



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal

เรียนรู้เพื่อรับใช้สังคม

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2567

ISSN 2985-1653 (Online)

Volume 10 No.2 July-December 2024



บทความวิจัย

- การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวดูดซับกับการสกัดสารจากมันเทศสีม่วง (*Ipomoea batatas*) ด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดสำหรับเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ
- การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทย
- การเปรียบเทียบการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยโดยตัวแบบ ARIMA และ ARIMAX
- ผลของสารสกัดสมุนไพรและการพัฒนาตำรับครีมสมุนไพรในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus*
- ระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกร โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก
- การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลบริเวณโดยรอบสถานที่ฝังกลบขยะชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายด้วยวิธีโพเทนชิโอเมตรี
- การเพิ่มประสิทธิภาพการสุ่มเพิ่มข้อมูลสำหรับข้อมูลไม่สมดุลในการจำแนกประเภท

บทความวิชาการ

- การบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ปีที่ 10 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2567

ISSN 2985-1653 (Online)

วัตถุประสงค์

เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยสาขาวิชา วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์สุขภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วิทยาการคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเพื่อส่งเสริมให้เกิดความรู้ทางวิชาการแก่สังคมทั่วไป และสนับสนุนให้ คณาจารย์ นักวิชาการ ผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และนักศึกษาเสนอผลงานวิชาการ

กำหนดเผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน

ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุไรพรรณ เจนวาณิชยานนท์

อาจารย์ ดร.จำรูญศรี พุ่มเทียน

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกาล

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.สุกัญญา เพชรศิริเวทย์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บังอร ฉางทรัพย์

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูรศักดิ์ เปลื้องผล

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ช่างทำ

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.นพมาศ อัครจันทโชติ

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ สุขสำราญ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.อรรพวรรณ ชัยลภากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.พีรพรรณ ตันอารีย์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ศาสตราจารย์ ดร.โกสุม จันทรศิริ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ศาสตราจารย์ ดร.อรษา สุตเธียรกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ครูส่ง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วิไล รังสาดทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลยุตต์ วรรณสว่าง
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ วิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจภรณ์ ประภักดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สิริธร สโมสร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี สายหยุดทอง
รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี พงศ์เสวี
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ ไชยนอก
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทนา จันทราพรชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภา มหากาญจนกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดิมา รุกขไชยศิริกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมศิลป์ ปิ่นสุข
รองศาสตราจารย์ นพ.สมพล สงวนรังศิริกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา จูอนุวัฒน์กุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันวิทยสิริเมธี
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฝ่ายพิสูจน์อักษรและตรวจการเขียนรายการอ้างอิง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ชุ่มบัวทอง
อาจารย์ ดร.นพมาศ อัครจันทโชติ
อาจารย์ยุคลธร สถาปนศิริ

อาจารย์ ดร.สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา
อาจารย์ ดร.สุกัญญา เพชรศิริเวทย์
อาจารย์ภัททิศา เลิศจริยพร

ฝ่ายเว็บไซต์และศิลปกรรมวารสาร

คุณอาคม สิมโสม

ฝ่ายการเงิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรวิภาล

คุณอริศรา สิทธิพงษ์

ฝ่ายสมาชิกวารสารและประชาสัมพันธ์

อาจารย์ตติภรณ์ ภัทรานุรักษ์โยธิน

เลขานุการกองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทเพ็ญ บางสำรวจ

อาจารย์ยุคลธร สถาปนศิริ

บทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยเฉพาะ
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนกับความคิดเห็นในข้อเขียนเหล่านั้น



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความ (peer review)

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.บุษบา ยงสมิทธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ สมสุข	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.วริศรา ปาริชาติกานนท์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.วารี ลิ้มปวีกรานต์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาล ปานรักษา	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.วิณา เสี่ยงเพราะ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตบรรจง ตั้งปอง	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงยศ อนุชปรีดา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นุชนิภา นันทะวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดร.ณัฏฐ์ วัฒนศิริเวช	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวลักษณ์ พงษ์ไพจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นงนุช เศรษฐเสถียร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ ศิริพรอดุลศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.พรพรม ย่อยสูงเนิน	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ภทวรรณ แสงนวกิจ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อรพินท์ จินตสถาพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริวิชญ์ กุมพล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา เตือนฉาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วิราวรรณ ชินวิริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.มนฤดี ผ่องอักษร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ พรหมสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อัชฌา อระวีพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จำเนียรสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ แหนจอน	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ ขำพึงสน	มหาวิทยาลัยพะเยา
รองศาสตราจารย์ ดร.สุริวัลย์ ดวงจิตต์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญรัตนกรกิจ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพรพรณ สุทรโชติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันตพงษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภา สิละวัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี แสงวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐพร วังโน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณมณ ญ จอม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เจริญสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี อารีศรีสม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสมัย วัฒนสิทธิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราทิพย์ จันสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ชัยสุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ปันรัตน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิตรี เจริญพานิชกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจิรา อินตะใส
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ อินทโกสม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี กล่อมวิเศษ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากานต์ เกียรติอร่ามกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ แสนราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ พลธิ์รักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร มัชฌิมะปุระ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนาถ แซ่มซ้อย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เตมีย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร แนวบุตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิมา นาคาพงศ์ อัครวิทย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไผ่แดง ขวัญใจ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ พรหมเด่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิขญา สวัสดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิมพ์ชนก พริกบุญจันทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปุณญาเพชร เดชเพชรธักษ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายใน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ โสภิตธรรมคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา เสมศรี
อาจารย์ ดร.มธุรส อ่อนไทย



