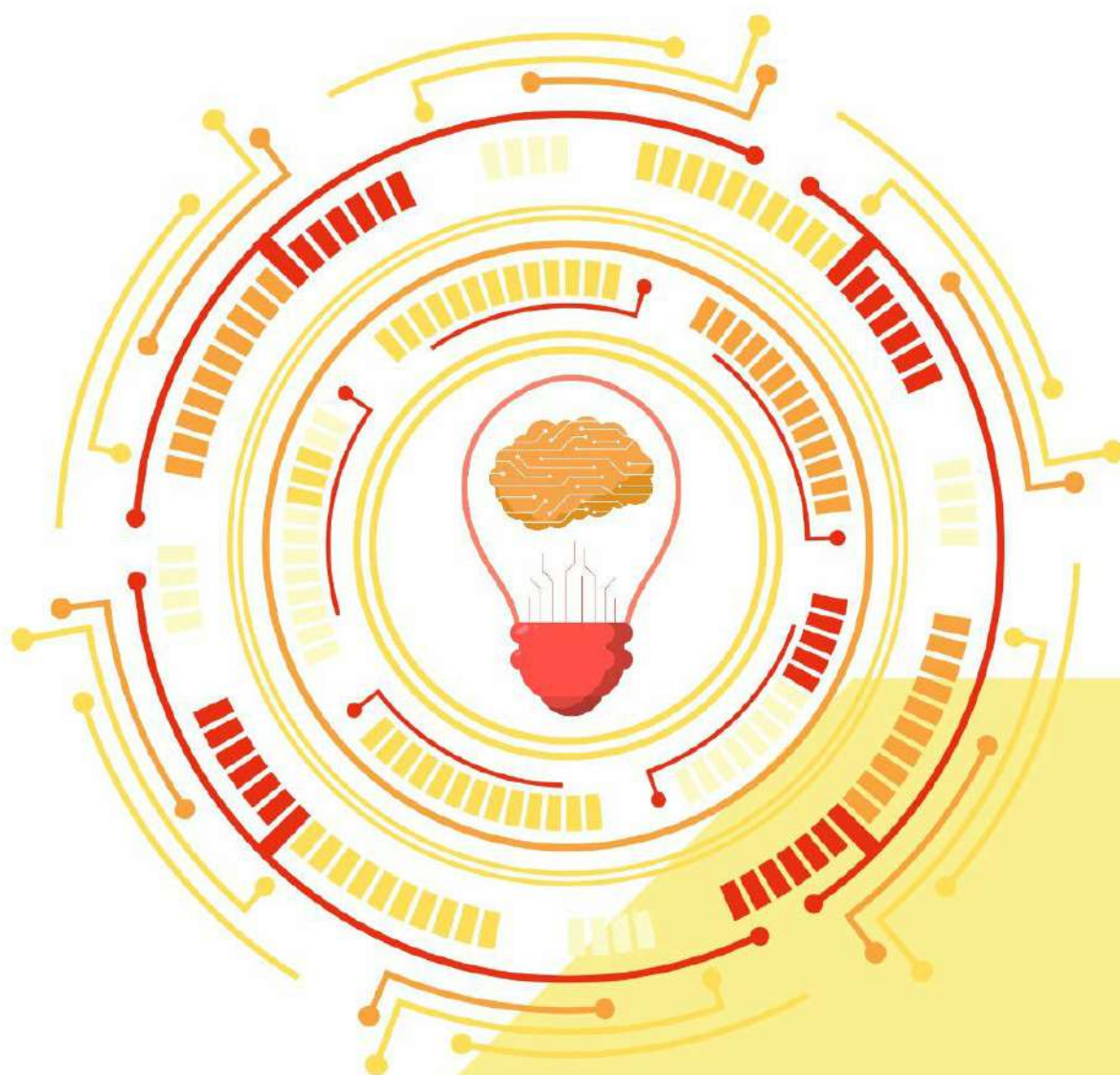




JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY THONBURI UNIVERSITY

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี



Vol. 10 No. 1 January - June 2026

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2569

ISSN 2730-3837 (Online)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม-มิถุนายน 2569



กำหนดการพิมพ์เผยแพร่

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธนบุรี กำหนดพิมพ์เผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ

1. ฉบับที่ 1 มกราคม- มิถุนายน
2. ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

พิมพ์ที่ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

วัตถุประสงค์ของการจัดพิมพ์วารสาร

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการ ในด้านวิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมการผลิต วิศวกรรมวัสดุ วิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม รวมทั้งสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง และในด้านวิทยาศาสตร์ ได้แก่ สาขาวิชา คณิตศาสตร์ สถิติ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา วิทยาศาสตร์การอาหาร วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาการสารสนเทศ หรือวิทยาศาสตร์ประยุกต์ และสาขาอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ ความคิดเห็น วิทยาการและเทคนิคใหม่ๆ อันนำไปสู่การพัฒนาทักษะและศักยภาพในการสร้างผลงานทางวิชาการ การค้นคว้า ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
3. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือและการนำเสนอบทความทางด้านการวิจัย และการบริการสังคม

เจ้าของ : มหาวิทยาลัยธนบุรี

ผู้ดำเนินการ : ดร.บัญชา เกิดมณี อธิการบดี มหาวิทยาลัยธนบุรี

บรรณาธิการวารสาร : ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร ผู้อำนวยการสำนักวิจัย มหาวิทยาลัยธนบุรี

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร. ปรัชญนันท์ นิลสุข
รองศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมชาติ มานพ
รองศาสตราจารย์ ดร. มานิตย์ ธิมาพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จริญญา แสงราช
รองศาสตราจารย์ ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์
รองศาสตราจารย์ สุรัชย์ ธรรมทวีกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนิต แต่งศรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยอดนภา เกตุเมือง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยธนบุรี
มหาวิทยาลัยธนบุรี
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

ฝ่ายจัดการ และเลขานุการ

ผศ.ดร.เอกรัตน์ นภกานต์
อาจารย์ผศ.จิระศักดิ์ส่งบุญแก้ว
อาจารย์ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม
อาจารย์นันทวัน นาคอร่าม
อาจารย์สิทธิศักดิ์ ทองสุข
อาจารย์วัฒนา เอกปมิตรศิลป์
อาจารย์อรรหาวิ เจ๊ะสะแม
อาจารย์ ดร.เอนก นามจันทร์
อาจารย์ศิรินทิพย์ ดีเนลา
ว่าที่ ร.ต.หญิงภัทรากร อาภาไพโร
อาจารย์สุดาร์ตน์ คงคาชาติ
อาจารย์วราภรณ์ สุ่มมาตย์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ศูนย์คอมพิวเตอร์และสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สำนักวิชาศึกษาทั่วไป/สำนักวิจัย
สำนักวิชาศึกษาทั่วไป/สำนักวิจัย

คณะกรรมการกลั่นกรอง (Peer Review)

รศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รศ.ดร.มานิตย์ อิมหาทา	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
รศ.ดร.ศราวุธ สุวรรณอัคร์	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
รศ.ดร. วงศ์วิศรุต เชื้อองสตุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เรวดี ศักดิ์ดุษฎีธรรม	มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์
ผศ.ดร.พรรษา เอกพรประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร. ประสพโชค ให้ทองคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.พิสิทธิ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.เมธา อึ้งทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.สถิตย์พงษ์ มั่นหล้า	วิทยาลัยดุสิตธานี
ผศ.ดร.กัม พรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผศ.ดร.พรสิริ ขาติปริชา	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รศ.ดร.ปัญญา สำราญพันธุ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผศ.ดร.นภดล เชนะโยธิน	มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์
ผศ.จิระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผศ.สมจินต์ อักษรธรรม	มหาวิทยาลัยธนบุรี
ผศ.ดร.น่านน้ำ บัวคล้าย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ตันติกร พิษณุพิบูล	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
ดร. อัครนันท์ พงศธรวิวัฒน์	สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
ดร. ยุทธนา คงจีน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.โสธมา เครือเมฆ	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
ดร. วสพร นิชรรัตน์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร. พรหมพักตร์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผศ. กิตติพงษ์ พุ่มโกชนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ดร. กัลยารัตน์ เชื้อวชาญ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร. จิรวดี อินทกาญจน์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ดร.อุทุมพร อยู่สุข	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.รณฤทธิ์ ชิงภูเขียว	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผศ.ดร.วรวิมล กังหัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ดร.ปวีตรา อวยจินดา	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์
ผศ.ดร.รัตติยา ชังชาติ	มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต
ดร.เกวลิ สืบญาติ	วิทยาลัยวิทยาศาสตร์การแพทย์เจ้าฟ้าจุฬาภรณ์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ฉบับนี้ จัดพิมพ์ขึ้นเป็นปีที่ 10 ฉบับที่ 1 (มกราคม - มิถุนายน 2569) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทุกบทความเน้นเนื้อหาที่น่าสนใจ และเป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเนื้อหาของบทความทั้งรูปแบบบทความวิชาการและบทความวิจัยที่ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา โดยแต่ละบทความผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อพัฒนาคุณภาพวารสารและเป็นประโยชน์สูงสุด

ในนามของกองบรรณาธิการของวารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ขอถือโอกาสเชิญชวนคณาจารย์ นักวิชาการและผู้สนใจเสนอบทความเข้ารับการตีพิมพ์เผยแพร่ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้อ่านทุกท่าน และขอขอบคุณที่ท่านผู้อ่านได้ให้ความสนใจวารสารฯ มาโดยตลอด

ดร.ฐิติพร กรัยวิเชียร

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม-มิถุนายน 2569

บทความวิจัย

- 1-9 เงื่อนไขการหารลงตัวโดยพิจารณาจากเลขโดดของจำนวนเต็มบวก
DIVISIBILITY CONDITIONS BASED ON DIGITS OF POSITIVE INTEGERS
นิติภูมิ อัครธิติสกุล, ญาณภัทร ทองร่อน, สุภัทรา เกิดมงคล, นฤเบศ ลาภยิ่งยง, กัญญาภัค ภัยแคล้ว,
ศุภานดา ด้านกุลประเสริฐคุณะครุศาสตร์, ภฤศรินทร์ ตั้งศิริดำรงค์, อนาวิล จงอัมกลาง
- 10-24 การประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของปล่องสุริยะที่ใช้วัสดุห่อหุ้มแบบน้ำหนักเบา
THERMAL PERFORMANCE EVALUATION OF A SOLAR CHIMNEY WITH LIGHTWEIGHT
ENCLOSURE MATERIALS
อาคม บุญปัญญา, อรุณยุพา บัวทรัพย์, เอกรัตน์ นกกานต์, ศรีสุตา จันศิริ, ชัยพร สุภาหิตานุกุล,
ศุภประดิษฐ์ มาสงค์
- 25-38 กรอบแนวคิดเชิงระบบสำหรับการประยุกต์ใช้บล็อกเชนเพื่อความปลอดภัยและความโปร่งใสใน
การเทียบโอนผลการศึกษา
A SYSTEMIC CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR APPLYING BLOCKCHAIN TO ENHANCE
SECURITY AND TRANSPARENCY IN ACADEMIC CREDIT TRANSFER
ปฐมพงษ์ ฤกษ์สมุทร, ธัญญรัตน์ น้อมพลกรัง, จิรพันธ์ ศรีสมพันธ์
- 39-50 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับวิเคราะห์โรคในใบ
ข้าวโพด
APPLICATION OF DEEP LEARNING TECHNOLOGY TO CREATE A WEB APPLICATION
FOR CORN LEAF DISEASE ANALYSIS
อัครเดช อินทชัย, ธนวัฒน์ ยอดดำเนิน, อนัน หยวักวัด, ปรีชาภรณ์ ชันบุรี
- 51-68 การทำนายพฤติกรรมการอบแห้งกระชายขาวภายใต้สภาวะอากาศด้วยแบบจำลองโครงข่าย
ประสาทเทียม
PREDICTION OF VACUUM DRYING KINETICS OF FINGERROOT USING ARTIFICIAL
NEURAL NETWORK MODELS
ภาณุศักดิ์มูลศรี, สัณชัย ราเพยพัฑ, อภิเดช บุญเจือ, อำพล พิชัยเชิด, วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ,
ศรัณย์ คัมภีร์ภัทร, ไผ่ตรีธรรมมา, วัชรราภรณ์ จรโคกรวด
- 69-80 การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา
THE DEVELOPMENT OF AUDIO MEDIA FOR LEARNING TO USE GOOGLE DOCS FOR
THE VISUALLY IMPAIRED
พุทธินันท์ นาคสุข, คณารักษ์ ศรีสมบุรณ์, สรวิศ เฉลิมแสน

- 81-94 การวิเคราะห์ความเสียหายของถังต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวที่ระบุเป็นเหล็กกล้าไร้
สนิมเกรด 304 จากระบบเปลวไฟโดยตรง: กรณีศึกษาโรงงาน SME
FAILURE ANALYSIS OF A REPORTED GRADE 304 STAINLESS STEEL COCONUT
FLOWER VINEGAR BOILER USING A DIRECT FLAME HEATING SYSTEM: AN SME CASE
STUDY
พิชา พันธุ์มงคล, เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์, วิบูลย์ ประทุมรัตน์, กฤษณะ ภิสิทธิ์วรรณ,
เกริกขจร ถนัทรบ, เขต บุราคร, วิษณุ พึ่งขุนทด
- 95-105 การพัฒนาระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้
เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
DEVELOPMENT OF A FACE DETECTION SYSTEM FOR SUSPECT ALERT VIA CLOUD
COMPUTING USING INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY
จิรวิญญู ดีเจริญจิตพงศ์, พลวัฒน์ ต่อตระกูล, โกเมศ ศุภักธัญญากิจ, ดุสิตา ปานสุวรรณ,
ลัดดา เทียนงาม

บทความวิชาการ

- 106-118 ชีววิทยาสังเคราะห์ : ความหมายและการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย
SYNTHETIC BIOLOGY :MEANING AND APPLICATION IN THAILAND
วรพันธ์ บุญชัย

Received: sep 1, 2025

Revised: Jun 16, 2026

Accepted: jun 22, 2026

DIVISIBILITY CONDITIONS BASED ON DIGITS OF POSITIVE INTEGERS

Nitiphoom Adsawatithisakul¹, Yanapat Tongron¹, Supattra Kerdmongkon¹,
Narubet Lapyingyong¹, Sukanda Dankunprasert², Presarin Tangsiridamrong³,
Kanyaphak Paikhlaew¹, Anawin Chongaumklang^{4*}

¹Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University

²Faculty of Education, Mahasarakham University ³Surawiwat School

Suranaree University of Technology

^{4*}Faculty of Science, Chulalongkorn University

Corresponding Author: e-mail^{4*} anawinchongaumklang@gmail.com

Abstract

In this research, we study the necessary and sufficient conditions for any positive integer N to be divisible by a given positive integer m whenever $N \geq m$. The conditions are related to digits in each place value of the positive integer N . Applications of these conditions are also provided via examples and corollaries. Some of the examples and corollaries show that our main results are generalizations of previous results.

Keywords: digit, place value, divisibility

Introduction

There are several studies concerning divisibility of integers. In 2007, Konick and Mercier (Konick & Mercier, 2007) proposed an interesting divisibility-test problem in the item 323: Let N be a positive integer whose decimal representation is

$$N = a_n 10^n + \cdots + a_2 10^2 + a_1 10 + a_0,$$

where $0 < a_n \leq 9$ and for $k = 0, \dots, n-1, 0 \leq a_k \leq 9$.

Show that

- $3|N \leftrightarrow 3|[a_n + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0]$.
- $4|N \leftrightarrow 4|[10a_1 + a_0]$.
- $6|N \leftrightarrow 6|[4(a_n + \cdots + a_2 + a_1) + a_0]$.
- $7|N \leftrightarrow 7|[(100a_2 + 10a_1 + a_0) - (100a_5 + 10a_4 + a_3) + (100a_8 + 10a_7 + a_6) - \cdots]$.
- $8|N \leftrightarrow 8|[100a_2 + 10a_1 + a_0]$.
- $9|N \leftrightarrow 9|[a_n + a_{n-1} + \cdots + a_1 + a_0]$.
- $11|N \leftrightarrow 11|[a_n - a_{n-1} + \cdots + (-1)^n a_0]$.

Recently in 2021, Jampawai (Jampawai, 2021) studied conditions on digits in the places of positive integers divisible by 7. He finds that $7|N$ if and only if 7 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, 3, 2, -1, -3, -2, 1, 3, 2, -1, -3, -2, ..., respectively, of the positive integer N . His idea is motivated by Nahir's research [3-4]. In comparison to problem (d) presented by Konick and Mercier, Jampawai's statement offers greater ease of application.

Indeed, a group of students from Chaiyabhum Bhakdeechumphon School, Chaiyabhum, Thailand, applied Jampawai's idea to study conditions on digits in the places of positive integers divisible by 13. They also presented their results in 2023 Mathematical mini-Project contest of Nakhon Ratchasima Rajabhat University Science Week, Nakhon Ratchasima, Thailand. However, their results have not yet been published.

Alongside these ongoing explorations, further formal studies on the divisibility of integers can be seen in [5-6], for example.

In this work, we study the necessary and sufficient conditions for any positive integer N to be divisible by a given positive integer m whenever $N \geq m$. We also solve some parts of the Konick and Mercier's problems by our main theorem and show that Jampawai's result is a special case of our main theorem.

Main Results

Throughout this section, let α be a positive integer such that

$$10^\alpha \equiv \beta \pmod{m},$$

where m is any positive integer, let

$$N = \sum_{i=0}^n 10^i a_i$$

be an $(n+1)$ -digit positive integer (i.e. $a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0$) with $N \geq m$, and let

$$n = \alpha k + l$$

for some integers k, l with $0 \leq l < \alpha$. The following theorem shows the necessary and sufficient conditions for N to be divisible by m .

Theorem 1. $m|N$ if and only if

$$m \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} \beta^j \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} b_i a_{\alpha j+i} \right) + \beta^k \sum_{i=0}^l b_i a_{\alpha k+i} \right],$$

where $b_i \equiv 10^i \pmod{m}$ for any $i \in \{0, 1, 2, \dots, \alpha-1\}$.

Proof. For any $j \in \{0, 1, 2, \dots, k-1\}$, observe that

$$\sum_{i=0}^{\alpha-1} 10^{\alpha j+i} a_{\alpha j+i} \equiv \sum_{i=0}^{\alpha-1} \beta^j 10^i a_{\alpha j+i} \pmod{m}.$$

Consider

$$\begin{aligned} N &= \sum_{i=0}^n 10^i a_i \\ &= \sum_{i=0}^{\alpha k-1} 10^i a_i + \sum_{i=\alpha k}^{\alpha k+l} 10^i a_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_{j=0}^{k-1} (10^{\alpha j + (\alpha-1)} a_{\alpha j + (\alpha-1)} + \cdots + 10^{\alpha j + 1} a_{\alpha j + 1} + 10^{\alpha j} a_{\alpha j}) \\
&\quad + \sum_{i=0}^l 10^{\alpha k + i} a_{\alpha k + i} \\
&= \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^{\alpha-1} 10^{\alpha j + i} a_{\alpha j + i} + \sum_{i=0}^l 10^{\alpha k + i} a_{\alpha k + i} \\
&\equiv \sum_{j=0}^{k-1} \beta^j \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} 10^i a_{\alpha j + i} \right) + \beta^k \sum_{i=0}^l 10^i a_{\alpha k + i} \pmod{m}
\end{aligned}$$

This completes the proof by the definition of $b_i \equiv 10^i \pmod{m}$ for any $i \in \{0, 1, 2, \dots, \alpha - 1\}$. $\square$

Corollary 2. Put $\beta = 1$. Then $m|N$ if and only if

$$m \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} b_i a_{\alpha j + i} \right) + \sum_{i=0}^l b_i a_{\alpha k + i} \right],$$

where $b_i \equiv 10^i \pmod{m}$ for any $i \in \{0, 1, 2, \dots, \alpha - 1\}$.

We next show the application of Corollary 2 when $m = 3$, $m = 9$, and $m = 101$ as follows:

Example 3. Put $m = 3$ or $m = 9$. Since

$$10^1 \equiv 1 \pmod{m},$$

we have that $\alpha = 1$. Then $n = k + l$ for some integers k, l with $0 \leq l < 1$ and so $n = k, l = 0$. It follows from Corollary 2 that $m|N$ if and only if

$$m \mid \left[\sum_{j=0}^{n-1} \left(\sum_{i=0}^0 b_i a_{j+i} \right) + \sum_{i=0}^0 b_i a_{n+i} \right],$$

where $b_0 \equiv 10^0 \pmod{m}$. Observe that we can possibly put $b_0 = 1 \equiv 10^0 \pmod{m}$.

Consequently, we obtain that $m|N$ if and only if

$$m \mid \sum_{i=0}^n a_i.$$

This implies that $m|N$ if and only if m divides the sum on each digit in each place of the positive integer N . The following two sub-examples are applications of this statement: Recall that $m \in \{3, 9\}$.

1. Put $N = 12345678$ which is divisible by m . Observe that $a_0 = 8, a_1 = 7, a_2 = 6, a_3 = 5, a_4 = 4, a_5 = 3, a_6 = 2, a_7 = 1$ and so $8 + 7 + 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 36$ which is also divisible by m .
2. Put $N = 1234567$ which is not divisible by m . Observe that $a_0 = 7, a_1 = 6, a_2 = 5, a_3 = 4, a_4 = 3, a_5 = 2, a_6 = 1$ and so $7 + 6 + 5 + 4 + 3 + 2 + 1 = 28$ which is not divisible by m too.

Example 4. Put $m = 101$. Since

$$10^4 \equiv 1 \pmod{101},$$

we have that $\alpha = 4$. Then $n = 4k + l$ for some integers k, l with $0 \leq l < 4$. It follows from Corollary 2 that $101|N$ if and only if

$$101 \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} \left(\sum_{i=0}^3 b_i a_{4j+i} \right) + \sum_{i=0}^l b_i a_{4k+i} \right],$$

where $b_i \equiv 10^i \pmod{101}$ for any $i \in \{0, 1, 2, 3\}$. Observe that we can possibly put

$$\begin{aligned} b_0 &= 1 \equiv 10^0 \pmod{101}, \\ b_1 &= 10 \equiv 10^1 \pmod{101}, \\ b_2 &= -1 \equiv 10^2 \pmod{101}, \\ b_3 &= -10 \equiv 10^3 \pmod{101}. \end{aligned}$$

Consequently, we obtain that $101|N$ if and only if

$$101 \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} (a_{4j} + 10a_{4j+1} - a_{4j+2} - 10a_{4j+3}) + \sum_{i=0}^l b_i a_{4k+i} \right].$$

This implies that $101|N$ if and only if 101 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and $1, 10, -1, -10, 1, 10, -1, -10, 1, 10, -1, -10, \dots$, respectively, of the positive integer N . The following two sub-examples are applications of this statement:

1. Put $N = 1212303$ which is divisible by 101 . Observe that $a_0 = 3, a_1 = 0, a_2 = 3, a_3 = 2, a_4 = 1, a_5 = 2, a_6 = 1$ and so $3 + 10(0) - 3 - 10(2) + 1 + 10(2) - 1 = 0$ which is also divisible by 101 .
2. Put $N = 1212312$ which is not divisible by 101 . Observe that $a_0 = 2, a_1 = 1, a_2 = 3, a_3 = 2, a_4 = 1, a_5 = 2, a_6 = 1$ and so $2 + 10(1) - 3 - 10(2) + 1 + 10(2) - 1 = 9$ which is not divisible by 101 too.

We conclude from Example 3 and Example 4 as in the following two corollaries:

Corollary 5. For $m \in \{3, 9\}$, $m|N$ if and only if m divides the sum of all digits in each place of the positive integer $N \geq m$.

Corollary 6. $101|N$ if and only if 101 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and $1, 10, -1, -10, 1, 10, -1, -10, 1, 10, -1, -10, \dots$, respectively, of the positive integer $N \geq 101$.

We can deduce a simple practical fact from Corollary 6 as follows:

Corollary 7. If $\sum_{i=0} a_{4i} = \sum_{i=0} a_{4i+2}$ and $\sum_{i=0} a_{4i+1} = \sum_{i=0} a_{4i+3}$, then $101|N$ for an $(n+1)$ -digit positive integer $N \geq 101$, i.e., $a_n a_{n-1} \dots a_1 a_0$.

Example 8. By Corollary 7, the following integers are divisible by 101:

1. 1212 (because $2 = 2$ and $1 = 1$)
2. 23331 (because $1 + 2 = 3$ and $3 = 3$)
3. 679831 (because $1 + 7 = 8$ and $3 + 6 = 9$)
4. 9238167 (because $7 + 3 = 1 + 9$ and $6 + 2 = 8$)
5. 168456789 (because $9 + 5 + 1 = 7 + 8$ and $8 + 4 = 6 + 6$)

In another direction, putting $\beta = -1$ in Theorem 1 yields the simpler statement:

Corollary 9. Put $\beta = -1$. Then $m|N$ if and only if

$$m \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} b_i a_{\alpha j+i} \right) + (-1)^k \sum_{i=0}^l b_i a_{\alpha k+i} \right],$$

where $b_i \equiv 10^i \pmod{m}$ for any $i \in \{0, 1, 2, \dots, \alpha-1\}$.

We next show the applications of Corollary 9 when $m = 11$ and $m = 17$ as follows:

Example 10. Put $m = 11$. Since

$$10^1 \equiv -1 \pmod{11},$$

we have that $\alpha = 1$. Then $n = k + l$ for some integers k, l with $0 \leq l < 1$ and so $n = k, l = 0$. It follows from Corollary 9 that $11|N$ if and only if

$$11 \mid \left[\sum_{j=0}^{n-1} (-1)^j \left(\sum_{i=0}^0 b_i a_{j+i} \right) + (-1)^n \sum_{i=0}^0 b_i a_{n+i} \right],$$

where $b_0 \equiv 10^0 \pmod{11}$. Observe that we can possibly put $b_0 = 1 \equiv 10^0 \pmod{11}$.

Consequently, we obtain that $11|N$ if and only if

$$11 \mid \sum_{i=0}^n (-1)^i a_i.$$

This implies that $11|N$ if and only if 11 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and $1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, \dots$, respectively, of the positive integer N . The following two sub-examples are applications of this statement:

1. Put $N = 780197$ which is divisible by 11. Observe that $a_0 = 7, a_1 = 9, a_2 = 1, a_3 = 0, a_4 = 8, a_5 = 7$ and so $7 - 9 + 1 - 0 + 8 - 7 = 0$ which is also divisible by 11.
2. Put $N = 1780198$ which is not divisible by 11. Observe that $a_0 = 8, a_1 = 9, a_2 = 1, a_3 = 0, a_4 = 8, a_5 = 7, a_6 = 1$ and so $8 - 9 + 1 - 0 + 8 - 7 + 1 = 2$ which is not divisible by 11 too.

Example 11. Put $m = 17$. Since

$$10^8 \equiv -1 \pmod{17},$$

we have that $\alpha = 8$. Then $n = 8k + l$ for some integers k, l with $0 \leq l < 8$. It follows from Corollary 9 that $17|N$ if and only if

$$17 \left| \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \left(\sum_{i=0}^7 b_i a_{8j+i} \right) + (-1)^k \sum_{i=0}^l b_i a_{8k+i} \right|,$$

where $b_i \equiv 10^i \pmod{17}$ for any $i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$. Observe that we can possibly put

$$\begin{aligned} b_0 &= 1 \equiv 10^0 \pmod{17}, \\ b_1 &= -7 \equiv 10^1 \pmod{17}, \\ b_2 &= -2 \equiv 10^2 \pmod{17}, \\ b_3 &= -3 \equiv 10^3 \pmod{17}, \\ b_4 &= 4 \equiv 10^4 \pmod{17}, \\ b_5 &= 6 \equiv 10^5 \pmod{17}, \\ b_6 &= -8 \equiv 10^6 \pmod{17}, \\ b_7 &= 5 \equiv 10^7 \pmod{17}. \end{aligned}$$

Consequently, we obtain that $17|N$ if and only if

$$17 \left| \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j (a_{8j} - 7a_{8j+1} - 2a_{8j+2} - 3a_{8j+3} + 4a_{8j+4} + 6a_{8j+5} - 8a_{8j+6} + 5a_{8j+7}) \right. \\ \left. + (-1)^k \sum_{i=0}^l b_i a_{8k+i} \right|.$$

This implies that $17|N$ if and only if 17 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, -7, -2, -3, 4, 6, -8, 5, -1, 7, 2, 3, -4, -6, 8, -5, 1, -7, -2, -3, 4, 6, -8, 5, ..., respectively, of the positive integer N . The following two sub-examples are applications of this statement:

1. Put $N = 167901234572091$ which is divisible by 17. Observe that $a_0 = 1, a_1 = 9, a_2 = 0, a_3 = 2, a_4 = 7, a_5 = 5, a_6 = 4, a_7 = 3, a_8 = 2, a_9 = 1, a_{10} = 0, a_{11} = 9, a_{12} = 7, a_{13} = 6, a_{14} = 1$ and so $1 - 7(9) - 2(0) - 3(2) + 4(7) + 6(5) - 8(4) + 5(3) - 1(2) + 7(1) + 2(0) + 3(9) - 4(7) - 6(6) + 8(1) = -51$ which is also divisible by 17.
2. Put $N = 852467913$ which is not divisible by 17. Observe that $a_0 = 3, a_1 = 1, a_2 = 9, a_3 = 7, a_4 = 6, a_5 = 4, a_6 = 2, a_7 = 5, a_8 = 8$ and so $3 - 7(1) - 2(9) - 3(7) + 4(6) + 6(4) - 8(2) + 5(5) - 8 = 6$ which is not divisible by 17 too.

From Example 10 and Example 11, we have the following two corollaries:

Corollary 12. $11|N$ if and only if 11 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, ..., respectively, of the positive integer $N \geq 11$.

Corollary 13. $17|N$ if and only if 17 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions

place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, -7, -2, -3, 4, 6, -8, 5, -1, 7, 2, 3, -4, -6, 8, -5, 1, -7, -2, -3, 4, 6, -8, 5, ..., respectively, of the positive integer $N \geq 17$.

Moreover, Corollary 12 leads to a simpler statement as follows:

Corollary 14. If $\sum_{i=0}^n a_{2i} = \sum_{i=0}^n a_{2i+1}$, then $11|N$ for an $(n+1)$ -digit positive integer $N \geq 11$, i.e., $a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0$.

Example 15. By Corollary 14, the following integers are divisible by 11:

1. 1243 (because $3 + 2 = 4 + 1$)
2. 34353 (because $3 + 3 + 3 = 5 + 4$)
3. 895763 (because $3 + 7 + 9 = 6 + 5 + 8$)
4. 7148680 (because $0 + 6 + 4 + 7 = 8 + 8 + 1$)
5. 78987898 (because $8 + 8 + 8 + 8 = 9 + 7 + 9 + 7$)

Finally, we consider $m = 7$ and get the same statement in the main result of (Jampawai, 2021).

Example 16. Put $m = 7$. Since

$$10^3 \equiv -1 \pmod{7},$$

we have that $\alpha = 3$. Then $n = 3k + l$ for some integers k, l with $0 \leq l < 3$. It follows from Corollary 9 that $7|N$ if and only if

$$7 \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \left(\sum_{i=0}^2 b_i a_{3j+i} \right) + (-1)^k \sum_{i=0}^l b_i a_{3k+i} \right],$$

where $b_i \equiv 10^i \pmod{7}$ for any $i \in \{0, 1, 2\}$. Observe that we can possibly put

$$b_0 = 1 \equiv 10^0 \pmod{7},$$

$$b_1 = 3 \equiv 10^1 \pmod{7},$$

$$b_2 = 2 \equiv 10^2 \pmod{7}.$$

Consequently, we obtain that $7|N$ if and only if

$$7 \mid \left[\sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j (a_{3j} + 3a_{3j+1} + 2a_{3j+2}) + (-1)^k \sum_{i=0}^l b_i a_{3k+i} \right].$$

This implies that $7|N$ if and only if 7 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, 3, 2, -1, -3, -2, 1, 3, 2, -1, -3, -2, ..., respectively, of the positive integer N .

Corollary 17. $7|N$ if and only if 7 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, 3, 2, -1, -3, -2, 1, 3, 2, -1, -3, -2, ..., respectively, of the positive integer $N \geq 7$.

The application of Corollary 17 can be seen in (Jampawai, 2021). In conclusion, we can say that our main results are generalizations of (Jampawai, 2021).

Conclusions

Let α be a positive integer such that

$$10^\alpha \equiv \beta \pmod{m},$$

where m is any positive integer, let

$$N = \sum_{i=0}^n 10^i a_i$$

be an $(n+1)$ -digit positive integer (i.e. $a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0$) with $N \geq m$, let

$$n = \alpha k + l$$

for some integers k, l with $0 \leq l < \alpha$, and let

$$b_i \equiv 10^i \pmod{m}$$

for any $i \in \{0, 1, 2, \dots, \alpha - 1\}$. We have proved that $m|N$ if and only if

$$m \left| \sum_{j=0}^{k-1} \beta^j \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} b_i a_{\alpha j + i} \right) + \beta^k \sum_{i=0}^l b_i a_{\alpha k + i} \right|.$$

It follows from putting $\beta = 1$ that $m|N$ if and only if

$$m \left| \sum_{j=0}^{k-1} \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} b_i a_{\alpha j + i} \right) + \sum_{i=0}^l b_i a_{\alpha k + i} \right|.$$

On the other hand, putting $\beta = -1$ yields the fact that $m|N$ if and only if

$$m \left| \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \left(\sum_{i=0}^{\alpha-1} b_i a_{\alpha j + i} \right) + (-1)^k \sum_{i=0}^l b_i a_{\alpha k + i} \right|.$$

Although these facts may not be immediately practical, we yield some simpler conditions for specific values of m as follows:

1. For $m \in \{3, 9\}$, $m|N$ if and only if m divides the sum of all digits in each place of the positive integer $N \geq m$.
2. $101|N$ if and only if 101 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and $1, 10, -1, -10, 1, 10, -1, -10, 1, 10, -1, -10, \dots$, respectively, of the positive integer $N \geq 101$.
3. If $\sum_{i=0} a_{4i} = \sum_{i=0} a_{4i+2}$ and $\sum_{i=0} a_{4i+1} = \sum_{i=0} a_{4i+3}$, then $101|N$ for an $(n+1)$ -digit positive integer $N \geq 101$, i.e., $a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0$.
4. $11|N$ if and only if 11 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions

place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, ..., respectively, of the positive integer $N \geq 11$.

5. If $\sum_{i=0} a_{2i} = \sum_{i=0} a_{2i+1}$, then $11|N$ for an $(n+1)$ -digit positive integer $N \geq 11$, i.e., $a_n a_{n-1} \cdots a_1 a_0$.
6. $17|N$ if and only if 17 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, -7, -2, -3, 4, 6, -8, 5, -1, 7, 2, 3, -4, -6, 8, -5, 1, -7, -2, -3, 4, 6, -8, 5, ..., respectively, of the positive integer $N \geq 17$.
7. $7|N$ if and only if 7 divides the sum of products between each digit in the ones place, tens place, hundreds place, thousands place, ten-thousands place, hundred-thousands place, millions place, ten-millions place, hundred-millions place, billions place, ... and 1, 3, 2, -1, -3, -2, 1, 3, 2, -1, -3, -2, ..., respectively, of the positive integer $N \geq 7$.

Other practical divisibility conditions for specific positive integers can also be deduced from our main results.

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to the editor for their invaluable guidance and to the anonymous referees for their insightful feedback, both of which greatly enhanced the quality of this research.

References

- C. Hood. (2003). *Divisibility tests in different number systems and their applications*. [Senior Thesis] Millersville University. Pennsylvania, U.S.A.
- J.-M. D. Konick and A. Mercier. (2007). *1001 Problems in Classical Number Theory*. Providence Rhode Island: American Mathematical Society.
- T. Jampawai. (2021). Conditions of Digit in The Places of Positive Integers Divisible by 7, *Mathematical Journal by The Mathematical Association of Thailand Under The Patronage of His Majesty The King*, 66(705), 52-64.
- Y. Nahir. (2008). On Divisibility Tests and The Curriculum Dilemma. *Sutra: International Journal of Mathematical Science Education*. 1(1), 16-29.
- Y. Nahir. (2003). Tests of divisibility. *International Journal for Mathematics Education in Science and Technology*, 34, 581-591.
- Y. Tongron and K. Paikhaew. (2022). The Number of Integers Divisible by a^k Except $a^{k+l}b$. *Science & Technology Asia*. 2022, 27(3), 132-136.

Received: Feb 25, 2026

Revised: Jun 4, 2026

Accepted: Jun 22, 2026

THERMAL PERFORMANCE EVALUATION OF A SOLAR CHIMNEY WITH LIGHTWEIGHT ENCLOSURE MATERIALS

Arkorn Boonpanya¹, Arunyupa Buasap¹, Akeratana Noppakant²
Srisuda Junsiri¹, Chaiporn Supahitanukool¹ and Supapradit Marsong^{1*}

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumtani University

²Faculty of Engineering, Thonburi University

E-mail: 6401436764007@ptu.ac.th, akeratana@trums.thonburi-u.ac.th, srisuda.j@ptu.ac.th,
arunyupa.b@ptu.ac.th, chaiporn.s@ptu.ac.th, supapradit.m@ptu.ac.th*

Abstract

Solar chimneys provide passive ventilation by converting solar radiation into buoyancy-driven airflow. While geometric optimization has been extensively studied, the influence of lightweight enclosure materials remains insufficiently quantified. This study experimentally and numerically evaluated the thermal performance of a solar chimney integrated with three lightweight materials: aerogel composite panel, polycarbonate twin-wall sheet, and expanded polystyrene sandwich board. A laboratory-scale prototype was constructed and tested under tropical outdoor conditions. Outlet air temperature, airflow velocity, and solar irradiance were recorded. A Python-based transient thermal model was developed and validated using the Mean Absolute Percentage Error. The aerogel configuration produced the highest temperature rise and thermal efficiency, with a temperature prediction error below 5%. Polycarbonate showed intermediate performance, while EPS exhibited the lowest thermal gain. The validated numerical model successfully reproduced experimental trends for all configurations. The findings demonstrate that lightweight material selection significantly influences solar chimney efficiency and should be considered a primary design variable.

Keywords: aerogel, lightweight material, MAPE, passive ventilation, polycarbonate, solar chimney, thermal modelling

Introduction

Solar chimneys have emerged as effective passive ventilation systems that operate through buoyancy-driven airflow generated by solar heating (Ahmed et al., 2022; Aziz & Elsayed, 2022; Haji Molla Ali Tork et al., 2024; Murena et al., 2022). Increasing global demand for energy-efficient buildings has intensified research into passive cooling strategies that reduce mechanical energy consumption (Singh & Kumar, 2024). The operating principle of a solar chimney relies on the temperature differential between heated air within the channel and ambient air, which induces upward flow. Recent studies have focused primarily on geometric optimization. Aziz and Elsayed (Kumar Mandal et al., 2024) demonstrated that chimney height and collector width significantly affect airflow velocity. (Fu et al., 2022) reported improved energy efficacy using divergent chimney structures with sloped absorbers. Gong et al. (Long et al., 2022) developed a theoretical model for high-rise solar chimneys and identified an optimal configuration for uniform flow distribution. However, these studies assumed fixed enclosure materials.

Material-related investigations have concentrated mainly on ground-layer energy storage rather than enclosure panels. (Cuce, 2024; Saleh et al., 2023; Yoo et al., 2023) analyzed natural ground materials

such as sand and basalt for thermal storage enhancement. (Fu et al., 2022; Saleh et al., 2023) reviewed absorber coatings and hybrid enhancements. Lightweight structural wall materials for the chimney enclosure have not been systematically compared.

Aerogel composites exhibit extremely low thermal conductivity and high insulation capacity (Fu et al., 2022). Polycarbonate twin-wall sheets offer moderate thermal resistance with acceptable solar transmittance (Long et al., 2022). EPS sandwich boards provide cost-effective insulation but limited solar transmission. The integration of these materials into solar chimney enclosures may alter both solar heat gain and conductive losses, thereby affecting buoyancy generation.

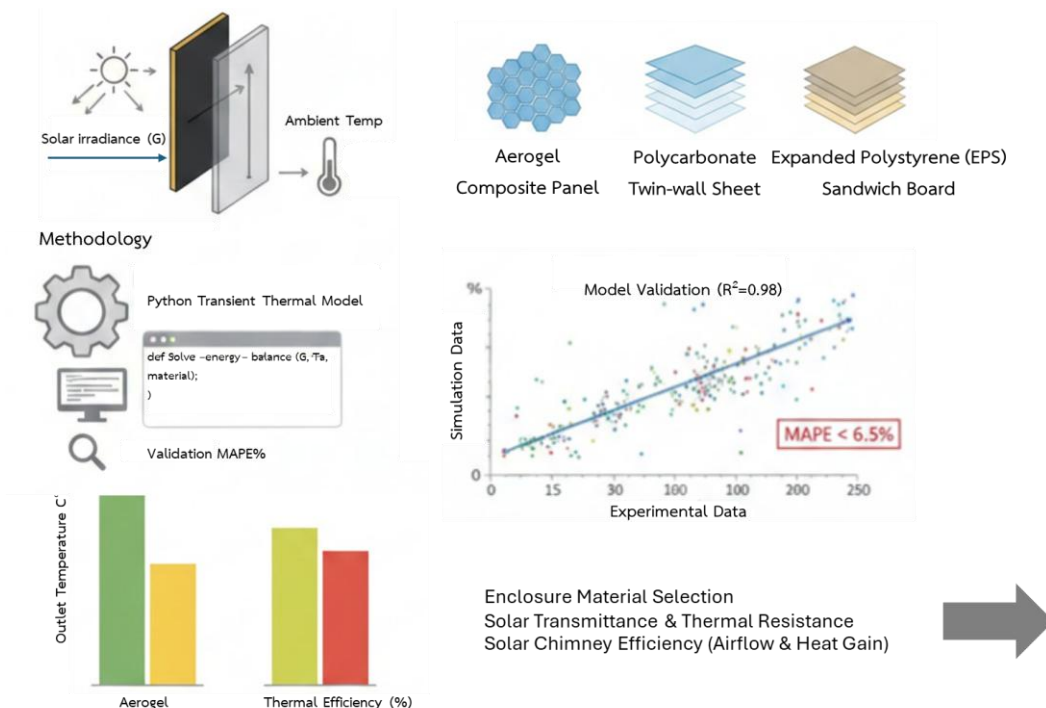


Figure 1 Graphical frame works

Numerical models validated against experimental data have been widely used to assess solar chimney behaviours (Brey et al., 2018; Zhu et al., 2025). The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) metric has been reported in related thermal modelling studies as a standard indicator of model fidelity (Perevozchikova et al., 2014). However, Python-based simulation frameworks specifically designed to compare multiple lightweight wall materials in a unified thermal evaluation model remain absent from the literature. a unified numerical framework for comparing multiple lightweight enclosure materials under identical boundary conditions. This research addresses that gap by integrating experimental testing with a Python-based validated thermal model.

Literature Review and Research Gap

Previous research has primarily addressed geometric optimization (Fu et al., 2022; Gong et al., 2024; Kumar Mandal et al., 2024; Long et al., 2022), hybrid energy integration (Haji Molla Ali Tork et al.,

2024), or ground storage materials (Saleh et al., 2023; Yoo et al., 2023). Material selection for chimney wall enclosures has remained secondary and typically fixed.

Lightweight materials have been widely applied in building envelopes but rarely evaluated in solar chimney channels. No experimental study has systematically compared aerogel, polycarbonate, and EPS in a controlled chimney configuration with validated numerical simulation.

Table 1 Literature Matrix

Author (Year)	Method	Focus	Key Finding	Limitation	Relevant to This Study
(Murena et al., 2022)	Experiment CFD	+ Solar airflow	chimney CFD predictions agreed with experimental airflow trends	Wall material properties not varied	
(Aziz & Elsayed, 2022; Kumar Mandal et al., 2024)	CFD	Geometric parameters	Increased chimney height improved velocity and temperature rise	Enclosure material fixed	
(Cuce, 2024; Saleh et al., 2023)	CFD Experiment	+ Ground materials	storage Sand improved thermal retention	Chimney wall materials not investigated	
(Perevozchikova et al., 2014)	CFD Experiment	+ Natural storage	stone Basalt increased capacity effects	heat Structural unchanged	enclosure
(Fallah & Valipour, 2022; Yoo et al., 2023; Zhu et al., 2025)	Numerical	Filter integration	Flow resistance affected outlet velocity	Collector and materials constant	wall
(Fu et al., 2022; Kumar Mandal et al., 2024)	Numerical Experiment	+ Divergent design	chimney Sloped absorber enhanced performance	Material influence separated	not
(Gong et al., 2024; Long et al., 2022)	Theoretical	High-rise solar chimney	Optimal geometry derived analytically	Thermal properties assumed constant	
(Ahmed et al., 2022; Toghraie et al., 2018)	Experimental	PV/solar chimney	Gravel improved PV cooling	Chimney enclosure material not compared	
(Bagheri & Ghodsi Hassanabad, 2023)	CFD and energy modeling	optimization to achieve maximum power outlet.	SCPP geometry has an optimal chimney diameter	optimal chimney diameter for its dimensions	

Author (Year)	Method	Focus	Key Finding	Limitation Relevant to This Study
(Xu & Zhou, 2018)	Numerical simulation (TPP + EPPRC)	the degree of divergence	vortex/backflow, and performance drop	material/structural-lightweight and real-world constructability analysis
This study	Experiment + Python model	Aerogel, polycarbonate, EPS	Compared thermal response under identical geometry	Limited to laboratory scale and tropical climate

Research Gap Existing studies have primarily focused on geometric configuration, hybrid integration, or ground-based thermal storage. In most cases, chimney enclosure materials were treated as constant parameters. Comparative evaluation of lightweight wall materials under controlled experimental conditions remains limited. This study provides an experimental and numerical assessment of selected lightweight materials within a unified thermal framework.

Therefore, the present study contributes:

1. Experimental comparison of three lightweight chimney enclosure materials.
2. Development of a Python-based transient heat-mass balance model.
3. Validation using statistical performance metrics.
4. Quantitative ranking of materials based on thermal efficiency and prediction accuracy.

Methodology

Research Framework

A time-resolved numerical model was developed to evaluate the thermal performance of a solar chimney integrated with alternative lightweight cover materials. The computational framework was structured into four sequential stages: (i) material parameter definition, (ii) geometry and boundary condition specification, (iii) nonlinear thermo-fluid iterative solution, and (iv) statistical performance evaluation.

The algorithm operated at discrete time intervals using measured or synthetic environmental data. For each candidate material, the model computed outlet air temperature, buoyancy velocity, mass flow rate, and thermal efficiency. A fixed-point iteration scheme was employed to resolve the nonlinear coupling between airflow and temperature rise.

Material Property Definition

Each candidate material was characterized by five primary parameters:

- Thermal conductivity $k_{[W/m\cdot K]}$
- Density $\rho_{[kg/m^3]}$
- Specific heat capacity $C_p_{[J/kg\cdot K]}$
- Thickness $t_{[m]}$
- Solar transmittance $\tau_{[-]}$

Table 2 Material properties

Material properties:	
A. EPS sandwich board:	$k = 0.038 \text{ W/m-K}$
B. Aerogel composite panel:	$k = 0.015 \text{ W/m-K}$
C. Polycarbonate twin-wall sheet:	$k = 0.19 \text{ W/m-K}$

Each configuration was tested for five clear-sky days between 08:00 and 16:00.

These parameters govern conductive heat transfer and solar transmission through the chimney cover. The absorber surface was assigned a constant absorptivity α , ensuring that differences in performance were attributed solely to material properties.

All materials were evaluated under identical geometric and climatic conditions to ensure comparative assessment controlled.

Solar Chimney Geometry and Assumptions

The solar chimney was defined by:

- Height H
- Width W
- Air gap depth D
- Absorber area A_c

The following assumptions were adopted:

1. One-dimensional vertical airflow.
2. Uniform air properties within each timestep.
3. Negligible radiative exchange between internal surfaces.
4. Constant external convective heat transfer coefficient h_{ext} .
5. Ideal buoyancy-driven flow without mechanical assistance.

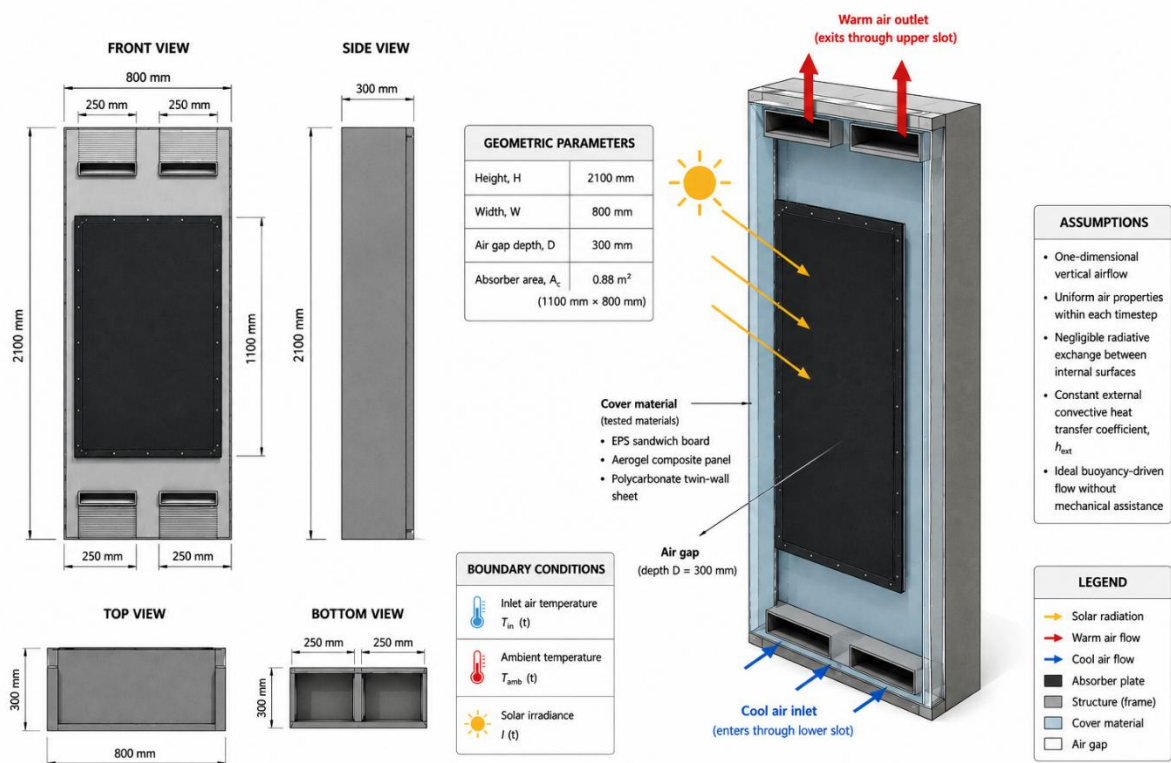


Figure 2 Solar Chimney Model Air density and specific heat were assumed constant for simplicity.

Boundary Conditions and Input Data-

Time-series input data were used as boundary conditions:

- Inlet air temperature $T_{in}(t)$
- Ambient temperature $T_{amb}(t)$
- Solar irradiance $I(t)$

The model was executed over the evaluation period with timestep resolution consistent with the available dataset. A peak irradiance timestep was separately analyzed to evaluate solver convergence behavior.

Governing Equations

1 Solar Heat Absorption

The absorbed solar energy at each timestep was calculated as

$$Q_{solar}(t) = I(t) A_c \tau \alpha \quad (1)$$

where τ was the material solar transmittance.

2 Heat Loss through the Cover

Heat transfer through the chimney cover was modeled using a combined conduction-convection approach. The overall heat transfer coefficient was expressed as

$$U = \left(\frac{1}{h_{ext}} + \frac{t}{k} \right)^{-1} \quad (2)$$

Heat loss to ambient was then

$$Q_{loss}(t) = U A_c (T(t) - T_{amb}(t)) \quad (3)$$

The net available heat became

$$Q_{net}(t) = \max (Q_{solar}(t) - Q_{loss}(t), 0) \quad (4)$$

3 Buoyancy-Induced Airflow

Air velocity was calculated using a thermosyphon approximation:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2gH(T_{out}(t) - T_{in}(t))}{T_{in}(t) + 273.15}} \quad (5)$$

where g represented gravitational acceleration.

4 Mass Flow Rate

$$\dot{m}(t) = \rho_{air} v(t) W D \quad (6)$$

Inlet and outlet air temperatures were measured using Type K thermocouples with an accuracy of ± 0.5 °C. The thermocouples were positioned at the chimney inlet and outlet to capture the temperature rise along the airflow path. Airflow velocity at the chimney outlet was measured using a hot-wire anemometer. The probe was centrally located at the outlet cross-section to represent the bulk airflow velocity.

Incident solar irradiance on the collector surface was recorded using a calibrated pyranometer installed in the same plane as the collector surface. All sensors were connected to a data acquisition system, and measurements were logged at one-minute intervals throughout the testing period.

5 Energy Balance

The outlet air temperature was obtained from

$$T_{out}(t) = T_{in}(t) + \frac{Q_{net}(t)}{\dot{m}(t) C_{p,air}} \quad (7)$$

6 Thermal Efficiency

Thermal efficiency was defined as

$$\eta(t) = \frac{\dot{m}(t) C_{p,air} (T_{out}(t) - T_{in}(t))}{I(t) A_c} \times 100 \quad (8)$$

Nonlinear Iterative Solution

Because airflow velocity depended on temperature rise, and temperature rise depended on mass flow rate, a nonlinear coupling existed.

A fixed-point iterative scheme was implemented at each timestep:

1. Initialize airflow velocity.
2. Compute mass flow rate.
3. Estimate outlet temperature.
4. Update heat loss and buoyancy velocity.
5. Recalculate mass flow rate and outlet temperature.
7. Evaluate convergence using
8. Stop iteration if tolerance was satisfied or maximum iterations were reached.

$$\left| T_{out}^{(j)} - T_{out}^{(j-1)} \right| < \varepsilon \quad (9)$$

This approach ensured stable convergence while maintaining computational efficiency.

