



วารสาร ศวท

ศิลปศาสตร์ วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 (มกราคม-เมษายน 2569)

Volume 3 Issue 1 (January-April 2026)

LAS

**LIBERAL ARTS, SCIENCE
AND TECHNOLOGY
JOURNAL**

ISSN 3027-8929 (Online)

ศวท: ศิลปศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

LAS: Liberal Arts, Science and Technology

ปีที่ 3 ฉบับที่ 1 (มกราคม-เมษายน) 2569

Volume 3 Issue 1 (January-April) 2026

ที่ปรึกษา

คณบดีคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์

หม่อมหลวงพัชรภากร เทวกุล

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระศักดิ์ มงคลเคหา

รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ระวี นิ่มน้อย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย เหมือนโพธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาร์ม อันอาดมงาม

กองบรรณาธิการ (ภายใน)

รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิพนธ์ วงศ์ฤกษ์ดี

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

รองศาสตราจารย์ ดร.สทนต์ เพชรศรี

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเดช เบิกฟ้า

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์ รักษาศักดิ์ชัย

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภา ไช้สลาม

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ มงคลศิริวัฒนา

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรา จตุรโกมล

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์พันธ์ ศรีเมือง

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งทิพย์ ไทยสม

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรพจน์ ปิ่นทองดี

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา ไม้หอม

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดำรงค์ ถาวร

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปริญญญา พัฒนวิสันต์พร

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทาริกา สระทองคำ

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูดาพร สอนภักดี

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

อาจารย์ ดร.ไข่มุกด์ วิกรัยศักดิ์ดา

(มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

กองบรรณาธิการ (ภายนอก)

รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระชัย ชนานันต์

(มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา โพธิ์เยี่ยม

(สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญรัตน์ จิตรพิระ

(มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา)

รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกรณ์ ภูเจริญศิลป์

(มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

รองศาสตราจารย์ ดร.พงศกร เมธีธรรม

(มหาวิทยาลัยนเรศวร)

รองศาสตราจารย์ ดร.ประกาศิต สิทธิธิดกุล

(มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

รองศาสตราจารย์ ดร.เสนห์ ทองรินทร์

(มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑิรา ยุติธรรม

(มหาวิทยาลัยมหิดล)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชิตชัย ปิมแปง

(มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งทิพา ชิดทอง

(มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.การันต์ บ่อบัวทอง

(มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ หาญพัฒนานากิจ

(มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญชนก ไชยรินทร์

(มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จวงจันทร์ จำปาทอง

(มหาวิทยาลัยนเรศวร)

อาจารย์ ดร.กฤษฎา ดิเรกวัฒนะ

(มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

อาจารย์ ดร.นาฏอนงค์ นามบุตดี

(มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)

อาจารย์ ดร.นริชญา ทองกลาง

(มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง)

อาจารย์ ดร.พรทิพย์ บุญศรี

(มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ)

อาจารย์ ดร.มุฮัมมัด นิยมเดชา

(มหาวิทยาลัยศิลปากร)

คุณกิตติยุทธ ปั่นฉาย

(สำนักวิจัยและอนุรักษ์ องค์การสวนพฤกษศาสตร์ กระทรวง

ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม)

Professor Dr.Yilin Sun

(Seattle Colleges, USA)

Professor Paul Kei Matsuda

(Arizona State University, USA)

Associate Professor Dr.Will Baker

(University of Southampton, England)

Associate Professor Dr.Pham Vu Phi Ho

(Van Lang University, Vietnam)

Assistant Professor Dr. Shahzada Qamar Hussain

(University Islamabad, Pakistan)

Dr.Dang Vinh Quang

(Vietnam National University, Vietnam)

Dr.Chatchai Rodwihok

(Konkuk University, Republic of Korea)

Dr.Peter Mickan

(University of Adelaide, Australia)

Dr.Junjira Tanum

(Yonsei University, Republic of Korea)

ฝ่ายเลขานุการวารสาร

นางสาวจิณณพัต ชื่นชมน้อย

นางสาวกัลยกร สิบแอง

นายสถาพร ไชยสมภาร

คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เลขที่ 1 หมู่ 6 ต.กำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

☎ โทรศัพท์ 034300481; โทรสาร 034351402

✉ Jinnaput.c@ku.th

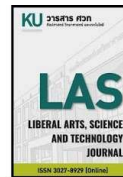
Website: <https://li04.tci-thaijo.org/index.php/art-science>

สารบัญ

	หน้า
1. แนวทางการจัดการความเครียดในงานบริการโรงแรม	1
ปาณิสรา สุขดี, กัลยาวิร สิงห์อยู่, นรบดี รื่นอารมณ์, ณัฐพร สุขสวัสดิ์, ธนทร์รัฐ นาคทั้ง	
2. การเข้าถึงสิทธิแรงงานนอกระบบและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนของ แรงงาน กรณีศึกษา แรงงานภาคบริการในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น	12
ภูฟ้า เขาวนพุทธิสาร, นิภาพรณ เจนสันติกุล	
3. การพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าจากลิกนินที่สกัดจากน้ำดำร่วมกับโซเดียมอัลจิเนต	21
วัชระ ทองเสมอ, นุชนาพร พิจารณ์, สุนทรี แสงจันทร์	
4. การศึกษาสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากขมิ้น	35
ทิพย์วรรณ รุ่งสว่าง, สุชีวัน กรอบทอง, กฤษฎา โธ่งสิทธิ์, สุภาพ ชูพันธ์, สุทธิพจน์ วงศ์ฤกษ์ดี	
5. กิจกรรมการต้านควอรัมเซนซิงของแอคติโนแบคทีเรียต่อเชื้อ <i>Serratia marcescens</i>	45
วนิสา จันทอง, เอกศิษฐ์ สุพรรณโรจน์, พงศ์ระวี นิ่มน้อย, จินตนาถ วงศ์ขวาลิต, อารีย์ อินทร์นวล, รัชนี มิ่งมา	
6. Relationship between Magic Fractions and Decimals Based on Lucas and Fibonacci Numbers	56
Pimkamon Buathong, Suphachit Prathipchit, Thanittha Kowan	

Table of contents

	Page
1. Stress Management Strategies in the Hotel Service Sector	1
Panisara Sukdee, Kanyawee Singau, Narabadee Ruenrrom, Nattaporn Suksawat, Tanonrat Naktang	
2. Access to Informal Labour Rights and Human Rights Protection for Workers: A Case Study of Service Sector Workers in Khon Kaen Province	12
Phufa Chaowanaputthisarn, Nipapan Jensantikul	
3. Development of Slow-Release Nitrogen Fertilizer from Lignin Extracted from Black Liquor Combined with Sodium Alginate	21
Wadchara Thongsamer, Nuchanaporn Pijarn, Suntree Sangjan	
4. Performance Investigation of Dye-sensitized Solar Cells Using Curcuma Longa-derived Dye	35
Tipawan Rungsawang, Sucheewan Krobthong, Kritsada Hongsith, Supab Choopun, Sutthipoj Wongrerkdee	
5. Anti-quorum Sensing Activities of Actinobacteria against <i>Serratia marcescens</i>	45
Wanisa Jeenlong, Aekasit Suphannarot, Pongrawee Nimnoi, Jintanart Wongchawalit, Aree Innun, Ratchanee Mingma	
6. Relationship between Magic Fractions and Decimals Based on Lucas and Fibonacci Numbers	56
Pimkamon Buathong, Suphachit Prathipchit, Thanittha Kowan	



บทความวิจัย (Research Article)

แนวทางการจัดการความเครียดในงานบริการโรงแรม

Stress Management Strategies in the Hotel Service Sector

ปาณิสรา สุขดี¹, กัลยาวีร์ สิงห์อยู่¹, นรบดี รื่นอารมณ์¹, ณัฏฐพร สุขสวัสดิ์¹, ธนัทธรัฐ นาคทัง^{1*}

¹สาขาวิชาภาษาอังกฤษเพื่อการสื่อสารทางธุรกิจ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี อำเภอนาทม
จังหวัดจันทบุรี 22170

Panisara Sukdee¹, Kanyawee Singau¹, Narabadee Ruenrrom¹,
Nattaporn Suksawat¹, Tanonrat Naktang^{1*}

¹ Department of English for Business Communication, Faculty of Science and Arts, Burapha University Chanthaburi Campus,
Chanthaburi, 22170, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: tanonratn@buu.ac.th

Received: 28/10/2025; Revised: 02/12/2025; Accepted: 02/12/2025

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
การบริหารความเครียดในงาน โรงแรม ปัจจัยความเครียดของพนักงาน โรงแรม การวิเคราะห์แนวทางการ จัดการความเครียด การวิจัยเชิงเอกสาร	การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงเอกสาร มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) สังเคราะห์แนวทางการจัดการ ความเครียดของพนักงานในอุตสาหกรรมโรงแรม 2) ระบุปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดใน โรงแรมไทย เก็บรวบรวมข้อมูลจากเอกสารประเภทงานวิจัย หนังสือ และบทความ วิชาการที่เกี่ยวข้องระหว่างปี ค.ศ.1976-2024 จากฐานข้อมูลออนไลน์ จำนวน 20 ฉบับ จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์เนื้อหา (content analysis) และสังเคราะห์ ประเด็นที่ได้จากข้อมูลทั้งหมดด้วยวิธีการสังเคราะห์เนื้อหา (content synthesis) ผลการศึกษาพบว่าตำแหน่งที่เผชิญความเครียดสูงสุดคือผู้จัดการและหัวหน้างานในแผนก พนักงานต้อนรับ รองลงมาคือพนักงานต้อนรับส่วนหน้าซึ่งต้องรับมือกับความคาดหวังสูง ของลูกค้าและการงานจำนวนมาก ปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดความเครียด ได้แก่ ความไม่ ชัดเจนหรือความขัดแย้งในบทบาท การงานเกิน ความสัมพันธ์ระหว่างบุคคลที่ตึงเครียด ความไม่มั่นคงในงาน ตลอดจนปัจจัยครอบครัว สำหรับแนวทางการจัดการความเครียด สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ 1) ระดับองค์กร ได้แก่ การปรับปรุงนโยบาย ค่าตอบแทน และสภาพแวดล้อมการทำงาน 2) ระดับบุคคล ได้แก่ การออกกำลังกาย การ ผ่อนคลาย และการควบคุมอารมณ์ และ 3) ระดับจิตวิทยา ได้แก่ การเสริมสร้าง

บุคลิกภาพที่มีอำนาจควบคุมภายใน เพื่อช่วยให้พนักงานสามารถเผชิญและจัดการความเครียดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

KEYWORDS

Stress Management in
Hotel Work
Stress Factors among
Hotel Employees
Analysis of Stress
Management Strategies
Documentary Research

ABSTRACT

This documentary research aimed to 1) synthesize stress management strategies among employees in the hotel industry; and 2) identify cause factors towards stress in the Thai hotel industry through a review and analysis of 20 relevant literature, research articles, textbooks and academic papers from year 1976-2024 by online database. Content analysis is applied for data analysis. The findings revealed that hotel managers and supervisors experience the highest levels of stress, followed by front-office employees who face intense customer expectations and heavy workloads. Major stress factors included role ambiguity and conflicts, work overload, interpersonal tension, job insecurity, and family-related issues. Stress management strategies can be categorized into three levels: 1) organizational level, including policy improvement, fair compensation, and supportive work environments; 2) individual level, namely exercise, relaxation, and emotional regulation; and 3) psychological level such as fostering an internal locus of control. The results highlighted that effective stress management requires both structural measures and the strengthening of individual resilience. This study provides practical implications for organizations to enhance employee well-being, reduce turnover rate, and improve service quality, as well as serving as an academic reference for developing human resource management policies.

1. บทนำ

ความเครียดเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนซึ่งเกี่ยวข้องกับทั้งทางสรีรวิทยาและทางจิตใจ เพื่อตอบสนองต่อแรงกดดันจากภายนอกหรือภายใน ในอุตสาหกรรมโรงแรม พนักงานมักเผชิญกับความเครียดจากการทำงาน เช่น ชั่วโมงการทำงานที่ยาวนาน บทบาทการบริการที่ต้องเจอลูกค้าที่มีความต้องการสูง และความตึงเครียดระหว่างบุคคล ความเครียดมีทั้งด้านบวก (eustress) ซึ่งช่วยกระตุ้นการทำงาน และด้านลบ (distress) ซึ่งหากยืดเยื้อนานเกินไปจะนำไปสู่ความเหนื่อยล้า ปัญหาสุขภาพ และประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลง ผลกระทบของความเครียดที่เกิดจากการทำงานมีความสำคัญอย่างยิ่ง ผลทางกายภาพ เช่น ความเหนื่อยล้า ปวดศีรษะ ความดันโลหิตสูง และการนอนไม่หลับ ส่วนผลทางจิตใจได้แก่ ความหงุดหงิด ความวิตกกังวล การโฟกัสลดลง ภาวะซึมเศร้า และการหมดไฟ (ปวีณา, 2564)

สำหรับอุตสาหกรรมโรงแรม คุณภาพการบริการสัมพันธ์กับความมั่นคงทางอารมณ์และความเป็นมืออาชีพของพนักงาน ความเครียดไม่เพียงทำร้ายสุขภาพพนักงาน แต่ยังทำให้ความพึงพอใจของลูกค้าลดลง เพิ่มข้อร้องเรียน และทำให้อัตราการลาออก

สูงขึ้น (O'Neill & Davis, 2011) ความเครียดถือเป็นปัญหาสำคัญในอุตสาหกรรมการโรงแรมเนื่องจากลักษณะงานต้องเผชิญกับแรงกดดันสูง เช่น ชั่วโมงการทำงานที่ยาวนาน การปฏิสัมพันธ์กับลูกค้าที่มีความคาดหวังสูง การทำงานเป็นทีม และการจัดการปัญหาที่ซับซ้อน หลายงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดบ่อยที่สุด ได้แก่ ความตึงเครียดระหว่างบุคคล ภาระงานเกิน ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับลูกค้า และความขัดข้องทางเทคโนโลยี โดยเฉพาะผู้จัดการโรงแรมมักมีระดับความเครียดสูงกว่าพนักงานรายชั่วโมง เนื่องจากต้องรับผิดชอบมากกว่าและทำงานชั่วโมงยาวนาน หากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม ความเครียดเหล่านี้สามารถลดความพึงพอใจในงาน ทำให้สุขภาพเสื่อมถอย และเพิ่มความตั้งใจลาออกได้ (O'Neill & Davis, 2011)

งานวิจัยในหลายประเทศได้ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบที่สำคัญของความเครียดที่เกิดจากการทำงาน ทั้งผลทางกายภาพ เช่น ความเหนื่อยล้า ปวดศีรษะ ความดันโลหิตสูง และการนอนไม่หลับ และผลทางจิตใจ เช่น ความหงุดหงิด ความวิตกกังวล การโฟกัสลดลง ภาวะซึมเศร้า และการหมดไฟ นอกจากนี้ ความเครียดยังมีผลต่อคุณภาพการบริการ ความพึงพอใจของลูกค้า และอัตราการลาออกของพนักงาน (O'Neill & Davis, 2011) อย่างไรก็ตามบริบทประเทศไทยยังมีช่องว่างสำคัญที่ต้องการการสำรวจอย่างละเอียด เพื่อให้การออกแบบนโยบายและแนวทางการจัดการความเครียดมีความเหมาะสมกับสภาพการทำงานจริงของพนักงานไทย ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดในประเทศไทยอาจแตกต่างกันในด้านวัฒนธรรมองค์กร ความคาดหวังของลูกค้าในประเทศไทย การบริหารภาระงาน ความพร้อมด้านทรัพยากรบุคคล และนโยบายให้รางวัลหรือสวัสดิการที่มีอยู่ ซึ่งทั้งหมดนี้อาจมีผลต่อระดับรูปแบบของความเครียด และวิธีการรับมือที่เหมาะสม อีกทั้งบริบทประเทศไทยยังขาดข้อมูลเชิงระบบเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยงาน เช่น ชั่วโมงการทำงาน ภาระงาน และการสื่อสารภายในทีม กับระดับความเครียด และผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบริการในโรงแรมของประเทศไทย ซึ่งยังรวมถึงความแตกต่างด้านวัฒนธรรมองค์กรและค่านิยมในการทำงานของพนักงานไทยอาจส่งผลต่อการรับมือและการตอบสนองต่อความเครียด

การจัดการความเครียดอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญ วิธีการจัดการประกอบด้วย กลยุทธ์เชิงตรง เช่น การแก้ปัญหา การกำหนดบทบาทงานให้ชัดเจน และการลดภาระงาน และกลยุทธ์เชิงอ้อม เช่น การผ่อนคลาย การออกกำลังกาย และการใช้กลไกการเผชิญปัญหาทางจิตใจ (ปวีณา, 2564) ทั้งนี้ นโยบายองค์กรและบุคลิกภาพของพนักงานเองก็มีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการจัดการความเครียด ผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิจัยเชิงเอกสาร (documentary research) เพื่อช่วยสังเคราะห์ข้อมูลจากแหล่งเอกสารที่มีอยู่เพื่อระบุแนวโน้ม ความสัมพันธ์ และช่องว่างที่ยังไม่ได้รับการสำรวจในประเทศไทย จะทำให้ได้ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างประเทศและระบุคุณลักษณะเฉพาะของโรงแรมในประเทศไทย ทั้งในแง่ของวัฒนธรรมองค์กร ลักษณะงาน และนโยบายสวัสดิการที่อาจมีผลต่อความเครียดของพนักงาน จะเป็นกรอบแนวคิดและข้อเสนอแนวทางการจัดการความเครียดที่สอดคล้องกับความเป็นจริงของประเทศไทย และสามารถนำไปสู่การออกแบบการศึกษาเชิงลึกต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์แนวทางการจัดการความเครียดของพนักงานโรงแรม
2. เพื่อระบุปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดในโรงแรมไทย

1.2 การทบทวนวรรณกรรม

การวิจัยเชิงเอกสารครั้งนี้ดำเนินการโดยการทบทวนวรรณกรรม ประกอบด้วย งานวิจัย หนังสือ และบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับแนวทางการจัดการความเครียดของพนักงานโรงแรม รวมถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละแนวคิด ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

หลักการ แนวคิด ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การจัดการความเครียดถือเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในแวดวงจิตวิทยาและการจัดการทรัพยากรมนุษย์ เนื่องจากความเครียดส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพกาย สุขภาพจิต และประสิทธิภาพในการทำงานของบุคคล (Cooper &

Marshall, 1976; Karasek, 1979) โดยกรอบแนวคิดหนึ่งที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายคือ ทฤษฎีการจัดการความเครียดของ Lazarus และ Folkman (1984) ซึ่งอธิบายว่าบุคคลจะตอบสนองต่อความเครียดผ่านกระบวนการ “การประเมินสถานการณ์ (appraisal)” และ “การเผชิญปัญหา (coping)” (Lazarus & Folkman, 1984) โดย Lazarus และ Folkman (1984) แบ่งการประเมินความสำคัญและการรับมือออกเป็นสองขั้นตอน ได้แก่ 1) การประเมินขั้นปฐมภูมิ (Primary Appraisal) คือการที่บุคคลตัดสินว่าสถานการณ์เป็นภัยคุกคามหรือไม่ 2) การประเมินขั้นทุติยภูมิ (Secondary Appraisal) คือการพิจารณาว่าตนมีทรัพยากรและวิธีการเพียงพอที่จะรับมือหรือไม่ หากบุคคลมองว่าตนไม่สามารถรับมือได้ ความเครียดจะเกิดขึ้น และนำไปสู่การเลือก กลยุทธ์การเผชิญปัญหา (coping strategies) ซึ่งแบ่งได้เป็นสองลักษณะหลัก ได้แก่

การมุ่งแก้ปัญหา (Problem-focused coping) เช่น การวางแผน การหาทางแก้ไขสถานการณ์

การจัดการอารมณ์ (Emotion-focused coping) เช่น การระบายอารมณ์ การหากำลังใจทางสังคม Cooper และ Marshall (1976) ได้เสนอรูปแบบความเครียดในงานที่เน้นปัจจัยด้านองค์กร เช่น ความไม่ชัดเจนของบทบาท ภาระงานที่มากเกินไป และความขัดแย้งในบทบาท ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ปรากฏชัดเจนในงานโรงแรมโดยเฉพาะในตำแหน่งผู้จัดการที่ต้องรับผิดชอบทั้งการบริหารทีมและการตอบสนองความคาดหวังของลูกค้าในเวลาเดียวกัน (Cooper & Marshall, 1976)

Karasek (1979) ได้นำเสนอแนวคิด job demand-control model ซึ่งระบุว่าความเครียดจะสูงที่สุดเมื่อความต้องการของงานสูง แต่ระดับการควบคุมงานของบุคคลต่ำ งานโรงแรมมักอยู่ในสภาวะดังกล่าว โดยพนักงานต้องตอบสนองความต้องการของลูกค้า แต่มีอิสระในการตัดสินใจจำกัด

งานวิจัยเชิงวิชาการที่เกี่ยวข้อง

Yoo, D.Y. (2022) ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความไม่มั่นคงในงาน ความเครียด และสุขภาวะทางจิตใจ ผลการวิจัยพบว่าความไม่มั่นคงในงานส่งผลทางอ้อมต่อสุขภาวะของพนักงานโดยการเพิ่มระดับความเครียด ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำคัญ นอกจากนี้ กลยุทธ์การควบคุมอารมณ์ เช่น การเผชิญหน้าเชิงรุก และการขอความช่วยเหลือ มีบทบาทบรรเทาความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างความเครียดกับสุขภาวะ ในขณะที่การหลีกเลี่ยงไม่พบว่ามีประสิทธิภาพ ข้อค้นพบนี้ชี้ว่าความเครียดไม่ได้เป็นเพียงผลพลอยได้จากความไม่มั่นคงในงาน แต่ยังเป็นกลไกหลักที่กำหนดสุขภาพจิตโดยรวมของพนักงาน

Pantha และคณะ (2024) ขยายขอบเขตการศึกษาโดยประเมินความคิดเห็นของพนักงานเกี่ยวกับแรงจูงใจ ความพึงพอใจ ประสิทธิภาพ และความเครียด แม้ว่าพนักงานส่วนใหญ่รายงานว่ามีความพึงพอใจในงานสูง แต่ยังมีจำนวนมากที่ประสบกับความเครียด โดยมีภาระงานเกินเป็นสาเหตุหลัก วิธีการคลายเครียดที่นิยมที่สุดคือ การพักเบรก ผลวิจัยยังพบว่า งานที่มีความหมายและผู้จัดการที่สนับสนุนช่วยเพิ่มแรงจูงใจ ซึ่งมีส่วนช่วยบรรเทาความเครียดได้ในทางอ้อม บ่งชี้ว่าปัจจัยเชิงองค์กรและปัจเจกบุคคลเชื่อมโยงกันในการสร้างการตอบสนองต่อความเครียด

พรทิพย์ (2562) การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์ปัจจัยด้านความเครียดตามตำแหน่งงาน แรงจูงใจ และความผูกพันต่อองค์กรของพนักงานระดับปฏิบัติการในกรุงเทพมหานคร ย่านอโศก ผลการวิจัยพบว่า ความคลุมเครือในบทบาทและแรงกดดันจากงานมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดความเครียด และยังส่งผลต่อความผูกพันและความตั้งใจที่จะลาออกของพนักงาน ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่าความเครียดไม่เพียงกระทบต่อสุขภาวะส่วนบุคคล แต่ยังส่งผลต่อความมั่นคงและประสิทธิภาพในองค์กรด้วย

ลดาวัลย์ และ ประพล (2567) การศึกษานี้มีความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของความเครียดในการทำงานที่มีอิทธิพลต่อการคงอยู่ของพนักงานบริการส่วนหน้าในโรงแรมระดับ 4-5 ดาว จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความเครียดจากงาน โดยเฉพาะปัจจัยด้านภาระงานและความคลุมเครือของบทบาท เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดการคงอยู่ในอาชีพของพนักงานบริการส่วนหน้า ข้อค้นพบนี้เน้นย้ำถึงความจำเป็นที่องค์กรจะต้องพัฒนาแนวทางการจัดการความเครียดเพื่อรักษาบุคลากรที่มีคุณภาพ

สูตรรัตน์ และคณะ (2563) การศึกษานี้เน้นไปที่พนักงานต้อนรับส่วนหน้าในโรงแรมพัทยา จังหวัดชลบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเครียด ผลการวิจัยพบว่าพนักงานกลุ่มนี้เผชิญความเครียดสูงจากแรงกดดันในการให้บริการที่ต้องเผชิญหน้ากับลูกค้าโดยตรง และยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านครอบครัวที่เชื่อมโยงกับคุณภาพการทำงานโดยตรง การค้นพบนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของทั้งปัจจัยด้านงานและปัจจัยส่วนบุคคลที่ร่วมกันสร้างความเครียด

วันทนา และอรณม (2564) งานวิจัยนี้ศึกษาการจัดการความเครียดและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพชีวิตในการทำงาน โดยผลการวิจัยพบว่าความสามารถในการจัดการความเครียดมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับคุณภาพชีวิตในการทำงาน พนักงานที่มีทักษะการจัดการความเครียดที่ดีจะมีความพึงพอใจและแรงจูงใจสูงกว่า ซึ่งสะท้อนว่าการบริหารจัดการด้านจิตใจเป็นสิ่งจำเป็นควบคู่ไปกับการบริหารเชิงโครงสร้างขององค์กร

Yoo, D. Y. (2023) การศึกษานี้ได้พัฒนา “hospitality stress matrix” เพื่ออธิบายตัวกระตุ้นความเครียดและผลกระทบต่อสุขภาพจิต ผลวิจัยชี้ว่าความเครียดจากปัจจัยงาน เช่น ความต้องการสูงและการสนับสนุนที่ไม่เพียงพอ ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพชีวิตและความพึงพอใจในงานของพนักงานโรงแรมหลายงานวิจัยในโรงแรมไทยพบว่าลักษณะบุคลิกภาพ โดยเฉพาะ การรับรู้การควบคุมตนเอง (locus of control) มีบทบาทสำคัญต่อระดับความเครียด พนักงานที่มีการควบคุมภายในสูงรายงานว่ามีความเครียดต่ำกว่าและมีความต่อเนื่องในการทำงานมากกว่า แม้คำตอบแทนและสวัสดิการจะต่ำ สิ่งนี้สะท้อนถึงความสำคัญของทั้งปัจจัยรายบุคคลและปัจจัยเชิงระบบเมื่อออกแบบมาตรการจัดการความเครียด

Yoo, J. (2022) เน้นไปที่ความไม่มั่นคงในอาชีพและความเป็นอยู่ที่ดีของพนักงานโรงแรม โดยใช้ความเครียดเป็นตัวแปรสื่อกลาง ผลการวิจัยยืนยันว่า ความไม่มั่นคงในอาชีพเป็นตัวเร่งให้เกิดความเครียดและบั่นทอนคุณภาพชีวิตการทำงานอย่างชัดเจน

Biding และ Nordin (2014) การทดลองกึ่งทดลองครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อประเมินผลโปรแกรมการจัดการความเครียดในพนักงานโรงแรม ผลการวิจัยพบว่าโปรแกรดังกล่าวสามารถลดระดับความวิตกกังวล ภาวะซึมเศร้า และความเครียดในกลุ่มตัวอย่างได้อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการแทรกแซงด้านจิตใจ

Bora (2017) วิเคราะห์ผลกระทบของความเครียดต่อพนักงานโรงแรม ผลการศึกษาพบว่าความเครียดส่งผลเสียต่อสุขภาพจิต ประสิทธิภาพการทำงาน และความพึงพอใจในการทำงานอย่างชัดเจน

Gohil (2017) ศึกษาความเครียดจากการทำงานและวิธีการจัดการในกลุ่มพนักงานโรงแรม พบว่าความเครียดมีผลโดยตรงต่อแรงจูงใจและประสิทธิภาพการทำงาน และการขาดกลยุทธ์การจัดการที่เหมาะสมยิ่งทำให้ผลกระทบดังกล่าวรุนแรงขึ้น

Kharb และ Kumar (2023) พัฒนาแนวทางจัดการความเครียดและเพิ่มความพึงพอใจในงานของพนักงานโรงแรมในเขต Delhi-NCR ผลการวิจัยเสนอการใช้แนวทางสหวิทยาการ (multidimensional approach) ในการจัดการความเครียดเพื่อเสริมสร้างแรงจูงใจและคุณภาพชีวิตการทำงาน

O'Neill และ Davis (2011) ศึกษาความเครียดและสุขภาวะในอุตสาหกรรมโรงแรม ผลการศึกษาพบว่าความเครียดมีความสัมพันธ์กับสุขภาพกายที่เสื่อมถอย ความพึงพอใจในงานต่ำ และอัตราการลาออกที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าความเครียดเป็นปัจจัยสำคัญที่กระทบต่อความยั่งยืนขององค์กร

Rabenu และ Yaniv (2017) เน้นไปที่ทรัพยากรทางจิตวิทยาและกลยุทธ์การเผชิญปัญหา โดยผลวิจัยพบว่าพนักงานที่มี internal locus of control และทรัพยากรทางจิตวิทยาที่แข็งแรง มีแนวโน้มที่จะรับมือกับความเครียดได้ดีกว่าและรายงานว่ามีความเครียดต่ำกว่า

บทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง

Brymer, Perrewe และ Johns (1991) ศึกษาความเครียดของผู้จัดการในอุตสาหกรรมโรงแรม พบว่าตัวกระตุ้นความเครียดสำคัญ ได้แก่ ความไม่ชัดเจนและความขัดแย้งของบทบาท ภาระงานและเวลาในการทำงานที่มากเกินไป รวมถึงปัญหา

ความสัมพันธ์กับบุคคลในที่ทำงาน ซึ่งส่งผลต่อสุขภาพกายและใจ เช่น อาการอ่อนเพลีย ปวดศีรษะ และขาดสมาธิ แม้ว่าผู้จัดการจะมีกลไกเผชิญความเครียดทั้งเชิงบวกและเชิงลบ แต่กลับไม่สามารถลดระดับความเครียดได้อย่างชัดเจน อีกทั้งความเครียดยังส่งผลเสียต่อองค์กร ทั้งการลาออก การขาดงาน และประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลง จึงเน้นย้ำความจำเป็นของมาตรการจัดการความเครียดในระดับองค์กร

นลินี (2562) เสนอแนวทางกลยุทธ์การเผชิญความเครียดในอุตสาหกรรมโรงแรม โดยชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้กลยุทธ์เชิงรุก (problem-focused coping) เช่น การวางแผนและการหาทางออกของปัญหา ควบคู่กับการใช้กลยุทธ์เชิงอารมณ์ (emotion-focused coping) เช่น การควบคุมอารมณ์และการสร้างพลังใจจากสังคม แม้งานนี้จะไม่ใช่งานวิจัยภาคสนาม แต่ถือเป็นการนำเสนอแนวทางเชิงวิชาการที่ช่วยให้พนักงานโรงแรมสามารถจัดการความเครียดในชีวิตการทำงานได้ดียิ่งขึ้น

ปวีณา (2564) มุ่งเน้นการให้ความรู้ด้านการจัดการความเครียดด้วยตนเอง โดยเสนอวิธีการที่เข้าถึงง่าย เช่น การออกกำลังกาย การฝึกการผ่อนคลาย และการดูแลสุขภาพจิตใจในชีวิตประจำวัน แม้จะไม่ใช่งานวิจัยเชิงประจักษ์ แต่เป็นแหล่งข้อมูลเชิงวิชาการที่มีประโยชน์ต่อการสร้างพฤติกรรมจัดการความเครียดเชิงป้องกันในกลุ่มพนักงานโรงแรม

โดยการทบทวนวรรณกรรมชี้ว่าความเครียดของพนักงานโรงแรมมีหลายสาเหตุและส่งผลต่อสุขภาพ ความพึงพอใจในงาน และการคงอยู่ในอาชีพ การจัดการที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีทั้งการปรับปรุงเชิงองค์กร (คำตอบแทนที่เหมาะสม สภาพการทำงานที่ดี วัฒนธรรมที่สนับสนุน) และกลยุทธ์ส่วนบุคคล (การควบคุมอารมณ์ การเผชิญปัญหา) ที่สำคัญ งานวิจัยในหลายประเทศเห็นพ้องว่าหากความเครียดไม่ได้รับการจัดการ ย่อมบั่นทอนสุขภาวะของพนักงานและประสิทธิภาพขององค์กร ดังนั้นการจัดการความเครียดจึงเป็นวาระสำคัญในด้านการบริหารงานโรงแรม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้การวิจัยเชิงเอกสาร (Documentary Research) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทบทวน วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารที่มีอยู่ตามหลักเกณฑ์ของ Scott (1990, 2006) โดยเน้นเอกสารที่มีความน่าเชื่อถือ ถูกต้อง เป็นตัวแทน และมีความหมาย โดยสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องระหว่างปี ค.ศ.1976 – 2024 จากฐานข้อมูลออนไลน์ ได้แก่ Google Scholar, TCI, และ Scopus ทั้งบทความที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษที่ใช้จริง จำนวน 20 ฉบับ โดยเลือกเฉพาะที่มีเนื้อหาและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อวิจัยและใช้คำสำคัญในการสืบค้น เช่น Stress, Hotel, Thailand, Management เป็นต้น หากพบว่าเอกสารใดมีเนื้อหาและข้อมูลที่ไม่ตรงกับหัวข้อวิจัยและไม่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลจะถูกคัดแยกออกด้วยเทคนิค Systematic Literature Review (SLR) Approach ตามแนวทางของ Kitchenham, B. (2004) และใช้เทคนิคการวิเคราะห์เนื้อหาแบบนิรนัย (Deductive Content Analysis) ตามแนวทางของ ขาย โปธิสิตา (2562) ในการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากวิธีการดังกล่าวข้างต้นนั้นสามารถช่วยให้ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลจากทั้งงานวิจัยเชิงประจักษ์และคู่มือเชิงปฏิบัติได้ขั้นตอนการวิจัยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. การรวบรวมวรรณกรรม: แหล่งข้อมูลได้แก่ งานวิจัย หนังสือ และบทความวิชาการ
 2. การวิเคราะห์ประเด็น: วิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยก่อความเครียด ผลกระทบ และวิธีการจัดการที่พบในวรรณกรรม โดยการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม เช่น ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียด ตำแหน่งงานที่เกิดความเครียด และระดับการจัดการความเครียดแต่ละด้าน
 3. การสังเคราะห์ข้อค้นพบ
- พัฒนารอบแนวทางการจัดการความเครียด ได้แก่
- ระดับองค์กร: ปรับปรุงนโยบายองค์กร คำตอบแทน และสภาพแวดล้อมการทำงาน รวมถึงลดภาระงานเกิน