บรรณาธิการแถลง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในฐานะเป็นสื่อกลางสำคัญในการแลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการของคณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และนักวิชาการ เพื่อก่อให้เกิดการสร้างสรรคผลงานวิชาการทั้งทางด้านการศึกษาและการวิจัยให้ก้าวหน้าต่อไป วารสารฉบับนี้เป็นฉบับที่ 2 ของปี พ.ศ. 2567 (กรกฎาคม - ธันวาคม) ซึ่งเป็นปีที่ 10 ของการดำเนินงานวารสาร มีจำนวนบทความทั้งหมด 9 เรื่อง ประกอบด้วยบทความวิจัย 8 เรื่อง และบทความวิชาการ 1 เรื่อง ซึ่งบทความเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการกลั่นกรองทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ในแต่ละสาขาวิชาอย่างน้อยหนึ่งท่าน เพื่อให้ได้คุณภาพและถูกต้องทางวิชาการ ตามเกณฑ์มาตรฐานของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index-TCI) โดยวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ได้ผ่านการรับรองคุณภาพอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 จากการประเมินคุณภาพวารสารวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI รอบที่ 4 พ.ศ. 2563-2567 ครั้งที่ 2 (2564-2567)

กองบรรณาธิการวารสารจะยังคงรักษาคุณภาพและมาตรฐานของวารสาร โดยปรับปรุงการดำเนินงานของกองบรรณาธิการวารสารในทุกฝ่าย เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินคุณภาพวารสารวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI โดยเฉพาะอย่างยิ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินบทความ (Peer-review) ตรวจสอบสอบบทความอย่างน้อย 3 ท่าน วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เพื่อควบคุมคุณภาพบทความของวารสารให้ได้มาตรฐานระดับสูง รวมทั้งผู้เขียนบทความในการแก้ไขบทความจนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจ เพื่อนำประโยชน์ไปใช้ในการอ้างอิง พัฒนางานวิจัย ตลอดจนสามารถนำมาปรับปรุงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ทั้งนี้กองบรรณาธิการใคร่ขอเชิญชวนท่านผู้สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ที่วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ โดยสามารถส่งต้นฉบับตามรายละเอียดในท้ายเล่มนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกาล

บรรณาธิการวารสาร



สารบัญ

บทความวิจัย

หน้า

- การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองกับการสกัดสารจากมันเทศสีม่วง (*Ipomoea batatas*) 1
ด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดสำหรับเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ
*Application of Response Surface Methodology to Acidified Water Extraction of Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) for Improving Bioactive Compounds and Antioxidant Activity*
สุพิชญ์ คำคม พัทยา ใจคำ และ พิชิต โชตก
- การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทย..... 31
Assessing Water Footprint and Virtual Water Related to Export of Fresh Tomatoes of Thailand
มนัสวี พานิชนอก สรัญญา ถีป้อม และ นภาพร มีสะอาด
- การเปรียบเทียบการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยโดยตัวแบบ ARIMA และ ARIMAX..... 44
A comparison of Consumer Price Index Forecasting using ARIMA and ARIMAX Model
กานต์ณัฐ ณ บางช้าง และ วันอาทิตย์ วันยะพาร์
- ผลของสารสกัดสมุนไพรและการพัฒนาตำรับครีมสมุนไพรในการยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย 60
Staphylococcus aureus
Effects of Herbal Extracts and Herbal Cream Formula Development on the Inhibition of Staphylococcus aureus Growth
ณวัตร ภักดี จตุพร ประทุมเทศ ภาวนิชา พงศ์นราทร สุรพงศ์ รัตนะ และ รณชัย ภูวันนา
- ระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกร โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก 70
Farrowing Monitoring System for Sows Using Deep Learning Techniques
สุธีรา พึ่งสวัสดิ์ จันเพ็ญ บางสำรวจ พงศกร บำรุงไทย และ พันธกร พนาพิทักษ์กุล
- การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลบริเวณโดยรอบสถานที่ 82
ฝังกลบขยะชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
Health Risk and Contamination Assessment of Heavy Metals in Groundwater around Municipal Landfill, Ayutthaya Province
สมคิด ต้นเก็ง และ ศิริภัสสร พันธะสา
- ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลาย 98
ด้วยวิธีโพเทนชิโอเมตริก
Carbon paste electrode modified with biochar for the determination of lead ion in aqueous solution by potentiometric method
ธนวัฒน์ พงษ์ศักดิ์ อรณวล หาญเม่ง และ เขมวดี อุดมพันธ์
- การเพิ่มประสิทธิภาพการสุ่มเพิ่มข้อมูลสำหรับข้อมูลไม่สมดุลในการจำแนกประเภท 110
Enhancing Random Oversampling for Imbalanced Classification
นพมาศ อัครจันทโชติ คีลา เต็มศิริฤกษ์กุล วรณัฐ มิภูมิจู และ ยุวธิดา ชิวปรีชา

บทความวิชาการ

- การบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว 19
Cognitive Behavioral Therapy in Children with Anger and Aggression
ศิลป์ไทย ธรรมเรืองฤทธิ์



การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองกับการสกัดสารจากมันเทศสีม่วง (*Ipomoea batatas* L.)
ด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดสำหรับเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

Application of Response Surface Methodology to Acidified Water Extraction of Purple Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) for Improving Bioactive Compounds and Antioxidant Activity

สุพิชญา คำคม¹ พิทยา ใจคำ² และ พิชิต โชคก^{3*}

¹หลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

²หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตและการจัดการเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

³หลักสูตรเทคโนโลยีการเกษตรสมัยใหม่ มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

Supichaya Khumkhom¹ Pittaya Chaikham² and Pichit Chodok^{3*}

¹Division of Home Economics, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,

Phranakhon Si Ayutthaya 13000

²Division of Food Science and Technology Management, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,

Phranakhon Si Ayutthaya 13000

³Division of Modern Agriculture Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,

Phranakhon Si Ayutthaya 13000

*Corresponding author: dr.pichitchodok@gmail.com

Received: 15 April 2024/ Revised: 21 June 2024/ Accepted: 24 June 2024

บทคัดย่อ

มันเทศสีม่วง (Purple sweet potatoes, PSP) เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากมาย โดยเฉพาะสารต้านอนุมูลอิสระ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผลิตและการนำเข้าที่มากขึ้นส่งผลให้เกษตรกรประสบปัญหาด้านราคาที่ดินตกต่ำ ซึ่ง PSP สามารถนำมาผ่านกระบวนการเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจาก PSP ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) โดยมีตัวแปรต้นประกอบด้วยอัตราส่วนของน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A: 20-60 มิลลิลิตรต่อกรัมของมันเทศสีม่วง) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B: ร้อยละ 0.2-0.6) เวลาที่ใช้ในการสกัด (C: 1.0-5.0 ชั่วโมง) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D: 20.0-60.0 องศาเซลเซียส) ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในการสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC, Y_{TPC}) ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC, Y_{TFC}) แอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC, Y_{TAC}) ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP, Y_{FRAP}) และ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS⁺⁺, $Y_{ABTS^{++}}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสองที่ได้จากผลการทดลองมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p < 0.0001$) มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9895, 0.9940, 0.9855, 0.9966 และ 0.9912 ตามลำดับ สำหรับ