7 Multi-Material Simulation Procedure

The full timestep solution was repeated independently for each material. For every candidate, arrays of

- Outlet temperature
- Air velocity
- Mass flow rate
- Thermal efficiency

A convergence residual history was stored at peak irradiance to examine numerical stability and solver behavior.

8 Statistical Evaluation

Model accuracy was assessed using two statistical indicators.

Mean Absolute Percentage Error

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum \left| \frac{y_{exp} - y_{pred}}{y_{exp}} \right| \quad (10)$$

Values below 10% were considered acceptable.

Coefficient of Determination

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{meas} - y_{pred})^2}{\sum (y_{meas} - \bar{y}_{meas})^2} \quad (11)$$

These metrics were computed for outlet temperature and airflow velocity.

9 Sensitivity and Comparative Assessment

All materials were evaluated under identical climatic conditions. Performance comparison focused on:

- Peak temperature rise
- Average airflow velocity
- Daily thermal efficiency
- Statistical error indices

This enabled objective ranking of candidate materials based on thermal and ventilation performance.

10 Output and Visualization

The algorithm generated:

- Time-series comparison plots
- Convergence residual plots
- Performance tables
- Material ranking summary

These outputs supported quantitative evaluation of lightweight and advanced glazing materials for solar chimney applications.

Results and Discussion

1 Outlet Air Temperature Validation

Figure 1 shows the comparison between predicted and experimental outlet air temperature. All candidate materials reproduced the temporal trend of the measured profile, with temperature rising from morning to midday and decreasing afterward.

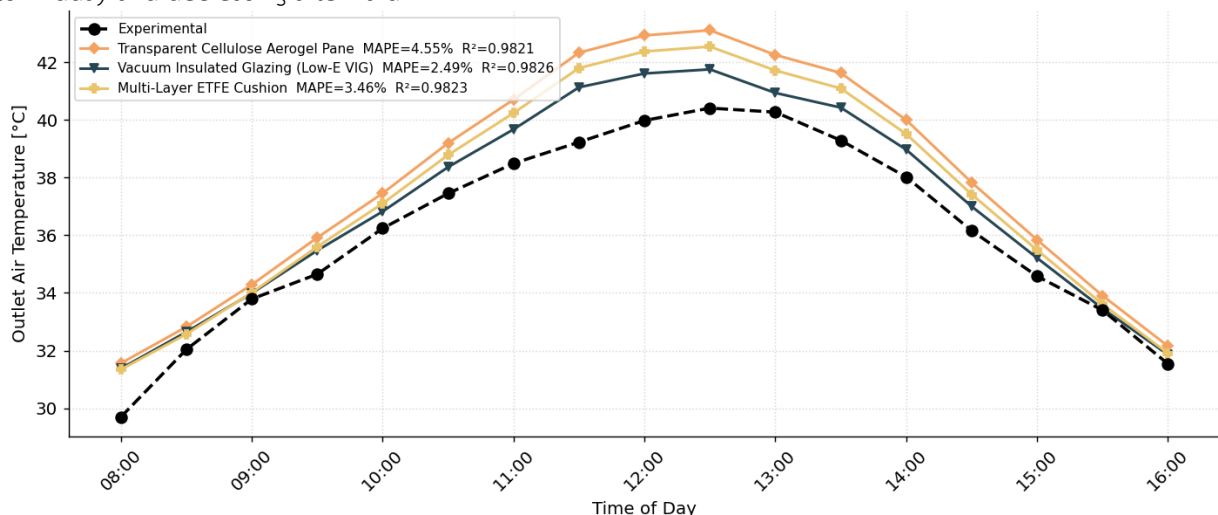


Figure 3 Predicted experimental outlet temperature

The transparent cellulose aerogel pane slightly overestimated the peak temperature, while vacuum insulated glazing provided the closest agreement with experimental data. The multi-layer ETFE cushion also followed the experimental curve with minor deviation during peak irradiance. Quantitatively, the mean absolute percentage error for outlet temperature remained below 5% for all materials. The

lowest error was obtained with vacuum insulated glazing (2.49%), followed by multi-layer ETFE (3.46%) and transparent aerogel (4.55%).

The coefficient of determination exceeded 0.98 in all cases, indicating strong correlation between predicted and measured temperature. The regression slopes were slightly greater than unity, showing a mild systematic overprediction at higher temperatures. These results confirmed that the simplified one-dimensional heat balance adequately captured dominant thermal behaviour.

2 Air Velocity Prediction

Figure 2 presents the comparison of predicted and measured air velocity. The predicted trend followed the same temporal pattern as experimental measurements, with maximum velocity occurring near peak solar irradiance.

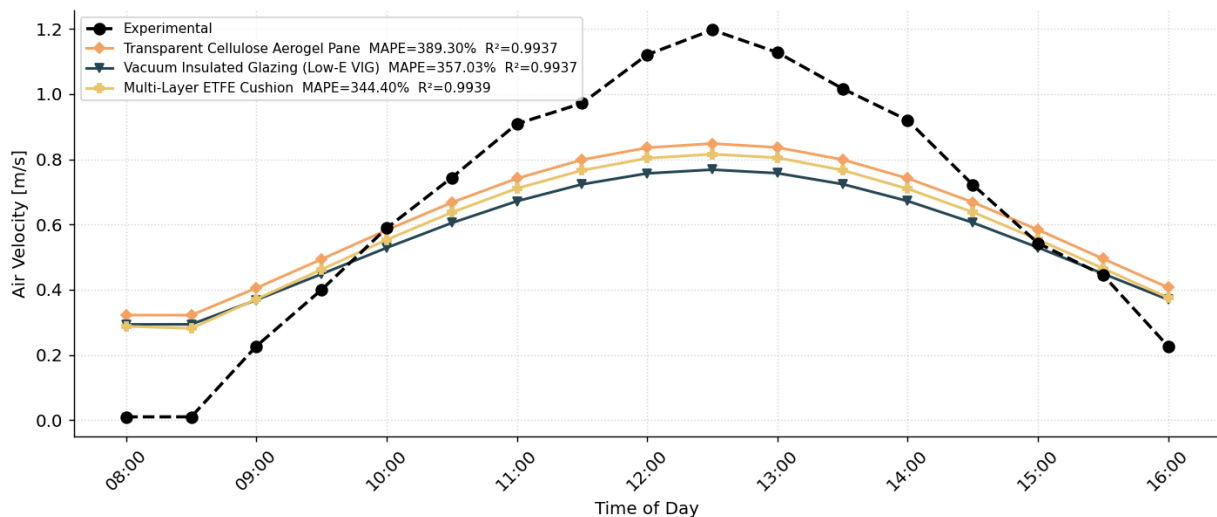


Figure 4 Predicted Experimental Air Velocity

However, velocity magnitude was consistently underestimated for all materials. The experimental peak velocity approached 1.2 m/s, whereas predicted values remained below 0.85 m/s. The reported MAPE values for velocity were high due to the influence of very small, measured velocities in early morning conditions, which amplified percentage errors. Despite large MAPE values, the coefficient of determination exceeded 0.99, indicating strong linear consistency between predicted and measured values. Regression analysis showed slopes between 0.426 and 0.475, confirming systematic underprediction. This deviation likely resulted from model simplifications, including the neglect of internal radiation, turbulence enhancement, and pressure losses. The results indicated that while the thermal model captured temperature rise accurately, airflow magnitude required further refinement for precise velocity estimation.

3 Thermal Efficiency Behaviour

Figure 3 illustrates thermal efficiency as a function of solar irradiance. Transparent cellulose aerogel demonstrated the highest efficiency, reaching approximately 84–85% under high irradiance. Multi-layer ETFE exhibited moderate efficiency, increasing with irradiance. Vacuum insulated glazing maintained relatively stable efficiency around 62–63%.

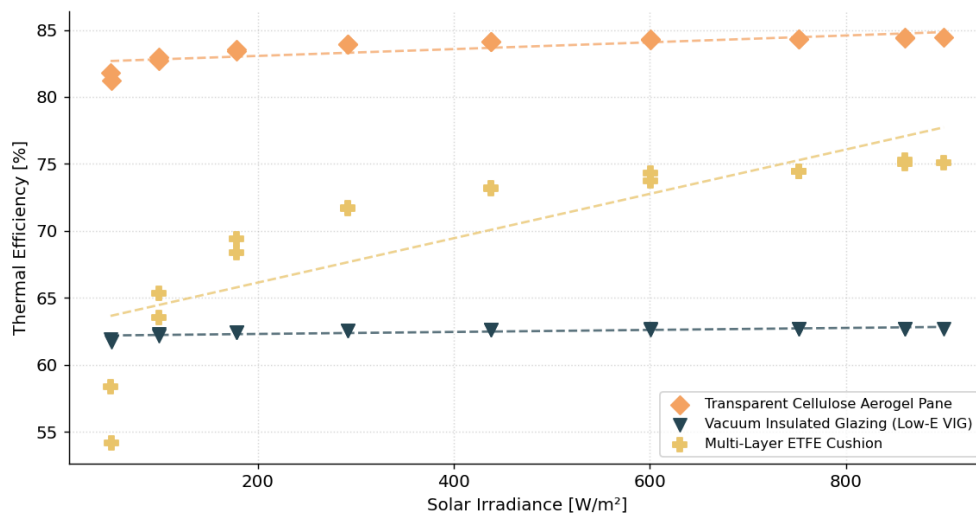


Figure 5 Thermal Efficiency with Solar Irradiance

Efficiency increased with irradiance for materials with high solar transmittance, confirming that absorbed energy dominated system performance. Insulation-dominant materials maintained more stable but lower efficiency due to reduced optical gain.

These findings suggested that optical transmission was the primary driver of ventilation enhancement under strong solar conditions.

4 Error Comparison Across Materials

Figure 4 The figure presents the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) for outlet temperature and air velocity for the three material configurations, along with reference thresholds of 5% (excellent) and 10% (acceptable).

For temperature prediction, all materials exhibited very low MAPE values below 1%. The aerogel panel achieved 0.83%, polycarbonate sheet 0.84%, and EPS sandwich board 0.89%.

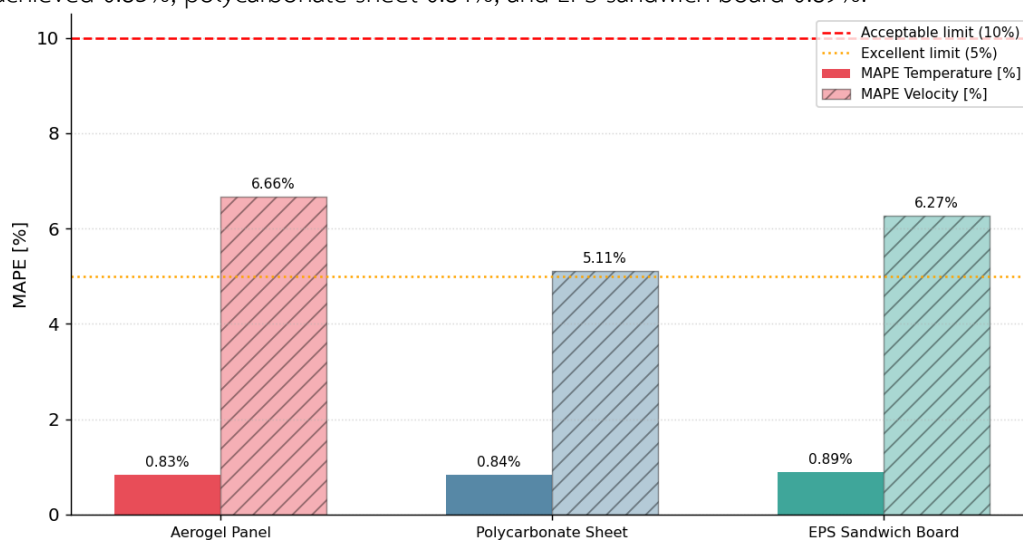


Figure 6 MAPE Comparison Across Materials

These values are significantly below the 5% threshold, indicating excellent agreement between predicted and experimental temperature results across all configurations. For air velocity prediction, MAPE

values were higher but remained within acceptable engineering limits. The polycarbonate sheet showed the lowest velocity error at 5.11%, followed by EPS sandwich board at 6.27%, and aerogel panel at 6.66%. Although these values exceeded the excellent 5% threshold, they remained below the 10% acceptable limit, indicating reasonable predictive performance.

5. Regression Analysis

Figure 5 presents the regression analysis between predicted and experimental values for outlet temperature and air velocity for the three material configurations. For outlet temperature (upper row), the coefficient of determination R^2 ranged between 0.9821 and 0.9826, indicating strong agreement between predicted and measured values across all materials.

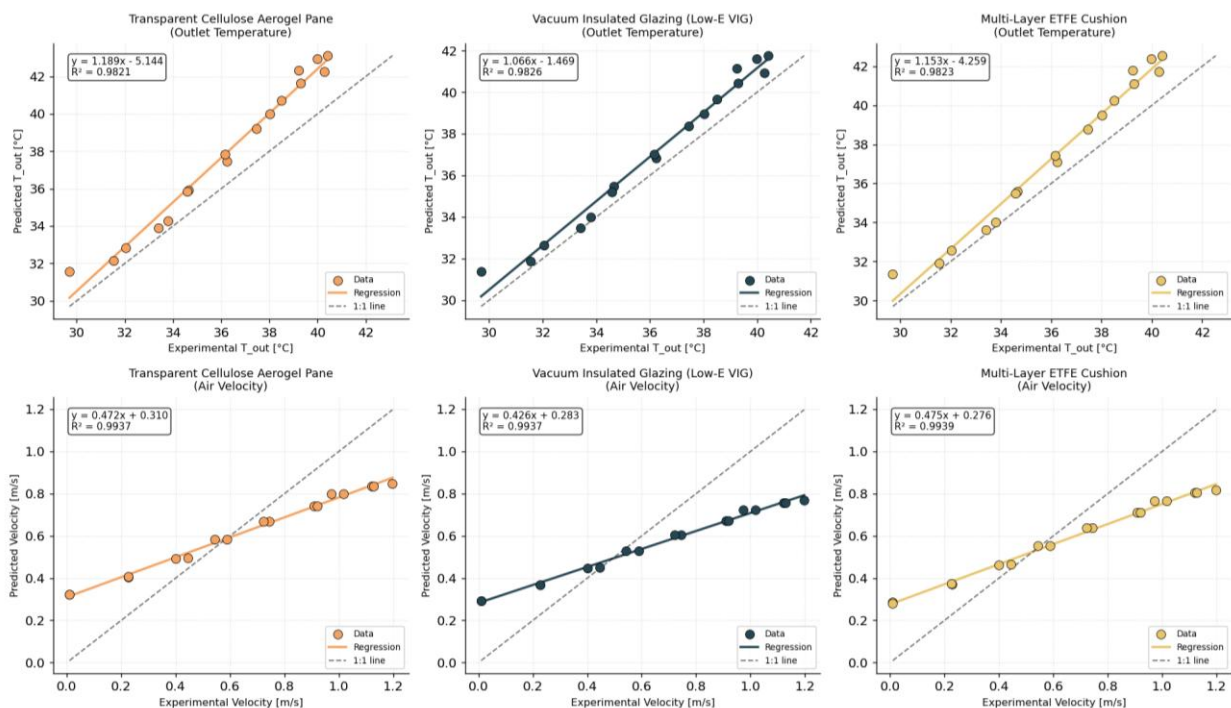


Figure 7 Regression Comparison of Predicted and Experimental

The regression slopes were slightly greater than unity (1.066–1.189), showing a mild overprediction at higher temperatures. The deviation from the 1:1 reference line was small and consistent, suggesting that the thermal model adequately captured the dominant heat transfer behaviour. For air velocity (lower row), R^2 values exceeded 0.993 for all materials, demonstrating strong linear correlation with experimental data. However, regression slopes were below unity (0.426–0.475), indicating systematic underestimation of velocity magnitude. Despite this bias, the linear trend was preserved, meaning the model correctly represented the air flow response pattern but underestimated its intensity. Overall, the regression analysis confirmed that the model reliably predicted temperature behaviour and consistently reproduced airflow trends, although velocity magnitude may require further calibration for improved quantitative accuracy.

6 Iterative Solver Convergence

Figure 6 shows the convergence residual history at peak irradiance. Residuals decreased exponentially with iteration number.

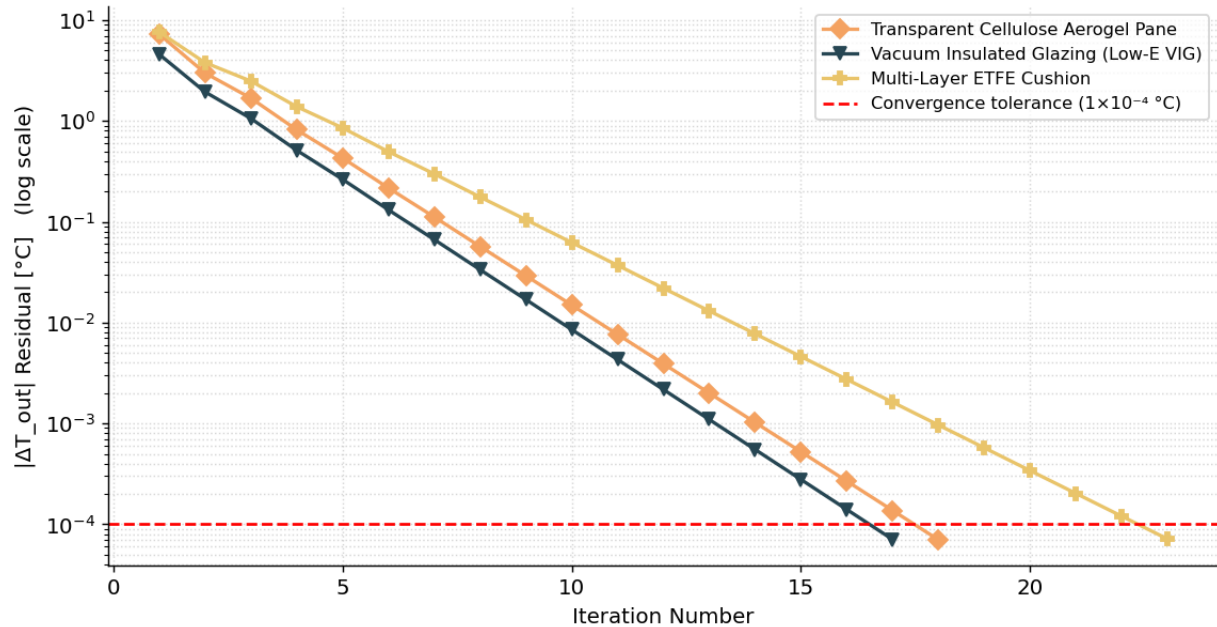


Figure 8 Iterative Convergence at Peak Irradiance

Vacuum insulated glazing converged within approximately 17 iterations, transparent aerogel within 18 iterations, and ETFE required approximately 23 iterations to reach the tolerance of $1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$. The smooth residual decay confirmed numerical stability and robustness of the fixed-point scheme. No oscillation or divergence was observed.

7 Comparative Performance Ranking

Considering temperature accuracy, thermal efficiency, and numerical stability, materials were ranked as follows:

1. Vacuum insulated glazing for prediction accuracy
2. Transparent cellulose aerogel for thermal efficiency
3. Multi-layer ETFE cushion for balanced optical-thermal performance

If ventilation enhancement was prioritized, transparent aerogel was preferable. If prediction accuracy and heat retention were prioritized, vacuum insulated glazing was recommended.

8 Discussion of Physical Implications

The results demonstrated that solar chimney performance depended primarily on solar transmittance under high irradiance conditions. While insulation reduced heat loss, excessive reduction in optical transmission limited buoyancy driving force. The underprediction of airflow suggested that additional mechanisms, such as internal radiation exchange or entrance loss coefficients, should be incorporated in future model refinement.

Overall, the numerical framework provided a reliable tool for comparative assessment of advanced lightweight materials for passive ventilation applications.

Conclusions

This study developed and validated a time-resolved numerical framework for evaluating the thermal and ventilation performance of a solar chimney integrated with advanced lightweight cover materials. The model employed a coupled heat-mass balance formulation solved using a fixed-point iterative scheme, and its predictions were assessed against experimental measurements of outlet air temperature and airflow velocity.

The main findings can be summarized as follows:

1. Temperature prediction accuracy was high for all materials. The mean absolute percentage error for outlet air temperature remained below 5%, and the coefficient of determination exceeded 0.98 in all cases. Vacuum insulated glazing achieved the lowest temperature error, indicating strong predictive reliability of the thermal model.
2. Air velocity trends were accurately captured, but magnitude was underestimated. Although R^2 values exceeded 0.99, regression slopes below unity indicated systematic underprediction of airflow velocity. This deviation was attributed to model simplifications, including neglect of internal radiative exchange and pressure-loss effects.
3. Solar transmittance was the dominant performance parameter. Materials with higher optical transmission produced larger temperature rise and stronger buoyancy-driven airflow. Transparent cellulose aerogel achieved the highest thermal efficiency, approaching 85% under peak irradiance conditions.
4. Thermal insulation alone did not guarantee superior ventilation. While vacuum insulated glazing reduced conductive heat loss, its moderate transmittance limited maximum buoyancy generation. Optimal performance required balanced optical and thermal properties.
5. The iterative solver demonstrated numerical robustness. Convergence was achieved within acceptable iteration limits for all materials, confirming stability of the nonlinear solution scheme.

The proposed framework provided a systematic and computationally efficient tool for comparative assessment of solar chimney materials under realistic climatic conditions. The results indicated that advanced transparent lightweight materials, particularly transparent aerogel-based systems, offered significant potential for enhancing passive ventilation performance in solar-driven building applications.

Future work should incorporate multidimensional heat transfer effects, internal radiative exchange, and experimentally calibrated loss coefficients to improve airflow magnitude prediction. Extension of the model to seasonal and annual simulations would further support material selection for climate-responsive building design.

The findings contribute to the advancement of material-based optimization strategies for passive ventilation systems and support the integration of high-performance transparent materials in sustainable building envelopes.

References

- Ahmed, O. K., Algburi, S., Ali, Z. H., Ahmed, A. K., & Shubat, H. N. (2022). Hybrid solar chimneys: A comprehensive review. *Energy Reports*, 8, 438-460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.007>

- Aziz, M. A., & Elsayed, A. M. (2022). Thermofluid effects of solar chimney geometry on performance parameters. *Renewable Energy*, 200, 674-693. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.022>
- Bagheri, S., & Ghodsi Hassanabad, M. (2023). Numerical and experimental investigation of a novel vertical solar chimney power plant for renewable energy production in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104700. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104700>
- Brey, J. J., Carazo, A. F., & Brey, R. (2018). Exploring the marketability of fuel cell electric vehicles in terms of infrastructure and hydrogen costs in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2893-2899. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.042>
- Cuce, E. (2024). Divergent chimney and sloping collector design for ground heat source integrated solar chimney power plants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(23), 14147-14161. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13669-5>
- Fallah, S. H., & Valipour, M. S. (2022). Numerical investigation of a small scale sloped solar chimney power plant. *Renewable Energy*, 183, 1-11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.081>
- Fu, Z., Corker, J., Papathanasiou, T., Wang, Y., Zhou, Y., Madyan, O. A., Liao, F., & Fan, M. (2022). Critical review on the thermal conductivity modelling of silica aerogel composites. *Journal of Building Engineering*, 57, 104814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104814>
- Gong, J., Chew, L. W., & Lee, P. S. (2024). Theoretical model for high-rise solar chimneys and optimum shape for uniform flowrate distribution. *Energy*, 298, 131358. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131358>
- Haji Molla Ali Tork, M. H., Houshfar, E., & Ashjaee, M. (2024). Integrating geothermal energy and a solar chimney to maximize renewable energy production: An analytical investigation of a novel hybrid system. *Renewable Energy*, 230, 120827. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120827>
- Kumar Mandal, D., Biswas, N., Manna, N. K., & Benim, A. C. (2024). Impact of chimney divergence and sloped absorber on energy efficacy of a solar chimney power plant (SCPP). *Ain Shams Engineering Journal*, 15(2), 102390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102390>
- Long, T., Li, W., Lv, Y., Li, Y., Liu, S., Lu, J., Huang, S., & Zhang, Y. (2022). Benefits of integrating phase-change material with solar chimney and earth-to-air heat exchanger system for passive ventilation and cooling in summer. *Journal of Energy Storage*, 48, 104037. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104037>
- Murena, F., Gaggiano, I., & Mele, B. (2022). Fluid dynamic performances of a solar chimney plant: Analysis of experimental data and CFD modelling. *Energy*, 249, 123702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123702>
- Perevozchikova, B. V., Pisciotta, A., Osovetsky, B. M., Menshikov, E. A., & Kazymov, K. P. (2014). Quality Evaluation of the Kuluevskaya Basalt Outcrop for the Production of Mineral Fiber, Southern Urals, Russia. *Energy Procedia*, 59, 309-314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.382>
- Saleh, M. J., Atallah, F. S., Algburi, S., & Ahmed, O. K. (2023). Enhancement methods of the performance of a solar chimney power plant: Review. *Results in Engineering*, 19, 101375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101375>
- Singh, T., & Kumar, A. (2024). Numerical analysis of the divergent solar chimney power plant with a novel arc and fillet radius at the chimney base region. *Renewable Energy*, 228, 120504. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120504>
- Toghraie, D., Karami, A., Afrand, M., & Karimipour, A. (2018). Effects of geometric parameters on the performance of solar chimney power plants. *Energy*, 162, 1052-1061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.086>
- Xu, Y., & Zhou, X. (2018). Performance of divergent-chimney solar power plants. *Solar Energy*, 170, 379-387. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.068>
- Yoo, S., Oh, S., & Hachicha, A. A. (2023). Numerical simulation and performance evaluation of filter-equipped solar chimney power plants. *Applied Thermal Engineering*, 218, 119284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119284>
- Zhu, L., Khdair, A. I., Aghaei, A., Zalipour, K., Chen, H., & Afrand, M. (2025). A comprehensive review of solar chimney power plants: technology, performance, and future prospects. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 81, 104413. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104413>

Received: Jun 19, 2025

Revised: Apr 2, 2026

Accepted: Apr 22, 2026

กรอบแนวคิดเชิงระบบสำหรับการประยุกต์ใช้บล็อกเชนเพื่อความปลอดภัยและความโปร่งใสในการเทียบโอนผลการศึกษา

A SYSTEMIC CONCEPTUAL FRAMEWORK FOR APPLYING BLOCKCHAIN TO ENHANCE SECURITY AND TRANSPARENCY IN ACADEMIC CREDIT TRANSFER

ปฐมพงษ์ ฤกษ์สมุทร¹, ธัญญรัตน์ น้อมพลกรัง², จิรพันธ์ ศรีสมพันธ์³

¹⁻³ภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Patompong Rergsamut¹, Thanyarat Nomponkrang², Jiraphan Srisomphan³

¹⁻³Department of Computer Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Email: S6402042910029@email.kmutnb.ac.th¹, thanyarat.n@fte.kmutnb.ac.th², jiraphan.s@fte.kmutnb.ac.th³

บทคัดย่อ

ปัจจุบันระบบการจัดการผลการศึกษาและการเทียบโอนหน่วยกิตของสถาบันการศึกษาในประเทศไทยยังคงเผชิญความท้าทายด้านความล่าช้า การจัดการข้อมูลที่ซับซ้อน และความเสี่ยงต่อการปลอมแปลงเอกสาร ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือในการดำเนินงาน การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนกรอบแนวคิดเชิงระบบสำหรับการบันทึกและการเทียบโอนผลการศึกษาที่มีความโปร่งใส และปลอดภัย โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรู้จำอักขระด้วยแสง (OCR), การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) และบล็อกเชน (Blockchain) ร่วมกันในกระบวนการจัดการข้อมูลการศึกษา OCR ช่วยแปลงข้อมูลจากเอกสารหรือภาพเป็นข้อความดิจิทัลอย่างรวดเร็ว ขณะที่ NLP วิเคราะห์และจัดระเบียบข้อมูล เช่น รายวิชา เกรด และเนื้อหาหลักสูตร เพื่อสนับสนุนการเทียบโอนหน่วยกิตอย่างเป็นระบบ บล็อกเชนถูกนำมาใช้เพื่อจัดเก็บข้อมูลอย่างปลอดภัย ด้วยคุณสมบัติการกระจายศูนย์และป้องกันการแก้ไขข้อมูลโดยมิชอบ

กรอบแนวคิดและสถาปัตยกรรมที่นำเสนอได้รับการประเมินความเหมาะสมจากผู้เชี่ยวชาญ 14 คน แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ ขั้นเตรียมการ (Preparation Phase) การพัฒนาเทคโนโลยีหลัก (Core Technology Development Phase) และขั้นการตรวจสอบและรับรองข้อมูล (Verification and Validation Phase) โดยคะแนนเฉลี่ยที่ได้รับในแต่ละระยะคือ 4.07, 4.10 และ 4.30 ตามลำดับ สะท้อนถึงความเชื่อมั่นในความแม่นยำ ความปลอดภัย และความสามารถของกรอบแนวคิด

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าสถาปัตยกรรมระบบที่นำเสนอสามารถยกระดับกระบวนการจัดการข้อมูลด้านการศึกษาได้อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านความโปร่งใส ความปลอดภัย และการลดขั้นตอนการทำงาน อีกทั้งยังเป็นแนวทางเชิงประยุกต์ที่สำคัญในการส่งเสริมให้สถาบันการศึกษาปรับตัวเข้าสู่ยุคดิจิทัลอย่างเกิดประสิทธิผล

คำสำคัญ : การรู้จำอักขระด้วยแสง, การประมวลผลภาษาธรรมชาติ, บล็อกเชน, การเทียบโอนผลการศึกษา

Abstract

Currently, academic record management and credit transfer systems in Thai educational institutions face significant challenges, including processing delays, complex data management, and vulnerability to document forgery, which collectively undermine operational credibility. Therefore, this research aims to develop a systemic conceptual framework for secure and transparent academic record management and credit transfer by integrating Optical Character Recognition (OCR), Natural Language Processing (NLP), and blockchain technology. OCR facilitates the rapid conversion of information from physical documents or images into digital text, while NLP analyzes and structures the extracted data—such as course details, grades, and curriculum content—to support a systematic credit transfer process. Furthermore, blockchain is utilized for secure data storage, leveraging its decentralized architecture and resistance to unauthorized modifications.

The proposed conceptual framework and system architecture were evaluated for appropriateness by 14 experts. The evaluation was divided into three phases: the Preparation Phase, the Core Technology Development Phase, and the Verification and Validation Phase. The average scores obtained for each phase were 4.07, 4.10, and 4.30, respectively, reflecting strong confidence in the accuracy, security, and overall capability of the framework.

The findings indicate that the proposed system architecture can significantly enhance educational data management by improving transparency, strengthening security, and reducing procedural complexity. Moreover, it serves as a valuable applied guideline to effectively support educational institutions in their digital transformation.

Keywords: Optical Character Recognition (OCR), Natural Language Processing (NLP), Blockchain, Academic Credit Transfer

บทนำ

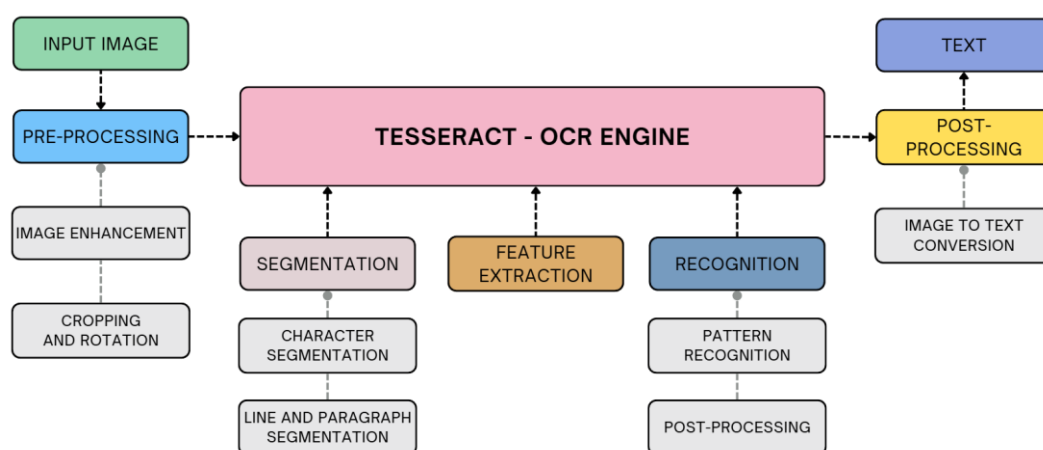
ระบบการจัดการผลการศึกษาและกระบวนการเทียบโอนหน่วยกิตของสถาบันการศึกษาในประเทศไทยปัจจุบันยังคงเผชิญกับข้อจำกัดหลายประการ โดยเฉพาะการจัดการเอกสารแบบดั้งเดิมและฐานข้อมูลที่แยกส่วนกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้าและซับซ้อนในการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างสถาบัน อีกทั้งการเทียบโอนผลการศึกษายังต้องดำเนินการให้สอดคล้องกับหลักเกณฑ์และข้อบังคับของกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ข้อมูลที่ขาดความเป็นระบบและมีแหล่งที่มาแตกต่างกัน เช่น ไฟล์ภาพหรือเอกสารกระดาษ จึงมีแนวโน้มเกิดข้อผิดพลาด เสี่ยงต่อการปลอมแปลง และลดความน่าเชื่อถือของกระบวนการรับรองผลการศึกษาระดับชาติ (Achar & Wukkadada, 2023) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรู้จำอักขระด้วยแสง (OCR) และการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) ช่วยลดความยุ่งยากในกระบวนการจัดการข้อมูล โดย OCR ทำหน้าที่แปลงข้อมูลจากเอกสารหรือภาพให้เป็นข้อความดิจิทัลที่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ (Joshi & Arolkar, 2024) ขณะที่ NLP ช่วยในการวิเคราะห์และจัดระเบียบข้อมูล เช่น รายวิชา เกณฑ์ และเนื้อหาหลักสูตร เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอัตโนมัติสำหรับการบันทึกและตรวจสอบผลการศึกษาอย่างเป็นรูปธรรม (Han et al., 2019) เทคโนโลยีบล็อกเชนมีบทบาทสำคัญในการเสริมความปลอดภัยและความโปร่งใสของข้อมูล เนื่องจาก

มีโครงสร้างแบบกระจายศูนย์และป้องกันการดัดแปลงข้อมูลโดยมิชอบ (Guo et al., 2022) เมื่อผสานการทำงานร่วมกับ OCR และ NLP ข้อมูลผลการศึกษาที่แปลงและวิเคราะห์แล้วจะสามารถจัดเก็บบนบล็อกเชนได้อย่างปลอดภัย พร้อมทั้งสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้โดยผู้ใช้งานหลายฝ่าย (Nguyen Thi et al., 2023) บทความนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาศักยภาพและพัฒนารอบแนวคิดเชิงระบบ (Systemic Conceptual Framework) ที่ผสมเทคโนโลยี OCR, NLP และบล็อกเชน เข้าด้วยกันสำหรับการจัดการข้อมูลและเทียบโอนผลการศึกษา โดยมีคำถามวิจัยสำคัญ ได้แก่ (1) เทคโนโลยีเหล่านี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในกระบวนการบันทึกและถ่ายโอนผลการศึกษามากเพียงใด (2) การประยุกต์ใช้ OCR และ NLP สามารถลดความซับซ้อนของข้อมูลเอกสารและสนับสนุนการทำงานแบบอัตโนมัติได้หรือไม่ และ (3) บล็อกเชน ช่วยเสริมความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จาก OCR และ NLP ได้มากน้อยเพียงใดในบริบทการเทียบโอนผลการศึกษา

การศึกษานี้คาดหวังว่าจะเป็นแหล่งข้อมูลเชิงแนวคิดที่สำคัญสำหรับนักวิจัยและผู้พัฒนาระบบในการนำเทคโนโลยีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มความปลอดภัย ความถูกต้อง และประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูลการศึกษา ซึ่งจะส่งเสริมให้สถาบันการศึกษาของไทยสามารถปรับตัวรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบดิจิทัล (Digital Transformation) ได้อย่างยั่งยืน (Singh et al., 2024)

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

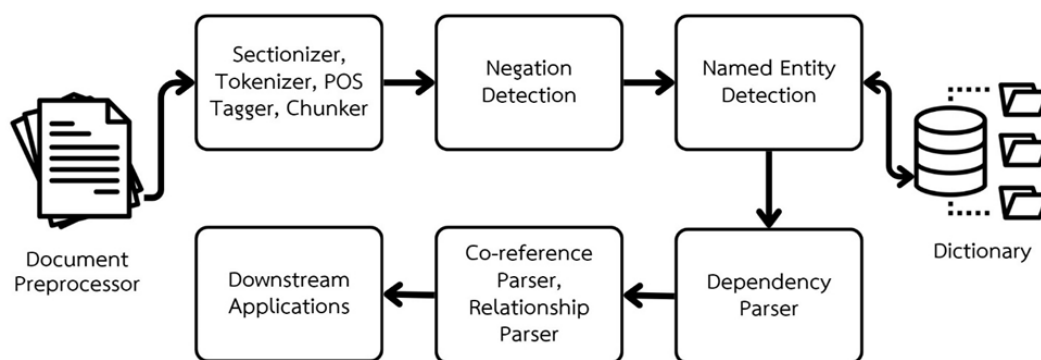
เทคโนโลยีการรู้จำอักขระด้วยแสง (Optical Character Recognition: OCR) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับแปลงข้อมูลจากรูปแบบภาพหรือเอกสารที่เป็นลายมือหรือพิมพ์เขียนให้กลายเป็นข้อความที่สามารถแก้ไขและค้นหาได้ในรูปแบบดิจิทัล เช่น การแปลงไฟล์ PDF ภาพสแกนเอกสาร หรือภาพถ่ายที่มีข้อความให้กลายเป็นไฟล์ข้อความ การทำงานของ OCR จะอาศัยการวิเคราะห์รูปแบบตัวอักษรในภาพ แล้วจดจำและแปลงให้เป็นข้อมูลที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้ในคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จาก OCR สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น การจัดเก็บเอกสาร การค้นหาข้อมูลจากเอกสารสแกน และการแปลงเอกสารให้เป็นข้อมูลดิจิทัลที่สามารถนำไปใช้ในระบบอื่น ๆ ได้ (Joshi & Arolkar, 2024) คุณสมบัติที่สำคัญของ OCR คือสามารถแปลงข้อมูลจากรูปภาพ (เช่น ไฟล์ JPG, PNG, PDF) ให้กลายเป็นข้อความดิจิทัลที่สามารถแก้ไขและค้นหาได้ รวมถึงสามารถจดจำและแปลงข้อความในหลากหลายภาษา ทั้งภาษาไทยและภาษาอื่น ๆ เพื่อช่วยยกระดับการจัดเก็บและค้นหาข้อมูลที่มีปริมาณมากให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 1 การดำเนินการของ OCR (Optical Character Recognition)

จากภาพที่ 1 แสดงกระบวนการทำงานของระบบการรู้จำอักขระด้วยแสงโดยใช้เอนจิน Tesseract OCR เริ่มจากภาพนำเข้า (Input Image) เช่น เอกสารหรือภาพที่มีข้อความ ซึ่งผ่านกระบวนการประมวลผลล่วงหน้า (Pre-processing) เพื่อเพิ่มคุณภาพของภาพผ่านการปรับความคมชัด การตัดขอบ และการหมุนภาพให้อยู่ในมุมที่เหมาะสม จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการแบ่งส่วน (Segmentation) ได้แก่ การแยกตัวอักษร เส้น และย่อหน้า เพื่อให้ระบบเข้าใจโครงสร้างของเอกสาร (Han et al., 2019) ถัดมาเป็นการดึงคุณลักษณะ (Feature Extraction) เช่น รูปร่างและขนาดของตัวอักษร เพื่อใช้ในการจดจำผ่านเทคนิคการจับคู่รูปแบบ (Pattern Recognition) จากนั้นข้อมูลอักขระ ระบบจะดำเนินการปรับผลลัพธ์ (Post-processing) เพื่อแก้ไขความคลาดเคลื่อน และสรุปผลเป็นข้อความดิจิทัลที่สามารถนำไปใช้งานได้ (Sinha et al., 2019)

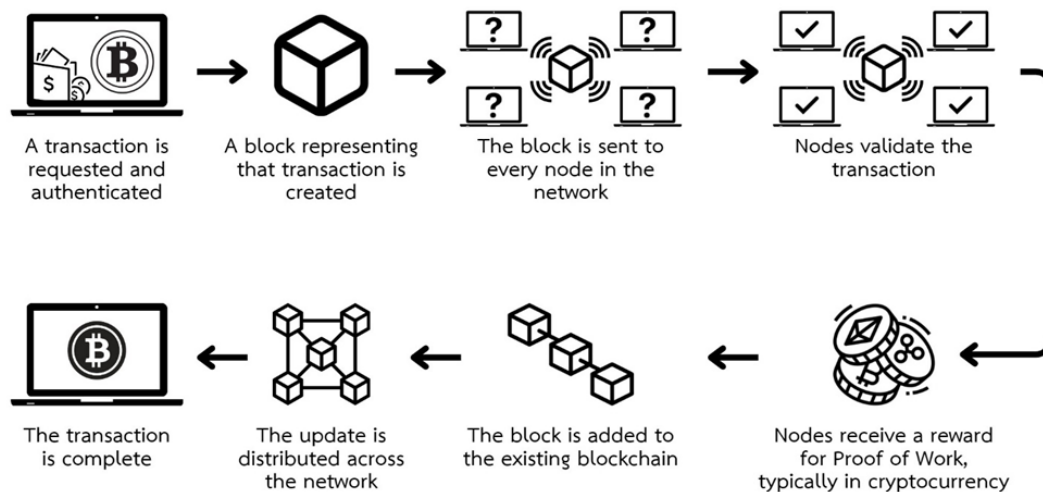
นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) ซึ่งเป็นสาขาของปัญญาประดิษฐ์ (AI) ที่ช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจ วิเคราะห์ และตีความภาษามนุษย์อย่างเป็นระบบ (Kavita & Singh, 2023) โดยผสมผสานความรู้ทางภาษาศาสตร์และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ระบบสามารถวิเคราะห์โครงสร้างทางไวยากรณ์ เข้าใจความหมายตามบริบท และสกัดข้อมูลสำคัญจากข้อความ เช่น ชื่อบุคคล สถานที่ หรือวันที่ (Pradeepa & Devi, 2022) เพื่อสนับสนุนกระบวนการจัดการข้อมูลจาก OCR ให้มีความแม่นยำและครบถ้วนยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2 การดำเนินการของ NLP (Natural Language Processing)

จากภาพที่ 2 กระบวนการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) สำหรับการวิเคราะห์ข้อความ เริ่มจากการเตรียมเอกสารด้วยการทำความสะอาดและจัดรูปแบบข้อมูล จากนั้นดำเนินการแยกย่อหน้าและหัวข้อ ตามด้วยการตัดแบ่งข้อความเป็นคำและการกำหนดชนิดคำ พร้อมทั้งการจัดกลุ่มคำเป็นวลีเพื่อเตรียมสำหรับการวิเคราะห์เชิงไวยากรณ์ ระบบจะตรวจจับคำปฏิเสธและหน่วยคำเฉพาะ เช่น ชื่อบุคคลหรือสถานที่ โดยอิงจากพจนานุกรมหรือฐานข้อมูลที่น่าเชื่อถือ (Alargrami & Eljazzar, 2020) ถัดมาคือการวิเคราะห์โครงสร้างประโยค เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างคำ รวมถึงการจับคู่คำที่หมายถึงสิ่งเดียวกันและการระบุความสัมพันธ์เชิงความหมาย ข้อมูลโครงสร้างที่ได้จากขั้นตอนเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในแอปพลิเคชันปลายทาง เช่น ระบบวิเคราะห์ความคิดเห็น การดึงข้อมูลสาระสำคัญ และระบบตอบคำถามให้เกิดผลสัมฤทธิ์สูงสุด (Kim et al., 2021) ในส่วนของเทคโนโลยีบล็อกเชน (Blockchain) เป็นกลไกการจัดเก็บข้อมูลแบบกระจายศูนย์ ซึ่งมีความโดดเด่นด้านความปลอดภัย ความโปร่งใส และความสามารถในการตรวจสอบธุรกรรม เครือข่ายคอมพิวเตอร์ในระบบบล็อกเชนจะทำงานร่วมกันเพื่อยืนยันความถูกต้องของธุรกรรม

โดยบทความนี้ได้แบ่งกลไกการทำงานของบล็อกเชนออกเป็น 6 ขั้นตอนสำคัญ ตั้งแต่การเริ่มต้นธุรกรรมจนถึงการบันทึกข้อมูลอย่างถาวรในเครือข่าย เพื่อให้เข้าใจถึงการประยุกต์ใช้อย่างเป็นระบบและน่าเชื่อถือในบริบทการจัดการข้อมูล



ภาพที่ 3 โมเดลการทำงานของ Blockchain

จากภาพที่ 3 กระบวนการทำธุรกรรมบนบล็อกเชนเริ่มจากการที่ผู้ใช้งานร้องขอธุรกรรมและผ่านการตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้น เช่น การยืนยันว่าผู้ส่งมีสินทรัพย์เพียงพอในระบบ จากนั้นจะมีการสร้างบล็อกใหม่เพื่อเก็บข้อมูลของธุรกรรมดังกล่าว เตรียมพร้อมสำหรับการส่งไปยังเครือข่ายบล็อกเชน บล็อกนี้จะถูกกระจายไปยังโหนด (Nodes) ทุกตัวในเครือข่าย ซึ่งก็คือคอมพิวเตอร์หรือเซิร์ฟเวอร์ที่เข้าร่วมในระบบและมีหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของธุรกรรม โหนดแต่ละตัวจะทำการตรวจสอบและยืนยันว่าธุรกรรมในบล็อกนั้นถูกต้องและไม่ซ้ำซ้อน เมื่อโหนดใดยืนยันธุรกรรมสำเร็จตามกลไกฉันทามติแบบพิสูจน์การทำงาน (Proof of Work) โหนดนั้นจะได้รับรางวัลเป็นสกุลเงินดิจิทัล เช่น บิตคอยน์ เพื่อเป็นแรงจูงใจในการช่วยตรวจสอบและประมวลผลธุรกรรมในระบบ (Gao, 2020) หลังจากธุรกรรมได้รับการยืนยัน บล็อกที่สร้างขึ้นจะถูกเพิ่มเข้าสู่บล็อกเชน ซึ่งเป็นห่วงโซ่ของบล็อกที่เชื่อมต่อกันและไม่สามารถดัดแปลงได้ การอัปเดตข้อมูลใหม่จะถูกกระจายไปยังโหนดทุกตัวในเครือข่าย เพื่อให้ข้อมูลบล็อกเชนของแต่ละโหนดมีความสอดคล้องและเป็นปัจจุบัน

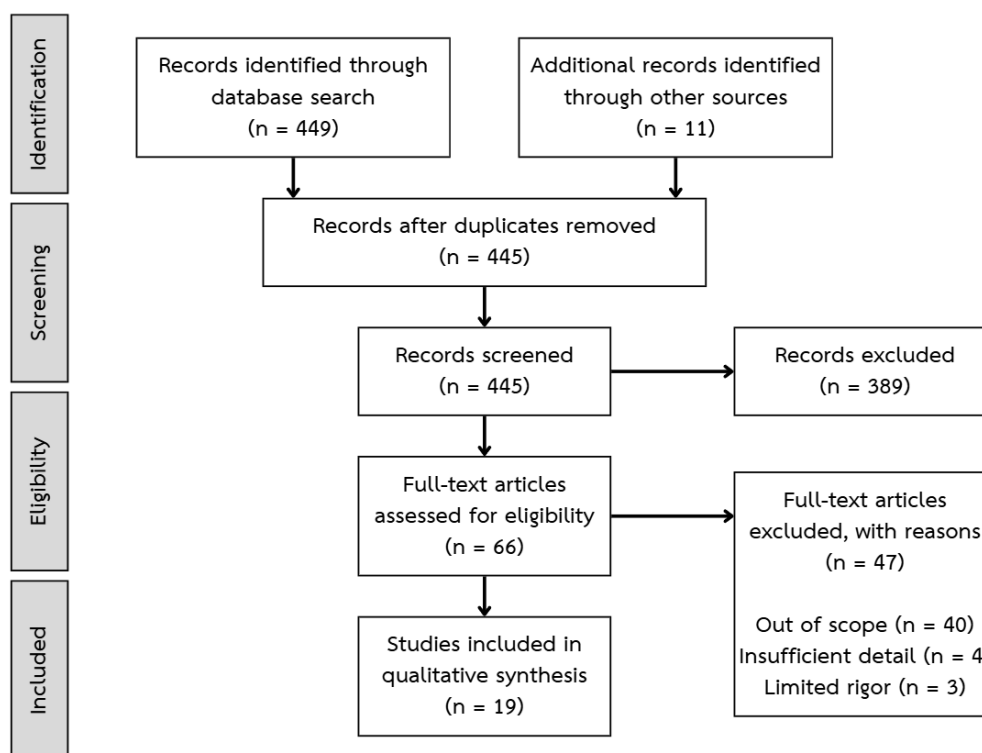
เมื่อกระบวนการทั้งหมดเสร็จสิ้น ธุรกรรมจะถูกบันทึกลงในบล็อกเชนอย่างถาวร ส่งผลให้ทุกโหนดมีข้อมูลที่ตรงกัน และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้ ซึ่งช่วยยกระดับความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือให้กับระบบบล็อกเชนได้อย่างเป็นรูปธรรม

วิธีดำเนินการวิจัย

การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Literature Review) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ความรู้จากงานวิจัยก่อนหน้าเพื่อใช้เป็นรากฐานสำหรับการศึกษาใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ เช่น บล็อกเชน (Blockchain), การรู้จำอักขระด้วยแสง (OCR) และการประมวลผลภาษาธรรมชาติ

(NLP) ในบริบทของการศึกษา ดังนั้น การคัดกรองเอกสารที่มีความเกี่ยวข้องและเชื่อถือได้จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการสร้างฐานข้อมูลที่ครบถ้วนและมีความน่าเชื่อถือทางวิชาการ

บทความนี้ได้กำหนดกระบวนการคัดกรองเอกสารเพื่อทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ โดยมุ่งเน้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้บล็อกเชน OCR และ NLP ในการจัดการข้อมูลและบันทึกการเทียบโอนผลการศึกษา ผ่านการกำหนดเกณฑ์การคัดกรองที่ละเอียดและชัดเจน ทั้งนี้ กระบวนการคัดกรองเอกสารดังกล่าวได้อ้างอิงตามมาตรฐานของ PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการออกเป็น 4 ลำดับขั้นตอน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 PRISMA Flow Diagram

จากภาพที่ 4 แสดงกระบวนการคัดกรองเอกสารตามแนวทาง PRISMA Flow Diagram ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การระบุเอกสาร (Identification), การคัดกรอง (Screening), การประเมินความเหมาะสม (Eligibility) และการคัดเลือกเข้าสู่การศึกษา (Included) โดยเริ่มจากการสืบค้นเอกสารจากฐานข้อมูลวิชาการและแหล่งข้อมูลเพิ่มเติม รวมทั้งสิ้น 460 ฉบับ (จากฐานข้อมูล 449 ฉบับ และจากแหล่งอื่น 11 ฉบับ) หลังจากกลบรายการที่ซ้ำซ้อนออก จะเหลือเอกสารที่ไม่ซ้ำกันจำนวน 445 ฉบับ

ในขั้นตอนการคัดกรอง (Screening) มีการพิจารณาเบื้องต้นจากหัวเรื่องและบทคัดย่อ พบว่าเอกสาร 389 ฉบับ ไม่ตรงตามวัตถุประสงค์การวิจัยจึงถูกตัดออก เหลือเอกสาร 66 ฉบับที่เข้าสู่ขั้นตอนการประเมินความเหมาะสม (Eligibility) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีการประเมินเนื้อหาฉบับเต็มอย่างละเอียด โดยพิจารณาความเกี่ยวข้องและคุณภาพของงานวิจัยอย่างเข้มงวด ผลปรากฏว่ามีเอกสาร 47 ฉบับที่ไม่ผ่านเกณฑ์ โดยแบ่งเป็น

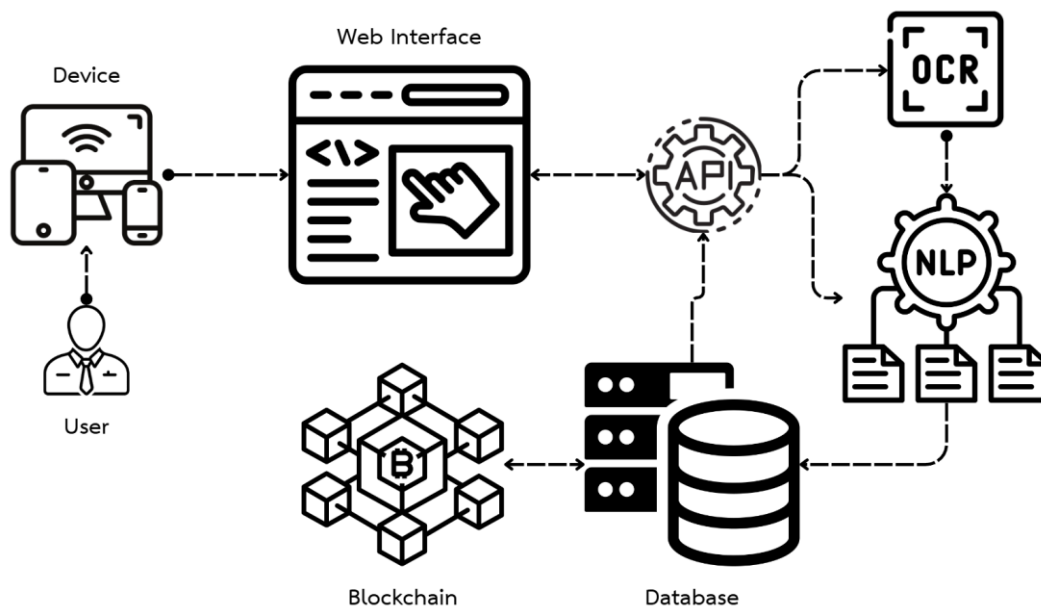
เอกสารที่อยู่นอกขอบเขตการศึกษาจำนวน 40 ฉบับ, ขาดรายละเอียดที่เพียงพอจำนวน 4 ฉบับ และมีความเข้มงวดทางวิธีวิจัยจำกัดอีก 3 ฉบับ