ระดับบุคคล: การดูแลสุขภาพ การฝึกผ่อนคลาย และการเสริมสร้างความยืดหยุ่นทางอารมณ์ การเสริมสร้างทางจิตวิทยา: ส่งเสริมบุคลิกภาพแบบอำนาจควบคุมภายใน เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับมือกับความเครียด การสังเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นว่าการจัดการความเครียดจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อองค์กรและพนักงานร่วมมือกัน โดยองค์กรสร้างระบบสนับสนุน ขณะที่พนักงานใช้กลยุทธ์ในการดูแลตนเองเพื่อรักษาสุขภาพและประสิทธิภาพการทำงาน

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเครียดในการทำงาน

ลำดับ	ปัจจัยความเครียด	รายละเอียด
1	ความคลุมเครือ/ขัดแย้งในบทบาทและภาระงาน	บทบาทงานไม่ชัดเจน หรือมีความขัดแย้งในหน้าที่รับผิดชอบ ก่อให้เกิดความสับสนและความเครียด
2	ความตึงเครียดระหว่างบุคคล	ความขัดแย้งหรือความไม่ลงรอยกับเพื่อนร่วมงาน หัวหน้างาน หรือผู้ใต้บังคับบัญชา
3	ภาระล้นและระบบทำงานติดขัด	งานมากเกินไปและระบบการทำงานไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดความเครียดสะสม
4	ปัจจัยครอบครัว	ความเครียดจากครอบครัวส่งผลกระทบต่อสมาธิและพฤติกรรมการทำงาน
5	ความไม่มั่นคงในงาน	ความกลัวตกงานหรืออนาคตไม่แน่นอน โดยเฉพาะช่วงวิกฤต เช่น โควิด-19
6	ปัจจัยเชิงระบบและบุคลิกภาพ	ระบบการทำงานร่วมกับบุคลิกภาพ (เช่น locus of control – การรับรู้ควบคุมชีวิต) ส่งผลต่อระดับความเครียด

ตารางที่ 2 ตำแหน่งงานที่มีความเครียดมากที่สุด

ลำดับ	ตำแหน่งงาน	ลำดับความเครียด	สาเหตุหลักของความเครียด
1	ผู้จัดการ / หัวหน้างาน	สูงที่สุด	ภาระรับผิดชอบสูง, บทบาทไม่ชัดเจน, ความขัดแย้งในบทบาท, ภาระงานเกิน
2	พนักงานต้อนรับส่วนหน้า (Front Office)	สูง	ความคาดหวังจากลูกค้า, แรงกดดันแบบเร่งด่วน, เวลาอันไม่สมดุลกับชีวิต

ตารางที่ 3 แนวทางจัดการความเครียด

ลำดับ	ระดับการจัดการ	แนวทางหลัก	รายละเอียด
1	องค์กร	ปรับนโยบายและสภาพแวดล้อมการทำงาน	จัดค่าตอบแทนที่เหมาะสม, ลดภาระงาน, ปรับสภาพแวดล้อมให้เอื้อต่อการทำงาน
2	บุคคล	ส่งเสริมพฤติกรรมจัดการตนเอง	ออกกำลังกาย, เทคนิคการผ่อนคลาย, การควบคุมอารมณ์
3	จิตวิทยา	พัฒนาอำนาจควบคุมภายใน (Locus of Control)	เสริมสร้างทัศนคติและบุคลิกภาพที่เข้มแข็งต่อการรับมือกับความเครียด

ผลการวิจัยเชิงเอกสารครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่า ความเครียดของพนักงานโรงแรมเกิดจากทั้งปัจจัยเชิงองค์กรและปัจเจกบุคคล โดยเฉพาะผู้จัดการและหัวหน้างาน รวมถึงพนักงานต้อนรับส่วนหน้า ซึ่งมีความเครียดสูงที่สุด เนื่องจากต้องเผชิญกับความคาดหวังของลูกค้าและภาระงานจำนวนมาก ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับงานของ สุदारัตน์ และคณะ (2563) ที่ระบุว่าพนักงานต้อนรับส่วนหน้ามีความเครียดสูงจากแรงกดดันในการให้บริการแบบในสถานการณ์นั้น ๆ และยังได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านครอบครัวซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการทำงานโดยตรง เมื่อพิจารณาปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียด พบว่าความไม่ชัดเจนในบทบาท (role ambiguity) และภาระงานเกิน (workload) เป็นสาเหตุสำคัญของความเครียดที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานของ พรทิพย์ (2562) ที่พบว่าความ

คลุมเครือของงานและแรงกดดันในบทบาทส่งผลต่อความผูกพันและการตั้งใจลาออกของพนักงานในกรุงเทพฯ เช่นเดียวกับ ลดาวัลย์ และ ประพล (2567) ที่ระบุว่าความเครียดของพนักงานบริการส่วนหน้าในโรงแรมระดับ 4–5 ดาวมีอิทธิพลต่อการคงอยู่ในงานอย่างมีนัยสำคัญ

ในด้านแนวทางจัดการความเครียด ผลวิจัยหลักเสนอให้มีมาตรการทั้งระดับองค์กร เช่น การปรับนโยบาย ค่าตอบแทน และสภาพการทำงาน และระดับบุคคล เช่น การออกกำลังกาย การผ่อนคลาย และการเสริมสร้างการควบคุมอารมณ์ ซึ่งสอดคล้องกับลินี (2562) ที่เสนอการใช้กลยุทธ์การเผชิญปัญหาเชิงรุก (problem-focused coping) ร่วมกับการจัดการอารมณ์ (emotion-focused coping) รวมถึง วันทนา และ อารมณ์ (2564) ที่ย้ำว่าการจัดการความเครียดควรเชื่อมโยงกับคุณภาพชีวิตในการทำงานและยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Biding และ Nordin (2014) ที่ระบุว่าโปรแกรมการจัดการความเครียดช่วยลดความวิตกกังวลและภาวะซึมเศร้าในพนักงานโรงแรมได้จริง ขณะที่ Gohil (2017) และ Bora (2017) ยืนยันว่าความเครียดส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพจิตและประสิทธิภาพการทำงาน อีกทั้ง Kharb และ Kumar (2023) เสนอแนวทางการจัดการความเครียดแบบสหวิธีการ (multidimensional approach) เพื่อเสริมสร้างความพึงพอใจในการทำงาน สำหรับด้านบุคลิกภาพและการควบคุมภายในที่สำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rabenu และ Yaniv (2017) ที่พบว่า การเสริมสร้าง psychological resources และการมี internal locus of control ช่วยให้พนักงานรับมือกับความเครียดได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยหลักที่ระบุว่าพนักงานที่มีการควบคุมตนเองภายในสูงมักรายงานว่ามีความเครียดต่ำกว่าเพื่อนร่วมงาน สุดท้ายประเด็นเรื่องความไม่มั่นคงในงานก็เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเครียดเช่นกัน ผลวิจัยหลักพบว่าในช่วงวิกฤตโควิด-19 ความไม่มั่นคงในงานทำให้พนักงานมีความเครียดเพิ่มขึ้น ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับงานของ Yoo, D.Y. (2022, 2023) และ Yoo, J. (2022) ที่รายงานตรงกันว่าความไม่มั่นคงในอาชีพเป็นตัวเร่งความเครียดและบั่นทอนคุณภาพชีวิตการทำงานของพนักงานโรงแรมอย่างชัดเจน ดังนั้นแนวทางการจัดการความเครียดที่มีประสิทธิภาพควรเป็นรูปแบบการบูรณาการ โดยต้องอาศัยการปรับปรุงเชิงโครงสร้างขององค์กร เช่น นโยบายและสภาพแวดล้อมการทำงานควบคู่ไปกับการเสริมสร้างความเข้มแข็งทางจิตใจและสนับสนุนให้พนักงานพัฒนากลยุทธ์การเผชิญปัญหาที่เหมาะสม

4. บทสรุป

จากการทบทวนวรรณกรรมและการสังเคราะห์ข้อมูล สามารถสรุปได้ว่าความเครียดของพนักงานโรงแรมมีสาเหตุมาจากปัจจัยเชิงองค์กรและเชิงบุคคล ซึ่งส่งผลกระทบต่องานและคุณภาพการบริการ ตำแหน่งที่มีความรับผิดชอบสูง เช่น ผู้จัดการในแผนกต้อนรับส่วนหน้า มีความเสี่ยงต่อความเครียดสูงสุด ในขณะที่พนักงานต้อนรับส่วนหน้ามีความเครียดในระดับที่อาจสะสมจนส่งผลกระทบต่องานได้ โดยปัจจัยหลักเกิดจากความไม่ชัดเจนในบทบาทและภาระงานที่มากเกินไป ซึ่งงานวิจัยนี้แบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 ประเด็นหลัก ได้แก่ แนวทางการจัดการความเครียด ตำแหน่งงานที่เกิดความเครียด และปัจจัยที่ทำให้เกิดความเครียด ซึ่งแต่ละประเด็นสามารถอธิบายขยายความได้ดังนี้

ตารางที่ 1 สรุปปัจจัยที่ทำให้เกิดความเครียดในที่ทำงาน ทั้งด้านบทบาทงาน ความสัมพันธ์ในที่ทำงาน ระบบงานที่ติดขัด และปัญหาส่วนตัว เช่น ครอบครัวหรือความไม่มั่นคงในอาชีพ ปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อสุขภาพจิตและพฤติกรรมการทำงานของพนักงานอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งงานที่มีความเครียดสูงสุดในอุตสาหกรรมโรงแรม โดย ผู้จัดการและหัวหน้างานมีระดับความเครียดสูงสุดจากภาระงานและปัญหาด้านบทบาท รองลงมาคือ พนักงานต้อนรับส่วนหน้าซึ่งเผชิญแรงกดดันจากลูกค้าและเวลาทำงานที่ยาวนาน

ตารางที่ 3 แสดงแนวทางจัดการความเครียดในสามระดับ ได้แก่ ระดับองค์กร (นโยบาย), ระดับบุคคล (ดูแลสุขภาพตนเอง), และระดับจิตวิทยา (เสริมสร้างบุคลิกภาพที่เข้มแข็ง) ซึ่งล้วนมีบทบาทร่วมในการลดและป้องกันความเครียดในที่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยในต่างประเทศหลายชิ้น เช่น งานของ Yoo, D.Y. (2022) ที่พบว่าความไม่มั่นคงในงาน ส่งผลทางอ้อมต่อสุขภาวะจิตใจโดยเพิ่มระดับความเครียด และงานของ Pantha และคณะ (2024) ที่พบว่าภาระงานเกินเป็นสาเหตุหลักของความเครียด แม้ว่าพนักงานจะรายงานว่ามีความพึงพอใจในงานสูง แต่ความเครียดก็ยังคงเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน งานของ Brymer และคณะ (1991) ยังยืนยันว่าผู้จัดการในโรงแรมต้องเผชิญกับความเครียดจากความไม่ชัดเจนและความขัดแย้งในบทบาท รวมถึงชั่วโมงทำงานที่มากเกินไป ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อสุขภาพกายและจิตอย่างชัดเจน เมื่อเชื่อมโยงกับผลการวิจัยในครั้งนี้ ทำให้เห็นภาพรวมที่ชัดเจนว่าความเครียดในโรงแรมไม่ใช่เพียงปัญหาส่วนบุคคล แต่เป็นประเด็นเชิงโครงสร้างที่ต้องจัดการ ข้อค้นพบที่น่าสนใจอีกประการคือบทบาทของบุคลิกภาพ โดยเฉพาะการรับรู้การควบคุมตนเอง (locus of control) พนักงานที่มีการควบคุมภายในสูงมักรายงานว่ามีความเครียดต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าปัจจัยส่วนบุคคลสามารถลดทอนผลกระทบของความเครียดได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งควรถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบมาตรการจัดการความเครียด

ประโยชน์ที่ได้รับ

งานวิจัยนี้ให้ประโยชน์ในหลายด้าน ได้แก่

ต่อองค์กร

1. ลดอัตราการลาออกของพนักงาน: เมื่อพนักงานมีความเครียดลดลงและมีความสุขในการทำงานมากขึ้น ก็จะส่งผลให้อัตราการลาออกลดลง ซึ่งช่วยประหยัดต้นทุนในการสรรหาและฝึกอบรมพนักงานใหม่
2. เพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน: พนักงานที่สุขภาพจิตดีและมีความสุขจะมีแรงจูงใจในการทำงานสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพและประสิทธิผลโดยรวมขององค์กรดีขึ้น
3. ยกระดับคุณภาพการบริการ: ความเครียดของพนักงานส่งผลกระทบต่อคุณภาพการบริการ การจัดการความเครียดอย่างเหมาะสมจะช่วยให้พนักงานมีทัศนคติที่ดีและสามารถให้บริการลูกค้าได้อย่างมีอาชีวะมากขึ้น ซึ่งนำไปสู่ความพึงพอใจของลูกค้าที่สูงขึ้น

ต่อพนักงาน

1. เสริมสร้างสุขภาวะทั้งกายและใจ: การทำความเข้าใจและจัดการความเครียดได้อย่างถูกวิธี จะช่วยให้พนักงานมีสุขภาพกายและใจที่ดีขึ้นโดยจัดอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่องนี้เป็นระยะ
2. เพิ่มแรงจูงใจและความพึงพอใจในการทำงาน: เมื่อพนักงานรู้สึกว่าการจัดการความเครียดมีความสำคัญกับความเป็นอยู่ที่ดีของพวกเขา จะส่งผลให้พวกเขารู้สึกมีคุณค่าและมีความผูกพันกับองค์กรมากขึ้น ซึ่งเป็นแรงจูงใจสำคัญในการทำงาน

ต่อวงการวิชาการ

เป็นฐานข้อมูลสำหรับการพัฒนานโยบายการบริหารทรัพยากรมนุษย์ (HRM): งานวิจัยนี้สามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับนักวิชาการและผู้บริหารในการออกแบบและพัฒนากลยุทธ์หรือนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการจัดการความเครียดของพนักงานโรงแรมในอุตสาหกรรมบริการโดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ในการบริหารงานโรงแรม

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต

งานวิจัยเชิงเอกสารนี้เป็นการสังเคราะห์จากวรรณกรรมที่มีอยู่ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเชิงประจักษ์เพื่อเก็บข้อมูลจากพนักงานโรงแรมโดยตรงเพื่อยืนยันผลการสังเคราะห์ อีกทั้งควรศึกษาเปรียบเทียบระหว่างแผนกต่าง ๆ เช่น ครั้ว แม่บ้าน และแผนกอาหารและเครื่องดื่มเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังควรพัฒนาแบบจำลองเชิงปฏิบัติ เช่น โปรแกรมการฝึกอบรมด้านการจัดการความเครียดที่ออกแบบเฉพาะสำหรับพนักงานโรงแรม และการศึกษาเชิงธุรกิจเพื่อเชื่อมโยงระดับความเครียดกับผลลัพธ์ทางเศรษฐกิจของโรงแรม เช่น รายได้ กำไร และความพึงพอใจของลูกค้า รวมไปถึงการศึกษาวิเคราะห์เพิ่มเติมว่าถ้าระดับโรงแรมต่างกันจะมีแนวทางการจัดการความเครียดเหมือนหรือต่างกันอย่างไร

เอกสารอ้างอิง

- ชาย โพธิ์สิตา. (2562). *ศาสตร์และศิลป์แห่งการวิจัยเชิงคุณภาพ* (พิมพ์ครั้งที่ 8). อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง.
- นลินี พานสายตา. (2562). ความเครียดและกลวิธีเผชิญความเครียดในงานโรงแรม. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์*, 39(4), 176–184.
- ปวีณา สุขพรรณพิมพ์. (2564). *กลยุทธ์การจัดการความเครียดที่ทำได้เองไม่ยาก*. สำนักงานส่งเสริมสุขภาพ กลุ่มอนามัยวัยทำงาน กระทรวงสาธารณสุข. <https://hp.anamai.moph.go.th/th/news-anamai/download/?did=193729&id=44449&reload=>
- พรทิพย์ ทิพมาสน์. (2562). *การศึกษาปัจจัยด้านความเครียดตามตำแหน่งงาน แรงจูงใจ และความผูกพันต่อองค์กรที่มีอิทธิพลต่อการตั้งใจจะลาออกจากงานของพนักงานระดับปฏิบัติการกรุงเทพมหานคร ย่านอโศก* (การค้นคว้าอิสระปริญญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยกรุงเทพ.
- ลดาวัลย์ รัตนไชยดำรง, และประพล เปรมทองสุข. (2567). รูปแบบความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของความเครียดในการทำงานที่มีอิทธิพลต่อการคงอยู่ของพนักงานบริการส่วนหน้าในโรงแรมระดับ4–5 ดาว ในจังหวัดประจวบคีรีขันธ์. *วารสารนวัตกรรม การจัดการศึกษาและการวิจัย*, 6(5), 1046–1048.
- วันทนา เนาววัน, และอารมณีย์ เอี่ยมประเสริฐ. (2564). การจัดการความเครียดและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการคุณภาพชีวิตในการทำงาน. *วารสารวิทยาการจัดการปริทัศน์*, 22(1), 223–226.
- สุภารัตน์ และคณะ. (2563). การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดในการทำงานของพนักงานต้อนรับส่วนหน้าในโรงแรมพัทยา จังหวัดชลบุรี. *วารสารไซปะโยม*, 28(2), 49–65.
- Biding, C., & Nordin, R. B. (2014). *Effects of a stress management intervention program on self-perceived depression, anxiety, and stress among hotel employees: A quasi-experimental study*. https://www.researchgate.net/publication/288541892_Effects_of_a_Stress_Management_Intervention_Program_on_Self-Perceived_Depression_Anxiety_and_Stress_Among_Hotel_Employees_A_Quasi-experimental_Study
- Bora, P. (2017). Analysis of effects of stress on hotel employees. *International Journal of Marketing and Human Resource Management*, 8(1), 1–12.
- Brymer, R. A., Perrewe, P. L., & Johns, T. R. (1991). Managerial stress in the hotel industry. *International Journal of Hospitality Management*, 10(1), 47–58.
- Cooper, C. L., & Marshall, J. (1976). Occupational sources of stress: A review of the literature relating to coronary heart disease and mental ill health. *Journal of Occupational Psychology*, 49(1), 11–28.
- Gohil, A.S. (2017). Work Stress & Stress Management. *SK International Journal of Multidisciplinary Research Hub*, 4(10), 27–30.
- Karasek, R. A. (1979). Job demands, job decision latitude, and mental strain: Implications for job redesign. *Administrative Science Quarterly*, 24(2), 285–308.
- Kharb, P., & Kumar, R. (2023). Strategies for mitigating job stress and improving job satisfaction in the hotel industry: A multidimensional approach with reference to Delhi-NCR. *International Journal of Hospitality, Management and Sciences*, 1(2), 116–120.

- Kitchenham, B. (2004). *Procedures for performing systematic reviews (Joint Technical Report TR/SE-0401)*. Keele University. https://www.researchgate.net/publication/228756057_Procedures_for_Performing_Systematic_Reviews
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer.
- O'Neill, J. W., & Davis, K. (2011). Work stress and well-being in the hotel industry. *International Journal of Hospitality Management*, 30(2), 385–390.
- Pantha, S., Yadav, L., Adhikari, S., & Hamal, K. (2024). Voices from the hotel industry: Employee opinions on motivation, job satisfaction, performance and job stress. *International Journal of Atharva*, 2(1), 52–64. <https://doi.org/10.3126/ija.v2i1.63463>
- Rabenu, E., & Yaniv, E. (2017). Psychological resources and strategies to cope with stress at work. *International Journal of Psychological Research*, 10(2), 8–15.
- Scott, J. (1990). *A matter of record: Documentary sources in social research*. Polity Press.
- Scott, J. (2006). *Documentary research*. (Vols. 1–4). SAGE Publications.
- Yoo, D. Y. (2022). How to alleviate hotel employees' job stress in the associations between job stressors and its consequences. *Sustainability*, 14(15), 8979; <https://doi.org/10.3390/su14158979>.
- Yoo, D. Y. (2023). The hospitality stress matrix: Exploring job stressors and their effects on psychological well-being. *Sustainability*, 15(17), Article 13116, 13, 29.
- Yoo, J. (2022). Job insecurity and employee well-being: The mediating role of stress. *Journal of Hospitality and Tourism Research*, 14, 29.

บทความวิจัย (Research Article)

การเข้าถึงสิทธิแรงงานนอกระบบและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนของ
แรงงาน กรณีศึกษา แรงงานภาคบริการในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น

Access to Informal Labour Rights and Human Rights Protection for
Workers: A Case Study of Service Sector Workers in Khon Kaen Province

ภูฟ้า ชาวนพทุธิสาร^{1*}, นิภาพรณ เจนสันติกุล¹

¹ สาขาวิชารัฐประศาสนศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

Phufa Chaowanaputthisarn^{1*}, Nipapan Jensantikul¹

¹ Division of Public Administration, Faculty of Humanities and Social Science, Khon Kaen University, Mueang, Khon Kaen, 40002, Thailand

*Corresponding author

E-mail address: phufa.c@kkumail.com

Received: 25/12/2025; Revised: 24/01/2026; Accepted: 29/01/2026

คำสำคัญ

สิทธิแรงงาน

สิทธิมนุษยชน

แรงงานนอกระบบ

การเข้าถึงสิทธิ

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์การเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนรวมถึงการคุ้มครองแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น 2) เพื่อศึกษาปัญหาและอุปสรรคที่แรงงานนอกระบบเผชิญในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมายและมาตรฐานสากล 3) เพื่อเสนอแนวทางการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนที่เหมาะสมกับบริบทของแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่นเป็นการวิจัยเชิงคุณภาพ รวบรวมข้อมูลจากผู้ให้ข้อมูลจำนวน 7 คน โดยมีการคัดเลือกแบบเจาะจง ด้วยการสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้างและทำการวิเคราะห์เนื้อหา ผลการวิจัย พบว่า 1) ผู้ให้ข้อมูลมีความเข้าใจและรับรู้สิทธิแรงงานในระดับพื้นฐาน 2) ปัญหาและอุปสรรคในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมาย คือ 2.1) ขาดความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับสิทธิแรงงานตามกฎหมาย 2.2) แรงงานนอกระบบส่วนใหญ่ยังไม่เคยขอความช่วยเหลือจากหน่วยงานรัฐหรือองค์กรใด ๆ โดยอาศัยการหาข้อมูลเองจากสื่อสังคมออนไลน์ 2.3) การเลือกปฏิบัติในที่ทำงาน และ 2.4) ปัญหาการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองแรงงานยังมีไม่เพียงพอ 3) แนวทางการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานนอกระบบและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชน คือ 3.1) รัฐควรมีมาตรการประชาสัมพันธ์ที่ชัดเจนและเข้าถึงง่าย 3.2) ควรกำหนดมาตรฐานค่าแรงที่เหมาะสมและเป็นธรรม มีสัญญาจ้างงานเป็นลายลักษณ์อักษร และ 3.3) ลดขั้นตอนการร้องเรียน และมีมาตรการเข้มงวดในการเอาผิดกับนายจ้างหรือเจ้าของกิจการที่เอาเปรียบแรงงาน

KEYWORDS

Labour Rights
Human Rights
Informal Workers
Access to Rights

ABSTRACT

This research article aimed to study 1) analyze the situation regarding access to labour rights and human rights, including the protection of informal workers in Khon Kaen Province; 2) study the problems and obstacles that informal workers face in accessing information and exercising their labour rights under national laws and international standards; and 3) propose appropriate approaches to promote access to labour rights and protection in accordance with human rights principles, suitable for the context of informal workers in Khon Kaen Province. This qualitative research collected data from seven key informants selected through purposive sampling. Semi-structured interviews were conducted, and the data were analyzed using content analysis. The research findings revealed that: 1) informants had a basic understanding and awareness of labour rights; 2) problems and obstacles to accessing information and legal protection of labour rights included: 2.1) a lack of in-depth understanding of legal labour rights; 2.2) the majority of informal workers had never sought assistance from government agencies or organizations, relying instead on information gathered from social media; 2.3) discrimination in the workplace; and 2.4) insufficient access to information and labour protection. 3) Recommendations for promoting access to informal labour rights and protection based on human rights principles included: 3.1) the government should implement clear and easily accessible public awareness campaigns; 3.2) appropriate and fair wage standards should be established, and written employment contracts should be in place; and 3.3) complaint procedures should be streamlined, and stricter measures should be taken to penalize employers or business owners who exploit workers.

1. บทนำ

ด้วยการเติบโตของระบบเศรษฐกิจแบบทุนนิยม มีการค้าแบบเสรี ทำให้เรื่องของสิทธิแรงงานได้กลายเป็นหนึ่งในการขับเคลื่อนสังคมในปัจจุบัน แม้ว่าจะมีการกำหนดนโยบายและมีการออกกฎหมายคุ้มครองสิทธิแรงงาน แต่ในทางปฏิบัติแล้วนั้นยังคงมีแรงงานจำนวนมากตกอยู่ในสถานการณ์ที่ยังไม่ได้รับความเป็นธรรมและยังไม่ได้ได้รับความคุ้มครองตามกฎหมายตามสิทธิขั้นพื้นฐานตามที่ควรจะเป็น (ชลนภา และ ศยามล, 2565)

การคุ้มครองสิทธิแรงงานนั้นไม่ใช่ประเด็นที่ถูกจำกัดอยู่แค่ภายในเรื่องของกฎหมาย แต่เป็นประเด็นที่มีเพียงเกี่ยวข้องโดยตรงกับหลักสิทธิมนุษยชน ซึ่งว่ายึดถือว่ามนุษย์ทุกคนนั้นมีศักดิ์ศรีเท่าเทียมกัน และควรได้รับการปฏิบัติอย่างเท่าเทียมและเป็นธรรม โดยที่หลักสิทธิมนุษยชนขั้นพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับแรงงานนั้นมีปรากฏอยู่ในปฏิญญาสากลว่าด้วยสิทธิมนุษยชน ค.ศ. 1948 (Universal Declaration of Human Rights: UDHR) ที่บัญญัติไว้ในข้อ 23 และข้อ 24 ซึ่งกล่าวถึงสิทธิในการทำงาน การเลือกงานอย่างเสรี ค่าจ้างที่เป็นธรรม การจัดตั้งสหภาพแรงงาน และการพักผ่อนหย่อนใจ นอกจากนี้ยังมิใช่อำนาจขององค์การแรงงานระหว่างประเทศ (ILO)

หลายฉบับที่ประเทศไทยเป็นภาคีหรืออ้างอิงแนวปฏิบัติ เช่น อนุสัญญาว่าด้วยเสรีภาพในการรวมตัวและการเจรจาต่อรอง (ฉบับที่ 87 และ 98) (สำนักงานแรงงานระหว่างประเทศ, 2551)

แม้จะมีกฎหมายและกรอบแนวปฏิบัติด้านสิทธิแรงงานในระดับสากล ทั้งจากปฏิญญาสากลว่าด้วยสิทธิมนุษยชน (UDHR) และอนุสัญญาองค์การแรงงานระหว่างประเทศ (ILO) ที่ประเทศไทยให้การยอมรับหรือใช้เป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายแรงงานระดับชาติ แต่ในทางปฏิบัติกลับพบว่าแรงงานจำนวนมาก โดยเฉพาะในภูมิภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังคงเข้าไม่ถึงสิทธิแรงงานพื้นฐานอย่างเป็นรูปธรรม ปัญหานี้เห็นได้ชัดในกลุ่มแรงงานนอกระบบซึ่งครอบคลุมแรงงานหลากหลายประเภท เช่น แรงงานในภาคเกษตรกรรมที่มีลักษณะการทำงานเป็นรายวันหรือเป็นงานตามฤดูกาล แรงงานรับจ้างทั่วไปในเขตชุมชนเมืองหรือกึ่งเมืองที่ไม่มีนายจ้างประจำ แรงงานก่อสร้างที่ต้องโยกย้ายตามไซต์งาน หรือแม้กระทั่งแรงงานข้ามชาติจากประเทศเพื่อนบ้านที่เข้ามาทำงานโดยถูกต้องหรือผิดกฎหมาย ซึ่งแรงงานกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ไม่ได้ทำสัญญาจ้างเป็นลายลักษณ์อักษร ขาดความมั่นคงในการจ้างงานไม่มีหลักประกันด้านรายได้หรือความปลอดภัย ไม่มีการลงทะเบียนในระบบประกันสังคม และไม่ได้รับสวัสดิการแรงงานอย่างเหมาะสม ทั้งยังประสบกับอุปสรรคในการเข้าถึงข้อมูลด้านสิทธิและกลไกการร้องเรียน อีกทั้งยังมิได้มีการรวมกลุ่มหรือการจัดตั้งองค์กรแรงงานที่มีพลังต่อรอง ทำให้ไม่สามารถเรียกร้องหรือปกป้องสิทธิของตนเองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในสังคมวัฒนธรรมแบบไทยที่แรงงานบางกลุ่มมีทัศนคติ “ยอมอดทน” หรือ “ไม่กล้าร้องเรียน” เพราะด้วยเหตุผลที่ว่ากลัวว่าตนเองจะถูกเลิกจ้างหรือถูกกีดกันจากการทำงานในอนาคต โดยจากข้อมูลของ สำนักงานสถิติแห่งชาติ (2566) ระบุว่าแรงงานนอกระบบในประเทศไทยมีจำนวนมากถึง 21.0 ล้านคน จากจำนวนผู้มีงานทำทั้งหมด 40.1 ล้านคน หรือคิดเป็นร้อยละ 52.4 ของแรงงานทั้งหมด ซึ่งมากกว่าแรงงานในระบบที่อยู่ภายใต้กฎหมายคุ้มครองแรงงานอย่างชัดเจน ตัวเลขดังกล่าวสะท้อนถึงความจริงที่ว่าแรงงานนอกระบบซึ่งถือเป็นกำลังแรงงานหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ กลับไม่ได้รับการคุ้มครองจากกลไกของรัฐอย่างทั่วถึง เนื่องจากไม่ได้เข้าเงื่อนไขของการเป็นลูกจ้างตามนิยามในพระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 ส่งผลให้สิทธิแรงงานที่ควรจะเป็นสากลและเป็นธรรมกลับกลายเป็นสิ่งที่ “เลือกปฏิบัติได้โดยง่าย” ผ่านโครงสร้างของกฎหมายและระบบการจ้างงานที่ยังไม่เอื้อต่อแรงงานทุกรูปแบบ ความเหลื่อมล้ำเชิงโครงสร้างเช่นนี้ยิ่งชัดเจนในพื้นที่ชนบทและกึ่งเมืองของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ซึ่งแรงงานจำนวนมากต้องพึ่งพารายได้ไม่แน่นอน ไม่มีหลักประกันทางเศรษฐกิจ และขาดโอกาสในการพัฒนาคุณภาพชีวิตอย่างยั่งยืน ปัญหาการเข้าไม่ถึงสิทธิแรงงานในกลุ่มนี้จึงไม่ใช่เพียงประเด็นเชิงแรงงานเท่านั้น แต่ยังสะท้อนถึงปัญหาด้านสิทธิมนุษยชนที่รัฐและสังคมต้องร่วมกันทบทวนและปรับปรุงเชิงนโยบายและกลไกการคุ้มครองในระยะยาวสอดคล้องกับ สถาบันวิจัยสังคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2565) ที่ระบุว่า สถานการณ์แรงงานนอกระบบในประเทศไทย โดยเน้นวิเคราะห์องค์ความรู้ ความเสี่ยง รวมถึงแนวปฏิบัติที่แรงงานนอกระบบนำมาใช้เพื่อรับมือกับสภาพความเปราะบางและความไม่มั่นคงในการทำงาน พบว่าแรงงานนอกระบบในประเทศไทยประสบกับความเปราะบางและความไม่มั่นคงอย่างรุนแรงในหลายด้าน ทั้งในแง่ของการเข้าถึงสิทธิประโยชน์และสวัสดิการทางสังคมที่ไม่เพียงพอ เช่น การไม่มีประกันสังคมที่ครอบคลุม การขาดสัญญาจ้างงานที่ชัดเจน และการไม่ได้รับความคุ้มครองทางสุขภาพและความปลอดภัยในที่ทำงาน ส่งผลให้แรงงานกลุ่มนี้ต้องเผชิญกับความเสี่ยงทางเศรษฐกิจและสังคมสูง เช่น ความเสี่ยงจากรายได้ไม่มั่นคง ความเสี่ยงต่อการเจ็บป่วยโดยไม่มีการดูแลรักษาที่เหมาะสม รวมถึงความเสี่ยงต่อการถูกเอาเปรียบและการถูกละเมิดสิทธิจากนายจ้างหรือระบบแรงงานที่ไม่เป็นธรรม

โดยภายในบริบทของจังหวัดขอนแก่นซึ่งเป็นศูนย์กลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะทางเศรษฐกิจที่มีความหลากหลาย ตั้งแต่ภาคเกษตรกรรม ภาคการผลิตในระดับครัวเรือน ภาคการค้าปลีกในเขตเมือง ไปจนถึงภาคอุตสาหกรรมขนาดย่อม ซึ่งทำให้จังหวัดขอนแก่นมีความหลากหลายของแรงงาน ไม่ว่าจะเป็นแรงงานในระบบ เช่น ลูกจ้างในโรงงาน แรงงานภาครัฐ และแรงงานนอกระบบที่ประกอบอาชีพอิสระหรือรับจ้างทั่วไป จากข้อมูลปี 2566 พบว่า ในจังหวัดขอนแก่นมีแรงงานนอกระบบจำนวน 701,347 คน โดยส่วนใหญ่ทำงานในภาคเกษตร จำนวน 408,983 คน (ร้อยละ 58.31) นอกภาคเกษตร จำนวน 292,364 คน (ร้อยละ 41.68) อายุของแรงงานนอกระบบส่วนใหญ่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป มีจำนวน 167,943 คน (ร้อยละ 23.95) ส่วนอาชีพที่มีการทำงานนอกระบบสูงสุด คือ ด้านการเกษตรและการประมง จำนวน 408,983 คน (ร้อยละ 58.31) สำหรับด้านการศึกษาแรงงานนอกระบบส่วนใหญ่มีการศึกษาอยู่ในระดับประถมศึกษา จำนวน 246,762 คน (ร้อยละ 35.18) (สำนักงานแรงงานจังหวัดขอนแก่น, 2568) อย่างไรก็ตามแรงงานบางส่วนภายในจังหวัดขอนแก่นนั้นต้องเผชิญกับปัญหาต่าง ๆ ได้แก่ การไม่รู้สิทธิของตนเอง การเข้าถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