ผลตอบสนอง Y_{TPC} , Y_{TFC} , Y_{TAC} , Y_{FRAP} และ $Y_{ABTS^{++}}$ ซึ่งบ่งบอกถึงความสอดคล้องกันระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยน้ำที่มีสภาพเป็นกรดได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ $ABTS^{++}$ เท่ากับ 6.28 mg GAE/g PSPP, 5.50 mg RE/g PSPP, 1.48 mg CGE/g PSPP, 11.26 mg TE/g PSPP และ 2.97 mg TE/g PSPP ตามลำดับ มีค่าร้อยละความผิดพลาด 0.64-2.70 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง 0.972 ผลจากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติที่มีศักยภาพซึ่งสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารฟังก์ชัน สารสีธรรมชาติ และผลิตภัณฑ์เสริมอาหารได้

คำสำคัญ: มันเทศสีม่วง สารประกอบฟีนอลิก สารประกอบฟลาโวนอยด์ สารประกอบแอนโทไซยานิน ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ วิธีพื้นผิวตอบสนอง

Abstract

Purple sweet potatoes (PSP) are rich in bioactive compounds, especially antioxidants. However, due to increased production and imports, there is now an oversupply, causing prices to drop for farmers. Nonetheless, PSP can be processed into value-added products. The objectives of this study were to optimize the extraction conditions of bioactive compounds from PSP using response surface methodology (RSM). The independent variables were viz. acidified water to purple sweet potato powder (PSPP) ratio (A: 20-60 mL/g PSPP), HCl concentration (B: 0.2-0.6%), extraction time (C: 1-5 h) and extraction temperature (D: 20-60°C). ANOVA results showed that acidified water to PSPP ratio, HCl concentration, extraction time and extraction temperature affected the total phenolic content (TPC, Y_{TPC}), total flavonoid content (TFC, Y_{TFC}), total anthocyanin content (TAC, Y_{TAC}), ferric reducing antioxidant power (FRAP, Y_{FRAP}) and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ($ABTS^{++}$, $Y_{ABTS^{++}}$) radical scavenging activities significantly ($p < 0.05$). A second-order polynomial model satisfactorily fitted the experimental data with the R^2 values of 0.9895, 0.9940, 0.9855, 0.9966 and 0.9912, respectively for the responses Y_{TPC} , Y_{TFC} , Y_{TAC} , Y_{FRAP} and $Y_{ABTS^{++}}$ ($p < 0.0001$), implying a good agreement between the experimental and predicted values. Under the optimized conditions, TPC, TFC, TAC, FRAP and $ABTS^{++}$ in acidified water extraction were 6.28 mg GAE/g PSPP, 5.50 mg RE/g PSPP, 1.48 mg CGE/g PSPP, 11.26 mg TE/g PSPP and 2.97 mg TE/g PSPP, respectively, with % error 0.64-2.70 and desirability 0.972. These results suggest that bioactive compounds from purple sweet potato are potential natural antioxidant agent that can be used as functional food ingredients, natural colorant and nutraceutical products.

Keywords: Purple sweet potato, Phenolic compound, Flavonoid compound, Anthocyanin compound, Antioxidant activity, Response surface methodology

บทนำ

มันเทศ (sweet potato) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Ipomoea batatas* L. อยู่ในวงศ์เดียวกับผักบุ้ง (Convolvulaceae) เป็นพืชหัวที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปอาหาร เครื่องสำอาง และเภสัชกรรม เป็นต้น โดยมันเทศเป็นหนึ่งในพืชอาหารหลักของโลกที่ให้คาร์โบไฮเดรตรองจากข้าวสาลี ข้าว ข้าวโพด มันฝรั่ง ข้าวบาร์เลย์ และมันสำปะหลัง มีการเพาะปลูกมากในแถบทวีปแอฟริกา อเมริกาใต้ และเอเชีย โดยเฉพาะประเทศจีนผลิตมันเทศได้มากถึงปีละ 117 ล้านตัน [1] และแนะนำให้ประชาชนชาวจีนบริโภคในปริมาณ 50-100 กรัมต่อวัน [2] เนื่องจากมันเทศ



อุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรต [3] สารประกอบฟีนอลิก (เช่น caffeoylquinic acid derivatives) [4] ฟลาโวนอยด์ [5] สารแอนโทไซยานิน [6] สารสตีแรนอยด์ (บีต้า-แคโรทีน) และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch polysaccharides) [7] ทั้งนี้ปริมาณสารเหล่านี้มีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพันธุ์มันเทศ เช่น มันเทศสีขาว สีส้ม สีเหลือง หรือสีม่วง เป็นต้น โดยเฉพาะมันเทศสีม่วง พบว่ามีสารแอนโทไซยานินเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ และมีปริมาณสูงกว่ามันเทศสีเหลืองขาว และส้ม ในขณะที่มันเทศสีส้มมีสารแคโรทีนอยด์สะสมมากที่สุด [5] ในปัจจุบันสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในมันเทศสีม่วงได้รับความสนใจในทางการแพทย์ เนื่องจากมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [6] ต้านการอักเสบ [8] ป้องกันการเกิดโรคมะเร็ง [9] ลดความดันโลหิตสูง ลดเบาหวาน ลดภาวะกรดยูริกในเลือดสูง [10] ปกป้องความเป็นพิษต่อตับ [11] ลดระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด [12] และปกป้องเซลล์ประสาท [13]