สุดท้าย จะเหลือเอกสารจำนวน 19 ฉบับที่ผ่านการคัดกรองครบทุกขั้นตอน ซึ่งเอกสารเหล่านี้ได้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์เชิงคุณภาพ เพื่อวิเคราะห์สารสนเทศที่เกี่ยวข้องกับคำถามวิจัย โดยกระบวนการคัดกรองที่ชัดเจนและเป็นระบบนี้ ช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือ ความโปร่งใส และความแม่นยำในการทบทวนวรรณกรรมให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

แนวคิดเบื้องต้น

เพื่อตอบสนองต่อปัญหาการปลอมแปลงใบรับรองทางการศึกษาและความจำเป็นในการเพิ่มความโปร่งใสในการจัดการข้อมูล กรอบแนวคิดการจัดการมหาวิทยาลัยแบบบูรณาการจึงได้ถูกนำเสนอขึ้น โดยผสานเทคโนโลยีบล็อกเชนเข้ากับกระบวนการบริหารจัดการข้อมูลแบบดั้งเดิม ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการดัดแปลงข้อมูลโดยมิชอบ ทั้งนี้ สถาปัตยกรรมที่นำเสนอยังได้ประยุกต์ใช้แนวคิดการกำหนดสิทธิ์เข้าถึงแบบลำดับขั้นมาใช้ เพื่อเสริมความปลอดภัยในการจัดเก็บและควบคุมการเข้าถึงข้อมูลได้อย่างแม่นยำ ในด้านการเทียบโอนผลการศึกษา กรอบแนวคิดนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรู้จำอักขระ ด้วยแสง (OCR) เพื่อสกัดข้อมูลจากเอกสารทางการศึกษา และใช้การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) ในการแปลงและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงโครงสร้าง จากนั้นข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลจะถูกบันทึกลงในบล็อกเชน โดยอาศัยโครงสร้าง Substrate ซึ่งรองรับฟังก์ชันการทำงานของโมเดล Relay Chain และ Parachain เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อและสื่อสารระหว่างระบบ บล็อกเชนต่าง ๆ ได้อย่างเกิดประสิทธิภาพสูงสุด Polkadot เป็นอีกหนึ่งแพลตฟอร์มที่มีศักยภาพในการรองรับสถาปัตยกรรมลักษณะนี้ ด้วยโครงสร้างที่ประกอบด้วย Relay Chain ซึ่งทำหน้าที่รักษาความปลอดภัยแบบรวมศูนย์ และ Parachains ซึ่งเป็นบล็อกเชนอิสระที่สามารถปรับแต่งตามกรณีการใช้งานเฉพาะได้ โดยใช้กลไกฉันทามติแบบ Nominated Proof-of-Stake (NPoS) ส่งผลให้ระบบเครือข่ายมีทั้งความยืดหยุ่นและความมั่นคง ทั้งนี้ ยังสามารถเชื่อมต่อกับบล็อกเชนภายนอก ผ่านสะพานเชื่อม (Bridge) ได้อย่างปลอดภัย

ข้อได้เปรียบของแนวทางนี้คือความสามารถในการรักษาความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวของข้อมูล พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการตรวจสอบย้อนกลับของข้อมูลได้อย่างโปร่งใส ส่งเสริมความน่าเชื่อถือในการจัดการข้อมูลทางการศึกษา เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า กรอบแนวคิดและสถาปัตยกรรมที่นำเสนอนี้มีศักยภาพที่เหนือกว่าในด้านความปลอดภัย ความยืดหยุ่น การแบ่งปันข้อมูลระหว่างหน่วยงาน และการสนับสนุนกระบวนการเทียบโอนผลการศึกษาอย่างปลอดภัยและเป็นระบบ



ภาพที่ 5 ภาพรวมการใช้งานระบบเทียบโอนผลการศึกษา

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน (Use Case Scenario) สถาปัตยกรรมระบบการเทียบโอนผลการศึกษา ได้รับการออกแบบให้สามารถเข้าถึงได้ผ่านเว็บอินเทอร์เฟซที่รองรับอุปกรณ์หลากหลาย ทั้งคอมพิวเตอร์ แท็บเล็ต และสมาร์ตโฟน โดยเชื่อมต่อกับระบบหลังบ้านผ่าน API เพื่อประมวลผลข้อมูลอย่างเป็นระบบ สถาปัตยกรรมดังกล่าวเริ่มจากการใช้เทคโนโลยี OCR ในการแปลงเอกสารภาพหรือไฟล์สแกนให้เป็นข้อความดิจิทัล ซึ่งจะถูกส่งต่อเข้าสู่กระบวนการ NLP เพื่อวิเคราะห์และจำแนกข้อมูลสำคัญ เช่น รายวิชา เกเรด และเนื้อหาหลักสูตร จากนั้นข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลจะถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล และข้อมูลสำคัญ เช่น ผลการเทียบโอน จะถูกบันทึกลงในระบบบล็อกเชนเพื่อเพิ่มความปลอดภัย ความโปร่งใส และสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้

การประเมินความเหมาะสมของกรอบแนวคิดและสถาปัตยกรรมโดยผู้เชี่ยวชาญ 14 ท่าน พบว่ามีความเหมาะสม ในระดับสูง โดยครอบคลุม 3 ด้านหลัก ได้แก่ ชั้นเตรียมการ ชั้นพัฒนาเทคโนโลยีหลัก และชั้นการตรวจสอบและรับรองข้อมูล โดยกรอบแนวคิดนี้ถูกพัฒนาให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากลด้านการจัดการข้อมูลการศึกษา การผสานเทคโนโลยี OCR, NLP และบล็อกเชน ช่วยให้การสกัดข้อมูลจากเอกสารได้อย่างแม่นยำ ลดความเสี่ยงจากการปลอมแปลง และเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูล ช่วยให้การตรวจสอบและยืนยันผลการเทียบโอนมีความเป็นระบบ ลดภาระงาน และส่งเสริมให้เกิดประสิทธิผลในการใช้งานทั้งในระดับบุคคลและสถาบันการศึกษา

ตารางที่ 1 รายละเอียดการประเมินองค์ประกอบที่ 1 ชั้นเตรียมการ

องค์ประกอบที่ 1 ชั้นเตรียมการ				
ข้อที่	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความเหมาะสม
1	รายการข้อมูลนักศึกษาครบถ้วนเหมาะสม ที่จะนำไปเทียบโอน	4.14	0.64	มาก
2	รายการข้อมูลอาจารย์ครบถ้วน เหมาะสม	4.14	0.74	มาก
3	รายการข้อมูลเจ้าหน้าที่สำนักวิชาการครบถ้วน เหมาะสม	4.21	0.67	มาก
4	รายละเอียดการเทียบโอนครบถ้วน เหมาะสม	3.79	0.77	มาก
5	รูปแบบเอกสารที่นำเข้าสู่ระบบครบถ้วน เหมาะสม	4.07	0.70	มาก
รวม		4.07	0.71	มาก

องค์ประกอบที่ 1 ชั้นเตรียมการ เป็นขั้นตอนสำคัญในการวางรากฐานสำหรับการนำเทคโนโลยีบล็อกเชนมาใช้ในการออกแบบการบันทึกการเทียบโอนผลการศึกษา โดยมุ่งเน้นการจัดเตรียมข้อมูลและเอกสารให้พร้อมสำหรับการประมวลผลอย่างเป็นระบบ กระบวนการนี้ประกอบด้วย การตรวจสอบความครบถ้วนและเหมาะสมของข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ รายการข้อมูลนักศึกษา, รายการข้อมูลอาจารย์, รายการข้อมูลเจ้าหน้าที่สำนักวิชาการ, รายละเอียดการเทียบโอน, และรูปแบบเอกสารเพื่อนำเข้าสู่ระบบ การจัดการข้อมูลเหล่านี้ต้องคำนึงถึงความเป็นระเบียบและการเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวก เพื่อให้พร้อมสำหรับการนำเข้าสู่สถาปัตยกรรมบล็อกเชน นอกจากนี้ยังรวมถึงการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อมูลโดยผู้เชี่ยวชาญ เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีข้อผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนก่อนการบันทึกเข้าสู่ระบบ รวมถึงการเตรียมเอกสารที่จำเป็นทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้สะดวกในภายหลัง

การประเมินความเหมาะสมโดยผู้เชี่ยวชาญในองค์ประกอบนี้อยู่ในระดับสูง โดยได้คะแนนเฉลี่ยรวม 4.07 และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) 0.71 ซึ่งสะท้อนถึงความสำคัญของการเตรียมการอย่างรัดกุมในขั้นตอนนี้ เพราะเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ช่วยให้การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนในกระบวนการบันทึกการเทียบโอนผลการศึกษาเป็นไปอย่างราบรื่นและเกิดประสิทธิผลสูงสุด

ตารางที่ 2 รายละเอียดการประเมินองค์ประกอบที่ 2 ชั้นพัฒนาเทคโนโลยีหลัก

องค์ประกอบที่ 2 ชั้นเทียบโอนผลการศึกษา				
ข้อที่	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความเหมาะสม
6	กระบวนการประมวลผลล่วงหน้าเอกสารที่นำเข้า OCR เหมาะสม	4.21	0.67	มาก
7	กระบวนการแยกส่วนเอกสารหรือภาพที่นำเข้า OCR เหมาะสม	4.29	0.59	มาก
8	กระบวนการสกัดลักษณะ (feature extraction) ใน OCR เหมาะสม	4.50	0.73	มาก
9	เทคโนโลยีการรู้จำตัวอักษรใน OCR เหมาะสม	4.36	0.72	มาก

ข้อที่	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับ ความเหมาะสม
10	การตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดหลังจากการประมวลผล OCR เหมาะสม	4.14	0.74	มาก
11	กระบวนการการแบ่งข้อความออกเป็นคำ (Tokenization) ใน NLP เหมาะสม	3.93	0.70	มาก
12	กระบวนการทำให้คำเป็นรูปคำพื้นฐาน (lemmatization/ stemming) ใน NLP เหมาะสม	3.93	0.70	มาก
13	กระบวนการระบุชนิดของคำ (Part of Speech Tagging) ใน NLP เหมาะสม	3.93	0.70	มาก
14	กระบวนการระบุหน่วยข้อความสำคัญ (Named Entity Recognition) ใน NLP เหมาะสม	3.93	0.59	มาก
15	กระบวนการวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment Analysis) ใน NLP เหมาะสม	3.93	0.59	มาก
16	กระบวนการสร้างโครงสร้างบล็อกเชน (Blockchain Creation) เหมาะสม	4.07	0.59	มาก
17	กระบวนการประมวลผลข้อมูล (Data Processing) ในบล็อกเชน เหมาะสม	4.00	0.65	มาก
18	กระบวนการสร้างบล็อกเพื่อเก็บข้อมูล ในบล็อกเชน เหมาะสม	4.07	0.59	มาก
19	กระบวนการการใช้เทคนิคการแฮชข้อมูล (Data Hashing) ในบล็อกเชน เหมาะสม	4.14	0.64	มาก
20	กระบวนการตรวจสอบและยืนยันข้อมูล (Verification and Validation) ในบล็อกเชน เหมาะสม	4.14	0.74	มาก
รวม		4.10	0.66	มาก

องค์ประกอบที่ 2 ขั้นพัฒนาเทคโนโลยีหลัก เป็นขั้นตอนที่มุ่งเน้นการบูรณาการเทคโนโลยี OCR (Optical Character Recognition) และ NLP (Natural Language Processing) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือให้กับกรอบแนวคิดการบันทึกการเทียบโอนหน่วยกิตในบล็อกเชน กระบวนการนี้เริ่มจากการประมวลผลล่วงหน้าและการแยกส่วนเอกสารภาพ ก่อนใช้เทคโนโลยี OCR ในการแปลงข้อมูลให้เป็นข้อความดิจิทัล พร้อมทั้งสกัดคุณลักษณะสำคัญของอักขระ (Feature Extraction) และตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดหลังจากการประมวลผล จากนั้นข้อมูลจะเข้าสู่กระบวนการ NLP ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การตัดแบ่งข้อความออกเป็นคำ (Tokenization), การแปลงคำให้เป็นรูปคำพื้นฐาน (Lemmatization/Stemming), และการระบุชนิดของคำ (Part of Speech Tagging) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างและบริบทของข้อความ นอกจากนี้ยังรวมถึงกระบวนการระบุหน่วยข้อความสำคัญ (Named Entity Recognition) และการวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment Analysis) ซึ่งช่วยเสริมความเข้าใจเชิงลึกต่อข้อมูลอย่างเป็นระบบ ภายหลังการประมวลผล ข้อมูล

จะเข้าสู่กระบวนการสร้างโครงสร้างและประมวลผลข้อมูลในบล็อกเชน (Blockchain Creation and Data Processing) โดยข้อมูลจะถูกสร้างเป็นบล็อกและเข้ารหัสด้วยเทคนิคการแฮชข้อมูล (Data Hashing) พร้อมทั้งมีขั้นตอนการตรวจสอบและยืนยันความถูกต้อง (Verification and Validation) เพื่อรับรองความถูกต้อง ความครบถ้วน และความปลอดภัยของข้อมูลก่อนการจัดเก็บถาวร

จากผลการประเมินความเหมาะสมโดยผู้เชี่ยวชาญ 14 ท่าน พบว่ากระบวนการในขั้นตอนนี้ได้รับคะแนนเฉลี่ยรวม 4.10 จาก 5 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) 0.66 ซึ่งสะท้อนถึงระดับการยอมรับต่อการประยุกต์ใช้ OCR และ NLP ร่วมกับเทคโนโลยีบล็อกเชน เพื่อยกระดับการจัดการข้อมูลการศึกษาให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 3 รายละเอียดการประเมินองค์ประกอบที่ 3 ขั้นตอนการตรวจสอบและรับรองข้อมูล

องค์ประกอบที่ 3 ขั้นรายงานผล/รับรอง				
ข้อที่	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความเหมาะสม
21	รายการข้อมูลรายละเอียดรายวิชา (Course Details) ที่ผ่านการเทียบโอน(Transferred Courses) ครบถ้วน เหมาะสม	4.29	0.59	มาก
22	รายการข้อมูลรายละเอียดรายวิชา (Course Details) ที่ไม่ผ่านการเทียบโอน (Non-Transferred Courses) ครบถ้วน เหมาะสม	4.29	0.59	มาก
23	รายการเหตุผลที่ไม่ผ่านการเทียบโอน ครบถ้วน เหมาะสม	4.36	0.61	มาก
24	รายการข้อเสนอแนะสำหรับนักศึกษาในการดำเนินการแก้ไขหรือเพิ่มเติมเอกสารครบถ้วน เหมาะสม	4.21	0.67	มาก
25	รายการคำแนะนำในการปรับปรุงการจัดทำเอกสารและกรรส่งเอกสาร ครบถ้วนเหมาะสม	4.36	0.61	มาก
รวม		4.30	0.61	มาก

องค์ประกอบที่ 3 ขั้นตอนการตรวจสอบและรับรองข้อมูล ขั้นตอนนี้มีบทบาทสำคัญในการประกันความถูกต้อง ความสมบูรณ์ และความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเทียบโอนหน่วยกิตก่อนบันทึกผลในสถาปัตยกรรมบล็อกเชน โดยมีกระบวนการตรวจสอบรายละเอียดข้อมูลรายวิชาที่ผ่านการเทียบโอนและรายวิชาที่ไม่ผ่านการเทียบ ให้สอดคล้องกับเกณฑ์และมาตรฐานของสถาบันการศึกษา พร้อมทั้งระบุเหตุผลที่ไม่ผ่านการเทียบโอนไว้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังครอบคลุมถึงการให้ข้อเสนอแนะสำหรับนักศึกษาในการแก้ไขหรือเพิ่มเติมเอกสาร ตลอดจนคำแนะนำในการปรับปรุงการจัดทำและส่งเอกสาร เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดในกระบวนการเทียบโอน การตรวจสอบดำเนินการโดยผู้มีอำนาจที่เกี่ยวข้อง เช่น เจ้าหน้าที่ทะเบียนหรือผู้ตรวจสอบข้อมูลของสถาบัน โดยใช้เทคโนโลยีและเครื่องมือดิจิทัลในการยืนยันตัวตนและความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งช่วยเพิ่มความโปร่งใส ลดข้อผิดพลาด และเสริมสร้างความเชื่อมั่นในกระบวนการจัดเก็บข้อมูลบนบล็อกเชน

จากการประเมินความเหมาะสมโดยผู้เชี่ยวชาญ กระบวนการในขั้นตอนนี้ได้รับคะแนนเฉลี่ยรวม 4.30 จาก 5 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) 0.61 ซึ่งสะท้อนถึงระดับการยอมรับในด้านความละเอียด รอบคอบ และความน่าเชื่อถือของกรอบแนวคิดและสถาปัตยกรรมก่อนการบันทึกข้อมูลอย่างถาวรในเครือข่ายบล็อกเชน

สรุปผล

บทความนี้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี OCR (Optical Character Recognition), NLP (Natural Language Processing) และบล็อกเชนเพื่อแก้ไขข้อจำกัดในระบบจัดการและบันทึกผลการศึกษาในปัจจุบัน โดย OCR ช่วยในการแปลงข้อมูลจากเอกสารในรูปภาพหรือกระดาษให้อยู่ในรูปแบบข้อความดิจิทัล ทำให้ข้อมูลสามารถนำไปวิเคราะห์และบันทึกเข้าสู่ระบบได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และมีประสิทธิภาพ ส่วน NLP ทำหน้าที่ในการวิเคราะห์และจัดการข้อมูลเชิงความหมาย ช่วยให้ระบบสามารถแยกแยะและจัดการข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทั้งสองเทคโนโลยีนี้ เมื่อใช้ร่วมกับบล็อกเชนจะช่วยเพิ่มความโปร่งใสและความปลอดภัยในการจัดเก็บและถ่ายโอนข้อมูล

การผสมผสานระบบบล็อกเชนเข้ากับ OCR และ NLP ช่วยให้สามารถจัดเก็บและบันทึกข้อมูลได้อย่างปลอดภัย ไม่สามารถแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้โดยไม่ได้รับอนุญาต บล็อกเชนยังเสริมความน่าเชื่อถือในกระบวนการตรวจสอบ โดยเฉพาะในบริบทของการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างสถาบันการศึกษา ทั้งนี้ ข้อมูลทั้งหมดที่ผ่านการประมวลผลจาก OCR และ NLP จะถูกจัดเก็บและตรวจสอบบนบล็อกเชนเพื่อป้องกันการดัดแปลง และเสริมความโปร่งใสผ่านการตรวจสอบจากผู้ใช้อย่างหลายฝ่าย ทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องและสามารถถ่ายโอนระหว่างหน่วยงานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

อภิปรายผล

สอดคล้องกับคำถามวิจัยข้อที่ 2 ที่มุ่งศึกษาว่า OCR และ NLP สามารถลดความซับซ้อนของข้อมูลเอกสารและสนับสนุนการทำงานแบบอัตโนมัติได้หรือไม่ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทั้งสองมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการจัดข้อจำกัดของการจัดการข้อมูลแบบดั้งเดิม การใช้ OCR ช่วยแปลงข้อมูลจากเอกสารกระดาษเข้าสู่รูปแบบดิจิทัลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยลดเวลาและทรัพยากรที่ต้องใช้ในการคีย์ข้อมูล ลดโอกาสเกิดข้อผิดพลาดจากมนุษย์ในขณะเดียวกัน NLP ทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลเชิงความหมายจากข้อความที่ OCR แปลงมา ทำให้สถาปัตยกรรมนี้สามารถตรวจจับและแยกแยะข้อมูลสำคัญแบบอัตโนมัติ เช่น ชื่อวิชา ผลการศึกษา และเนื้อหาหลักสูตร ในส่วนของคำถามวิจัยข้อที่ 3 ที่พิจารณาว่าบล็อกเชนช่วยเสริมความน่าเชื่อถือของข้อมูลได้อย่างไร การบูรณาการบล็อกเชนเข้าสู่กรอบแนวคิดนี้ ทำให้ข้อมูลที่ผ่านการสกัดจาก OCR และ NLP มีการจัดเก็บที่ปลอดภัย โปร่งใส และตรวจสอบย้อนกลับได้ การบันทึกข้อมูลบนบล็อกเชนช่วยป้องกันการแก้ไขข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต และลดความเสี่ยงในการปลอมแปลงเอกสารสำคัญ ซึ่งตอบสนองต่อหลักเกณฑ์และข้อบังคับของกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ที่ให้ความสำคัญกับความถูกต้องและมาตรฐานในการเทียบโอนผลการศึกษา การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบล็อกเชนจึงช่วยเสริมความน่าเชื่อถือในกระบวนการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างสถาบันการศึกษาได้อย่างเป็นรูปธรรม

ท้ายที่สุด เพื่อตอบคำถามวิจัยข้อที่ 1 การศึกษานี้ได้ยืนยันศักยภาพว่า การผสมผสานเทคโนโลยี OCR, NLP และบล็อกเชนเข้าด้วยกันเป็นกรอบแนวคิดเชิงระบบ (Systemic Conceptual Framework) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในกระบวนการบันทึกและถ่ายโอนผลการศึกษาได้อย่างมีนัยสำคัญ แนวทางที่นำเสนอนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้

การบันทึกข้อมูลมีความสะดวกและแม่นยำสูงขึ้นเท่านั้น แต่ยังคงผลักดันให้กระบวนการตรวจสอบในระดับสถาบันเป็นไปอย่างโปร่งใส ปลอดภัย และสามารถอ้างอิงข้อมูลร่วมกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นการปูรากฐานที่สำคัญในการส่งเสริมให้สถาบันการศึกษาปรับตัวเข้าสู่ยุคดิจิทัลอย่างเกิดประสิทธิผลสูงสุด

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์และการพัฒนาต่อยอดในอนาคต โดยในด้านการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ควรมีการนำกรอบแนวคิดเชิงระบบและสถาปัตยกรรมที่นำเสนอไปทดลองประยุกต์ใช้ในระบบทะเบียนกลางของสถาบันการศึกษา หรือขยายผลเพื่อพัฒนาระบบแพลตฟอร์มการเทียบโอนผลการศึกษาระดับประเทศ เพื่อเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างผลลัพธ์ของงานวิจัยกับการใช้งานในเชิงนโยบายอย่างเป็นรูปธรรม ทั้งนี้ ในการนำไปปฏิบัติจริงควรพิจารณาและบูรณาการร่วมกับหลักเกณฑ์และข้อบังคับของกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ว่าด้วยการเทียบโอนผลการศึกษา เพื่อให้กระบวนการทำงานสอดคล้องกับมาตรฐาน และสามารถรับรองผลการศึกษได้อย่างถูกต้องตามกฎหมาย นอกจากนี้ สถาบันการศึกษาที่ต้องการนำแนวทางนี้ไปใช้ควรสร้างกรณีตัวอย่างการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อให้บุคลากรและผู้เกี่ยวข้องเห็นภาพการทำงานและกระบวนการเชื่อมโยงข้อมูลได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น สำหรับข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคต งานวิจัยในระยะต่อไปควรนำกรอบแนวคิดนี้ไปพัฒนาต่อยอดเป็นระบบต้นแบบที่สามารถทำงานได้จริง โดยควรแสดงให้เห็นถึงรูปแบบหน้าจอการใช้งาน การทดสอบป้อนข้อมูลนำเข้า และการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง ยิ่งไปกว่านั้น เพื่อเพิ่มน้ำหนักและยืนยันความถูกต้องทางวิชาการ ควรมีการประเมินผลเชิงวิศวกรรมเพิ่มเติม เช่น การวัดค่าความแม่นยำของเทคโนโลยี OCR การวัดประสิทธิภาพการสกัดข้อมูลของ NLP (ผ่านค่า Precision, Recall หรือตาราง Confusion Matrix) เวลาในการตอบสนองของระบบ รวมถึงการเปรียบเทียบต้นทุนด้านพื้นที่จัดเก็บระหว่างบล็อกเชนกับฐานข้อมูลแบบดั้งเดิม ท้ายที่สุด ควรมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นตามกรอบแนวคิดนี้กับกระบวนการทำงานในรูปแบบเดิม เพื่อชี้ให้เห็นถึงความแตกต่าง จุดเด่น และข้อได้เปรียบในมิติของความปลอดภัยและความโปร่งใอย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

- Achar, C., & Wukkadada, B. (2023). Blockchain enabled applications in the education domain and potential challenges. *2023 Somaiya International Conference on Technology and Information Management (SICTIM)*, 73–77.
- Alargrami, A. M., & Eljazzar, M. M. (2020). Imam: Word embedding model for Islamic Arabic NLP. *2020 2nd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)*, 520–524.
- Gao, L. (2020). Management of online education based on blockchains. *2020 International Conference on Modern Education and Information Management (ICMEIM)*, 84–89.
- Guo, Q., Chen, S., Wang, J., & Pan, X. (2022). Research and design of electric power engineering project management system based on blockchain technology. *2022 International Conference on Blockchain Technology and Information Security (ICBTIS)*, 80–84.

- Han, X., Dang, Y., Mei, L., Wang, Y., Li, S., & Zhou, X. (2019). A novel part of speech tagging framework for NLP based business process management. *2019 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*, 383–387.
- Inayatulloh, & Zamasi, H. C. (2024). Development of non-accredited higher education with the support of high-accredited higher education with blockchain technology. *2024 Second International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things (ICoCI)*, 50–54.
- Iwai, K., Akiyoshi, M., & Hamagami, T. (2020). Structured feature derivation for transfer learning on credit scoring. *2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 818–823.
- Joshi, K., & Arolkar, H. (2024). Comparative analysis of outcomes of Tesseract OCR for different languages. *2024 5th International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)*, 95–100.
- Kavita, M., & Singh, H. (2023). Utilizing mixture methods for classifier in NLP: An essential consideration. *2023 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Communication (AISC)*, 422–426.
- Kim, J., Hur, S., Lee, E., Lee, S., & Kim, J. (2021). NLP-Fast: A fast, scalable, and flexible system to accelerate large-scale heterogeneous NLP models. *2021 30th International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques (PACT)*, 75–89.
- Liu, R. (2020). A preliminary study of the impact of blockchain technology on internal auditing. *2020 2nd International Conference on Applied Machine Learning (ICAML)*, 286–293.
- Nguyen Thi, T., Do, T.-H., & Yoo, M. (2023). Implementation of OCR system on extracting information from Vietnamese book cover images. *2023 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 427–432.
- Pradeepa, G., & Devi, R. (2022). Malicious domain detection using NLP methods — A review. *2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*, 1584–1588.
- Rao, S. R., Niranjana, V. R., Saraf, M. N., Bansal, A., & Upreti, A. (2024). Personalized credit score prediction and improvement model using machine learning. *2024 Asia Pacific Conference on Innovation in Technology (APCIT)*, 1–4.
- Singh, A., Jangra, S., & Aggarwal, G. (2024). EnvisionText: Enhancing text recognition accuracy through OCR extraction and NLP-based correction. *2024 14th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, 47–52.
- Sinha, A., Jenckel, M., Bukhari, S. S., & Dengel, A. (2019). Unsupervised OCR model evaluation using GAN. *2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, 1256–1261.
- Wang, X., Jia, J., Cao, Y., Du, J., Hu, A., Liu, Y., & Wang, Z. (2023). Application of data storage management system in blockchain-based technology. *2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)*, 1437–1440.
- Wei, Q., Liu, Y., & Wu, K. (2021). Transfer learning based credit scoring. *2021 IEEE 24th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, 1251–1255.

Received: Nov 6, 2025

Revised: Jan 21, 2026

Accepted: Apr 22, 2026

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับวิเคราะห์โรคในใบข้าวโพด

APPLICATION OF DEEP LEARNING TECHNOLOGY TO CREATE A WEB APPLICATION FOR CORN LEAF DISEASE ANALYSIS

อัศมเดช อินทชัย¹, ธนिरัตน์ ยอดดำเนิน², อนัน หยวักว³, ปรีชาภรณ์ ขันบุรี^{4*}

^{1,2}สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

³สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุและอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมสารพัดกิจและยานยนต์ไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

Autsadech Intachai¹, Thanirat Yoddamnern², Anan Yuakwat³, Preechabhorn Kunburi^{4*}

^{1,2}Computer Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

³Materials and Industrial Engineering Program, Faculty of Industrial Technology,

Kamphaeng Phet Rajabhat University

^{4*}Smart Grid and Electric Vehicle Engineering Program, Faculty of Industrial Technology,

Kamphaeng Phet Rajabhat University

*Corresponding author, e-mail : prechaporn23pp@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์โรคในใบข้าวโพด โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึกในลักษณะของ การตรวจจับวัตถุ (Object Detection) เพื่อระบุชนิดของโรคจากภาพถ่ายใบข้าวโพด ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้สถาปัตยกรรม YOLOv11 สำหรับตรวจจับและจำแนกโรคในใบข้าวโพด 3 ชนิด ได้แก่ โรคราสนิมข้าวโพด โรคราน้ำค้าง และโรคใบไหม้ข้าวโพด ชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยภาพใบข้าวโพดจำนวน 450 ภาพ โดยแบ่งข้อมูลสำหรับฝึกสอนและทดสอบโมเดลในอัตราส่วน 50:50 จาก Dataset มีขนาดจำกัดเน้นการนำไปใช้งานจริงมากกว่าต้องการความแม่นยำ เพื่อลดปัญหาการเกิด Overfitting ในส่วนการประเมินประสิทธิภาพของระบบใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall และ F1-Score

ผลการทดลองพบว่าโมเดลสามารถตรวจจับและจำแนกโรคในใบข้าวโพดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความแม่นยำเฉลี่ยอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงผ่านเว็บแอปพลิเคชันได้แบบ Real-time งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึกด้านการตรวจจับวัตถุในการสนับสนุนการวิเคราะห์โรคพืช และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาเกษตรแม่นยำในอนาคตได้

คำสำคัญ : โรคข้าวโพด, การประมวลผลภาพ, โมเดล YOLO, การเรียนรู้เชิงลึก, เว็บแอปพลิเคชัน

Abstract

This research aims to develop a web application for analyzing corn leaf diseases by applying deep learning techniques based on object detection to identify disease types from corn leaf images. The proposed system employs the YOLOv11 architecture to detect and classify three types of corn leaf diseases: corn common rust, downy mildew, and corn leaf blight. The dataset used in this study consists of 450 corn leaf images, which were divided into training and testing sets at a ratio of 50:50. Due to the limited size of the dataset, the focus is on practical application rather than competing on accuracy, in order to reduce the problem of overfitting. The system performance was evaluated using standard metrics, including accuracy, precision, recall, and F1-score.

Experimental results demonstrate that the proposed model can effectively detect and classify corn leaf diseases with satisfactory accuracy and can be deployed in real-time through a web application. The findings indicate the potential of deep learning-based object detection techniques to support plant disease analysis and contribute to the advancement of precision agriculture in the future.

Keywords : Corn Diseases, Image Processing, YOLO, Deep Learning, Web Application

บทนำ

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตข้าวโพดสำคัญ โดยการวางแผนพัฒนาการผลิตและงานวิจัยระดับประเทศชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของข้าวโพดต่อภาคเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร (กรมวิชาการเกษตร, 2566) การระบาดของโรคใบข้าวโพด เช่น โรคราสนิมข้าวโพด (Corn Common Rust) โรคราน้ำค้าง (Downy Mildew) โรคใบไหม้ข้าวโพด (Corn Blight) อีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ผลผลิตข้าวโพดที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ ทำให้ต้องมีการนำเข้าทั้งจากประเทศเพื่อนบ้านและนอกอาเซียน ดังนั้นการตรวจพบและจำแนกโรคในระยะต้นเป็นหัวใจของการจัดการโรคพืชที่มีประสิทธิภาพ (Waheed et al., 2020; Fraiwan et al., 2022) ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายต่อผลผลิตได้สูงถึง 20-60% หากไม่ได้รับการตรวจจับและจัดการอย่างทันท่วงที (Janruang and Unartngam, 2018) ความสูญเสียดังกล่าวไม่เพียงแต่กระทบต่อรายได้ของเกษตรกรรายย่อย แต่ยังส่งผลต่อเสถียรภาพด้านวัตถุดิบอาหารสัตว์และความมั่นคงทางอาหารโดยรวม วิธีการตรวจจับโรคแบบดั้งเดิมในประเทศไทยยังอาศัยการสังเกตโดยผู้เชี่ยวชาญเกษตร ซึ่งใช้เวลานาน มีข้อจำกัดด้านจำนวนบุคลากร และไม่สามารถรองรับพื้นที่เพาะปลูกที่กว้างขวางได้ทันต่อการระบาด

งานวิจัยของ (Fraiwan et al., 2022) พัฒนาโมเดล Deep Learning บนชุดข้อมูลภาพใบพืชและยืนยันว่าเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับการตรวจจับโรคในระดับไร่นา ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคนิค Deep Learning โดยเฉพาะสถาปัตยกรรม Convolutional Neural Networks และโมเดลตระกูล YOLO ถูกนำมาใช้เพื่อการตรวจจับและจำแนกโรคใบพืชด้วยความแม่นยำสูง (Aldakheel et al., 2024; Alhwaiti et al., 2025) และงานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้งานจริงมักรวมทั้งการพัฒนาโมเดลที่มีประสิทธิภาพและการวางระบบเชื่อมต่อ เช่น ระบบเว็บ และ IoT เพื่อให้เกษตรกรสามารถอัปโหลดภาพและรับการวินิจฉัยแบบเรียลไทม์ ซึ่งสอดคล้องกับ (Parez et al., 2023) แนวทางเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) ที่นำสู่การลดการสูญเสียและการตัดสินใจจัดการเชิงปฏิบัติ

งานวิจัยของ (Zhou, Z., et al., 2021) ได้รื้อฟื้นที่ครอบคลุมแนวทางต่าง ๆ ของการตรวจจับโรคและแมลงบนพืชโดยใช้ deep learning แบ่งตามแนวทาง (classification, detection, segmentation) พร้อมวิจารณ์จุดแข็ง จุดอ่อน และทำ

หายของแต่ละแนวทาง เช่น การหาชุดข้อมูลที่หลากหลาย, การทำงานภาคสนาม, ปัญหาแสงและพื้นหลัง เป็นต้น ในส่วนของ (Li et al., 2022) เสนอสถาปัตยกรรม FL-EfficientNet (Focal loss + EfficientNet) สำหรับจำแนกโรคพืชหลายประเภท พร้อมเทคนิค attention และ loss function แบบ focal เพื่อรับมือกับตัวอย่างที่ยากต่อการจำแนก ผลการทดลองแสดงว่า accuracy สูงถึง 99.72% งานวิจัย (Zhang et al., 2024) นี้รวมโมเดลหลายรุ่น (DenseNet201, EfficientNetB0, InceptionResNetV2 ฯลฯ) เป็น ensemble เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกโรคพืช ผลงานรายงานว่า ensemble สามารถให้ความแม่นยำอยู่ที่ 99.89% บนชุดข้อมูล PlantVillage งานของ (Kaur & Singh, 2022) ใช้โมเดล CNN ที่ pre-trained (DenseNet-121, ResNet-50, VGG-16, Inception V4) แล้ว fine-tune กับข้อมูลโรคพืช เพื่อให้สามารถจำแนกโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้พัฒนาโมเดล deep learning เพื่อวินิจฉัยโรคพืชในหลายพืช (multi-crop disease detection) งานของ (Li et al., 2023) ใช้ขั้นตอน preprocessing, augmentation และเลือกโครงสร้างเครือข่ายให้เหมาะสม ผลทดสอบในหลายพืชแสดงผลดี งานวิจัยของ (Wang et al., 2024) ออกแบบ CNN ที่เบา (lightweight) สำหรับจำแนกโรคใบพริก เพื่อให้สามารถประมวลผลบนอุปกรณ์ edge ได้ พบว่าโมเดลยังคงให้ความแม่นยำสูงแม้มีข้อจำกัดทรัพยากร งานวิจัยของ (Hossain et al., 2025) พัฒนาแอปบนมือถือที่ฝังโมเดล CNN (VGG16, AlexNet, ResNet50) สำหรับตรวจจับโรคในใบข้าวโพดแบบเรียลไทม์ พบว่า VGG16 ให้ความแม่นยำ ~95% บนชุดทดสอบ งานวิจัยของ (Cap et al., 2020) เสนอวิธีสร้างภาพเพิ่ม (data augmentation) ด้วย GAN (LeafGAN) ที่เปลี่ยนภาพพืชปกติให้เป็นพืชที่มีอาการโรคเฉพาะเจาะจง โดยเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล ทำให้ผลการจำแนกโรคบนชุดข้อมูลทดสอบเพิ่มขึ้น 7.4% งานของ (Thakur et al., 2022) รวมแนวคิด Vision Transformer กับ CNN เพื่อวินิจฉัยโรคพืช พร้อมใส่เทคนิค explainable AI (XAI) เพื่อให้โมเดลมีความอธิบายได้ (interpretability) โดยรายงานผลว่า PlantXViT ให้ความแม่นยำสูงในหลายชุดข้อมูล ชุดทำงานของ (Wang et al., 2022) งานวิจัยนี้สำรวจ 70 งานวิจัยที่ประยุกต์ deep learning กับการวินิจฉัยโรคพืชและแนวโน้มการใช้งาน พบว่าเทคนิคเช่น transfer learning, data augmentation, ensemble models เป็นที่นิยม และมีช่องว่างเรื่อง generalization ข้ามสายพันธุ์พืช จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสรุปได้ว่า การวินิจฉัยด้วยสายตายังมีความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะในกรณีที่โรคอยู่ในระยะเริ่มต้นหรือมีอาการคล้ายคลึงกับโรคอื่นๆ การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และ Deep Learning จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการวิจัยระดับนานาชาติ

ในบริบทประเทศไทย การสร้างระบบที่สามารถจำแนกโรคข้าวโพดได้ ผ่านเว็บ (Website Platform) ถือเป็นนวัตกรรมที่ช่วยแก้ไขข้อจำกัดเชิงโครงสร้างพื้นฐานด้านเกษตรกรรม เนื่องจากเกษตรกรส่วนใหญ่สามารถเข้าถึงสมาร์ทโฟนและอินเทอร์เน็ตมากกว่าบุคลากรผู้เชี่ยวชาญ การพัฒนาระบบที่ใช้โมเดล YOLOv11 ซึ่งเป็นอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุที่มีความเร็วและความแม่นยำสูง จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถอัปโหลดภาพใบข้าวโพดเข้าสู่ระบบเพื่อวิเคราะห์และรับผลการวินิจฉัยโรคได้ทันที พร้อมค่าความเชื่อมั่น (Confidence Score) ที่ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และวิชาการ โดยไม่เพียงแต่ช่วยเกษตรกรไทยลดความสูญเสียจากโรคพืช แต่ยังเป็นรากฐานสู่การพัฒนาแพลตฟอร์มเกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture Platform) ที่สามารถขยายผลสู่การตรวจจับโรคพืชชนิดอื่นๆ การจำแนกแบบหลายโรคพร้อมกัน (Multi-disease Classification) เพื่อรองรับเกษตรกรแม่นยำในอนาคต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบจำแนกโรคในใบข้าวโพดด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์ผลการตรวจจับโรคข้าวโพด

ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตของข้อมูล

ข้อมูลภาพของโรคในใบข้าวโพดที่ใช้ในการตรวจจำแนก จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ โรคราสนิม ข้าวโพด (Corn Common Rust) โรคราน้ำค้าง (Downy mildew) โรคใบไหม้ข้าวโพด (corn blight) โดยข้อมูลภาพที่ใช้ทั้งหมด จำนวน 450 ภาพ ซึ่งแบ่งออกเป็นชุดฝึก (Training Set) จำนวน 225 ภาพ และชุดทดสอบ (Testing Set) จำนวน 225 ภาพ

2. ขอบเขตด้านเทคโนโลยีและเครื่องมือ

2.1 ใช้โมเดล YOLOv11 สำหรับจำแนกโรค

2.2 พัฒนาแอปพลิเคชันด้วยเทคโนโลยีเว็บ โดยสามารถอัปโหลดภาพและรับผลการวิเคราะห์ผ่านเว็บไซต์

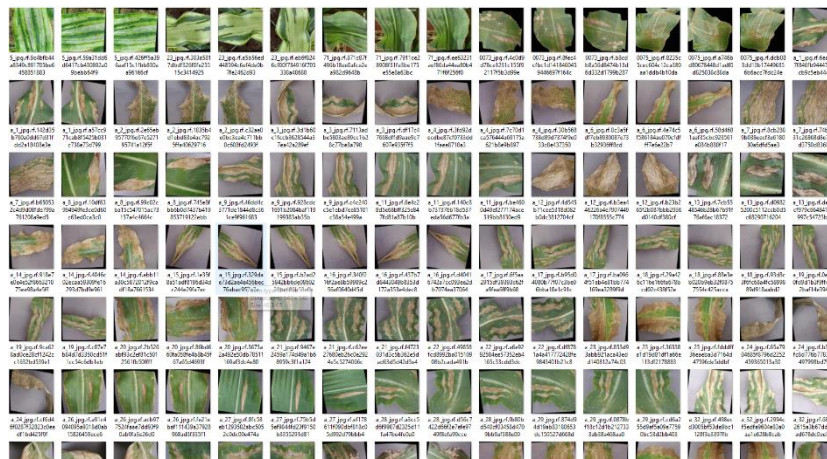
วิธีดำเนินการวิจัย

1. ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจจำแนกโรคพืช

โดยมุ่งเน้นไปที่การใช้เทคนิคการประมวลผลภาพและปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกลุ่มชาวไร่ที่ปลูกข้าวโพด และกำหนดแนวทางการแก้ไข คือ การออกแบบระบบที่สามารถตรวจจำแนกและวิเคราะห์ได้โดยอัตโนมัติ

2. การเก็บรวบรวมข้อมูล

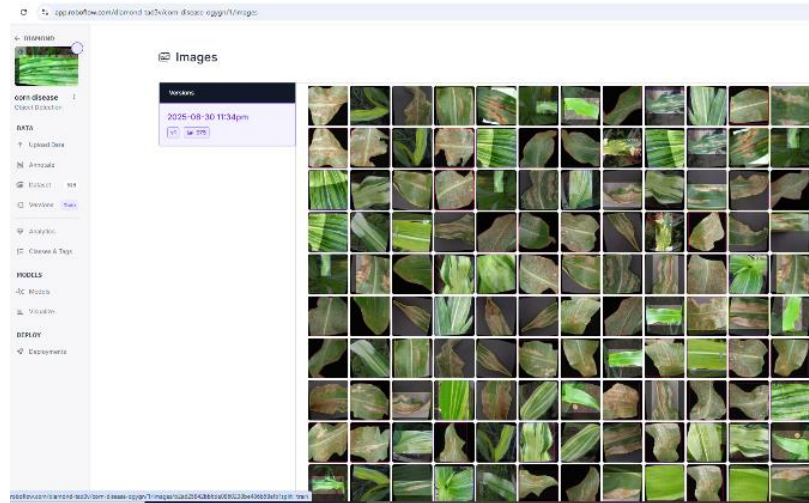
การเก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการฝึกสอนโมเดลดำเนินการโดยรวบรวม ภาพใบข้าวโพดที่มีอาการของโรคต่างๆ จากแหล่งข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ศูนย์วิจัยพืชพรรณสวนหลวง ร.9 กรุงเทพมหานคร (ศูนย์วิจัยข้าวโพดนครสวรรค์, 2566) โดยเลือกภาพที่ขนาดภาพ 640x640 และระบุโรคได้ชัดเจน



ภาพที่ 1 แสดงข้อมูลภาพโรคในใบข้าวโพด

3. การจัดเตรียมข้อมูลภาพและการทำ Label

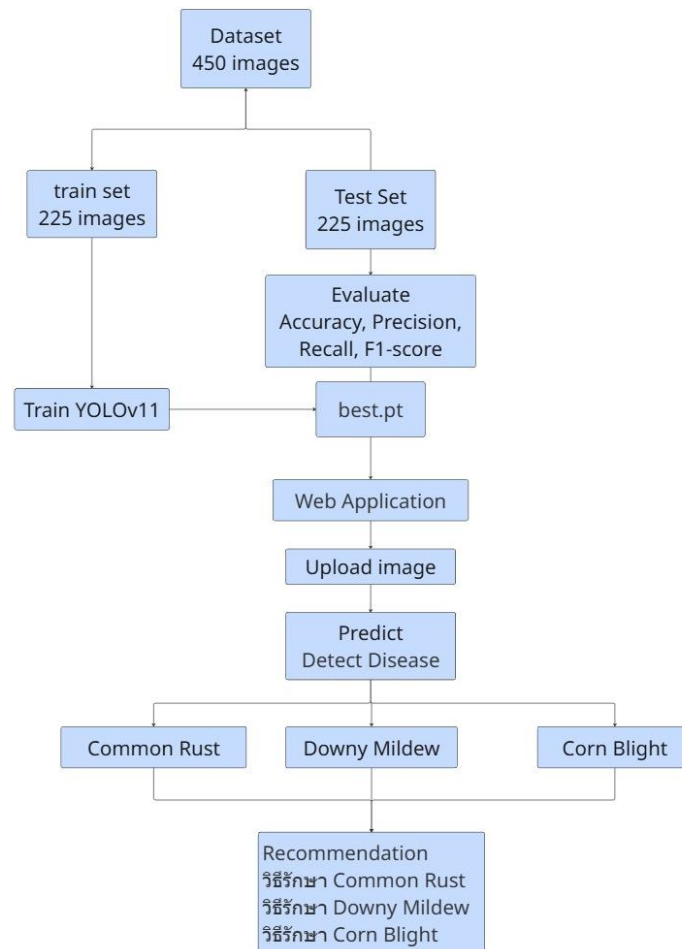
หลังจากได้ไฟล์ภาพภาพที่ผ่านการคัดเลือกแล้วดำเนินการทำ Label บนเว็บไซต์ Roboflow โดยกำหนดชื่อคลาสเป็น Common Rust, Downy Mildew และ Corn Blight



ภาพที่ 2 แสดงการทำ Label ภาพ

4. การสร้างโมเดลสำหรับการตรวจจับโรคใบข้าวโพดและการทดลอง

กระบวนการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การฝึกสอนโมเดล (Training Phase) ผู้วิจัยได้ใช้สถาปัตยกรรม YOLOV11 ในการสร้างโมเดลสำหรับตรวจจับโรคใบข้าวโพด โดยกำหนดคลาสทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ Common Rust, Downy Mildew และ Corn Blight สำหรับชุดข้อมูลภาพที่ใช้ทั้งหมดจำนวนภาพรวม 450 ภาพ โดยแบ่งข้อมูลเป็น 50:50 โดยหลักวิชาการสัดส่วน 70:30 และ 80:20 เหมาะสมกับงานที่มีชุดข้อมูลขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ และมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลเป็นหลัก ชุดข้อมูลมีขนาดจำกัดและมีความหลากหลายสูง การแบ่งข้อมูลในอัตราส่วน 50:50 สามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการประเมินได้ดีกว่า เนื่องจากมีชุดทดสอบที่เพียงพอในการสะท้อนความสามารถของโมเดลต่อข้อมูล ซึ่งเป็นภาพสำหรับการฝึกสอน (Training Set) จำนวน 225 ภาพ เมื่อการฝึกสอนเสร็จสิ้น โมเดลที่ได้จะถูกนำไปทดสอบด้วยชุดข้อมูลทดสอบ (Testing Set) จำนวน 225 ภาพ ซึ่งมีการแบ่งภาพออกตามคลาสเช่นเดียวกับชุดฝึกสอน โดยผลการทดสอบถูกประเมินด้วยเกณฑ์ด้านความแม่นยำ (Accuracy) และประสิทธิภาพ (Performance) ในการตรวจจับโรคของแต่ละคลาส ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การจำลองโมเดล

5. การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลและผลลัพธ์

การทำนายจะใช้ Confusion Matrix และหลักการในการประเมิน Machine Learning Model เพื่อทดสอบความแม่นยำและความถูกต้องของโมเดลตามข้อมูลที่ได้รับการประเมิน จากชุดทดสอบจำนวน 225 ภาพ แบ่งเป็น 3 คลาสๆ ละ 75 ภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 1 ค่า Confusion Matrix ของโมเดล

ผล	Predicted		
จากตารางที่ 1 แสดงโรคราสนิม (Corn Common Rust) จำนวนถูกต้องทั้งหมด 75 ครั้ง ไม่สับสนกับโรคอื่นเลย โรคราน้ำค้าง (Downy M	Corn Common Rust	Downy mildew	Corn blight
ขั้นตอนประเมินประสิทธิภาพของโมเดล	Corn Common Rust	75	0
ขั้นตอนที่ 1 หากจำนวนทั้งหมด N โดยใช้สัญลักษณ์: A = Corn Common Rust, B = Corn Downy Mildew, C = Corn Blight	Downy mildew	0	73
	N = จำนวน A + จำนวน B + จำนวน C = 75+75+75 = 225	2	73
ขั้นตอนที่ 2 หา TP ต่อคลาส			

$$TP_A = 75, TP_B = 73, TP_C = 73$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณ Precision / Recall / F1 ต่อคลาส

สูตรพื้นฐาน

$$Precision_i = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i}$$

$$Recall_i = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i}$$

$$F1_i = 2 \times \frac{Precision_i \times Recall_i}{Precision_i + Recall_i}$$

ขั้นตอนที่ 4 หาค่า Accuracy และค่าเฉลี่ย Precision / Recall / F1 ของโมเดล

$$Accuracy = \frac{TP_A + TP_B + TP_C}{N} = \frac{75 + 73 + 73}{225} = \frac{221}{225} = 0.9822$$

$$Precision = \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} = 221/225 = 0.9822$$

$$Recall = \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} = 221/225 = 0.9822$$

$$F1\text{-score} = 2 \times \frac{Precision_i \times Recall_i}{Precision_i + Recall_i} = 2 \times \frac{0.9822 \times 0.9822}{0.9822 + 0.9822} = 0.9822$$

ตารางที่ 2 ค่าประสิทธิภาพ Precision, Recall และ F1-Score ของโมเดลจำแนกโรคข้าวโพด

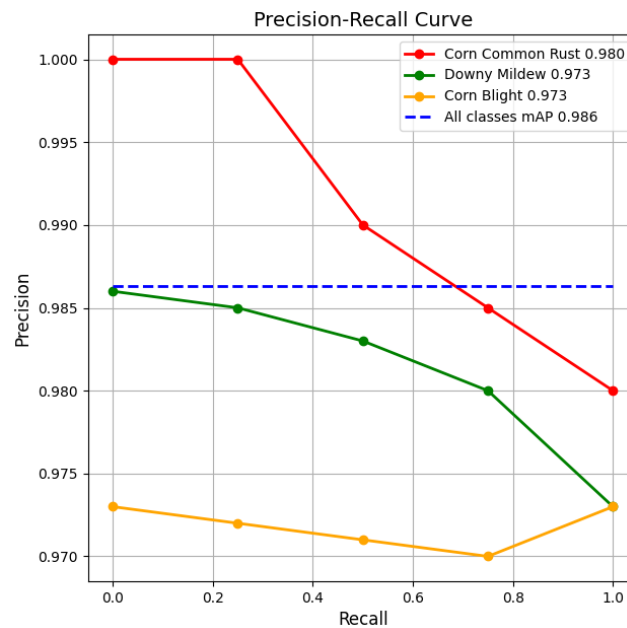
คลาส	Precision	Recall	F1 Score
Corn Common Rust	1.00	1.00	1.00
Downy mildew	0.973	0.973	0.973
corn blight	0.973	0.973	0.973
ค่าเฉลี่ยทุกคลาส	Accuracy = 98.22%		

จากตารางที่ 2 ผลของโมเดลตรวจจับโรคในใบข้าวโพดทั้ง 3 ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อพิจารณาทีละคลาส พบว่า โรคราสนิมข้าวโพด (Corn Common Rust) โมเดลตรวจจับได้ถูกต้องทั้งหมด ไม่มีข้อผิดพลาดเลย ค่า Precision, Recall และ F1 Score = 1.00 (หรือ 100%) แสดงว่าโมเดลสามารถแยกโรคราสนิมได้อย่างแม่นยำที่สุด โรคราน้ำค้าง (Downy Mildew) มีค่า Precision = 0.973, Recall = 0.973, F1 Score = 0.973 โรคใบไหม้ข้าวโพด (Corn Blight) มีค่า Precision = 0.973, Recall = 0.973, F1 Score = 0.973 ค่าเฉลี่ยทุกคลาสความแม่นยำ เท่ากับ 98.22%



ภาพที่ 4 แสดงผลลัพธ์การใช้โมเดลการตรวจจับโรคในข้าวโพด

จากภาพที่ 4 ผลของโมเดลตรวจจับโรคในใบข้าวโพดที่ถูกฝึกด้วยสถาปัตยกรรม YOLOv11 โดยภาพเหล่านี้แสดงผลการจำแนกประเภทของโรคต่างๆ ที่พบในใบข้าวโพด ภาพแต่ละภาพมีกรอบบอกตำแหน่งของโรค พร้อมชื่อโรคและค่าความมั่นใจ (Confidence score) เช่น corn blight 0.9 ลักษณะใบไม้มีความหลากหลาย ทั้งแสงและมุมกล้อง แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถรองรับความหลากหลายของข้อมูล (robustness) ได้



ภาพที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่า Precision กับ Recall ของโมเดล

จากภาพที่ 5 กราฟ Precision-Recall Curve แสดงให้เห็นว่าโมเดล YOLOv11 สามารถตรวจจับและจำแนกโรคในใบข้าวโพดทั้ง 3 ชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยมีความสมดุลระหว่าง Precision และ Recall ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการตรวจพบโรคได้ครบถ้วนพร้อมกับการทำนายที่มีความถูกต้องสูง สนับสนุนความเหมาะสมของโมเดลสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงผ่านเว็บแอปพลิเคชันด้านการวิเคราะห์โรคพืช