กฎหมายแรงงานอย่างจำกัด การกลัวเสียงานหากมีการเรียกร้องสิทธิ หรือรวมไปถึงความเข้าใจแบบผิด ๆ เกี่ยวกับบทบาทของภาครัฐ ในการคุ้มครองแรงงาน และนอกเหนือจากนี้ยังมีปัจจัยเชิงโครงสร้าง เช่น การบังคับใช้กฎหมายอย่างจริงจัง เจ้าหน้าที่ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในการคุ้มครองแรงงานมีจำนวนน้อย หรือมีข้อจำกัดในการตรวจสอบสถานการณ์ภายในพื้นที่ที่ห่างไกล หรืออะไรก็ตามแต่ สิ่งเหล่านี้ ล้วนสะท้อนให้เห็นว่าการคุ้มครองแรงงานนั้นยังไม่บรรลุตามเป้าหมายตามหลักสิทธิมนุษยชนจากที่ควรจะเป็น (อุปลัทธิ, 2565)

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาเรื่องการเข้าถึงสิทธิแรงงานนอกระบบและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนของแรงงาน กรณีศึกษา แรงงานภาคบริการในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น เพื่อวิเคราะห์และสะท้อนภาพรวมของปัญหาและอุปสรรคที่แรงงานในพื้นที่ ต้องเผชิญ ข้อจำกัดเชิงโครงสร้างที่ทำให้แรงงานนอกระบบยังเข้าไม่ถึงสิทธิที่ควรได้รับอย่างเท่าเทียม พร้อมทั้งเป็นข้อมูลพื้นฐาน สำหรับการพัฒนาข้อเสนอเชิงนโยบายในระดับพื้นที่อย่างเหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อวิเคราะห์สถานการณ์การเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนรวมไปถึงการคุ้มครองแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น
2. เพื่อศึกษาปัญหาและอุปสรรคที่แรงงานนอกระบบเผชิญในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมายและมาตรฐานสากล
3. เพื่อเสนอแนวทางการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนที่เหมาะสมกับบริบทของแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ใช้วิธีการวิจัย 2 วิธี คือ การวิจัยเอกสาร (Documentary research) เป็นการรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการ เอกสารประกอบการบรรยาย สื่ออิเล็กทรอนิกส์ สารนิพนธ์ วิทยานิพนธ์ ระเบียบ ประกาศ คำสั่งที่เกี่ยวข้อง และการวิจัยสนาม (Field research) โดยผู้วิจัยลงพื้นที่เพื่อสัมภาษณ์ผู้ให้ข้อมูลด้วยการสัมภาษณ์แบบกึ่งมีโครงสร้าง (Semi-structured Interview) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ผู้ให้ข้อมูล คือ แรงงานนอกระบบที่อยู่ในภาคบริการ ซึ่งมีลักษณะงานที่หลากหลายและไม่ได้เจาะจง เช่น หาบเร่แผงลอย แม่ค้า ช่างตัดผม พนักงานร้านอาหาร ไนต์สส่งของ พนักงานพาร์ตไทม์ และผู้ให้บริการในลักษณะอื่น ๆ ผู้วิจัยทำการคัดเลือกแบบเจาะจง โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกผู้ให้ข้อมูล ดังนี้ 1.1) ต้องเป็นแรงงานนอกระบบในภาคบริการ ที่ไม่ได้อยู่ภายใต้กฎหมายคุ้มครองแรงงานในระบบ เช่น ไม่มีสัญญาจ้างงานระยะยาวหรือการประกันสังคมมาตรา 33 1.2) มีประสบการณ์การทำงานไม่น้อยกว่า 1 ปี เพื่อให้สามารถสะท้อนถึงประสบการณ์ในการเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนได้อย่างชัดเจน 1.3) มีความเต็มใจในการให้ข้อมูล และสามารถอธิบายประสบการณ์หรือความคิดเห็นได้อย่างอิสระ จำนวน 7 คน โดยเก็บรวบรวมข้อมูลช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน 2568

2. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ การสัมภาษณ์แบบกึ่งมีโครงสร้าง (Semi-structured Interview) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ตั้งคำถามที่กำหนดไว้ล่วงหน้าและเป็นคำถามปลายเปิดเพื่อให้ได้รับข้อมูลเชิงลึกมากขึ้นเกี่ยวกับมุมมอง ทักษะ และประสบการณ์ของผู้ให้สัมภาษณ์ ผู้วิจัยทำการตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือการวิจัยโดยให้ผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่านพิจารณาคำตรรกะ ความตรงตามเนื้อหา (อุไรวรรณ และ ชญาภา, 2560) ผลการตรวจสอบคุณภาพได้ดัชนีความตรงตามเนื้อหา 1.00

3. การวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์มาแยกเป็นประเด็น จากนั้นจึงวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละประเด็น โดยใช้วิธีการตีความตามหลักการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ เพื่อสรุปผลการวิจัยแยกเป็นประเด็น ๆ และเรียงลำดับตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ตั้งไว้ และนำผลการวิจัยมาเปรียบเทียบกับข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงลักษณะที่มีความคล้ายคลึงหรือแตกต่างกัน ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์กับข้อมูลจากเอกสาร เพื่อนำไปใช้ในการอภิปรายผล

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. ผู้ให้ข้อมูลซึ่งเป็นแรงงานนอกระบบส่วนใหญ่มีความเข้าใจและรับรู้สิทธิแรงงานในระดับพื้นฐานเท่านั้น โดยสามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญสถานการณ์การเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนรวมไปถึงการคุ้มครองแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น ดังนี้ 1) เรื่องค่าแรงขั้นต่ำตามที่กฎหมายกำหนดในระดับพื้นฐานเพียงเท่านั้น 2) สิทธิในการทำงานไม่เกิน วันละ 8 ชั่วโมง พร้อมทั้งสิทธิในการได้รับ เวลาพักระหว่างวัน เพื่อรักษาสุขภาพและประสิทธิภาพในการทำงาน 3) เข้าใจสิทธิในการได้รับ ค่าล่วงเวลา (โอที) เมื่อมีการทำงานเกินเวลาปกติ รวมถึงสิทธิในการได้รับ วันหยุดประเพณี ตามที่กฎหมายแรงงานกำหนด 4) ด้านสวัสดิการ ผู้ให้ข้อมูลส่วนใหญ่เข้าใจเพียงเรื่องพื้นฐาน เช่น การมีน้ำดื่ม ห้องน้ำสะอาด หรือสภาพแวดล้อมการทำงานที่ปลอดภัย แต่ยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับสิทธิในการได้รับสวัสดิการจากภาครัฐ

2. ปัญหาและอุปสรรคที่ผู้ให้ข้อมูลซึ่งเป็นแรงงานนอกระบบเผชิญในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมายและมาตรฐานสากล พบว่า 2.1) ขาดความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับสิทธิแรงงานตามกฎหมายทั้งหมด ขั้นตอนการร้องเรียน และการเข้าถึงหน่วยงานรัฐเพื่อขอความช่วยเหลือ จึงทำให้แรงงานนอกระบบหลายคนไม่ทราบว่าต้องติดต่อใครเมื่อเกิดปัญหา เช่น ถูกเอาเปรียบ ถูกกดค่าแรง หรือทำงานเกินเวลาที่ตกลง โดยผู้ให้ข้อมูลหลายคนระบุว่ามีความเข้าใจเพียงคร่าว ๆ และมักยอมรับเงื่อนไขจากนายจ้าง เนื่องจากไม่มั่นใจว่าจะได้รับการคุ้มครองหรือกลัวการเสียโอกาสในการทำงาน 2.2) แรงงานนอกระบบส่วนใหญ่ยังไม่เคยขอความช่วยเหลือจากหน่วยงานรัฐหรือองค์กรใด ๆ โดยอาศัยการหาข้อมูลเองจากสื่อสังคมออนไลน์ เช่น Facebook, TikTok หรือข่าวสารทั่วไป แต่ข้อมูลเหล่านั้นมักไม่ครบถ้วน ไม่ต่อเนื่อง และยากต่อการนำไปปฏิบัติจริง ส่งผลให้แรงงานพาร์ทไทม์หรือแรงงานนอกระบบไม่กล้าใช้สิทธิของตนเอง ดังข้อมูลจากผู้ให้สัมภาษณ์ที่ระบุว่า “ยังไม่เคยติดต่อหน่วยงานรัฐหรือองค์กรใด ๆ โดยตรงเพื่อขอความช่วยเหลือด้านสิทธิแรงงาน เนื่องจากทำงานพาร์ทไทม์ระยะสั้นและไม่ได้คิดว่าจะทำให้เป็นเรื่องใหญ่ ส่วนใหญ่จะค้นหาข้อมูลด้วยตนเองผ่านอินเทอร์เน็ต Facebook มีความเข้าใจคร่าว ๆ เกี่ยวกับกฎหมายแรงงาน แต่ยังไม่ได้นำไปใช้จริง” (การสัมภาษณ์บุคคล, 8 กันยายน 2568) 2.3) การเลือกปฏิบัติในที่ทำงานปรากฏในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การมอบหมายงานหนักเกินไป การให้โอกาสเฉพาะพนักงานเก่าหรือลูกรักนายจ้าง หรือแรงกดดันทางอ้อมผ่านการตำหนิหรือพฤติกรรมไม่เป็นมิตร แม้บางครั้งผู้ให้ข้อมูลไม่ได้เผชิญโดยตรง แต่รับรู้จากเพื่อนร่วมงาน การรับมือส่วนใหญ่คืออดทน ปรับตัว และทำงานเต็มที่เท่าที่ทำได้โดยไม่โต้ตอบ ซึ่งสะท้อนถึงความไม่มั่นคงและความกังวลต่อการสูญเสียรายได้และโอกาสในงาน และ 2.4) ปัญหาการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองแรงงานยังไม่เพียงพอ

3. แนวทางการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนที่เหมาะสมกับบริบทของแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น พบว่า 3.1) รัฐควรมีมาตรการประชาสัมพันธ์ที่ชัดเจนและเข้าถึงง่าย เช่น การอธิบายสิทธิเป็นภาษาที่เข้าใจง่าย จัดทำคลิปหรือคู่มือสั้น ๆ ระบุชัดเจนว่าต้องติดต่อหน่วยงานใดเมื่อต้องการร้องเรียน 3.2) ควรกำหนดมาตรฐานค่าแรงที่เหมาะสมและเป็นธรรม มีสัญญาจ้างงานเป็นลายลักษณ์อักษรแม้เป็นงานพาร์ทไทม์หรืองานเล็ก 3.3) ลดขั้นตอนการร้องเรียน และมีมาตรการเข้มงวดในการเอาผิดกับนายจ้างหรือเจ้าของกิจการที่เอาเปรียบแรงงาน พร้อมทั้งสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่เท่าเทียม มีความสัมพันธ์ที่ดีในที่ทำงาน และให้แรงงานนอกระบบสามารถเข้าถึงสวัสดิการและสิทธิพื้นฐานได้อย่างแท้จริง ทั้งนี้เพื่อให้แรงงานซึ่งเป็นกำลังสำคัญของประเทศได้รับการคุ้มครอง ลดการเอาเปรียบ และสร้างความมั่นคงในการทำงานได้อย่างแท้จริง

อภิปรายผล

สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 สถานการณ์การเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนรวมไปถึงการคุ้มครองแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น พบว่า ผู้ให้ข้อมูลสามารถเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนได้ โดยรับรู้ข้อมูลเรื่องค่าแรงขั้นต่ำตามที่กฎหมายกำหนดในระดับพื้นฐาน สิทธิในการทำงานไม่เกิน วันละ 8 ชั่วโมง พร้อมทั้งสิทธิในการได้รับ เวลาพักระหว่างวัน เพื่อรักษาสุขภาพและประสิทธิภาพในการทำงาน เข้าใจสิทธิในการได้รับ ค่าล่วงเวลา (โอที) เมื่อมีการทำงานเกินเวลาปกติ รวมถึงสิทธิในการได้รับ วันหยุดประเพณี ตามที่กฎหมายแรงงานกำหนด และด้านสวัสดิการ ผู้ให้ข้อมูลส่วนใหญ่เข้าใจเพียงเรื่องพื้นฐาน เช่น การมีน้ำดื่ม ห้องน้ำสะอาด หรือสภาพแวดล้อมการทำงานที่ปลอดภัย แต่ยังขาดความเข้าใจเกี่ยวกับสิทธิในการได้รับสวัสดิการจากภาครัฐ สอดคล้องกับ

การศึกษาของ ดุษฎี และ วณิชชา (2556) ที่พบว่าแรงงานนอกระบบที่รับงานไปทำที่บ้านในชนบทจังหวัดขอนแก่นมีความเข้าใจเรื่องสิทธิแรงงานตามพระราชบัญญัติคุ้มครองผู้รับงานไปทำที่บ้าน พ.ศ. 2553 โดยรวมอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลางเป็นส่วนใหญ่ โดยร้อยละ 52.5 อยู่ในระดับต่ำและร้อยละ 41.7 ในระดับปานกลาง มีเพียงร้อยละ 22.4 ที่เข้าใจในระดับสูง รายละเอียดพบว่าแรงงานส่วนใหญ่ไม่ทราบถึงกฎหมายคุ้มครองและการส่งเสริมสิทธิแรงงาน เช่น กว่า 60% ไม่ทราบว่ากฎหมายคุ้มครองและพระราชบัญญัติคุ้มครองผู้รับงานไปทำที่บ้านโดยเฉพาะ อีกทั้งส่วนใหญ่ไม่เข้าใจเรื่องสัญญาจ้าง การระบุนเริ่ม-สิ้นสุดงาน การหักค่าตอบแทน และมาตรการความปลอดภัยในการทำงาน เช่น การห้ามเด็กอายุต่ำกว่า 15 ปีและหญิงมีครรภ์รับงาน รวมถึงความรับผิดชอบของผู้จ้างงานในกรณีอุบัติเหตุหรือเจ็บป่วย นอกจากนี้ กว่า 70% ไม่ทราบบทกำหนดโทษกรณีผู้จ้างงานไม่จัดทำสัญญาหรือไม่จ่ายค่าตอบแทนตามกำหนด คณะนักวิจัยความเข้าใจของกลุ่มตัวอย่างอยู่ที่ 13.6 จาก 30 คะแนน ซึ่งสะท้อนถึงช่องว่างความรู้ด้านสิทธิแรงงาน สิทธิมนุษยชน และความเสี่ยงต่อการถูกเลือกปฏิบัติในกลุ่มแรงงานนอกระบบเหล่านี้อย่างชัดเจน

วัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ปัญหาและอุปสรรคที่แรงงานนอกระบบเผชิญในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมายและมาตรฐานสากล พบว่า ปัญหาและอุปสรรคที่ผู้ให้ข้อมูลซึ่งเป็นแรงงานนอกระบบเผชิญในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมายและมาตรฐานสากล มีดังนี้ 1) ขาดความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับสิทธิแรงงานตามกฎหมายทั้งหมด ขั้นตอนการร้องเรียน และการเข้าถึงหน่วยงานรัฐเพื่อขอความช่วยเหลือ จึงทำให้แรงงานนอกระบบหลายคนไม่ทราบว่าต้องติดต่อใคร เมื่อเกิดปัญหา เช่น ถูกเอาเปรียบ ถูกกดค่าแรง หรือทำงานเกินเวลาที่ตกลง โดยผู้ให้ข้อมูลหลายคนระบุว่ามีความเข้าใจเพียงคร่าว ๆ และมักยอมรับเงื่อนไขจากนายจ้าง เนื่องจากไม่มั่นใจว่าจะได้รับการคุ้มครองหรือกลัวการเสียโอกาสในการทำงาน 2) แรงงานนอกระบบส่วนใหญ่ยังไม่เคยขอความช่วยเหลือจากหน่วยงานรัฐหรือองค์กรใด ๆ โดยอาศัยการหาข้อมูลเองจากสื่อสังคมออนไลน์ เช่น Facebook, TikTok หรือข่าวสารทั่วไป แต่ข้อมูลเหล่านี้มักไม่ครบถ้วน ไม่ต่อเนื่อง และยากต่อการนำไปปฏิบัติจริง ส่งผลให้แรงงานพาร์ทไทม์หรือแรงงานนอกระบบไม่กล้าใช้สิทธิของตนเอง 3) การเลือกปฏิบัติในที่ทำงานปรากฏในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การมอบหมายงานหนักเกินไป การให้โอกาสเฉพาะพนักงานเก่าหรือลูกรักนายจ้าง หรือแรงกดดันทางอารมณ์ผ่านการตำหนิหรือพฤติกรรมไม่เป็นมิตร แม้บางครั้งผู้ให้ข้อมูลไม่ได้เผชิญโดยตรง แต่รับรู้จากเพื่อนร่วมงาน การรับมือส่วนใหญ่คืออดทน ปรับตัว และทำงานเต็มที่เท่าที่ทำได้โดยไม่โต้ตอบ ซึ่งสะท้อนถึงความไม่มั่นคงและความกังวลต่อการสูญเสียรายได้และโอกาสในงาน และ 4) ปัญหาการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองแรงงานยังไม่เพียงพอ สอดคล้องกับการศึกษาของ มูลนิธิสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย (2558) ที่ชี้ให้เห็นว่าแรงงานนอกระบบในประเทศไทยมีข้อจำกัดอย่างมากในการเข้าถึงข้อมูลและสิทธิประโยชน์ เนื่องจากกฎหมายแรงงานไทยมีนิยามแรงงานที่แคบ ขาดระบบขึ้นทะเบียนกลาง และไม่มีการบูรณาการข้อมูลระหว่างหน่วยงาน ส่งผลให้แรงงานกลุ่มนี้ไม่สามารถเข้าถึงบริการสวัสดิการและความช่วยเหลือจากรัฐได้อย่างเต็มที่ ทั้งการเข้าถึงการประกันสุขภาพ เงินชดเชยกรณีเจ็บป่วย หรือการฝึกอบรมพัฒนาทักษะก็มีอุปสรรค อีกทั้งแรงงานนอกระบบยังประสบปัญหาการไม่รู้สิทธิของตนเองและวิธีการเรียกร้องสิทธิ ทำให้ต้องเผชิญความเสี่ยงจากรายได้ไม่มั่นคง การถูกเอาเปรียบ หรือการละเมิดสิทธิแรงงานโดยไม่มีช่องทางแก้ไขที่ชัดเจน ผลจากความไม่เข้าถึงข้อมูลและความช่วยเหลือนี้สะท้อนถึงประสบการณ์การถูกเลือกปฏิบัติ ความเปราะบาง และความไม่มั่นคงในชีวิตของแรงงานนอกระบบอย่างชัดเจนสอดคล้องกับงานวิจัยหลายเรื่อง อาทิ งานวิจัยของ ปิยพัชร และคณะ (2566) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสถานะสิทธิและการคุ้มครองแรงงานนอกระบบในประเทศไทย งานวิจัยของ ณัฏชนันท์ (2562) ได้ทำการศึกษาปัญหากฎหมายเกี่ยวกับการคุ้มครองแรงงานลูกจ้างขององค์กรที่ไม่แสวงหากำไรและงานวิจัยของ กนกกุล และ ปุณยวีร์ (2566) ได้ทำศึกษาสภาพปัญหาและความคุ้มครองทางสังคมของผู้ประกอบอาชีพลูกจ้างแม่บ้าน ต่างสะท้อนข้อมูลว่า กฎระเบียบเกี่ยวกับแรงงานนอกระบบ ในทางปฏิบัติยังขาดความชัดเจนและมาตรการที่เป็นรูปธรรมในการคุ้มครองสิทธิในด้านต่าง ๆ เช่น สิทธิด้านรายได้ สุขภาพ สวัสดิการ และความปลอดภัยในการทำงาน ส่งผลให้แรงงานนอกระบบต้องเผชิญกับความไม่มั่นคงในชีวิตและความเสี่ยงต่อการถูกละเมิดสิทธิอย่างต่อเนื่อง

วัตถุประสงค์ข้อที่ 3 แนวทางการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนที่เหมาะสมกับบริบทของแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น พบว่า 1) รัฐควรมีมาตรการประชาสัมพันธ์ที่ชัดเจนและเข้าถึงง่าย เช่น การอธิบายสิทธิเป็นภาษาที่เข้าใจง่าย จัดทำคลิปหรือคู่มือสั้น ๆ ระบุชัดเจนว่าต้องติดต่อหน่วยงานใดเมื่อต้องการร้องเรียน สอดคล้องกับนิภาพรณ (2563) ที่ระบุว่า รัฐบาลควรเผยแพร่กฎหมายที่แรงงานต้องทราบ ได้แก่ กฎกระทรวงแรงงาน เรื่องการได้รับประโยชน์

ทดแทนในกรณีว่างงานเนื่องจากเหตุสุดวิสัยอันเกิดจากการระบาดของโรคติดต่ออันตรายตามกฎหมายว่าด้วยโรคติดต่อ พ.ศ. 2563 ข้อ 9 กฎกระทรวงแรงงาน เรื่อง การได้รับประโยชน์ทดแทนในกรณีว่างงานอันเนื่องมาได้รับผลกระทบจากสภาวะเศรษฐกิจ พ.ศ. 2563 กติการะหว่างประเทศว่าด้วยสิทธิทางเศรษฐกิจ สังคมและวัฒนธรรม (ICESCR) ข้อ 9 พระราชบัญญัติคุ้มครองแรงงาน พ.ศ. 2541 พระราชบัญญัติประกันสังคม พ.ศ. 2533 ซึ่งเป็นกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับแรงงานในช่องทางที่หลากหลายและคำนึงถึงรูปแบบการนำเสนอที่เข้าใจง่ายและส่งเสริมความรู้ด้านกฎหมายให้กับแรงงาน 2) ควรกำหนดมาตรฐานค่าแรงที่เหมาะสมและเป็นธรรม มีสัญญาจ้างงานเป็นลายลักษณ์อักษรแม้เป็นงานพาร์ทไทม์หรืองานเล็ก 3) ลดขั้นตอนการร้องเรียน และมีมาตรการเข้มงวดในการเอาผิดกับนายจ้างหรือเจ้าของกิจการที่เอาเปรียบแรงงาน พร้อมทั้งสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่เท่าเทียม มีความสัมพันธ์ที่ดีในที่ทำงาน และให้แรงงานนอกระบบสามารถเข้าถึงสวัสดิการและสิทธิพื้นฐานได้อย่างแท้จริง ทั้งนี้เพื่อให้แรงงานซึ่งเป็นกำลังสำคัญของประเทศได้รับการคุ้มครอง ลดการเอาเปรียบ และสร้างความมั่นคงในการทำงานได้อย่างแท้จริง สอดคล้องกับ สำนักงานแรงงานจังหวัดขอนแก่น (2565) ที่ระบุว่าสถานประกอบการหลายแห่งไม่ทราบหรือทราบไม่ครบทุกขั้นตอนเกี่ยวกับกฎหมายคุ้มครองแรงงาน และกฎหมายความปลอดภัยในการทำงาน จึงพบปัญหาไม่ปฏิบัติตามกฎหมายที่มีจำนวนมาก และสอดคล้องกับการศึกษาของ กานติมา (2564) ที่มีการเน้นย้ำถึงความสำคัญของการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานของแรงงานนอกระบบ โดยชี้ว่าแนวทางสำคัญควรเริ่มจากการปรับปรุงระบบสวัสดิการภาครัฐให้ครอบคลุมและเข้าถึงได้ง่ายสำหรับแรงงานทุกกลุ่ม ทั้งการลดขั้นตอนการลงทะเบียน การสื่อสารข้อมูลสิทธิและมาตรการช่วยเหลืออย่างชัดเจน รวมถึงการจัดทำช่องทางเข้าถึงข้อมูลที่เป็นมิตรต่อผู้ใช้ เช่น ศูนย์บริการข้อมูลแรงงาน นอกจากนี้ยังควรสร้างกลไกให้แรงงานนอกระบบสามารถเรียกร้องสิทธิและเข้าร่วมโครงการสวัสดิการได้อย่างสะดวก เช่น การใช้เทคโนโลยีดิจิทัล การจัดเวิร์กช็อปให้ความรู้เรื่องสิทธิแรงงานและการคุ้มครองทางสังคม รวมทั้งการเสริมสร้างความเข้าใจเรื่องความปลอดภัยและสวัสดิการในที่ทำงาน แนวทางเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อให้แรงงานนอกระบบสามารถเข้าถึงสิทธิของตนได้อย่างเต็มที่ ลดความเปราะบางทางเศรษฐกิจและสังคม และสร้างความมั่นคงและความเป็นธรรมในตลาดแรงงานไทยอย่างยั่งยืนด้าน และสอดคล้องกับ นิภาพรณ (2566) ที่ระบุว่าการพัฒนาอาชีพและการรวมกลุ่ม หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมพัฒนาฝีมือแรงงาน ศูนย์พัฒนาฝีมือแรงงานจังหวัด สำนักงานแรงงานจังหวัด ควรกำหนดและเผยแพร่เกณฑ์มาตรฐานของงานที่เป็นธรรม และส่งเสริมการให้ความรู้ทางการทำงาน การฝึกอบรมที่จำเป็นสำหรับการทำงานผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์และให้คำแนะนำทางการเงิน และส่งเสริมแรงงานแพลตฟอร์มให้รับรู้เงื่อนไขสำหรับการทำงานและมีส่วนร่วมในการกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทำงานระหว่างผู้จ้างงานและแรงงานเพื่อลดข้อพิพาทและความขัดแย้ง

4. บทสรุป

จากผลการวิจัยสะท้อนให้เห็นว่าสถานการณ์การเข้าถึงสิทธิแรงงานและสิทธิมนุษยชนรวมถึงการคุ้มครองแรงงานนอกระบบ ในจังหวัดขอนแก่น พบว่า ผู้ให้ข้อมูลซึ่งเป็นแรงงานนอกระบบส่วนใหญ่มีความเข้าใจและรับรู้สิทธิแรงงานในระดับพื้นฐานเท่านั้น และยังคงประสบปัญหาและอุปสรรคในการเข้าถึงข้อมูลและการคุ้มครองสิทธิแรงงานตามกฎหมายและมาตรฐานสากล ขาดความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับสิทธิแรงงานตามกฎหมาย ประกอบกับแรงงานนอกระบบส่วนใหญ่ยังไม่เคยขอความช่วยเหลือจากหน่วยงานรัฐหรือองค์กรใด ๆ โดยอาศัยการหาข้อมูลเองจากสื่อสังคมออนไลน์ที่เข้าถึงง่าย และเหมาะสมกับกลุ่มแรงงานนอกระบบซึ่งมีระดับการศึกษาที่แตกต่างกัน เช่น การใช้ภาษาที่เข้าใจง่ายในการอธิบายสิทธิแรงงาน การผลิตสื่อคลิปวิดีโอสั้น อินโฟกราฟิก หรือคู่มือการรู้สิทธิในรูปแบบที่เป็นมิตรต่อผู้ใช้ รวมถึงการระบุช่องทางการติดต่อร้องเรียนหรือขอความช่วยเหลือจากหน่วยงานรัฐอย่างชัดเจน โดยผู้ให้ข้อมูลได้เสนอแนะทางการส่งเสริมการเข้าถึงสิทธิแรงงานและการคุ้มครองตามหลักสิทธิมนุษยชนที่เหมาะสมกับบริบทของแรงงานนอกระบบในจังหวัดขอนแก่น คือ รัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรมีมาตรการประชาสัมพันธ์ที่ชัดเจนและเข้าถึงง่าย กำหนดมาตรฐานค่าแรงที่เหมาะสมและเป็นธรรม มีสัญญาจ้างงานเป็นลายลักษณ์อักษร และลดขั้นตอนการร้องเรียนด้วยการพัฒนา “ระบบร้องเรียนออนไลน์” ที่แรงงานสามารถเข้าถึงได้โดยไม่ต้องเดินทาง พร้อมมีมาตรการทางกฎหมายที่เข้มงวดในการดำเนินคดีกับนายจ้างหรือผู้ประกอบการที่ละเมิดสิทธิแรงงาน เพื่อสร้างบรรยากาศความยุติธรรมและความเชื่อมั่นในกระบวนการคุ้มครองสิทธิ และมีมาตรการเข้มงวดในการเอาผิดกับนายจ้างหรือเจ้าของกิจการที่เอาเปรียบแรงงาน ประกอบกับการสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่ปลอดภัย เท่าเทียม

และมีคุณภาพชีวิตที่ดี โดยส่งเสริมให้มีการอบรมด้านสิทธิมนุษยชนและแรงงานอย่างต่อเนื่องแก่ทั้งนายจ้างและลูกจ้าง รวมทั้งเปิดพื้นที่ให้แรงงานมีส่วนร่วมในการพัฒนานโยบายแรงงานในระดับท้องถิ่น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไปไว้ดังนี้

1. การขยายขอบเขตประชากรให้ครอบคลุมแรงงานนอกระบบในหลายประเภทอาชีพให้เจาะจงมากขึ้น เช่น แรงงานหาบเร่ แผงลอย แรงงานทำงานที่บ้าน หรือแรงงานด้านบริการในเมืองใหญ่และชนบท เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างในการรับรู้สิทธิแรงงานและประสบการณ์การเข้าถึงสิทธิของแรงงานแต่ละกลุ่ม
2. ควรศึกษาความคิดเห็นของผู้ประกอบการ นายจ้าง และเจ้าหน้าที่รัฐที่เกี่ยวข้อง ร่วมกับแรงงานนอกระบบ เพื่อให้เข้าใจมุมมองของทุกภาคส่วนอย่างรอบด้าน และสามารถหาจุดร่วมในการพัฒนากลไกคุ้มครองสิทธิแรงงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. ควรใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสม (Mixed Methods Research) โดยเก็บข้อมูลทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกและสามารถวัดระดับการรับรู้สิทธิแรงงานอย่างเป็นระบบ

เอกสารอ้างอิง

- กนกกุล เพชรอุทัย และปยุตยวีร์ หนูประกอบ. (2566). การศึกษาสภาพปัญหาและความคุ้มครองทางสังคมของผู้ประกอบอาชีพลูกจ้างแม่บ้าน. *วารสารสหวิทยาการนวัตกรรมการบริหาร*, 6(2), 229-245.
- กานติมา พงษ์นัยรัตน์. (2564). ผลกระทบของแรงงานนอกระบบจากการเข้าไม่ถึงสวัสดิการภาครัฐ ในช่วงสถานการณ์โควิด-19: กรณีศึกษาเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี. *วารสารรัฐศาสตร์รอบรู้และสหวิทยาการ*, 4(3), 29-44.
- ดุขฎิ อายุวัฒน์ และวณิชชา ณรงค์ชัย. (2556). ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับความเข้าใจเรื่องสิทธิแรงงานของแรงงานนอกระบบในชนบท จังหวัดขอนแก่น. *วารสารมนุษยศาสตร์ สังคมศาสตร์*, 30(1), 18-29.
- ชลนภา อนุกุล และศยามล เจริญรัตน์. (2565). กรอบคิดคุณค่าทางจริยธรรมว่าด้วยประเด็นแรงงาน. *วารสารความเป็นธรรมทางสังคมและความเหลื่อมล้ำ*, 3(3), 27-45.
- ณัชนันท์ ธรรมธ. (2562). ปัญหากฎหมายเกี่ยวกับการคุ้มครองแรงงานลูกจ้างขององค์กรที่ไม่แสวงหากำไร [วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต. <https://libdoc.dpu.ac.th/thesis/Natchanan.Tha.pdf>
- นิภาพรรณ เจนสันติกุล. (2563). แรงงานในสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโคโรนา (COVID-19): มาตรการของรัฐบาลและผลกระทบ. *วารสารสหวิทยาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์*, 3(3), 601-612.
- นิภาพรรณ เจนสันติกุล. (2566). มาตรฐานแรงงานและการคุ้มครองแรงงานในระบบเศรษฐกิจแพลตฟอร์มของประเทศไทย: บทสำรวจวรรณกรรมที่เผยแพร่ระหว่าง พ.ศ. 2562 - 2565. *วารสารสังคมศาสตร์บูรณาการ มหาวิทยาลัยมหิดล*, 10(2), 60-79.
- ปิยพัชร์ ภักดี, จิตาภา พรยิ่ง, และกรกฎ ทองชะโฮก. (2566). การเข้าถึงสิทธิขั้นพื้นฐานของแรงงานนอกระบบ: หาบเร่ แผงลอย. *วารสารวิชาการนิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ*, 11(1), 65-88.
- มูลนิธิสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. (2558). *โครงการพัฒนาระบบการคุ้มครองแรงงานเพื่อรองรับการเคลื่อนย้ายแรงงานเสรีอาเซียน: การจัดทำฐานข้อมูลระบบการคุ้มครองแรงงานของประเทศสมาชิกประชาคมอาเซียน 9 ประเทศ. กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน กระทรวงแรงงาน.*
https://tdri.or.th/wpcontent/uploads/2016/11/Labour_Dr_Yui_2016_10_03.pdf
- สถาบันวิจัยสังคม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2565). *สถานการณ์แรงงานนอกระบบ: สถานะองค์ความรู้ ความเสี่ยง และแนวปฏิบัติ และแผนพัฒนาคุณภาพชีวิตแรงงานนอกระบบ 3 ปี (พ.ศ 2565-2567).* สำนักงานกองทุนสนับสนุนการส่งเสริมสุขภาพ (สสส.)
- สำนักงานแรงงานจังหวัดขอนแก่น. (2565). *รายงานสถานการณ์และดัชนีชี้วัดภาวะด้านแรงงานจังหวัดขอนแก่น ไตรมาสที่ 3 (กรกฎาคม-กันยายน).* สำนักงานแรงงานจังหวัดขอนแก่น.

- สำนักงานแรงงานจังหวัดขอนแก่น. (2568). รายงานสถานการณ์และดัชนีชี้วัดภาวะแรงงานจังหวัดขอนแก่น รายปี 2567 (มกราคม-ธันวาคม). สำนักงานแรงงานจังหวัดขอนแก่น.
- สำนักงานแรงงานระหว่างประเทศ. (2551). มาตรฐานแรงงานระหว่างประเทศว่าด้วยสิทธิแรงงานข้ามชาติ แนวทางสำหรับผู้กำหนดนโยบายและผู้ปฏิบัติในเอเชียและแปซิฟิก. องค์การแรงงานระหว่างประเทศ.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2566). การสำรวจแรงงานนอกระบบ พ.ศ. 2566. สำนักงานสถิติแห่งชาติ.
- อุปลัทธิ กอวัฒนสกุล. (2565). แรงงานนอกระบบในไทย: ความเหลื่อมล้ำ ค่าแรง และความเสี่ยงในการทำงาน. <https://www.pier.or.th/abridged/2022/02/>
- อุไรวรรณ ชัยชนะวิโรจน์ และชญาภา วันทุม. (2560). การทดสอบความตรงตามเนื้อหาของเครื่องมือวิจัย. วารสารการพยาบาลและสุขภาพ, (ฉบับพิเศษ), 105-111.