จังหวัดพระนครศรีอยุธยามีการเพาะปลูกมันเทศเป็นจำนวนมาก โดยพันธุ์ที่ปลูกมีลักษณะสีเนื้อที่แตกต่างกัน เช่น พันธุ์อีกา พันธุ์ปากช่อง พันธุ์เนื้อสีม่วง พันธุ์เวียดนามเนื้อสีม่วงเข้ม พันธุ์ญี่ปุ่นเนื้อสีเหลืองและสีม่วงเข้ม [14] การเพาะปลูกและผลผลิตที่มีจำนวนมากร่วมกับการนำเข้าจากต่างประเทศที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกษตรกรประสบปัญหาด้านราคาที่ดีต่ำ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการสร้างทางเลือกใหม่สำหรับการนำมันเทศสีม่วงไปใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น โดยการนำมาสกัดและใช้ประโยชน์จากสารสกัดในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อสุขภาพ และผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ในกระบวนการสกัดสารจากพืชมีวิธีการสกัดหลายวิธี การสกัดแบบการแช่ด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีการสกัดที่มีขั้นตอนง่าย ต้นทุนไม่สูง แต่การสกัดอาจจะใช้ระยะเวลานาน ซึ่งในปัจจุบันวิธีการสกัดแบบนี้มีกรรมนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีทางคณิตศาสตร์และสถิติ ได้แก่ วิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ซึ่งเป็นการใช้องค์ความรู้ทางคณิตศาสตร์และสถิติมาวางแผนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่สุดของผลตอบสนอง ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวางแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (central composite design, CCD) เป็นการพัฒนาจากการวางแผนการทดลองเพื่อให้สามารถสร้างรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหรือแบบความสัมพันธ์อันดับสอง (quadratic model) ได้ ข้อดีของการวางแผนการทดลองแบบ CCD จะช่วยลดจำนวนชุดของการทดลองและลดการใช้ทรัพยากรในการทดลองให้น้อยลง รวมทั้งทราบถึงผลของปัจจัยที่มีปฏิสัมพันธ์ร่วมกัน (interaction) สำหรับการประยุกต์ใช้วิธี RSM และวางแผนการทดลองแบบ CCD ในงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากพืช ตัวอย่างเช่น การสกัดสารประกอบฟีนอลิกจากเมล็ดเสาวรสและเมล็ดเงาะ [15] เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงด้วยตัวทำละลายน้ำที่มีสภาพเป็นกรดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และวางแผนการทดลองแบบ CCD รวมทั้งศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบมันเทศสีม่วง ซึ่งองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำสารสกัดที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าในทางเภสัชกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมผงมันเทศสีม่วง

มันเทศสีม่วง (purple sweet potato, PSP) ซื้อมาจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกมันเทศในอำเภอบางปะหัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น และปอกเปลือกออก หลังจากนั้นนำมันเทศสีม่วงไปเตรียมให้เป็นผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง (drum dryers) โดยการนำไปนึ่งเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นตีบดให้ละเอียด และนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยไอน้ำความดันสูงความเร็ว 3 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะได้มันเทศสีม่วงที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ และนำมาปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด [16] และเก็บรักษาผงมันเทศสีม่วง (purple sweet potato powder, PSPP) ในถุงลามิเนทกันความชื้นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมันเทศสีม่วงด้วยวิธี RSM

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดต่อปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content, TPC) สารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (total flavonoid content, TFC) และสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (total anthocyanin content, TAC) รวมทั้งการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี ferric reducing antioxidant power (FRAP) และ 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS⁺) โดยศึกษาตัวแปรต้นที่ใช้ในการสกัดจำนวน 4 ปัจจัย ได้แก่ (A) อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (ratio of acidified water to PSPP) 20.0-60.0 มิลลิลิตรต่อกรัม ผงมันเทศสีม่วง (B) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (HCl concentration) ร้อยละ 0.2-0.6 (C) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (extraction time) 1.0-5.0 ชั่วโมง และ (D) อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (extraction temperature) 20.0-60.0 องศาเซลเซียส โดยแบ่งระดับของตัวแปรต้นเหล่านี้ออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ -2 (- α), -1, 0, +1 และ +2 (+ α) มีจำนวนชุดการทดลองทั้งหมด 30 การทดลองแสดงดังตารางที่ 1 เมื่อทำการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงในแต่ละชุดการทดลองแล้ว นำตัวอย่างที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงควบคุมอุณหภูมิ (Eppendorf centrifuge 5810R, Germany) ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดหยาบไปวิเคราะห์หาปริมาณ TPC, TFC และ TAC รวมทั้งทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (FRAP และ ABTS⁺) ต่อไป โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

3. การวิเคราะห์หาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดหยาบที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณ TPC

การวิเคราะห์หาปริมาณ TPC ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (U-5100 UV-visible spectrophotometer, Hitachi, Japan) ที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร ตามวิธีการของ Shao และคณะ [17] มีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำปราศจากไอออน Folin-Ciocalteu reagent (เจือจางร้อยละ 10) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 5 นาที และเติมน้ำปราศจากไอออน โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร (OD₇₂₅) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณ TPC โดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (gallic acid equivalent, GAE) และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg GAE/g PSPP)

3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณ TFC

การวิเคราะห์หาปริมาณ TFC ด้วยวิธี aluminum chloride colorimetry ตามวิธีการของ Kubola และคณะ [18] มีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำปราศจากไอออน (deionized water) ปริมาตร 2.25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน โซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂) ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน อะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl₃) ความเข้มข้นร้อยละ 10.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 0.30 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 6 นาที เมื่อครบเวลาแล้ว เติมน้ำปราศจากไอออน โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร (OD₅₁₀) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และคำนวณหาปริมาณ TFC โดยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของรูติน (rutin equivalent, RE) และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของรูตินต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg RE/g PSPP)



3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ TAC

การวิเคราะห์หาปริมาณ TAC ด้วยวิธี pH-differential ตามวิธีการของ Shao และคณะ [17] มีขั้นตอนการปฏิบัติดังต่อไปนี้ นำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองจำนวน 2 หลอด หลอดที่ 1 นำมาเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 1.0 จนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 นาโนเมตร (OD_{510} และ OD_{700}) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในขณะที่หลอดที่ 2 นำมาเจือจางด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 4.5 จนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 และ 700 นาโนเมตร คำนวณหาปริมาณ TAC และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ cyanidin 3-glucoside ต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg CGE/g PSPP)

4. การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

4.1 การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ตามวิธีการของ Kubola และคณะ [18] โดยการนำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย FRAP ปริมาตร 3.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้ในที่มืดอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร (OD_{593}) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่างสารสกัดหยาบ และคำนวณหาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยการเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ trolox (6-hydroxy-2, 5, 7, 8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid, trolox) และรายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ Trolox ต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg trolox equivalent/g PSPP, mg TE/g PSPP)