ผลการวิจัย

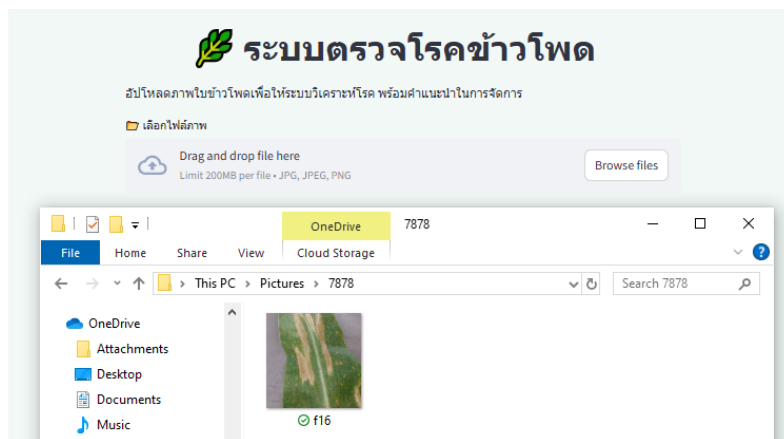
1. ผลการประเมินโมเดลโรคข้าวโพดด้วย Confusion Matrix และค่าชี้วัดต่างๆ แสดงให้เห็นว่าโมเดล YOLOv11 มีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกโรค โดยเฉพาะคลาส Corn Common Rust ทำนายได้ถูกต้อง 100% (Precision และ Recall เท่ากับ 1.00) สำหรับคลาส Downy mildew และ corn blight โมเดลก็มีประสิทธิภาพที่น่าพอใจ โดยมีค่า F1-Score อยู่ที่ 0.97 และ 0.97 ตามลำดับ โดยรวมแล้วผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันว่าโมเดลนี้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งานเพื่อตรวจจับและจำแนกโรคข้าวโพด เมื่อเปรียบเทียบโมเดลต่าง ๆ สำหรับการคัดเลือกโมเดลให้มีประสิทธิภาพด้านความแม่นยำและความเร็วที่เหมาะสมกับงานได้ดังนี้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสถาปัตยกรรมแต่ละโมเดลการจำแนกโรคข้าวโพด

Model	accuracy	Precision	Recall	F1-Score	Inference Time (ms/img)
YOLOv5n	94.8%	95.1%	94.5%	94.8%	8.3
YOLOv8n	96.3%	96.9%	95.6%	96.2%	7.5
YOLOv11n	98.2%	98.2%	98.2%	98.2%	6.9
ResNet-50	91.2%	92.0%	90.4%	91.2%	58.4
MobileNetV2	88.6%	89.1%	87.8%	88.4%	5.9

จากการเปรียบเทียบสถาปัตยกรรมแต่ละโมเดลผลปรากฏว่า ด้านความแม่นยำสูงที่สุดได้แก่ YOLOv11n ทางด้านความเร็วสูงที่สุดได้แก่ MobileNetV2 แต่เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองโมเดลนี้ทั้งด้านความแม่นยำและความเร็วสรุปได้ว่า โมเดล YOLOv11n มีความเหมาะสมกับงานมากที่สุด คือ ความแม่นยำที่ 98.2% ความเร็วที่ 6.9 ms/img ในขณะที่ MobileNetV2 ความแม่นยำเพียง 88.6% ความเร็วที่ 5.9 ms/img ซึ่งความเร็วไม่ต่างกันมากนักแต่ความแม่นยำต่างกันเกือบ 10%

2. ผลลัพธ์จากการทดสอบโมเดลในการใช้งานจริงบนเว็บแอปพลิเคชัน โดยการอัปโหลดรูปภาพให้กับระบบได้วิเคราะห์ตรวจจับโรคข้าวโพดและวิธีการรักษา ทางแอดเดรส <https://dfbbdaf0f325.ngrok-free.app/> (ซึ่งการใช้งาน ngrok หากปิดเครื่องเว็บจะใช้ไม่ได้ โดยที่แอดเดรสเว็บจะเปลี่ยนไป เมื่อทำการเปิดระบบให้ใช้งาน)



ภาพที่ 6 แสดงผลการทดสอบโมเดลบนเว็บแอปพลิเคชัน

จากภาพที่ 6 เป็นการแสดงวิธีใช้งานจริงบนเว็บแอปพลิเคชัน ด้วยวิธีการอัปโหลดภาพไปยังเซิร์ฟเวอร์ โดยเรียกข้อมูลในเครื่องและส่งเพื่อวิเคราะห์ ในตัวอย่างรองรับไฟล์ภาพนามสกุล JPG, JPEG, PNG



ภาพที่ 7 ผลการทดสอบโมเดลในการใช้งานจริงบนเว็บแอปพลิเคชัน

จากภาพที่ 7 ผลของการทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำของโมเดลในการตรวจจับโรคข้าวโพดและวิธีการรักษา ในตัวอย่างตรวจพบเป็น โรคใบไหม้ข้าวโพด (Corn blight) ผลการตรวจจับบนภาพ ที่ค่าความเชื่อมั่น (Confidence) 0.55 พร้อมแสดงสาเหตุ วิธีแก้ และป้องกัน



ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ไม่พบโรค

จากภาพที่ 8 ผลของการทดสอบเมื่อไม่มีโรคในข้าวโพดได้อย่างความถูกต้องและแม่นยำอีกทั้งยังแสดงการให้คำแนะนำป้องกันการเกิดโรค

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบโมเดลในการใช้งานจริง

การทดสอบโมเดลในการใช้งานจริง			
ชื่อโรค	จำนวนครั้งทั้งหมด	จำนวนครั้งที่ถูกต้อง	ความถูกต้องร้อยละ
โรคราสนิมข้าวโพด	30	29	96.00
โรคราน้ำค้าง	30	26	86.00
โรคใบไหม้ข้าวโพด	30	27	90.00
รวมทั้งหมด	90	82	91.11

จากตารางที่ 4 เป็นผลการทดสอบโมเดลในการใช้งานจริงเพื่อหาความถูกต้องและความแม่นยำของโมเดลจากการทดสอบทั้งหมด 90 ครั้ง โรคละ 30 ครั้ง มีผลดังนี้ 1) โรคราสนิมข้าวโพด ถูกต้อง 29 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 96.00, 2) โรคราน้ำค้าง ถูกต้อง 26 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 86.00, 3) โรคราน้ำค้าง ถูกต้อง 27 ครั้ง คิดเป็น ร้อยละ 90.00, เฉลี่ยความถูกต้องโดยรวมเท่ากับร้อยละ 91.11

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า โมเดลที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการตรวจจับโรคข้าวโพดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง การประยุกต์ใช้เทคนิค YOLOv11 ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่โดดเด่นสำหรับงานตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์ ทำให้ระบบสามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการวินิจฉัยและระบุสาเหตุของโรคข้าวโพดในระยะเริ่มต้นได้อย่างดียิ่ง

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ควรมีการทดสอบเพิ่มเติมในสถานการณ์ที่มีความหลากหลายและซับซ้อน เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแสงที่ต่างกัน หรือการตรวจจับวัตถุในกรณีที่มีการบังบางส่วน การทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงจะช่วยประเมินขีด ถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยแก้ปัญหาให้แก่เกษตรกรผู้ปลูกข้าวโพด และเป็นตัวอย่างที่ชัดเจนในการส่งเสริมให้มีการนำนวัตกรรมมาใช้เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตและสร้างความยั่งยืนในภาคเกษตรกรรมต่อไป

สรุปผลและอภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่าโมเดล YOLOv11n ให้ความแม่นยำสูงสุดในการจำแนกโรคของข้าวโพดโดยมีความแม่นยำ เท่ากับ 98.2% รองลงมาคือ YOLOv8n เท่ากับ 96.3%) และ YOLOv5s เท่ากับ 94.8% ขณะที่ ResNet-50 และ MobileNetV2 มีความแม่นยำลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสถาปัตยกรรมทั้งสองเน้นการตรวจจับวัตถุทั่วไปในเชิงภาพนิ่งมากกว่าการตรวจจับเชิงเรียลไทม์ ซึ่งต้องอาศัยการประมวลผลที่รวดเร็วและสามารถจับลักษณะสีและพื้นผิว (texture) ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ สาเหตุที่ YOLOv11n ให้ผลดีกว่าโมเดลอื่น สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของ Convolutional Neural Network (CNN) ที่มุ่งเน้นการเรียนรู้คุณลักษณะเชิงพื้นที่ (spatial features) จากภาพ เช่น สี ลวดลาย และพื้นผิว ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับโรคของผลไม้ (Zhou et al., 2021) โดย YOLOv11 มีการพัฒนาโครงสร้างแบบ Hybrid Backbone (RT-DETR) และใช้กลไก Anchor-free Detection ที่ช่วยให้ตรวจจับวัตถุขนาดเล็กและความซับซ้อนได้แม่นยำกว่าแบบดั้งเดิม ทั้งยังลดปัญหา overfitting ในข้อมูลชุดเล็ก (Li et al., 2023; Zhang et al., 2024)

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า YOLOv11n เป็นสถาปัตยกรรมที่มีประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับการจำแนกโรคของข้าวโพด เนื่องจากสามารถเรียนรู้ฟีเจอร์เชิงลึกของสีและพื้นผิวได้อย่างแม่นยำ มีความเร็วในการประมวลผลสูง และลดความคลาดเคลื่อนของการจำแนกได้ดีกว่าโมเดลอื่น นอกจากนี้ยังเป็นตัวอย่างของการนำนวัตกรรมมาใช้เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตและสร้างความยั่งยืนในภาคเกษตรกรรมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad A., Saraswat D. & Gamal E A. (2022). A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools. *Computers an Electronics in Agriculture*.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277237552200048X>
- Aldakheel, E. A., Zakariah, M., & Alabdallal, A. H. (2024). Detection and identification of plant leaf diseases using YOLOv4. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1355941. doi: 10.3389/fpls.2024.1355941

- Alhwaiti, Y., Khan, M., Asim, M., Siddiqi, M. H., Ishaq, M., & Alruwaili, M. (2025). Leveraging YOLO deep learning models to enhance plant disease identification. *Scientific Reports*, 15, 7969. doi: 10.1038/s41598-025-92143-0
- Andrew, J., Eunice J., Popescu D., Chowdary, M., & Hemanth, J. (2022). Deep Learning-Based Leaf Disease Detection in Crops Using Pre-trained Models. *Agronomy*. 12, 2395. <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/10/2395>
- Askale, G.T., Yibel, A.B., Taye, B.M., & Wubneh, G.D. (2025). Mobile based deep CNN model for maize leaf disease detection and classification. *Plant Methods*, 21(72). <https://doi.org/10.1186/s13007-025-01386-5>
- Cap, Q. H., Uga, H., Kagiwada, S., & Iyatomi, H. (2020). LeafGAN: An Effective Data Augmentation Method for Practical Plant Disease Diagnosis. *arXiv*. doi: 10.48550/arXiv.2002.10100
- Fraivan, M., Esraa, F., and Khasawneh, N. (2022). Classification of Corn Diseases from Leaf Images Using Deep Transfer Learning. *Plants*, 11(20), 2668. doi: 10.3390/plants11202668
- Fu, Y., Gou, L., & Hung, F. (2024). A lightweight CNN model for pepper leaf disease recognition in a human palm background. *Journal of Plant Protection and Resources*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024094787>
- Janruang, N., and Unartngam, P. (2018). Morphological and Molecular Based Identification of Corn Downy Mildew Distributed in Thailand. *International Journal of Agricultural Technology*, 14(6), 845–860. <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/IJAT/10992417.pdf>
- Jung, M., Song, J.S., Shin, A.Y., Choi, B., Go, S., Kwon, S., Park J., & Kim, Y.M. (2023). Construction of deep learning-based disease detection model in multiple crops. *Scientific Reports*. 13(7331). <https://www.nature.com/articles/s41598-023-34549-2>
- Parez, S., Dilshad, N., Alghamdi, N. S., Alanazi, T. M., and Lee, J. W. (2023). Visual intelligence in precision agriculture: exploring plant disease detection via efficient vision transformers. *Sensors*, 23(15), 6949. <https://doi.org/10.3390/s23156949>
- Sun, X., Li, G., Qu, P., Xie, X., Pan, X., & Zang, W. (2022). Research on plant disease identification based on CNN. *Cognitive Robotics*, (2), 155–163. doi: 10.1016/j.cogr.2022.07.001
- Thakur, P. S., Khanna, P., Sheorey, T., & Ojha, A. (2022). Explainable vision transformer enabled convolutional neural network for plant disease identification: PlantXViT. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2207.07919>
- Zhang, Y., et al. (2024). An ensemble of deep learning architectures for accurate plant leaf disease classification. *Computers and Electronics in Agriculture*. <https://doi.org/10.37936/ecti-cit.2024181.254501>
- Zhou, Z., et al. (2021). Plant diseases and pests detection based on deep learning: a review. *Plant Methods*. 17(22), <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00722-9>
- ศูนย์วิจัยข้าวโพดนครสวรรค์. (ม.ป.ป). (2567, 15 สิงหาคม). องค์ความรู้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. https://www.doa.go.th/fc/nakhonsawan/?page_id=2321

Translated Thai References

- Nakhon Sawan Field Crops Research Center. (2024, August 15). *Knowledge on feed corn*. Retrieved from https://www.doa.go.th/fc/nakhonsawan/?page_id=2321

Received: Aug 28, 2025

Revised: Jun 16, 2026

Accepted: Jun 22, 2026

การทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งกระชายขาวภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

PREDICTION OF VACUUM DRYING KINETICS OF FINGERROOT USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODELS

ภาณุศักดิ์ มุลศรี¹, สัญชัย รำเพยพัฑ¹, อภิเดช บุญเจือ¹, อำพล พิชัยเชิด², วิชชุพงษ์ วิบูลเจริญ³,
ศรันย์ คัมภีร์ภัก³, ไมตรี ธรรมมา³, วริศราภรณ์ จรโคกกรวด^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

²สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

³สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Phanusak Munsri¹, Sanchai Ramphueiphad¹, Apidach Boonjue¹, Aumpol Pichaicherd²,
Witchupong Wiboonjaroen³, Saran Kampeephat³, Maitree Thamma³,
Warisaraporn Jornkokkrud^{1*}

¹Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology is the Engineering
Rajamangala University of Technology Isan

²Mechanical Technology, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

³Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Technology is the Engineering Rajamangala University
of Technology Isan

Corresponding author: Warisaraporn.jo@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่มีความสำคัญต่อคุณภาพ ความปลอดภัย และอายุการเก็บรักษาของสมุนไพรและพืชสมุนไพร งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) เพื่อทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งของกระชายขาว (*Boesenbergia rotunda*) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยได้ทำการทดลองอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 3 ระดับ (5, 10 และ 15 kPa) และความหนาตัวอย่าง 3 ระดับ (3, 5 และ 7 mm) โดยพิจารณาตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ความชื้น (Moisture Content; MC) อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio; MR) และอัตราการแห้ง (Drying Rate; DR) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า การอบแห้งที่ความดันต่ำ 5 kPa ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคายน้ำ ทำให้ระยะเวลาอบแห้งสั้นที่สุด ในขณะที่ความดันที่สูงขึ้นส่งผลให้การคายน้ำช้าลง แบบจำลอง ANN ที่พัฒนาขึ้นมีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ชั้นซ่อน (Hidden Layers) พร้อมกลไกการหยุดก่อนเวลา (Early Stopping) และการปรับอัตราการเรียนรู้ (Learning Rate Reduction) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้ ผลการประเมินพบว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองอย่างดียิ่ง โดยได้ค่า R^2 มากกว่า 0.98, ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.03 และค่า MAPE อยู่ระหว่าง 3.8–10.9% แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือและความสามารถของ ANN ในการทำนายพฤติกรรมกรอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศได้อย่าง

แม่นยำ ดังนั้น การวิจัยครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ ANN ในการประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและควบคุมกระบวนการอบแห้งสุญญากาศของสมุนไพร ซึ่งมีประโยชน์ต่อการออกแบบระบบการอบในระดับอุตสาหกรรม การประหยัดพลังงาน และการคงคุณภาพของสมุนไพรที่มีคุณค่าทางยา

คำสำคัญ : กระชายขาว, การอบแห้งสุญญากาศ, โคโรนาไฟฟ้า, อัตราการแห้ง

Abstract

Drying is a crucial post-harvest process that significantly affects the quality, safety, and shelf-life of herbal materials. This study aimed to develop an Artificial Neural Network (ANN) model to predict the drying behavior of fingerroot (*Boesenbergia rotunda*) under vacuum conditions. Drying experiments were conducted at three absolute pressures (5, 10, and 15 kPa) and three sample thicknesses (3, 5, and 7 mm), with key response variables including moisture content (MC), moisture ratio (MR), and drying rate (DR). The results indicated that drying at a low pressure of 5 kPa enhanced moisture removal efficiency, resulting in the shortest drying time, whereas higher pressures slowed down the drying process. The developed ANN model consisted of two hidden layers and incorporated early stopping and learning rate reduction mechanisms to optimize training performance. Model evaluation showed excellent agreement with experimental data, with R^2 values exceeding 0.98, RMSE below 0.03, and MAPE ranging from 3.8% to 10.9%, demonstrating the reliability and predictive capability of the developed ANN model for vacuum drying behavior prediction. This study highlights the potential of ANN for improving efficiency and controlling vacuum drying processes of herbal materials, contributing to industrial-scale dryer design, energy savings, and preservation of bioactive compounds in medicinal herbs.

Keywords : Fingerroot, Vacuum Drying, Artificial Neural Network, Drying Rate

บทนำ

กระชาย (*Boesenbergia rotunda*) เป็นสมุนไพรในวงศ์ขิง (Zingiberaceae) ที่นิยมใช้ทั้งในอาหารและการแพทย์แผนโบราณในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Trakoontivakorn et al., 2001) เนื่องจากมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น แพนดูราทิน เอ (Panduratin A) และพินอสโตรบิน (Pinostrobin) ซึ่งมีฤทธิ์ต้านการอักเสบ ต้านอนุมูลอิสระ ต้านแบคทีเรีย ต้านมะเร็ง และสารประกอบฟีนอลิกที่ช่วยล้างพิษจากสารคาร์บอนิลชนิดว่องไว (Reactive Carbonyl Species – RCS) อีกทั้งยังมีรายงานว่าสามารถต้านไวรัส SARS-CoV-2 ได้ (Techapichetvanich et al., 2024; Phahom & Mano, 2023; Shindo, Kato, Kinoshita, Kobayashi, & Koike, 2006) ดังนั้น การรักษาสารสำคัญเหล่านี้ระหว่างการแปรรูปจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพและคุณสมบัติทางยาของผลิตภัณฑ์ หนึ่งในกระบวนการหลักที่ใช้ในการถนอมสมุนไพรคือ การอบแห้ง ซึ่งช่วยลดความชื้นเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ลดการเสื่อมสลายของสารสำคัญ และยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Ilman Fahrudin, Sulaiman, Rukayadi, & Sukaryadi, 2020) วิธีการอบแห้งที่ใช้ เช่น การอบด้วยลมร้อน ไมโครเวฟ และสุญญากาศ ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของผลิตภัณฑ์ โดยมีรายงานว่า การอบแห้งด้วยไมโครเวฟในสภาวะสุญญากาศสามารถลดเวลาอบแห้งได้ถึง 90% เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน (Therdthai & Northongkom, 2011) ปัจจุบันยังมีการพัฒนาวิธีการอบแห้งแบบผสมผสาน เช่น การอบแห้งลมร้อนร่วมกับไมโครเวฟ การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการคายน้ำแบบออสโมซิส เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น (Zielinska, Ropelewska, Xiao, Mujumdar, & Law, 2020)

การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการคงคุณภาพและสารออกฤทธิ์ของกระชาย งานวิจัยพบว่าการปรับสภาวะ เช่น อุณหภูมิ เวลา และตัวทำละลาย มีผลต่อปริมาณสารฟีนอลิกและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ (Therdthai & Northongkom, 2011) อีกทั้งยังมีการใช้วิธีทางสถิติและการสร้างแบบจำลองขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) เพื่อทำนายและเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ (Phahom & Mano, 2023, Menlik, Özdemir, & Kirmaci, 2010) ในด้านการอบแห้งแบบสุญญากาศ งานวิจัยรายงานว่า การใช้ไมโครเวฟร่วมในสภาวะสุญญากาศสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งและสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความชื้นได้มากกว่าการอบแห้งธรรมดา (Therdthai & Northongkom, 2011) โดยอาศัยหลักการถ่ายโอนความชื้นตามกฎของดาร์ซี (Darcy's Law) ซึ่งใช้ความแตกต่างของความดันเป็นตัวขับเคลื่อน (Chen & Lamb, 2007) วิธีนี้ช่วยให้อัตราการอบแห้งเร็วขึ้น ใช้พลังงานน้อยลง และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Ilman Fahrudin et al., 2020) นอกจากนี้เทคโนโลยีการอบแห้งแล้ว ปัจจุบัน เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในการสร้างแบบจำลองและทำนายพฤติกรรม การอบแห้ง โดยเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ซึ่งแสดงประสิทธิภาพในการประมวลผลความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น และสามารถทำนายตัวแปรสำคัญ เช่น ปริมาณความชื้นและอัตราการอบแห้งได้อย่างแม่นยำ (Martynenko & Misra, 2020, Khan, Sablani, Joardder, & Karim, 2022, Menlik et al., 2010) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการอบแห้งกระชายขวยังมุ่งเน้นเพียงด้านคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ขณะที่การพัฒนาแบบจำลองเชิงคาดการณ์สำหรับปริมาณความชื้น (Moisture Content: MC) อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) และอัตราการแห้ง (Drying Rate: DR) ในสภาวะสุญญากาศยังมีอยู่อย่างจำกัด

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) สำหรับทำนายพฤติกรรม การอบแห้งของกระชายขวยในสภาวะสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ โดยพิจารณาตัวแปรสำคัญ ได้แก่ MC, MR และ DR ภายใต้ระดับความดันสัมบูรณ์ 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 kPa และความหนาของตัวอย่าง 3 ระดับ คือ 3, 5 และ 7 mm พร้อมทั้งประเมินความแม่นยำของแบบจำลองโดยใช้ RMSE, MAPE และ R^2 ผลการศึกษาเชื่อว่าจะช่วยยืนยันศักยภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในการควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งกระชายขวยระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

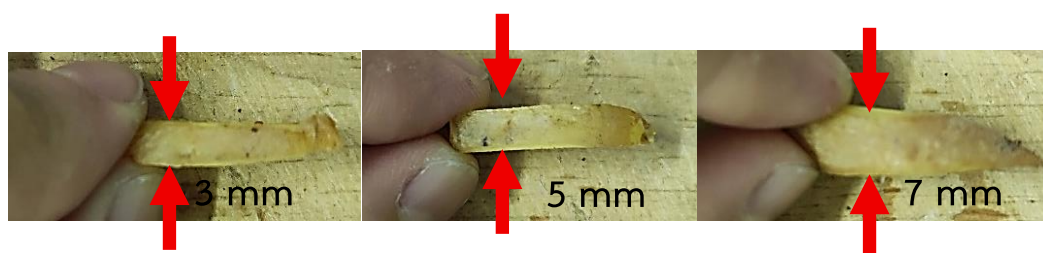
1. เพื่อศึกษาลักษณะและอัตราการอบแห้งของกระชายขวยภายใต้การอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับการทำนายพฤติกรรม การอบแห้งของกระชายขวย
3. เพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์พฤติกรรม การอบแห้งของกระชายขวยภายใต้ระดับความดันสัมบูรณ์ที่แตกต่างกัน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยอาศัยพื้นฐานทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้ได้ผลการวิจัยที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

การเตรียมตัวอย่างทดลอง

ตัวอย่างกระชายขาวที่ใช้ในการทดลองถูกคัดเลือกจากวัตถุดิบที่มีคุณภาพดี นำมาล้างทำความสะอาด และหั่นเป็นชิ้นตามความหนาที่กำหนด ได้แก่ 3, 5 และ 7 mm แต่ละตัวอย่างจะชั่งน้ำหนักเริ่มต้นประมาณ 100 g ใส่ลงในถาดอบแห้ง และนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักซ้ำอีกครั้งเพื่อบันทึกน้ำหนักหลังอบแห้ง ข้อมูลที่ได้จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย โดยการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ แสดงดังภาพที่ 1



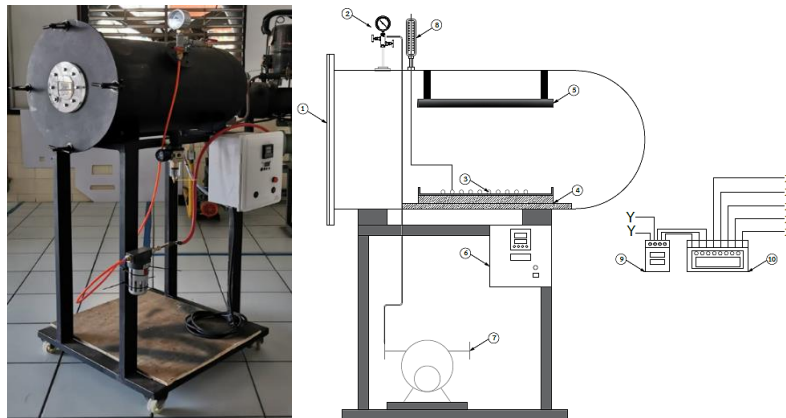
ภาพที่ 1 ตัวอย่างกระชายขาวที่ความหนา 3, 5 และ 7 mm

ชุดอุปกรณ์การทดลอง

การทดลองใช้เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศที่ออกแบบมาเฉพาะ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 330 mm ยาว 800 mm หนา 2.55 mm ความจุถึง 58 L สามารถทนแรงดันได้สูงสุด 2.55 MPa และทนแรงบีบอัดได้ 3.30 MPa ระบบทำความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 700 W พร้อมปั๊มสุญญากาศสมรรถนะไม่ต่ำกว่า 1/4 HP 100 L/min โดยตั้งค่าความดันสัมบูรณ์ที่ 5, 10 และ 15 kPa ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C ด้วยระบบ PID แสดงดังภาพที่ 2 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

การเลือกอุณหภูมิ 50 °C สำหรับการอบแห้งในงานวิจัยนี้มีเหตุผลสำคัญ 2 ประการ ประการแรก อุณหภูมิดังกล่าวเป็นระดับที่นิยมใช้ในการอบแห้งสมุนไพรและผลิตภัณฑ์เกษตรที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เพื่อลดการสูญเสียสารสำคัญจากความร้อนสูงเกินไป โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในกระชายขาว ซึ่งอาจเสื่อมสภาพได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °C (Therdthai & Northongkom, 2011; Ilman Fahrudin et al., 2020) ประการที่สอง ในสภาวะสุญญากาศ น้ำจะระเหยที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดปกติเนื่องจากความดันไอลดลง ทำให้อุณหภูมิ 50 °C เพียงพอสำหรับการคายน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการถ่ายเทมวลในระบบสุญญากาศที่อาศัยความแตกต่างของความดันเป็นตัวขับเคลื่อนการระเหย (Chen & Lamb, 2007)

สำหรับการเลือกระดับความดันสัมบูรณ์ที่ 5, 10 และ 15 kPa นั้น มีเหตุผลดังนี้ ช่วงความดันดังกล่าวอยู่ในช่วงที่สามารถทำให้น้ำเดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิควบคุมของระบบ ที่ความดัน 5 kPa จุดเดือดของน้ำอยู่ที่ประมาณ 32.9 °C ที่ความดัน 10 kPa จุดเดือดอยู่ที่ประมาณ 45.8 °C และที่ความดัน 15 kPa จุดเดือดอยู่ที่ประมาณ 54.0 °C ซึ่งช่วงดังกล่าวสะท้อนพฤติกรรมของการระเหยที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้สามารถศึกษาผลของความดันต่ออัตราการอบแห้งได้อย่างครอบคลุม นอกจากนี้ ช่วงความดัน 5–15 kPa เป็นช่วงที่อุปกรณ์ปั๊มสุญญากาศขนาดทั่วไปสามารถรักษาได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพในระดับห้องปฏิบัติการ และยังเป็นช่วงที่มีรายงานในงานวิจัยการอบแห้งสุญญากาศของผลิตภัณฑ์เกษตรและสมุนไพรหลายชนิด (Chen & Lamb, 2007; Li, Wang, Wu, Wan, & Yang, 2020)



ภาพที่ 2 อุปกรณ์สำหรับการอบแห้งแบบสุญญากาศ

ตารางที่ 1 อุปกรณ์สำหรับการอบแห้งแบบสุญญากาศ

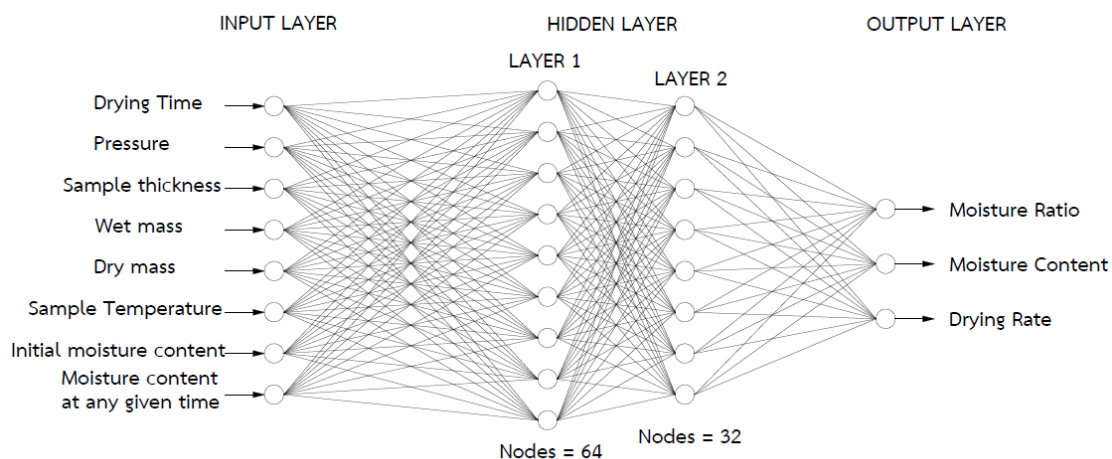
1) ถังอบแห้งสุญญากาศ	6) ชุดควบคุมอุณหภูมิห้องอบแห้งด้วยระบบ PID
2) เกจวัดความดัน	7) ปัมสุญญากาศ
3) ถาดวางอาหาร	8) เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของกระชายขาว
4) โหลดเซลล์ (เครื่องชั่งน้ำหนัก)	9) ตัวแปลงสัญญาณ
5) ฮีตเตอร์แท่ง Spec 700W 220VAC	10) เครื่องบันทึกข้อมูล

วิธีการทดลอง

เตรียมตัวอย่างกระชายขาวตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.1 และจัดเรียงลงบนถาดอบแห้ง ตั้งค่าความดันสัมบูรณ์ที่ระดับที่กำหนด คือ 5, 10 และ 15 kPa และเริ่มกระบวนการอบแห้ง บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างทุก 30 นาที จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 4.55 – 13.64% (d.b.) คำนวณค่าปริมาณความชื้น อัตราส่วนความชื้น และอัตราการอบแห้ง จากข้อมูลน้ำหนักบันทึกข้อมูลสถานะการทดลองอื่น ๆ ได้แก่ ความดัน ความชื้น และข้อมูลอื่น ๆ เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์และนำไปพัฒนาแบบจำลอง

การพัฒนาและทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งของกระชายขาว โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง เช่น เวลาอบแห้ง ระดับความดัน ความหนาของชิ้นตัวอย่าง มวลเปียก มวลแห้ง อุณหภูมิ และค่าความชื้นที่บันทึกได้ แสดงแผนภาพโครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนภาพโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

1. โครงสร้างของแบบจำลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่
 - ชั้นอินพุต (Input Layer): ตัวแปรอิสระจากการทดลอง
 - ชั้นซ่อน (Hidden Layers): จำนวน 2 ชั้น ชั้นแรกมี 64 โหนด และชั้นที่สองมี 32 โหนด ใช้ฟังก์ชันกระตุ้นแบบ ReLU
 - ชั้นเอาต์พุต (Output Layer): ประกอบด้วยค่าที่ต้องการทำนาย ได้แก่ MC, MR และ DR ใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น
2. พารามิเตอร์หลักในการฝึกโมเดล
 - Learning Rate: 0.001
 - Epochs: 500 รอบ
 - Batch Size: 16
 - Weight Initialization: Xavier/Glorot Uniform
 - Optimizer: Adam
 - Early Stopping เมื่อ Validation Loss ไม่ลดลง 30 รอบติดต่อกัน
3. การประเมินผลใช้ตัวชี้วัด เช่น ค่า R-squared (R^2), RMSE และ MAPE เพื่อวัดความแม่นยำของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การเขียนโค้ดพัฒนาแบบจำลองใช้ภาษา Python โดยอาศัยไลบรารี TensorFlow และ Scikit-Learn ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลประกอบด้วย การตรวจสอบ Outliers จัดการ Missing Values ปรับสเกลด้วย MinMaxScaler และแบ่งข้อมูลเป็น Training Set (80%) และ Testing Set (20%) ก่อนนำไปใช้ฝึกและประเมินผล

การวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง

การคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ในรูปแบบของน้ำหนักแห้ง (Dry basis) เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง โดยคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำที่ระเหยออกไปกับน้ำหนักของสารแห้งคงเหลือ โดยคำนวณจากสมการที่ (1) (Taghinezhad et al., 2020)

$$MC = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ปริมาณความชื้น (g water/g dry matter)

W_t คือ น้ำหนักของวัสดุที่เวลาใดๆ (g)

W_d คือ น้ำหนักของวัสดุหลังอบแห้ง (g)

การวิเคราะห์การอบแห้งยังรวมถึงค่าที่แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นในวัสดุเมื่อเทียบกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นขณะที่เวลาในการอบแห้งดำเนินไปในช่วงเวลาใด ๆ ซึ่งเรียกว่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio, MR) โดยคำนวณจากสมการที่ (2) (Seremet, Botez, Nistor, Andronoiu, & Mocanu, 2016)

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น

M_t คือ ปริมาณความชื้น ณ เวลา (g water/g dry matter)

M_i คือ ปริมาณความชื้นเริ่มต้น (g water/g dry matter)

M_{eq} คือ ปริมาณความชื้นสมดุล (g water/g dry matter)

ในหลายกรณี ค่าของ M_{eq} มีค่าใกล้ศูนย์ จึงสามารถประมาณค่า MR จึงถูกคำนวณจากสมการที่ (3) (Khan et al., 2022)

$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

สำหรับอัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของตัวอย่างในช่วงเวลา Δt โดยคำนวณจากสมการที่ (4) (Li et al., 2020)

$$DR = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \times m_{dry} \quad (4)$$

เมื่อ DR คือ อัตราการอบแห้ง (g/min)

$M_{t+\Delta t} - M_t$ คือ ปริมาณความชื้น ณ เวลา (g water/ g dry matter)

m_{dry} คือ มวลแห้งของตัวอย่าง (g)

Δt คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

การทำนายผลด้วยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN)

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ได้รับการฝึกฝนด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยปรับโครงสร้างเครือข่ายและค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถทำนายค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) อัตราการอบแห้ง (Drying Rate: DR) และปริมาณความชื้น (Moisture Content: MC) ในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลอง ANN กับค่าจริงที่ได้จากการทดลองโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง (Menlik et al., 2010; Topal, Şahin, & Vela, 2024; Kaveh et al., 2023) ตามลำดับดังต่อไปนี้

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้บอกความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าจริงในรูปของเปอร์เซ็นต์ โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างค่าจริงและค่าที่ทำนายได้ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ y_i คือ ค่าจริงจากการทดลองที่จุดข้อมูลที่ i
 $\hat{y}_i$ คือ ค่าที่ทำนายจากแบบจำลองที่จุดข้อมูลที่ i
 n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

Root Mean Square Error (RMSE) เป็นตัวชี้วัดที่คำนวณค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ทำนายได้กับค่าจริง โดย RMSE จะมีหน่วยเดียวกับข้อมูลจริงที่ใช้ทำนาย ทำให้สามารถตีความได้ง่ายในเชิงปริมาณ ดังสมการที่ (6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (6)$$

Coefficient of Determination (R^2) เป็นตัวชี้วัดที่แสดงว่าแบบจำลอง ANN สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลจริงได้ดีเพียงใด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 หากค่า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่าแบบจำลองมีความสามารถในการทำนายที่แม่นยำสูง โดยคำนวณได้ดังสมการที่ (7)

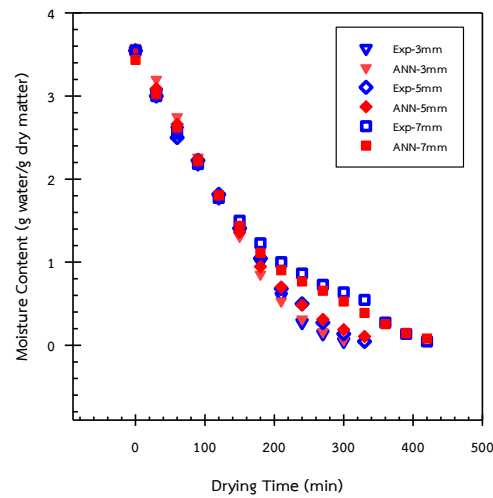
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

ผลการวิจัย

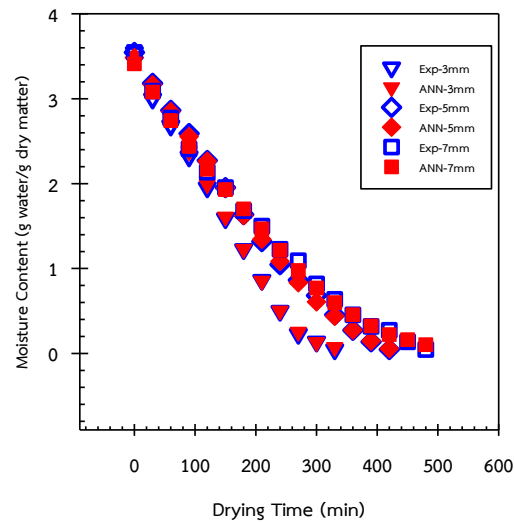
งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์พฤติกรรมการอบแห้งของกระชายขาวภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองกับค่าพยากรณ์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) โดยพิจารณาตัวแปรการตอบสนองสำคัญ ได้แก่ ปริมาณความชื้น (Moisture Content: MC), อัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) และอัตราการแห้ง (Drying Rate: DR) ผลลัพธ์ถูกประเมินด้วยดัชนีทางสถิติ ได้แก่ Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) และค่า R-squared (R^2) เพื่อสะท้อนความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลองพยากรณ์

การทำนายปริมาณความชื้น

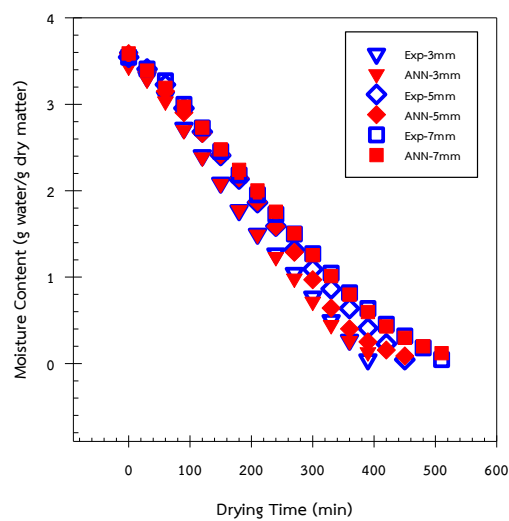
ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าปริมาณความชื้นของกระชายขาวลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกสภาวะการอบแห้งสุญญากาศ โดยที่ระดับความดัน 5 kPa พบว่าการสูญเสียไอน้ำเกิดขึ้นรวดเร็วที่สุด สาเหตุหนึ่งมาจากความดันต่ำช่วยกระตุ้นการระเหยของน้ำที่ผิวชิ้นตัวอย่าง ทำให้การลดลงของความชื้นชัดเจนกว่าที่ระดับ 10 และ 15 kPa ซึ่งมีแนวโน้มลดลงช้ากว่า แสดงถึงความต้านทานการแพร่กระจายของไอน้ำที่มากขึ้นในสภาวะความดันสูง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการพยากรณ์จากแบบจำลอง ANN พบว่าแบบจำลองสามารถจำลองแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ MC ได้สอดคล้องกับข้อมูลเชิงทดลองในทุกสภาวะ โดยมีค่า RMSE อยู่ในช่วง 0.01574–0.01873 และค่า MAPE ต่ำกว่าระดับ 5% ในเกือบทุกกรณี แสดงถึงความแม่นยำเชิงปริมาณและความสอดคล้องเชิงแนวโน้มที่ดีระหว่างผลการทดลองและค่าที่พยากรณ์ การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นว่า ANN มีศักยภาพสูงในการประเมินพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระชายระหว่างกระบวนการอบแห้ง และสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือเพื่อการออกแบบและควบคุมการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพแสดงดังภาพที่ 4–6



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa



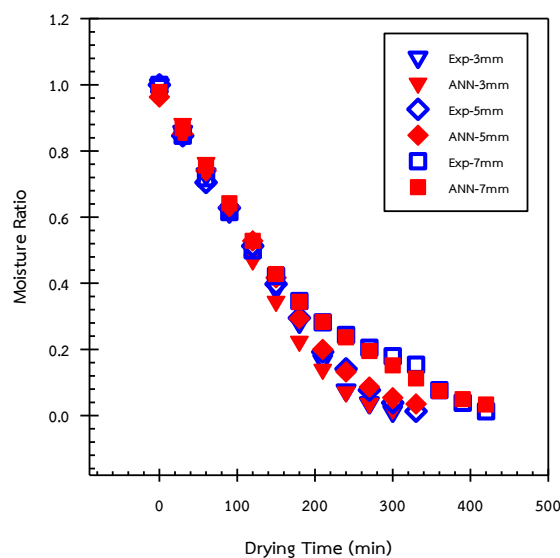
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa



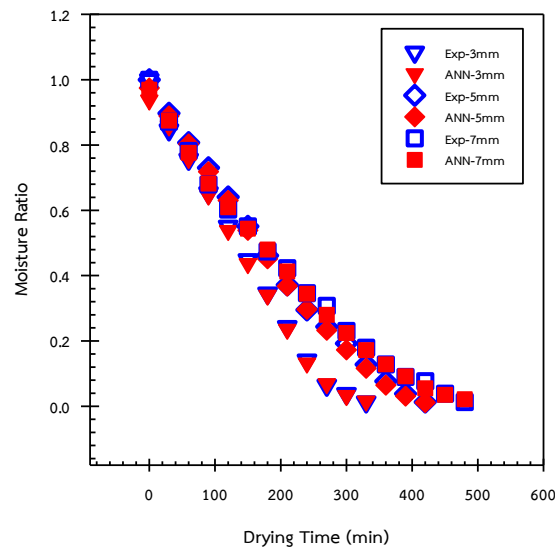
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa

การทำนายอัตราส่วนความชื้น

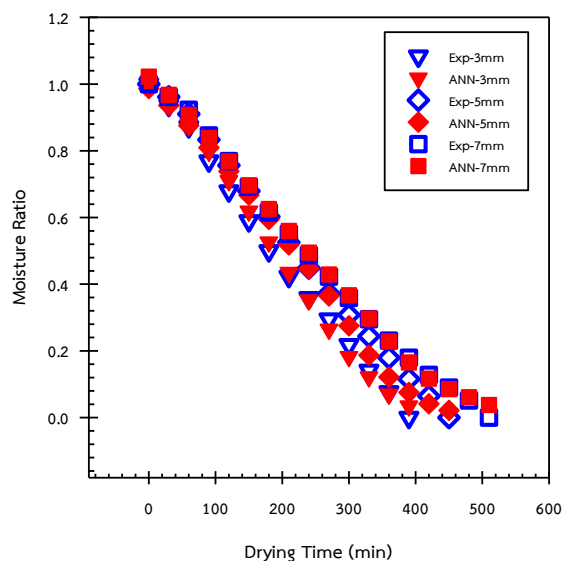
ผลการทดลองการอบแห้งกระชายขาวภายใต้สภาวะความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio: MR) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาอบแห้งจนเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยเฉพาะที่ความดัน 5 kPa พบว่าการลดลงของ MR เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุด สะท้อนถึงประสิทธิภาพของการใช้สุญญากาศระดับสูงที่ช่วยเร่งการถ่ายเทความชื้น ส่งผลให้การอบแห้งดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ที่ความดัน 10 และ 15 kPa อัตราการเปลี่ยนแปลงของ MR ลดลงอย่างช้ากว่าและมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไป อันเป็นผลจากความแตกต่างของความดันไอรหว่างผิวและภายในเนื้อกระชายที่ลดลง ทำให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นช้าลง เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการพยากรณ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) พบว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่าการเปลี่ยนแปลงของ MR ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่า R^2 มากกว่า 0.98 ในทุกเงื่อนไข แสดงถึงความสอดคล้องที่ดีระหว่างค่าทดลองและค่าที่พยากรณ์ นอกจากนี้ ค่า RMSE ต่ำกว่า 0.03 และค่า MAPE อยู่ระหว่าง 3.8–10.9% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมการอบแห้ง แสดงให้เห็นว่า ANN สามารถจับแนวโน้มของข้อมูลเชิงพลวัตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในสภาวะที่มีความซับซ้อนจากหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น ระยะเวลาอบแห้ง ความหนาของชิ้นตัวอย่าง และระดับความดันสุญญากาศ ดังนั้น ผลการศึกษานี้ยืนยันว่าโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงสำหรับการพยากรณ์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นในกระบวนการอบแห้ง ซึ่งสามารถต่อยอดไปสู่การประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อการควบคุมกระบวนการที่แม่นยำและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โดยไม่เพียงช่วยลดระยะเวลาอบแห้ง แต่ยังสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สมุนไพรให้คงอยู่ได้อย่างเหมาะสมแสดงดังภาพที่ 7–9



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa

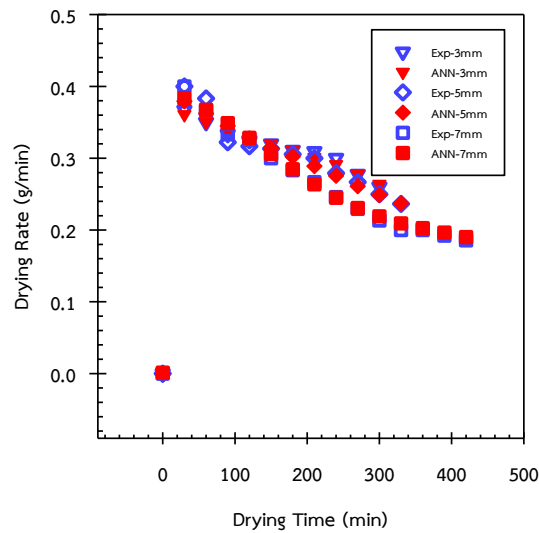


ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa

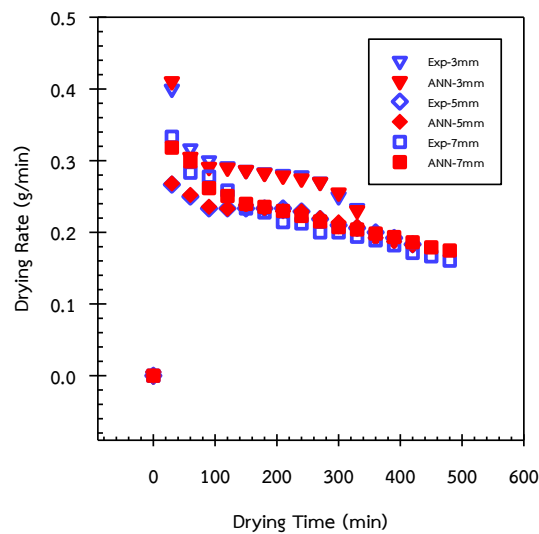
การทำนายอัตราการแห้ง

การศึกษาพฤติกรรมอัตราการแห้งของกระชายขาวระหว่างกระบวนการอบแห้งสุญญากาศพบว่า อัตราการแห้งสูงสุดเกิดขึ้นในระยะเริ่มต้นของการอบ และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความชื้นภายในชิ้นตัวอย่างลดลง สำหรับความดันสัมบูรณ์ 5 kPa อัตราการแห้งสูงสุดในช่วงต้น เนื่องจากแรงดันต่ำช่วยเร่งการระเหยของน้ำจากผิวสดุดังรูปที่ 10 เมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 10 kPa อัตราการแห้งในช่วงเริ่มต้นยังคงสูง แต่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อกระบวนการดำเนินไป แสดงให้เห็นว่าการแพร่ของน้ำเริ่มถูกจำกัดดังรูปที่ 11 และที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa การระเหยนํ้าลดลงอย่างชัดเจน ส่งผลให้ต้องใช้เวลากการอบนานขึ้นเพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ใกล้เคียงกันดังรูปที่ 12 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทดลองกับค่าที่พยากรณ์โดย Artificial Neural Network (ANN) พบว่าแบบจำลอง ANN สามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแห้งได้อย่างแม่นยำ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้คือ RMSE = 0.01117 และ MAPE = 4.49% แสดง

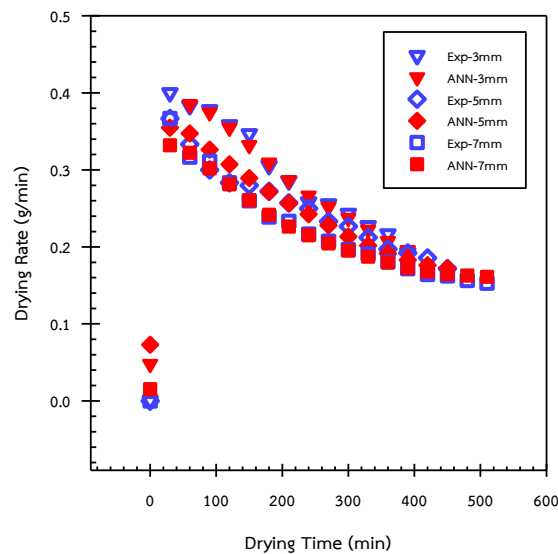
ถึงความใกล้เคียงสูงกับข้อมูลจริง ซึ่งบ่งชี้ว่า ANN สามารถสะท้อนพฤติกรรมการระเหยน้ำและการสูญเสียน้ำระหว่างการอบแห้งได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นการใช้ ANN ในการทำนายอัตราการแห้งถือเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ในอุตสาหกรรม ช่วยสนับสนุนการควบคุมกระบวนการอบแห้งให้มีประสิทธิภาพ ลดข้อผิดพลาดในการผลิต และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์สมุนไพร



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 10 kPa



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับเวลาอบแห้งของกระชายที่ความดันสัมบูรณ์ 15 kPa

ประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

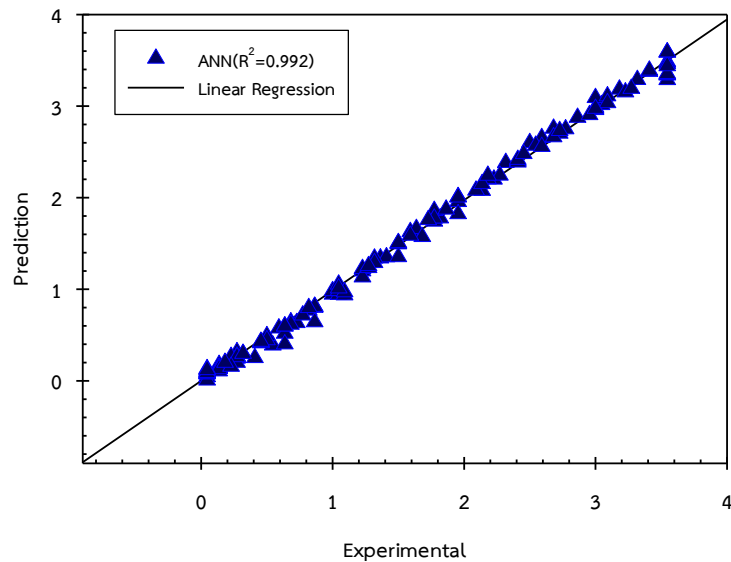
เพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ในการพยากรณ์พฤติกรรมกรอบแห้งของกระชายขาว ได้ทำการเปรียบเทียบค่าที่พยากรณ์จาก ANN กับผลการทดลองจริง โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2), ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย (MAPE) ซึ่งสะท้อนความแม่นยำและความสอดคล้องเชิงปริมาณระหว่างค่าพยากรณ์และค่าการทดลอง ตารางที่ 2 แสดงค่าตัวชี้วัดทางสถิติของ ANN สำหรับตัวแปรปริมาณความชื้น (MC), อัตราส่วนความชื้น (MR) และอัตราการแห้ง (DR) ในสภาวะความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa

ตารางที่ 2 ค่าตัวชี้วัดทางสถิติของ MC, MR, และ DR จากแบบจำลอง ANN

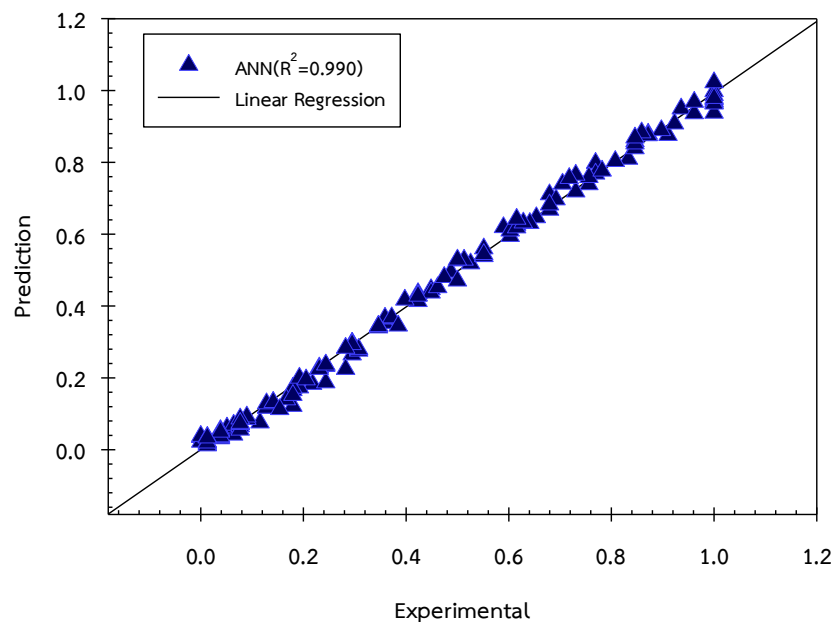
Model	R^2	RMSE	MAPE
MC (5 kPa)	0.99423	0.01574	0.03727
MR (5 kPa)	0.99051	0.02083	0.04565
DR (5 kPa)	0.99561	0.01685	0.01981
MC (10 kPa)	0.99583	0.01873	0.05950
MR (10 kPa)	0.99539	0.01971	0.09797
DR (10 kPa)	0.99782	0.01117	0.05199
MC (15 kPa)	0.99423	0.01574	0.03793
MR (15 kPa)	0.99230	0.02758	0.08685
DR (15 kPa)	0.99631	0.01342	0.04487

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ANN สามารถพยากรณ์พฤติกรรมกรอบแห้งของกระชายขาวได้อย่างแม่นยำ โดยค่า R^2 มีค่าใกล้ 1.00 แสดงถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้สูง ส่วนค่า RMSE และ MAPE อยู่ในระดับต่ำ แสดงถึงความแม่นยำเชิงปริมาณและการลดข้อผิดพลาดในการพยากรณ์ นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการ

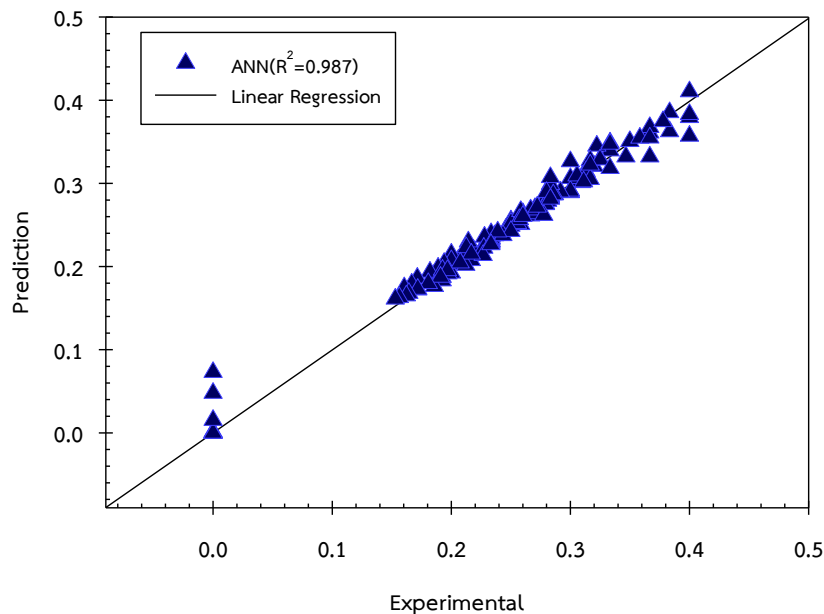
ทดลองจริง (Experimental) และค่าที่พยากรณ์ (Predicted) ของ MC, MR และ DR โดยมี เส้น Linear Regression แสดงตำแหน่งที่ค่าพยากรณ์เท่ากับค่าการทดลอง 100% การกระจายตัวของจุดข้อมูลใกล้เส้น Linear Regression มาก แสดงถึงความแม่นยำสูงของ ANN ในทุกตัวแปร แสดงดังภาพที่ 13-15



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดลองจริงและค่าพยากรณ์ของปริมาณความชื้น



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดลองจริงและค่าพยากรณ์ของอัตราส่วนความชื้น

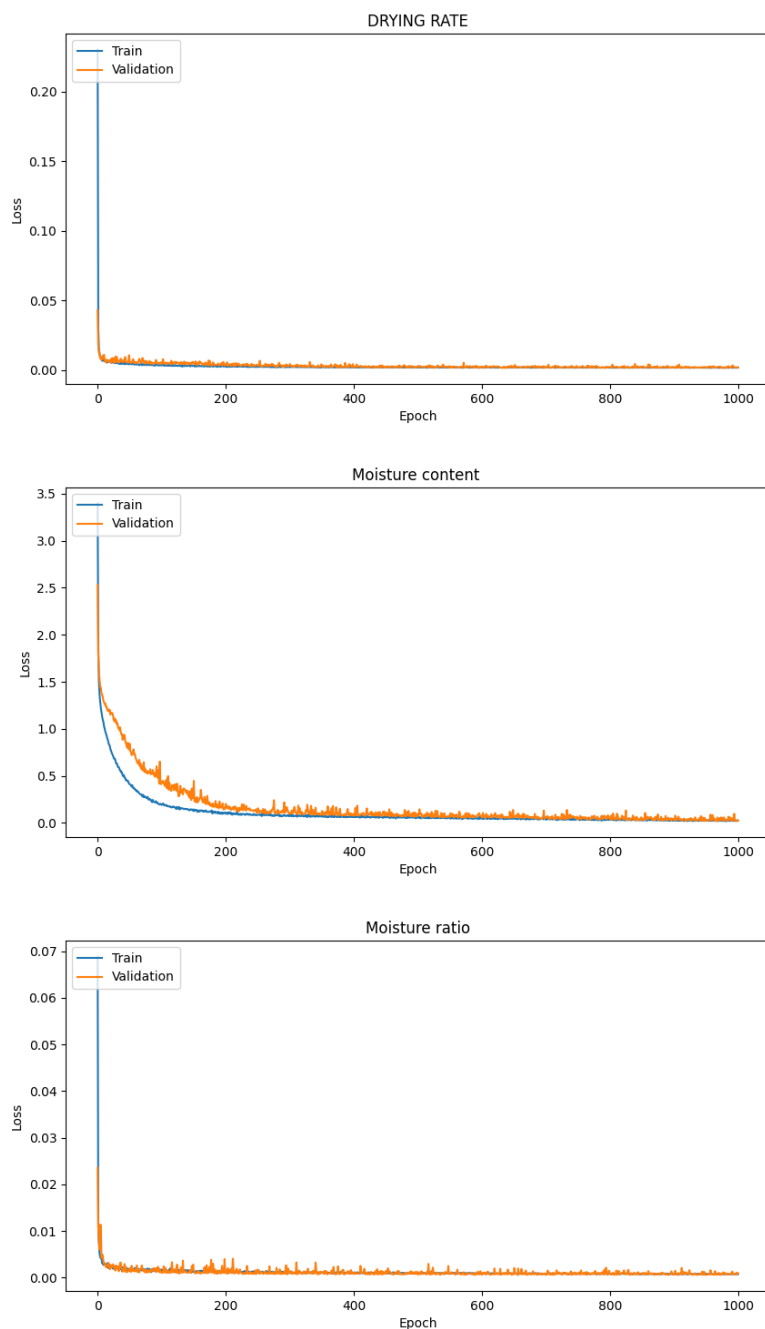


ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทดลองจริงและค่าพยากรณ์ของอัตราการแห้ง

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ANN สามารถเรียนรู้รูปแบบข้อมูลที่ซับซ้อนและมีความไม่เชิงเส้นได้ดีกว่า สามารถใช้ในการควบคุมกระบวนการอบแห้งสุญญากาศให้มีประสิทธิภาพสูง ลดเวลาและต้นทุนพลังงาน พร้อมทั้งรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์สมุนไพรได้อย่างเหมาะสม สรุปได้ว่า โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) เป็นเครื่องมือที่ทรงพลังและมีศักยภาพสูงสำหรับการพยากรณ์และควบคุมกระบวนการอบแห้งแบบสุญญากาศของสมุนไพรและผลิตภัณฑ์เกษตรอื่น ๆ ในระดับอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์กระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และตรวจสอบความเป็นไปได้ของปัญหา overfitting ได้ทำการติดตามค่าความสูญเสีย (Loss Function) ของชุดข้อมูลฝึกสอน (Training Set) และชุดข้อมูลตรวจสอบ (Validation Set) ตลอดกระบวนการเรียนรู้ ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Training Loss และ Validation Loss ลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเริ่มต้นของการฝึก และมีแนวโน้มเข้าสู่ภาวะคงตัวเมื่อจำนวน Epoch เพิ่มขึ้น โดยค่า Validation Loss ไม่ปรากฏแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างผิดปกติเมื่อเทียบกับ Training Loss ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่พบลักษณะของการเกิด Overfitting ซึ่งสนับสนุนความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสำหรับการทำนายพฤติกรรมกระบวนการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ



ภาพที่ 16 Learning Curve แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Training Loss และ Validation Loss ตามจำนวน Epoch ระหว่างกระบวนการฝึกแบบจำลอง ANN

สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการอบแห้งกระชายขาวภายใต้สภาวะสุญญากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C และเปรียบเทียบพฤติกรรมการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5, 10 และ 15 kPa ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการลดความดันช่วยเร่งการสูญเสียน้ำออกจากวัตถุดิบอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ระดับ 5 kPa พบการลดลงของปริมาณความชื้นและอัตราส่วนความชื้นอย่างรวดเร็วที่สุด ส่งผลให้เวลาอบแห้งสั้นกว่าในสภาวะที่ความดันสูงกว่า สอดคล้องกับหลักการถ่ายเทมวลที่แรงขับเคลื่อนของความดันไม่มีผลต่ออัตราการระเหยของน้ำ เมื่อใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural

Network: ANN) เพื่อทำนายพฤติกรรมกรอบแห้ง พบว่าโมเดลสามารถจำลองแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้น (MC) อัตราส่วนความชื้น (MR) และอัตราการแห้ง (DR) ได้ใกล้เคียงกับข้อมูลเชิงทดลองอย่างมาก โดยมีค่า R^2 อยู่ระหว่าง 0.9903–0.9978 และค่า RMSE ต่ำกว่า 0.03 ในทุกเงื่อนไข ขณะที่ค่า MAPE ต่ำกว่า 11% แสดงถึงความแม่นยำเชิงปริมาณและเสถียรภาพสูงในการพยากรณ์ นอกจากนี้ การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างค่าที่พยากรณ์และค่าที่วัดจริงแสดงให้เห็นว่าจุดข้อมูลส่วนใหญ่จะกระจุกตัวใกล้เส้น Linear Regression line อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งตอกย้ำความสามารถของ ANN ในการเรียนรู้รูปแบบข้อมูลที่ซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear relationship) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวโดยสรุปแบบจำลอง ANN ไม่เพียงแต่สามารถทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งได้อย่างถูกต้อง แต่ยังมีศักยภาพสำหรับการนำไปใช้จริงในกระบวนการผลิตระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยให้สามารถ ควบคุมสถานะการอบได้แม่นยำ ลดเวลาและพลังงานในการอบแห้ง พร้อมรักษาคุณภาพของสมุนไพรได้อย่างเหมาะสม ผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงศักยภาพของ ANN ในการเป็นเครื่องมือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตรในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) ในการพยากรณ์กระบวนการอบแห้งสมุนไพรได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอนาคตควรให้ความสำคัญกับ การขยายขอบเขตตัวแปรการทดลอง เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความหนาของตัวอย่าง การปรับโครงสร้างและพารามิเตอร์ของ ANN รวมถึงการเปรียบเทียบกับวิธีการเรียนรู้ของเครื่องที่ทันสมัยยิ่งขึ้น เช่น Deep Learning หรือแบบจำลองเชิงผสม และการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ควบคู่กับการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ครอบคลุมทั้งด้านประสิทธิภาพการอบและคุณภาพผลิตภัณฑ์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ รวมทั้งแหล่งความรู้ในการสืบค้นงานวิจัย และ สาขาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ในงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Chen, Z., & Lamb, F. M. (2007). Analysis of the vacuum drying rate for red oak in a hot water vacuum drying system. *Drying Technology*, 25(3), 497–500. <https://doi.org/10.1080/07373930601184064>
- Ilman Fahrudin, F., Sulaiman, R., Rukayadi, Y., & Sukaryadi, Y. (2020). Effect of Drying Methods on Physicochemical Characteristics of Boesenbergia Rotunda (L.) Mansf. Powder Article in. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(6), 3952–3962. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/370927914>
- Kaveh, M., Çetin, N., Khalife, E., Abbaspour-Gilandeh, Y., Sabouri, M., & Sharifian, F. (2023). Machine learning approaches for estimating apricot drying characteristics in various advanced and conventional dryers. *Journal of Food Process Engineering*, 46(12). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14475>
- Khan, M. I. H., Sablani, S. S., Joardder, M. U. H., & Karim, M. A. (2022). Application of machine learning-based approach in food drying: opportunities and challenges. *Drying Technology*, 40(6), 1051–1067. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1853152>

- Li, Y., Wang, X., Wu, Z., Wan, N., & Yang, M. (2020). Dehydration of hawthorn fruit juices using ultrasound-assisted vacuum drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105219>
- Martynenko, A., & Misra, N. N. (2020). Machine learning in drying. *Drying Technology*, 38(5–6), 596–609. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1690502>
- Menlik, T., Özdemir, M. B., & Kirmaci, V. (2010). Determination of freeze-drying behaviors of apples by artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7669–7677. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.075>
- Phahom, T., & Mano, J. (2023). Integration of multiple linear regression, principal component analysis, and hierarchical cluster analysis for optimizing dried fingerroot (*Boesenbergia rotunda*) extraction process. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.jamap.2023.100511>
- Seremet, L., Botez, E., Nistor, O. V., Andronoiu, D. G., & Mocanu, G. D. (2016). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry*, 195, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.125>
- Shindo, K., Kato, M., Kinoshita, A., Kobayashi, A., & Koike, Y. (2006). Analysis of antioxidant activities contained in the *Boesenbergia pandurata* Schult. rhizome. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 70(9), 2281–2284. <https://doi.org/10.1271/bbb.60086>
- Taghinezhad, E., Szumny, A., Kaveh, M., Sharabiani, V. R., Kumar, A., & Shimizu, N. (2020). Parboiled paddy drying with different dryers: Thermodynamic and quality properties, mathematical modeling using ANNs assessment. *Foods*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/foods9010086>
- Techapichetvanich, P., Tangpanithandee, S., Supannapan, K., Wongwiwatthanakut, S., Chang, L. C., & Khemawoot, P. (2024). Oral sub-chronic toxicity of fingerroot (*Boesenbergia rotunda*) rhizome extract formulation in Wistar rats. *Toxicology Reports*, 12, 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.01.013>
- Therdthai, N., & Northongkom, H. (2011). Characterization of hot air drying and microwave vacuum drying of fingerroot (*Boesenbergia pandurata*). *International Journal of Food Science and Technology*, 46(3), 601–607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02525.x>
- Topal, M. E., Şahin, B., & Vela, S. (2024). Artificial Neural Network Modeling Techniques for Drying Kinetics of Citrus medica Fruit during the Freeze-Drying Process. *Processes*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/pr12071362>
- Trakoontivakorn, G., Nakahara, K., Shinmoto, H., Takenaka, M., Onishi-Kameyama, M., Ono, H., Tsushida, T. (2001). Structural analysis of a novel antimutagenic compound, 4-hydroxypanduratin A, and the antimutagenic activity of flavonoids in a Thai spice, fingerroot (*Boesenbergia pandurata* Schult.) against mutagenic heterocyclic amines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(6), 3046–3050. <https://doi.org/10.1021/jf010016o>
- Zielinska, M., Ropelewska, E., Xiao, H. W., Mujumdar, A. S., & Law, C. L. (2020). Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: Quality properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60, 2212–2264. Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1632788>

Received: Dec 17, 2025

Revised: Jun 22, 2026

Accepted: Jun 24, 2026

การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา THE DEVELOPMENT OF AUDIO MEDIA FOR LEARNING TO USE GOOGLE DOCS FOR THE VISUALLY IMPAIRED

พุทธินันท์ นาคสุข^{1*}, คณารักษ์ ศรีสมบุญ², สรวิต เฉลิมแสน³

^{1,2,3}คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ

Puttinun Naksukh¹, Kanarak Srisomboon², Soravit Chalermsean³

^{1,2,3}Faculty of Information Technology and Digital Innovation, North Bangkok University

puttinun.na@northbkk.ac.th, kanarak.sr@northbkk.ac.th, soravit.ch@northbkk.ac.th

*Corresponding Author : puttinun.na@northbkk.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อพัฒนาสื่อเสียงที่พัฒนาขึ้นสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา 2) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของผู้บกพร่องทางสายตาที่ใช้สื่อเสียงในการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นนักศึกษาผู้บกพร่องทางสายตา จำนวน 30 คน โดยการคัดเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบไปด้วย 1) สื่อเสียงที่พัฒนาขึ้น 2) แบบประเมินประสิทธิภาพสื่อเสียงจากผู้เชี่ยวชาญ 3) แบบสอบถามความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานสื่อเสียงที่พัฒนาขึ้น

ผลการวิจัยพบว่า การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพตามการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.48 และมีส่วนเบี่ยงเบน ($S.D.$) เท่ากับ 0.60 และจากการวัดความพึงพอใจของผู้ใช้สื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา พบว่ามีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.44 และมีส่วนเบี่ยงเบน ($S.D.$) เท่ากับ 0.56 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา สามารถนำมาใช้ในการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตาได้ และยังช่วยทบทวนเนื้อหาได้ง่าย สะดวก รวดเร็วผ่านโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ หรือ แท็บเล็ตได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ผู้บกพร่องทางสายตา, การใช้งาน Google Docs, สื่อเสียง

Abstract

The research on the development of audio media for learning to use Google Docs for individuals with visual impairments aimed to 1) develop audio media to support learning in the use of Google Docs for visually impaired users, and 2) investigate the satisfaction of visually impaired individuals who utilized the audio media to learn how to use Google Docs. The sample group consisted of 30 visually impaired students selected through purposive sampling. The research instruments included 1) the developed audio media, 2) an expert evaluation form to assess the efficiency of the audio media, and 3) a satisfaction

questionnaire regarding the use of the developed audio media. The findings revealed that the audio media developed for learning to use Google Docs was effective, as evaluated by experts, with a mean score ($\bar{X}$) of 4.48 and a standard deviation (S.D.) of 0.60.

Additionally, user satisfaction with the audio media yielded a mean score ($\bar{X}$) of 4.44 and a standard deviation (S.D.) of 0.56. These results suggest that the audio media is suitable for learning how to use Google Docs among visually impaired individuals and also supports convenient, quick, and accessible review of content via mobile phones, computers, or tablets.

Keywords : Visually Impaired Persons, Google Docs Usage, Audio Media

บทนำ

จากสถานการณ์คนพิการในประเทศไทยของเดือนเมษายน 2568 จากกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ พบว่ามีจำนวนผู้พิการในประเทศไทย 2,242,693 คน คิดเป็น 3.39% ของประชากรไทย ในจำนวนนี้เป็นผู้พิการทางการเห็นจำนวน 171,477 คน คิดเป็น 7.65% ซึ่งสาเหตุหลักของความพิการทางการเห็นนั้นเกิดมาจากอุบัติเหตุ รองลงมาคือโรคติดเชื้อ และพันธุกรรม ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วจำนวนผู้พิการทางการเห็นที่มีระดับการศึกษาในระดับปริญญาตรี หรือเทียบเท่า มีจำนวน 2,951 คน สูงกว่าปริญญาตรีมีเพียง 447 คน ในขณะที่ไม่ได้รับการศึกษานั้นสูงถึง 30,549 คน และมีระดับการศึกษาต่ำกว่าปริญญาตรีมากกว่า 136,000 คน

ในยุคดิจิทัลที่การเข้าถึงข้อมูลและการทำงานออนไลน์เป็นเรื่องปกติ การใช้โปรแกรมประมวลผลคำอย่าง Google Docs มีบทบาทสำคัญทั้งในด้านการศึกษา และการทำงาน ผู้คนจำนวนมากพึ่งพาแพลตฟอร์มนี้ในการสร้างและแบ่งปันเอกสารการทำงานร่วมกัน และการจัดการข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม สำหรับผู้บกพร่องทางสายตา การใช้งาน Google Docs ยังคงเผชิญกับอุปสรรคมากมาย แม้ว่าโปรแกรมจะมีฟังก์ชันรองรับการใช้งานร่วมกับเครื่องมืออ่านหน้าจอ (Screen Reader) เช่น NVDA หรือ JAWS แต่การใช้งานยังมีความซับซ้อน ทำให้การทำงานร่วมกันในแพลตฟอร์มนี้ยังไม่เป็นมิตรต่อผู้ใช้งานกลุ่มนี้มากนัก

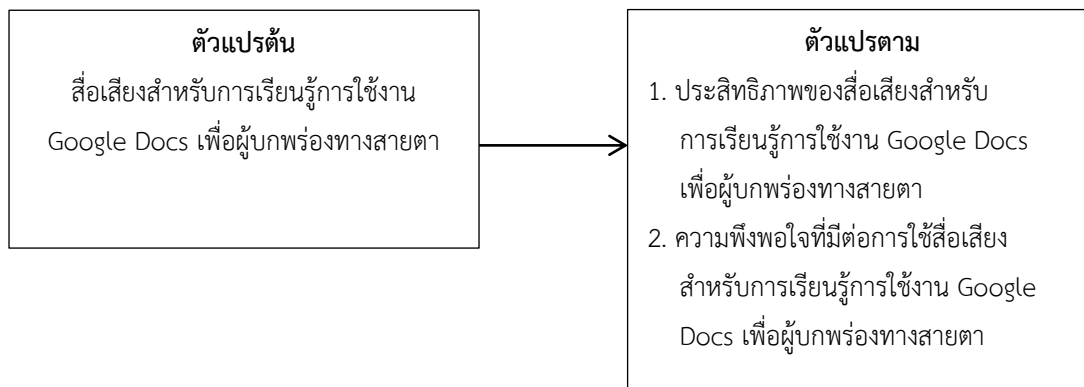
ปัญหาหลักที่ผู้บกพร่องทางสายตาประสบ คือ การขาดแคลนสื่อการเรียนรู้ที่ออกแบบเฉพาะสำหรับผู้พิการ การที่เนื้อหาส่วนใหญ่ในปัจจุบันอยู่ในรูปแบบตัวอักษร และต้องใช้การมองเห็นในการทำความเข้าใจ ทำให้ผู้บกพร่องทางสายตาไม่สามารถเข้าถึง และใช้งานฟังก์ชันต่าง ๆ ได้อย่างเต็มที่ การขาดข้อมูลในรูปแบบสื่อเสียงที่มีรายละเอียดและขั้นตอนการใช้งานที่ชัดเจนยิ่งเพิ่มความยากลำบากในการเรียนรู้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสื่อการเรียนรู้ที่เน้นการอธิบายด้วยเสียง เพื่อให้ผู้บกพร่องทางสายตาสามารถเรียนรู้ และใช้งานโปรแกรมนี้ได้อย่างอิสระและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การพัฒนาสื่อเสียงเพื่อการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs จึงเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างยิ่ง สื่อเสียงที่มีคุณภาพจะช่วยให้ผู้บกพร่องทางสายตาสามารถเข้าใจขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมได้ด้วยการฟัง ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการรับรู้ของพวกเขา การวิจัยและพัฒนาสื่อเสียงที่มีความละเอียด ชัดเจน และตอบสนองต่อความต้องการของผู้บกพร่องทางสายตา จะไม่เพียงแต่เพิ่มโอกาสในการเรียนรู้ และทำงานของกลุ่มผู้พิการแต่ยังช่วยลดความเหลื่อมล้ำในการเข้าถึงเทคโนโลยี ส่งเสริมให้พวกเขามีส่วนร่วมในการทำงานร่วมกับคนทั่วไปในสังคมได้มากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา
2. เพื่อประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มโอกาสในการเรียนรู้ และความสามารถในการพึ่งพาตนเองในด้านทักษะการใช้งานเทคโนโลยี
2. เป็นต้นแบบของสื่อการเรียนรู้แบบเสียง สำหรับกลุ่มผู้บกพร่องทางสายตา
3. ส่งเสริมความเท่าเทียมทางดิจิทัลสำหรับกลุ่มผู้บกพร่องทางสายตา

นิยามศัพท์เฉพาะ

ผู้บกพร่องทางสายตา หมายถึง บุคคลที่มีความสามารถในการมองเห็นลดลงจากระดับปกติ ซึ่งประกอบด้วย คนตาบอด (Blind) และผู้มีสายตาเลือนราง (Low Vision)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ความหมายของสื่อการเรียนรู้

สื่อการเรียนรู้ (Instructional Media) หมายถึง วัสดุ อุปกรณ์ หรือเทคโนโลยีต่าง ๆ ที่ใช้ในการถ่ายทอดความรู้ ทักษะ หรือประสบการณ์จากผู้สอนไปยังผู้เรียน เพื่อให้การเรียนรู้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เข้าใจง่ายขึ้น และสอดคล้องกับลักษณะของผู้เรียน

องค์ประกอบสำคัญของสื่อการเรียนรู้

1. เนื้อหา (Content) ได้แก่ ข้อมูล ความรู้ หรือทักษะที่ต้องการสื่อ
2. วิธีการนำเสนอ (Delivery Method) ได้แก่ วิธีการถ่ายทอด เช่น เสียง วิดีโอ ข้อความ รูปภาพ
3. ผู้ใช้ (User) ได้แก่ ผู้เรียนหรือผู้ใช้สื่อ ซึ่งอาจมีลักษณะเฉพาะ เช่น ผู้บกพร่องทางการมองเห็น

ความหมายการเรียนรู้ผ่านพหุประสาทสัมผัส

การเรียนรู้ผ่านพหุประสาทสัมผัส (Multisensory Learning) หมายถึง การใช้ประสาทสัมผัสมากกว่า 2 อย่างขึ้นไป ร่วมกันในการเรียนรู้ เช่น ใช้ระบบประสาท การได้ยินร่วมกับระบบประสาทการมองเห็น ระบบประสาทสั่งการให้เคลื่อนไหว และระบบประสาทรับสัมผัสที่ผิวหนัง (การหยิบจับสัมผัสและลงมือทำ) เป็นต้น

หลักการสำคัญของ UDL

ความหมายของ UDL

UDL ย่อมาจากคำว่า Universal Design for Learning หรือ การออกแบบเพื่อการเรียนรู้แบบสากล เป็นกรอบแนวคิดในการออกแบบการเรียนรู้ที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้เรียนทุกคนสามารถเข้าถึง และมีส่วนร่วมในการเรียนรู้ได้อย่างเท่าเทียมกัน

หลักการสำคัญของ UDL

หลักการสำคัญของ UDL จะประกอบไปด้วย 1) การนำเสนอเนื้อหาหลายรูปแบบ (Multiple Means of Representation) ซึ่งผู้เรียนจะเรียนรู้ด้วยวิธีการที่ต่างกัน อาทิเช่น การเรียนรู้ผ่านการมองเห็น การเรียนรู้ผ่านการฟัง เป็นต้น 2) ความหลากหลายวิธีในการแสดงความเข้าใจ (Multiple Means of Action and Expression) ผู้เรียนสามารถแสดงออก หรือโต้ตอบความรู้ในวิธีการที่ต่างกัน อาทิเช่น การพิมพ์ การพูด การวาด เป็นต้น 3) ความหลากหลายในการมีส่วนร่วม (Multiple Means of Engagement) ใช้รูปแบบการเรียนรู้ที่จูงใจ ทำให้ผู้เรียนมีแรงจูงใจในการเรียนในรูปแบบที่เหมาะสมกับผู้เรียน อาทิเช่น ใช้เสียงพูดที่ชัดเจน สนุก มีการโต้ตอบผ่านเสียง เพื่อเพิ่มความสนใจ เป็นต้น

การศึกษากับผู้บกพร่องทางสายตา

ความหมายของผู้บกพร่องทางสายตา

ประกาศกระทรวงศึกษาธิการเรื่องกำหนดประเภทและหลักเกณฑ์ของคณพิการทางการศึกษา พ.ศ. 2552 กำหนดว่าบุคคลที่มีความบกพร่องทางการเห็นได้แก่ บุคคลที่สูญเสียการเห็นตั้งแต่ระดับเล็กน้อยจนถึงตาบอดสนิทซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้ 1) คนตาบอด หมายถึง บุคคลที่สูญเสียการเห็นมากจนต้องใช้สื่อสัมผัสสื่อเสียง หากตรวจวัดความชัดของสายตาข้างดีเมื่อแก้ไขแล้วอยู่ในระดับ 6 ส่วน 60 (6/60) หรือ 20 ส่วน 200 (20/200) จนถึงไม่สามารถรับรู้เรื่องแสง 2) คนเห็นเลือนราง หมายถึง บุคคลที่สูญเสียการเห็น แต่ยังสามารถอ่านอักษรตัวพิมพ์ขยายใหญ่ด้วยอุปกรณ์เครื่องช่วยความพิการหรือเทคโนโลยีสิ่งอำนวยความสะดวก หากวัดความชัดของสายตาข้างดีเมื่อแก้ไขแล้วอยู่ระดับ 6 ส่วน 18 (6/18) หรือ 20 ส่วน 70 (20/70)

การจัดการศึกษากับผู้บกพร่องทางสายตา

สำหรับการจัดการศึกษาให้กับผู้บกพร่องทางสายตานั้น ผู้สอนจะต้องปรับสื่อการเรียนรู้ให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้ผ่านเสียง หรือใช้สื่อสัมผัสแทนการเรียนรู้ในรูปแบบปกติ รวมถึงการนำเทคโนโลยีมาช่วยในการจัดการเรียนการสอน อาทิเช่น โปรแกรมอ่านหน้าจอ (Screen Reader) การใช้ VoiceOver หรือ TalkBack ผ่านโทรศัพท์มือถือ รวมไปถึงการใช้งานฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ของซอฟต์แวร์ที่ตอบสนองการทำงานของผู้บกพร่องทางสายตา นอกจากนั้นแล้วผู้สอนจะต้องมีการวางแผนการเรียนรู้ที่มีความสอดคล้องกับผู้เรียนที่มีความบกพร่องทางสายตา และที่สำคัญคือการประเมินผลที่มีความเหมาะสม โดยสามารถประเมินผลได้จากการฟัง การตอบคำถามผ่านการพูดแทนการพิมพ์

การดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัย และพัฒนา (Research and Development) โดยมีรายละเอียดในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ประชากร และกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชา DBT201 : การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับธุรกิจ ในภาคเรียนที่ 2/67 จำนวน 156 คน

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ คือ นักศึกษาที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชา DBT201 : การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลสำหรับธุรกิจ โดยการสุ่มกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ที่มีความบกพร่องทางสายตา จำนวน 30 คน เพื่อทดสอบการใช้งานสื่อเสียงที่พัฒนาขึ้น

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

2.1 สื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา

2.2 แบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อการพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา

2.3 แบบสอบถามความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา

3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเป็น 3 ระยะ ประกอบไปด้วย

ระยะที่ 1 ศึกษาปัญหาและแนวทางการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงาน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ศึกษาปัญหา และความต้องการ โดยผู้วิจัยได้ศึกษา และรวบรวมปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยการสัมภาษณ์ผู้บกพร่องทางสายตา และสอบถามผู้ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อสรุปของปัญหา และความต้องการที่เกิดขึ้น

2) วิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้อง โดยผู้วิจัยได้วิเคราะห์ปัญหาต่างๆ และความต้องการที่เกิดขึ้นซึ่งได้แก่ การทบทวนและเรียนรู้เนื้อหาเกี่ยวกับการใช้งาน Google Docs การนำเทคโนโลยีในชีวิตประจำวันมาประยุกต์ใช้ รวมถึงการนำสมาร์ตโฟนมาประยุกต์ใช้ในการใช้งานเพื่อให้เกิดความสะดวก รวดเร็ว และสามารถใช้งานได้ทุกที่ทุกเวลา

3) ทำการออกแบบสื่อเสียง โดยศึกษาแพลตฟอร์มวิดีโอออนไลน์ที่สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกกับผู้บกพร่องทางสายตามากที่สุด โดยผู้วิจัยเลือกใช้ YouTube Platform สำหรับการพัฒนา และใช้งานสื่อเสียง

ระยะที่ 2 ประยุกต์ใช้ YouTube Platform ในการพัฒนาสื่อเสียงตามที่ได้มีการออกแบบไว้ โดยมีการทดสอบการใช้งาน และทำการหาประสิทธิภาพของสื่อเสียงที่พัฒนาขึ้นจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน ประกอบไปด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสำหรับผู้พิการ (Assistive Technology Expert) ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบสื่อการเรียนรู้ (Instructional Designer) และผู้บกพร่องทางสายตาที่เป็นผู้ใช้จริงในกลุ่มเป้าหมาย (End-user Testing)

ระยะที่ 3 ศึกษาผลการทดลองใช้งานสื่อเสียงที่ได้มีการพัฒนาขึ้น โดยผู้วิจัยได้มีการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยมีระยะเวลาในการทดสอบการใช้งานและเก็บรวบรวมข้อมูล 2 สัปดาห์

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

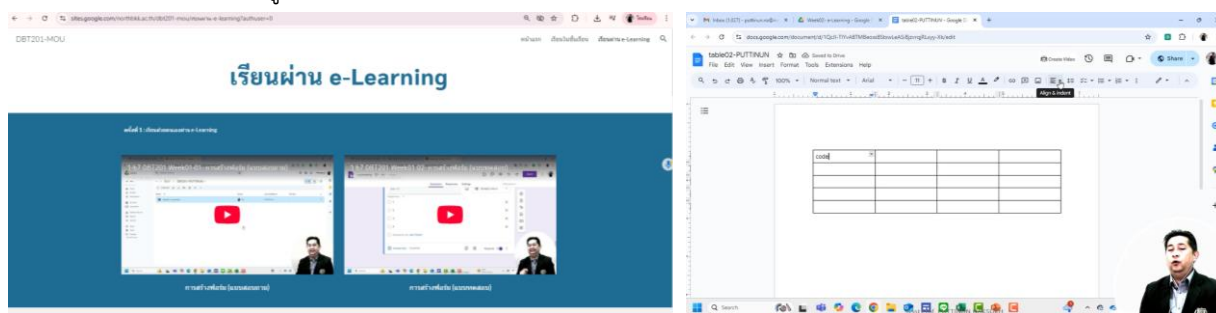
ผู้วิจัยทำการศึกษาผลการใช้งานสื่อเสียงที่ได้พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วย 1) การหาประสิทธิภาพสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตาจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 คน 2) ศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา โดยใช้สถิติพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ($S.D.$) โดยในแต่ละหัวข้อจะมีคำถามให้พิจารณา และตอบโดยเป็นแบบสอบถามชนิดมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย น้อยที่สุด ซึ่งมีเกณฑ์การประเมิน และการให้คะแนนแบ่งเป็น 5 ระดับ ตามมาตรวัดของลิเคิร์ต (Likert Scale) ดังนี้

ระดับ	เกณฑ์การประเมิน
มากที่สุด	4.51 – 5.00
มาก	3.51 – 4.50
ปานกลาง	2.51 – 3.50
น้อย	1.51 – 2.50
น้อยที่สุด	1.00 – 1.50

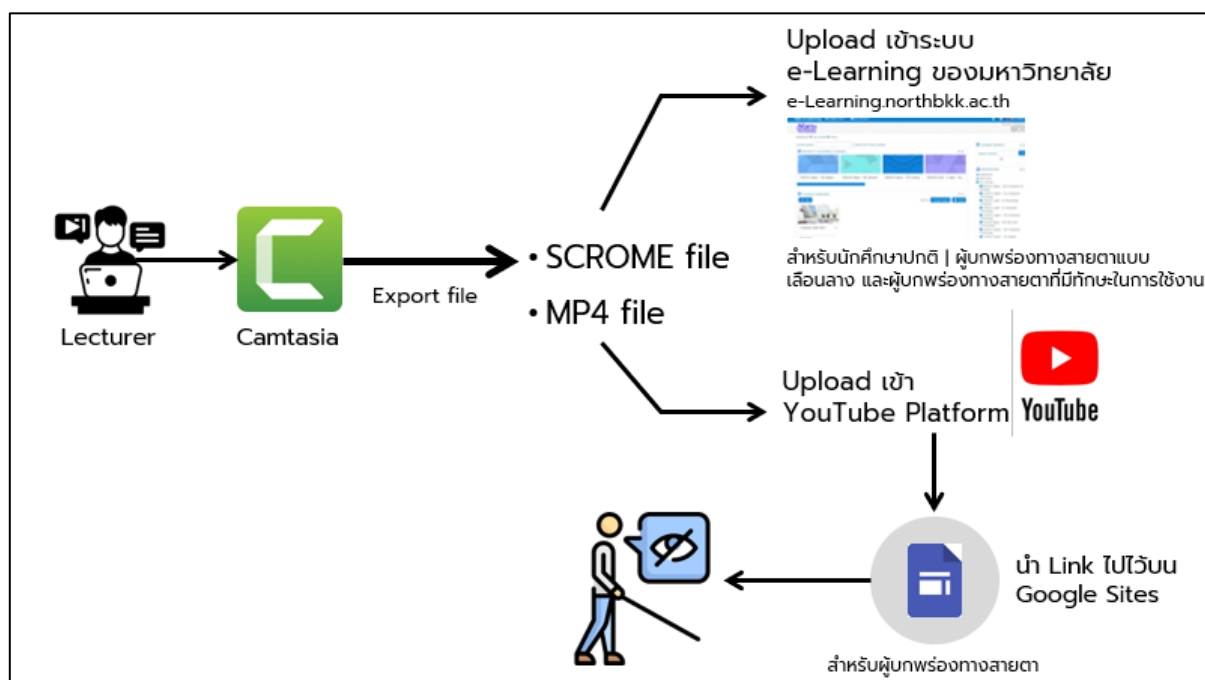
ผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. การออกแบบสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา โดยให้ผู้ใช้งานที่เป็นผู้บกพร่องทางสายตา เรียกใช้งานผ่านทางระบบ e-Learning ของทางมหาวิทยาลัยและผ่านทาง Google Sites โดยมีการแสดงผลบน YouTube Platform เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก และไม่ต้องปรับตัว หรือใช้งานยากมากเกินไป



ภาพที่ 1 ตัวอย่างหน้าจอ



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงกระบวนการดำเนินงาน

จากภาพที่ 2 ผู้วิจัยได้ดำเนินการอัดเสียงผ่านโปรแกรม Camtasia โดยตัวโปรแกรมมีคุณสมบัติในการบันทึกวิดีโอหน้าจอ (Screen Recording) สามารถทำการตัดต่อวิดีโอ (Video Editing) และที่สำคัญสามารถใช้ในการสร้างวิดีโอการสอนหรือวิดีโอสื่อการเรียนรู้ (Instruction Videos, Tutorials) จากนั้นจะทำการ Export file ในรูปแบบของ 1) SCORM (Sharable Content Object Reference Model) ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการสร้างสื่อการเรียนรู้แบบอิเล็กทรอนิกส์ (e-learning) ที่สามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบจัดการเรียนการสอน (LMS: Learning Management System) ได้อย่างมี

ประสิทธิภาพทำให้สามารถติดตามความก้าวหน้าของผู้เรียน (Progress Tracking) เก็บคะแนน (Score Reporting) รายงานสถานะการเรียนรู้ (Completion Status, Pass / Fail) เรียกใช้เนื้อหาบน LMS ได้ง่ายและสามารถใช้อัปโหลดเนื้อหาบนหลายระบบ LMS ได้ และ 2) MP4 file เพื่อนำไป Upload ลงบน YouTube Platform สำหรับการเรียกใช้งาน

สำหรับการเข้าใช้งานนั้น กลุ่มที่ 1 คือ นักศึกษาปกติ, นักศึกษาที่เป็นผู้บกพร่องทางสายตาแบบเลื่อนกลาง และนักศึกษาที่เป็นผู้บกพร่องทางสายตาที่มีทักษะในการใช้งาน สามารถเข้าใช้งานได้ผ่านทางระบบ e-Learning ของทางมหาวิทยาลัย โดยเรียกใช้งานผ่านเมนูบริการออนไลน์ เลือกอีเลิร์นนิ่ง จากเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ (<http://www.northbkk.ac.th>)

กลุ่มที่ 2 คือ นักนักศึกษาที่เป็นผู้บกพร่องทางสายตา จะเข้าใช้งานผ่านทาง Google Sites โดยผู้วิจัยยังได้นำสื่อดังกล่าวนี้ไปไว้บน Google Sites โดยมีการสร้างจุดเชื่อมโยงไปยัง YouTube เพื่อเพิ่มช่องทางให้ผู้บกพร่องทางสายตา โดยทำการส่ง URL ของ Google Sites ผ่านช่องทาง Line Group เพื่อให้ผู้บกพร่องทางสายตา สามารถเข้าถึงได้สะดวก

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา จากผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ประกอบไปด้วย 1) ผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสำหรับผู้พิการ (Assistive Technology Expert) 2) ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบสื่อการเรียนรู้ (Instructional Designer) และ 3) ผู้บกพร่องทางสายตาที่เป็นผู้ใช้จริงในกลุ่มเป้าหมาย (End-user Testing)

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา จากผู้เชี่ยวชาญ

รายการประเมิน	ผลการประเมิน		
	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. ด้านเนื้อหา			
1.1 เนื้อหามีความถูกต้องและเป็นปัจจุบัน	4.67	0.58	มากที่สุด
1.2 เนื้อหาครอบคลุมการใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานของ Google Docs	4.67	0.58	มากที่สุด
1.3 เนื้อหาครอบคลุมการใช้งานฟังก์ชันขั้นสูง (เช่น การทำงานร่วมกัน)	4.33	0.58	มาก
1.4 การอธิบายเนื้อหาที่มีความล้าดับขั้นตอนชัดเจน (ง่ายไปยาก)	4.33	0.58	มาก
1.5 เนื้อหาเหมาะสมกับผู้บกพร่องทางสายตาโดยเฉพาะ	4.67	0.58	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ย	4.53	0.52	มากที่สุด
2. ด้านการออกแบบเสียง			
2.1 เสียงที่ใช้มีความชัดเจนและเหมาะสม (โทนเสียงและจังหวะ)	5.00	0.00	มากที่สุด
2.2 การใช้ภาษาที่มีความกระชับและเข้าใจง่าย	4.67	0.58	มากที่สุด
2.3 การออกเสียงถูกต้องตามหลักภาษา	4.67	0.58	มากที่สุด
2.4 การเน้นเสียงหรือการเว้นจังหวะช่วยในการจดจำข้อมูล	4.67	0.58	มากที่สุด
2.5 ไม่มีเสียงรบกวนหรือสิ่งที่ทำให้เสียสมาธิ	4.33	0.58	มาก
ค่าเฉลี่ย	4.67	0.49	มากที่สุด

3. ด้านการใช้งาน			
3.1 สื่อเสียงช่วยให้สามารถปฏิบัติตามขั้นตอนได้จริง	5.00	0.00	มากที่สุด
3.2 ระยะเวลาของแต่ละตอนเหมาะสม (ไม่ยาวหรือสั้นเกินไป)	4.67	0.58	มากที่สุด
3.3 การใช้งานสื่อเสียงสะดวกและเข้าถึงง่าย	4.33	0.58	มาก
3.4 สามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมอ่านหน้าจอหรือเทคโนโลยีช่วยเหลืออื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ	3.67	0.58	มาก
3.5 มีการแนะนำวิธีการใช้สื่อเสียงที่ชัดเจน	3.67	0.58	มาก
ค่าเฉลี่ย	4.27	0.70	มาก
4. ด้านผลลัพธ์การเรียนรู้			
4.1 ผู้เรียนเข้าใจวิธีการใช้งาน Google Docs อย่างถูกต้อง	4.67	0.58	มากที่สุด
4.2 ผู้เรียนมีความมั่นใจในการใช้งาน Google Docs มากขึ้น	4.67	0.58	มากที่สุด
4.3 ผู้เรียนสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้งานจริงได้ทันที	4.67	0.58	มากที่สุด
4.4 ผู้เรียนมีทักษะเพิ่มขึ้นในการใช้งานร่วมกับผู้อื่นใน Google Docs	3.67	0.58	มาก
4.5 การเรียนรู้ผ่านสื่อเสียงช่วยลดความกังวลในการใช้งานโปรแกรม	4.67	0.58	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ย	4.47	0.64	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	4.48	0.60	มาก

จากตารางที่ 1 พบว่าผู้เชี่ยวชาญได้ทำการประเมินประสิทธิภาพสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา โดยมีผลการประเมินสูงสุด ได้แก่ ด้านการออกแบบเสียง โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.67 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.49 สำหรับประเด็นที่ได้รับการประเมินสูงสุด ได้แก่ 1) เสียงที่ใช้มีความชัดเจนและเหมาะสม (โทนเสียงและจังหวะ) และ 2) สื่อเสียงช่วยให้สามารถปฏิบัติตามขั้นตอนได้จริง โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 5.00 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.00 โดยในภาพรวมทุกด้านมีค่าเฉลี่ยรวม เท่ากับ 4.48 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.60 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับมาก

3. ผลการศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อการใช้สื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา จากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้บกพร่องทางสายตา จำนวน 30 คน

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อการใช้สื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา จากกลุ่มตัวอย่าง

รายการประเมิน	ผลการประเมิน		
	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
1. เนื้อหาของสื่อเสียงมีความถูกต้องและเชื่อถือได้	4.20	0.41	มาก
2. เนื้อหามีความครอบคลุมและเหมาะสมกับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs	4.57	0.57	มากที่สุด
3. การอธิบายเนื้อหาชัดเจน เข้าใจง่าย และเหมาะสมกับผู้บกพร่องทางสายตา	4.53	0.51	มากที่สุด
4. เนื้อหาครอบคลุมการใช้งาน Google Docs ในระดับที่เหมาะสม	4.23	0.57	มาก

รายการประเมิน	ผลการประเมิน		
	$\bar{X}$	S.D.	แปลผล
5. น้ำเสียงของผู้บรรยายชัดเจน เหมาะกับผู้บกพร่องทางสายตา	4.60	0.50	มากที่สุด
6. ความเร็วในการพูดเหมาะสมต่อการฟังและทำความเข้าใจ (ไม่ช้าเกินไปหรือเร็วเกินไป)	4.37	0.49	มาก
7. ไม่มีเสียงรบกวนหรือสิ่งที่ทำให้เสียสมาธิระหว่างการฟัง	4.27	0.83	มาก
8. มีการเว้นจังหวะและเน้นเสียงในช่วงสำคัญของเนื้อหาอย่างเหมาะสม	4.20	0.41	มาก
9. สื่อเสียงนี้ช่วยให้สามารถปฏิบัติตามขั้นตอนการใช้งาน Google Docs ได้จริง	4.53	0.63	มากที่สุด
10. สามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมอ่านหน้าจอ (Screen Reader) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ	4.53	0.51	มากที่สุด
11. สามารถฟังและปฏิบัติตามได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องพึ่งผู้ช่วย	4.67	0.55	มากที่สุด
12. มีความสะดวกในการเข้าถึงและใช้งานไฟล์เสียงจากอุปกรณ์ต่าง ๆ (โทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์, แท็บเล็ต)	4.53	0.51	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ย	4.44	0.56	มาก

จากตารางที่ 2 พบว่ากลุ่มตัวอย่างได้ทำการประเมินความพึงพอใจที่มีต่อการใช้สื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา ซึ่งมีการประเมินความพึงพอใจในภาพรวม โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.44 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.56 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับมาก สำหรับประเด็นที่ได้รับการประเมินความพึงพอใจสูงที่สุดได้แก่ สามารถฟังและปฏิบัติตามได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องพึ่งผู้ช่วย โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.67 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.55

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา ได้มีการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยมีการใช้พัฒนาสื่อเสียงด้วยโปรแกรม Camtasia และทำการ Export เพื่อให้ผู้บกพร่องทางสายตาเรียกใช้งานผ่าน YouTube โดยมีการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 3 ท่าน พบว่าได้รับการประเมินในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.48 และมีส่วนเบี่ยงเบน ($S.D.$) เท่ากับ 0.60 ซึ่งด้านการออกแบบเสียงได้รับการประเมินสูงสุด โดยเฉพาะในประเด็นเสียงที่ใช้มีความชัดเจนและเหมาะสม (โทนเสียงและจังหวะ) รองลงมาได้แก่ ด้านเนื้อหา ในประเด็นเนื้อหามีความถูกต้อง ครอบคลุมการใช้งาน และเหมาะสมกับผู้บกพร่องทางสายตา และด้านผลลัพธ์การเรียนรู้ ในประเด็นเข้าใจวิธีการใช้งาน Google Docs อย่างถูกต้อง ความมั่นใจในการใช้งาน Google Docs มากขึ้น สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้งานจริง และช่วยลดความกังวลในการใช้งาน ตามลำดับ

นอกจากนั้นแล้วการศึกษาความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตา พบว่าได้รับความพึงพอใจในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.44 และมีส่วนเบี่ยงเบน ($S.D.$) เท่ากับ 0.56 สำหรับประเด็นที่ได้รับความพึงพอใจมากที่สุด ได้แก่ สามารถฟังและปฏิบัติตามได้ด้วยตนเองโดยไม่ต้องพึ่งผู้ช่วย รองลงมา ได้แก่ น้ำเสียงของผู้บรรยายชัดเจน เหมาะกับผู้บกพร่องทางสายตา และเนื้อหามีความครอบคลุมและเหมาะสมกับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs ตามลำดับ

จากผลการวิจัยที่ได้รับการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ และความพึงพอใจจากผู้ใช้งานที่อยู่ในระดับมาก ชี้ให้เห็นว่าการพัฒนาสื่อเสียงสำหรับการเรียนรู้การใช้งาน Google Docs เพื่อผู้บกพร่องทางสายตาเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยสื่อเสียงช่วยให้สามารถปฏิบัติตามขั้นตอนได้จริง เสียงที่ใช้มีความชัดเจนและเหมาะสม เนื้อหาครอบคลุมการใช้งานฟังก์ชันพื้นฐานของ Google Docs ทำให้ผู้เรียนเข้าใจวิธีการใช้งาน Google Docs ได้อย่างถูกต้อง มีความมั่นใจในการใช้งาน Google Docs มากขึ้น และสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้งานจริงได้ทันที

นอกจากนั้นแล้วยังใช้สำหรับการทบทวนได้ตลอดเวลาเนื่องจากการเรียกใช้งานผ่านระบบออนไลน์ด้วยช่องทางที่ง่าย และคุ้นเคยผ่าน YouTube ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งคอมพิวเตอร์ แท็บเล็ต และโทรศัพท์มือถือ ทำให้เกิดความสะดวกในการเข้าใช้งานทุกที่ทุกเวลา

อภิปรายผล

จากงานวิจัยที่ได้ดำเนินการผลที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญ และความพึงพอใจจากผู้ใช้งานพบว่าอยู่ในระดับที่ดี โดยเฉพาะด้านการออกแบบเสียง ที่มีความชัดเจนและเหมาะสม ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ บงกช สังข์นาค (2564) ได้ทำวิจัยเรื่อง การผลิตสื่อเสียงและแบบจำลองวิชาวิทยาศาสตร์ เรื่องเมฆ ระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 สำหรับผู้บกพร่องทางสายตา โรงเรียนธรรมิกวิทยา อำเภอเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี โดยการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการผลิตสื่อเสียงและแบบจำลองวิชาวิทยาศาสตร์ เรื่องเมฆ ระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 สำหรับผู้บกพร่องทางสายตา โรงเรียนธรรมิกวิทยา อำเภอเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี กลุ่มตัวอย่างในการวิจัยคือผู้เชี่ยวชาญในการหาคุณภาพด้านสื่อเสียงและเนื้อหาจำนวน 3 คน และผู้เชี่ยวชาญด้านแบบจำลอง จำนวน 3 คน โดยใช้วิธีการเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง ผลการวิจัยพบว่าการประเมินในด้านคุณภาพสื่อเสียงและเนื้อหามีคุณภาพในระดับดีมาก โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.93 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน .25 ส่วนการประเมินด้านแบบจำลองมี คุณภาพในระดับดีมาก โดยมีคะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 4.76 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน .43 โดยผลรวม ของคะแนนเฉลี่ยทั้งสองด้านเท่ากับ 4.84 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ .34 ดังนั้นงานวิจัยที่จัดทำขึ้นมาคุณภาพอยู่ในระดับดีมากซึ่งสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ อัญมณี เพชรมา และวิภาวี วีระวงศ์ (2562) ได้ทำวิจัยเรื่อง การผลิตเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์สำหรับผู้พิการทางการเห็น พบว่าการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อศึกษากระบวนการผลิตเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ สำหรับผู้พิการทางการเห็น 2) เพื่อศึกษาความเข้าใจเนื้อหาการบรรยายหลังการฟังเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ สำหรับผู้พิการทางการเห็น และ 3) เพื่อประเมินความพึงพอใจของผู้พิการทางการเห็นที่มีต่อเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ สำหรับผู้พิการทางการเห็นกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้แก่ ผู้พิการทางการเห็น จากศูนย์ฝึกอาชีพ ศูนย์พัฒนาสมรรถภาพคนตาบอด จังหวัดนนทบุรี ประจำปีการศึกษา 2560 จำนวน 20 คน ได้มาโดยการเลือกอย่างเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ได้แก่ เสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ สำหรับผู้พิการทางการเห็น แบบทดสอบวัดความเข้าใจเรื่องการฟัง เสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ แบบเลือกตอบ 4 ตัวเลือกจำนวน 10 ข้อ แบบสอบถามความพึงพอใจของผู้พิการทางการเห็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับจำนวน 15 ข้อ ผลการวิจัย พบว่า 1) กระบวนการผลิตเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ สำหรับผู้พิการทางการเห็นประกอบด้วย ขั้นตอนการผลิต (Pre-Production) ขั้นตอนการผลิต (Production) และขั้นตอนหลังการผลิต (Post-Production) 2) ผู้พิการทางการเห็นมีความเข้าใจเนื้อหาเรื่องหลังการฟังเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบการบรรยายการสารคดีโทรทัศน์ สูงกว่าเกณฑ์ร้อยละ 80 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ

0.05 และ 3) ผู้พิการทางการเห็นมีความพึงพอใจต่อเสียงบรรยายภาพประกอบรายการสารคดีโทรทัศน์ด้วยระบบดิจิทัลอยู่ในระดับมาก

จากงานวิจัยข้างต้นชี้ให้เห็นถึงความสอดคล้องในผลการวิจัยที่ได้ในเรื่องของเสียง และการสร้างความเข้าใจในเนื้อหาที่บรรยาย ทำให้ผู้บกพร่องทางการมองเห็นสามารถเข้าถึงสื่อเพื่อการเรียนรู้ ทำให้เกิดการพัฒนาทักษะด้านดิจิทัลได้ด้วยตนเองไม่เป็นภาระในการพึ่งพาผู้อื่น และที่สำคัญช่วยทำให้เกิดความทัดเทียมในด้านการเรียนรู้ให้กับผู้บกพร่องทางสายตาทำให้สามารถทำงานร่วมกันได้กับคนปกติทั่วไปได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อนำผลการวิจัยไปใช้งาน

- 1) ควรมีการเผยแพร่ไปยังสถานศึกษาที่สอนผู้บกพร่องทางสายตา
- 2) ควรมีการจัดอบรมผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่อให้คำแนะนำในการใช้สื่อเสียงได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ เช่น การติดตั้ง Short Cut Key เพื่อเรียกใช้งานผ่านคอมพิวเตอร์ หรือ Smart Phone
- 3) ควรมีการประชาสัมพันธ์ หรือจัดฝึกอบรมให้กับผู้บกพร่องทางสายตาในกลุ่มบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจ

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

- 1) ควรมีการจัดทำสื่อเสียงทั้งหมดให้ครบทั้ง Google Workspace (G Suite) และอาจปรับเป็นหัวเรื่องย่อยๆ เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเลือกเรียนได้ตามที่ต้องการ
- 2) การนำเทคโนโลยี AI มาประยุกต์ในการใช้งาน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับผู้ใช้งานมากขึ้น
- 3) ควรมีการติดตามผลในระยะยาวเพื่อประเมินประสิทธิภาพของสื่อเสียงที่มีต่อผู้ใช้งาน

เอกสารอ้างอิง

- กรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคนพิการ. (ม.ป.ป.). *สถานการณ์คนพิการในประเทศไทย*. <https://dep.go.th/images/uploads/files/Dashboard042568.pdf>
- จักรพันธ์ พรหมฉาย, & นันทวัฒน์ ภัทรกรนันท์. (2564). การศึกษากับคนพิการ. *วารสารศึกษาศาสตร์มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี*, 9(3), 1–13.
- นัฐติยา สอนสุภาพ. (2562). *การพัฒนาการจัดการเรียนการสอนด้วยแอปพลิเคชันเสียงเพื่อการเรียนรู้สำหรับคนพิการทางสายตา* (ปริญญาานิพนธ์). มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.
- นวลจันทร์ จุฑาภักติกุล. (ม.ป.ป.). การเรียนรู้ผ่านพหุประสาทสัมผัส. สืบค้น มิถุนายน 2568, จาก <https://ejournals.swu.ac.th/index.php/ENEDU/article/download/6701/6313/20688>
- บงกช สังข์นาค, กรรวิ ขาวสอาด, & ภาสกร ศรีสุวรรณ. (2564). การผลิตสื่อเสียงและแบบจำลองวิชาวิทยาศาสตร์ เรื่องเมฆระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 สำหรับผู้บกพร่องทางสายตา โรงเรียนธรรมิกวิทยา อำเภอยะย้อย จังหวัดเพชรบุรี. *วารสารครูพรรณ*, 1(1), 1–18.
- เพ็ญทิพา จิตวรางคณา. (2558). *การใช้บทเรียนคอมพิวเตอร์ช่วยสอน เรื่อง ภาษาพาสุนัข เพื่อพัฒนาทักษะการเขียนสะกดคำของนักเรียนที่มีความบกพร่องทางการเห็นเรียนรวม* (การค้นคว้าอิสระ). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศศินันท์ ศิริธาดากุลพัฒน์. (ม.ป.ป.). การออกแบบการเรียนรู้ที่เป็นสากล (Universal Design for Learning). สืบค้น 16 มิถุนายน 2568, จาก <https://event.educathai.com/educa2024>

อัญมณี เพชรมา, & วิภาวี วีระวงศ์. (2562). การผลิตเสียงบรรยายภาพด้วยระบบดิจิทัลประกอบรายการสารคดีโทรทัศน์สำหรับผู้พิการทางการเห็น. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยการจัดการและเทคโนโลยีอีสเทิร์น*, 16(2), 97–100.