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าจากลิกนินที่สกัดจากน้ำดำร่วมกับ
โซเดียมอัลจิเนต

Development of Slow-Release Nitrogen Fertilizer from Lignin
Extracted from Black Liquor Combined with Sodium Alginate

วัชร ทงเสมอ¹, นุชนาพร พิจารณ², สุนทรี แสงจันทร์^{1*}

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Wadchara Thongsamer¹, Nuchanaporn Pijarn², Suntree Sangjan^{1*}

¹ Division of Physics, Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

² Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, 34190, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: faasstp@ku.ac.th

Received: 09/06/2025; Revised: 31/01/2026; Accepted: 12/02/2026

คำสำคัญ	บทคัดย่อ
ปุ๋ยปลดปล่อยช้า ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ลิกนิน อัลจิเนต ไฮโดรเจล น้ำยางดำ	งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าโดยประยุกต์ใช้วัสดุชีวภาพและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ได้แก่ ลิกนินที่สกัดจากน้ำดำ (black liquor) ร่วมกับโซเดียมอัลจิเนต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยและลดการสูญเสียไนโตรเจนสู่สิ่งแวดล้อม ลิกนินที่สกัดได้ถูกนำมาศึกษาสัณฐานวิทยา องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างพันธะด้วยเทคนิค SEM, EDS และ FT-IR ตามลำดับ จากนั้นนำมาพัฒนาเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยยูเรียซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 46 โดยเตรียมปุ๋ยใน 3 รูปแบบ ได้แก่ ปุ๋ยที่ไม่ผ่านการเคลือบ ปุ๋ยเคลือบด้วยโซเดียมอัลจิเนต และปุ๋ยเคลือบด้วยสารเชิงประกอบโซเดียมอัลจิเนต/ลิกนิน (อัตราส่วน 1:1) แล้วศึกษาพฤติกรรมและจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 รูปแบบ ได้แก่ Zero-order, First-order, Higuchi, Korsmeyer–Peppas และ Hixson–Crowell ผลการศึกษาพบว่าชนิดของวัสดุเคลือบมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราและกลไกการปลดปล่อยไนโตรเจน โดยปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารเชิงประกอบโซเดียมอัลจิเนต/ลิกนินแสดงอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนช้าที่สุด และมีความสอดคล้องกับแบบจำลอง Higuchi มากที่สุด โดยมีค่าคงที่การปลดปล่อยลดลงจาก $0.211 \text{ h}^{-1/2}$ ในสูตรที่ไม่เคลือบ เหลือ $0.1064 \text{ h}^{-1/2}$ ในสูตรที่

เคลือบด้วยลิกนิน/อัลจิเนต แสดงให้เห็นว่าวัสดุเคลือบดังกล่าวสามารถชะลอการแพร่ของไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้สะท้อนถึงศักยภาพของการใช้วัสดุชีวภาพและของเสียจากอุตสาหกรรมในการพัฒนาปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพและเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อการเกษตรอย่างยั่งยืน

KEYWORDS

Slow-release fertilizers
Controlled release
fertilizers
Lignin
Alginate
Hydrogel
Black liquor

ABSTRACT

This research aims to develop a slow-release nitrogen fertilizer by applying biobased materials and industrial residues from the pulp and paper industry, specifically lignin extracted from black liquor, in combination with sodium alginate, to enhance fertilizer use efficiency and reduce nitrogen losses to the environment. The extracted lignin was characterized in terms of morphology, chemical composition, and bonding structure using SEM, EDS, and FT-IR techniques, respectively. The lignin was then utilized to develop a coating material for urea fertilizer containing 46% nitrogen. Three fertilizer formulations were prepared: uncoated fertilizer, fertilizer coated with sodium alginate, and fertilizer coated with a sodium alginate/lignin composite (1:1 ratio). The nitrogen release behavior and kinetics were investigated using five mathematical models: Zero-order, First-order, Higuchi, Korsmeyer–Peppas, and Hixson–Crowell. The results demonstrated that the type of coating material significantly affected the nitrogen release rate and mechanism. The fertilizer coated with the sodium alginate/lignin composite exhibited the slowest nitrogen release and showed the best agreement with the Higuchi model, with the release constant decreasing from $0.211 \text{ h}^{-1/2}$ for the uncoated formulation to $0.1064 \text{ h}^{-1/2}$ for the lignin/alginate-coated formulation. This indicates that the composite coating effectively retarded nitrogen diffusion. Overall, this research highlights the potential of utilizing biobased materials and industrial waste in the development of environmentally friendly slow-release fertilizers, aligning with the principles of the bioeconomy and circular economy for sustainable agriculture.

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรอย่างมหาศาลและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกปี โดยมีความจำเป็นในการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มทั้งปริมาณและรักษาคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในปัจจุบันการใช้ปุ๋ยเคมีทางการเกษตรเป็นความจำเป็นที่เกษตรกรต้องใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตและรักษาคุณภาพของผลผลิตให้เป็นไปตามความต้องการของตลาดที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยทั่วไปพืชสามารถใช้ประโยชน์จากปุ๋ยไนโตรเจนได้เพียงประมาณ 30–40% เท่านั้น ส่งผลให้ไนโตรเจนมากกว่าร้อยละ 60–70 สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านกระบวนการชะล้าง การระเหย และการดีไนริฟิเคชัน (Duan et al., 2022) อีกทั้งปุ๋ยที่ถูกชะล้างลงสู่สิ่งแวดล้อมนั้นยังสามารถก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศเหล่านั้น สุดท้ายแล้วก็จะกลับมาส่งผลต่อสุขภาพของประชาชนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นการสร้าง

นวัตกรรมที่สามารถนำปุ๋ยเคมีมาใช้อย่างคุ้มค่าและคุ้มค่ามากที่สุดจึงถูกคิดค้นขึ้น ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร (Controlled release fertilizers; CRFs) และปุ๋ยปลดปล่อยช้า (Slow release fertilizers; SRFs) จึงเป็นนวัตกรรมทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้ปุ๋ยเคมีถูกนำมาใช้อย่างคุ้มค่า เพื่อให้การปลดปล่อยธาตุอาหารเกิดขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด โดยปุ๋ยประเภท CRFs จะเป็นปุ๋ยที่สังเคราะห์ขึ้นให้มีความสามารถในการควบคุมระยะเวลาการปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชได้ตามระยะเวลาที่กำหนด ในขณะที่ปุ๋ยประเภท SRFs จะเป็นปุ๋ยที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อชะลอระยะเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ยาวนานขึ้น หากแต่ปุ๋ยชนิดนี้ยากแก่การควบคุมระยะเวลาการปลดปล่อยธาตุอาหารให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามการวิจัยและพัฒนาปุ๋ยทั้งสองชนิดที่กล่าวมานั้นมีจุดมุ่งหมายเดียวกันคือเพื่อให้พืชสามารถนำธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุดนั่นเองและลดการปนเปื้อนของธาตุอาหารเหล่านี้ลงสู่สิ่งแวดล้อมอันจะก่อให้เกิดมลพิษต่าง ๆ ตามมานั่นเอง

ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นปุ๋ยที่นำมาใช้ในภาคการเกษตรอย่างสูงสุดอีกทั้งเป็นปุ๋ยที่ง่ายต่อการถูกชะล้างลงสู่สิ่งแวดล้อมได้เร็วด้วย ดังนั้นจึงมีการวิจัยและพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าด้วยการสังเคราะห์ในหลากหลายเทคนิคด้วยกัน อาทิ การใช้ปฏิกิริยาทางเคมี การปรับเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพ การเติมสารเติมแต่ง และการเคลือบ เป็นต้น วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการสังเคราะห์ปุ๋ยปลดปล่อยมีด้วยกันหลายประเภทโดยส่วนใหญ่จะเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิตปิโตรเคมีภัณฑ์ อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้พอลิเมอร์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมนั้นก็ก่อให้เกิดปัญหามลพิษตามมาในภายหลังเนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้มีระยะเวลาในการสลายตัวที่ยาวนาน ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาปุ๋ยละลายช้าในปัจจุบันจึงมุ่งเน้นการใช้วัสดุจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่ก่อให้เกิดมลพิษในสิ่งแวดล้อมตามมาอีกด้วย โดยกระบวนการวิจัยและพัฒนาปุ๋ยปลดปล่อยช้าในปัจจุบันมีหลายรูปแบบด้วยกัน อาทิ การสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี การบรรจุธาตุอาหารลงในวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นพาหนะในการปลดปล่อยโดยวัสดุเหล่านี้จะต้องมีโครงสร้างเป็นวัสดุที่มีรูพรุนหรือมีโครงสร้างแบบชั้นเพื่อที่จะสามารถบรรจุโมเลกุลของปุ๋ยเข้าไปในโครงสร้างได้มากที่สุด การเคลือบปุ๋ยด้วยวัสดุที่ไม่สลายตัว การประยุกต์ใช้พอลิเมอร์ที่สลายตัวได้ในธรรมชาติมาเป็นวัสดุในการบรรจุโมเลกุลของปุ๋ยและการเก็บกักปุ๋ยในรูปแบบของวัสดุไฮโดรเจล เช่น แป้งมันสำปะหลัง ลิกนิน เซลลูโลส ไคโตซาน อัลจิเนต และวัสดุเชิงประกอบในระดับนาโน (Zhou et al., 2017; Chen et al., 2022) เป็นต้น

โซเดียมอัลจิเนตและลิกนินถูกเลือกใช้เป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยปลดปล่อยช้าเนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมและเสริมประสิทธิภาพซึ่งกันและกันอย่างชัดเจน โดยโซเดียมอัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพในกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลจำนวนมาก สามารถเกิดการเชื่อมขวางกับไอออนแคลเซียมทำให้เกิดโครงสร้างไฮโดรเจลสามมิติที่มีรูพรุน ส่งผลให้สามารถกักเก็บยูเรียและควบคุมการแพร่ของไนโตรเจนออกสู่สภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษ และมีต้นทุนต่ำ เหมาะต่อการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ อาทิ สารเพิ่มความหนืด สารก่อเจล บรรจุภัณฑ์ วัสดุการแพทย์ และวัสดุทางการแพทย์ (Zhang & Chen, 2023; Kenawy et al., 2017; Duan et al., 2022) ในขณะที่ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติในกลุ่มพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างอะโรมาติกซับซ้อนและมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่ฟีนอลิกไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิล ซึ่งสามารถเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับไอออนแอมโมเนียมและไนเตรต ช่วยตรึงไนโตรเจนไว้ภายในโครงสร้างเม็ดปุ๋ย อีกทั้งโครงสร้างที่หนาแน่นของลิกนินยังทำหน้าที่เป็นแนวกันการแพร่ ลดการซึมผ่านของน้ำและชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ariyanta et al., 2023) การใช้สารเชิงประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและลิกนินจึงช่วยผสมผสานข้อดีของการเป็นเมทริกซ์ไฮโดรเจลที่ควบคุมการบวมตัวเข้ากับคุณสมบัติการเป็น diffusion barrier ของลิกนิน ส่งผลให้ระบบเคลือบสามารถควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนได้ดีขึ้น ลดการสูญเสียปุ๋ย และสอดคล้องกับแนวคิดการใช้วัสดุชีวภาพและวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเพื่อการเกษตรอย่างยั่งยืน

ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างเป็นออสซิลอนซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนทีฟของโมโนเมอร์ฟีนิลโพรพานอยด์สามชนิดคือ โคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ ซิแนฟิลแอลกอฮอล์ และพี-คูมาริลแอลกอฮอล์ ลิกนินเป็นองค์ประกอบในของเสียจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีการวิจัยในการประยุกต์ใช้ลิกนินในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น วัสดุการเกษตร (Liu, et al., 2021; Lu et al., 2021; Ariyanta et al., 2023) การนำลิกนินมาเป็นวัสดุผสมเนื้อในการผลิตคอนกรีต (Binh et al., 2009) และการนำมาใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการปิโตรเลียม

(Cazacu et al., 2004) ลิกนินมีอยู่ในผนังเซลล์ของพืชที่มีท่อลำเลียงและในลำต้นที่แข็งและอ่อนไม้ เช่น เส้นใยไม้ ภาชนะ และหลอดลม ซึ่งมีลิกนินอยู่ประมาณ 20–30 โดยน้ำหนัก (Bonini et al., 2005) ปัจจุบันพบว่าอัตราการใช้กระดาษต่อประชากรในประเทศไทยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกระดาษถูกนำมาประยุกต์ในด้านต่างๆ มากมาย ส่งผลให้อัตราการบริโภคกระดาษของคนไทยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ปี สอดคล้องกับการรายงานภาวะการผลิตเยื่อกระดาษและกระดาษของสำนักเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการผลิตกระดาษที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่ออัตราการผลิตกระดาษเพิ่มมากขึ้นจึงเป็นเหตุให้ของเสียที่เกิดจากการผลิตก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน น้ำดำ (Black liquor) คือของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเพิ่มความยุ่งยากให้กับระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำดำมีลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 12 – 20% ถือเป็นปริมาณที่ไม่มากแต่เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำดำที่เกิดจาก กระบวนการผลิตโดยรวมแล้วถือว่าเป็นปริมาณที่มีนัยสำคัญ ลิกนินเป็นสารประกอบในวัตถุดิบชีวมวลที่อุตสาหกรรมกระดาษจำเป็นต้องกำจัดออก เพราะเป็นสารที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์กระดาษ ทั้งด้านสี ผิวสัมผัส และการทนทานต่อความชื้น ซึ่งสารปริมาณมหาศาลนี้มักนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไฟฟ้าเพื่อลดต้นทุนด้านพลังงานเท่านั้น

งานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรมกระดาษและวัสดุชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในการผลิตปุ๋ยละลายช้า โครงการวิจัยนี้จะเน้นการสังเคราะห์และศึกษาปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าด้วยการใช้ลิกนินที่สกัดจากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ เพื่อลดปริมาณของเสียที่จะปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม หลังจากนั้นนำมาเตรียมเป็นปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าร่วมกับพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติคือโซเดียมอัลจิเนต แล้วนำมาศึกษาจากจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนต่อไป โดยมีเป้าประสงค์ในการใช้องค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีสมัยใหม่ และความคิดสร้างสรรค์ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อให้ตอบรับกับหลักการของแผนพัฒนาฯ ฉบับที่ 13 คือ การพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน เศรษฐกิจสีเขียว เพื่อพัฒนาไปสู่เศรษฐกิจที่ยั่งยืนต่อไป

2. วัตถุประสงค์และวิธีการ

2.1 การสกัดลิกนินจากน้ำดำซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

การสกัดลิกนินจากน้ำดำของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เริ่มต้นจากการนำน้ำดำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาเตรียมเป็นของผสมในน้ำกลั่นที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวล ปริมาตร 1000 mL หลังจากนั้นนำไปผ่านแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ค่า pH ของน้ำดำลดลงจากเดิมที่ประมาณ pH 12 เป็น pH 9 ซึ่งจะทำให้สารผสมเปลี่ยนที่จากสีดำเป็นสีเหลืองเข้ม หลังจากนั้นนำกรดอินทรีย์ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 5000 mL เติมลงไป ในของผสมน้ำดำแล้วกวนให้เข้ากันอย่างต่อเนื่องซึ่งจะทำให้ค่า pH ของของผสมมีค่าประมาณ 4 หลังจากนั้นวางทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงนำมาปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตะกอนลิกนินออกมาแล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะได้ผงลิกนินที่สกัดจากน้ำดำซึ่งเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษซึ่งจะนำไปใช้เป็นวัสดุในปุ๋ยปลดปล่อยช้าต่อไป (Luong, et al., 2011; Mennani et al., 2022; Jabli, 2023)

2.2 ศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของสารสกัดลิกนิน

ศึกษาโครงสร้างพันธะทางเคมีด้วย Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Alpha-E เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ functional โดยศึกษาจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในเม็ดปุ๋ย

ศึกษาสัณฐานวิทยาของลิกนินด้วย Scanning electron microscopy (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ยี่ห้อ Tescan รุ่น Mira 3

2.3 การสังเคราะห์ปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าจากพอลิเมอร์ชีวภาพโซเดียมอัลจิเนต

2.3.1 การขึ้นรูปเม็ดปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้า

ปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ปุ๋ยยูเรีย (Urea) ซึ่งมีสูตรเคมีเป็น $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ และมีปริมาณไนโตรเจนคิดเป็น ร้อยละ 46 โดยน้ำหนัก (46% N) โดยในกระบวนการเตรียมเม็ดปุ๋ยได้ใช้ยูเรียในปริมาณเท่ากันในทุกสูตรทดลอง ได้แก่ สูตรไม่เคลือบ (uncoat) สูตรเคลือบด้วยโซเดียมอัลจิเนต (SA coat) และสูตรเคลือบด้วยสารเชิงประกอบโซเดียมอัลจิเนต/ลิกนิน (Lignin/SA coat) เพื่อควบคุมให้ปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้นในระบบมีค่าเท่ากันทุกกรณี การควบคุมดังกล่าวทำให้การเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยไนโตรเจนและการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของปุ๋ยแต่ละสูตรมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยผลที่แตกต่างกันที่พบจึงเกิดจากผลของวัสดุเคลือบและโครงสร้างเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นหลัก ไม่ใช่จากความแตกต่างของปริมาณไนโตรเจนเริ่มต้น

การขึ้นรูปเม็ดปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้ามีกระบวนการดังต่อไปนี้ นำโซเดียมอัลจิเนต 4 กรัม ละลายในน้ำ 50 mL ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง นำปุ๋ยยูเรีย 20 กรัม ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันกับอัลจิเนต นำไปปั่นขึ้นรูป แล้วนำไปเคลือบด้วยสารเคลือบที่เตรียมไว้ แล้วนำไปแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 6 wt% หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ (Uncoat)

2.3.2 การเคลือบเม็ดปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้า

a. การเตรียมสารเคลือบโซเดียมอัลจิเนต ด้วยการนำโซเดียมอัลจิเนต 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 mL กวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำมาเคลือบเม็ดปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่เตรียมไว้ปริมาณ 50 กรัม ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip Coating) แล้วนำไปแช่ในสารละลาย CaCl_2 6 wt% หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จะได้ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่เคลือบด้วยอัลจิเนต (SA Coat)

b. การเตรียมสารเคลือบลิกนินร่วมกับโซเดียมอัลจิเนต ด้วยการนำลิกนิน 2 กรัม และ โซเดียมอัลจิเนต 2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 mL กวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นนำมาเคลือบเม็ดปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่เตรียมไว้ปริมาณ 50 กรัม ด้วยกระบวนการจุ่มเคลือบ (Dip Coating) แล้วนำไปแช่ในสารละลาย CaCl_2 6 wt% หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง จะได้ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่เคลือบด้วยลิกนินร่วมกับโซเดียมอัลจิเนต (Lignin/SA Coat)

2.4 การศึกษาจลนศาสตร์การปลดปล่อยของปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้า

โดยนำเม็ดปุ๋ย 5 กรัม ใส่ลงในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 24 ชั่วโมง นำไปวัดปริมาณยูเรียด้วยวิธี Trichloroacetic acid (TCA)–4-Dimethylaminobenzaldehyde (DMAB) colorimetric assay เป็นการวิเคราะห์เชิงสีที่อาศัยการสร้างสารเชิงซ้อนที่มีสีเพื่อนำไปวัดด้วยเครื่อง UV–Visible spectrophotometer โดยเริ่มจากการนำ สารตัวอย่างหรือสารมาตรฐานยูเรียปริมาตร 1.0 mL เติม Trichloroacetic acid (TCA) ความเข้มข้น 10% (w/v) ปริมาตร 1.0 mL เพื่อทำให้โปรตีนและสารรบกวนตกตะกอน จากนั้นพักไว้ประมาณ 10 นาทีและแยกเอาส่วนใสด้วยการปั่นเหวี่ยงหรือกรอง นำสารใสปริมาตร 1.0 mL มาทำปฏิกิริยากับ DMAB reagent ปริมาตร 1.0 mL ซึ่งเตรียมจาก 4-Dimethylaminobenzaldehyde 1.6 g ละลายในเอทานอล 100 mL และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 mL เพื่อสร้างสภาวะกรดที่เหมาะสม เมื่อผสมแล้วบ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15–20 นาที จะเกิดสารเชิงซ้อนสีเหลืองถึงเหลืองอมส้ม ซึ่งมีความเข้มของสีแปรผันตรงกับความเข้มข้นของยูเรีย จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 435 นาโนเมตร โดยใช้สาร Blank ที่ประกอบด้วย TCA และ DMAB และนำค่า Absorbance ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานยูเรียเพื่อคำนวณปริมาณยูเรียในตัวอย่างการวัดปริมาณยูเรียด้วยวิธี Trichloroacetic acid (TCA)–4-Dimethylaminobenzaldehyde (DMAB) colorimetric assay เป็นการวิเคราะห์เชิงสีที่อาศัยการสร้างสารเชิงซ้อนที่มีสีเพื่อนำไปวัดด้วยเครื่อง UV–Visible spectrophotometer โดยเริ่มจากการนำ สารตัวอย่างหรือสารมาตรฐานยูเรียปริมาตร 1.0 mL เติม Trichloroacetic acid (TCA) ความเข้มข้น 10% (w/v) ปริมาตร 1.0 mL เพื่อทำให้โปรตีนและสารรบกวนตกตะกอน จากนั้นพักไว้ประมาณ 10 นาทีและแยกเอาส่วนใสด้วยการปั่นเหวี่ยงหรือกรอง นำสารใสปริมาตร 1.0 mL มาทำปฏิกิริยากับ DMAB reagent ปริมาตร 1.0 mL ซึ่งเตรียมจาก 4-Dimethylaminobenzaldehyde 1.6 g ละลายในเอทานอล 100 mL และเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 mL เพื่อสร้างสภาวะกรดที่เหมาะสม เมื่อผสมแล้วบ่มปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15–20 นาที จะเกิดสารเชิงซ้อนสี

เหลือถึงเหลืออมส้ม ซึ่งมีความเข้มข้นของสีแปรผันตรงกับความเข้มข้นของยูเรีย จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 435 นาโนเมตร โดยใช้สาร Blank ที่ประกอบด้วย TCA และ DMAB และนำค่า Absorbance ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานยูเรีย เพื่อคำนวณปริมาณยูเรียในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำมาศึกษาจลนศาสตร์การปลดปล่อยในรูปแบบต่างๆดังต่อไปนี้ (Duan et al., 2022)

2.4.1 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ (Zero-order model)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_0 t \quad (1)$$

เมื่อ M_t คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลา t ใดๆ, M_∞ คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลาสุดท้าย และ k_0 คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์

2.4.2 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง (First-order model)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - e^{-k_1 t} \quad (2)$$

เมื่อ M_t คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลา t ใดๆ, M_∞ คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลาสุดท้าย และ k_1 คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่ง

2.4.3 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยฮิกูชิ (Higuchi model)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_H t^{1/2} \quad (3)$$

เมื่อ M_t คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลา t ใดๆ, M_∞ คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลาสุดท้าย และ k_H คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยฮิกูชิ

2.4.4 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยคอสมeyer – เพบพาส (Korsmeyer-Peppas model)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_{KP} t^n \quad (4)$$

เมื่อ M_t คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลา t ใดๆ, M_∞ คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยออกมาที่เวลาสุดท้าย และ k_{KP} คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยคอสมeyer – เพบพาส

2.4.5 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยฮิกสัน ไครเวลล์ (Hixson Crowell model)

$$M_0^{1/3} - M_t^{1/3} = k_{HC} t \quad (5)$$

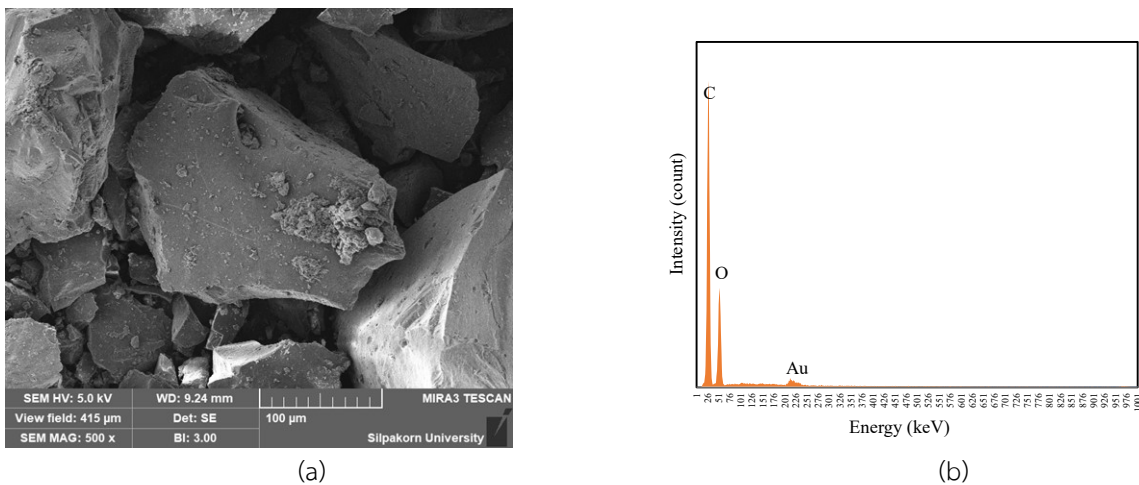
เมื่อ M_0 คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่เวลาเริ่มต้น, M_t คือ มวลของปุ๋ยยูเรียที่เหลืออยู่ในเม็ดปุ๋ย และ k_{HC} คือ ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยฮิกสัน ไครเวลล์

3. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของลิกนินด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด SEM แสดงดังภาพที่ 1 พบว่า ลิกนินมีลักษณะเป็นแผ่นและมีขนาดค่อนข้างแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าลิกนินมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของลิกนินที่สังเคราะห์จากน้ำยางดำที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ แสดงดังภาพที่ 1(a) แสดงสัณฐานวิทยาของลิกนินที่สกัดจากน้ำดำซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยเน้นการแสดงลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างทางกายภาพของอนุภาคลิกนิน พบว่าลิกนินมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด (flake-like structure) ที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ ขนาดของอนุภาคแตกต่างกัน และมีผิวค่อนข้างหยาบ ซึ่งสะท้อนถึงธรรมชาติของลิกนินที่เป็นพอลิเมอร์อสัณฐานและเกิดจากกระบวนการตกตะกอนด้วยการปรับค่า pH โครงสร้างดังกล่าวเอื้อต่อการเกิดพื้นที่ผิวสูงและการยึดเกาะกับพอลิเมอร์ชีวภาพเมื่อถูกนำไปใช้เป็นวัสดุผสมหรือวัสดุเคลือบปุ๋ยปลดปล่อยช้า

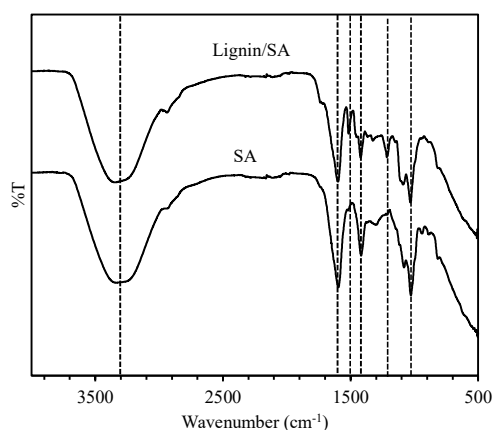
ในขณะที่ ภาพที่ 1(b) เป็นผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของลิกนินในบริเวณเดียวกันด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ซึ่งแสดงสเปกตรัมและสัดส่วนธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักของลิกนิน ผลการวิเคราะห์พบว่า

ลิกนินประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นหลัก โดยมีคาร์บอนประมาณร้อยละ 70 และออกซิเจนประมาณร้อยละ 30 ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของลิกนินที่เป็นพอลิฟีนอลจากชีวมวลพืช และยืนยันว่าลิกนินที่สกัดได้มีความบริสุทธิ์ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุชีวภาพ”



ภาพที่ 1 สันฐานวิทยาของลิกนินด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด SEM องค์ประกอบทางเคมีของลิกนินที่สังเคราะห์จากน้ำยางดำที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

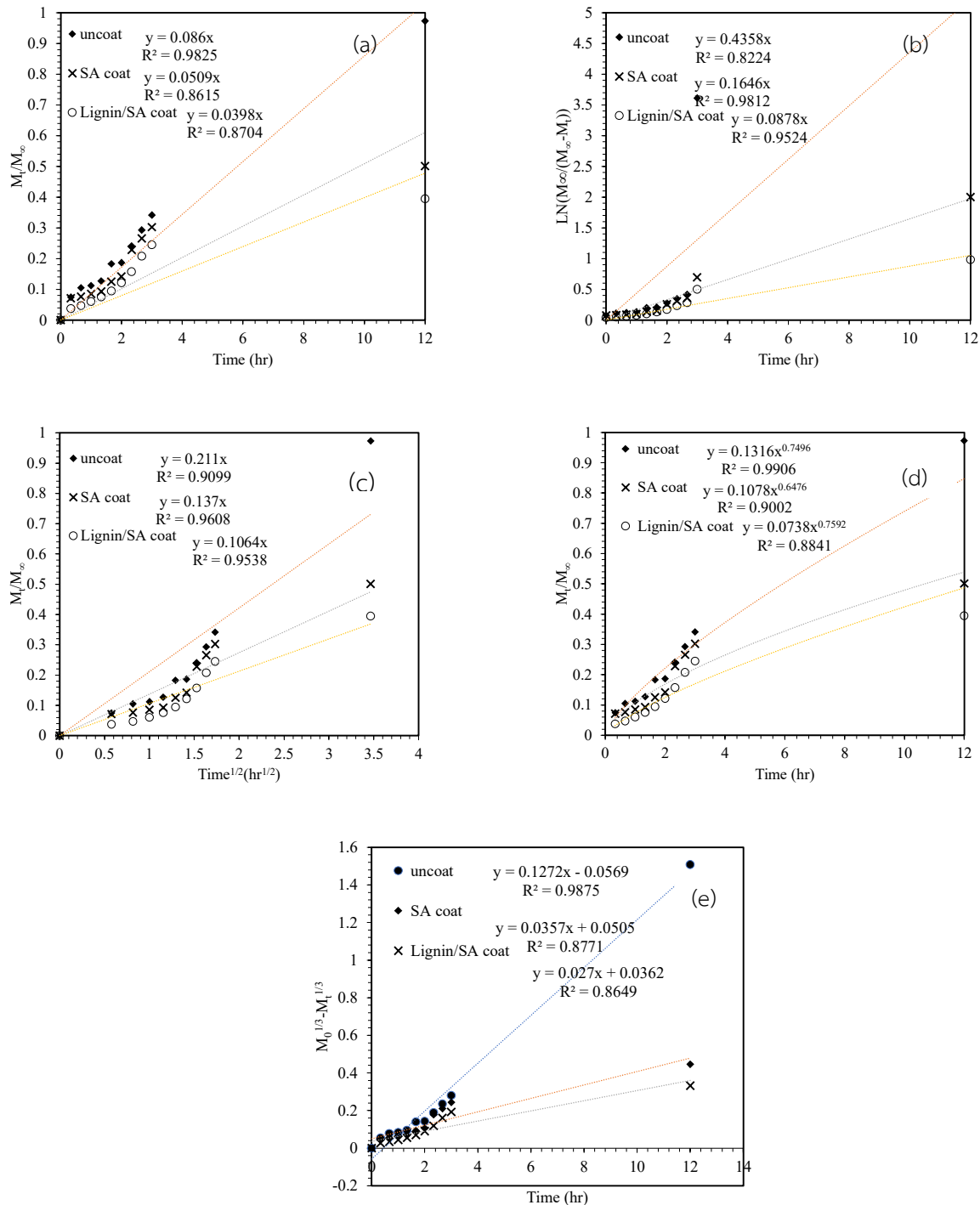
จากการศึกษาโครงสร้างพันธะทางเคมีของอัลจิเนตที่ใช้ในการเคลือบปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าด้วยกระบวนการ FTIR แสดงดังภาพที่ 2 ปรากฏพีคการสั่นที่เลขคลื่น 1030 cm^{-1} แสดงพันธะ primary alcohol (C-O) เลขคลื่น 1083 cm^{-1} แสดงพันธะ primary alcohol (C-O) เลขคลื่นที่ 1300 cm^{-1} แสดงพันธะ carboxyl (C-O) เลขคลื่นที่ 1417 cm^{-1} แสดงพันธะ (C=O) เลขคลื่น 1597 และที่เลขคลื่น 3356 cm^{-1} แสดงโครงสร้างพันธะ O-H จากโครงสร้างพันธะเคมีดังแสดงในกราฟ FTIR ข้างต้น สอดคล้องกับโครงสร้างพันธะทางเคมีของอัลจิเนต (วัชร, 2565) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของ manuronate และ guluronate หรือแสดงองค์ประกอบทางด้านเคมีเป็นไปตามสูตร $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_7)_n$ สำหรับลิกนินจะสังเกตพีค aromatic C=C skeletal ที่ $\sim 1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ และพีค C-O / C-H ที่ช่วง $1000\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$ (Hatakeyama & Hatakeyama, 2009; Belattmania et al., 2020)



ภาพที่ 2 โครงสร้างพันธะทางเคมีด้วยการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ FTIR ของอัลจิเนต(SA) และสารเชิงประกอบลิกนินร่วมกับอัลจิเนต (Lignin/SA) ในอัตราส่วนโดยมวลของโซเดียมอัลจิเนตและลิกนินในอัตราส่วน 1: 1

การวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ FTIR ของสารเชิงประกอบระหว่างอัลจิเนตและลิกนิน ในอัตราส่วนโดยมวลของโซเดียมอัลจิเนตและลิกนินในอัตราส่วน 1:1 พบว่า ปรากฏพีคการสั่นที่เลขคลื่น 1031 cm^{-1} แสดงพันธะอีเทอร์ (C-O) การสั่นที่เลขคลื่น 1306 cm^{-1} แสดงพันธะ carboxylic acid (C-O) การสั่นที่เลขคลื่น 1418 cm^{-1} แสดงพันธะ carboxylic acid (C=O) การสั่นที่เลขคลื่น