4.2 การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS⁺

การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS⁺ ตามวิธีการของ Shao และคณะ [17] โดยการเตรียมสารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ สารละลาย ABTS ที่ความเข้มข้น 7.0 มิลลิโมลาร์ และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ที่ความเข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ นำสารละลายทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันในอัตราส่วน 1.0:0.5 ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 12-16 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ หลังจากนั้นเตรียมสารละลาย ABTS⁺ โดยการเจือจางด้วยเมทานอลให้มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.7 ± 0.02 ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร (OD_{734}) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ การวิเคราะห์หาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS⁺ เริ่มต้นจากการนำตัวอย่างสารสกัดหยาบปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย ABTS⁺ ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นเป็น blank แทนตัวอย่างสารสกัดหยาบ และใช้ trolox เป็นสารมาตรฐาน รายงานผลการทดลองเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ trolox ต่อกรัมมันเทศสีม่วง (mg TE/g PSPP)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺) มาวิเคราะห์คุณภาพ ความเหมาะสม ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจปรับแก้ (adjusted R^2) สัมประสิทธิ์ของความผันแปร (coefficient of variation, CV) และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ ของสารสกัดหยาบในรูปของสมการที่ 1

$$Y_{(\text{Response})} = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3C + \beta_4D + \beta_{12}AB + \beta_{13}AC + \beta_{14}AD + \beta_{23}BC + \beta_{24}BD + \beta_{34}CD + \beta_{11}A^2 + \beta_{22}B^2 + \beta_{33}C^2 + \beta_{44}D^2 \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ผลตอบสนอง ได้แก่ TPC (mg GAE/g PSPP), TFC (mg RE/g PSPP), TAC (mg CGE/g PSPP), FRAP (mg TE/g PSPP) และ ABTS⁺ (mg TE/g PSPP)



A, B, C และ D คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ต้องการศึกษา

β_0 คือ ค่าคงที่สมการ

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ และ β_4 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรง

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{14}, \beta_{23}, \beta_{24}$ และ β_{34} คือ สัมประสิทธิ์ของสมการปฏิสัมพันธ์

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ และ β_{44} คือ สัมประสิทธิ์ของสมการกำลังสอง

6. การสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามข้อ 5 แล้ว นำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงที่ส่งผลให้ได้ปริมาณ TPC, TFC และ TAC สูงสุด รวมทั้งได้สารสกัดหยาบที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS^{•+} มากที่สุดด้วยการใช้โปรแกรม Design-Expert Version 13.0.3 (Stat Ease Inc., MN, USA)

7. การศึกษาความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดมันเทศสีม่วง

นำสารสกัดที่เตรียมได้จากข้อ 6 มาหาสภาวะของการสกัดที่เหมาะสมตามที่ได้ทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 - 6 โดยสภาวะของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) เวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) จากนั้นนำตัวอย่างสารสกัดหยาบที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปวิเคราะห์หาปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS^{•+} ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนาย (predicted value) กับผลที่ได้จากการทดลองจริง (experimental value) และนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% error) รวมทั้งค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (desirability)

ผลการวิจัย

1. ผลของสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ผลจากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารจากมันเทศสีม่วงด้วยวิธี RSM ใช้การออกแบบการทดลอง CCD ต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS^{•+} จากมันเทศสีม่วง แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าสามารถสกัดสารได้ปริมาณ TPC, TFC และ TAC แตกต่างกันในช่วง 4.72 - 6.27 mg GAE/g PSPP, 4.34-6.79 mg RE/g PSPP และ 1.03-1.45 mg CGE/g PSPP ตามลำดับ ในขณะที่ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างสารสกัดหยาบจากมันเทศสีม่วงเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS^{•+} มีค่าอยู่ในช่วง 8.73-11.38 และ 2.61-4.56 mg TE/g PSPP ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในการทดลองที่ 16 ประกอบด้วยปัจจัย A = 50 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง ปัจจัย B = ร้อยละ 0.5 ปัจจัย C = 4 ชั่วโมง และปัจจัย D = 50 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างสารสกัดหยาบมีปริมาณ TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP สูงสุดเท่ากับ 6.27 mg GAE/g PSPP, 1.45 mg CGE/g PSPP และ 11.38 mg TE/g PSPP ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองที่ 19 (A = 40 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง B = ร้อยละ 0.2 C = 3 ชั่วโมง และ D = 40 องศาเซลเซียส) ตัวอย่างสารสกัดหยาบมีปริมาณ TFC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS^{•+} สูงที่สุดเท่ากับ 6.79 mg RE/g PSPP และ 4.56 mg TE/g PSPP ตามลำดับ (ตารางที่ 1) จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าตัวแปรต้นของการสกัดทั้ง 4 ปัจจัย (A, B, C และ D) มีอิทธิพลต่อการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมันเทศสีม่วง



ตารางที่ 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) แอนโทไซยานินทั้งหมด (TAC) ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS⁺⁺ ของสารสกัดหยาบในแต่ละการทดลองเมื่อออกแบบการทดลองด้วยวิธี CCD สำหรับ RSM