Translated Thai References

- Anyamanee, P., & Weerawong, W. (2019). Production of digital audio description for television documentaries for visually impaired persons. *UMT Poly Journal*, 16(2), 97–100.
- Bongkot, S., Khaosaat, K., & Srisuwan, P. (2021). Production of audio media and science models on clouds for Grade 4 visually impaired students at Thammik Wittaya School, Khao Yoi District, Phetchaburi Province. *Khuruthat Journal*, 1(1), 1–18.
- Department of Empowerment of Persons with Disabilities. *Situation of persons with disabilities in Thailand*. <https://dep.go.th/images/uploads/files/Dashboard042568.pdf>
- Jitwarangkhan, P. (2015). *The use of computer-assisted instruction entitled “Language Fun” to develop spelling skills of students with low vision*. (Independent study). Chiang Mai University.
- Juthapakdikul, N. Multisensory learning. Retrieved June 2025, from <https://ejournals.swu.ac.th/index.php/ENEDU/article/download/6701/6313/20688>
- Phromchaloei, C., & Phatkornanan, N. (2021). Education and persons with disabilities. *Journal of Education, Bangkokthonburi University*, 9(3), 1–13.
- Sirithadakulpat, S. Universal Design for Learning. Retrieved June 16, 2025, from <https://event.educathai.com/educa2024>
- Sonsuphap, N. (2019). *Development of instructional management using an audio learning application for visually impaired persons*. (Master’s thesis). Rajabhat Maha Sarakham University.

Received: Nov 26, 2025

Revised: Jun 27, 2026

Accepted: Jun 29, 2026

การวิเคราะห์ความเสียหายของถังต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวที่ระบุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 จากระบบเปลวไฟโดยตรง: กรณีศึกษาโรงงาน SME

FAILURE ANALYSIS OF A REPORTED GRADE 304 STAINLESS STEEL COCONUT FLOWER VINEGAR BOILER USING A DIRECT FLAME HEATING SYSTEM: AN SME CASE STUDY

พิชา พันธุ์มงคล^{1*}, เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์¹, วิบูลย์ ประทุมรัตน์¹, กฤษณะ ภัลลยวรรณ์¹,

เกริกขจร ถนัทรบ¹, เขต บุราคร², วิษณุ พึ่งขุนทด²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

²วิศวกรโครงการ บริษัท เออีซี อินดัสเตรียล เซอร์วิส จำกัด

Picha Panmongkol^{1*}, Wetarin Atijirasing¹, Wiboon Pratumrat¹, Kritsana Philaiwan¹

Krirkkajon Tanadrob¹, Khet Burakorn, Wissanu Pongkuntod²

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thonburi University

²Project Engineer, AEC INDUSTRIAL SERVICES CO., LTD.

Corresponding author: *picha.p@thonburi-u.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะความเสียหายและกลไกที่เป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถังต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวในโรงงานอาหารขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) ซึ่งเกิดการรั่วซึมภายในระยะเวลาการใช้งานประมาณ 4 เดือน ถังดังกล่าวใช้ระบบให้ความร้อนแบบเปลวไฟสัมผัสกันโดยตรงจากแก๊ส LPG การตรวจสอบดำเนินการตามแนวทางการวิเคราะห์ความเสียหาย โดยใช้การตรวจพินิจด้วยสายตา การประเมินการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนตามแนวทาง ASTM G46 การตรวจลักษณะพื้นฐานของหลุม และการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย SEM-EDS ผลการศึกษาพบหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มกระจายตัวหนาแน่นบริเวณก้นถัง โดยพบหลุมขนาดใหญ่กว่า 3.0 มม. จำนวนมากในพื้นที่สัมผัสกับตำแหน่งเปลวไฟ ผล SEM-EDS บ่งชี้ว่าปริมาณนิกเกิล (Ni) ในบริเวณที่ตรวจวัดอยู่ที่ประมาณ 6.49–6.84 wt.% ซึ่งต่ำกว่าช่วงองค์ประกอบที่กำหนดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตาม ASTM A240/A240M โดยภาพรวมหลักฐานที่ตรวจพบสนับสนุนสมมติฐานว่าความเสียหายเกิดจากกลไกความเสียหายร่วมระหว่างการให้ความร้อนด้วยเปลวไฟโดยตรง การไม่มีท่อระบายน้ำซึ่งทำให้เกิดของเหลวตกค้าง และสภาพแวดล้อมกรดอินทรีย์ที่อาจเกิดความเข้มข้นเฉพาะจุดจากการระเหยซ้ำ ภายหลังการวิเคราะห์และการปรับปรุงเชิงวิศวกรรม โรงงานได้เปลี่ยนวัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ขณะที่ยังคงใช้ระบบให้ความร้อนแบบเปลวไฟโดยตรงตามข้อจำกัดของโรงงาน SME จากการติดตามผลภาคสนามประมาณ 1 ปี ยังไม่พบการรั่วซึมหรือความเสียหายซ้ำในลักษณะเดิม งานวิจัยจึงเสนอแนวทางปรับปรุงโดยพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมกับสภาวะกรดอินทรีย์ เพิ่มระบบระบายน้ำ ลดการตกค้างของของเหลว และกำหนดมาตรการตรวจสอบวัสดุก่อนใช้งาน ทั้งนี้ ข้อเสนอแนะ Root Cause ในงานนี้เป็นการวิเคราะห์จากหลักฐานที่มีอยู่และข้อมูลติดตามภาคสนาม ยังไม่ใช่งานยืนยันเชิงทดลองโดยสมบูรณ์

คำสำคัญ : การกัดกร่อนแบบรูเข็ม, เหล็กกล้าไร้สนิม 304, การวิเคราะห์ความเสียหาย, ระบบให้ความร้อนแบบสัมผัสไฟโดยตรง, อุสาหกรรมการอาหาร SMEs

Abstract

This study investigates premature pitting failure at the bottom of a coconut flower vinegar boiling/pasteurization tank used in an SME food processing facility. The tank was heated by a direct flame heating system using LPG and developed leakage after approximately four months of operation. Failure analysis was conducted through visual inspection, pit distribution evaluation according to ASTM G46,

morphological examination, and SEM-EDS analysis. The results revealed a dense distribution of pitting corrosion at the tank bottom, particularly in the area associated with direct flame exposure. Large pits greater than 3.0 mm were observed, indicating severe localized corrosion. SEM-EDS results showed that the measured nickel (Ni) content in the analyzed area was approximately 6.49–6.84 wt.%, which is lower than the compositional range specified for Type 304 stainless steel in ASTM A240/A240M. Overall, the available evidence supports the hypothesis that the failure resulted from a synergistic mechanism involving direct flame heating, residual fluid hold-up due to the absence of a bottom drain, localized concentration of acidic solution, and possible lower-than-expected corrosion resistance of the material. After the failure analysis and engineering improvement, the factory replaced the material with Type 316L stainless steel while continuing to use the direct flame heating system due to practical constraints in the SME production environment. Field follow-up for approximately one year showed no recurrence of leakage or similar damage. The findings suggest that material upgrading, improved bottom drainage, reduction of residual hold-up, and material verification before fabrication or service are practical corrective measures for reducing the risk of repeated pitting failure. The proposed root cause is based on available evidence and field follow-up information and still requires further experimental validation.

Keywords : Pitting corrosion, stainless steel, failure analysis, direct-fired heating, root cause analysis, SME food industry

บทนำ

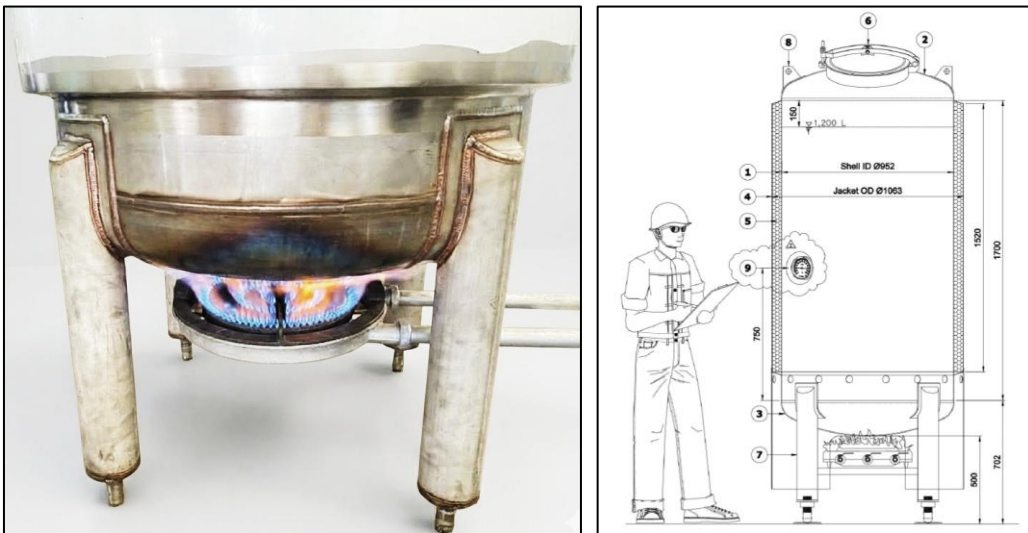
อุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหมักดอง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์กลุ่มที่มีสภาพกรดอินทรีย์อ่อน เช่น น้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าว (Coconut flower vinegar) ซึ่งมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกประมาณ 4–6% จำเป็นต้องพึ่งพาอุปกรณ์แปรรูปที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) เพื่อรักษามาตรฐานสุขอนามัย (Hygiene) และความทนทานต่อการกัดกร่อนโดยการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในสถานะที่สัมผัสกรดอะซิติกควรพิจารณาทั้งความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ สิ่งเจือปน และความเสี่ยงจากคลอไรด์ร่วมด้วย (Lai et al., 2012; Ministry of Public Health, 1985; British Stainless Steel Association, n.d.) แม้ว่าเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) เช่น เกรด 304 และ 316 จะเป็นวัสดุมาตรฐานในอุตสาหกรรมนี้ แต่ความทนทานต่อการกัดกร่อนอาจลดลงได้ภายใต้สภาวะที่เอื้อต่อการกัดกร่อนเฉพาะจุด (Localized corrosion) โดยเฉพาะเมื่อมีคลอไรด์ร่วมกับอุณหภูมิสูงและวัสดุมีค่าดัชนีความทนทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Resistance Equivalent Number; PREN) ต่ำ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304/304L ซึ่งไม่มีการเติมโมลิบดีนัม (Sedriks, 1996; Frankel, 1998) นอกจากนี้ การใช้งานในสภาวะที่มีกรดอะซิติกร่วมกับความร้อนสูงอาจส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่รุนแรงขึ้น หากมีการสะสมของสิ่งเจือปนหรือเกิดความเข้มข้นเฉพาะจุดระหว่างการใช้งาน (Zadi & Shaaban, 2012)

อย่างไรก็ตาม ความเสียหายในบริบทของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) มักมีความซับซ้อนมากกว่าปัจจัยด้านเคมีเพียงอย่างเดียว กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้พบการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่รุนแรงจนเกิดการรั่วซึมบริเวณก้นถังภายในระยะเวลาการใช้งานประมาณ 4 เดือน จากการรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงพบว่า ถังดังกล่าวถูกใช้งานในกระบวนการต้มน้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าวเฉลี่ยประมาณวันละ 1 batch ลักษณะการให้ความร้อนเป็นการใช้เชื้อเพลิง LPG ผ่านหัวเตาแก๊สที่ให้เปลวไฟสัมผัสบริเวณก้นถังโดยตรง อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ระหว่างการใช้งานไม่ได้มีการบันทึกเป็นค่าตัวเลขด้วยเครื่องมือวัด แต่จากข้อมูลการปฏิบัติงานระบุว่าเป็นการให้ความร้อนจนผลิตภัณฑ์อยู่ในสถานะเดือด หลังสิ้นสุดการผลิตในแต่ละรอบ ผู้ใช้งานทำความสะอาดถังโดยการฉีดน้ำล้างภายในถัง แล้วใช้ปั๊มดูดน้ำล้างออกจากภายในถัง เนื่องจากถังไม่มีท่อระบายหรือวาล์วระบายที่ก้นถังโดยตรง ลักษณะดังกล่าวมีความสำคัญทางวิศวกรรม เนื่องจากอาจทำให้เกิดของเหลวตกค้างบริเวณก้นถัง โดยเฉพาะในพื้นที่ต่ำหรือบริเวณที่สัมผัสกับตำแหน่งเปลวไฟ เมื่อมีการให้ความร้อนซ้ำในรอบการผลิตถัดไป ของเหลวตกค้างดังกล่าวอาจเกิดการระเหยของน้ำและทำให้กรดอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนมีความเข้มข้นเฉพาะจุดสูงขึ้นส่งผลให้สภาวะบริเวณก้นถังเอื้อต่อการเกิด concentration cell และการเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นประเด็นที่วรรณกรรมส่วนใหญ่อาจมองข้าม การใช้เปลวไฟสัมผัสกันโดยตรงมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดจุดร้อนเฉพาะที่ (Hot Spot) และทำให้อุณหภูมิผิวโลหะบริเวณกันถึงสูงกว่าอุณหภูมิของของเหลวภายในถึง โดยเฉพาะบริเวณที่เปลวไฟสัมผัสระหว่างรอบการผลิต ปัจจัยดังกล่าวอาจส่งผลให้ฟิล์มพาสซีฟของเหล็กกล้าไร้สนิมเสื่อมสภาพและเอื้อต่อการเริ่มต้นของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม นอกจากนี้ หากอุณหภูมิผิวโลหะเข้าสู่ช่วงวิกฤตซ้ำ ๆ ระหว่างการใช้งาน อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิด sensitization หรือการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน อย่างไรก็ตาม งานศึกษานี้ยังไม่ได้ตรวจยืนยัน intergranular corrosion หรือ chromium carbide precipitation โดยตรง จึงใช้ประเด็นดังกล่าวเป็นข้อพิจารณาเชิงกลไกที่เป็นไปได้เท่านั้น (Davis, 2006; Davis, 2000) แต่ยังคงก่อให้เกิดความเสี่ยงทางโลหะวิทยาที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1) การสลายตัวของฟิล์มพาสซีฟโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) จากสภาวะความร้อนสูงเฉพาะที่ และ 2) ความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะไวต่อการกัดกร่อน (Sensitization) หรือการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน หากอุณหภูมิผิวโลหะสูงเข้าสู่ช่วงวิกฤต (Critical Temperature Range) ซ้ำ ๆ ระหว่างรอบการผลิต ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความเสียหายในรอยเชื่อมและพื้นที่กระทบความร้อน ตามขอบเกรน หากอุณหภูมิผิวโลหะสูงเข้าสู่ช่วงวิกฤต $425\text{--}815\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซ้ำ ๆ ระหว่างรอบการผลิต (ASM International, 2006; Davis, 2000)

จากข้อมูลของกรณีศึกษานี้พบว่า นอกจากปัจจัยด้านความร้อน ปัจจัยด้านการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design) ยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อกลไกการกัดกร่อน การออกแบบถังที่ไม่มีจุดระบายก้นถัง (Bottom Drain) และใช้วิธีดูดผลิตภัณฑ์จากปากถัง ส่งผลให้เกิด "ปริมาณของเหลวตกค้าง (Residual Hold-up)" สภาวะนี้ร่วมกับความร้อนจากเปลวไฟ ทำให้เกิดการระเหยตัวของน้ำ (Evaporation) ส่งผลให้คลอไรด์และความเข้มข้นกรดเข้มข้นขึ้นเฉพาะจุด (Concentration Cell) และนำไปสู่การเพิ่มความเข้มข้นของกรดและคลอไรด์ในบริเวณกันถึงจนสูงเกินกว่าค่าออกแบบปกติ (Concentration Cell Corrosion) ปัจจัยเหล่านี้เมื่อรวมกับรอยขีดข่วนทางกลหรือสิ่งปนเปื้อนจากการผลิต ล้วนเป็นตัวเร่งให้เกิดการเริ่มต้นของรูเข็มได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (Sedriks, 1996; Frankel, 1998)

โครงการนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัญหาจากหน้างานจริง (Field Failure Analysis) โดยบูรณาการความสัมพันธ์แบบ "ครบห่วงโซ่" (Integrated Chain) ตั้งแต่ข้อจำกัดด้านการออกแบบ พฤติกรรมการใช้งาน และการเลือกวัสดุ งานศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ปัญหาจากหน้างานจริง (Field Failure Analysis) โดยบูรณาการความสัมพันธ์ระหว่างข้อจำกัดด้านการออกแบบ พฤติกรรมการใช้งาน สภาพแวดล้อมของกระบวนการ และการเลือกวัสดุ เพื่อสังเคราะห์แนวทางแก้ไข ปัญหาที่ปฏิบัติได้จริงสำหรับผู้ประกอบการ SME ทั้งการปรับปรุงระบบให้ความร้อน การออกแบบจุดระบายก้นถัง การควบคุมการตกค้างของของเหลว และการตรวจสอบวัสดุก่อนใช้งาน อันเป็นแนวทางที่ช่วยยกระดับความปลอดภัยและความทนทานของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมอาหาร



ภาพที่ 1 การใช้งานถังให้ความร้อนด้วยเปลวไฟจากแก๊ส LPG สัมผัสกันถึงโดยตรง (ซ้าย) และ มิติถัง (ขวา)

วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์ลักษณะและความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถังผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้ในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์ น้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าว
2. ศึกษาสัณฐานวิทยาของหลุมกัดกร่อน (pit morphology) และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีเบื้องต้นของบริเวณหลุมและโลหะฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ร่วมกับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เพื่อประเมินแนวโน้มองค์ประกอบของวัสดุและผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน
3. เสนอแนวทางเชิงวิศวกรรมสำหรับการซ่อมแซม การออกแบบใหม่ และการเดินระบบ/การทำความสะอาด เพื่อป้องกันปัญหาซ้ำในอนาคต

ขอบเขตของงาน

1. เป็นกรณีศึกษาจากถังเพียง 1 ใบในกระบวนการพาสเจอร์ไรซ์น้ำส้มสายชูหมักจากดอกมะพร้าว ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 952 มม. หนา 4 มม. ไม่มี bottom drain ที่ผ่านการใช้งานมา 4 เดือน
2. ศึกษาเฉพาะก้นถังด้านใน ไม่ครอบคลุมโซนแนวเชื่อมหรือผนังถัง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมชิ้นงานและการตรวจสอบเบื้องต้น ชิ้นงานตัวอย่างถูกตัดจากบริเวณก้นถังที่เกิดความเสียหาย ขนาด ตัวอย่าง 50x50 มม. จำนวน 2 ชิ้น ทำความสะอาดพื้นผิวและเตรียมชิ้นงานทางโลหะวิทยา (Metallographic Preparation) ตามมาตรฐาน ASTM E3 (ASTM International, 2017) เพื่อจัดคราบสกริปโดยไม่ทำลายลักษณะทางจุลภาคดั้งเดิม การตรวจสอบพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) ดำเนินการเพื่อระบุตำแหน่งและการกระจายตัวของความเสียหายตามแนวทางของ ASM Handbook Vol. 11 (ASM International, 2002)
2. การประเมินลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม การประเมินความรุนแรงของการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion Evaluation) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G46 (ASTM International, 2021) โดยทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดและคำนวณความหนาแน่นของหลุมต่อหน่วยพื้นที่ เพื่อจำแนกความรุนแรงของความเสียหาย.
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของบริเวณหลุมกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อน และเนื้อโลหะฐาน ด้วยเทคนิค SEM-EDS โดยพิจารณาธาตุหลัก ได้แก่ Cr, Ni, Fe, Mo, C, O, Si และ Mn และเปรียบเทียบผลที่ได้กับช่วงองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน ASTM A240/A240M ทั้งนี้ ผลจาก SEM-EDS ใช้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับการวิเคราะห์ ไม่ใช้การยืนยันเกรดวัสดุอย่างเป็นทางการ

ผลการดำเนินงาน

1. การตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection)

ทำการตรวจสอบก้นถังหลังการระบายน้ำทิ้งและทำความสะอาดเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยอาศัยการตรวจพินิจด้วยสายตา จากการตรวจพินิจด้วยสายตา พบว่าบริเวณก้นถังมีพื้นที่วิกฤตเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 มม. ซึ่งเป็นบริเวณที่พบคราบตกค้าง ร่องรอยการไหลของของเหลว และหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มหนาแน่นที่สุด พื้นที่ดังกล่าวสัมพันธ์กับตำแหน่งเปลวไฟใต้ถังถัง และสอดคล้องกับบริเวณที่ตรวจพบความเสียหายรุนแรงที่สุด โดยหลุมกัดกร่อนกระจายตัวในลักษณะเป็นแถบวงแหวนรอบบริเวณก้นถังของถัง และสัมพันธ์กับตำแหน่งเปลวไฟใต้ถังถังซึ่งมีคราบน้ำและร่องรอยการไหลของของเหลวตกค้างอย่างชัดเจน พื้นที่ดังกล่าวสอดคล้องกับบริเวณที่ตรวจพบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) รุนแรงที่สุด โดยรูเข็มกระจายตัวหนาแน่นในลักษณะเป็นแถบวงแหวนกว้างรอบจุดศูนย์กลางของก้นถัง

จากการตรวจด้วยสายตาได้ทำการบันทึกภาพถ่ายตำแหน่งและลักษณะของการกัดกร่อนเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเชิงคุณภาพ จากนั้นกำหนดให้พื้นที่วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มม. ที่ก้นถังดังกล่าวเป็น พื้นที่วิกฤต (critical area) สำหรับ

การตรวจสอบเชิงปริมาณ โดยวางแผนดำเนินการประเมินความหนาแน่นของรูเข็มต่อหน่วยพื้นที่ตามแนวทางในมาตรฐาน ASTM G46 เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินระดับความเสียหายและการกำหนดแนวทางซ่อมแซมเชิงวิศวกรรมต่อไป

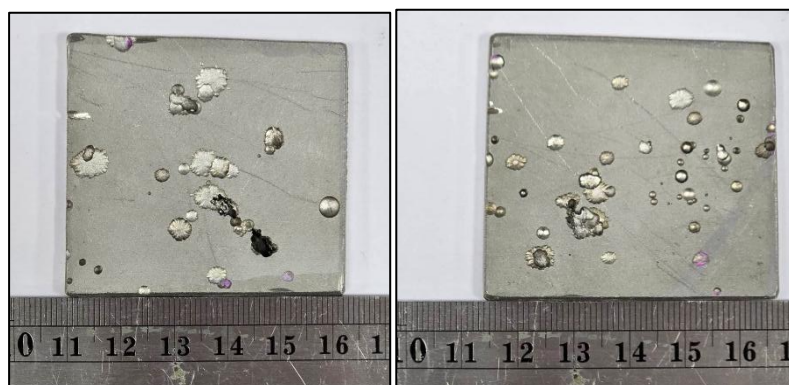


ภาพที่ 2 ลักษณะกันถังและขอบเขตพื้นที่วิกฤตกรณีศึกษาเส้นผ่านศูนย์กลาง 600 มม. ที่ตรวจพบการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (ด้านในถัง)

2. การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มตาม ASTM G46

2.1 การเตรียมชิ้นงานและการถ่ายภาพมาโคร (Macro)

บริเวณกันถังที่ระบุว่าเป็นพื้นที่วิกฤตเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 600 มม. ได้ทำการตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 50x50 มม. รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสออกมาจากกันถัง เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม จากนั้นวางชิ้นงานบนพื้นเรียบและจัดวางไม้บรรทัดโลหะในภาพเดียวกันเพื่อใช้เป็นสเกลอ้างอิงสำหรับการวัดขนาดหลุม pitting ดังแสดงในภาพที่ 3 ภาพถ่ายถูกถ่ายในแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากมุมมอง (perspective error) ก่อนนำไปประมวลผลภาพดิจิทัล



ภาพที่ 3 ชิ้นงานตัวอย่างขนาด 50x50x4 มม. จากกันถังแสดงการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็ม (ด้านในถัง)

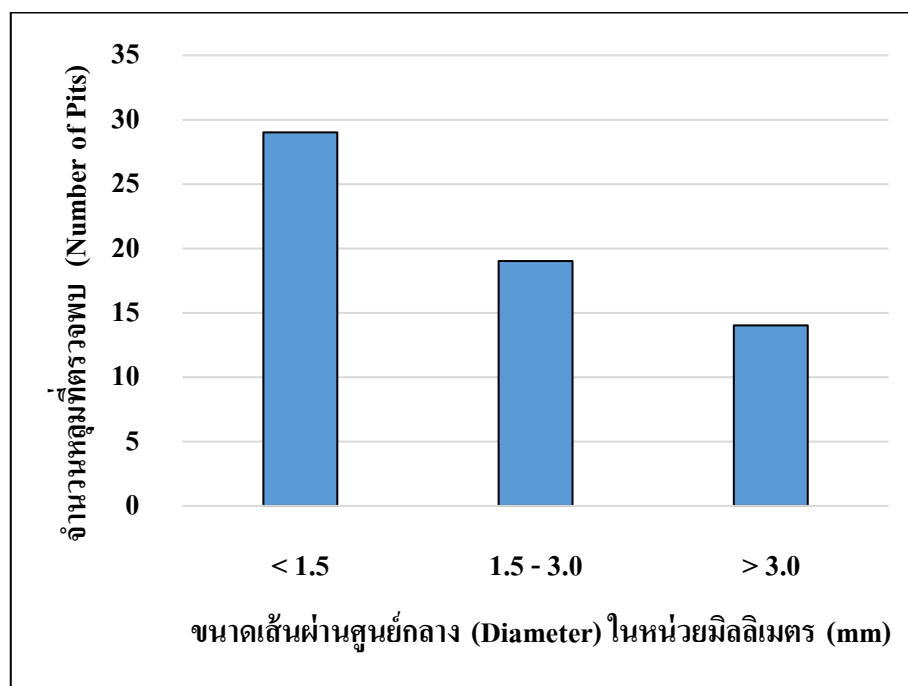
2.2 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมกัดกร่อนที่ก้นถัง

ภาพถ่ายของชิ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 3 ถูกแปลงเป็นภาพเฉดเทา (grayscale) แล้วทำการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลเพื่อแยกบริเวณหลุม pitting ออกจากพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม โดยใช้เกณฑ์ความสว่างของขอบหลุมที่มีคอนทราสต์สูงกว่าพื้นผิวโดยรอบ จากนั้นทำการจัดกลุ่มพิกเซลที่ต่อเนื่องกันเป็นแต่ละหลุมกัดกร่อน (connected components) สำหรับหลุมแต่ละหลุม ทำการคำนวณพื้นที่ A (หน่วยพิกเซล²) และแปลงเป็น เส้นผ่านศูนย์กลางเชิงสมมูลของวงกลม (equivalent circular diameter) ดังแสดงในสมการ (1)

$$d_{px} = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1)$$

แล้วแปลงเป็นหน่วยมิลลิเมตรด้วยอัตราส่วนสเกลที่ได้ โดยในขั้นตอนการประมวลผลมีการกรองสัญญาณรบกวน (noise) โดยตัดหลุมที่มีพื้นที่เล็กมาก (เช่น เกิดจากจุดสะท้อนแสง/คราบสกปรก) และไม่ใช้หลุมกัดกร่อนจริงออก เพื่อให้ได้เฉพาะหลุม pitting ที่มีนัยสำคัญทางวิศวกรรม วิธีการดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของมาตรฐาน ASTM G46 ในการใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและพื้นที่ของหลุมกัดกร่อนเพื่ออธิบายลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็มในเชิงปริมาณ และสามารถนำไปเชื่อมโยงกับ "average pit diameter" ในแผนภูมิการจัดชั้นของ ASTM G46 ได้

จากการประมวลผลภาพ สามารถประมาณค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมกัดกร่อนและจัดกลุ่มตามช่วงขนาด ได้ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยพบหลุมกัดกร่อนรวมทั้งสิ้น 62 หลุม จากชิ้นงานตัวอย่างในรูปที่ 3 เมื่อจำแนกตามช่วงเส้นผ่านศูนย์กลาง พบผลดังนี้



ภาพที่ 4 แสดงจำนวนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมที่เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มที่ก้นถัง

- ช่วง < 1.5 มม. พบหลุมกัดกร่อนจำนวน 29 หลุม คิดเป็นประมาณ 47% ของจำนวนหลุมทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนส่วนหนึ่งเกิดในลักษณะรูเข็มขนาดเล็กและกระจายตัวทั่วไปบนผิวก้นถัง
- ช่วง 1.5–3.0 มม. พบหลุมกัดกร่อนจำนวน 19 หลุม หรือประมาณ 31% ของทั้งหมด เป็นกลุ่มหลุมขนาดปานกลางที่เริ่มมีผลต่อความหนาที่มีประสิทธิภาพของแผ่นก้นถังมากขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มแรก

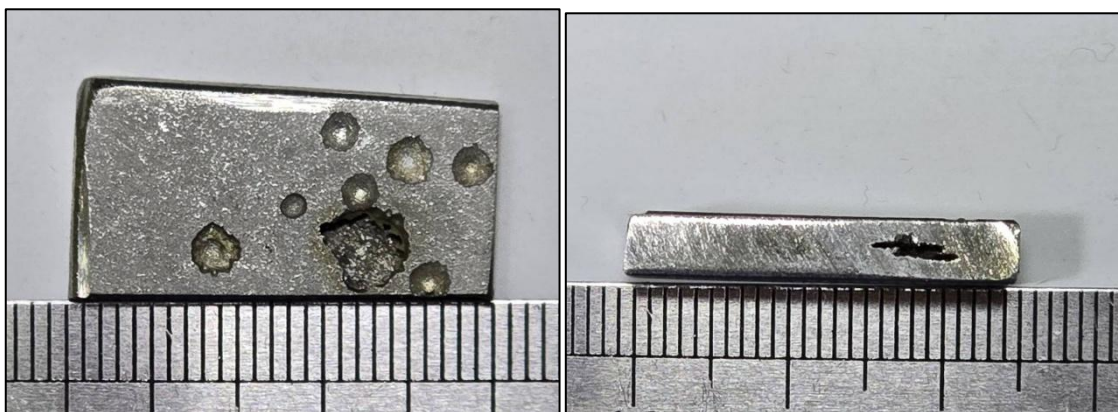
- ช่วง > 3.0 มม. พบหลุมกัดกร่อนจำนวน 14 หลุม หรือประมาณ 23% ของทั้งหมด ซึ่งจัดเป็นหลุมขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับสองช่วงแรก และสะท้อนว่าบริเวณกันดั้มมีตำแหน่งที่ได้รับความเสียหายรุนแรงอยู่หลายจุด ไม่ได้มีเพียงหลุมขนาดเล็กเท่านั้น

จากผลการตรวจวัดขนาดหลุมกัดกร่อนที่กันดั้ม พบว่าหลุมขนาดเล็กกว่า 1.5 มม. มีจำนวนมากที่สุด แต่หลุมขนาดปานกลาง 1.5–3.0 มม. และขนาดใหญ่กว่า 3.0 มม. รวมกันคิดเป็นมากกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนหลุมทั้งหมด สะท้อนว่าบริเวณกันดั้มไม่ได้มีเพียง pitting ขนาดเล็ก แต่มีการพัฒนาตัวเองเป็นหลุมขนาดกลางถึงใหญ่ในหลายตำแหน่ง ซึ่งบ่งชี้ถึงการเติบโตของหลุมในแนวตั้ง (Vertical propagation) อย่างรวดเร็ว (Szklańska-Smiałowska, 1986) ลักษณะนี้ หากเทียบกับมาตรฐาน ASTM G46 สามารถจัดได้ว่าเป็นกรณีที่มี ความหนาแน่นของหลุมค่อนข้างสูง ร่วมกับ ขนาดปากหลุมเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลางถึงค่อนข้างใหญ่ ซึ่งมักสัมพันธ์กับความลึกของหลุมที่เพิ่มขึ้นและมีศักยภาพต่อการทะลุผนังกันดั้ม ในเชิงโครงสร้าง การมีหลุมขนาดกลางและใหญ่จำนวนมากย่อมทำให้ความหนาแน่นที่มีประสิทธิภาพของแผ่นกันดั้มลดลงและเกิดจุดรวมความเค้นเฉพาะที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อความสามารถรับแรงดันของเหลวภายในถังและเพิ่มความเสี่ยงการรั่วซึมแบบ leak-before-break ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของถังในหน้าที่ตรวจพบการรั่วไหลบริเวณกันดั้ม กล่าวคือ ตำแหน่งการรั่วจริงอยู่ในโซนเดียวกับบริเวณที่ตรวจพบหลุมกัดกร่อนหนาแน่นและมีขนาดปานกลางถึงใหญ่ ทำให้มีความเป็นไปได้สูงว่า การทะลุของผนังกันดั้มเกิดจากการเจริญตัวของหลุม pitting เหล่านี้จนทะลุความหนาที่เหลื่ออยู่จนทำให้เกิดการรั่วไหลจากด้านในสู่ภายนอก

ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนจึงไม่ใช่เพียงข้อมูลเชิงสถิติ แต่เป็นหลักฐานสนับสนุนโดยตรงต่อกลไกการวิบัติของถังในหน้าที่ว่าความเสียหายหลักเกิดจาก localized pitting corrosion ที่พัฒนาไปสู่การรั่วซึมก่อนการวิบัติด้านกำลังรับแรงของแผ่นกันดั้ม

2.3 ลักษณะทางกายภาพของหลุม

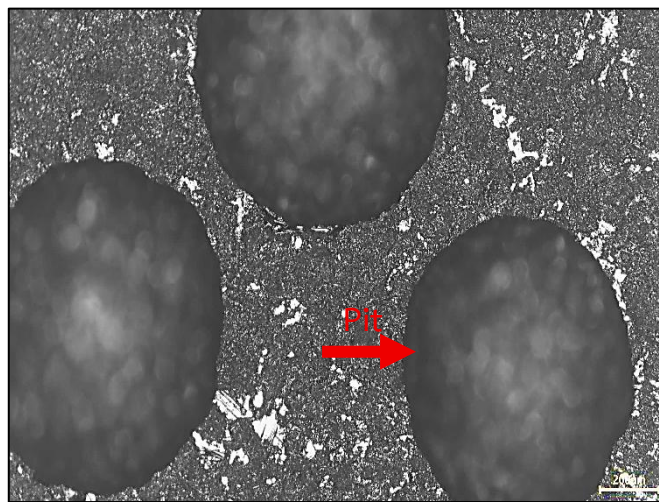
การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าหลุมกัดกร่อนส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างทรงกลมเมื่อมองจากด้านบน (Top view) และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวาง (Side view/Cross-section) พบลักษณะที่บ่งชี้ความเป็นไปได้ของการเติบโตของหลุมทั้งในแนวตั้ง (Vertical propagation) และการกัดเซาะใต้ผิวบางส่วนในแนวนอน (Sideway propagation หรือ undercutting) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมของ pitting corrosion ที่ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนอาจปกคลุมบริเวณปากหลุม ทำให้สภาวะภายในหลุมมีความแตกต่างจากสภาวะภายนอก และอาจเอื้อต่อการเกิดสภาวะกรดหรือความเข้มข้นเฉพาะจุดภายในหลุม



ภาพที่ 5 ภาพ Side View/Cross-section การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา (Morphology) ของหลุม
(รูปซ้าย: Top View ด้านสัมผัสผลิตภัณฑ์ และ รูปขวา: Side View/Cross-section ความหนาเดิม 4 มม.)

3. การตรวจสอบลักษณะหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มด้วยกล้องจุลทรรศน์

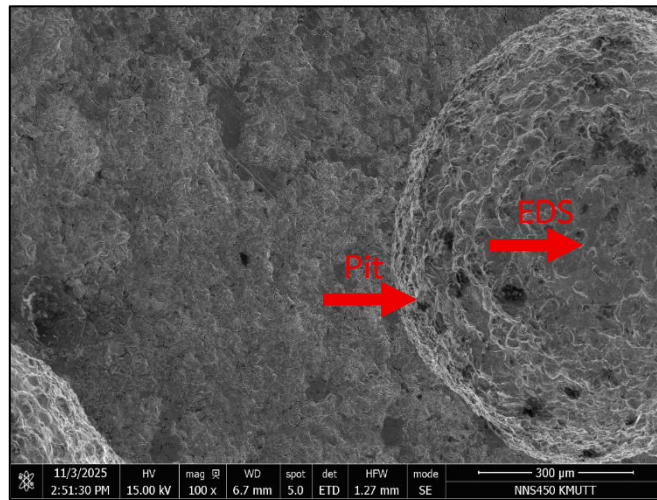
ชิ้นงานตัวอย่างถูกตัดจากบริเวณก้นถังในตำแหน่งที่ตรวจพบการกัดกร่อนรุนแรง จากนั้นทำการเตรียมผิวโดยขัดทำความสะอาดเพื่อลดคราบตะกอนและสิ่งสกปรกออกให้มากที่สุด พร้อมทั้งหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพผิวโลหะดั้งเดิมเกินจำเป็น ก่อนนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) ที่กำลังขยายเหมาะสมสำหรับการสังเกตลักษณะรอยกัดกร่อน ผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบหลุมกัดกร่อนทรงค่อนข้างกลมหลายตำแหน่งกระจายอยู่บนพื้นผิวโลหะอย่างชัดเจน ลักษณะดังกล่าวยืนยันได้อย่างมีนัยสำคัญว่าความเสียหายบริเวณก้นถังเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) มีใช้ร่องรอยการกระแทกเชิงกลหรือข้อบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการผลิตผิวหน้าวัสดุเดิม อีกทั้งผลการสังเกตในระดับจุลภาคยังสอดคล้องกับการประเมินในระดับภาพถ่ายแบบมาโคร (macro) ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่พบหลุมขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่จำนวนมาก ซึ่งมีศักยภาพในการลดความหนาที่มีประสิทธิภาพของแผ่นก้นถัง และเพิ่มความเสี่ยงต่อการรั่วซึมระหว่างการใช้งานในระยะยาวของถังดังกล่าว



ภาพที่ 6 ภาพขยายลักษณะหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถังบนชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

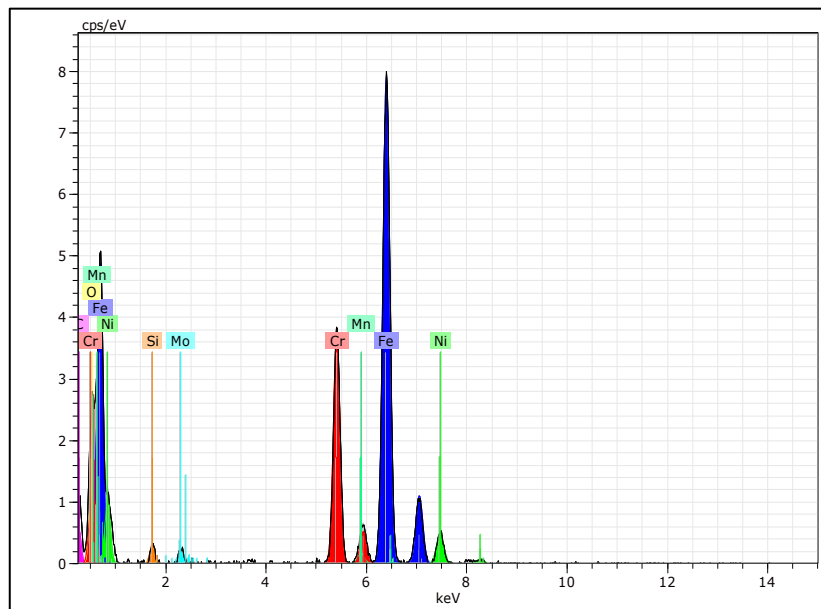
4. การตรวจสอบลักษณะหลุมกัดกร่อนแบบรูเข็ม

วิธีการดำเนินงาน ชิ้นงานตัวอย่างถูกตัดจากบริเวณก้นถังในตำแหน่งที่ตรวจพบการกัดกร่อนแบบรูเข็มรุนแรง จากนั้นทำความสะอาดผิวหน้า โดยระมัดระวังไม่ให้เกิดการเปลี่ยนรูปผิวโลหะเดิมมากเกินไป ก่อนนำไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การถ่ายภาพใช้ค่าศักย์เร่งลำอิเล็กตรอน 15 kV กำลังขยายประมาณ 100× โดยบันทึกภาพพื้นผิวบริเวณหลุมกัดกร่อนและผิวโลหะโดยรอบ เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของหลุม (pit morphology) ดังแสดงในภาพที่ 7 ผลการตรวจสอบด้วย SEM และ EDS แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเสียหายบริเวณก้นถังเป็นการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) เฉพาะที่ (localized corrosion) โดยภาพ SEM แสดงลักษณะปากหลุมที่มีทรงเกือบกลม ขอบหลุมชัดเจน และแยกตัวออกจากพื้นผิวโลหะโดยรอบ ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของ pitting ในเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้ การกระจายตัวของหลุมกัดกร่อนบนผิวในบริเวณก้นถังยังสอดคล้องกับผลการประเมินในระดับมาโครที่พบหลุมขนาดเล็ก ปานกลาง และใหญ่กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก

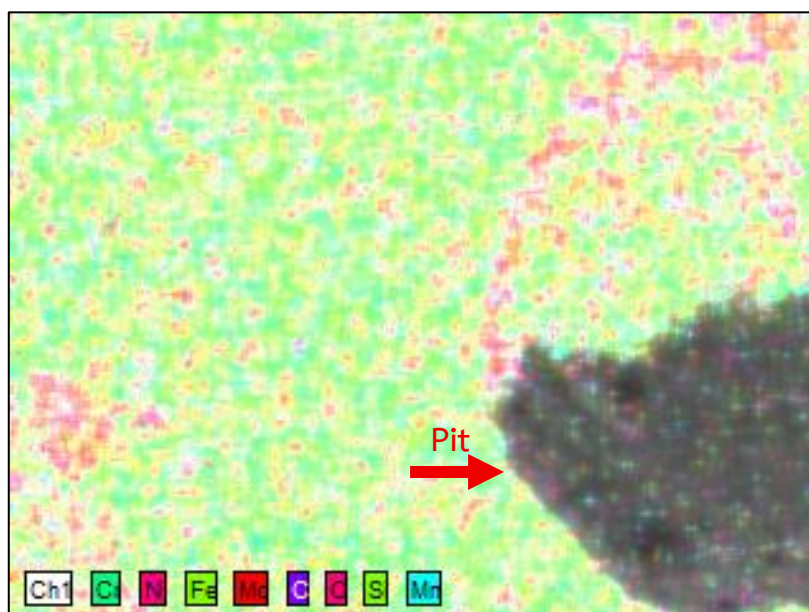


ภาพที่ 7 ภาพ SEM พื้นผิวบริเวณหลุมกัดกร่อนและผิวโลหะโดยรอบ

เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีในบริเวณหลุมและเนื้อโลหะฐานร่วมกัน ได้ทำการวัดด้วย EDS ควบคู่กับ SEM โดยเก็บข้อมูลทั้งในรูปแบบสเปกตรัมในรูปแบบแผนที่การกระจายตัวของธาตุ (elemental mapping) สำหรับธาตุหลัก โครเมียม (Chromium; Cr), นิกเกิล (Nickel; Ni), เหล็ก (Iron; Fe), โมลิบดีนัม (Molybdenum; Mo), คาร์บอน (Carbon; C), ออกซิเจน (Oxygen; O), ซิลิคอน (Silicon; Si) และแมงกานีส (Manganese; Mn) ดังแสดงใน ภาพที่ 8 และภาพที่ 9 ตามลำดับ โดยพบว่า ธาตุ C และ O เป็นคราบหรือผลิตภัณฑ์กัดกร่อน ไม่ใช่องค์ประกอบหลักของวัสดุ



ภาพที่ 8 สเปกตรัม EDS แสดงองค์ประกอบเคมีบริเวณหลุมกัดกร่อนจากรูปที่ 7 และเนื้อโลหะฐานที่กั้นถึง



ภาพที่ 9 แผนที่การกระจายตัวของธาตุ (EDS elemental mapping) บริเวณหลุมกัดกร่อนที่ก้นถัง สำหรับธาตุ Cr, Ni, Fe, Mo, C, O, Si และ Mn

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย EDS ตำแหน่งบริเวณหลุมและเนื้อโลหะฐาน แสดงให้เห็นว่าเนื้อโลหะมีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุเหล็กโครเมียม-นิกเกิล โดยมีองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของพื้นผิวโลหะบริเวณหลุมกัดกร่อนที่ก้นถังจากการวิเคราะห์ด้วย EDS

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [wt.%]
Chromium	K-series	16.18	17.07	14.58	1.52
Nickel	K-series	6.49	6.84	5.18	0.80
Iron	K-series	62.58	66.01	52.51	5.64
Molybdenum	L-series	0.62	0.65	0.30	0.17
Carbon	K-series	4.04	4.26	15.75	2.40
Oxygen	K-series	3.42	3.61	10.03	1.71
Silicon	K-series	0.47	0.50	0.79	0.15
Manganese	K-series	1.01	1.06	0.86	0.21
Total	—	94.81	100.00	100.00	—

หมายเหตุ; C และ O ค่าธาตุเบาเป็นเพียงกึ่งปริมาณเพื่อบ่งชี้สิ่งปนเปื้อนเท่านั้น ไม่ใช่องค์ประกอบผสมหลักของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบริเวณเนื้อโลหะฐาน (Base Metal) ใกล้เคียงกับจุดที่เกิดหลุมกัดกร่อน ด้วยเทคนิค EDS แสดงผลดังปรากฏใน ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ตรวจพบเผยให้เห็นประเด็นที่มีนัยสำคัญ องค์ประกอบหลักของโครเมียม (Cr) อยู่ที่ระดับประมาณ 16.18 – 17.07 wt.% และนิกเกิล (Ni) อยู่ที่ระดับ 6.49 – 6.84 wt.% ในขณะที่ตรวจพบโมลิบดีนัม (Mo) ในระดับต่ำมาก (< 0.7 wt.%) ซึ่งบ่งชี้ว่าวัสดุไม่ใช่เกรด 316

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนองค์ประกอบดังกล่าวกับช่วงองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตามมาตรฐาน ASTM A240/A240M ซึ่งกำหนดช่วงปริมาณนิกเกิลไว้ที่ประมาณ 8.0–10.5 wt.% พบว่าค่าปริมาณนิกเกิลที่ตรวจวัดได้จาก SEM-EDS บริเวณชิ้นงานเกินมีค่าประมาณ 6.49–6.84 wt.% ซึ่งต่ำกว่าช่วงที่คาดหวังสำหรับเกรด 304 (ASTM International, 2022) ผลดังกล่าวบ่งชี้ความเป็นไปได้ว่าวัสดุอาจมีองค์ประกอบแตกต่างจากเกรด 304 มาตรฐาน หรือค่าที่วัดได้อาจได้รับอิทธิพลจากสภาพผิว ผลึกภัณฑ์การกัดกร่อน หรือข้อจำกัดของเทคนิค SEM-EDS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงกึ่งปริมาณ ดังนั้น ผล EDS ในงานนี้จึงควรใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนสมมติฐานด้านวัสดุเท่านั้น และควรยืนยันเพิ่มเติมด้วย OES, PMI หรือ Mill Certificate ก่อนสรุปอย่างเป็นทางการว่าวัสดุไม่เป็นไปตามข้อกำหนด

แม้ผลดังกล่าวยังไม่ใช่การยืนยันเชิงมาตรฐานวัสดุโดยสมบูรณ์ แต่การพบแนวโน้มของปริมาณนิกเกิลที่ต่ำกว่าค่าที่คาดหวังอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถในการคงเสถียรภาพของโครงสร้างอสเทนนิติกและฟิล์มพาสซีฟ ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมในสภาวะกรดและคลอไรด์ (Davis, 2000)

นอกจากนี้ การปรากฏของธาตุคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) ในระดับค่อนข้างสูงบริเวณผิวและภายในหลุมกัดกร่อน บ่งชี้ถึงการก่อตัวของผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนและสิ่งตกค้างบนผิวโลหะ ซึ่งมีแนวโน้มทำให้สภาวะภายในหลุมมีความเป็นกรดสูงขึ้น และเร่งให้เกิดกลไกการกัดกร่อนแบบ self-catalytic ตามที่รายงานไว้ในวรรณกรรมด้าน pitting corrosion ของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติก เมื่อเชื่อมโยงข้อมูลจาก SEM-EDS เข้ากับผลการแจกแจงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมในระดับไมโครที่ก้นถัง จะพบว่าความเสียหายไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะหลุมขนาดเล็ก แต่มีหลุมขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ในสัดส่วนที่สูง ซึ่งส่งผลให้ความหนาที่มีประสิทธิภาพ (effective thickness) ของแผ่นกั้นถึงลดลงและเพิ่มจุดรวมความเค้นเฉพาะที่ ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสามารถรับแรงดันของเหลวและความน่าเชื่อถือเชิงโครงสร้างของถังในระยะยาว

ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับกรอบแนวคิดการประเมินความรุนแรงของ pitting ตาม ASTM G46 ซึ่งพิจารณาร่วมกันทั้งความหนาแน่น ขนาดความกว้างปากหลุม และความลึกเฉลี่ยของหลุม โดยในกรณีนี้สามารถจัดได้ว่าเป็นสภาวะความเสียหายที่มีทั้งความหนาแน่นของจำนวนหลุมในระดับสูงและมีหลุมขนาดใหญ่จำนวนหนึ่งที่มีศักยภาพเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการรั่วแบบ leak-before-break ในภาพรวม ข้อมูลจาก SEM และ EDS มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการวิเคราะห์ว่าความเสียหายของถังมีลักษณะสอดคล้องกับ pitting corrosion เฉพาะที่จากสภาวะแวดล้อมการใช้งาน และช่วยชี้ให้เห็นประเด็นด้านองค์ประกอบวัสดุที่ควรตรวจสอบเพิ่มเติม อย่างไรก็ตาม การระบุชนิดวัสดุฐานและการยืนยันว่าเป็นไปตามหรือไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของเกรด 304 ควรดำเนินการด้วยวิธีการตรวจยืนยันที่เหมาะสมกว่า เช่น OES, PMI หรือการตรวจสอบ Mill Certificate ซึ่งร่วมกันสนับสนุนความจำเป็นในการประเมินอายุการใช้งานที่เหลือ การกำหนดเกณฑ์ซ่อมแซม และการพิจารณาปรับปรุงรายละเอียดการออกแบบและเงื่อนไขการใช้งานของถังเพื่อยกระดับความปลอดภัยและความทนทานในระยะยาวต่อไป

สรุปและอภิปรายผล

จากการตรวจสอบกันถึงด้วยการบูรณาการวิธีการตรวจสอบหลายวิธี ได้แก่ การตรวจพินิจด้วยสายตา การวิเคราะห์ภาพถ่ายไมโคร การประเมินการกระจายตัวของหลุมกัดกร่อน การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของหลุม และการวิเคราะห์ SEM-EDS พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นมีลักษณะสอดคล้องกับการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) เฉพาะที่บริเวณก้นถัง โดยผลการแจกแจงขนาดหลุมพบว่าหลุมขนาดปานกลางถึงขนาดใหญ่ในสัดส่วนสูง ซึ่งสัมพันธ์กับบริเวณที่ตรวจพบการรั่วซึมในถัง

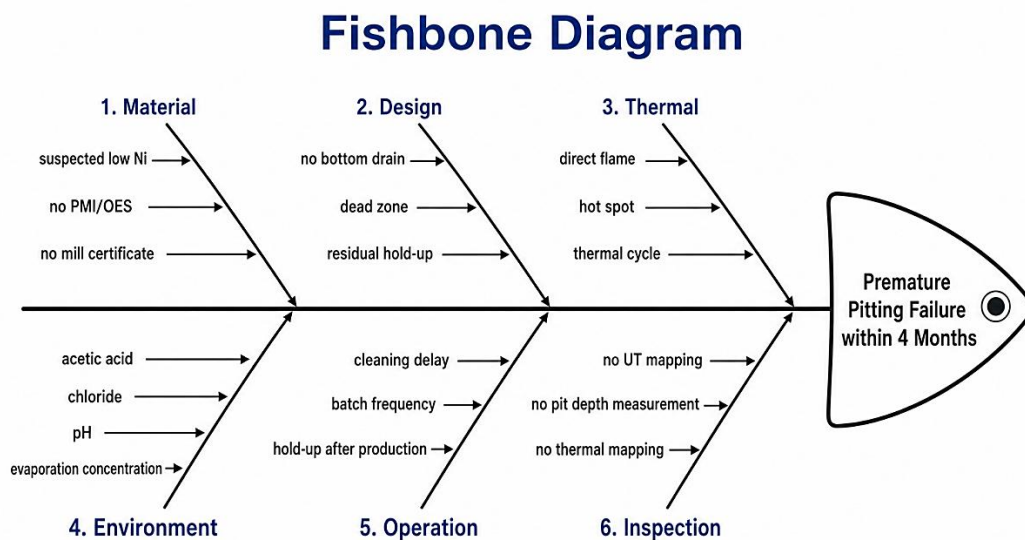
ผล SEM-EDS บ่งชี้ว่าบริเวณที่ตรวจวัดมีปริมาณนิกเกิล (Ni) ประมาณ 6.49–6.84 wt.% ซึ่งต่ำกว่าช่วงองค์ประกอบที่กำหนดสำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ตาม ASTM A240/A240M อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก SEM-EDS เป็นเทคนิคเชิงกึ่งปริมาณและมีความไวต่อสภาพผิว ผลดังกล่าวจึงควรใช้เป็นหลักฐานเบื้องต้นในการตั้งสมมติฐานด้านวัสดุ และควรยืนยันเพิ่มเติมด้วย OES, PMI หรือ Mill Certificate ก่อนสรุปสถานะวัสดุอย่างเป็นทางการ

จากการสังเคราะห์หลักฐานทั้งหมด ความเสียหายที่เกิดขึ้นภายในระยะเวลาประมาณ 4 เดือน มีแนวโน้มเกิดจากกลไกความเสียหายร่วม (Synergistic Failure Mechanism) ระหว่างปัจจัยหลัก 3 ด้าน ได้แก่

1. ปัจจัยด้านวัสดุ (Material factor) ผล SEM-EDS บ่งชี้ความเป็นไปได้ว่าวัสดุอาจมีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าที่คาดการณ์สำหรับการใช้งานในสภาวะกรดและความร้อนสูง
2. ปัจจัยด้านการออกแบบ (Design factor) การไม่มีท่อระบายหรือวาล์วระบายที่กั้นถึงทำให้มีโอกาสเกิดของเหลวตกค้าง (Residual hold-up) บริเวณก้นถังหลังการผลิตและการล้างถัง
3. ปัจจัยด้านความร้อนและสภาพแวดล้อมกระบวนการ (Thermal and environmental factor) การใช้เปลวไฟสัมผัสกันถึงโดยตรงจาก แก๊ส LPG อาจทำให้เกิด hot spot และการระเหยซ้ำของของเหลวตกค้าง ส่งผลให้กรดอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนมีความเข้มข้นเฉพาะจุด และเอื้อต่อการเกิด concentration cell และ pitting corrosion

เพื่อให้การอภิปรายผลมีความเป็นระบบและสอดคล้องกับแนวทางการวิเคราะห์สาเหตุรากของความเสียหาย (Root Cause Analysis) งานศึกษานี้จึงสังเคราะห์หลักฐานจากการตรวจพินิจด้วยสายตา การกระจายตัวของหลุมกัดกร่อน การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของหลุมด้วย OM และ SEM รวมถึงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย SEM-EDS ร่วมกับข้อมูลสภาวะการใช้งานจริงของถัง แล้วจัดกลุ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องในรูปแบบ Fishbone Diagram ดังแสดงในภาพที่ 10

แผนภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเสียหายของถังถึงไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเพียงลำพัง แต่เกิดจากความสัมพันธ์ของหลายปัจจัย ได้แก่ วัสดุ การออกแบบ การใช้งาน สภาพแวดล้อมของกระบวนการ ความร้อน และการตรวจสอบ/ควบคุมคุณภาพ โดยแต่ละปัจจัยมีบทบาทสนับสนุนให้เกิดการสลายตัวของฟิล์มพาสซีฟและการพัฒนาของการกัดกร่อนแบบรูเข็มบริเวณก้นถัง



ภาพที่ 10 Fishbone Diagram แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายแบบ pitting corrosion ของก้นถัง

จาก Fishbone Diagram จะเห็นได้ว่าปัจจัยแต่ละกลุ่มมีความเชื่อมโยงกันเป็นลำดับเหตุและผล กล่าวคือ การไม่มี bottom drain ทำให้เกิด residual hold-up หลังการผลิตและการล้างถัง ขณะที่การให้ความร้อนด้วยเปลวไฟโดยตรงจาก แก๊ส LPG อาจทำให้ของเหลวตกค้างบริเวณก้นถังได้รับความร้อนซ้ำจนเกิดการระเหยและเพิ่มความเข้มข้นเฉพาะจุดของกรดหรือสิ่งเจือปน เมื่อรวมกับความเป็นไปได้ของวัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำกว่าที่คาดการณ์ จึงทำให้สภาวะบริเวณก้นถังเหมาะสมต่อการเริ่มต้นและการเติบโตของ pitting corrosion ได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ข้อจำกัดของข้อมูล

งานศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเชิงวิเคราะห์ความเสียหายจากชิ้นงานจริง โดยใช้หลักฐานจากการตรวจพินิจ ภาพถ่ายมาโคร การวิเคราะห์ขนาดหลุม การตรวจ OM และ SEM-EDS เป็นหลัก อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีข้อมูลยืนยันเพิ่มเติมบางส่วน เช่น OES/PMI, UT thickness mapping, pit depth measurement, thermal mapping, flame temperature, skin temperature, chloride concentration, pH และ comparative experiment ดังนั้นข้อสรุปด้าน Root Cause จึงตีความเป็นสมมติฐานเชิงวิศวกรรมที่สนับสนุนด้วยหลักฐานที่มีอยู่

ผลการติดตามหลังการปรับปรุงเชิงวิศวกรรม

ภายหลังจากการวิเคราะห์ความเสียหายและจัดทำข้อเสนอแนะเชิงวิศวกรรม ผู้วิจัยและผู้ประกอบการได้ดำเนินการปรับปรุงในส่วนที่สามารถดำเนินการได้จริงภายใต้ข้อจำกัดของโรงงาน SME โดยมีการเปลี่ยนวัสดุบริเวณกันถังที่สัมผัสผลิตภัณฑ์เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่มีกรดอินทรีย์และความเสี่ยงจากสิ่งเจือปนหรือคลอไรด์ อย่างไรก็ตาม ระบบให้ความร้อนยังคงเป็นระบบเปลวไฟแก๊ส LPG สัมผัสกันถังโดยตรงเนื่องจากข้อจำกัดด้านพื้นที่ งบประมาณ และความเหมาะสมของกระบวนการผลิตในโรงงาน SME

จากการติดตามผลภายหลังการปรับปรุงเป็นระยะเวลาประมาณ 1 ปี พบว่ายังไม่ปรากฏปัญหาการรั่วซึมหรือความเสียหายซ้ำในลักษณะเดียวกับกรณีเดิม ข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนในเชิงปฏิบัติว่า การปรับปรุงเกรดวัสดุเป็น 316L สามารถช่วยลดความเสี่ยงของการกัดกร่อนแบบรูเข็มในสภาวะการใช้งานจริงได้ แม้ระบบให้ความร้อนยังไม่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นระบบให้ความร้อนทางอ้อม อย่างไรก็ตาม ผลการติดตามนี้ควรตีความเป็นข้อมูลสนับสนุนจากภาคสนาม ไม่ใช่การยืนยันเชิงทดลองอย่างสมบูรณ์

ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนระบบให้ความร้อน ยกเลิกการใช้เปลวไฟสัมผัสกันถังโดยตรง (Direct-Fired) และเปลี่ยนมาใช้ ระบบให้ความร้อนทางอ้อม (Indirect Heating) เช่น Water Bath หรือ Steam Jacket เพื่อลดโอกาสเกิดจุดร้อนสะสม (Hot Spot) ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยเร่งที่อาจส่งผลต่อความเสียหายบริเวณกันถัง
2. พิจารณาใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ในกรณีที่มีคลอไรด์/กรดอินทรีย์สะสม และกำหนดให้มีการตรวจสอบใบรับรองคุณภาพ (Mill Certificate) หรือตรวจสอบส่วนผสมธาตุ (PMI) ก่อนรับมอบ เพื่อป้องกันวัสดุด้วยคุณภาพ
3. ปรับปรุงการออกแบบเพื่อการระบาย ออกแบบกันถังให้มีความลาดเอียงและติดตั้ง วาล์วระบายกันถัง (Bottom Drain) เพื่อขจัดจุดอับของเหลวตกค้าง (Dead Zone) ป้องกันการสะสมความเข้มข้นของกรดและเกลือ
4. มาตรการบำรุงรักษา ปรับปรุงระเบียบการทำความสะอาดให้ล้างถังทันทีหลังใช้งาน และกำหนดแผนตรวจสอบสภาพความหนาถังตามวาระ เพื่อประเมินความเสี่ยงก่อนเกิดการรั่วไหล

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณ บริษัท เออีซี อินดัสเทรียล เซอร์วิส จำกัด ผู้บริหาร และทีมวิศวกร ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ ทรัพยากร และข้อมูลภาคสนามที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนการอำนวยความสะดวกด้านเทคนิคที่ช่วยให้การศึกษาสามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น นอกจากนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ Welding Evaluation and Learning Laboratory (WELLab) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนด้านการตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมโลหการ และขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้การคำแนะนำและการสนับสนุนตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ASM International. (2002). *ASM handbook, Volume 11: Failure analysis and prevention*. Materials Park, OH: ASM International.
- Davis, J. R. (Ed.). (2006). *Corrosion of weldments*. Materials Park, OH: ASM International.

- ASTM International. (2017). *ASTM E3-11(2017): Standard guide for preparation of metallographic specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM G46-21: Standard guide for examination and evaluation of pitting corrosion*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM A240/A240M-22: Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- British Stainless Steel Association. (n.d.). *Selection of stainless steels for handling acetic acid (CH₃COOH)*.
- Davis, J. R. (2000). *Nickel, cobalt, and their alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
- Fontana, M. G. (1986). *Corrosion engineering* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Frankel, G. S. (1998). Pitting corrosion of metals. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(6), 2186–2198.
- Lai, J. K. L., Lo, K. H., & Shek, C. H. (Eds.). (2012). *Stainless steels: An introduction and their recent developments*. Bentham Science Publishers.
- Ministry of Public Health. (1985). *Notification of the Ministry of Public Health No. 92 B.E. 2528 Re: Prescription of quality or standard for containers, use of containers and prohibition of use of things as containers for food packaging*. Bangkok, Thailand.
- Sedriks, A. J. (1996). *Corrosion of stainless steels* (2nd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Szklarska-Smialowska, Z. (1986). *Pitting corrosion of metals*. Houston, TX: NACE International.
- Zadi, N., & Shaaban, A. (2012). Corrosion of stainless steel during acetate production. *Journal of Applied Sciences*, 12(15), 1587–1591.

Received: Apr 20, 2025

Revised: Jun 28, 2026

Accepted: Jun 29, 2026

การพัฒนาระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

DEVELOPMENT OF A FACE DETECTION SYSTEM FOR SUSPECT ALERT VIA CLOUD COMPUTING USING INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

จิรวินญ์ ดีเจริญชิตพงศ์¹ พลวัฒน์ ต่อดระกุล² โกเมศ ศุภักธัญญาภิ³ดุสิตา ปานสุวรรณ⁴ ลัดดา เทียนงาม⁵^{1,2,3,4,5} คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล, มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพJirawin Deecharoenchitpong¹, Ponlawat Tortrakul², Komes Supakthanyakit³,Dusita Pansuwan⁴, Ladda Tianngam⁵^{1,2,3,4,5} Faculty of Information Technology and Digital Innovation, North Bangkok University

Corresponding author: * ponlawat.to@northbkk.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มีวัตถุประสงค์ ดังนี้ 1) เพื่อพัฒนาระบบแจ้งเตือนผู้ต้องสงสัย 2) เพื่อพัฒนาระบบจัดเก็บบันทึกข้อมูลบุคคลต้องสงสัยไว้บนระบบ Cloud และ 3) เพื่อให้ระบบส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังเจ้าของบ้านผ่านระบบ Line Notify หากตรวจพบบุคคลต้องสงสัย สำหรับการพัฒนาระบบนี้ มีการใช้อุปกรณ์ Raspberry Pi 3 Model B+ มาใช้สำหรับการประมวลผล รวมทั้งควบคุมระบบ และใช้กล้องเว็บแคม Full HD Auto Focus Webcam A881 สำหรับถ่ายภาพบุคคลที่ต้องสงสัย ในการทำงานของระบบตรวจจับใบหน้า ระบบจะทำการตรวจจับใบหน้าของบุคคลที่เข้ามาในขอบเขตพื้นที่การทำงานของระบบ และส่งภาพใบหน้าบุคคลไปยัง Raspberry Pi เพื่อประมวลผลภาพเพื่อใช้สำหรับหาบุคคลที่ต้องสงสัย สำหรับภาษาที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบนี้ได้ใช้ภาษา Python และใช้ Thonny Python IDE เป็นเครื่องมือสำหรับการพัฒนาและเขียนชุดคำสั่งเพื่อใช้สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ

ในการประเมินประสิทธิภาพได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลผ่านแบบสอบถามและแบบประเมิน โดยมีกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วย ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน และผู้ใช้งานทั่วไป จำนวน 50 คน ที่อาศัยอยู่ในหมู่บ้านในชุมชนเขตสายไหม กรุงเทพมหานคร ซึ่งได้มาโดยวิธีการสุ่มอย่างง่าย หลังจากที่ได้พัฒนาระบบขึ้นมาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ได้มีการประเมินประสิทธิภาพของต้นแบบ พบว่าผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของโมเดลมีความแม่นยำสูง โดยมีค่าความแม่นยำโดยรวม (Accuracy) เท่ากับ 98.74%, ค่าความแม่นยำในการทำนายผล (Precision) เท่ากับ 98.61% และค่าความครอบคลุมในการตรวจจับ (Recall) เท่ากับ 98.52% นอกจากนี้ ผลจากการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบจากความคิดเห็นของกลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ได้ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.61 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.58 ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก และสรุปผลทดสอบหาความพึงพอใจของกลุ่มผู้ใช้งาน ได้ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) เท่ากับ 4.57 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 0.60 ซึ่งอยู่ในระดับดีมากเช่นเดียวกัน สรุปผลการหาประสิทธิภาพของต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ได้ว่าระบบมีความแม่นยำสูง มีการตอบสนองต่อการใช้งานจริง และเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการพัฒนาระบบอย่างสมบูรณ์

คำสำคัญ : อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, ไมโครคอนโทรลเลอร์, คลาวด์คอมพิวติ้ง

Abstract

This research presents the Development of a Face Detection System for Suspect Alert via Cloud Computing Using Internet of Things Technology (IoT). The objectives of this study were: (1) to develop a suspicious person notification system, (2) to develop a cloud-based storage system for recording suspicious person information,

and (3) to enable the system to send real-time notification messages to homeowners via Line Notify whenever a suspicious person is detected.

The proposed system was implemented using a Raspberry Pi 3 Model B+ as the central processing and control unit, together with a Full HD Auto Focus Webcam A881 for image acquisition. During system operation, facial images of individuals entering the monitoring area are captured and transmitted to the Raspberry Pi for image processing and facial recognition. The system was developed in Python, using the Thonny Python IDE as the development environment.

The system performance was evaluated through questionnaires and performance assessments involving three experts and fifty general users residing in Sai Mai District, Bangkok, selected through simple random sampling. Experimental results demonstrated that the developed facial recognition model achieved high predictive performance, with an overall accuracy of 98.74%, a precision of 98.61%, and a recall of 98.52%. Furthermore, the experts' evaluation indicated a mean score of 4.61 (S.D. = 0.58), representing a very high level of system performance. Similarly, the user satisfaction assessment yielded a mean score of 4.57 (S.D. = 0.60), also corresponding to a very high level of satisfaction. The findings indicate that the proposed system provides highly accurate facial recognition, effectively supports real-time monitoring and notification, and successfully fulfills all research objectives.

Keywords : Internet of Things, Microcontroller, Cloud Computing

บทนำ

การรักษาความปลอดภัยในปัจจุบันนิยมใช้กล้องวิดีโอวงจรปิด เพื่อใช้สำหรับการบันทึกภาพเหตุการณ์ต่าง ๆ ในบริเวณหน้าบ้าน อีกทั้งภาพที่บันทึกไว้ยังสามารถใช้เป็นหลักฐานในติดตามตัวผู้ร้ายที่กระทำความผิด ปัจจุบันกล้องวงจรปิดยังมีการพัฒนาซอฟต์แวร์บนโทรศัพท์สมาร์ทโฟนเพื่อใช้สำหรับติดตามและดูภาพเหตุการณ์ย้อนหลังได้ บางครั้งหากมีความผิดปกติเกิดขึ้น เช่น มีบุคคลที่ไม่ใช่ผู้ต้องสงสัยเดินผ่านบริเวณที่ได้ติดตั้งกล้องวงจรปิดไว้หน้าบ้าน ทำให้มีการแจ้งเตือนส่งไปยังโทรศัพท์สมาร์ทโฟน จึงทำให้เกิดปัญหาการแจ้งเตือนที่ผิดพลาด เนื่องจากบุคคลที่เดินผ่านบริเวณกล้องวงจรปิดอาจจะเป็นเจ้าของบ้าน หรือผู้ที่พักอาศัยอยู่ในบ้าน ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นได้ หากมีการเปิดระบบให้แจ้งเตือนผ่านทางสมาร์ทโฟนไว้ อาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการตรวจพบการเคลื่อนไหวไม่ว่าจะเป็นสัตว์เลี้ยงหรือคนเดินผ่านก็ตาม เมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติเกิดขึ้นในบริเวณบ้าน เจ้าของบ้านจะไม่สามารถรู้ได้ว่าเกิดจากอะไร เช่น ขงมีค่าสูญหาย หรือเกิดอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิดขึ้น โดยปกติทั่วไปแล้วสำหรับบ้านที่มีกล้องวงจรปิดตั้งไว้แล้วจะต้องมาทำการเปิดภาพวิดีโอที่กล้องวงจรปิดบันทึกภาพไว้ย้อนหลัง ซึ่งจะทำให้เสียเวลา และอาจจะเกิดข้อมูลสูญหายทำให้ยากต่อการติดตาม ปัจจุบันความปลอดภัยของอาคารที่อยู่อาศัยมีความสำคัญอย่างมาก เพราะมีปัญหาเหตุการณ์ต่าง ๆ เกิดขึ้นมากมายในสังคม จากสถิติของสำนักงานตำรวจแห่งชาติ รับแจ้งรับแจ้งเหตุอาญาความผิดเกี่ยวกับทรัพย์ ปี พ.ศ. 2564 มีจำนวนคดีที่รับแจ้ง 52,331 คดี และเมื่อเปรียบเทียบกับปี 2565 มีจำนวนคดี 57,226 เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.35 จบได้แล้ว 11,142 คดี ยังจับไม่ได้ 2,905 คดี (สำนักงานตำรวจแห่งชาติ, 2564)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและสามารถแจ้งเตือนผู้ต้องสงสัยผ่านทางระบบ Line Notify เพื่อใช้ในการตรวจสอบติดตามและเก็บข้อมูลของบุคคลต้องสงสัย รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ในการแจ้งเตือนในงานด้านอื่น ๆ ได้ต่อไป

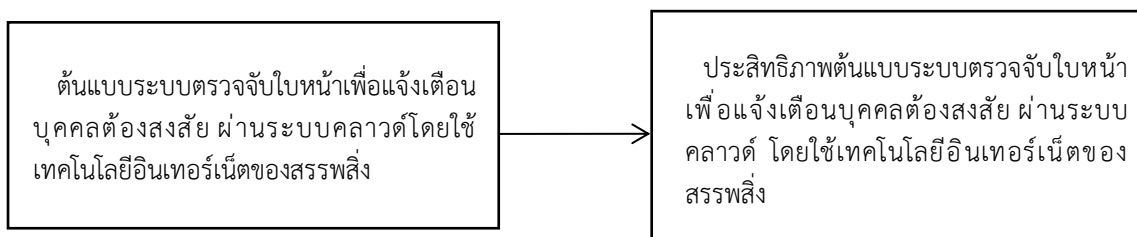
วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
2. เพื่อพัฒนาระบบให้สามารถจัดเก็บข้อมูลบุคคลต้องสงสัยบนระบบ Cloud
3. เพื่อให้สามารถส่งข้อความแจ้งเตือนไปยังเจ้าของบ้านผ่านทาง Line Notify ได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบสามารถตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง
2. สามารถตรวจสอบและค้นหาข้อมูลบุคคลต้องสงสัยบนระบบ Cloud
3. เจ้าของบ้านได้รับการแจ้งเตือนในกรณีมีบุคคลต้องสงสัยผ่านทางระบบ Line Notify

กรอบแนวคิด



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิด

วิธีดำเนินการวิจัย

1. **กำหนดปัญหา (Problem Definition)** ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าหาข้อมูลต่าง ๆ ตามเว็บไซต์ และการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งกล้องวงจรปิด ระบบรักษาความปลอดภัยในปัจจุบัน รวมทั้งศึกษาค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและ การใช้งานของระบบรักษาความปลอดภัย ศึกษาประโยชน์ของระบบกล้องวงจรปิดการวัดประสิทธิภาพของระบบแจ้งเตือน การนำภาพจากกล้องวงจรปิดไปเปิดใช้งานภายหลัง ปัญหาอุปกรณ์และข้อบกพร่องในการบันทึกภาพ การตรวจสอบภาพ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นย้อนหลัง ปัญหาแจ้งเตือนในเวลาที่เกิดเหตุการณ์ โดยได้มีการเก็บรวบรวมปัญหาและข้อมูลเพื่อนำไป วิเคราะห์ต่อไป

2. **การวิเคราะห์ (Analysis)** จากปัญหาที่ได้กำหนดขึ้นหลังจากการที่ได้ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้ เก็บรวบรวมทั้งหมดและได้นำมาวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมด ควรจะต้องมีการพัฒนา ต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้า เพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย และบันทึกภาพผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต ของสรรพสิ่ง มาใช้เพื่อสนับสนุนด้านความปลอดภัย และมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูล เข้ามาเสริม ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบเพื่อใช้เป็นพยานหลักฐานในการดำเนินคดีตามกระบวนการยุติธรรม

3. **การออกแบบ (Design)** ผู้วิจัยได้มีการเขียน Use Case Diagram และ Class Diagram และมีการใช้โปรแกรม เขียนโปรแกรมคำสั่งโดยใช้ภาษา Python

4. **การพัฒนา (Development)** ผู้วิจัยได้พัฒนาต้นแบบระบบโดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานกล้องวงจร ปิดให้มากขึ้น เพื่อพัฒนาระบบเพื่อให้กล้องวงจรปิดสามารถทำงานตามที่ได้ทำการออกแบบ โดยได้มีการใช้ Raspberry Pi และ Line Application ให้สามารถทำงานร่วมกับระบบที่ได้พัฒนาและออกให้สามารถทำงานร่วมกันได้ พัฒนาให้มีระบบการ แจ้งเตือนไปยังผู้ใช้ได้ กรณีที่เกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดขึ้น ทำให้ผู้ใช้สามารถนำข้อมูลที่ถูกจัดเก็บบนระบบคลาวด์นำไปใช้เป็น หลักฐานประกอบในการแจ้งความเพื่อดำเนินคดีต่อไป

5. การทดสอบ (Testing) หลังจากการพัฒนา การทดสอบการทำงานของระบบว่าสามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยจะทำการทดสอบระบบเพื่อให้แน่ใจว่าระบบที่ได้พัฒนามานั้น มีความถูกต้อง และมีความสมบูรณ์

6. การติดตั้ง (Implementation) มีการนำต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อนำไปติดตั้งและนำไปใช้ในบ้าน โดยมีการจำลองเหตุการณ์และสมมติเหตุการณ์ขึ้นมา เพื่อทดสอบระบบว่าสามารถใช้งานได้จริงตามที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นมา

7. การบำรุงรักษา (Maintenance) การบำรุงรักษาโดยการปรับปรุงให้สามารถเข้ากับเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงในอนาคต เช่น การ Update เวอร์ชันระบบปฏิบัติการ Raspbian ให้เป็นปัจจุบัน

8. จัดทำคู่มือการใช้งาน (User Manual) จัดทำคู่มือการใช้งานบนระบบ Raspbian เพื่อจะได้ใช้งานระบบอย่างมีประสิทธิภาพ สมบูรณ์เพื่อให้มีความง่ายต่อการใช้งาน และใช้สำหรับเพื่อแก้ปัญหาเบื้องต้น

การพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและบันทึกภาพโดยใช้เทคโนโลยีไอโอทีได้มีการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องรวมทั้งเทคโนโลยีการสื่อสารและอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

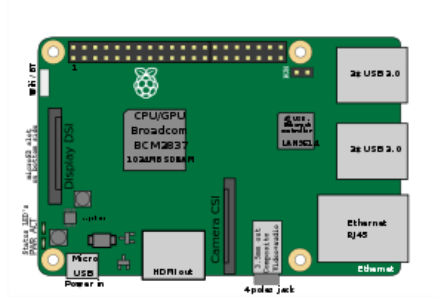
ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ มีการรวมฟังก์ชันขององค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมและการประมวลผลในระบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าทั่วไป ระบบควบคุมการทำงานของรถยนต์ (ทันพงษ์ ภูรักษา :

โครงสร้างโดยทั่วไป ของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็นส่วนใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

- ก) หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU : Central Processing Unit)
- ข) หน่วยความจำ (Memory)
- ค) ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port)
- ง) ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS)
- จ) วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

2. ราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi)

เป็นชุดของขนาดเล็กคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวที่คณะกรรมการการพัฒนาในสหราชอาณาจักรโดย Pi มูลนิธิราสเบอร์รี่ร่วมกับ Broadcom ในช่วงต้นของโครงการ Raspberry Pi มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการส่งเสริมการเรียนรู้การสอนขั้นพื้นฐานวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ในโรงเรียนและในประเทศกำลังพัฒนา ต่อมาโมเดลราสเบอร์รี่พายมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ยังได้รับความนิยมในการใช้เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนตัวหรือโน้ตบุ๊กที่เกี่ยวข้องกับอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ระบบควบคุมอุปกรณ์ หรือการสร้างโปรเจกต์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมมิ่งต่าง ๆ ราสเบอร์รี่พาย ใช้ Raspbian เป็นระบบปฏิบัติการที่พัฒนามาบนพื้นฐานของระบบปฏิบัติการ Linux และมีการปรับแต่งให้เหมาะสมกับโปรเจกต์ที่ใช้ Raspberry Pi โดยเฉพาะ Raspbian มีอินเตอร์เฟซกราฟิกที่ใช้งานง่ายและเป็นมิตรต่อผู้ใช้ มีโปรแกรมแบบกราฟิกและคำสั่งเป็นมาตรฐานของ Linux ทำให้เหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาการใช้ระบบปฏิบัติการ Linux หรือทำโปรเจกต์ที่เกี่ยวข้องกับการโปรแกรมมิ่งและอิเล็กทรอนิกส์ด้วย Raspberry Pi. (วิกิพีเดีย, 2563)



ภาพที่ 2 Raspberry Pi 3 (วิกิพีเดีย, 2563)

3. กล้องวงจรปิด Closed Circuit Television

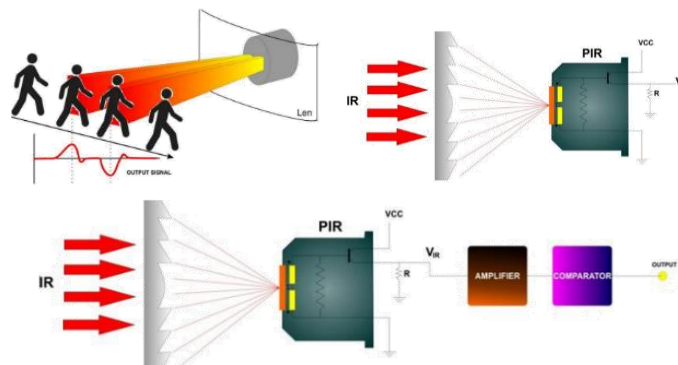
CCTV เป็นคำย่อของ “Closed Circuit Television” มีความหมายตรงตัวว่า โทรทัศน์วงจรปิด หรือเรียกระบบกล้องวงจรปิด ในการทำงานนั้นจะมีการใช้กล้องถ่ายวิดีโอแบบที่มีหลายรูปทรงติดตั้งไว้ตามจุดต่าง ๆ และส่งสัญญาณไปยังสถานที่ส่วนตัวที่ไม่เหมือนการออกอากาศทีวี เช่น ส่งภาพไปยังห้องทำงานของเจ้าหน้าที่รักษาความปลอดภัย หรือส่งภาพไปยังห้องนอนหรือห้องทำงานของเจ้าของบ้านหรือเจ้าของกิจการ (Agi, 2561)



ภาพที่ 3 กล้อง Logitech HD Webcam B525 (bestreview, 2564)

4. เซนเซอร์ (Sensor)

เซนเซอร์ (Sensor) คือ ชุดอุปกรณ์ วงจร หรือระบบที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ หรือลักษณะของสิ่งต่าง ๆ โดยรอบวัตถุเป้าหมาย และนำข้อมูลจำนวนมาก (Big Data) ที่ได้จากการตรวจวัด เข้าสู่กระบวนการแจกแจงและวิเคราะห์พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลง ประมวลผลเป็นองค์ความรู้และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ให้มนุษย์สามารถนำองค์ความรู้มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลดขั้นตอนของกระบวนการทำงาน (ชัยนรินทร์ อินทร์แก้ว และคณะ, 2560)



ภาพที่ 4 หลักการทำงานของ PIR (ชัยนรินทร์ อินทร์แก้ว และคณะ, 2560)

5. อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT)

การที่อุปกรณ์ต่าง ๆ สิ่งต่าง ๆ ได้ถูกเชื่อมโยงทุกอย่างสู่โลกอินเทอร์เน็ต ทำให้มนุษย์สามารถสั่งการควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เช่น การสั่งการเปิด-ปิดไฟฟ้าภายในบ้านด้วยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุม เช่น มือถือ ผ่านทางอินเทอร์เน็ต หรือเครื่องมือสื่อสารต่าง ๆ เครื่องมือทางการแพทย์ อาคาร บ้านเรือน เครื่องใช้ใน ชีวิตประจำวันต่าง ๆ ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตการทำงานของ IoT นั้นต้องเรียกว่า เป็น Ecosystem เลย์ทีเดียว เพราะหากขาดส่วนใดส่วนหนึ่งไปก็จะเกิดความบกพร่องได้ ซึ่งองค์ประกอบของ IoT ปัจจุบัน ประกอบด้วย

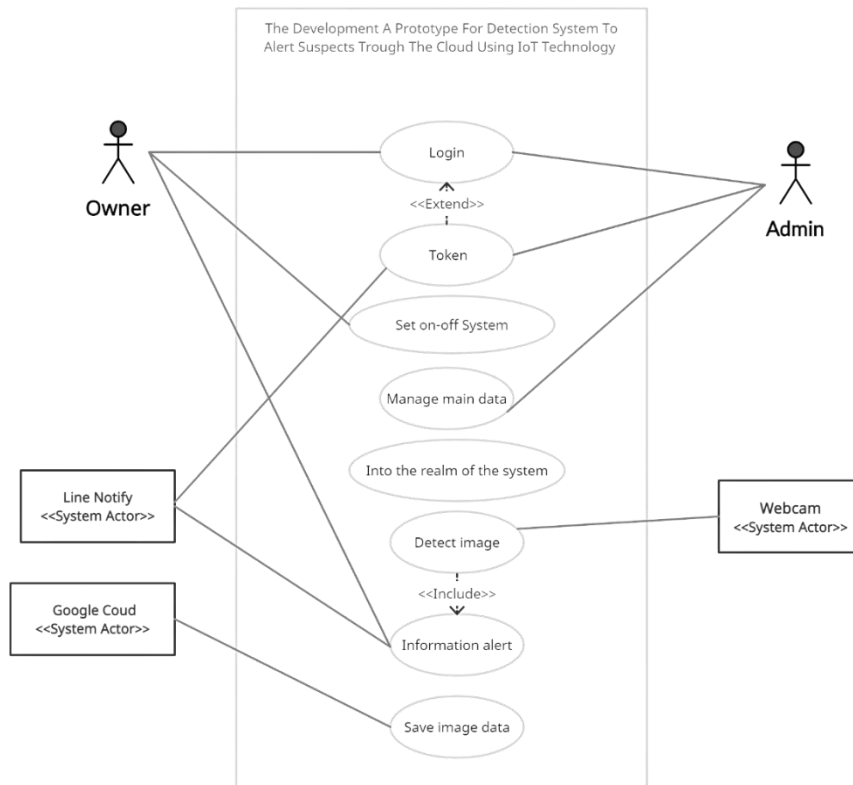
ก) Smart Device อุปกรณ์ที่มีหน้าที่เฉพาะ เป็นจุดเริ่มต้นที่ตอบโจทย์การใช้ IoT โดยจำเป็นต้องมีส่วนประกอบอย่าง Microprocessor และ Communication Device ติดตั้งอยู่ภายในเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลข้อมูลที่ Smart Device ส่งมอบไปยังระบบคลาวด์ โดยไม่เพียงแต่ข้อมูลตามหน้าที่เท่านั้น แต่ยังรวมถึงสภาพของอุปกรณ์ด้วย ผู้ใช้จึงไม่ต้องเดินทางมาตรวจสอบอุปกรณ์ด้วยตัวเองเป็นประจำ

ข) Cloud Computing หรือ Wireless Network สื่อกลางรับส่งข้อมูลจาก Smart Device ไปยังผู้ใช้ ซึ่งมีทั้งการส่งข้อมูลผ่านระบบ Wireless ไปยังผู้ใช้ เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลและส่งไปยังเครื่อง Server ซึ่งข้อมูลจำเป็นจะต้องจัดเก็บในรูปแบบโครงสร้างที่ดีเพื่อส่งผ่านไปยังระบบ Cloud Computer ที่สามารถรองรับการใช้งาน Smart Device จำนวนมากกว่า และระยะทางไกลกว่า รวมถึงอาจมีการติดตั้งระบบแปลงการแสดงผลข้อมูลให้เหมาะกับผู้ใช้ในส่วนนี้ได้ (Pranshu Dhingra, 2019)



ภาพที่ 5 Internet Of Thing (aisdc, 2562)

ในการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและบันทึกภาพโดยใช้เทคโนโลยีคลาวด์ ได้มีการวิเคราะห์ระบบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ระบบเชิงวัตถุ ได้แก่ Use Case Diagram มีรายละเอียดดังภาพที่ 6

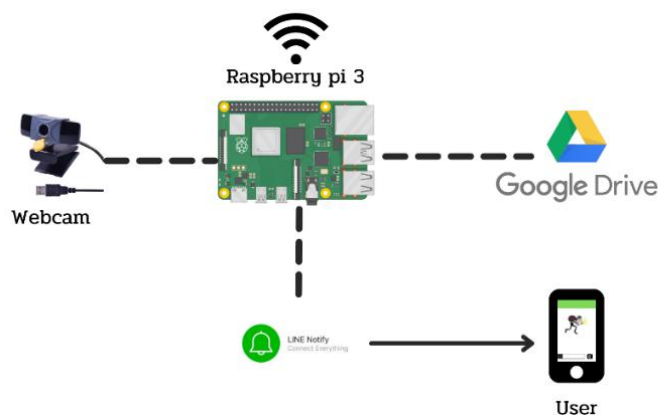


ภาพที่ 6 แสดง Use Case Diagram การพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

จากภาพที่ 6 มี Actor อยู่ภายในระบบ 2 ตัวได้แก่ Owner Admin และ Admin โดย Owner มีความสามารถดังนี้ เข้าสู่ระบบแอปพลิเคชันไลน์ และรับการแจ้งเตือนผ่านทางแอปพลิเคชัน ส่วน Admin มีความสามารถคือเข้าสู่ระบบ จัดการ Token กับแอปพลิเคชัน Line และจัดการข้อมูล ซึ่งจะต้องทำการ Login ก่อนถึงจะร้องขอ Token ได้

ระบบจะประกอบด้วย System Actor อยู่ 3 ตัว ได้แก่ Line Notify, Webcam และ Google Cloud โดย Line Notify มีความสามารถในการแจ้งเตือนไปยัง Owner ส่วน Webcam จะตรวจจับใบหน้าของผู้ต้องสงสัย และ Google Cloud จะใช้สำหรับในการบันทึกข้อมูล

การพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มีรูปแบบแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 7 แสดงแผนภาพการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีไอโอที

การทดสอบความถูกต้องของระบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีไอโอที แบ่งออกเป็นสองส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การหาประสิทธิภาพของระบบ การทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ในการทำงานของระบบได้มีการใช้ OpenCV Haar Cascades ที่เป็นชุดข้อมูลที่บรรจุข้อมูลโมเดลที่ได้ทำการฝึกในการตรวจจับวัตถุ สำหรับการตรวจจับใบหน้า ตา หรือรอยยิ้ม โดยใช้ OpenCV ที่เป็นไฟล์ XML ประกอบด้วยข้อมูล ขนาด และตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจจับที่เกี่ยวกับการฝึกโมเดล โดยทางผู้วิจัยได้นำมาปรับแต่งให้ระบบสามารถตรวจจับวัตถุที่ต้องการ ให้มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำ

ชุดข้อมูลสำหรับใช้ในการสอนและทดสอบ ประกอบด้วย 4 คอลัมน์ จำนวน 5,720 แถว โดยจัดเก็บข้อมูลที่มีการจำนวนใบหน้าที่มีคุณลักษณะจำนวน 200 รายการที่แตกต่างกัน ข้อมูลใบหน้าที่ใช้สำหรับการทดสอบจำนวน 715 ใบหน้า haarcascade_frontalface_default.xml: ตรวจจับใบหน้า โดยใช้ Haar Cascade Classifier เพื่อการตรวจจับวัตถุในภาพ ขั้นตอนและวิธีการทดสอบโมเดลจะประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้:

1. การเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกโมเดล ในการแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดฝึก (Training Set) และชุดทดสอบ (Testing Set) ข้อมูลจะถูกใช้สำหรับการฝึกโมเดล 80% ของข้อมูล เพื่อให้โมเดลมีความแม่นยำ

ข้อมูลที่เหลือ 20% จะถูกใช้สำหรับทดสอบความแม่นยำของโมเดล

2. การเตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกโมเดล สำหรับชุดข้อมูลที่เตรียมไว้สำหรับการฝึกโมเดล โดยใช้เทคนิคใช้วิธี AdaBoost (Adaptive Boosting) ซึ่งเป็นวิธีการเรียนรู้แบบจำลองจำนวนหนึ่งสำหรับการปรับปรุงโมเดลที่ใช้ในการตรวจจับแบบแคสเคด (Cascade) แบบต่อเนื่อง โดยมีการแบ่งข้อมูลออกเป็นดังนี้

3. ภาพฝึกใบหน้า (Face Training Images)

1) เซ็ตของภาพฝึกที่มีใบหน้าที่ถูกป้ายกำกับและมีขนาดที่ถูกปรับให้อยู่ในขนาด 130x100 พิกเซล

2) ภาพฝึกใบหน้านี้นี้จะถูกนำเข้าไปในกระบวนการฝึกของ AdaBoost เพื่อสร้างตัวตรวจที่สามารถจำแนกใบหน้าให้ได้อย่างแม่นยำ

4. ภาพที่ไม่ใช่ใบหน้า (Non-Face Training Images)

1) เซ็ตของภาพที่ไม่ใช่ใบหน้าซึ่งอาจเป็นภาพต่าง ๆ ที่ไม่มีใบหน้า หรืออาจเป็นพื้นที่ที่ไม่ใช่ใบหน้าในภาพที่มีใบหน้า

2) ภาพที่ไม่ใช่ใบหน้านี้นี้จะถูกนำเข้าไปในกระบวนการฝึกของ AdaBoost เพื่อให้ตัวตรวจสามารถจำแนกภาพที่ไม่ใช่ใบหน้าได้อย่างถูกต้อง

โดยในกระบวนการฝึก AdaBoost จะทำการเลือกลักษณะเฉพาะ (Features Selection) และนำเข้าลักษณะเหล่านั้นเข้าในตัวแบบ และจะปรับน้ำหนัก (Weighting) ของตัวอย่างแต่ละตัวเพื่อให้การให้ความสำคัญที่เหมาะสมต่อการฝึกตัวตรวจ ทั้งในกรณีของภาพใบหน้าและภาพที่ไม่ใช่ใบหน้า และจะฝึกตัวตรวจใหม่ โดยใช้ตัวอย่างเหล่านี้ทำซ้ำเพื่อสร้างตัวตรวจที่มีความแม่นยำมากขึ้นในการจำแนกภาพใหม่ และกระบวนการนี้จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ตัวตรวจที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงสุด

ผลการดำเนินงาน

ระบบแจ้งเตือนผู้ต้องสงสัยผ่านทางไลน์ด้วยการพัฒนาระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยระบบจะทำการบันทึกใบหน้าผู้ที่เข้ามาในขอบเขตการทำงานของระบบโดยอัตโนมัติ เมื่อมีผู้ต้องสงสัยเข้ามาในขอบเขตของระบบกล้องเว็บแคม ระบบจะทำการตรวจจับใบหน้าของผู้ต้องสงสัยพร้อมประมวลผลกับชุดข้อมูลการเปรียบเทียบที่มีอยู่ หากตรงกับชุดข้อมูลก็จะส่งการแจ้งเตือนไปยังไลน์ของผู้ใช้ แต่จะไม่มี การบันทึกภาพลงไปในโฟลเดอร์ และในขั้นตอนนี้จะไม่ได้มีการสำรองข้อมูลลงบน Google Drive หากข้อมูลไม่ตรงกับชุดข้อมูลที่มีอยู่ ระบบก็จะทำการส่งการแจ้งเตือนไปยังไลน์ของผู้ใช้ มีการบันทึกภาพลงไปในโฟลเดอร์ จากนั้นก็จะทำการสำรองข้อมูลลงบน Google Drive

1. ทดสอบโมเดล ในการทดสอบโมเดลจะมีการใช้ชุดข้อมูลทดสอบที่เตรียมไว้ เพื่อวัดความแม่นยำและประสิทธิภาพของโมเดล โดยมีการวัดผลลัพธ์ตามเกณฑ์ประเมินที่กำหนด

2. ปรับปรุงและประเมินโมเดล ในการทดสอบโมเดลทางผู้วิจัยได้มีการทดสอบความถูกต้องของโมเดล หากพบว่าประสิทธิภาพของโมเดลไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์และจะปรับแก้ไขโครงสร้างของโมเดลเพิ่มเติม เพื่อทำการทดสอบโมเดลใหม่ เพื่อให้แน่ใจว่าเมื่อมีการปรับปรุงแล้วมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

3. การปรับเพื่อนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมจริง โดยมีการนำระบบที่พัฒนาเสร็จแล้วนำไปติดตั้งเพื่อทำการโมเดลได้ที่พัฒนาและปรับปรุงแล้วแล้ว โดยการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งที่ติดตั้ง บริเวณที่ติดตั้งว่ามีความเหมาะสมและตรวจสอบว่ามีปัญหาอีกอาจเกิดขึ้นได้หลังจากที่ทำการติดตั้งไว้หรือไม่

เมื่อได้ทำการติดตั้งตามขั้นตอนและทดสอบโมเดลทั่วแล้ว ได้มีการปรับแต่งและการทดสอบโมเดลว่าสามารถจำแนกตามลักษณะการตรวจจับใบหน้าได้ถูกต้อง และการแจ้งเตือนว่ามีการส่งข้อมูลถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่เพื่อให้การทำงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลการดำเนินงาน

การวิจัยนี้สรุปได้ว่า การพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์โดยใช้เทคโนโลยี IoT สามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบ ระบบได้ใช้ Raspberry Pi 3 Model B+ ร่วมกับกล้อง Webcam ตรวจจับใบหน้าและประมวลผล หากตรงกับฐานข้อมูลจะส่งการแจ้งเตือนผ่าน Line Notify หากไม่ตรงจะบันทึกภาพและอัปโหลดขึ้น Google Drive เพื่อเก็บหลักฐาน ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน มีค่าเฉลี่ยรวม 4.61 (S.D. 0.58) อยู่ในระดับดีมาก ด้านที่ได้ผลการประเมินสูงสุดได้แก่ ความสามารถในการออกแบบระบบ ความถูกต้องของการประมวลผล ความเหมาะสมของฮาร์ดแวร์ และการนำไปใช้จริง ส่วนผู้ใช้งานทั่วไป 50 คน มีค่าเฉลี่ยรวม 4.57 (S.D. 0.60) อยู่ในระดับดีมาก โดยพึงพอใจด้านความสะดวก ความถูกต้อง และความเหมาะสมของการเก็บและสำรองข้อมูล ผลการทดสอบความถูกต้องของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญพบว่ามีความถูกต้องและความแม่นยำมากกว่า 93% ในทุกหัวข้อ โดยประเด็นเรื่องของการแจ้งเตือนผ่าน Line มีความถูกต้องสูงสุดที่ 98.67%

อภิปรายผล

การพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัยผ่านระบบคลาวด์โดยใช้เทคโนโลยี IoT นี้ จะทำการแจ้งเตือนในทันทีเมื่อมีบุคคลต้องสงสัย ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการตอบสนองและเพิ่มความแม่นยำของการตรวจจับบุคคลต้องสงสัยได้ทันที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Zhang et al., 2025) รวมทั้งการออกแบบที่ใช้อุปกรณ์ Raspberry Pi สำหรับใช้ประมวลผลยังช่วยสนับสนุนแนวทางของการประมวลผลอุปกรณ์ IoT ของเซ็นเซอร์ได้ทันทีจะทำให้ลด Latency ในการส่งข้อมูลและการส่งข้อมูลไปประมวลผลที่ศูนย์กลางซึ่งจะเป็นการช่วยความเร็วอีกทั้งยังเพิ่มความปลอดภัยในระบบ IoT ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Medich, 2021)

จากผลการประเมินของผู้ใช้และผู้เชี่ยวชาญมีผลการประเมินระบบอยู่ในระดับ ดีมาก แสดงถึงประสิทธิภาพใช้งานที่ดีและระบบที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Mazhar et al. 2023) ที่มีการพัฒนาและออกแบบระบบการรักษาความปลอดภัยให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีการจัดเก็บข้อมูลที่เหมาะสม ขณะเดียวกัน ผลทดสอบความถูกต้องของระบบที่สูงกว่า 93% ในทุกหัวข้อ และมีผลการประเมินสูงสุดถึง 98.67% ในประเด็นเรื่องของการแจ้งเตือนผ่าน Line ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chaichana, 2023) ที่มีการนำเทคโนโลยีการประมวลผลภาพกับการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายที่สามารถเพิ่มความแม่นยำและความรวดเร็วในการตอบสนองของระบบเผื่อระวังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยสรุป ระบบที่พัฒนามีความแม่นยำสูง ใช้งานง่าย และสามารถปรับใช้ในสถานการณ์จริงได้หลากหลาย เช่น การเฝ้าระวังพื้นที่สำคัญ การรักษาความปลอดภัยในสถานศึกษา หรือการติดตั้งในหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ IoT ในด้านการรักษาความปลอดภัยสาธารณะ

ข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ควรใช้ Raspberry Pi 4 ขึ้นไป ซึ่งมีความเร็วของการประมวลผล และหน่วยความจำที่มากกว่า จะส่งผลให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่วนของ Webcam ถ้าใช้ Webcam ที่สามารถหมุนกล้องตามผู้บุกรุกที่เข้ามาในขอบเขตของกล้อง ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของภาพที่ออกมาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้พัฒนาที่จะนำงานส่วนนี้ไปต่อยอดต้องคำนึงถึงด้านอุปกรณ์ หรือการออกแบบฮาร์ดแวร์อิเล็กทรอนิกส์ ให้มีความทนทานต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ควรคำนึงถึงต้นทุนในการทำการวิจัยในส่วนนี้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ความช่วยเหลือจากคณาจารย์หลายท่าน ในสาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยนอร์ทกรุงเทพ ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ กับผู้วิจัยทางผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมาจนคณะผู้จัดทำประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ และคณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณทีมวิจัยได้แก่ คุณนครินทร์ ยิ่งยง และคุณศุภกร นุ่มสารพัฒน์ ได้ช่วยเลือกในการเก็บข้อมูลในการวิจัย และทีมติดตั้งและช่วยในการพัฒนาต้นแบบที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนช่วยปรับปรุงและแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเสียสละอย่างดียิ่ง อีกทั้งยังคอยสนับสนุน และส่งเสริมในการวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้กำลังใจกับคณะผู้วิจัยด้วยดีมาตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ และขอกราบขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญที่ได้ให้คำแนะนำสิ่งต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ให้กับคณะผู้วิจัยเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการแก้ไขปรับปรุงแก้ไขจนเกิดความสมบูรณ์ของการพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับใบหน้าเพื่อแจ้งเตือนบุคคลต้องสงสัย ผ่านระบบคลาวด์ โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งได้อย่างสมบูรณ์แบบ

ผู้วิจัยได้พัฒนาต้นแบบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาจนทำให้ผลการดำเนินงานสำเร็จลง เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอมอบความกตัญญูกตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ ที่ให้การช่วยเหลือ สนับสนุน และให้คำแนะนำกับคณะผู้วิจัย ทั้งยังเป็นผู้ที่คอยให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา และให้โอกาสในการศึกษาอันมีค่าให้แก่คณะผู้วิจัย ส่งผลให้การจัดทำวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- agi. (2561, 18 มิถุนายน). กล้องวงจรปิดเพื่อการป้องกันและปราบปรามอาชญากรรมในเมืองพิษณุโลก. สืบค้นจาก https://www.agi.nu.ac.th/nred/Document/isPDF/2561/geo_2561_032_FullPaper.pdf
- bestreview. (2563, 3 สิงหาคม). รีวิวกล้องเว็บแคม Web camera สำหรับ PC ที่ให้ภาพคมชัดที่สุดปี 2021. สืบค้นจาก <https://bestreview.asia/best-webcams-pc>
- Chaichana, K. (2023). *Design and implementation of an IoT-based surveillance system using Raspberry Pi*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3599609.3599638>
- Mazhar, T., Shafique, M., & Khan, I. (2023). Analysis of IoT security challenges and its solutions. *Sensors*, 23(7), 3548. <https://doi.org/10.3390/s23073548>
- Medich, J. (2021, January 25). *Edge computing is about to solve the IoT's biggest problems*. Wired. Retrieved from <https://www.wired.com/story/edge-computing-iot>
- Zhang, H., Zhang, R., & Sun, J. (2025). Developing real-time IoT-based public safety alert and emergency response systems. *Scientific Reports*, 15, 29056. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13465-7>

ชัยนรินทร์ อินทร์แก้ว, และคณะ. (2564, 3 มีนาคม). เซ็นเซอร์. สืบค้นจาก <https://blog.thaieasyelec.com/getting-started-pir-motion-sensor-sensor/>

ทันพงษ์ ภูริรักษ์. (2562, 2 กรกฎาคม). ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น. สืบค้นจาก http://www.sbt.ac.th/new/sites/default/files/TNP_Unit_1.pdf

ราสเบอร์รี่ พาย. (2563, 5 กุมภาพันธ์). ไมโครคอนโทรลเลอร์. สืบค้นจาก <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/>

สำนักงานตำรวจแห่งชาติ. (2564, 8 สิงหาคม). รับแจ้งเหตุความผิดเกี่ยวกับทรัพย์. สืบค้นจาก <https://www.thaipoliceonline.com>

Translated Thai References

agi. (2018, June 18). *Closed-circuit television (CCTV) for crime prevention and suppression in Phitsanulok City*. https://www.agi.nu.ac.th/nred/Document/isPDF/2561/geo_2561_032_FullPaper.pdf

BestReview. (2020, August 3). *Review of the best web cameras for PC with the sharpest image quality in 2021*. <https://bestreview.asia/best-webcams-pc>

Inkaew, C., et al. (2021, March 3). *Sensor*. ThaiEasyElec Blog. <https://blog.thaieasyelec.com/getting-started-pir-motion-sensor-sensor/>

Phurak, T. (2019, July 2). *Basic knowledge of microcontrollers*. http://www.sbtac.th/new/sites/default/files/TNP_Unit_1.pdf

Raspberry Pi. (2020, February 5). *Microcontrollers*. <https://www.raspberrypi.com/documentation/microcontrollers/>

Royal Thai Police. (2021, August 8). *Reporting property-related offenses*. <https://www.thaipoliceonline.com>

Received: Feb 13, 2026

Revised: Jun 28, 2026

Accepted: Jun 29, 2026

ชีววิทยาสังเคราะห์ : ความหมายและการประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

SYNTHETIC BIOLOGY : MEANING AND APPLICATION IN THAILAND

วรพันธ์ บุญชัย

สาขาวิชาชีววิทยาการแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

Woraphan Boonchai

Department of Medical Biology, Faculty of Allied Health Sciences,

Bansomdejchaopraya Rajabhat University

บทคัดย่อ

ชีววิทยาสังเคราะห์เป็นการสร้างวงจรชีวภาพสังเคราะห์บนพลาสมิดซึ่งประกอบด้วย ชิ้นส่วนดีเอ็นเอหรือยีนที่สนใจร่วมกับบริเวณโปรโมเตอร์ บริเวณที่เกี่ยวกับการจับของไรโบโซมแล้วก็นำเข้าสู่เซลล์เจ้าบ้าน กระบวนการชีววิทยาสังเคราะห์ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสิ่งมีชีวิตได้สองประเภทใหญ่ๆได้แก่ การสร้างสิ่งมีชีวิตด้วยการเพิ่มหรือลดจีโนมและการสร้างจุลินทรีย์ที่มีการดัดแปลงวิถีเมตาบอลิก เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ให้กับมนุษย์ โดยในบทความนี้กล่าวถึงความหมายกับการประยุกต์ใช้ชีววิทยาสังเคราะห์ด้านการแพทย์และชีววิทยาสังเคราะห์ในประเทศไทย

คำสำคัญ : ชีววิทยาสังเคราะห์ การโคลนยีน วิศวกรรมเซลล์

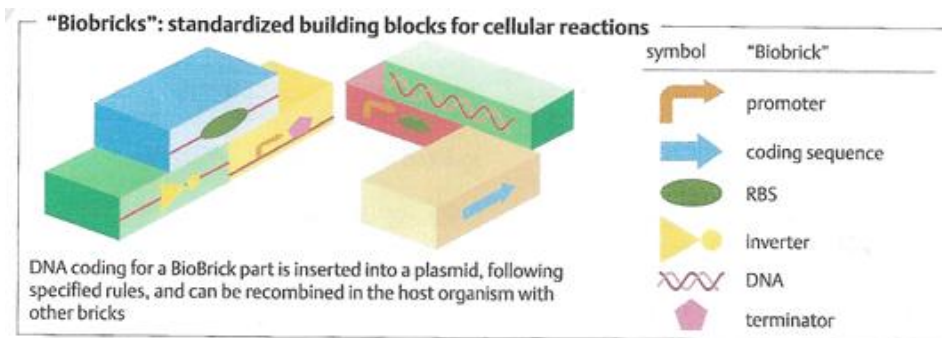
Abstract

Synthetic biology involves constructing synthetic biological circuits on plasmids, which consist of DNA fragments or genes of interest combined with promoter and ribosome-binding regions, and then introducing them into a host cell. Synthetic biology processes can lead to two main types of changes in living organisms: the creation of organisms through genome addition or deletion, and the creation of microorganisms with modified metabolic pathways for various human applications. This article describes : the meaning and applications of synthetic biology in medicine and synthetic biology in Thailand.