1595 cm^{-1} แสดงพันธะ amine และการสั่นที่เลขคลื่น 3357 cm^{-1} แสดงการสั่นของพันธะไฮดรอกซิล (O-H) กล่าวโดยสรุปได้ว่า ลิกนินมีโครงสร้างแบบอะโรมาติก (Aromatic structures) ประกอบด้วยมอนอเมอร์หลายชนิด ได้แก่ coniferyl, sinapyl และ p-coumaryl alcohols ที่เชื่อมต่อกันจนทำให้เกิดโมเลกุลชีวภาพขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน จากการวิเคราะห์โครงสร้างพันธะทางเคมีของ โซเดียมอัลจิเนตและสารเชิงประกอบโซเดียมอัลจิเนตและลิกนิน พบว่า มีโครงสร้างพันธะทางเคมีในรูปแบบเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก อัลจิเนตและลิกนินเป็นสารในกลุ่ม polysaccharide เช่นเดียวกัน ซึ่งสารประเภทนี้มีโครงสร้างพันธะไกลโคไซด์เช่นเดียวกันนั่นเอง



ภาพที่ 3 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบผิว (uncoat) ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยอัลจิเนต (SA) และ ลิกนินร่วมอัลจิเนต (Lignin/SA) ด้วยรูปแบบของ (a) Zero-order (b) First-order (c) Higuchi (d) Korsmeyer-Peppas และ (e) Hixson Crowell model

จากภาพที่ 3(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการปลดปล่อยไนโตรเจนและอัตราส่วนมวลของไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยต่อมวลไนโตรเจนที่ตำแหน่งสมดุล โดยสามารถคำนวณค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ (k_0) ได้จากค่าความชันของกราฟ พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์ของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนตและลิกนินในอัตรา 1:1 พบว่ามีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยลำดับที่ศูนย์เป็น 0.086, 0.0509 และ 0.0398 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่สังเคราะห์ขึ้นมีการปล่อยธาตุอาหารอย่างสม่ำเสมอในระยะเวลาอันยาวนานและมีอัตราการปลดปล่อยที่คงที่

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยลำดับที่ 1 แสดงการหาค่าคงที่การปลดปล่อยจากค่าความชันของกราฟ ภาพที่ 3(b) พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยลำดับที่หนึ่งของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนตและลิกนินในอัตรา 1:1 พบว่ามีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยลำดับที่หนึ่งเป็น 0.4358, 0.1646 และ 0.0878 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่เคลือบด้วยวัสดุผสมระหว่างอัลจิเนตและลิกนินมีอัตราการปลดปล่อยที่ช้าที่สุด เนื่องจากปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในปุ๋ยปลดปล่อยช้ามีปริมาณสูงที่สุดนั่นเอง

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi โดยสามารถคำนวณค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi (k_h) ได้จากค่าความชันของกราฟภาพที่ 3(c) พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยการปลดปล่อยของ Higuchi ของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนตและลิกนินในอัตรา 1:1 พบว่ามีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยของ Higuchi (k_h) เป็น 0.211, 0.137 และ 0.1064 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการปลดปล่อยการปลดปล่อยของ Higuchi เป็นรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบาย การปลดปล่อยของสารออกฤทธิ์จากวัสดุที่มีลักษณะเป็นเมทริกซ์ (matrix) เช่น พิล์ม เจล หรือเม็ดยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่กระบวนการควบคุมการปลดปล่อยเป็น การแพร่ (diffusion-controlled release)

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยอัลจิเนตและลิกนินด้วยรูปแบบของจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Korsmeyer-Peppas แสดงดังภาพที่ 3(d) สามารถคำนวณค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Korsmeyer-Peppas ได้จากค่ากราฟ exponential พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยการปลดปล่อยของ Korsmeyer-Peppas ของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนตและลิกนินในอัตรา 1:1 พบว่ามีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยของ Korsmeyer-Peppas เป็น 0.1316, 0.1078 และ 0.0738 ต่อชั่วโมง ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าค่าคงที่ n ในสมการของ Korsmeyer-Peppas มีค่าเป็น 0.7496, 0.6472 และ 0.7592 ตามลำดับ โดยตามทฤษฎีค่า n ที่มีค่าระหว่าง 0.5 – 1.0 แสดงถึงการปลดปล่อยเป็นแบบ non-fickian diffusion จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าปุ๋ยไนโตรเจนที่สังเคราะห์ร่วมกับอัลจิเนตโดยที่ปราศจากการเคลือบผิวนั้นมีการแพร่ฝ่ายของธาตุอาหารไนโตรเจนเป็นไปตามลักษณะการแพร่แบบ fickian diffusion กล่าวคือ ธาตุอาหารไนโตรเจนการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยอาศัยกฎการแพร่ของฟิค (Fick's Laws of Diffusion) ส่วนปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจิเนตและลิกนินในอัตรา 1:1 แสดงถึงการปลดปล่อยเป็นแบบ non-fickian diffusion คือการแพร่ของโมเลกุลที่ไม่เป็นไปตามกฎของฟิค กล่าวคือ อัตราการแพร่และรูปแบบการเคลื่อนที่ของโมเลกุลไม่สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Fickian diffusion ทั้งหมด ซึ่งมักเกิดขึ้นในระบบที่ซับซ้อนหรือมีข้อจำกัดบางอย่าง ทำให้การแพร่ในระบบเหล่านี้มีพฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่า โดยเฉพาะในวัสดุพอลิเมอร์ ของแข็งที่มีรูพรุน หรือสารที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเครียดหรือการบวมตัวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของโพลิเมอร์ โดยอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในของสารเมื่อทำการแพร่

โดยเม็ดปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกเตรียมโดยการปั้นขึ้นรูปด้วยมือก่อนนำไปผ่านกระบวนการเคลือบและการเชื่อมขวางด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ส่งผลให้เม็ดปุ๋ยมีลักษณะใกล้เคียง ทรงกลม (spherical shape) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงประมาณ 2–4 มิลลิเมตร ทั้งนี้แม้รูปร่างของเม็ดปุ๋ยจะไม่ใช่ทรงกลมสมบูรณ์แบบทางเรขาคณิต แต่สามารถพิจารณาเป็นทรงกลม

เชิงประมาณ (quasi-spherical geometry) ได้อย่างเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การปลดปล่อย ภายใต้สมมติฐานของเรขาคณิตแบบทรงกลม ค่า n จากแบบจำลอง Korsmeyer–Peppas ที่มีค่าต่ำกว่า 0.43 แสดงถึงการแพร่แบบ Fickian diffusion ในขณะที่ ค่า n อยู่ในช่วง 0.43–0.85 บ่งชี้ถึงการปลดปล่อยแบบ non-Fickian หรือ anomalous transport ซึ่งเป็นผลจากการผสมผสานระหว่างกระบวนการแพร่ของสารและการบวมตัวหรือการคลายตัวของเมทริกซ์พอลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าสูตรที่ไม่ผ่านการเคลือบ (uncoat) มีค่า n เท่ากับ 0.7496 ซึ่งอยู่ในช่วงของ non-Fickian diffusion อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่ากลไกการปลดปล่อยในโตรเจนของสูตรดังกล่าวไม่ได้ถูกควบคุมด้วยการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากการบวมตัวและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมทริกซ์อัลจินตในระหว่างการปลดปล่อย

จากการศึกษาการปลดปล่อยการปลดปล่อยของ Hixson Crowell โดยสามารถคำนวณค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Hixson Crowell ได้จากค่าความชันของกราฟภาพที่ 3(e) พบว่า ค่าคงที่การปลดปล่อยการปลดปล่อยของ Hixson Crowell ของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจินต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจินตและลิกนินในอัตรา 1:1 พบว่ามีค่าคงที่อัตราการปลดปล่อยของ Hixson Crowell เป็น 0.1272, 0.0357 และ 0.027 $\text{g}^{-1/3} \text{hr}^{-1}$ ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการปลดปล่อยการปลดปล่อยของ Hixson–Crowell ใช้สำหรับอธิบาย การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว เช่น ในกรณีที่วัสดุพาหะที่เกิดการสลายตัวไปเรื่อย ๆ (erosion) หรือหุดตัว/ยุบตัวขณะปลดปล่อยสาร เช่น เม็ดยาละลาย ปุ๋ยเม็ด หรือฟิล์มที่เสื่อมโครงสร้าง

ตารางที่ 1 จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบผิว (uncoat) ปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ผ่านกระบวนการเคลือบผิวด้วยอัลจินต (SA) และ ลิกนินร่วมอัลอัลจินต (Lignin/SA) ด้วยรูปแบบของ (a) Zero-order (b) First-order (c) Higuchi (d) Korsmeyer–Peppas และ (e) Hixson Crowell model

Sample	k_0 (hr^{-1})	R^2	k_1 (hr^{-1})	R^2	k_H ($\text{hr}^{-1/2}$)	R^2	k_K (hr^{-n})	n	R^2	k_{HC} ($\text{g}^{-1/3}\text{hr}^{-1}$)	R^2
uncoat	0.086	0.9825	0.4358	0.8224	0.211	0.9099	0.1316	0.7496	0.9906	0.1272	0.9875
SA coat	0.0509	0.8615	0.1646	0.9812	0.137	0.9608	0.1078	0.6472	0.9002	0.0357	0.8771
Lignin/ SA coat	0.0398	0.8704	0.0878	0.9524	0.1064	0.9538	0.0738	0.7592	0.8841	0.027	0.8649

เมื่อพิจารณาค่าคงที่จลนพลศาสตร์การปลดปล่อย (k) ที่แสดงในตารางที่ 1 ในเชิงแนวโน้ม (trend) พบว่าค่า k ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญหลังการเคลือบปุ๋ยด้วยโซเดียมอัลจินต และลดลงมากที่สุดเมื่อเคลือบด้วยสารเชิงประกอบโซเดียมอัลจินต/ลิกนิน มีความสอดคล้องกับรายงานในวรรณกรรมที่ระบุว่า การเพิ่มขึ้นเคลือบจากพอลิเมอร์ชีวภาพหรือการใช้วัสดุเชิงประกอบจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการแพร่ของธาตุอาหารและทำให้อัตราการปลดปล่อยลดลง งานวิจัยของ Kenawy et al. (2017) และ Chen et al. (2022) รายงานว่าปุ๋ยยูเรียที่ถูกกักเก็บในโครงสร้างไฮโดรเจลอัลจินตหรือพอลิเมอร์ชีวภาพอื่น ๆ ให้ค่าคงที่การปลดปล่อยตามแบบจำลอง Higuchi และ First-order ต่ำกว่าปุ๋ยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างชัดเจน ในขณะที่งานทบทวนของ Duan et al. (2022) ชี้ให้เห็นว่าปุ๋ยที่มีโครงสร้างเป็นเมทริกซ์พอลิเมอร์หรือมีชั้นเคลือบหลายองค์ประกอบมักแสดงค่า k ต่ำกว่า และมีพฤติกรรมการปลดปล่อยแบบ diffusion-controlled release ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยเฉพาะสูตรที่เคลือบด้วยสารเชิงประกอบโซเดียมอัลจินต/ลิกนินที่ให้ค่า k ต่ำที่สุดในทุกแบบจำลองที่ศึกษา

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าที่ปราศจากการเคลือบ ปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจินต และปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจินตและลิกนินในอัตรา 1:1 พบว่า รูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดคือจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยของ Higuchi แสดงให้เห็นว่ากระบวนการควบคุมการปลดปล่อยเป็นรูปแบบของการแพร่ (diffusion-controlled release) อีกทั้งปุ๋ยไนโตรเจนที่เคลือบด้วยอัลจินตและลิกนินพบว่ามีอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนช้าที่สุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยไนโตรเจนได้นานที่สุดนั่นเอง ทั้งนี้เนื่องมาจากลิกนินมีโครงสร้าง

แบบอะโรมาติก (Aromatic structures) ประกอบด้วยมอนอเมอร์หลายชนิด ได้แก่ coniferyl, sinapyl และ p-coumaryl alcohols ที่เชื่อมต่อกันจนทำให้เกิดโมเลกุลชีวภาพขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน โครงสร้างพันธะทางเคมีมีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิลส่งผลให้มีความสามารถในการสร้างพันธะกับแอมโมเนียมไอออน อีกทั้งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลสามารถสร้างพันธะยึดเหนี่ยวกับไนโตรเจนได้อีกทางหนึ่งด้วย ส่งผลให้สามารถตรึงไนโตรเจนไว้ในโครงสร้างของปุ๋ยปล่อยช้าได้ดีและเพิ่มระยะเวลาในการปลดปล่อยปุ๋ยไนโตรเจนได้นานขึ้นเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยปลดปล่อยช้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการปลดปล่อยธาตุอาหารแก่พืชได้อย่างคุ้มค่ามากที่สุด

งานวิจัยนี้มีความแตกต่างและความก้าวหน้าทางวิชาการจากงานวิจัยที่มีอยู่เดิมอย่างชัดเจน ทั้งในด้านแหล่งวัตถุดิบ แนวคิดการออกแบบวัสดุ และการอธิบายกลไกการปลดปล่อยไนโตรเจน โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่เกี่ยวกับปุ๋ยปลดปล่อยช้ามักใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์หรือไฮโดรเจลจากวัสดุชีวภาพเพียงชนิดเดียว เช่น แป้ง เซลลูโลส หรืออัลจิเนต เพื่อควบคุมการแพร่ของธาตุอาหารเป็นหลัก (Azeem et al., 2014; Chen et al., 2022; Duan et al., 2022) เพื่อควบคุมการแพร่ของธาตุอาหารเป็นหลัก ในขณะที่งานวิจัยนี้นำลิกนินที่สกัดจากน้ำดำซึ่งเป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษมาใช้ร่วมกับโซเดียมอัลจิเนตในรูปของสารเชิงประกอบเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ย ซึ่งไม่เพียงแต่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ควบคุมการแพร่ แต่ยังมีส่วนในการตรึงไนโตรเจนผ่านแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีจากหมู่ฟังก์ชันของลิกนิน ส่งผลให้กลไกการปลดปล่อยเปลี่ยนจากการแพร่แบบง่ายไปสู่การควบคุมการปลดปล่อยที่ซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นความเชื่อมโยงอย่างเป็นระบบระหว่างชนิดของวัสดุเคลือบกับพฤติกรรมการปลดปล่อยไนโตรเจนผ่านการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์หลายแบบ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการผสมลิกนินกับอัลจิเนตสามารถลดอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนได้อย่างมีนัยสำคัญและสอดคล้องกับแบบจำลอง Higuchi มากที่สุด ความโดดเด่นดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพในการพัฒนาปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพและเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งถือเป็นการต่อยอดองค์ความรู้และเพิ่มคุณค่าทางวิชาการจากงานวิจัยที่มีอยู่เดิมอย่างชัดเจน

4. บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้มุ่งพัฒนาปุ๋ยไนโตรเจนปลดปล่อยช้าโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษอย่างน้ำดำ (Black liquor) ซึ่งมีลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก โดยนำลิกนินที่สกัดได้มาผสมกับโซเดียมอัลจิเนตเพื่อสร้างเม็ดปุ๋ยในรูปแบบไฮโดรเจล จากนั้นนำเม็ดปุ๋ยไปเคลือบใน 3 รูปแบบ คือ ไม่เคลือบ เคลือบด้วยอัลจิเนต และเคลือบด้วยอัลจิเนตร่วมลิกนิน (1:1) แล้วศึกษาจลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ 5 แบบ ได้แก่ Zero-order, First-order, Higuchi, Korsmeyer-Peppas และ Hixson-Crowell พบว่าปุ๋ยที่เคลือบด้วยอัลจิเนตร่วมลิกนินสามารถควบคุมการปลดปล่อยไนโตรเจนได้ดีที่สุด โดยสอดคล้องกับโมเดล Higuchi มากที่สุด ส่งผลให้ธาตุอาหารไนโตรเจนปลดปล่อยช้าลงอย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนถึงศักยภาพของวัสดุชีวภาพในการเพิ่มมูลค่าของเสีย ลดการสูญเสียปุ๋ยและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เหมาะกับแนวทางการพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพและหมุนเวียนเพื่อความยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุนจาก สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ และศูนย์ส่งเสริมการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

วัชร ทอสมอ และสุนทรี แสงจันทร์. (2565). จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยไนโตรเจนของปุ๋ยปลดปล่อยช้าด้วยวัสดุผสมอัลจิเนต-ทัลคัมในรูปแบบแอโรเจล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, 11(2), 34-45.

- Ariyanta, H. A., Sari, F. P., Sohail, A., Restu, W. K., Septiyanti, M., Aryana, N., Fatriasari, W., & Kumar, A. (2023). Current roles of lignin for the agroindustry: Applications, challenges, and opportunities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124523. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124523>
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z. B., Basit, A., & Thanh, T. H. (2014). Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*, 181, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.02.020>
- Belattmania, Z., Kaidi, S., El Atouani, S., Katif, C., Bentiss, F., Jama, C., Reani, A., Sabour, B., & Vasconcelos, V. (2020). Isolation and FTIR-ATR and 1H NMR Characterization of Alginates from the Main Alginophyte Species of the Atlantic Coast of Morocco. *Molecules* (Basel, Switzerland), 25(18), 4335. <https://doi.org/10.3390/molecules25184335>
- Binh, N. T. T., Luong, N. D., Kim, D. O., Lee, S. H., Kim, B. J., Lee, Y. S., & Nam, J. D. (2009). Synthesis of lignin-based thermoplastic copolyester using kraft lignin as a macromonomer. *Compos Interfaces*, 16(7–9), 923–935.
- Bonini, C., D’Auria, M., Emanuele, L., Ferri, R., Pucciariello, R., & Sabia, A. R. (2005). Polyurethanes and polyesters from lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, 98(3), 1451–1456. <https://doi.org/10.1002/app.22277>
- Cazacu, G., Pascu, M. C., Profire, L., Kowarski, A. I., Mihaes, M., & Wasile, C. (2004) Lignin role in a complex polyolefin blend. *Industrial Crops and Products*, 20, 261–273.
- Chen, F., Miao, C., Duan, Q., Jiang, S., Liu, H., Ma, L., Li, Z., Bao, X., Lan, B., Chen, L., & Yu, L. (2022). Developing slow release fertilizer through in-situ radiation-synthesis of urea-embedded starch-based hydrogels. *Industrial Crops and Products*, 191, 115971. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115971>
- Duan, Q., Jiang, S., Chen, F., Li, Z., Ma, L., Song, Y., Yu, X., Chen, Y., Liu, H., & Yu, L. (2022). Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: A review. *Industrial Crops and Products*, 192, 116075. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116075>
- Hatakeyama, H., & Hatakeyama, T. (2009). Lignin Structure, Properties, and Applications. *Advances in Polymer Science*, 232, 1-63.
- Jabli, M. (2023). Preparation of alkali lignin extracted from ligno-cellulosic populus tremula fibers: Application to copper oxide nanoparticles synthesis, characterization, and methylene blue biosorption study. *International Journal of Biological Macromolecules*, 226, 956–964. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.097>
- Kenawy, E., Azaam, M. M., & El-Nshar, E. M. (2017). Sodium alginate-g-poly(acrylic acid-co-2-hydroxyethyl methacrylate)/montmorillonite superabsorbent composite: Preparation, swelling investigation and its application as a slow-release fertilizer. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(6), 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.10.013>
- Liu, X., Li, Y., Meng, Y., Lu, J., Cheng, Y., Tao, Y., & Wang, H. (2021). Pulping black liquor-based polymer hydrogel as water retention material and slow-release fertilizer. *Industrial Crops and Products*, 165, 113445. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113445>
- Lu, J., Cheng, M., Zhao, C., Li, B., Peng, H., Zhang, Y., Shao, Q., & Hassan, M. (2021). Application of lignin in preparation of slow-release fertilizer: Current status and future perspectives. *Industrial Crops and Products*, 176, 114267. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114267>

- Luong, N. D., Binh, N. T. T., Duong, L. D., Kim, D. O., Kim, D., Lee, S. H., Kim, B. J., Lee, Y. S., & Nam, J. (2011). An eco-friendly and efficient route of lignin extraction from black liquor and a lignin-based copolyester synthesis. *Polymer Bulletin*, 68(3), 879–890. <https://doi.org/10.1007/s00289-011-0658-x>
- Mennani, M., Benhamou, A. A., Kasbaji, M., Boussetta, A., Ablouh, E., Kassab, Z., Achaby, M. E., Boussetta, N., Grimi, N., & Moubarik, A. (2022). Insights on the physico-chemical properties of alkali lignins from different agro-industrial residues and their use in phenol-formaldehyde wood adhesive formulation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 221, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.191>
- Zhang, M., & Chen, H. (2023). Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123462>
- Zhou, T., Wang, Y., Huang, S., & Zhao, Y. (2017). Synthesis composite hydrogels from inorganic-organic hybrids based on leftover rice for environment-friendly controlled-release urea fertilizers. *The Science of the Total Environment*, 615, 422–430. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.084>

บทความวิจัย (Research Article)

การศึกษาสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่ใช้สีย้อมจากขมิ้น
Performance investigation of dye-sensitized solar cells using
Curcuma longa-derived dye

ทิพย์วรรณ รุ่งสว่าง¹, สุชีวัน กรอบทอง¹, กฤษฎา โส่งสิทธิ์²,
สุภาพ ชูพันธ์², สุทธิพนธ์ วงศ์ฤกษ์ดี^{1*}

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

Tipawan Rungsawang¹, Sucheewan Krobthong¹, Kritsada Hongsith²,
Supab Choopun², Sutthipoj Wongrerkdee^{1*}

¹ Department of Physical and Material Sciences, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

² Department of Physics and Materials Science, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiangmai 50200, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: sutthipoj.s@ku.ac.th

Received: 07/02/2026; Revised: 23/03/2026; Accepted: 23/03/2026

คำสำคัญ

เซลล์แสงอาทิตย์
สีย้อมธรรมชาติ
ขมิ้น
เคอร์คูมินอยด์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells; DSSCs) ที่ใช้สีย้อมธรรมชาติสกัดจากขมิ้นซึ่งมีสารสำคัญในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์เป็นตัวดูดกลืนแสงโดยสกัดด้วยเอทานอลและกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 820 rpm เป็นเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 25 °C จากนั้นเตรียมโพโตอิเล็กโทรดจากผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เคลือบลงบนกระจกนำไฟฟ้าและย้อมด้วยสารสกัดขมิ้น นำโพโตอิเล็กโทรดที่ย้อมสีมาประกอบกับแคโทดอิเล็กโทรดแพลทินัมเพื่อสร้างเซลล์ DSSCs เมื่อตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นด้วยเทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโตรสโกปีพบพีคการดูดกลืนที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 420 nm ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ ของโครงสร้างคอนจูเกตในโมเลกุลเคอร์คูมิน จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีพบหมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอนิลซึ่งช่วยเสริมการยึดเกาะของสีย้อมกับพื้นผิว ZnO ผลการทดสอบเซลล์ DSSCs พบว่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเท่ากับ $1.02 \pm 0.22 \text{ mA/cm}^2$ ค่าความต่างศักย์วงจเปิดเท่ากับ $0.35 \pm 0.01 \text{ V}$ และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ $0.13 \pm 0.04 \%$

แม้ว่าประสิทธิภาพของเซลล์ DSSCs จะอยู่ในระดับต่ำ แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสี
 ย้อมจากขมิ้นมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติสำหรับ DSSCs และสามารถ
 พิจารณาเป็นแนวทางในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

KEYWORDS

Solar cells
 Natural dyes
 Curcuma longa
 Curcuminoids

ABSTRACT

This work investigates the development of dye-sensitized solar cells (DSSCs) using a natural dye extracted from *Curcuma longa* powder in ethanol and magnetic stirring at 820 rpm for 30 minutes at 25 °C. A photoelectrode was then prepared from zinc oxide (ZnO) coating onto conductive glass and immersing in the extract dye. The dye-sensitized photoelectrode was assembled with a platinum counter electrode to fabricate the DSSCs. Optical characterization of the turmeric solution using ultraviolet-visible spectroscopy showed the absorption peak at 420 nm corresponding to the $\pi \rightarrow \pi^*$ electronic transition within the conjugated structure of curcumin molecules. Functional group analysis by Fourier transform infrared spectroscopy indicated the presence of hydroxyl and carbonyl groups, which enhance the anchoring of dye molecules onto ZnO surfaces. Photovoltaic test of the DSSCs showed the short-circuit current density and open-circuit voltage of $1.02 \pm 0.22 \text{ mA/cm}^2$ and $0.35 \pm 0.01 \text{ V}$, respectively, resulting in the power conversion efficiency of $0.13 \pm 0.04\%$. Although a low PCE was observed, the photovoltaic results demonstrate that turmeric-derived dye exhibits potential as a natural sensitizer for DSSC applications and may serve as a promising approach toward the development of low-cost and environmentally friendly solar cells.

1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cells; DSSCs) ทำงานบนหลักการของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากสีย้อมไวแสง (sensitizer) เมื่อได้รับพลังงานแสง แล้วถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ที่มักใช้เป็นชั้นโพโตอิเล็กโทรด (Grätzel, 2003) เช่น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) หรือไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) กระบวนการนี้ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญคือ การยึดเกาะของสีย้อมกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ผ่านพันธะเคมีและแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิต

สีย้อมไวแสง (Dye-sensitizer) เป็นองค์ประกอบหลักที่มีบทบาทโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSCs โดยสีย้อมเชิงพาณิชย์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมักเป็นสีย้อมโลหะเชิงซ้อน เช่น สีย้อมที่มีรูทีเนียม (Ru-based complexes) ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงในการดูดกลืนแสงและถ่ายโอนอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามสีย้อมดังกล่าวมีข้อจำกัดด้านต้นทุนที่สูง ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และกระบวนการสังเคราะห์ที่ซับซ้อน ส่งผลให้เกิดความสนใจในการพัฒนาสีย้อมทางเลือกจากธรรมชาติ (Natural dyes) ซึ่งมีข้อดีด้านความปลอดภัยในการหา ต้นทุนต่ำ ความปลอดภัย และความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยสีย้อมจากพืชหลายชนิดประกอบด้วยสารในกลุ่มโพลีฟีนอล แอนโทไซยานิน (Anthocyanins) (Calogero & Marco, 2008) และเคอร์คูมินอยด์ (Curcuminoids) (Sajan et al., 2011) ซึ่งมีโครงสร้างคอนจูเกตที่เหมาะสมต่อการดูดกลืนแสงในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่สารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ สีย้อมที่เหมาะสมสำหรับ DSSC จำเป็นต้องมีหมู่

ฟังก์ชันที่สามารถประสานกับพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำชนิดโลหะออกไซด์ เช่น ZnO โดยหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$), คาร์บอนิล ($-C=O$) และคาร์บอกซิลิก ($-COOH$) สามารถเกิดพันธะประสานกับไอออน Zn^{2+} บนพื้นผิว ทำให้สีย้อมยึดเกาะได้อย่างมั่นคงและมีเสถียรภาพสูง การยึดเกาะที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและลดการหลุดลอกของสีย้อมเท่านั้น แต่ยังเอื้อต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่องจากสีย้อมไปยังแถบนำไฟฟ้า (Conduction band; CB) ของ ZnO ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (Short-circuit current density; J_{sc}) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency; PCE) ของ DSSCs เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประสิทธิภาพดังกล่าวขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของสีย้อม ชนิดและจำนวนหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ยึดเกาะ รวมถึงความหนาแน่นและความสม่ำเสมอของฟิล์มสีย้อมบนพื้นผิวสารกึ่งตัวนำ

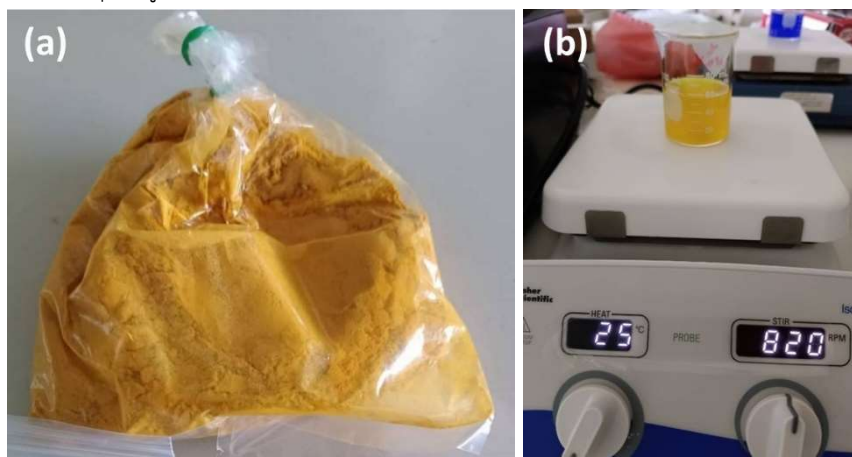
ขมิ้น (*Curcuma longa*) เป็นแหล่งสีย้อมธรรมชาติที่มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ใน DSSCs เนื่องจากมีสารสำคัญในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์โดยเฉพาะเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งมีโครงสร้างระบบคอนจูเกตพาย (π -conjugated system) ช่วยเสริมการดูดกลืนโฟตอนในย่านแสงที่มองเห็นได้ และเอื้อต่อการเกิดสถานะกระตุ้นที่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังสารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Sharma et al., 2023) นอกจากนี้ โมเลกุลของเคอร์คูมินยังประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันสำคัญ ได้แก่ $-OH$ และ $-C=O$ ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นหมู่ยึดเกาะ (Anchoring groups) โดยเกิดการประสานกับตำแหน่ง Zn^{2+} บนพื้นผิวของอนุภาค ZnO (Moussawi & Patra, 2016) ส่งผลให้เกิดการดูดซับสีย้อมบนผิวที่เพิ่มขึ้น ลดการชะล้างหรือการหลุดลอกของสีย้อมในระหว่างการทำงานของ DSSCs และเพิ่มความหนาแน่นของโมเลกุลสีย้อมครอบคลุมพื้นผิว ซึ่งจะช่วยเสริมกลไกการฉีดอิเล็กตรอน (electron injection) จากสีย้อมเข้าสู่ CB ของ ZnO พร้อมทั้งเพิ่มอัตราการขนส่งประจุต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นและนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของ DSSC นอกจากนี้เคอร์คูมินมีช่วงการดูดกลืนแสงที่เด่นในช่วงประมาณ 410-430 nm (Mardiyati et al., 2023) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ในย่านแสงที่มองเห็นได้ ทำให้สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับแสง (Light harvester) สำหรับ DSSC ได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนา DSSCs โดยใช้สีย้อมธรรมชาติจากขมิ้น เพื่อค้นหาและสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้สารสกัดจากวัสดุธรรมชาติเพื่อพัฒนาเซลล์ DSSCs ต้นทุนต่ำ รวมทั้งเสนอแนวทางการใช้สารธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีที่ยั่งยืน

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมสีย้อมไวแสงจากขมิ้น

นำผงขมิ้นสำเร็จรูปดังภาพที่ 1(a) ซึ่งซื้อจากร้านค้าในท้องถิ่น ปริมาณ 0.1 g ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 mL จากนั้นเติมเอทานอลปริมาตร 50 mL ใส่แท่งแม่เหล็กและปิดบีกเกอร์ด้วยพาราฟิล์ม แล้วนำไปกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กด้วยความเร็วรอบ 820 rpm เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C ดังภาพที่ 1(b) เพื่อให้ได้สารละลายสีย้อมจากขมิ้นที่พร้อมใช้งาน



ภาพที่ 1 (a) ผงขมิ้น (b) การเตรียมสารละลายขมิ้น

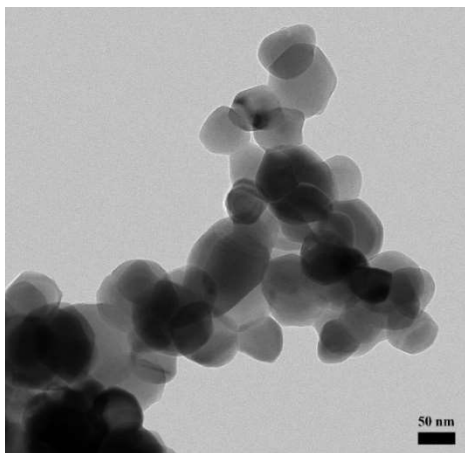
2.2 การเตรียมโฟโตอิเล็กโทรด

1) เตรียมแผ่นกระจกนำไฟฟ้า (F-doped SnO_2 ; FTO) ขนาด $2.0 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ทำความสะอาดด้วยกระบวนการอัลตราโซนิกในอะซิโตน (Acetone) น้ำปราศจากไอออน (De-ionized water; DI water) และเอทานอล (Ethanol) อย่างละ 30 นาที ตามลำดับเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนและคราบอินทรีย์บนพื้นผิว จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยลมร้อนและติดทับด้วยเทปกาวชนิดไม่เหนียวบนแผ่นกระจก โดยเว้นช่องตรงกลางขนาดประมาณ $0.5 \times 2.0 \text{ cm}^2$ เพื่อกำหนดพื้นที่สำหรับการเคลือบฟิล์ม ZnO ทั้งนี้ความหนาของฟิล์มจะควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาของเทปกาวคือประมาณ $52 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$

2) เตรียมสารเคลือบ ZnO โดยเตรียมสารละลาย 2-ethoxyethanol ในน้ำกลั่น (10% by weight) และกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมผง ZnO (ZnO powder) ในอัตราส่วน 4 กรัมต่อสารละลาย 2-ethoxyethanol ปริมาตร 10 mL และกวนต่ออีก 1 ชั่วโมงจนได้สารเคลือบ ZnO ที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทั้งนี้ตรวจสอบขนาดอนุภาค ZnO ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) ดังภาพที่ 2 และวัดขนาดอนุภาคโดยใช้ image-J software ได้ค่าเป็น $83.89 \pm 20.5 \text{ nm}$

3) นำสารแขวนลอย ZnO ที่เตรียมได้สกรีนลงบนแผ่นกระจกนำไฟฟ้าที่กำหนดพื้นที่ไว้ โดยควบคุมให้ฟิล์มมีความเรียบและหนาสม่ำเสมอ หลังจากปล่อยให้แห้งจึงลอกเทปกาวออก และนำแผ่นกระจก FTO ที่เคลือบด้วย ZnO ไปเผาที่อุณหภูมิ $400 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ฟิล์ม ZnO ที่เคลือบบนกระจก FTO

4) นำฟิล์ม ZnO วางใน Petri dish จากนั้นเติมสารละลายสีย้อมจากขมิ้นลงไปปริมาตร 40 mL แล้วปิดหุ้มด้วยพาราฟิล์มทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดแล้วนำฟิล์ม ZnO ที่ย้อมด้วยสารละลายขมิ้นมาล้างด้วยเมทานอลเพื่อชะตะกอนหรือสิ่งตกค้างออก โดยทำซ้ำกระบวนการย้อมด้วยสารละลายขมิ้นอีกครั้งเพื่อลดการรวมตัวหรือการเกาะกลุ่มของสีย้อม จากนั้นรอให้แห้งเพื่อนำไปประกอบเป็น DSSCs