Runs	A	B	C	D	TPC	TFC	TAC	FRAP	ABTS ⁺⁺
					(mg GAE/g PSPP)	(mg RE/g PSPP)	(mg CGE/g PSPP)	(mg TE/g PSPP)	(mg TE/g PSPP)
					Exp. (Pred.)	Exp. (Pred.)	Exp. (Pred.)	Exp. (Pred.)	Exp. (Pred.)
1	30	0.3	2	30	4.72 (4.80)	5.40 (5.40)	1.04 (1.04)	8.74 (8.87)	3.20 (3.30)
2	50	0.3	2	30	5.22 (5.24)	6.08 (6.04)	1.11 (1.10)	9.80 (9.72)	3.48 (3.49)
3	30	0.5	2	30	5.01 (4.95)	4.79 (4.77)	1.06 (1.05)	9.58 (9.58)	2.61 (2.64)
4	50	0.5	2	30	5.41 (5.42)	5.43 (5.39)	1.10 (1.11)	10.30 (10.24)	2.82 (2.85)
5	30	0.3	4	30	4.85 (4.88)	4.98 (5.02)	1.04 (1.05)	8.94 (8.91)	3.48 (3.51)
6	50	0.3	4	30	5.38 (5.38)	5.53 (5.57)	1.13 (1.14)	9.98 (10.07)	3.51 (3.58)
7	30	0.5	4	30	4.98 (5.04)	4.85 (4.81)	1.11 (1.11)	9.49 (9.59)	2.72 (2.72)
8	50	0.5	4	30	5.57 (5.56)	5.41 (5.34)	1.20 (1.19)	10.55 (10.56)	2.77 (2.81)
9	30	0.3	2	50	5.20 (5.19)	5.00 (5.03)	1.15 (1.15)	9.48 (9.44)	3.84 (3.79)
10	50	0.3	2	50	5.55 (5.53)	5.77 (5.78)	1.25 (1.24)	10.67 (10.58)	3.98 (4.06)
11	30	0.5	2	50	5.63 (5.68)	4.73 (4.67)	1.25 (1.24)	9.93 (9.85)	2.91 (2.92)
12	50	0.5	2	50	6.10 (6.05)	5.48 (5.41)	1.33 (1.31)	10.79 (10.79)	3.25 (3.21)
13	30	0.3	4	50	5.27 (5.31)	4.73 (4.74)	1.22 (1.20)	9.55 (9.62)	3.75 (3.79)
14	50	0.3	4	50	5.68 (5.72)	5.42 (5.41)	1.32 (1.31)	11.11 (11.08)	3.99 (3.95)
15	30	0.5	4	50	5.84 (5.80)	4.80 (4.80)	1.35 (1.34)	9.94 (9.99)	2.81 (2.79)
16	50	0.5	4	50	6.27 (6.24)	5.48 (5.45)	1.45 (1.44)	11.38 (11.26)	3.00 (2.97)
17	20	0.4	3	40	4.80 (4.74)	4.34 (4.33)	1.14 (1.15)	8.73 (8.62)	3.00 (2.96)
18	60	0.4	3	40	5.58 (5.62)	5.54 (5.62)	1.30 (1.31)	10.60 (10.73)	3.36 (3.33)
19	40	0.2	3	40	5.31 (5.24)	6.79 (6.72)	1.04 (1.05)	9.47 (9.45)	4.56 (4.48)
20	40	0.6	3	40	5.87 (5.92)	6.00 (6.13)	1.18 (1.19)	10.30 (10.34)	2.83 (2.85)
21	40	0.4	1	40	5.22 (5.22)	4.73 (4.80)	1.11 (1.13)	10.01 (10.11)	3.32 (3.27)
22	40	0.4	5	40	5.52 (5.49)	4.46 (4.46)	1.27 (1.27)	10.69 (10.61)	3.25 (3.24)
23	40	0.4	3	20	5.10 (5.05)	4.97 (5.01)	1.03 (1.02)	9.57 (9.48)	2.84 (2.71)
24	40	0.4	3	60	6.08 (6.11)	4.72 (4.75)	1.35 (1.38)	10.65 (10.75)	3.29 (3.35)
25	40	0.4	3	40	5.65 (5.61)	4.57 (4.71)	1.17 (1.22)	10.05 (10.04)	3.43 (3.33)
26	40	0.4	3	40	5.67 (5.61)	4.75 (4.71)	1.22 (1.22)	10.17 (10.04)	3.23 (3.33)
27	40	0.4	3	40	5.67 (5.61)	4.80 (4.71)	1.22 (1.22)	10.07 (10.04)	3.28 (3.33)
28	40	0.4	3	40	5.53 (5.61)	4.72 (4.71)	1.21 (1.22)	10.02 (10.04)	3.34 (3.33)
29	40	0.4	3	40	5.67 (5.61)	4.62 (4.71)	1.24 (1.22)	10.04 (10.04)	3.30 (3.33)
30	40	0.4	3	40	5.47 (5.61)	4.77 (4.71)	1.24 (1.22)	9.90 (10.04)	3.40 (3.33)

Exp. คือ ผลที่ได้จากการทดลองจริง (experimental value), Pred. คือ ผลที่ได้จากการทำนาย (predicted value)
 A คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง, B คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก, C คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และ D คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด

2. ผลของการวิเคราะห์คุณภาพและความเหมาะสมของข้อมูลปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

ผลของการตรวจสอบคุณภาพ และความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้ง 30 การทดลอง แสดงดังภาพที่ 1 (a1) – (a5) เป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูล พบว่าข้อมูลปริมาณ (a1) TPC, (a2) TFC และ (a3) TAC ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (a4) FRAP และ (a5) ABTS⁺⁺ มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ในขณะที่ภาพที่ 1 (b1) – (b5) เป็นการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนโดยพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายของส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย ได้แก่ ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺⁺ พบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งในด้านบวกและลบ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมีเสถียรภาพของความแปรปรวน และภาพที่ 1 (c1) – (c5) เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลโดยพิจารณาจากกราฟส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลอง พบว่าส่วนตกค้างของข้อมูลปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺⁺ มีการกระจายตัวไร้รูปแบบ แสดงให้เห็นถึงความเป็นอิสระของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมีคุณภาพ และมีความเหมาะสมในการนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS⁺⁺ ของสารสกัดหยาบ

3. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง

ผลจากการเลือกรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS⁺⁺ ของสารสกัดหยาบจากมันเทศสีม่วง โดยพิจารณาจากผลสรุปทางสถิติ พบว่าจากการประเมินค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) รูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กำลังสอง (quadratic model) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺⁺ โดยค่า R^2 ของแบบจำลองกำลังสองมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9814, 0.9887, 0.9793, 0.9838 และ 0.9826 ตามลำดับ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบกำลังสอง หรือ quadratic model มีความเหมาะสมที่จะใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (A, B, C และ D) กับปริมาณ TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS⁺⁺ รวมทั้งยังสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2 - 6

$$\text{TPC (mg GAE/g PSPP)} = 5.61 + 0.2183A + 0.1692B + 0.0667C + 0.265D + 0.0063AB + 0.015AC - 0.0225AD + 0.0013BC + 0.0838BD + 0.01CD - 0.1079A^2 - 0.0079B^2 - 0.0629C^2 - 0.0079D^2 \quad (2)$$