Keywords : Synthetic biology, Gene cloning, Cell engineering

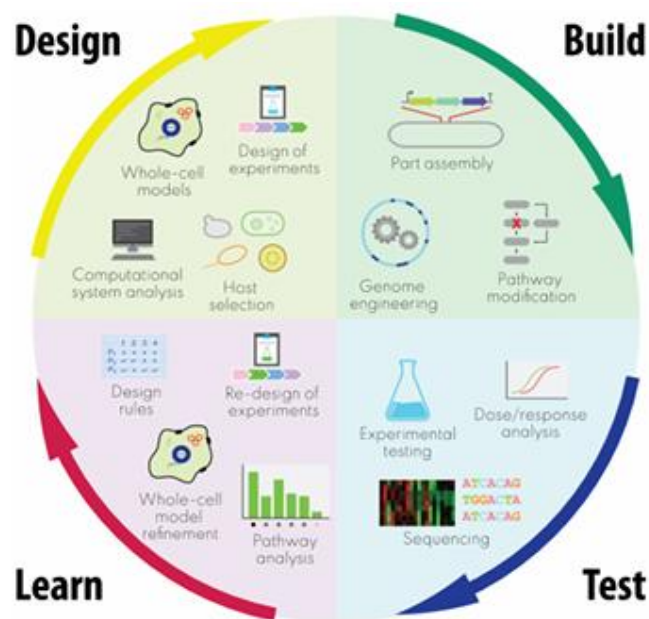
บทนำ

ชีววิทยาสังเคราะห์ หมายถึงการดัดแปลงรหัสพันธุกรรมหรือการออกแบบเอนไซม์ดัดแปลงโดยใช้ชีวสารสนเทศ (bioinformatics) โดยส่วนใหญ่ความคิดรวบยอดเกี่ยวกับชีววิทยาสังเคราะห์คือการสร้างวงจรชีวภาพสังเคราะห์บนพลาสมิด เรียกว่าไบโอบricks (Bibricks) ซึ่งประกอบด้วย ชิ้นส่วนดีเอ็นเอหรือยีนที่สนใจร่วมกับบริเวณโปรโมเตอร์ (promoter) บริเวณที่เกี่ยวกับการจับของไรโบโซม แล้วก็นำเข้าสู่เซลล์เจ้าบ้านส่วนใหญ่จะใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่เป็นแบคทีเรีย เช่น *Escherichia coli* เป็นต้น เครื่องมือสำคัญในกระบวนการชีววิทยาสังเคราะห์ที่จะใช้ในการผลิตสารที่ต้องการก็คือการโคลนยีน (gene cloning) ที่มีความเกี่ยวข้องการสร้างและตัดต่อยีน การถ่ายและการคัดเลือกยีนที่ต้องการ (Karatas, P. and Ayaz, F. ,2025) (ภาพที่ 1)



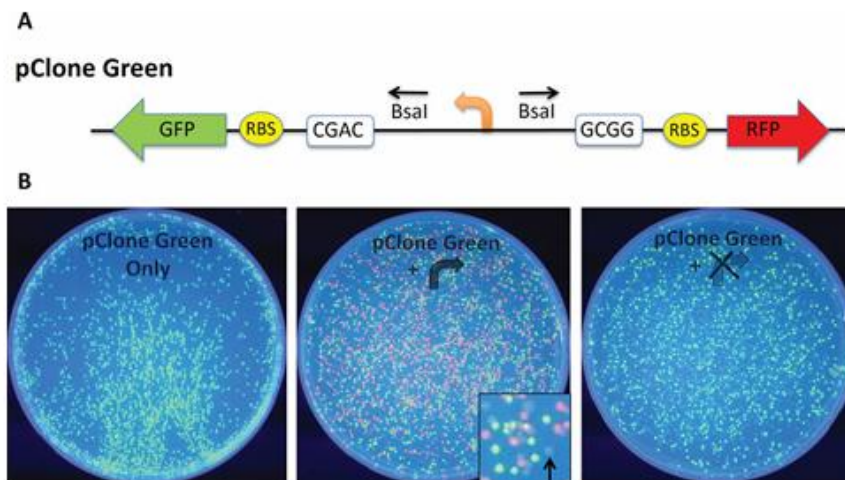
ภาพที่ 1 วงจรชีวภาพสังเคราะห์
ที่มา : Schmid, R.D. and Schmidt-Dannert, C. (2016).

ในการทดลองทางชีววิทยาสังเคราะห์จะมีขั้นตอนที่เป็นหลักสำคัญอยู่ 4 ขั้นตอน ได้แก่ วัฏจักรการออกแบบ การสร้าง การทดสอบและการเรียนรู้ (design-build-test-learn cycle) (รูปที่ 2)



ภาพที่ 2 วัฏจักรการออกแบบ การสร้าง การทดสอบและการเรียนรู้
ที่มา : Marucci, L. และคณะ. (2020).

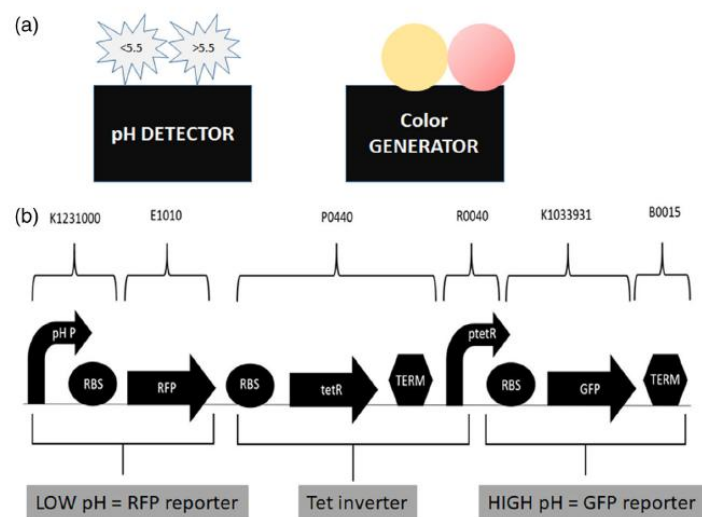
ตัวอย่างในการศึกษาทางด้านชีววิทยาสังเคราะห์ก็คือเวกเตอร์ (vector) ที่ใช้ในกระบวนการโคลนนิ่งมีการออกแบบให้เหมาะสม เช่น เวกเตอร์พีโคลน (pClone) ซึ่งมีองค์ประกอบ บริเวณโปรโมเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการถอดรหัสสามารถดัดแปลงได้และสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากโปรตีนเรืองแสงที่มีสีสรรที่แตกต่างกัน (4kr) (3)



ภาพที่ 3 เวกเตอร์พรีโคลนและการสร้างโปรตีนเรืองแสง

ที่มา : Campbell A.M. และคณะ. (2014).

ตัวอย่างต่อมาทางชีววิทยาสังเคราะห์คือการออกแบบให้แบคทีเรีย *E. coli* เป็นตัวตรวจสอบสภาพความเป็นกรดต่างหรือค่าพีเอช (pH) หรืออาจเรียกว่าเป็นไบโอเซนเซอร์ (biosensor) ในสิ่งแวดล้อม โดยออกแบบให้โปรโมเตอร์เหนี่ยวนำ (inducible promoter) ต่อกับบริเวณจับของไรโบโซม (ribosome binding site) และยีนรายงานผล (reporter gene) โดยถ้าในสิ่งแวดล้อมมีค่าพีเอชต่ำจะทำให้แบคทีเรีย *E. coli* มีสีแดง ถ้าค่าพีเอชในสิ่งแวดล้อมมีค่าสูงแบคทีเรีย *E. coli* จะมีสีเขียว (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 แบคทีเรีย *E. coli* ตรวจสอบสภาพความเป็นกรดต่างในสิ่งแวดล้อม

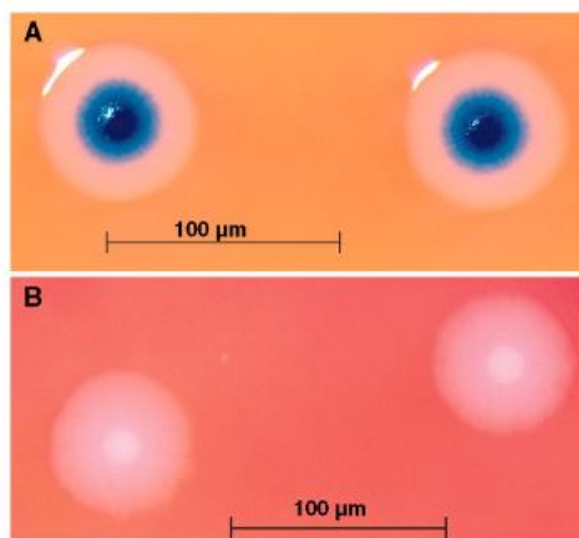
ที่มา : Johnson K.C. และคณะ. (2022).

เทคนิคทางชีววิทยาสังเคราะห์มีสองแบบได้แก่ การสร้างสิ่งมีชีวิตด้วยการเพิ่มหรือลดจีโนมและการสร้างจุลินทรีย์ที่มีการดัดแปลงวิถีเมตาบอลิก

การสร้างสิ่งมีชีวิตด้วยการเพิ่มหรือลดจีโนม

ตัวอย่างการทดลองแรกๆ ที่เกี่ยวกับงานชีววิทยาสังเคราะห์ ได้แก่ การสร้างแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ K 12 ที่มีการลดหรือตัดยีนที่ก่อโรคในมนุษย์ออกไป เช่น ยีนที่เกี่ยวข้องกับการเกาะของแบคทีเรียกับเซลล์ทำให้ได้เซลล์แบคทีเรีย

E. coli สายพันธุ์ K 12 ที่ใช้ในกระบวนการพันธุวิศวกรรมมีปลอดภัยกับมนุษย์มากขึ้น ตัวอย่างต่อมาที่มีความเกี่ยวข้องกับวงการธุรกิจสารปรุงแต่งรสอาหาร เช่น ผงชูรส โดยมีการสร้างแบคทีเรีย *Corynebacterium glutamicum* ที่มีการตัดจีโนมออกอย่างกว้างขวาง ส่งผลให้มีการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ทรานสกลูตามิเนส (transglutaminase) ทำให้เกิดการสร้างกรดกลูตามิก (glutamic acid) หรือ ไลซีน (lysine) เพิ่มขึ้น ตัวอย่างต่อมาคือการสร้างแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ที่มีการลดจำนวนจีโนมลงร้อยละ 21 และดัดแปลงบริเวณที่เกี่ยวกับการรับสารตั้งต้นเข้าสู่เซลล์และการขับสารผลิตภัณฑ์ออกจากเซลล์ จากกระบวนการดัดแปลงดังกล่าวข้างต้น ก่อให้เกิดผลิตเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) เพื่อใช้ผสมกับผงซักฟอกเพิ่มมากขึ้นในท้องตลาด ในด้านงานวิจัยพื้นฐานมีการมีการสร้างจุลินทรีย์สังเคราะห์ (artificial microorganism) ในปี พ.ศ. 2543 มีการสร้างแบคทีเรีย *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 โดยการใส่จีโนมสังเคราะห์ขนาด 1.08 เมกะเบส เข้าไปในเซลล์แบคทีเรีย *Mycoplasma capricolum* แบคทีเรียที่สังเคราะห์ขึ้นมาใหม่นี้สามารถเติบโตและแบ่งเซลล์ได้ (ภาพที่ 5)



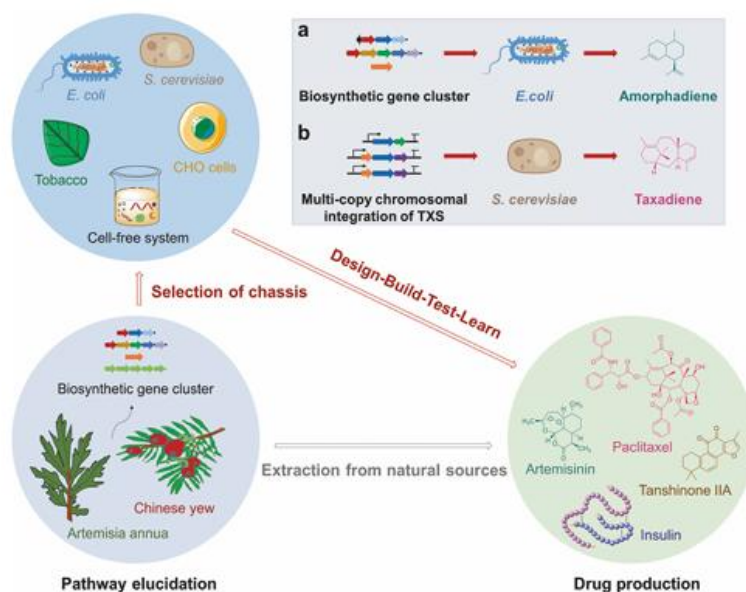
ภาพที่ 5 A. แบคทีเรีย *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0

B. แบคทีเรีย *Mycoplasma capricolum*

ที่มา : Gibson D.G. และคณะ. (2010).

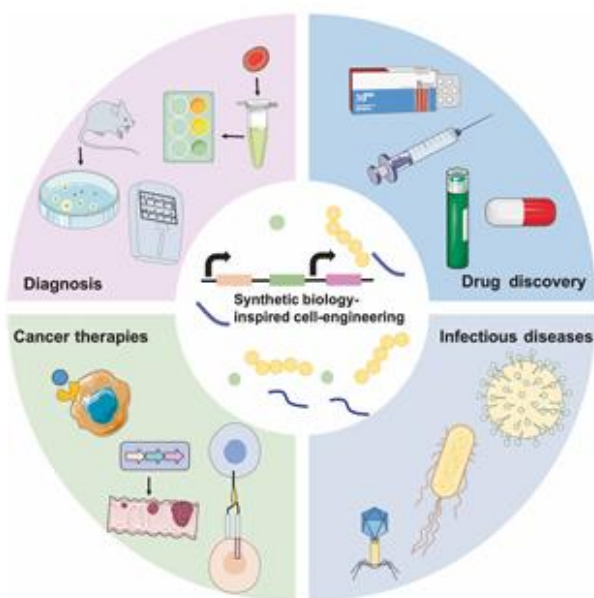
การสร้างจุลินทรีย์ที่มีการดัดแปลงวิธีเมตาบอลิก

ในช่วงเริ่มต้น พ.ศ. 2548 มีการสร้างแบคทีเรีย *E. coli* ที่มีวิธีการสังเคราะห์สาร 1,3 โพรเพนไดออล (1,3 propanediol) เพื่อผลิตใช้ทางอุตสาหกรรมได้ ต่อมาในปีพ.ศ. 2557 มีการสร้างยีสต์ขนมปังที่ผลิตสารไฮโดรคอร์ติซอล (hydrocortisone) นอกจากการใช้ในทางอุตสาหกรรมแล้วยังมีการใช้ความรู้ชีววิทยาสังเคราะห์กับทางการแพทย์ เช่น การสร้างแบคทีเรีย *E. coli* หรือ ยีสต์ที่สามารถผลิตสารอะมอฟาร์ไดอิน (amorphadiene) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตสารอาร์ทิมิซินิน (artemisinin) ซึ่งใช้ในการรักษาโรคมาเลเรีย (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 แบคทีเรีย *E. coli* ที่ผลิตสารอะมอฟาไดอิน
ที่มา : Zhao N. และคณะ. (2023)

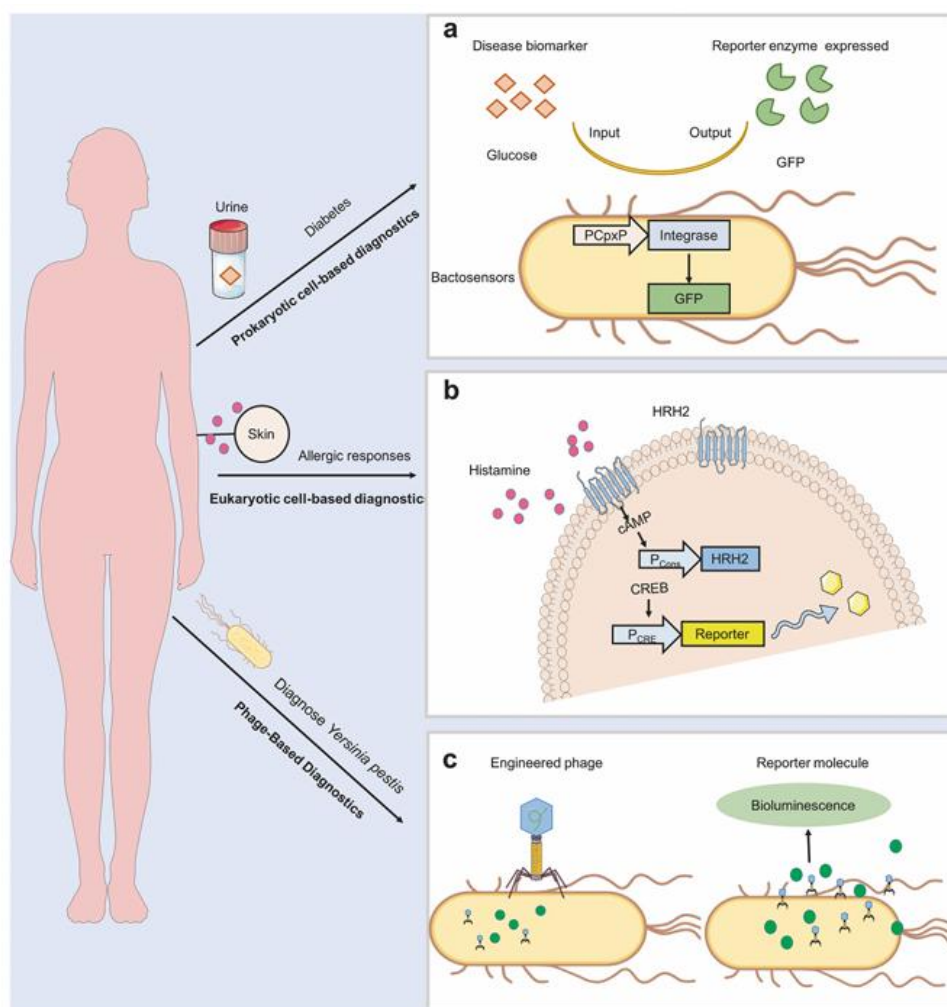
ในปัจจุบันมีการนำเทคนิคชีววิทยาสังเคราะห์มาดัดแปลงพันธุกรรมเรียกว่า วิศวกรรมเซลล์ (cell engineering) เพื่อประโยชน์ทางการแพทย์อย่างมากมาย เช่น การตรวจวินิจฉัยโรค การรักษาโรคมะเร็ง การรักษาโรคติดเชื้อและการค้นพบยา เป็นต้น (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 ชีววิทยาสังเคราะห์และวิศวกรรมเซลล์
ที่มา : Zhao N. และคณะ. (2023).

การพัฒนาแบบชีววิทยาสังเคราะห์สำหรับการวินิจฉัยโรคเบาหวาน โดยดัดแปลงแบคทีเรียให้สามารถตรวจน้ำตาลกลูโคสในน้ำปัสสาวะได้ เมื่อน้ำตาลกลูโคสในน้ำปัสสาวะจะทำให้มีการกระตุ้นให้สร้างโปรตีนเรืองแสงขึ้นในแบคทีเรีย ทำให้เราสามารถสังเกตเห็นได้ นอกจากนี้ยังมีการสร้างเซลล์สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีตัวรับที่ตอบสนองต่อสารฮิสตามีน (histamine) และไปกระตุ้นกลไกการสร้างโปรตีนรายงานผลว่ามีการเกิดโรคมุมิแพ้ขึ้นแล้วในร่างกาย นอกจากนี้ยังมีการสร้าง

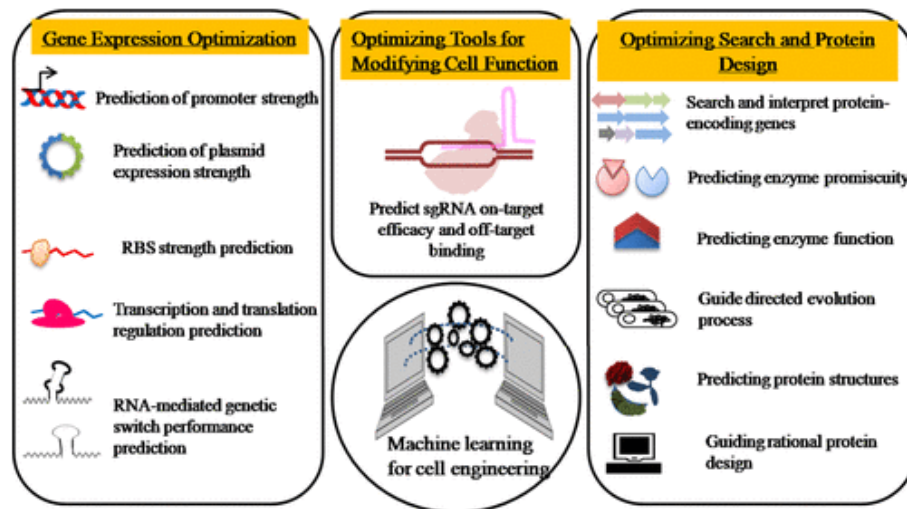
ฟาจ (phage) ที่จับกับแบคทีเรียก่อโรคอย่างจำเพาะเจาะจง แล้วสามารถฉีดจีโนมเข้าไปในแบคทีเรียก่อโรคนั้นได้ ฟาจนั้นสามารถเพิ่มจำนวนและสร้างโปรตีนรายงานผลในเซลล์แบคทีเรียก่อโรคนั้นได้ วิธีการใช้ชีววิทยาสังเคราะห์ จะมีความเกี่ยวข้องกับไวรัสที่ก่อโรคในมนุษย์ ทำให้ต้องมีการตั้งกฎระเบียบ การวัดผลกระทบที่เกิดจากความผิดพลาดของการใช้เทคโนโลยี นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงจริยธรรมที่เกี่ยวกับการใช้เซลล์ต้นกำเนิดอวัยวะ ประเด็นทางสิทธิบัตรที่เกี่ยวกับเมล็ดพันธุ์ การใช้จุลินทรีย์อุตสาหกรรมและการโต้แย้งเกี่ยวกับการปล่อยจุลินทรีย์สังเคราะห์ในสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจมีการระงับการใช้หรือเลื่อนออกไป (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ชีววิทยาสังเคราะห์ทางการแพทย์

ที่มา : Zhao N. และคณะ. (2023).

ในปัจจุบันมีการใช้ความรู้ด้านแมชชีน เลิร์นนิง (machine learning) ในชีววิทยาสังเคราะห์ เพื่อแก้ปัญหาและออกแบบองค์ประกอบทางชีวภาพ โดยสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในชีววิทยาสังเคราะห์ เช่น การทำวิศวกรรมเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับวงจรพันธุกรรมในเซลล์หรือเครือข่ายที่ประสานกับกลไกภายในเซลล์ที่จะปรับปรุง องค์ประกอบทางชีวภาพซึ่งจะประกอบด้วย การควบคุมการถอดรหัส การแปลรหัสและโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัส นอกจากนี้นักชีววิทยาสังเคราะห์ได้ใช้รูปแบบแมชชีน เลิร์นนิงในการออกแบบการสร้างสารชีวภาพในสถานะที่เหมาะสมในเซลล์ รวมถึงการทำนายผลที่เกิดขึ้นจากการดัดแปลงเซลล์และการออกแบบโปรตีนในเซลล์ (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 ชีววิทยาสังเคราะห์กับแมชชีน เลนนิ่ง
ที่มา : Goshisht M.K. (2024).

ชีววิทยาสังเคราะห์ในประเทศไทย

ในประเทศไทยมีการส่งเสริมการเรียนรู้ชีววิทยาสังเคราะห์โดยมีการสร้างหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาสังเคราะห์ (หลักสูตรนานาชาติ) ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2567 นอกจากนี้ยังสามารถค้นหาความรู้ชีววิทยาสังเคราะห์โดยใช้สื่อออนไลน์ เช่น เว็บไซต์ (website) ภาควิชาชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทย (SynBio Consortium) หรือเฟซบุ๊ก (Facebook) ที่มีชื่อว่าชีววิทยาเหนือธรรมชาติ ([Biology Beyond Nature](#)) ซึ่งจะมีความรู้ทางด้านชีววิทยาสังเคราะห์ตั้งแต่พื้นฐานถึงการประยุกต์ใช้ในงานวิจัยใหม่อย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ผู้ที่สนใจอาจเริ่มต้นที่เรื่องของรายวิชา ชีววิทยาสังเคราะห์และพันธุวิศวกรรมระดับจีโนม (411311-65-2: Synthetic Biology & Genome-Scale Engineering) โดย ผศ. ดร. ภาณุภูมิ ทรัพย์สุนทร อาจารย์ประจำภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวรและทีมงานที่เป็นนักศึกษาปริญญาโท-เอกหรือนักวิจัยที่ทำงานหรือเรียนต่ออยู่ในต่างประเทศทั่วโลกทำให้ผู้ที่สนใจได้รับความรู้ใหม่ๆอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 10)

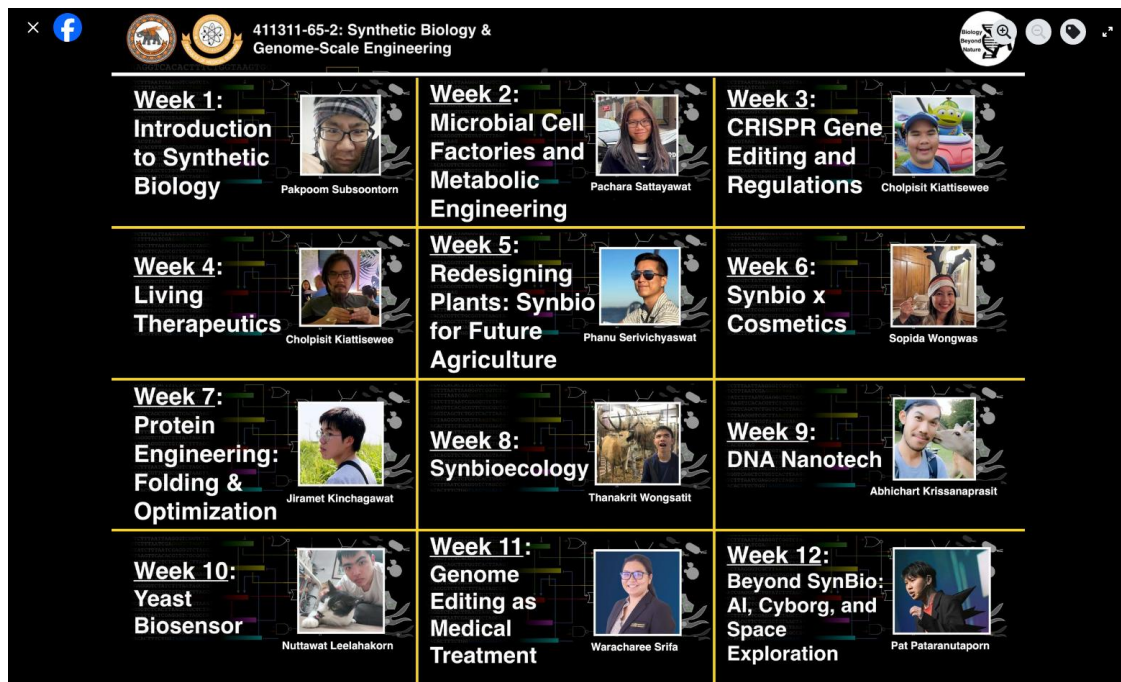
The screenshot shows the Facebook page for 'Biology Beyond Nature: ชีววิทยาเหนือธรรมชาติ'. The page features a large image with a DNA sequence on the left, a logic gate diagram in the center, and various chemical structures on the right. The DNA sequence is as follows:

```

GAAGGTCACACTTTCTGGTAAGTGC
CCTCTTTAATTAAGGTCGGTCTAG
TATCTTTAATCGAGGGCTAGCCGT
TGTATCTTTAATCGAGGGTCTAGCC
GGTAAGTTCACACGTTCTGCGGTAA
AAGGGTCAGCTCTGGTCACTTAAGT
GCTCTAAGGGTCGCTTAAGTAGTCA
TCACACTTTCTGGTAAGTGGAAAGGC
CCTCTTTAATTAAGGGTCGGTCTAG
TCGAGGGTCTATCTTTAATAGCCGT
TAATCGAGGGTCTGTATCTTTAGCC
ATCACGTAAGTCGTTCTGCGGTAAAG
GTCACACGTTCTGCGGTAAAGTAAAGT
AAGGGTCTCACTTAAGTAGCTCTGG
TATCTTTAATCGAGGGTCTAGCCGT
GTCACACGTTCTGCGGTAAAGTAAAGT
AAGGGTCTCACTTAAGTAGCTCTGG
TATCTTTAATCGAGGGTCTAGCCGT
GTCACACGTTCTGCGGTAAAGTAAAGT

```

The page also includes a Facebook logo, the text 'Biology Beyond Nature', and the title 'Biology Beyond Nature: ชีววิทยาเหนือธรรมชาติ'. At the bottom, there are buttons for 'ส่งข้อความ' (Send Message), 'กำลังติดตาม' (Following), and a search bar.



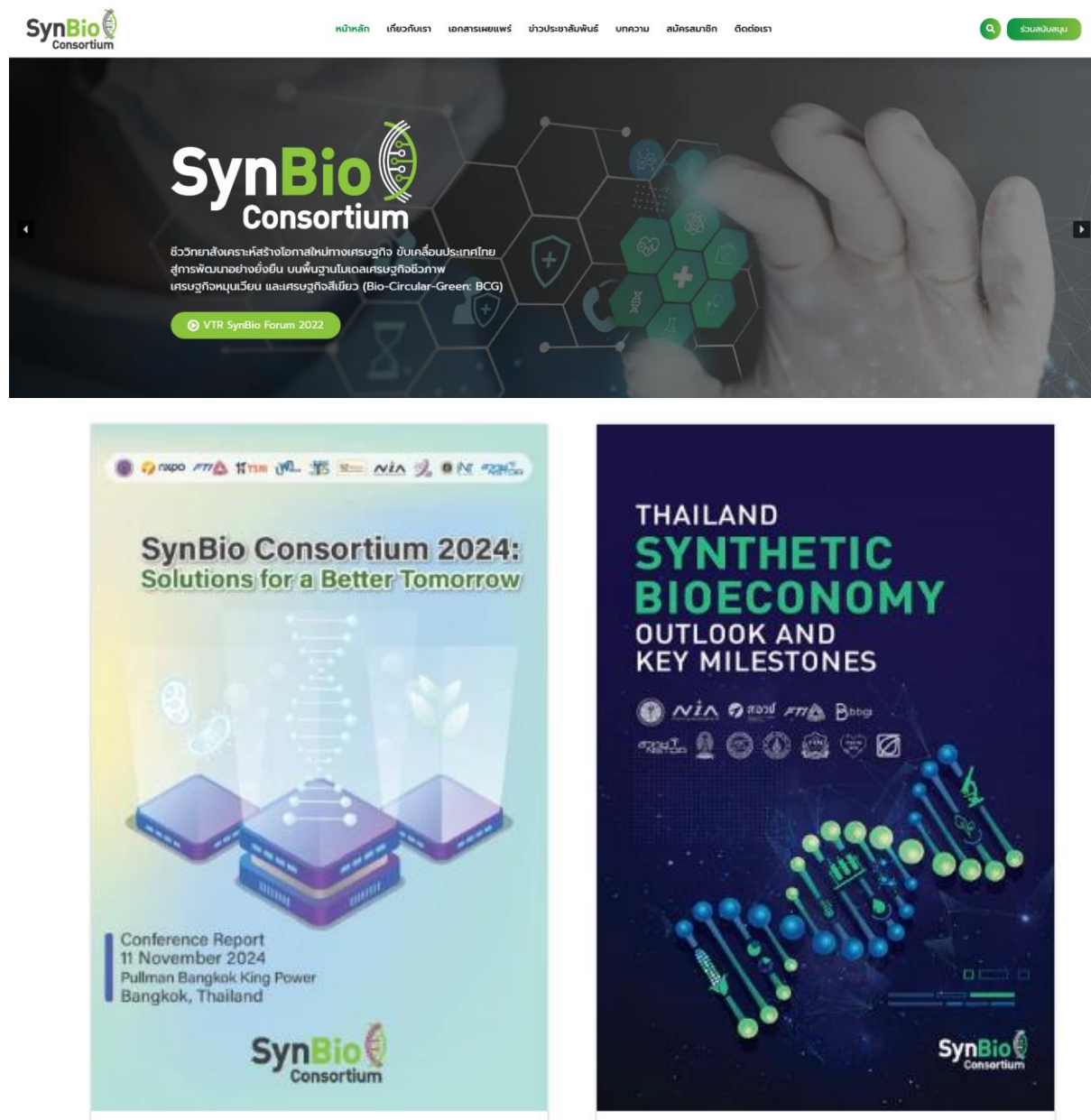
ภาพที่ 10 เฟซบุ๊กชีววิทยาเหนือธรรมชาติและรายวิชาชีววิทยาสังเคราะห์และพันธุวิศวกรรมระดับจีโนม
ที่มา : https://www.facebook.com/biologybeyondnature?locale=th_TH

นอกจากเรื่องความรู้พื้นฐานทางชีววิทยาสังเคราะห์ที่จะได้รับแล้วยังมีการนำเสนอความก้าวหน้าด้านการวิจัยด้านชีววิทยาสังเคราะห์ในรูปแบบกิจกรรมสัมมนาทางวิชาการ (journal club) ทางชีววิทยาสังเคราะห์อย่างต่อเนื่อง โดย ดร. ชลพิสิฐ เกียรติเสวี นักวิจัยหลังปริญญาเอก สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ ประเทศสหรัฐอเมริกาและทีมงาน (รูปที่ 11)



ภาพที่ 11 กิจกรรมสัมมนาทางวิชาการ (journal club) ทางชีววิทยาสังเคราะห์
ที่มา : https://www.facebook.com/biologybeyondnature?locale=th_TH

สำหรับเว็บไซต์ภาคีเครือข่ายชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทย (SynBio Consortium) มีรายละเอียดมากมายเกี่ยวกับความร่วมมือทั้งภาครัฐและเอกชน บทความ เอกสารเผยแพร่ ข่าวประชาสัมพันธ์และการสมัครสมาชิก หัวข้อที่น่าสนใจคือข่าวประชาสัมพันธ์จะมีเอกสารที่เป็น หนังสือ Thailand Synthetic Bioeconomy Outlook and Key Milestones และหนังสือ SynBio Consortium 2024 Solution for a Better Tomorrow (Forum Proceedings) ในหนังสือทั้งสองเล่มนี้จะบอกถึง เทคโนโลยีและความก้าวหน้าทางด้านชีววิทยาสังเคราะห์ การกำกับดูแลความปลอดภัยทางชีวภาพและแผนยุทธศาสตร์ทางด้านชีววิทยาสังเคราะห์ของประเทศไทย (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 12 เว็บไซต์ภาคีเครือข่ายชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทยและหนังสือชีววิทยาสังเคราะห์
ที่มา : <https://www.th-synbioconsortium.com/>

ในประเทศไทยโดยสถาบันนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรม (สนอ.) เล็งเห็นถึงความสำคัญในการนำความรู้ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม ซึ่งสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ชาติ ตามโมเดลเศรษฐกิจ บีซีจี มาพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนและ

ยกระดับความสามารถในการแข่งขันให้กับอุตสาหกรรมเป้าหมาย (S-curves) ด้วยความสำคัญของเทคโนโลยีชีวภาพขั้นสูง หรือ Synthetic Biology Technology (SynBio) จึงก่อตั้ง SynBio Consortium ขึ้นในประเทศไทย โดยมี 4 ภาครีearch นำร่อง ได้แก่ สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย โดยสถาบันนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรม (สนอ.) สำนักงานนโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) และบริษัท บีบีจีไอ จำกัด (มหาชน) ต่อมา ได้มีการประกาศลงนามความร่วมมือของภาครีearch ชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทย (Thailand Synthetic Biology Consortium) เพิ่มเติมจากทั้งภาครัฐและภาคเอกชน รวมเป็น 22 หน่วยงาน ได้แก่ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) โดยศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร สถาบันวิทยสิริเมธี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บริษัท บางจาก คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) บริษัท ไทยยูเนี่ยน กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) บริษัท เบทาโกร จำกัด (มหาชน) บริษัท ไบโอ บัดดี้ จำกัด บริษัท เทสท์บัด จำกัด ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีววิทยาศาสตร์ (องค์การมหาชน) มหาวิทยาลัยมหิดล สมาคมอุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพไทย (ThaiBio) บริษัท โกลบอล อาร์แอนดี จำกัด และบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) เพื่อดำเนินการผลักดันและขับเคลื่อนนวัตกรรม อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีววิทยาสังเคราะห์ในประเทศ สอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ชาติ ด้านยกระดับการพัฒนาอุตสาหกรรมภายใต้เศรษฐกิจ บีบีจี (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 สมาชิกภาครีearch ชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทย (SynBio Consortium)

ที่มา : <https://www.th-synbioc consortium.com/>

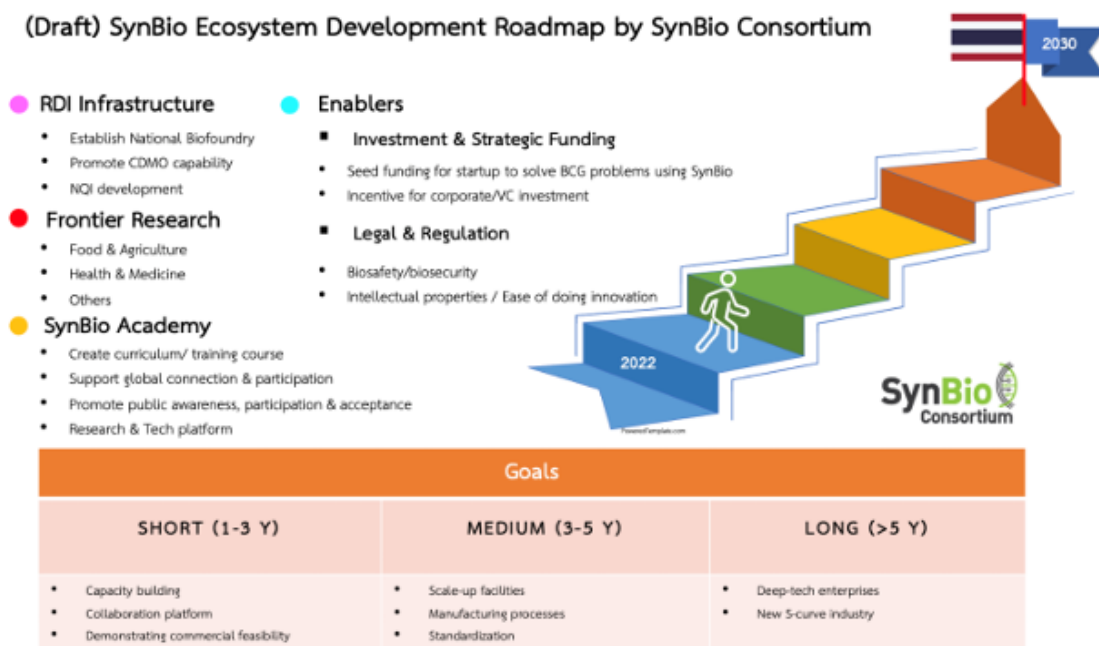
เป้าหมายในภาพรวม แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ดังนี้ ระยะสั้น (1–3 ปี) เป็นการวางรากฐานให้เข้มแข็ง เพื่อสร้างขีดความสามารถ (Capacity Building) ด้านการพัฒนาชีววิทยาสังเคราะห์ สร้างแพลตฟอร์มความร่วมมือ (Collaboration Platform) ทั้งในประเทศและต่างประเทศ และแสดงตัวอย่างการนำชีววิทยาสังเคราะห์ไปใช้ประโยชน์จริงในเชิงพาณิชย์ ระยะกลาง (3–5 ปี) เป็นการพัฒนาและการขยายขนาด (Scale-up) ของกระบวนการผลิตจากห้องปฏิบัติการสู่โรงงานต้นแบบ (Pilot plant) และไปสู่โรงงานผลิต และการสร้างมาตรฐานรับรองผลิตภัณฑ์ ระยะยาว (5 ปีขึ้นไป) มุ่งเน้นการเพิ่มจำนวนผู้ประกอบการที่ใช้เทคโนโลยีเข้มข้น (Deep-tech enterprises) บนฐานของชีววิทยาสังเคราะห์ (ภาพที่ 14)



ภาพที่ 14 เป้าหมายการพัฒนาชีววิทยาศาสตร์ทั้งระบบของประเทศไทย
ที่มา : มูลนิธิบัณฑิตยสภาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (บวท.). (2567)

เพื่อนำไปสู่การสร้างอุตสาหกรรมใหม่ (New S-curve) เพิ่มการจ้างงาน เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมายที่กำหนดไว้ จึงได้กำหนดหมุดหมายสำคัญไว้ดังนี้

1. จัดตั้งสถาบันวิชาการด้านชีววิทยาศาสตร์ (SynBio Academy) เพื่อเป็นแพลตฟอร์มกลางในการผลิตและพัฒนาบุคลากร รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านชีววิทยาศาสตร์ ให้มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งรวมถึงด้านกฎหมายและกฎระเบียบ ผ่านหลักสูตรศึกษาหรือหลักสูตรฝึกอบรมโดยความร่วมมือระหว่างสถาบันการศึกษา เอกชน และสถาบันวิจัย ทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดตั้ง National Biofoundry เพื่อสนับสนุนการทำวิจัยไปจนถึงขั้นการขยายขนาดการผลิต และเข้าร่วมเครือข่ายพันธมิตรด้าน Biofoundry ระดับโลก (Global Biofoundries Alliance) เพื่อสร้างความร่วมมือด้านชีววิทยาศาสตร์ในระดับโลก
3. ส่งเสริมให้เกิดหน่วยงานรับจ้างพัฒนาและผลิตระดับอุตสาหกรรม (Contract Development and Manufacturing Organization : CDMO) ในประเทศ เพื่อเป็นตัวกลางในเชื่อมโยงจากการวิจัยไปสู่กระบวนการผลิตเชิงพาณิชย์
4. ปรับปรุงระเบียบ ข้อกำหนด กฎหมาย สำคัญ โดยเฉพาะกฎหมายความปลอดภัยทางชีวภาพ พระราชบัญญัติความปลอดภัยทางชีวภาพ ซึ่งควรสอดคล้องกับกฎหมาย ข้อกำหนด ระเบียบระหว่างประเทศ ยกตัวอย่าง The Cartagena Protocol on Biosafety to the Convention on Biological Diversity, the Convention on Biological Diversity (CBD) and the WTO TRIPS Agreement
5. ส่งเสริมการวิจัยขั้นแนวหน้า (Frontier Research) ด้านชีววิทยาศาสตร์ เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ พัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม รองรับความต้องการของภาคอุตสาหกรรมในอนาคต (รูปที่ 15)



ภาพที่ 15 การพัฒนาระบบนิเวศชีววิทยาสังเคราะห์ของประเทศไทย
ที่มา : ภาควิชาชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทย. (2565)

บทสรุป

ชีววิทยาสังเคราะห์เป็นการสร้างวงจรชีวภาพสังเคราะห์บนพลาสติก ซึ่งประกอบด้วย ชิ้นส่วนดีเอ็นเอหรือยีนที่สนใจ รวมกับบริเวณโปรโมเตอร์ บริเวณที่เกี่ยวข้องกับการจับของไรโบโซมแล้วก็นำเข้าสู่เซลล์เจ้าบ้าน กระบวนการชีววิทยาสังเคราะห์ ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสิ่งมีชีวิตได้สองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ การสร้างสิ่งมีชีวิตด้วยการเพิ่มหรือลดจีโนมและการสร้าง จุลินทรีย์ที่มีการดัดแปลงวิธิตาบอลิก ในปัจจุบันมีการใช้ความรู้ด้านแมชชีน เลิร์นนิ่งในชีววิทยาสังเคราะห์ เพื่อแก้ปัญหา และออกแบบองค์ประกอบทางชีวภาพ โดยสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในชีววิทยาสังเคราะห์ เช่น การทำวิศวกรรมเซลล์ที่ เกี่ยวกับวงจรพันธุกรรมในเซลล์หรือเครือข่ายที่ประสานกับกลไกภายในเซลล์ที่จะปรับปรุง องค์ประกอบทางชีวภาพซึ่งจะ ประกอบด้วย การควบคุมการถอดรหัส การแปลรหัสและโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการแปลรหัส นอกจากนี้ นักชีววิทยาสังเคราะห์ ได้ใช้รูปแบบแมชชีน เลิร์นนิ่งในการออกแบบการสร้างสารชีวภาพในสถานะที่เหมาะสมในเซลล์ รวมถึงการทำนายผลที่เกิดขึ้น จากการดัดแปลงเซลล์และการออกแบบโปรตีนในเซลล์ ในประเทศไทยมีการส่งเสริมการเรียนรู้ชีววิทยาสังเคราะห์โดยมีการ สร้างหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยาสังเคราะห์ (หลักสูตรนานาชาติ) ที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นอกจากนี้ยังสามารถค้นหาความรู้ชีววิทยาสังเคราะห์โดยใช้สื่อออนไลน์ เช่น เฟซบุ๊กที่มีชื่อว่าชีววิทยาเหนือธรรมชาติ ประเทศไทยโดยสถาบันนวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรม (สนอ.) ได้มีการจัดตั้งภาควิชาชีววิทยาสังเคราะห์แห่งประเทศไทย เพื่อดำเนินการผลักดันและขับเคลื่อนนวัตกรรม อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีววิทยาสังเคราะห์ในประเทศ สอดคล้องกับแผน ยุทธศาสตร์ชาติ ด้านยกระดับการพัฒนาอุตสาหกรรมภายใต้เศรษฐกิจ บีซีจี ชีววิทยาสังเคราะห์จึงเป็นศาสตร์ที่สำคัญต่อการ พัฒนาประเทศไทยในปัจจุบันและอนาคต

เอกสารอ้างอิง

Graduate Academy Foundation for Science and Technology of Thailand. (2024). *Final report: Study on the technology readiness status of synthetic biology-related technologies in Thailand* [รายงานฉบับ สมบูรณ์ โครงการศึกษาสถานภาพความพร้อมของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับชีววิทยาสังเคราะห์ในประเทศไทย]. <https://www.nxpo.or.th/th/report/30477/>

- Thailand Synthetic Biology Consortium. (2022). *Thailand synthetic biology ecosystem development roadmap 2022–2030 (Draft)* [ร่างแผนที่นำทางการพัฒนาระบบนิเวศชีววิทยาสังเคราะห์ของประเทศไทย พ.ศ. 2565–2573]. <https://www.th-synbioconsortium.com/about/>
- Campbell, A. M., Eckdahl, T., Cronk, B., Andresen, C., Frederick, P., Huckuntod, S., Shinneman, C., Wacker, A., & Yuan, J. (2014). pClone: Synthetic biology tool makes promoter research accessible to beginning biology students. *CBE—Life Sciences Education*, 13(2), 285–296. <https://doi.org/10.1187/cbe.13-08-0166>
- Gibson, D. G., Glass, J. I., Lartigue, C., Noskov, V. N., Chuang, R.-Y., Algire, M. A., Benders, G. A., Montague, M. G., Ma, L., Moodie, M. M., Merryman, C., Vashee, S., Krishnakumar, R., Assad-Garcia, N., Andrews-Pfannkoch, C., Denisova, E. A., Young, L., Qi, Z.-Q., Segall-Shapiro, T. H., Calvey, C. H., Parmer, P. P., Hutchison, C. A., III, Smith, H. O., & Venter, J. C. (2010). Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science*, 329(5987), 52–56. <https://doi.org/10.1126/science.1190719>
- Goshisht, M. K. (2024). Machine learning and deep learning in synthetic biology: Key architectures, applications, and challenges. *ACS Omega*, 9, 9921–9945. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09216>
- Johnson, K. C., Sabel, J. L., Cole, J., Pruett, C. L., Plymale, R., & Reyna, N. S. (2022). From genetics to biotechnology: Synthetic biology as a course-embedded research experience. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 50(6), 580–591. <https://doi.org/10.1002/bmb.21671>
- Karatas, P., & Ayaz, F. (2025). Synthetic biology and application areas. *Discovery Biotechnology*, 2(3), 1–29.
- Marucci, L., Barberis, M., Karr, J., Ray, G., Race, P. R., Andrade, M. de S., Grierson, C., Hoffmann, S. A., Landon, S., Rech, E., Rees-Garbutt, J., Seabrook, R., Shaw, W., & Woods, C. (2020). Computer-aided whole-cell design: Taking a holistic approach by integrating synthetic with systems biology. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, Article 447. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00447>
- Schmid, R. D., & Schmidt-Dannert, C. (2016). *Biotechnology: An illustrated primer*. Wiley-VCH.
- SynBio Consortium. (2021). *Thailand synthetic bioeconomy outlook and key milestones*.
- Zhao, N., Song, Y., Xie, X., Zhu, Z., Duan, C., Nong, C., Wang, H., & Bao, R. (2023). Synthetic biology-inspired cell engineering in diagnosis, treatment, and drug development. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 8, Article 112. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01373-0>
- Biology Beyond Nature. Facebook. Retrieved December 18, 2025, from <https://www.facebook.com/biologybeyonddnature>
- Thailand Synthetic Biology Consortium. *Thailand Synthetic Biology Consortium*. Retrieved December 18, 2025, from <https://www.th-synbioconsortium.com/>



JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY THONBURI UNIVERSITY

Thonburi University

248 Phetkasem 110 Nongkhaengplu,
Nongkhaem District, Bangkok - 10160