ภาพที่ 2 อนุภาค ZnO ที่ใช้ในการทดลองมีขนาดอนุภาค $83.89 \pm 20.50 \text{ nm}$

2.3 การเตรียมแคโทดรีเล็กโทรด

การเตรียมแคโทดรีเล็กโทรดด้วยแพลตินัม (Pt) โดยใช้สารละลาย Pt สำเร็จรูปปริมาตร $40 \text{ }\mu\text{L}$ หยดลงบนกระจก FTO ที่ติดทับด้วยเทปกาวชนิดไม่เหนียวที่เว้นพื้นที่สำหรับการเคลือบฟิล์ม Pt ขนาดประมาณ $0.5 \times 2.0 \text{ cm}^2$ รอให้แห้งและลอกเทปกาวออก จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ $550 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แคโทดรีเล็กโทรดที่พร้อมนำไปใช้งาน

2.4 การประกอบเซลล์ DSSCs และวัดประสิทธิภาพ

ประกอบเซลล์ DSSCs โดยนำโฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดรีเล็กโทรดประกบเข้าด้วยกันโดยใช้แผ่นพาราฟิล์มเป็นแถบกันให้มีช่องว่างระหว่างโฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดรีเล็กโทรด เป่าด้วยลมร้อนเพื่อละลายพาราฟิล์มให้โฟโตอิเล็กโทรดและแคโทดรีเล็กโทรดยึดติดกันเป็นเซลล์ DSSCs จากนั้นหยดสารอิเล็กโทรไลต์ชนิด EL-HPE Electrode ปริมาตร $30 \text{ }\mu\text{L}$ และทำการทดสอบประสิทธิภาพภายใต้แหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์จำลอง (Solar Simulator, ABET) ความเข้มแสงขนาด 1000 W/m^2 พร้อมทำการบันทึก

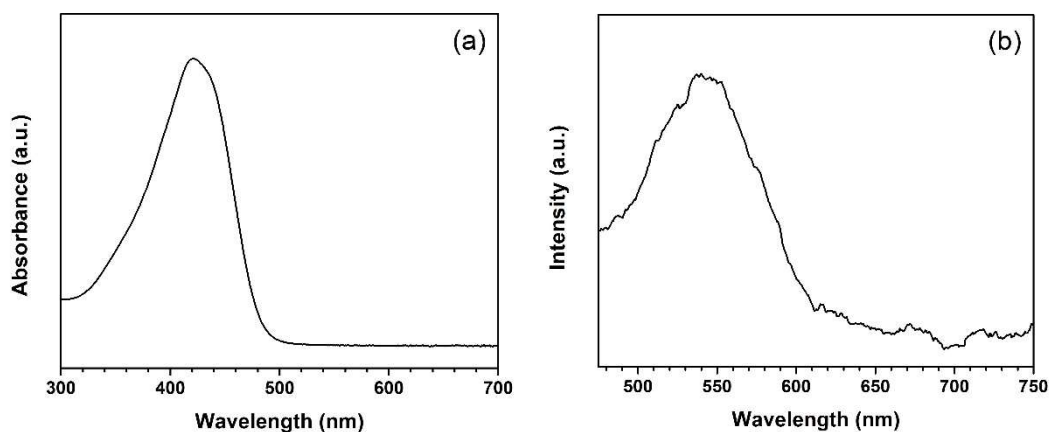
ค่าความหนาแน่นกระแส (Current density; J) เมื่อแปรค่าความต่างศักย์ (V) ในช่วง -0.1 ถึง 0.8 V ด้วยเครื่องวัดแหล่งจ่าย (Source Meter, KEITHLEY) โดยทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง

2.5 การศึกษาลักษณะจำเพาะ

วิเคราะห์สีย้อมจากขมิ้นโดยนำสารละลายขมิ้นเจือจางให้เหมาะสมแล้วนำไปวัดสมบัติเชิงแสงประกอบด้วยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล (Ultraviolet-visible spectrophotometer, Thermo Scientific BioMate 160; UV-Vis) เพื่อศึกษาช่วงความยาวคลื่นและลักษณะการดูดกลืนแสงของสีย้อมซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการดูดซับพลังงานแสงสำหรับการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ และการวัดการเรืองแสงด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโทรฟลูออโรมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer, Horiba Scientific FluoroMax+ Spectrofluorometer) โดยกระตุ้นตัวอย่างด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 405 nm เพื่อตรวจสอบลักษณะการเรืองแสงซึ่งสะท้อนพฤติกรรมการคายพลังงานของอิเล็กตรอน จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันของสารละลายขมิ้นด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy, PerkinElmer Scientific Spectrum Two; FTIR) โดยเปรียบเทียบผลการวัดจากผงสำเร็จรูปและสารละลายสีย้อมเพื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

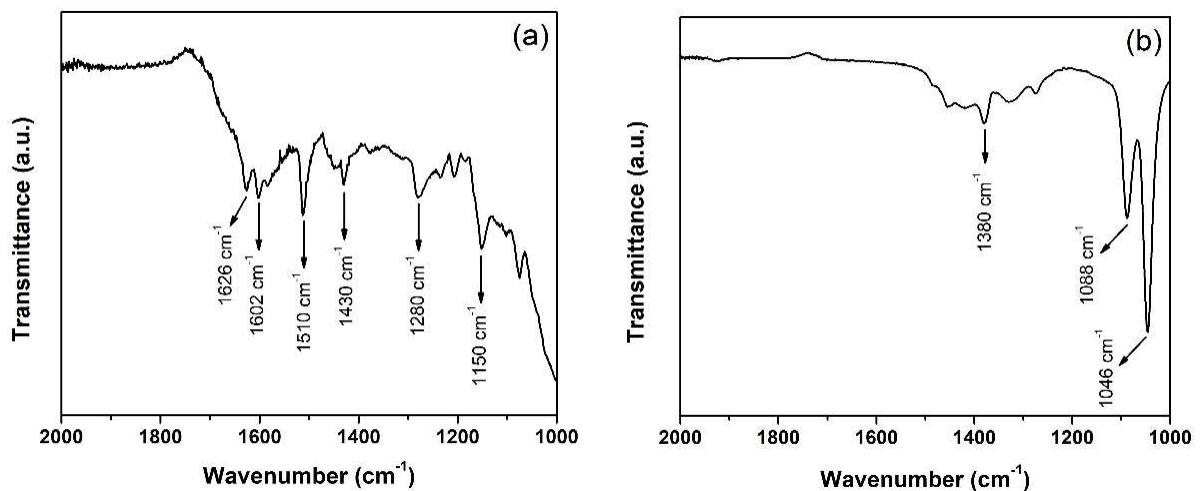
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นดังภาพที่ 3(a) พบพีกการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 420 nm ซึ่งเป็นพีกหลักที่อยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible region) โดยเป็นลักษณะเด่นของสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Gibbard, 2025) ที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ ของระบบพันธะคู่คอนจูเกต (Conjugated double bonds) ภายในโครงสร้างของเคอร์คูมิน (Rani et al., 2020) แสดงให้เห็นว่าสีย้อมขมิ้นสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงแสงสีน้ำเงิน-ม่วงได้ จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายขมิ้นบ่งบอกถึงโครงสร้างโมเลกุลที่มีระบบคอนจูเกตและหมู่ฟังก์ชันที่เอื้อต่อการดูดกลืนแสงทั้งในย่านอัลตราไวโอเลตและแสงที่ตามองเห็นได้ แสดงให้เห็นว่าสีย้อมขมิ้นมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติในเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs ได้ เมื่อพิจารณาสมบัติการเรืองแสงของสารละลายขมิ้นเมื่อกระตุ้นด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น 405 nm ดังภาพที่ 3(b) พบว่าการเรืองแสงเป็นแถบกว้างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500–600 nm โดยมีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 540-550 nm (Ferreira et al., 2023; Melo et al., 2024) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ที่มีโครงสร้างคอนจูเกตแบบ $\pi \rightarrow \pi^*$ เมื่อถูกกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนถูกย้ายจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น เมื่อเกิดการกลับสู่สถานะพื้นจะปลดปล่อยโฟตอนในช่วงสีเขียว-เหลือง การเลื่อนของความยาวคลื่นจาก 405 nm ไปยังช่วง 540-550 nm บ่งบอกถึงการสูญเสียพลังงานเชิงความร้อนก่อนการคายพลังงานแบบเรืองแสงเพื่อกลับสู่สถานะพื้นของอิเล็กตรอน ซึ่งการคายพลังงานแบบนี้ช่วยให้อิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าสู่แถบนำไฟฟ้าของ ZnO ด้วยแรงขับ (Driving force, ΔG_{inject}) (Wang et al., 2023) ได้ก่อนที่จะกลับไปสู่สถานะพื้นในโมเลกุลของขมิ้นเอง ซึ่งมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้เป็นสีย้อมไวแสง



ภาพที่ 3 (a) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง และ (b) สเปกตรัมการเรืองแสงของสารละลายขมิ้น

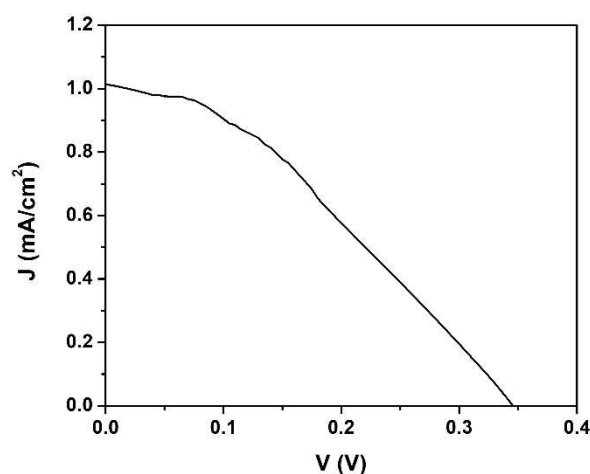
จากกราฟฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม (FTIR) ของผงเข้มน้ดงภาพที่ 4(a) พบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในช่วงเลขคลื่น 2000–1000 cm^{-1} ประกอบด้วยพีคที่ตำแหน่ง 1626 cm^{-1} และ 1602 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นผานกันของพันธะ C=O และ C=C ในโครงสร้างอะโรมาติกและพันธะคู่คอนจูเกตของสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Ciuca et al., 2023; Subhan et al., 2013) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเข้มน้ พีคที่ตำแหน่งประมาณ 1510 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการสั่นของวงแหวนเบนซีน (aromatic ring stretching) ขณะที่พีคบริเวณ 1430 cm^{-1} สอดคล้องกับหมู่เมทิล นอกจากนี้พีคที่ประมาณ 1280 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C–H ซึ่งมีพบในหมู่ฟีนอลิก (phenolic group) และเมทอกซี ($-\text{OCH}_3$) ที่เป็นลักษณะเฉพาะของโมเลกุลเคอร์คูมิน ส่วนพีคที่ตำแหน่งประมาณ 1150 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C–O–C หรือ C–O ซึ่งยืนยันการมีอยู่ของหมู่เอเทอร์และแอลกอฮอล์ในโครงสร้างของเข้มน้โดยรวม เมื่อทดสอบ FTIR ของสารละลายเข้มน้ในเอทานอลตามภาพที่ 4(b) พบพีคที่ตำแหน่ง 1380 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ bending ของพันธะ C–H ในหมู่เมทิลและเมทิลีน ($-\text{CH}_3$ และ $-\text{CH}_2-$) ซึ่งได้รับอิทธิพลจากทั้งโครงสร้างของสารเคอร์คูมินและเอทานอล ขณะที่พีคที่ตำแหน่ง 1088 cm^{-1} และ 1046 cm^{-1} มีความเข้มเด่นชัด ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C–O stretching ของหมู่แอลกอฮอล์และเอเทอร์ โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ของเอทานอลและหมู่ฟีนอลิกในโครงสร้างของเคอร์คูมิน การปรากฏพีคที่ชัดเจนในช่วงเลขคลื่นต่ำกว่า 1200 cm^{-1} นี้บ่งบอกถึงพันธะไฮโดรเจนระหว่างสีย้อมเข้มน้กับเอทานอล ซึ่งหมู่ C–O และ $-\text{OH}$ มีความสำคัญต่อการยึดเกาะของสีย้อมบนผิวสารกึ่งตัวนำ ZnO สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นเซลล์ DSSCs



ภาพที่ 4 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) ผงเข้มน้ (b) สารละลายเข้มน้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าดงแสดงในภาพที่ 5 และตารางที่ 1 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ DSSCs ให้ค่าความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (J_{sc}) เท่ากับ $1.02 \pm 0.22 \text{ mA/cm}^2$ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) เท่ากับ $0.35 \pm 0.01 \text{ V}$ แสดงให้เห็นว่าสีย้อมจากเข้มน้สามารถดูดกลืนแสงและผลิตประจุพาหะสำหรับเซลล์ DSSCs ได้ในระดับหนึ่ง โดยกลไกการทำงานของ DSSCs สามารถอธิบายได้ดงภาพที่ 6(a) ซึ่งเมื่อแสงตกกระทบบโมเลกุลของสีย้อม (Dye) อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานออร์บิทัลเชิงโมเลกุลที่ถูกครอบครองสูงสุด (Highest occupied molecular orbital: HOMO) ไปยังระดับพลังงานออร์บิทัลเชิงโมเลกุลว่างที่ถูกครอบครองต่ำสุด (Lowest unoccupied molecular orbital: LUMO) ทำให้โมเลกุลของสีย้อมอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) และถูกฉีดเข้าสู่ CB ของ ZnO ได้ จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของ ZnO ไปยัง FTO และไหลผ่านวงจรภายนอกไปยังโหลด (Load) ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของสีย้อมที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะถูกรีดิวซ์กลับโดยไอออนไอโอดีน (I^-) ในอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งจะถูกออกซิไดซ์เป็นไตรไอโอดีน (I_3^-) ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปยังขั้ว Pt และรีดิวซ์กลับเป็น I^- เกิดวัฏจักรรีด็อกซ์ของอิเล็กโทรไลต์อย่างต่อเนื่องและรักษาสสมดุลของประจุภายในเซลล์ DSSCs (Hasin & Kladkaew, 2019) โดยกลไกนี้สามารถอธิบายการไหลของกระแสไฟฟ้าได้ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit) (Onah et al., 2024) ดงแสดงในภาพ 6(b) โดยเซลล์ DSSCs ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าเมื่อแสงตกกระทบบ

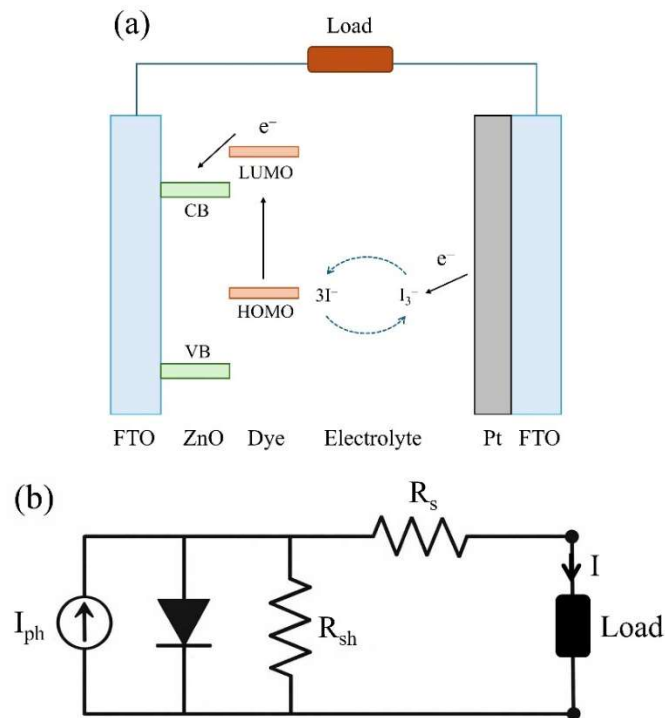
(Photocurrent source: I_{ph}) ซึ่งเกิดจากการดูดกลืนแสงของสีย้อมและผลิตอิเล็กตรอน โดยกระแส I_{ph} ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ในลักษณะคล้ายกระแสที่ไหลผ่านไดโอด (Diode) ซึ่งป้องกันกระบวนการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮลภายในเซลล์ อย่างไรก็ตาม กระแส I_{ph} ที่ไหลออกไปสู่โหลดอาจมีค่าลดลงเนื่องจากการรวมตัวกลับของอิเล็กตรอนกับโฮลบางส่วนทำให้การสูญเสียพลังงานภายในอุปกรณ์ผ่านวงจรความต้านทานชั๊นท์ (Shunt resistance: R_{sh}) และกระแสจำนวนมากจะไหลสู่โหลดโดยมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนที่เป็นผลมาจากความต้านทานอนุกรม (Series resistance: R_s) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าสู่โหลดภายนอก ทั้งนี้เมื่อพิจารณา J_{sc} และ V_{oc} จากการทดลองที่อยู่ในช่วงค่อนข้างต่ำบ่งชี้ว่าการฉีดอิเล็กตรอนจากสีย้อมซึมเข้าสู่แถบ CB ของสารกึ่งตัวนำ ZnO รวมถึงการเคลื่อนที่ของพาหะประจุภายในเซลล์ยังมีประสิทธิภาพต่ำ นอกจากนี้ ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (FF) เท่ากับ 0.36 ± 0.04 แสดงให้เห็นว่ากราฟ J-V ยังไม่เป็นอุดมคติ ซึ่งอาจเกิดจากการสูญเสียพลังงานภายในเซลล์อันเนื่องมาจากความต้านทานภายในระบบ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency; PCE) มีค่าเพียง $0.13 \pm 0.04\%$ เมื่อพิจารณา R_{sh} ที่มีค่าสูงถึง $1675 \pm 531 \Omega$ แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์อยู่ในระดับต่ำ (Sung et al., 2020) ขณะที่ค่า R_s ที่มีค่า $221 \pm 74 \Omega$ ยังอยู่ในระดับค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเกิดจากความต้านทานที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุ ทำให้การนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดหรือการแพร่ของอิเล็กโทรไลต์มีประสิทธิภาพลดลง ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแม้เซลล์จะมีประสิทธิภาพต่ำแต่แสดงให้เห็นว่าสีย้อมจากขมิ้นสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดกลืนพลังงานและผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์ DSSCs ได้ ซึ่งประสิทธิภาพอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ใช้สีย้อมสกัดจากสารธรรมชาติชนิดอื่นดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ในการพัฒนาขั้นต่อไปอาจจำเป็นต้องปรับปรุงวัสดุและกระบวนการเตรียม เช่น การเพิ่มการยึดเกาะของสีย้อม การลดความต้านทานภายใน และการปรับปรุงโครงสร้างของอิเล็กโทรด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต



ภาพที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ DSSCs

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์ DSSCs

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
J_{sc}	1.02 ± 0.22	mA/cm^2
V_{oc}	0.35 ± 0.01	V
FF	0.36 ± 0.04	-
PCE	0.13 ± 0.04	%
R_s	221 ± 74	Ω
R_{sh}	1675 ± 531	Ω



ภาพที่ 6 (a) แผนภาพกลไกการทำงานของเซลล์ DSSCs และ (b) วงจรสมมูลทางไฟฟ้า

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์ DSSCs ที่ใช้สีย้อมจากธรรมชาติ

แหล่งสีย้อมธรรมชาติ	สารละลายที่ใช้สกัด	ประสิทธิภาพ (%)	อ้างอิง
ผงขมิ้น	เอทานอล	0.13	งานวิจัยนี้
กลีบกุหลาบ	กรดซิตริก	1.53 – 2.61	Prajapat et al. (2025)
ผักโขม	เอทานอล	0.072	Cari et al. (2018)
ผักโขม	อะซิโตน	0.17	Ammar et al. (2019)
มะม่วง	เมทานอล	0.38	Ismail et al. (2018)

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้สาธิตการสกัดและประยุกต์ใช้สีย้อมธรรมชาติจากขมิ้นเป็นสีย้อมไวแสงในเซลล์ DSSCs โดยผลการวิเคราะห์ UV-Vis ยืนยันว่าขมิ้นมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยมีพีคการดูดกลืนแสงที่ 420 nm ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทางโครงสร้างของสารเคอร์คูมินอยด์ที่มีระบบพันธะคู่คอนจูเกต การวิเคราะห์ FTIR แสดงให้เห็นการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น $-OH$ และ $-C=O$ ซึ่งเอื้อต่อการยึดเกาะบนพื้นผิว ZnO และสนับสนุนกระบวนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เมื่อทดสอบสมรรถนะของเซลล์พบว่า DSSCs ที่ใช้สีย้อมขมิ้นสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จริง แม้จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานค่อนข้างต่ำ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดด้านการฉีดอิเล็กตรอนและความต้านทานภายในเซลล์ อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแบบซีรี่ย์ที่สูงบ่งชี้ว่าการรั่วไหลของกระแสมีน้อย แสดงถึงศักยภาพของโครงสร้างเซลล์โดยรวม ดังนั้นผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสีย้อมจากขมิ้นเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความเป็นไปได้สำหรับการพัฒนา DSSCs ต้นทุนต่ำในอนาคต ทั้งนี้อาจปรับปรุงด้านการยึดเกาะของสีย้อมเพื่อลดความต้านทานอนุกรมและยกระดับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ใช้งบประมาณการทํางานวิจัยโดยทุนวิจัยส่วนตัวและได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์วิจัยจากศูนย์วิจัยส่งเสริม และถ่ายทอดเทคโนโลยี คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- Ammar, A. M., Mohamed, H. S. H., Yousef, M. M. K., Abdel-Hafez, G. M., Hassanien, A. S., & Khalil, A. S. G. (2019). Dye-sensitized solar cells (DSSCs) based on extracted natural dyes. *Journal of Nanomaterials*, 2019, 1867271. <https://doi.org/10.1155/2019/1867271>
- Calogero, G., & Marco, G. D. (2008). Red Sicilian orange and purple eggplant fruits as natural sensitizers for dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1341-1346. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.05.007>
- Cari, C., Khairuddin, Septiawan, T. Y., Suciarmoko, P. M., Kurniawan, D., & Supriyanto, A. (2018). The preparation of natural dye for dye-sensitized solar cell (DSSC). *AIP Conference Proceedings*, 2014(1), 020106. <https://doi.org/10.1063/1.5054510>
- Ciuca, M. D., & Racovita, R. C. (2023). Curcumin: Overview of Extraction Methods, Health Benefits, and Encapsulation and Delivery Using Microemulsions and Nanoemulsions. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(10), 8874. <https://doi.org/10.3390/ijms24108874>
- Ferreira, J. R. M., Alves, M., Sousa, B., Vieira, S. I., Silva, A. M. S., Guieu, S., Cunha, Â., & Nunes da Silva, R. (2023). Curcumin-based molecular probes for fluorescence imaging of fungi. *Organic & Biomolecular Chemistry*, 21, 1531–1536. <https://doi.org/10.1039/D2OB01872A>
- Grätzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4(2), 145-153. [https://doi.org/10.1016/S1389-5567\(03\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S1389-5567(03)00026-1)
- Gibbard, J. A. (2025). On the intrinsic stability of curcumin. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 27, 22698-22709. <https://doi.org/10.1039/D5CP02049B>
- Hasin, P., & Kladkaew, M. (2019). Economical dye-sensitized solar cells based on polypyrrole/multiwalled carbon nanotube@reduced graphene oxide nanoribbon counter electrode. *Defense Technology Academic Journal*, 1(3), 38–51.
- Ismail, M., Ludin, N. A., Hamid, N. H., Ibrahim, M. A., & Sopian, K. (2018). The effect of chenodeoxycholic acid (CDCA) in mangosteen (*Garcinia mangostana*) pericarps sensitizer for dye-sensitized solar cell (DSSC). *Journal of Physics: Conference Series*, 1083(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1083/1/012018>
- Mardiyati, Y., Fauza, A. N., Steven, S., Hansen, Shoimah, S. M., Rachman, O. A., Nuruddin, A., & Hidayat, R. (2023). Initial study of curcumin extraction from turmeric as an indicator for basic solution detector. *AIP Conference Proceedings*, 2538(1), 050004. <https://doi.org/10.1063/5.0115465>
- Melo, N. J., Soares, J. M., Dovigo, L. N., Carmona-Vargas, C., Aguiar, A. S. N., dos Passos, A. C., de Oliveira, K. T., Bagnato, V. S., Dias, L. D., & Inada, N. (2024). Photodynamic action of synthetic curcuminoids against *Staphylococcus aureus*: Experimental and computational evaluation. *Chemistry*, 6(4), 581–600. <https://doi.org/10.3390/chemistry6040036>
- Moussawi, R. N., & Patra, D. (2016). Modification of nanostructured ZnO surfaces with curcumin: fluorescence-based sensing for arsenic and improving arsenic removal by ZnO. *RSC Advances*, 6, 17256-17268. <https://doi.org/10.1039/C5RA20221C>

- Onah, E. H., Lethole, N. L., & Mukumba, P. (2024). Luminescent Materials for Dye-Sensitized Solar Cells: Advances and Directions. *Applied Sciences*, 14(20), 9202. <https://doi.org/10.3390/app14209202>
- Prajapat, K., Mahajan, U., Dhonde, M., Sahu, K., Sakthivel, P., Vyas, S., & Shirage, P. M. (2025). Anthocyanin-sensitized Cu-doped TiO₂ nanoparticles for efficient and sustainable dye-sensitized solar cells. *Materials Advances*, 6, 2371–2384. <https://doi.org/10.1039/D4MA01297F>
- Rani, S., Mishra, S., Sharma, M., Nandy, A., & Mozumdar, S. (2020). Solubility and stability enhancement of curcumin in Soluplus® polymeric micelles: a spectroscopic study. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(4), 523–536. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1592687>
- Sajan, D., Joseph, L., Vijayan, N., & Karabacak. M. (2011). Natural bond orbital analysis, electronic structure, non-linear properties and vibrational spectral analysis of l-histidinium bromide monohydrate: A density functional theory. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 81(1), 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2011.05.052>
- Sharma, G., Dawo, C., Kumawat, U. K., Saini, S. K., Singhal, R. K., & Lal, C. (2023). Revealing the relaxation kinetics of curcumin based dye-sensitized solar cell. *Materials Science and Engineering: B*, 298, 116905. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116905>
- Subhan, M. A., Alam, K., Rahaman, M. S., Rahman, M. A., & Awal, R. (2013). Synthesis and Characterization of Metal Complexes Containing Curcumin (C₂₁H₂₀O₆) and Study of their Anti-microbial Activities and DNA-binding Properties. *Journal of Scientific Research*, 6(1), 97–109. <https://doi.org/10.3329/jsr.v6i1.15381>
- Sung, H. K., Lee, Y., Kim, W. H., Lee, S.-J., Sung, S.-J., Kim, D.-H., & Han, Y. S. (2020). Enhanced Power Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells by Band Edge Shift of TiO₂ Photoanode. *Molecules*, 25(7), 1502. <https://doi.org/10.3390/molecules25071502>
- Wang, X., Shen, C., Li, J., Zhang, M., & Song, P. (2023). Control and regulation of the performance of fullerene-based dye-sensitized solar cells with a D–D–A structure by external electric fields. *Nanoscale Advances*, 5, 3267–3278. <https://doi.org/10.1039/D3NA00115F>

บทความวิจัย (Research Article)

กิจกรรมการต้านควอร์มเซนซิงของแอคติโนแบคทีเรีย
ต่อเชื้อ *Serratia marcescens*

Anti-quorum sensing activities of actinobacteria against
Serratia marcescens

วนิส จินหลง¹, เอกศิษฐ์ สุพรรณโรจน์^{1,2}, พงศ์ระวี นิ่มน้อย¹, จินตนาถ วงศ์ขวลิต¹,
อารีย์ อินทร์นวล¹, รัชณี มิ่งมา^{1*}

¹ สาขาวิชาจุลชีววิทยา ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ภาควิชาเวชศาสตร์การธนาคารเลือดและจุลชีววิทยาคลินิก คณะสหเวชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Wanisa Jeenlong¹, Aekasit Suphannarot^{1,2}, Pongrawee Nimnoi¹,
Jintanart Wongchawalit¹, Aree Innun¹, Ratchanee Mingma^{1*}

¹ Division of Microbiology, Department of Sciences and Bioinnovation, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University
Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

² Department of Transfusion Medicine and Clinical Microbiology, Faculty of Allied Health Sciences, Chulalongkorn University,
Bangkok, 10330, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: faasnm@ku.ac.th

Received: 02/03/2026; Revised: 01/04/2026; Accepted: 05/04/2026

คำสำคัญ

แอคติโนแบคทีเรีย
การยับยั้งควอร์มเซนซิง
Serratia marcescens
Streptomyces sp.

บทคัดย่อ

ระบบควอร์มเซนซิง (quorum sensing; QS) ของแบคทีเรียเป็นกลไกการสื่อสารระหว่างเซลล์ที่มีบทบาทในการควบคุมกระบวนการทางสรีรวิทยาหลายประการของจุลินทรีย์ รวมถึงการสร้างไบโอฟิล์มและการผลิตปัจจัยก่อความรุนแรง ดังนั้น การยับยั้งระบบควอร์มเซนซิง (quorum sensing inhibition; QSI) จึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่กำลังได้รับสนใจเพื่อใช้ในการควบคุมโรคติดเชื้อในแบคทีเรีย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากิจกรรมการต้านควอร์มเซนซิงของเชื้อแอคติโนแบคทีเรียต่อแบคทีเรีย *Serratia marcescens* ผลการทดสอบเชื้อแอคติโนแบคทีเรียจำนวน 10 ไอโซเลต พบว่ามีเพียงไอโซเลต PKS22-27 เท่านั้นที่แสดงกิจกรรมการต้านระบบควอร์มเซนซิง โดยสามารถยับยั้งการสร้างรงควัตถุโพรดิจีโอซิน (prodigiosin) ของ *S. marcescens* ได้ โดยไม่แสดงฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย จากนั้นทำการสกัดสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิของไอโซเลต PKS22-27 จากน้ำเลี้ยงเชื้อปราศจากเซลล์ด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตต และประเมินฤทธิ์การต้านควอร์มเซนซิง

ด้วยวิธี agar well diffusion พบว่าสารสกัดหยาบของไอโซเลต PKS22-27 สามารถยับยั้งการสร้างรงควัตถุได้โดยไม่ยับยั้งการเจริญของเชื้อ ซึ่งยืนยันถึงศักยภาพในการยับยั้งควอรัมเซนซิง การระบุชนิดโดยอาศัยการวิเคราะห์ลำดับเบสบางส่วนของยีน 16S rRNA พบว่าไอโซเลต PKS22-27 จัดอยู่ในสกุล *Streptomyces* และมีความคล้ายคลึงสูงที่สุดกับ *Streptomyces badius* JCM4350^T (99.14 เปอร์เซ็นต์) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า *Streptomyces* sp. PKS22-27 เป็นแหล่งของสารที่มีฤทธิ์ต้านควอรัมเซนซิง การยับยั้งการสร้างรงควัตถุโพรดิจีโอซินซึ่งเป็นลักษณะที่ถูกควบคุมโดยระบบควอรัมเซนซิง บ่งชี้ถึงผลกระทบที่อาจส่งต่อการสร้างชั้นไบโอฟิล์ม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบการสร้างไบโอฟิล์มเพิ่มเติม เพื่อยืนยันกลไกการออกฤทธิ์ต่อไป

KEYWORDS

Actinobacteria
Quorum sensing inhibition
Serratia marcescens
Streptomyces sp.

ABSTRACT

Bacterial quorum sensing (QS) is a cell-to-cell communication system that regulates a wide range of physiological processes, including biofilm formation and the production of virulence factors. Therefore, quorum sensing inhibition (QSI) has emerged as a promising strategy for controlling bacterial infections. The aim of this study was to investigate the anti-quorum sensing activity of actinobacterial isolates against *Serratia marcescens*. Among ten actinobacterial isolates screened, only isolate PKS22-27 exhibited QSI activity, as evidenced by inhibition of prodigiosin pigment production, while showing no antibacterial effect on the growth of *S. marcescens*. Secondary metabolites of PKS22-27 were extracted from cell-free supernatant using ethyl acetate and further evaluated the anti-QS activity by an agar well diffusion assay. The crude extract consistently suppressed pigment production without inhibiting bacterial growth, confirming its quorum sensing inhibitory potential. Identification based on partial 16S rRNA gene sequence analysis revealed that isolate PKS22-27 belonged to the genus *Streptomyces* and showed the highest sequence similarity to *Streptomyces badius* JCM4350^T (99.14%). These findings indicate that *Streptomyces* sp. PKS22-27 is a promising source of quorum sensing inhibitory compounds. The inhibition of prodigiosin production, a QS-regulated trait, suggests a potential effect on biofilm formation. Therefore, further biofilm formation assays are required to confirm the underlying mechanism of action.