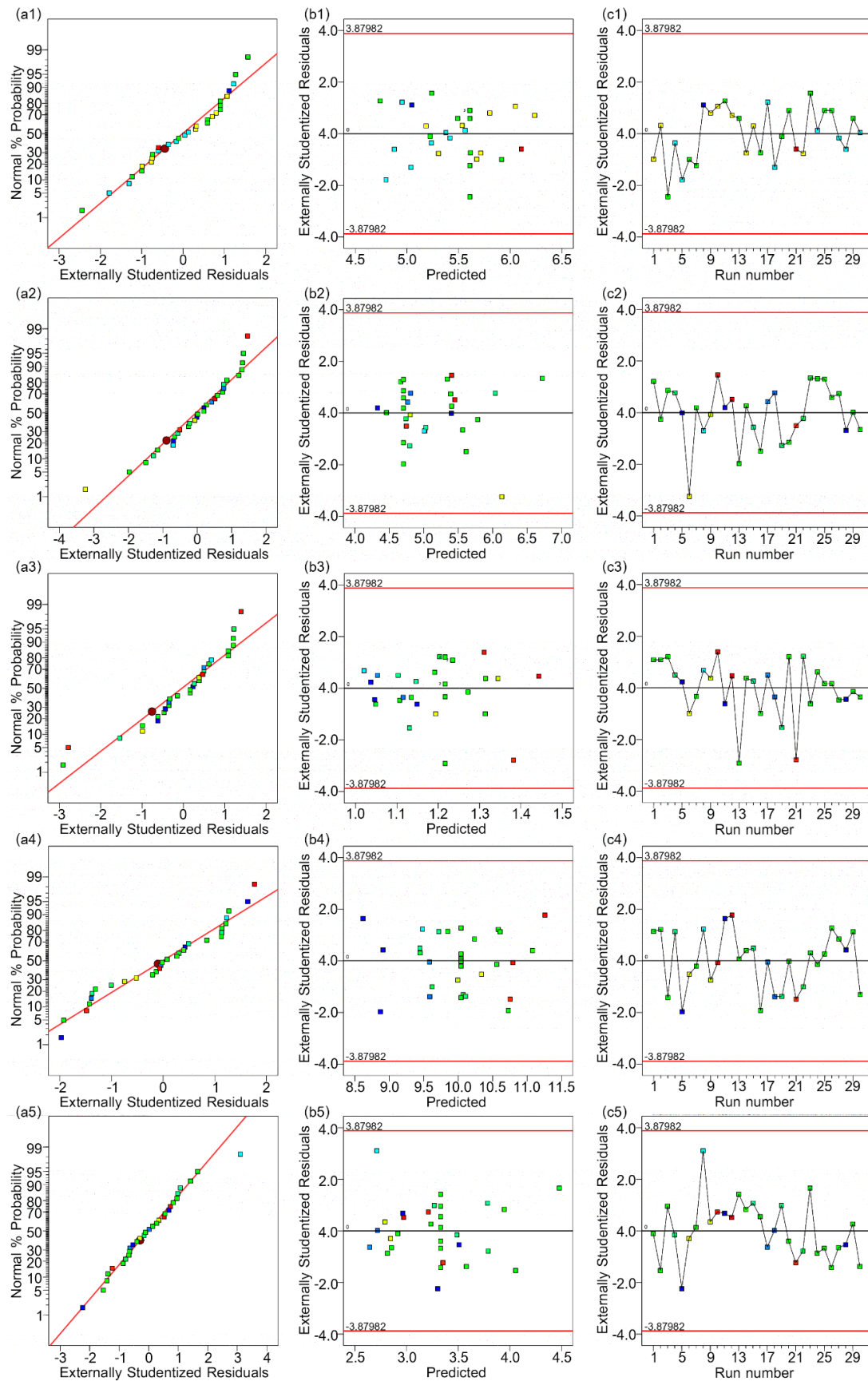
$$\text{TFC (mg RE/g PSPP)} = 4.71 + 0.3217A - 0.1467B - 0.0842C - 0.065D - 0.0037AB - 0.0225AC + 0.0288AD + 0.1062BC + 0.0675BD + 0.0238CD + 0.0669A^2 + 0.4306B^2 - 0.0194C^2 + 0.0431D^2 \quad (3)$$

$$\text{TAC (mg CGE/g PSPP)} = 1.22 + 0.0412A + 0.0362B + 0.0354C + 0.0904D - 0.0031AB + 0.0056AC + 0.0056AD + 0.0131BC + 0.0181BD + 0.0119CD + 0.0036A^2 - 0.0239B^2 - 0.0039C^2 - 0.0039D^2 \quad (4)$$

$$\text{FRAP (mg TE/g PSPP)} = 10.04 + 0.5279A + 0.2229B + 0.1254C + 0.3179D - 0.0481AB + 0.0794AC + 0.0731AD - 0.0081BC - 0.0769BD + 0.0356CD - 0.0922A^2 - 0.0372B^2 + 0.0791C^2 + 0.0191D^2 \quad (5)$$

$$\text{ABTS}^{++} (\text{mg TE/g PSPP}) = 3.33 + 0.0917A - 0.4083B - 0.0083C + 0.16D + 0.0063AB - 0.0287AC + 0.0213AD - 0.0325BC - 0.0525BD - 0.05CD - 0.0456A^2 + 0.0831B^2 - 0.0194C^2 - 0.0744D^2 \quad (6)$$

เมื่อ TPC (mg GAE/g PSPP) คือ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g PSPP), TFC (mg RE/g PSPP) คือ ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (mg RE/g PSPP), TAC (mg CGE/g PSPP) คือ ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (mg CGE/g PSPP), FRAP (mg TE/g PSPP) คือ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP (mg TE/g PSPP), ABTS⁺⁺ (mg TE/g PSPP) คือ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี ABTS⁺⁺ (mg TE/g PSPP), A, B, C และ D คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อผงมันเทศสีม่วง ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เวลาที่ใช้ในการสกัด และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด ตามลำดับ