1. บทนำ

ควอรัมเซนซิง (quorum sensing; QS) เป็นระบบการสื่อสารระหว่างเซลล์ของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ควบคุมการแสดงออกของยีน โดยตอบสนองต่อความหนาแน่นของประชากรเซลล์ในสภาพแวดล้อม แบคทีเรียจะสร้างและหลั่งสารสัญญาณขนาดเล็กที่เรียกว่าออโตอินดิเคเตอร์ (autoinducers) ซึ่งเมื่อมีการสะสมถึงระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม จะกระตุ้นให้เกิดการจับกับตัวรับ (receptor) และส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของยีนเป้าหมาย ทำให้ประชากรแบคทีเรียสามารถแสดงพฤติกรรมแบบประสาน

ร่วมกัน (coordinated behavior) ได้ โดยทั่วไปแบคทีเรียแกรมลบมักใช้สารสัญญาณกลุ่มเอ็น-อะซิลโฮโมเซอรีนแลคโตน (N-acyl homoserine lactones) หรือ AHLs ซึ่งสามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้อย่างอิสระ และเมื่อมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤติ จะจับกับโปรตีนตัวรับภายในเซลล์เพื่อกระตุ้นหรือยับยั้งการแสดงออกของยีนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการก่อโรคและการปรับตัว ระบบนี้พบได้ในแบคทีเรียแกรมลบหลายชนิด รวมถึง *Serratia marcescens* เมื่อแบคทีเรียมีจำนวนเพิ่มขึ้น สารสัญญาณจะถูกสร้างและสะสมมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับการแสดงออกของยีนจำนวนมาก ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสำคัญ เช่น การสร้างปัจจัยก่อโรค การสร้างเอนไซม์นอกเซลล์ การเคลื่อนที่ และการสร้างชั้นไบโอฟิล์ม

S. marcescens เป็นแบคทีเรียแกรมลบ รูปร่างแท่ง มีความสามารถในการเคลื่อนที่และจัดอยู่ในวงศ์ *Enterobacteriaceae* โดยเป็นเชื้อก่อโรคฉวยโอกาสที่พบได้บ่อยในมนุษย์ โดยเชื้อมีระบบควอรัมเซนซิงที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการสื่อสารผ่านโมเลกุล AHL ซึ่งควบคุมโดยยีนในกลุ่ม LuxI/LuxR homologs ได้แก่ Smal/SmaR ทำหน้าที่ควบคุมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรง และมีบทบาทในการควบคุมพฤติกรรมกลุ่มและการเคลื่อนที่แบบสวอร์มมิง (swarming motility) (Horng et al., 2002) หนึ่งในลักษณะเด่นของ *S. marcescens* คือการสร้างรงควัตถุสีแดง “โพรดิจีโอซิน” (prodigiosin; 2-methyl-3-amylo/pentyl-6-methoxyprodigiosin) ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของควอรัมเซนซิง และสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้กิจกรรมของระบบดังกล่าวได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ควอรัมเซนซิงของเชื้อมีบทบาทในการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรงของเชื้อ เช่น การผลิตเอนไซม์นอกเซลล์ ได้แก่ โปรตีเอส นิวคลีเอส ไลเปส โคติเนส เอโมไลซิน รวมถึงสารลดแรงตึงผิวชนิดเซอร์ราฟาทิน ตลอดจนความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์ม (Morohoshi et al., 2007) ในปัจจุบัน การยับยั้งระบบควอรัมเซนซิงได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นทางเลือกสำหรับการควบคุมการติดเชื้อจากเชื้อดื้อยา ด้วยเหตุนี้ *S. marcescens* จึงเหมาะสมและถูกนำมาใช้เป็น reporter strain สำหรับการศึกษาและคัดกรองสารที่มีฤทธิ์ต้านควอรัมเซนซิง โดยประเมินจากการลดลงของการสร้างรงควัตถุโพรดิจีโอซินซึ่งเป็นลักษณะที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบควอรัมเซนซิงโดยตรง โดยในช่วงที่ผ่านมาได้มีการค้นพบสารยับยั้งควอรัมเซนซิง (quorum sensing inhibitors) หรือ QSI จากแหล่งธรรมชาติหลากหลายชนิด เช่น พุราโนนจากสาหร่าย *Delisea pulchra* (Rasmussen et al., 2000) เมทิลยูจีนอลจากยี่หระ (*Cuminum cyminum*) (Packiavathy et al., 2012) และสาร cyclo (L-leucyl-L-prolyl) จากแบคทีเรียบริเวณไรโซสเฟียร์ของพืชป่าชายเลน (Gowrishankar et al., 2019) รวมถึงสารสกัดจากพืชหลายชนิด เช่น กระถินณรงค์ ยี่หระ ไม้ดอกตระกูลทานตะวัน (*Inula Britannica*) และมะม่วง เป็นต้น (Husain et al., 2017; Ghannay et al., 2022; Samreen et al., 2022; Dimitrova et al., 2024) โดยทั่วไป สารต้านควอรัมเซนซิงไม่ได้ยับยั้งการเจริญหรือฆ่าแบคทีเรียโดยตรง แต่เป็นการลดความสามารถของเชื้อในการก่อโรค เช่น รบกวนการสื่อสารระหว่างเซลล์แบคทีเรีย ลดการสร้างไบโอฟิล์ม ลดการสร้างสารพิษหรือสารพิษบางชนิด รวมถึงลดการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรง และไม่ทำให้แบคทีเรียถูกบีบให้ต้องวิวัฒนาการดื้อยาอย่างหนักเหมือนยาปฏิชีวนะทั่วไป (Bouyahya et al., 2022)

แอคติโนแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียแกรมบวกที่มีร้อยละของเบสกวานีนและไซโทซีนในจีโนมสูง เป็นจุลินทรีย์กลุ่มสำคัญที่สามารถผลิตสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย โดยสารเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์และเทคโนโลยีชีวภาพ เช่น สารต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านมะเร็ง และต้านเชื้อรา (Jakubiec-Krzesniak et al., 2018) จากรายงานการรวบรวมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ผลิตจากจุลินทรีย์ พบว่ามีสารมากกว่า 22,000 ชนิด และประมาณครึ่งหนึ่งเป็นสารที่ได้จากแอคติโนแบคทีเรีย (Bérdy, 2005) ปัจจุบันมีการใช้ยาปฏิชีวนะประมาณ 160 ชนิดในการแพทย์และการเกษตร โดยในจำนวนนี้พบว่าประมาณ 100 – 120 ชนิด ผลิตจากแอคติโนแบคทีเรีย เช่น สเตรปโตมัยซิน (streptomycin), อิริโทรมัยซิน (erythromycin), เจนตามัยซิน (gentamicin) แวนโคมัยซิน (vancomycin) และอะเวอร์เมคติน (ivermectin) เป็นต้น โดยสารเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตจากแอคติโนแบคทีเรียสกุล *Streptomyces* sp. ซึ่งเป็นสกุลที่มีความสามารถในการสร้างสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิ (Lacey & Rutledge, 2022) นอกจากนี้ ยังมีรายงานสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพบางชนิดจากแอคติโนแบคทีเรียมีคุณสมบัติในการต้านควอรัมเซนซิง (Polkade et al., 2016) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรมการต้านควอรัมเซนซิงจากแอคติโนแบคทีเรียยังมีอย่างจำกัด โดยแอคติโนแบคทีเรียอาจเป็นแหล่งสำคัญของสารออกฤทธิ์ที่สามารถยับยั้งระบบควอรัมเซนซิงของแบคทีเรียได้ ดังนั้น

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดกรองแอคติโนแบคทีเรียที่มีกิจกรรมการต้านควอร์มเซนซิง และประเมินฤทธิ์ของสารสกัดหยาบต่อการยับยั้งการสร้างรงควัตถุโพรดิจีโอซินของ *S. marcescens* เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษานำขั้นต่อไป

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

2.1 แอคติโนแบคทีเรียและเชื้อทดสอบที่ใช้ในการวิจัย

แอคติโนแบคทีเรียจำนวน 10 ไอโซเลต ได้แก่ PS22-09, PS22-25, PS22-41, PKS22-25, PKS22-27, PKS22-30, PKS22-38, CHS21-01, SP21-03 และ SP21-04 ที่แยกได้จากดินป่าชายเลนในจังหวัดชลบุรี และจังหวัดสมุทรสงคราม นำมาเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง International *Streptomyces* Project medium 2 (ISP2) (Shirling & Gottlieb, 1966) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

แบคทีเรียทดสอบที่ใช้เป็น reporter strain สำหรับการทดสอบฤทธิ์ต้านควอร์มเซนซิง ได้แก่ *S. marcescens* ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการจุลชีววิทยา สาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นำมาเพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง Luria-Bertani (LB) และบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.2 การตรวจหากิจกรรมการยับยั้งควอร์มเซนซิงในเบื้องต้น

เตรียมสารแขวนลอย (suspension) ของสปอร์และเส้นใยแอคติโนแบคทีเรียทั้ง 10 ไอโซเลต โดยเพาะเลี้ยงแอคติโนแบคทีเรียบนอาหารแข็ง ISP2 และบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นใช้ลูปปลอดเชื้อขูดเส้นใยและสปอร์ปริมาณ 1-2 ลูป ใส่ลงในหลอดไมโครเซนทริฟิวซ์ขนาด 1.5 มล. ที่มีสารละลาย 0.85 เปอร์เซ็นต์ (w/v) โซเดียมคลอไรด์

นำซัสเพนชันของแอคติโนแบคทีเรียที่เตรียมไว้มาลากเป็นเส้นตรงบริเวณกึ่งกลางจานอาหาร Nutrient agar (NA) จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้แอคติโนแบคทีเรียเจริญ ในส่วนของเชื้อทดสอบ *S. marcescens* ทำการเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว LB และบ่มแบบเขย่า เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับความขุ่นเซลล์ให้เทียบเท่ากับมาตรฐาน 0.5 McFarland (ประมาณ 1.5×10^8 CFU/mL) เตรียมอาหารกึ่งเหลว (semi-solid) โดยใช้อาหาร LB ที่มีความเข้มข้นของวุ้น 0.75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร และทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิประมาณ 45 – 50 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมเชื้อ *S. marcescens* ปริมาตร 100 ไมโครลิตรลงในอาหารกึ่งเหลว ปั่นผสมให้เข้ากัน แล้วราดทับ (overlay) ลงบนจานอาหาร NA ที่เลี้ยงแอคติโนแบคทีเรียไว้ก่อนหน้านี้ บ่มจนทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นสังเกตการเกิดบริเวณโซนยับยั้งรงควัตถุสีแดงรอบแนวการเจริญของแอคติโนแบคทีเรีย และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนยับยั้งในหน่วยเซนติเมตร โดยบันทึกผลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.3 การสกัดสารด้วยตัวทำละลาย

นำแอคติโนแบคทีเรียมาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Tryptic soy broth (TSB) ที่เติมกลูโคส 1 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มแบบเขย่า ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ทำการแยกน้ำเลี้ยงเซลล์ (cell-free supernatant) โดยปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 6900 xg เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเก็บส่วนใสด้านบนนำมากรองด้วยกระดาษ Whatman No.1 และนำของเหลวที่กรองได้มาสกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตต (ethyl acetate) โดยผสมในอัตราส่วนปริมาตรเท่ากัน (1:1, v/v) และนำไปเขย่าผสมที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 – 16 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ทำการแยกชั้นตัวทำละลาย และเก็บเฉพาะชั้นเอทิลอะซิเตต นำมาระเหยตัวทำละลายออกภายใต้ความดันต่ำ ด้วยเครื่อง rotary evaporator จนแห้ง เพื่อให้ได้สารสกัดหยาบ (crude extract) จากนั้นละลายสารสกัดหยาบที่ได้ด้วยสารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (dimethyl sulfoxide; DMSO) ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (v/v) เพื่อเตรียมเป็นสารละลายตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร สำหรับใช้ในการทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพในขั้นตอนถัดไป เก็บรักษาสารสกัดไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาใช้

2.4 การทดสอบกิจกรรมการต้านควอรัมเซนซิงขั้นทุติยภูมิ

เตรียมเชื้อทดสอบ *S. marcescens* โดยเลี้ยงในอาหารเหลว LB และปรับความขุ่นของเซลล์เทียบเท่ากับมาตรฐาน 0.5 McFarland ตามวิธีที่อธิบายก่อนหน้านี้ จากนั้นใช้ไม้ปั่นสำลีปลอดเชื้อจุ่มเชื้อทดสอบ นำมาป้ายให้ทั่วผิวหน้าอาหารแข็ง LB ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ หลังจากนั้นใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม. เจาะหลุมบนผิวอาหารแข็ง แล้วเติมสารสกัดหยาบจากแอคติโนแบคทีเรียที่เตรียมไว้ ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ 40 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตรหลุมละ 50 ไมโครลิตร ใช้ DMSO และเอทิลอะซิเตต เป็นชุดควบคุมผลลบ (negative control) และใช้แอมพิซิลิน (ampicilin) ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร เป็นชุดควบคุมผลบวก (positive control) เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นการยับยั้งแบคทีเรีย จากนั้นบ่มจานเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทำการประเมินผลโดยวัดขนาดโซนยับยั้งการสร้างรงควัตถุ ซึ่งเป็นบริเวณรอบหลุมที่เชื้อเจริญได้แต่ไม่สร้างรงควัตถุ โดยบันทึกผลเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโซนในหน่วยเซนติเมตร

2.5 การระบุชนิดแอคติโนแบคทีเรีย

เลี้ยงแอคติโนแบคทีเรียในอาหารเหลว Yeast extract dextrose (YD; 1% yeast extract, 1% dextrose) บ่มแบบเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นเก็บเซลล์โดยการปั่นเหวี่ยงและล้างตะกอนเซลล์ด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ 2 ครั้ง นำมาสกัดดีเอ็นเอและเพิ่มปริมาณยีน 16S rRNA ด้วยเทคนิคพีซีอาร์ (PCR) ตามวิธีที่อธิบายโดย Tongtoht et al. (2024) โดยใช้ไพรเมอร์ 27F (5' AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3') และ 1492R (5' GGTTACCTGTTACGACTT-3') จากนั้นนำผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ และนำลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ที่มีในฐานข้อมูล EzBioCloud (<http://ezbiocloud.net>) (Chalita et al., 2024) เพื่อระบุสกุลของแอคติโนแบคทีเรีย วิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการของการสร้างแผนภูมิต้นไม้ (phylogenetic tree) โดยใช้โปรแกรม MEGA 11.0 (Tamura et al., 2021) โดยเลือกวิธีจัดกลุ่มแบบ Neighbor-joining (Saitou & Nei, 1987) และกำหนดค่า bootstrap เป็น 1,000 ครั้ง (Felsenstein, 1985)

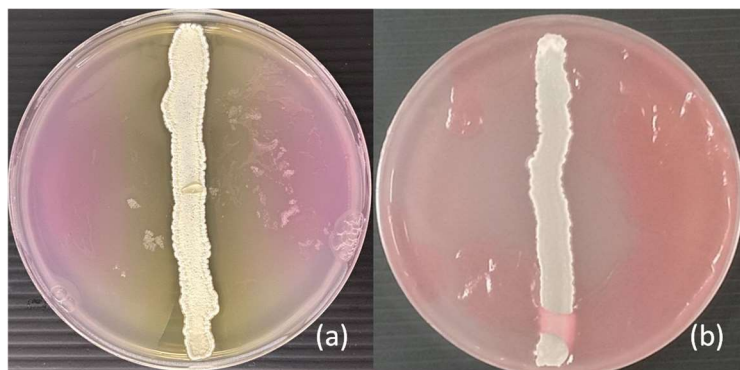
2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้ซอฟต์แวร์ R เวอร์ชัน 4.4.0 โดยข้อมูลแต่ละการทดลองจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ความแตกต่างทางนัยสำคัญทางสถิติที่ความน่าจะเป็นน้อยกว่า 0.05 (Duncan's test, $p < 0.05$)

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การศึกษากิจกรรมการต้านควอรัมเซนซิงขั้นปฐมภูมิ

จากการศึกษาการยับยั้งการสร้างรงควัตถุโปรตีนของแอคติโนแบคทีเรียจำนวน 10 ไอโซเลต ได้แก่ PS22-09, PS22-25, PS22-41, PKS22-25, PKS22-27, PKS22-30, PKS22-38, CHS21-01, SP21-03 และ SP21-04 โดยใช้ *S. marcescens* เป็นแบคทีเรียอินดิเคเตอร์ ผลการทดลองพบว่าแอคติโนแบคทีเรียเพียง 1 ไอโซเลต คือ PKS22-27 ที่แสดงผลการยับยั้งผลการยับยั้งการสร้างรงควัตถุโปรตีนอย่างเด่นชัด โดยสังเกตได้จากการไม่พบรงควัตถุสีแดงของ *S. marcescens* ในบริเวณรอบโคโลนีของไอโซเลต PKS22-27 (ภาพที่ 1a) ทั้งนี้ บริเวณดังกล่าวยังคงปรากฏการเจริญของเชื้อ *S. marcescens* ในลักษณะขุ่น แสดงให้เห็นว่าไอโซเลต PKS22-27 มีผลยับยั้งการสร้างรงควัตถุโดยไม่กระทบต่อการเจริญของเชื้อ ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับการรบกวนระบบควอรัมเซนซิง หรือบ่งชี้ถึงฤทธิ์ต้านควอรัมเซนซิง ขนาดของบริเวณยับยั้งการสร้างรงควัตถุรอบโคโลนีของไอโซเลต PKS22-27 เท่ากับ 2.1 ± 0.3 เซนติเมตร ในขณะที่แอคติโนแบคทีเรียไอโซเลตอื่น ๆ ไม่พบการเกิดบริเวณยับยั้งการสร้างรงควัตถุของ *S. marcescens* และยังคงปรากฏรงควัตถุสีแดงตามปกติ (ภาพที่ 1b)



ภาพที่ 1 การทดสอบกิจกรรมของแอกติโนแบคทีเรียไฮโซเลต PKS22-27 (a) และไฮโซเลต SP21-03 (b) ในการยับยั้งการสร้างรงควัตถุโพรติจีโอซินของเชื้อ *S. marcescens*

การทดสอบกิจกรรมการต้านควอร์มเซนซิงนิยมใช้เชื้อที่สร้างรงควัตถุเป็น reporter strain เนื่องจากการสร้างรงควัตถุเป็นลักษณะที่ถูกควบคุมโดยควอร์มเซนซิง ทำให้สามารถสังเกตผลการยับยั้งได้ง่าย รวดเร็ว และสามารถแยกผลระหว่างการยับยั้งควอร์มเซนซิงกับการยับยั้งการเจริญได้ ในการศึกษา *S. marcescens* ถูกใช้เป็นแบคทีเรียอินดิเคเตอร์ เนื่องจากสามารถสร้างรงควัตถุโพรติจีโอซินซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของระบบควอร์มเซนซิง ชนิด AHL อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงการสร้างรงควัตถุสามารถสังเกตได้ชัดเจนด้วยตาเปล่า และสามารถแยกความแตกต่างระหว่างการยับยั้งการสร้างรงควัตถุกับการยับยั้งการเจริญของเชื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังมีข้อดีในด้านความสะดวก รวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือพิเศษในการวิเคราะห์ผล เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้ออื่น เช่น *Vibrio harveyi* ที่ต้องอาศัยเครื่องวัดการเรืองแสง (luminometer) อย่างไรก็ตาม การสร้างโพรติจีโอซินของ *S. marcescens* อาจได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและองค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ จึงจำเป็นต้องควบคุมสภาวะการทดลองอย่างเหมาะสม

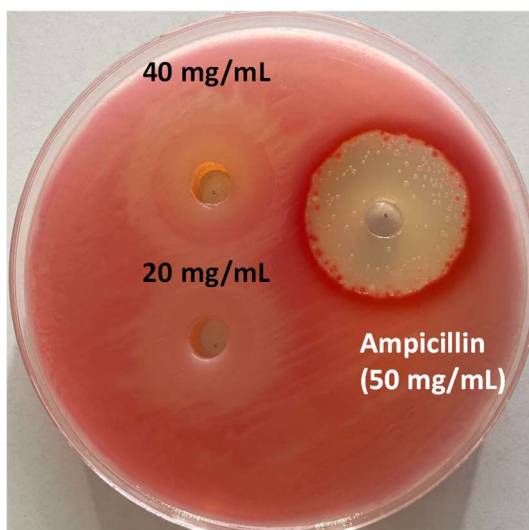
โดย reporter strain ที่นิยมใช้นอกเหนือจาก *S. marcescens* ได้แก่ *Chromobacterium violaceum* สร้างรงควัตถุไวโอลาซิน (violacein) ที่มีสีม่วง *Pseudomonas aeruginosa* สร้างรงควัตถุไพโอไซยานิน (pyocyanin) ที่มีสีเขียว/น้ำเงิน และ *Vibrio harveyi* สร้างสารเรืองแสง (bioluminescence) เป็นต้น ทั้งนี้ *C. violaceum* มักถูกใช้เป็นหลักในการคัดกรองสารต้านควอร์มเซนซิง เนื่องจากระบบตอบสนองมีความชัดเจนและเสถียรกว่า

3.2 การต้านควอร์มเซนซิงของสกัดหยาบจากไฮโซเลต PKS22-27

คัดเลือกไฮโซเลต PKS22-27 นำมาสกัดสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตต ได้สารสกัดหยาบสีส้มที่มีความเป็นกลางถึงกึ่งมีขี้ (ภาพที่ 2) จากนั้นนำสารสกัดหยาบมาทดสอบฤทธิ์ในขั้นสุดท้ายเพื่อยืนยันความสามารถในการต้านควอร์มเซนซิง ผลการทดลองพบว่าสารสกัดที่มีความเข้มข้น 40 และ 20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร สามารถยับยั้งการสร้างรงควัตถุของเชื้อ *S. marcescens* ได้ โดยมีขนาดโซนยับยั้งเท่ากับ 2.5 ± 0.25 เซนติเมตร และ 1.2 ± 0.15 เซนติเมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 3) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมผลบวก คือแอมพิซิลินซึ่งให้โซนยับยั้งการเจริญขนาด 2.8 ± 0.20 เซนติเมตร พบว่าสารสกัดจาก PKS22-27 สามารถยับยั้งการสร้างรงควัตถุได้โดยไม่กระทบต่อการเจริญของแบคทีเรีย สังเกตได้จากบริเวณรอบหลุมยังคงมีความขุ่นของเชื้ออยู่ขณะเดียวกัน ชุดควบคุมผลลบ ได้แก่ DMSO และเอทิลอะซิเตต ไม่แสดงผลต่อการสร้างรงควัตถุและการเจริญของเชื้อ ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการยับยั้งรงควัตถุเกิดจากการรบกวนการทำงานของระบบควอร์มเซนซิง มากกว่าการยับยั้งการเจริญของเชื้อโดยตรง แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจาก PKS22-27 มีศักยภาพในการยับยั้งการสื่อสารแบบควอร์มเซนซิง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ควบคุมการแสดงออกของปัจจัยก่อความรุนแรง เช่น การสร้างรงควัตถุ และพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการติดเชื้อของ *S. marcescens* สอดคล้องกับรายงานของ Devi et al. (2018) ที่พบว่าสารสกัดจากน้ำเลี้ยงเซลล์ของ *Bacillus subtilis* สายพันธุ์ R18 ซึ่งสกัดด้วยตัวทำละลายอีเธอร์ สามารถยับยั้งควอร์มเซนซิงใน *S. marcescens* รวมถึงยับยั้งการสร้างไบโอฟิล์ม และการผลิตเอนไซม์โปรติเอส ไลเปสและฮีโมไลซินได้



ภาพที่ 2 สารสกัดหยาบจากตัวทำละลายเอทิลอะซิเตตของไอโซเลต PKS22-27



ภาพที่ 3 ผลของสารสกัดหยาบจากไอโซเลต PKS22-27 (40 และ 20 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) ต่อ *S. marcescens* พบการยับยั้งการสร้างรงควัตถุโพรดิจิโอะซินโดยไม่ส่งผลต่อการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย เปรียบเทียบกับแอมพิซิลิน (50 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

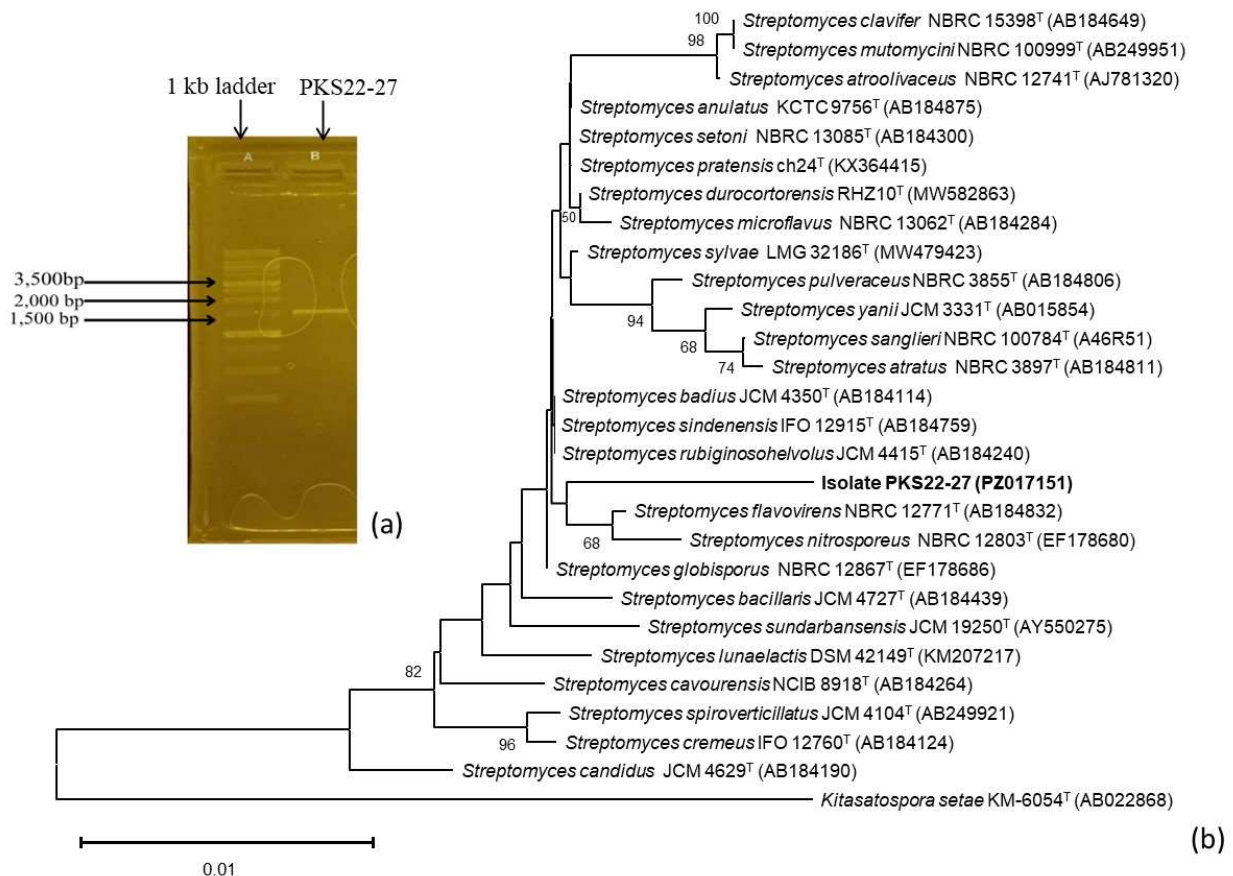
ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่แสดงให้เห็นว่าสารจากจุลินทรีย์หรือสารธรรมชาติสามารถยับยั้งการสร้างรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับควอร์มเซนซิงได้ เช่น งานวิจัยของ Devi et al. (2018) รายงานว่า *B. subtilis* สายพันธุ์ R18 สามารถผลิตสารในน้ำเลี้ยงเชื้อปราศจากเซลล์ที่ยับยั้งการสร้างรงควัตถุโวลาคีนของ *C. violaceum* และรงควัตถุโพรดิจิโอะซินของ *S. marcescens* โดยไม่มีผลต่อการเจริญของเชื้อ นอกจากนี้ งานวิจัยของ Qi et al. (2023) รายงานว่าสาร phloretin ซึ่งสกัดจากผิวแอปเปิ้ลสามารถรบกวนการสื่อสารแบบควอร์มเซนซิงของ *S. marcescens* NJ01 โดยไม่มีผลต่อการสร้างโมเลกุล AHL ส่งผลให้การสร้างไบโอฟิล์ม การผลิตเอนไซม์ การสร้างรงควัตถุโพรดิจิโอะซิน และการเคลื่อนที่ของเชื้อลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับรายงานส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ *C. violaceum* เป็น reporter strain การใช้ *S. marcescens* ในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบ prodigiosin-based assay ในการตรวจคัดกรองสารที่มีผลต่อการสร้างรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับควอร์มเซนซิง แม้ว่าจะมีข้อจำกัดด้านความเสถียรของการสร้างรงควัตถุภายใต้สภาวะต่าง ๆ ก็ตาม ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นข้อมูลสนับสนุนเพิ่มเติมว่าการยับยั้งการสร้างโพรดิจิโอะซินภายใต้สภาวะที่ไม่พบการยับยั้งการเจริญของเชื้อ มีลักษณะสอดคล้องกับการรบกวนระบบควอร์มเซนซิง หรือบ่งชี้ถึงฤทธิ์การต้านควอร์มเซนซิง ทั้งนี้ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไปเพิ่มเติมในระดับโมเลกุลเพื่อยืนยันผลดังกล่าวต่อไป

นอกจากการประเมินการยับยั้งการสร้างรงควัตถุใน reporter strain แล้ว ยังมีวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาฤทธิ์การต้านควอรัมเซนซิง ได้แก่ การทดสอบการเคลื่อนที่แบบสวอร์มมิง (swarming motility) และการทดสอบการสร้างไบโอฟิล์ม (biofilm formation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ถูกควบคุมของระบบควอรัมเซนซิงในแบคทีเรียหลายชนิด เช่น *P. aeruginosa*, *S. marcescens* และ *Proteus mirabilis* (Thabit et al., 2022; Zhang et al., 2023) เป็นที่ทราบกันว่ากระบวนการเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อการแสดงออกของรุนแรงและความสามารถในการก่อโรคของแบคทีเรีย การลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณสวอร์มมิง การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนที่แบบสวอร์มมิง ตลอดจนการลดลงของการสร้างไบโอฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่ามีการรบกวนหรือยับยั้งการทำงานของระบบควอรัมเซนซิง และสะท้อนถึงฤทธิ์ต้านควอรัมเซนซิงของสารทดสอบได้

3.3 การระบุชนิดแอกติโนแบคทีเรีย

นำแอกติโนแบคทีเรียไอโซเลต PKS22-27 มาระบุชนิดโดยการเพิ่มจำนวนและวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ด้วยเทคนิคพีซีอาร์ พบว่าได้ผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ที่มีขนาด 1,500 คู่เบส (ภาพที่ 4a) ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของยีน 16S rRNA ในแบคทีเรียทั่วไป เมื่อทำการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์และเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล พบว่าไอโซเลต PKS22-27 จัดอยู่ในสกุล *Streptomyces* sp. (ภาพที่ 4b) และมีความคล้ายคลึงกับ *S. badius* JCM4350^T (AB184114) โดยมีเปอร์เซ็นต์ความเหมือนของลำดับนิวคลีโอไทด์เท่ากับ 99.14 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบขนาดของผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ของยีน 16S rRNA กับดีเอ็นเอมาตรฐาน (1 kb ladder) (a) และแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการของยีน 16S rRNA ของแอกติโนแบคทีเรียไอโซเลต PKS22-27 (b) ค่า bootstrap แสดงเป็นร้อยละจากการทำซ้ำ 1,000 ครั้ง โดยแสดงเฉพาะค่าที่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และใช้ *Kitasatospora setae* เป็น outgroup

จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า *Streptomyces badius* สามารถแยกได้ทั้งจากดินและจากภายในเนื้อเยื่อพืช อีกทั้งยังมีศักยภาพในการผลิตเอนไซม์หลายชนิด เช่น เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส เอนไซม์ย่อยลิกนิน รวมถึงการผลิตสารเมแทบอไลต์ที่มีฤทธิ์ยับยั้งราก่อโรคพืช (Reichardt et al., 2025; Shivilata & Satyanarayana, 2017; Zhang et al., 2020) อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบรายงานเกี่ยวกับกิจกรรมการต้านควอร์มเซนซิงของแอคติโนแบคทีเรียชนิดนี้ ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงนับเป็นรายงานฉบับแรกที่แสดงให้เห็นถึงฤทธิ์ด้านการสื่อสารแบบควอร์มเซนซิงของเชื้อ *S. badius*

แม้ว่าผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยับยั้งการสร้างรงควัตถุฟิโตรีดิวชัน ซึ่งเป็นลักษณะที่อยู่ภายใต้การควบคุมของระบบควอร์มเซนซิง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังจำกัดอยู่ในระดับลักษณะปรากฏหรือฟีโนไทป์ (phenotype) ของเชื้อเท่านั้น จึงยังไม่สามารถอธิบายกลไกการออกฤทธิ์ในระดับโมเลกุลได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังไม่ได้มีการประเมินผลต่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรงอื่น ๆ เช่น การสร้างไบโอฟิล์ม การเคลื่อนที่ของเชื้อ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยมุ่งเน้นวิเคราะห์ในระดับโมเลกุล เช่น การตรวจวัดสัญญาณ AHL และการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบควอร์มเซนซิง รวมถึงประเมินฤทธิ์ต่อการสร้างและการทำลายชั้นไบโอฟิล์ม ตลอดจนผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเชื้อ เพื่อยืนยันกลไกในการออกฤทธิ์ และประเมินศักยภาพในการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ต่อไป

4. บทสรุป

แอคติโนแบคทีเรียจากดินตะกอนป่าชายเลน *Streptomyces* sp. PKS22-27 มีศักยภาพในการต้านควอร์มเซนซิงได้ โดยสามารถยับยั้งการสร้างรงควัตถุฟิโตรีดิวชันของ *S. marcescens* บนอาหารแข็งได้ นอกจากนี้ สารสกัดหยาบจากไฮโซเลตดังกล่าวยังคงแสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการสร้างรงควัตถุ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเชื้อทดสอบ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับแนวทางในการค้นหาสารต้านควอร์มเซนซิงที่มุ่งควบคุมปัจจัยก่อโรค โดยไม่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรีย ซึ่งช่วยลดแรงกดดันในการเกิดการดื้อยา ทั้งนี้ สารสกัดหยาบจากไฮโซเลต PKS22-27 จะถูกคัดเลือกเพื่อนำไปศึกษาต่อในด้านการยับยั้งไบโอฟิล์มเพื่อประเมินศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิจัยจากสาขาจุลชีววิทยา ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2568

เอกสารอ้างอิง

- Bérdy, J. (2005). Bioactive microbial metabolites. *The Journal of Antibiotics*, 58(1), 1-26.
<https://doi.org/10.1038/ja.2005.1>
- Chalita, M., Kim, Y. O., Park, S., Oh, H. S., Cho, J. H., Moon, J., Baek, N., Moon, C., Lee, K., Yang, J., Nam, G. G., Jung, Y., Na, S. I., Bailey, M. J., & Chun, J. (2024). EzBioCloud: a genome-driven database and platform for microbiome identification and discovery. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 74(6). <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.006421>
- Devi, K. R., Srinivasan, S., & Ravi, A. V. (2018). Inhibition of quorum sensing-mediated virulence in *Serratia marcescens* by *Bacillus subtilis* R-18. *Microbial Pathogenesis*, 120, 166-175.
<https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.04.023>
- Dimitrova, P. D., Ivanova, V., Trendafilova, A., & Paunova-Krasteva, T. (2024). Anti-biofilm and anti-quorum-sensing activity of inula extracts: A strategy for modulating *Chromobacterium violaceum* virulence factors. *Pharmaceuticals*, 17(5), 573. <https://doi.org/10.3390/ph17050573>

- Felsenstein, J. (1985). Confidence limits on phylogenies: An approach using the bootstrap. *Evolution*, 39(4), 783-791.
- Ghannay, S., Aouadi, K., Kadri, A., & Snoussi, M. (2022). In vitro and in silico screening of anti-*Vibrio* spp., antibiofilm, antioxidant and anti-quorum sensing activities of *Cuminum cyminum* L. volatile oil. *Plants (Basel)*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/plants11172236>
- Gowrishankar, S., Pandian, S. K., Balasubramaniam, B., & Balamurugan, K. (2019). Quorum quelling efficacy of marine cyclic dipeptide -cyclo(L-leucyl-L-prolyl) against the uropathogen *Serratia marcescens*. *Food and Chemical Toxicology*, 123, 326-336. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.11.013>
- Horng, Y.-T., Deng, S.-C., Daykin, M., Soo, P.-C., Wei, J.-R., Luh, K.-T., Ho, S.-W., Swift, S., Lai, H.-C., & Williams, P. (2002). The LuxR family protein SpnR functions as a negative regulator of N-acylhomoserine lactone-dependent Quorum Sensing in *Serratia marcescens*. *Molecular Microbiology*, 45, 1655-1671. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2958.2002.03117.x>
- Husain, F. M., Ahmad, I., Al-thubiani, A. S., Abulreesh, H. H., AlHazza, I. M., & Aqil, F. (2017). Leaf extracts of *Mangifera indica* L. inhibit quorum sensing – regulated production of virulence factors and biofilm in test bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 8, 727. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00727>
- Jakubiec-Krzesniak, K., Rajnisz-Mateusiak, A., Guspiel, A., Ziemska, J., & Solecka, J. (2018). Secondary metabolites of actinomycetes and their antibacterial, antifungal and antiviral Properties. *Polish Journal of Microbiology*, 67(3), 259-272. <https://doi.org/10.21307/pjm-2018-048>
- Lacey, H. J., & Rutledge, P. J. (2022). Recently discovered secondary metabolites from *Streptomyces* Species. *Molecules*, 27(3). <https://doi.org/10.3390/molecules27030887>
- Morohoshi, T., Shiono, T., Takidouchi, K., Kato, M., Kato, N., Kato, J., & Ikeda, T. (2007). Inhibition of quorum sensing in *Serratia marcescens* AS-1 by synthetic analogs of N-acylhomoserine lactone. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(20), 6339-6344. <https://doi.org/10.1128/AEM.00593-07>
- Packiavathy, I. A. S. S., Agilandewari, P., Musthafa, K. S., Pandian, S. K., & Ravi, A. V. (2012). Antibiofilm and quorum sensing inhibitory potential of *Cuminum cyminum* and its secondary metabolite methyl eugenol against Gram negative bacterial pathogens. *Food Research International*, 45(1), 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.10.022>
- Polkade, A. V., Mantri, S. S., Patwekar, U. J., & Jangid, K. (2016). Quorum sensing: an under-explored phenomenon in the Phylum Actinobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 7, 131. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00131>
- Qi, Y., Ji, P., Yin, K., Zheng, Y., Niu, J., Jia, A., Zhou, J., & Li, J. (2023). Phloretin inhibits quorum sensing and biofilm formation in *Serratia marcescens*. *Molecules*, 28(24), 8067. <https://doi.org/10.3390/molecules28248067>

- Rasmussen, T. B., Manefield, M., Andersen, J. B., Eberl, L., Anthoni, U., Christophersen, C., Steinberg, P. D., Kjelleberg, S., & Givskov, M. (2000). How *Delisea pulchra* furanones affect quorum sensing and swarming motility in *Serratia liquefaciens* MG1. *Microbiology*, 146(12), 3237-3244.
<https://doi.org/10.1099/00221287-146-12-3237>
- Reichardt, C., Estes, D., Carlson, C. M., Currie, C. R., & May, D. S. (2025). Endophytic *Streptomyces* from honeybee hives inhibit plant and honeybee pathogens. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1644842.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1644842>
- Saitou, N., & Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4(4), 406-425.
- Samreen, Qais, F. A., & Ahmad, I. (2022). Anti-quorum sensing and biofilm inhibitory effect of some medicinal plants against gram-negative bacterial pathogens: in vitro and in silico investigations. *Heliyon*, 8(10), e11113. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11113>
- Shirling, E. B., & Gottlieb, D. (1966). Methods for characterization of *Streptomyces* species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 16(3), 313-340. <https://doi.org/10.1099/00207713-16-3-313>
- Shivlata, L., & Satyanarayana, T. (2017). Characteristics of Raw Starch-Digesting α -Amylase of *Streptomyces badius* DB-1 with transglycosylation activity and its applications. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 181(4), 1283-1303. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2284-4>
- Tamura, K., Stecher, G., & Kumar, S. (2021). MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution*, 38(7), 3022-3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
- Thabit, A. K., Eljaaly, K., Zawawi, A., Ibrahim, T. S., Eissa, A. G., Elbaramawi, S. S., Hegazy, W. A. H., & Elfaky, M. A. (2022). Muting bacterial communication: Evaluation of prazosin anti-quorum sensing activities against Gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa*, *Proteus mirabilis*, and *Serratia marcescens*. *Biology*, 11(9), 1349. <https://doi.org/10.3390/biology11091349>
- Tongtoht, J., Wongchawalit, J., & Mingma, R. (2024). Antimicrobial activities against pathogenic bacteria of marine actinobacteria isolated from mangrove sediments at Klong Khon Mangrove Forest, Thailand. *Science Essence Journal*, 40(1), 74-87.
- Zhang, K., Gu, L., Zhang, Y., Liu, Z., & Li, X. (2020). Dinactin from a new producer, *Streptomyces badius* gz-8, and its antifungal activity against the rubber anthracnose fungus *Colletotrichum gloeosporioides*. *Microbiological Research*, 240, 126548. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126548>
- Zhang, Z., Sun, Y., Yi, Y., Bai, X., Zhu, L., Zhu, J., Gu, M., Zhu, Y., & Jiang, L. (2023). Screening and identification of a *Streptomyces* strain with quorum-sensing inhibitory activity and effect of the crude extracts on virulence factors of *Pseudomonas aeruginosa*. *Microorganisms*, 11(8), 2079.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms11082079>

บทความวิจัย (Research Article)

Relationship between magic fractions and decimals based on Lucas and Fibonacci numbers

Pimkamon Buathong, Suphachit Prathipchit, Thanittha Kowan*

Division of Mathematics and Statistics, Department of Computational Science and Digital Technology, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140, Thailand

* Corresponding author

E-mail address: thanittha.ko@ku.th

Received: 13/03/2026r; Revised: 10/04/2026; Accepted: 16/04/2026

KEYWORDS

Fibonacci numbers
Lucas numbers
fractions
decimals

ABSTRACT

This research aims to study the relationship between fractions and decimals derived from the Lucas and Fibonacci sequences by considering the decimal values of fractions with digit numbers in the Lucas and Fibonacci sequences. We analyze the pattern of repeating decimals and their mathematical properties. The results show a distinct correlation between Lucas and Fibonacci sequences in the occurrence of the decimals. We give the exact count of Fibonacci numbers in decimal forms of remarkable fractions studied by James Smoak (2003). These theorems offer potential applications in numerical analysis, particularly regarding approximations and error estimation.

1. Introduction

Fibonacci numbers are famous due to their interesting properties, including their connection to the Golden Ratio and their appearance in various natural patterns. Lucas numbers are related to Fibonacci numbers because they follow the same recursive relationship. Fibonacci and Lucas numbers play a critical role in analyzing the performance of the Euclidean algorithm, which is used to find the greatest common factor of two integers. The Euclidean algorithm performs slowest if the input data are two consecutive Fibonacci numbers. Furthermore, ratios of Fibonacci and Lucas numbers have been applied to modified fraction expansions such as the Engel and Pierce expansions (Knopfmacher and Mays, 1995). Regarding the representation of natural numbers, Zeckendorf's Theorem (Keller, 1972) states that every natural number can be written uniquely as a sum of one or more non-consecutive Fibonacci numbers. From this important theorem, many further research studies have been developed, such as Zeckendorf games (Baird-Smith et al., 2018; Cusenza et al., 2021), a pooling layer in convolutional neural network (Vigneron et al., 2021), and a probabilistic approach for Markov chains (Ben-Ari and Miller, 2016). Additionally, in the field of image encryption, several researchers (Batool and Waseem, 2019; Maiti et al., 2023) have developed an encryption method using Fibonacci and Lucas numbers. These numbers are continued being researched, and their properties are used in many fields (see (Debnath, 2011; Vajda, 2008; Koshy, 2019) for more details).

In this study, we are interested in research article by Smoak and Osler (Smoak and Osler, 2003). They studied the following fascinating fractions related to Fibonacci numbers:

$$\frac{100}{89} = 1.1235955056 \dots$$

$$\frac{10000}{9899} = 1.0102030508132134559046368 \dots$$

$$\frac{1000000}{998999} = 1.001\ 002\ 003\ 005\ 008\ 013\ 021\ 034\ 055\ 089\ 144\ 233\ 377\ 610\ 98859958818777596 \dots$$

From the three examples above, it is evident that the decimal expansions of these fractions contain Fibonacci numbers. The decimal expansion of the first fraction produces the first five Fibonacci numbers (starting with $F_1 = 1$) before transitioning into other digits. The decimal expansion of the second fraction contains the first ten Fibonacci numbers, while the decimal expansion of the third fraction contains the first fifteen Fibonacci numbers. These three fractions have similar structure. The numerator of the fractions is in the form of 10^{2n} and the denominator of the fractions is in the form of $10^{2n} - 10^n - 1$ for integers $n = 1, 2, 3$. Smoak and Osler proved that this pattern continues indefinitely for all integers n .

This research determines the exact number of Fibonacci numbers appearing in the decimal expansions of the family of fractions above. Furthermore, we investigate two additional families of fractions whose decimal expansions generate Lucas numbers. Representative members of the first family of fractions generating Lucas numbers are shown as follows

$$\frac{12}{89} = 0.1\ 3\ 4\ 83146 \dots$$

$$\frac{102}{9899} = 0.01\ 03\ 04\ 07\ 11\ 18\ 29\ 47\ 772502 \dots$$

$$\frac{1002}{998999} = 0.001\ 003\ 004\ 007\ 011\ 018\ 029\ 047\ 076\ 123\ 199\ 322\ 521\ 84436621057 \dots$$

From the three examples above, it is observed that the decimal expansions of these fractions contain Lucas numbers. The decimal expansion of the first fraction displays the first three Lucas numbers (starting with $L_1 = 1$) before transitioning into other digits. The decimal expansion of the second fraction contains the first eight Lucas numbers, while the decimal expansion of the third fraction contains the first thirteen Lucas numbers. These three fractions have a similar structure. The numerator of the fractions is in the form of $10^n + 2$ and the denominator of the fractions is in the form of $10^{2n} - 10^n - 1$ for integers $n = 1, 2, 3$.

The examples of the member of another family of fractions generating Lucas numbers are shown as follows

$$\frac{19}{89} = 0.2\ 1\ 3\ 4\ 83146 \dots$$

$$\frac{199}{9899} = 0.02\ 01\ 03\ 04\ 07\ 11\ 18\ 29\ 47\ 7725022 \dots$$

$$\frac{1999}{998999} = 0.002\ 001\ 003\ 004\ 007\ 011\ 018\ 029\ 047\ 076\ 123\ 199\ 322\ 521\ 84436621 \dots$$

From the three examples above, it is evident that the decimal expansions of the fractions contain Lucas numbers. The decimal expansion of the first fraction produces the first four Lucas numbers (starting with $L_0 = 2$) before being followed by other digits. The decimal expansion of the second fraction contains the first nine Lucas numbers, while the decimal expansion of the third fraction contains the first fourteen Lucas numbers. These three fractions have a similar structure. The numerator of the fractions is in the form of $2(10^n) - 1$ and the denominator of the fractions is in the form of $10^{2n} - 10^n - 1$ for integers $n = 1, 2, 3$.

In the Results section, we prove that the patterns of these decimal expansions of the fractions of these two families generating Lucas numbers hold true for all positive integers. In addition, we provide the exact count of Fibonacci and Lucas numbers appearing in decimal expansions of all three families of fractions.

2. Preliminary

In this section, we provide the fundamental definitions and notation used throughout this study. Additionally, we review essential properties of the Fibonacci and Lucas sequences that are necessary for proving the main results of this research.

2.1 Fibonacci numbers

The **Fibonacci numbers** are defined by the recurrence relation:

$$F_{n+1} = F_n + F_{n-1}$$

for all positive integers $n \geq 2$ with the initial conditions $F_0 = 0$ and $F_1 = 1$. This recurrence relation generates the **Fibonacci sequence**, denoted by $\{F_n\}$. The first 15 Fibonacci numbers are 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, and 377. The n^{th} Fibonacci number can be calculated using Binet's formula as follows:

$$F_n = \frac{\phi^n - (1-\phi)^n}{\sqrt{5}}$$

for all nonnegative integers n , where $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ is the golden ratio.

2.2 Lucas numbers

The **Lucas numbers** are defined by the recurrence relation:

$$L_{n+1} = L_n + L_{n-1}$$

for all positive integers $n \geq 2$ with the initial conditions $L_0 = 2$ and $L_1 = 1$. This recurrence relation generates the **Lucas sequence**, denoted by $\{L_n\}$. The first 15 Lucas numbers are 2, 1, 3, 4, 7, 11, 18, 29, 47, 76, 123, 199, 322, 521, and 843. The n^{th} Lucas number can be calculated using Binet's formula as follows: for all nonnegative integers n ,

$$L_n = \phi^n + (1-\phi)^n = \phi^n + (-\phi)^{-n}$$

for all nonnegative integers n , where $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ is the golden ratio.

Fibonacci and Lucas number are connected by various algebraic identities. For example,

- $L_n = F_{n-1} + F_{n+1} = 2F_{n+1} + F_n$
- $F_n = \frac{L_{n-1} + L_{n+1}}{5}$

2.3 Floor function

The **floor function**, denoted by $[x]$, maps a real number x to the greatest integer less than or equal to x . For example,

- $[0.4] = 0$
- $[1.6] = 1$
- $[-0.4] = -1$
- $[-1.6] = -2$

The main properties applied in this research are as follows: for any real number x , there exists a unique integer m that satisfying the following statements:

- $[x] = m$ if and only if $m \leq x < m + 1$;
- $[x] = m$ if and only if $x - 1 < m \leq x$.

3. Results

This section presents the proofs for the properties of the three families of fractions, starting with *Lemma 1* and *Lemma 2*.

The following lemma establishes the relationship between linear recurrence relations and their corresponding power series.

Lemma 1. Let a_n be a sequence of real numbers generated by the recurrence relation $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$ for all positive integers $n \geq 2$ with initial condition that a_0, a_1 as constants. Then, the generating function for the sequence is given by

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \frac{a_0 + (a_1 - a_0)x}{1 - x - x^2}$$

Proof. Consider the following equations

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n (1 - x - x^2) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - x \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - x^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n - \sum_{n=1}^{\infty} a_{n-1} x^n - \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2} x^n \\ &= a_0 + a_1 x - a_0 x + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n - a_{n-1} - a_{n-2}) x^n. \end{aligned}$$

From the recurrence relation, it follows that $a_n - a_{n-1} - a_{n-2} = 0$ for all positive integers $n \geq 2$ and

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n (1 - x - x^2) = a_0 + a_1 x - a_0 x.$$

Therefore,

$$\frac{a_0 + (a_1 - a_0)x}{1 - x - x^2} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

□

The examples of *Lemma 1* are Fibonacci and Lucas sequences as follows:

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 - x - x^2} &= \frac{F_1 + (F_2 - F_1)x}{1 - x - x^2} = F_1 + F_2 x + \cdots + F_n x^{n-1} + \cdots \\ \frac{2 - x}{1 - x - x^2} &= \frac{L_0 + (L_1 - L_0)x}{1 - x - x^2} = L_0 + L_1 x + L_2 x^2 + \cdots + L_n x^n + \cdots \end{aligned}$$

where $F_1 = F_2 = L_1 = 1$ and $L_0 = 2$. Next, we establish *Lemma 2* that shows the relationship between Lucas numbers and the golden ratio.

Lemma 2. The number of digits in the n^{th} Lucas number is equal to $1 + \lfloor n \log \phi \rfloor$.

Proof. Let n be a nonnegative integer. There exists a unique N such that the n^{th} Lucas number L_n can be expressed as

$$d_N d_{N-1} \dots d_2 d_1$$

where d_i denotes the digit associated with the 10^{i-1} power in the decimal expansion for all positive integers i . Therefore, L_n can also be written as $L_n = (d_N \cdot d_{N-1} \dots d_2 d_1) 10^{N-1}$.

It follows that

$$\begin{aligned} \log L_n &= \log(d_N \cdot d_{N-1} \dots d_2 d_1) + \log(10)^{N-1} \\ \log L_n &= \log(d_N \cdot d_{N-1} \dots d_2 d_1) + (N - 1) \log 10 \\ \log L_n &= y + N - 1 \text{ where } y = \log(d_N \cdot d_{N-1} \dots d_2 d_1). \end{aligned}$$

We have $N = \log L_n - y + 1$. Since $0 = \log(1) \leq y = \log(d_N \cdot d_{N-1} \dots d_2 d_1) \leq \log(10) = 1$, $N = \lfloor \log L_n \rfloor + 1$. Note that N is the number of digits in the n^{th} Lucas number.

From Binet's formula $L_n = \phi^n + (1 - \phi)^n = \phi^n + (-\phi)^{-n}$, we obtain $\log(L_n) = \log(\phi^n + (1 - \phi)^n) = \log(\phi^n + \frac{(-1)^n}{\phi^n})$. Thus $\log(\phi^n - \frac{1}{\phi^n}) \leq \log(L_n) \leq \log(\phi^n + \frac{1}{\phi^n})$.

Consider the $f(n) = \log(1 - \frac{1}{\phi^{2n}})$. Since $f(n)$ is strictly increasing, it follows that $-0.00355 < f(9) < f(n)$ for all $n > 9$. Conversely, let $g(n) = \log(1 + \frac{1}{\phi^{2n}})$. Since $g(n)$ is strictly decreasing, it follows that $0.00355 > g(9) > g(n)$ for all $n > 9$.

Note that $\log(\phi^n - \frac{1}{\phi^n}) = \log(\phi^n(1 - \frac{1}{\phi^{2n}})) = \log(\phi^n) + \log(1 - \frac{1}{\phi^{2n}}) > \log(\phi^n) - 0.00355$ for all integers $n > 9$. Similarly, note that $\log(\phi^n + \frac{1}{\phi^n}) = \log(\phi^n(1 + \frac{1}{\phi^{2n}})) = \log(\phi^n) + \log(1 + \frac{1}{\phi^{2n}}) < \log(\phi^n) + 0.00355$ for all integers $n > 9$. Thus, $\log \phi^n - 0.00355 < \log(L_n) < \log \phi^n + 0.00355$ for all integers $n > 9$.

If $\log \phi^n - 0.00355 - y < \log L_n - y = \lfloor \log L_n \rfloor$, then $\log \phi^n - 0.00355 < \lfloor \log L_n \rfloor + y = \lfloor \log L_n \rfloor$. We have $\lfloor \log \phi^n \rfloor - 1 < \lfloor \log L_n \rfloor$ for all integers $n > 9$. If $\lfloor \log L_n \rfloor = \log L_n - y < \log \phi^n + 0.00355 - y$, then $\lfloor \log L_n \rfloor = \lfloor \log L_n \rfloor + y < \log \phi^n + 0.00355$. We have $\lfloor \log L_n \rfloor < \lfloor \log \phi^n \rfloor + 1$ for all integers $n > 9$. It can be concluded that $\lfloor \log \phi^n \rfloor - 1 < \lfloor \log L_n \rfloor < \lfloor \log \phi^n \rfloor + 1$ for all integers $n > 9$. In addition, one can calculate to verify $\lfloor \log L_n \rfloor = \lfloor \log \phi^n \rfloor = 0$ for all integers $n \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ and $\lfloor \log L_n \rfloor = \lfloor \log \phi^n \rfloor = 1$ for all integers $n \in \{5, 6, 7, 8, 9\}$.

Therefore, $\lfloor \log L_n \rfloor = \lfloor \log \phi^n \rfloor = \lfloor n \log \phi \rfloor$ for all nonnegative integers n .

Since $N = \lfloor \log L_n \rfloor + 1$ and $\lfloor \log L_n \rfloor = \lfloor n \log \phi \rfloor$, $N = \lfloor n \log \phi \rfloor + 1$. This proves that the number of digits in the n^{th} Lucas number is equal to $1 + \lfloor n \log \phi \rfloor$. □

The examples of Lemma 2 are shown below:

- The number of digits in $L_0 = 2$ is equal to $1 + \lfloor 0(\log \phi) \rfloor = 1$;
- The number of digits in $L_1 = 1$ is equal to $1 + \lfloor 1(\log \phi) \rfloor = 1$;
- The number of digits in $L_5 = 11$ is equal to $1 + \lfloor 5(\log \phi) \rfloor = 2$;
- The number of digits in $L_{15} = 1364$ is equal to $1 + \lfloor 15(\log \phi) \rfloor = 4$;
- The number of digits in $L_{45} = 2537720636$ is equal to $1 + \lfloor 45(\log \phi) \rfloor = 10$;

Next, we examine the two main theorems stating the properties of the families of magic fractions.

Theorem 1. Let a sequence $\{R_n\}_{n=1}^{\infty}$ be a family of fractions where $R_n = \frac{2(10^n)-1}{10^{2n}-10^{n-1}}$ for all positive integers n . Then the decimal expansion of the fractions R_n generates the first M Lucas numbers starting with $L_0 = 2$ where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = n\}$.

Proof. From Lemma 1 and the recurrence relation of Lucas sequence $L_n = L_{n-1} + L_{n-2}$ for all positive integers $n > 1$ where $L_1 = 1$ and $L_0 = 2$, we have

$$L_0 + L_1x + L_2x^2 + \dots = \frac{2-x}{1-x-x^2}. \quad (1)$$

Multiplying both sides of Equation (1) by x , we have

$$L_0x + L_1x^2 + L_2x^3 + \dots = \frac{2x-x^2}{1-x-x^2}. \quad (2)$$

Replacing $x = 10^{-n}$ in Equation (2), we have

$$L_0(10^{-n}) + L_1(10^{-2n}) + L_2(10^{-3n}) + \dots = \frac{2(10^{-n}) - 10^{-2n}}{1 - 10^{-n} - 10^{-2n}}. \quad (3)$$

The right-hand side of Equation (3) gives the family of fractions when n is positive integer as follows:

$$\left\{ \frac{2(0.1) - (0.01)}{1 - (0.1) - (0.01)}, \frac{2(0.01) - (0.0001)}{1 - (0.01) - (0.0001)}, \frac{2(0.001) - (0.000001)}{1 - (0.001) - (0.000001)}, \dots \right\}.$$

That is,

$$\left\{ \frac{19}{89}, \frac{199}{9899}, \frac{1999}{998999}, \dots \right\}.$$

Hence, the right-hand side of Equation (3) provides the family $\{R_n\}_{n=1}^{\infty}$, while the left-hand side of Equation (3) gives the decimal expansion of the fractions R_n for all positive integers n . For example,

$$R_1 = \frac{19}{89} = L_0(0.1) + L_1(0.01) + L_2(0.001) + \dots = 0.2 + 0.01 + 0.003 + 0.004 + \dots;$$

$$R_2 = \frac{199}{9899} = L_0(0.01) + L_1(0.0001) + L_2(0.000001) + \dots = 0.02 + 0.0001 + 0.000003 + \dots.$$

Thus, each R_n generates the decimal containing the first M Lucas numbers for some positive integer M . Since some Lucas numbers have a place value exceeding 10^n , carrying over may occur; consequently, the summation on the left-hand side of Equation (3) does not display every Lucas number.

From Lemma 2, the number of digits in the n^{th} Lucas number is equal to $1 + \lfloor n \log \phi \rfloor$. Then, L_M is the greatest Lucas number with its place value less than 10^{n+1} , where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = n\}$. So, L_{M+1} is the smallest Lucas number with its place value equal to 10^{n+1} and L_M is the first Lucas number that fails to appear clearly in the decimal expansion of the fraction due to the carrying effect from subsequent terms.

It can be concluded that the decimal expansion of the fractions R_n generates the first M Lucas numbers starting with $L_0 = 2$ where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = n\}$. □

From Theorem 1, we can see that, for example, $R_1 = \frac{19}{89}$ generates the first four Lucas numbers starting with $L_0 = 2$ where $4 = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = 1\} = \max\{0, 1, 2, 3, 4\}$. That is,

$$R_1 = \frac{19}{89} = 0.2 + 0.01 + 0.003 + 0.0004 + 0.00007 + 0.000011 + \dots = 0.213483 \dots$$

which shows the only first four Lucas numbers: 2, 1, 3, and 4.

Next, we prove another main theorem about the family of magic fractions generating Lucas numbers starting with $L_1 = 1$.

Theorem 2. Let a sequence $\{P_n\}_{n=1}^{\infty}$ be a family of fractions where $P_n = \frac{10^{n+2}}{10^{2n-1} - 1}$ for all positive integers n . Then the decimal expansion of the fractions P_n generates the first $M - 1$ Lucas numbers starting with $L_1 = 1$ where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = n\}$.

Proof. From Lemma 1 and the recurrence relation of Lucas sequence $L_n = L_{n-1} + L_{n-2}$ for all positive integers $n > 2$ where $L_2 = 3$ and $L_1 = 1$, we have

$$L_1 + L_2x + L_3x^2 + \dots = \frac{1 + 2x}{1 - x - x^2}. \quad (5)$$

Multiplying both sides of Equation (1) by x , we have

$$L_1x + L_2x^2 + L_3x^3 + \dots = \frac{x + 2x^2}{1 - x - x^2}. \quad (6)$$

Replacing $x = 10^{-n}$ in Equation (2), we have

$$L_1(10^{-n}) + L_2(10^{-2n}) + L_3(10^{-3n}) + \dots = \frac{10^{-n} + 2(10^{-2n})}{1 - 10^{-n} - 10^{-2n}}. \quad (7)$$

The right-hand side of Equation (7) gives the family of fractions when n is positive integer as follows:

$$\left\{ \frac{0.1 + 2(0.01)}{1 - (0.1) - (0.01)}, \quad \frac{0.01 + 2(0.0001)}{1 - (0.01) - (0.0001)}, \quad \frac{0.001 + 2(0.000001)}{1 - (0.001) - (0.000001)}, \quad \dots \right\}.$$

That is,

$$\left\{ \frac{12}{89}, \quad \frac{102}{9899}, \quad \frac{1002}{998999}, \quad \dots \right\}.$$

Hence, the right-hand side of Equation (7) gives the family $\{P_n\}_{n=1}^{\infty}$, while the left-hand side of Equation (7) gives the decimal expansion of the fractions P_n for all positive integers n . For example,

$$P_1 = \frac{12}{89} = L_1(0.1) + L_2(0.01) + L_3(0.001) + \dots = 0.1 + 0.03 + 0.004 + 0.007 + \dots;$$

$$P_2 = \frac{102}{9899} = L_1(0.01) + L_2(0.0001) + L_3(0.000001) + \dots = 0.01 + 0.0003 + 0.000004 + \dots.$$

Thus, each P_n generates the decimal containing the first N Lucas numbers for some positive integer N . Since some Lucas numbers have a place value exceeding 10^n , carrying over may occur; consequently, the summation on the left-hand side of Equation (7) does not display every Lucas number.

From Lemma 2, the number of digits in the n^{th} Lucas number is equal to $1 + \lfloor n \log \phi \rfloor$. Then, L_M is the greatest Lucas number with its place value less than 10^{n+1} , where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = n\}$. So, L_{M+1} is the smallest Lucas number with its place value equal to 10^{n+1} and L_M is the first Lucas number that fails to appear clearly in the decimal expansion of the fraction due to the carrying effect from subsequent terms. It can be concluded that the decimal expansion of the fractions P_n generates the first $M - 1$ Lucas numbers starting with $L_1 = 1$ where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = n\}$.

□

From Theorem 2, we can see that, for example, $P_1 = \frac{12}{89}$ generates the first three Lucas numbers starting with $L_1 = 1$ where $4 = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi \rfloor = 1\} = \max\{0, 1, 2, 3, 4\}$. That is,

$$P_1 = \frac{12}{89} = 0.1 + 0.03 + 0.004 + 0.0007 + 0.00011 + \dots = 0.13483 \dots$$

which shows the only first three Lucas numbers: 1, 3, and 4.

Based on James Smoak's study in 2003, that the n^{th} Fibonacci number L_n can be written as

$$d_N d_{N-1} \dots d_2 d_1$$

where d_i represents a digit in the 10^{i-1} s place. Therefore, F_n can also be written as $F_n = (d_N d_{N-1} \dots d_2 d_1) 10^{N-1}$. It follows that $N = \log F_n - y + 1$ where $y = \log(d_N d_{N-1} \dots d_2 d_1)$ and N is the number of digits in the n^{th} Fibonacci number. Since $F_n = \frac{\phi^n - (1-\phi)^n}{\sqrt{5}}$ when $\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$, we have $N = \left\lfloor \log \frac{\phi^n}{\sqrt{5}} \right\rfloor + 1 = \lfloor n \log \phi - \log \sqrt{5} \rfloor + 1$. Therefore, we obtain the following corollary.

Corollary 3. Let a sequence $\{E_n\}_{n=1}^{\infty}$ be a family of fractions where $E_n = \frac{10^n}{10^{2n}-10^{n-1}}$ for all positive integers n . Then the decimal expansion of the fractions E_n generates the first $M - 1$ Fibonacci numbers starting with $F_1 = 1$ where $M = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi - \log \sqrt{5} \rfloor = n\}$.

From Corollary 3, we can see that, for example, $E_1 = \frac{10}{89}$ generates the first five Fibonacci numbers starting with $F_1 = 1$ where $6 = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi - \log \sqrt{5} \rfloor = 1\} = \max\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. That is,

$$E_1 = \frac{10}{89} = 0.1 + 0.01 + 0.002 + 0.0003 + 0.00005 + 0.000008 + \dots = 0.11235955 \dots$$

which displays the only first five Fibonacci numbers: 1, 1, 2, 3 and 5. For another example, $E_2 = \frac{10}{9899}$ generates the first ten Fibonacci numbers starting with $F_1 = 1$ where $11 = \max_{m \in \mathbb{N}} \{1 + \lfloor m \log \phi - \log \sqrt{5} \rfloor = 2\} = \max\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$. That is,

$$E_2 = \frac{100}{9899} = 0.01 + 0.0001 + 0.000002 + 0.00000003 + \dots = 0.010102030508132134559046 \dots$$

which shows the only first ten Fibonacci numbers: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, and 55.

We can notice that the three families of magic fractions $\{R_n\}_{n=1}^{\infty}$, $\{P_n\}_{n=1}^{\infty}$, and $\{E_n\}_{n=1}^{\infty}$ in Theorem 1, Theorem 2, and Corollary 3, respectively, are related. Since $\{R_n\}_{n=1}^{\infty}$ and $\{P_n\}_{n=1}^{\infty}$ are families of fractions generating Lucas numbers and $\{E_n\}_{n=1}^{\infty}$ is a family of fractions generating Fibonacci numbers,

$$2P_n - R_n = \frac{5}{10^n} E_n$$

for all positive integers n .

4. Conclusions

This research analyzes the pattern of repeated decimals of magic fractions and their special properties. There are three families that are studied as follows:

$$\{R_n\}_{n=1}^{\infty} = \left\{ \frac{19}{89}, \frac{199}{9899}, \frac{1999}{998999}, \dots, \frac{2(10^n) - 1}{\underbrace{10^{2n} - 10^n - 1}_{R_n}}, \dots \right\}$$

$$\{P_n\}_{n=1}^{\infty} = \left\{ \frac{12}{89}, \frac{102}{9899}, \frac{1002}{998999}, \dots, \frac{10^n + 2}{\underbrace{10^{2n} - 10^n - 1}_{P_n}}, \dots \right\}$$

$$\{E_n\}_{n=1}^{\infty} = \left\{ \frac{10}{89}, \frac{100}{9899}, \frac{1000}{998999}, \dots, \frac{10^n}{\underbrace{10^{2n} - 10^n - 1}_{E_n}}, \dots \right\}$$

The fractions in $\{R_n\}_{n=1}^{\infty}$ and $\{P_n\}_{n=1}^{\infty}$ generate Lucas numbers and the fractions in $\{E_n\}_{n=1}^{\infty}$ generate Fibonacci numbers. We give the exact number of Fibonacci and Lucas numbers in decimal forms of remarkable fractions. Moreover, we find the relation of these three families that

$$2P_n - R_n = \frac{5}{10^n} E_n$$

for all positive integers n . Our theorems may be applied in numerical analysis such as approximations and errors.

Acknowledgements

We acknowledge the support of Division of Mathematics and Statistics, Department of Computational Science and Digital Technology for providing the space and infrastructure that supported this research.

References

- Baird-Smith, P., Epstein, A., Flint, K., & Miller, S. J. (2018). The Zeckendorf Game. In *Combinatorial and Additive Number Theory, New York Number Theory Seminar* (pp. 25-38). Cham: Springer International Publishing.
- Batool, S. I., & Waseem, H. M. (2019). A novel image encryption scheme based on Arnold scrambling and Lucas series. *Multimedia tools and applications*, 78(19), 27611-27637.
- Ben-Ari, I., & Miller, S. J. (2016). A probabilistic approach to generalized Zeckendorf decompositions. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 30(2), 1302-1332.
- Cusenza, A., Dunkelberg, A., Huffman, K., Ke, D., Kleber, D., Miller, S. J., & Zheng, X. (2021). Winning Strategy for Multiplayer and Multialliance Zeckendorf Games. *The Fibonacci Quarterly*, 59(4), 308-318.
- Debnath, L. (2011). A short history of the Fibonacci and golden numbers with their applications. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 42(3), 337-367.
- Keller, T. J. (1972). Generalizations of Zeckendorf's theorem. *The Fibonacci Quarterly*, 10(1), 95-102.
- Knopfmacher, A., & Mays, M. E. (1995). Pierce Expansions of Ratios and Fibonacci and Lucas Numbers and Polynomials. *The Fibonacci Quarterly*, 33(2), 153-163.
- Koshy, T. (2019). *Fibonacci and Lucas Numbers with Applications, Volume 2* (Vol. 2). John Wiley & Sons.
- Maiti, C., Dhara, B. C., Umer, S., & Asari, V. (2023). An efficient and secure method of plaintext-based image encryption using fibonacci and tribonacci transformations. *IEEE Access*, 11, 48421-48440.
- Smoak, J., & Osler, T. J. (2003). A magic trick from Fibonacci. *The College Mathematics Journal*, 34(1), 58-60.
- Vajda, S. (2008). *Fibonacci and Lucas numbers, and the golden section: theory and applications*. Courier Corporation.
- Vigneron, V., Maaref, H., & Syed, T. Q. (2021). A new pooling approach based on zeckendorf's theorem for texture transfer information. *Entropy*, 23(3), 279.