ภาพที่ 1 กราฟการกระจายแบบปกติของส่วนตกค้างของข้อมูล (a1) TPC, (a2) TFC, (a3) TAC, (a4) FRAP และ (a5) ABTS⁺, กราฟค่าส่วนตกค้างต่อค่าที่ถูกทำนาย (b1) TPC, (b2) TFC, (b3) TAC, (b4) FRAP และ (b5) ABTS⁺ และ กราฟค่าส่วนตกค้างต่อลำดับการทดลองของข้อมูล (c1) TPC, (c2) TFC, (c3) TAC, (c4) FRAP และ (c5) ABTS⁺



4. ผลวิเคราะห์ความแปรปรวน

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อตรวจสอบความเหมาะสม และคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 2 - 6 โดยการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่า p -value ของโมเดล (model) และค่าความสมบูรณ์ (lack of fit) แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าค่าโมเดลของแบบจำลองของปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า $p < 0.0001$ และเมื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (สมการที่ 2 - 6) พบว่าแบบจำลองสำหรับทำนายค่า TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ มีความสมบูรณ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) มีค่าเท่ากับ 0.8205, 0.6874, 0.8105, 0.2280 และ 0.4519 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 - 6 สามารถใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Source	p -value				
	TPC	TFC	TAC	FRAP	ABTS ⁺
	(mg GAE/g PSPP)	(mg RE/g PSPP)	(mg CGE/g PSPP)	(mg TE/g PSPP)	(mg TE/g PSPP)
Model	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A- Ratio of acidified water to PSPP	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
B-HCl concentration	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
C-Extraction time	0.0004	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.6166
D-Extraction temperature	<0.0001	0.0015	<0.0001	<0.0001	<0.0001
AB	0.7346	0.8571	0.5694	0.1080	0.7585
AC	0.4202	0.2892	0.3116	0.0130	0.1704
AD	0.2329	0.1807	0.3116	0.0202	0.3040
BC	0.9458	0.0001	0.0274	0.7769	0.1243
BD	0.0003	0.0049	0.0042	0.0155	0.0189
CD	0.5887	0.2642	0.0430	0.2251	0.0243
A ²	<0.0001	0.0007	0.3882	0.0006	0.0091
B ²	0.5753	<0.0001	<0.0001	0.1043	<0.0001
C ²	0.0004	0.2344	0.3624	0.0022	0.2232
D ²	0.5753	0.0147	0.3624	0.3894	0.0002
Lack of fit	0.8205	0.6874	0.8105	0.2280	0.4519
R ²	0.9814	0.9887	0.9793	0.9838	0.9826
Adjusted R ²	0.9640	0.9782	0.9599	0.9687	0.9664
Predicted R ²	0.9320	0.9549	0.9237	0.9206	0.9222
C.V. (%)	1.33	1.60	1.80	1.12	2.43

ส่วนคุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ ในสมการที่ 2 - 6 สามารถประเมินได้จากค่า R², Adjusted R² และ C.V.% พบว่ามีค่า R² เท่ากับ 0.9814, 0.9887, 0.9793, 0.9838 และ 0.9826 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าตัวแปรตอบสนองได้รับอิทธิพลจากตัวแปรต้นทั้ง 4 ปัจจัย (A, B, C และ D) เท่ากับร้อยละ 98.14, 98.87, 97.93, 98.38 และ 98.26 ตามลำดับ และที่เป็นผลมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถควบคุมได้มีเพียงร้อยละ 1.86, 1.13, 2.07, 1.62 และ 1.74 ตามลำดับ ส่วนความแม่นยำของแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ สามารถตรวจสอบได้จากค่า adjusted R² แสดงดังตารางที่ 2 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.9640, 0.9782, 0.9599, 0.9687 และ 0.9664 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ

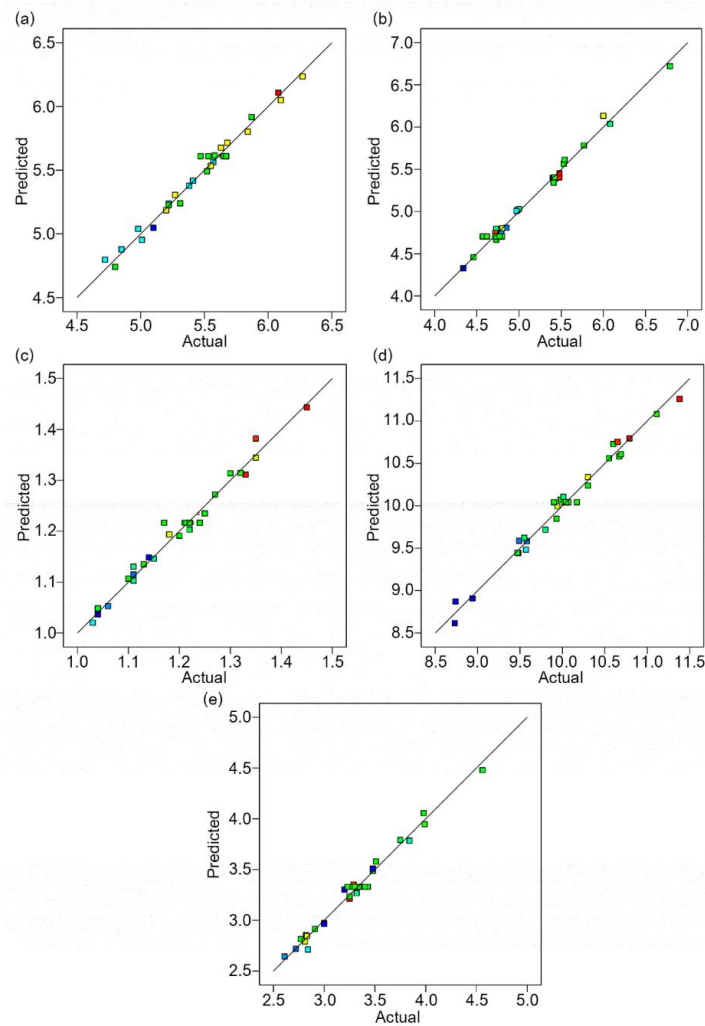


ABTS⁺ ด้วยแบบจำลองในสมการที่ 2 - 6 มีความแม่นยำร้อยละ 96.40, 97.82, 95.99, 96.87 และ 96.64 ตามลำดับ ภาพที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ ที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองในสมการที่ 2 - 6 พบว่ามีแนวโน้มเข้าใกล้แนวของเส้นทแยงมุม แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองในสมการที่ 2 - 6 สามารถใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ ได้อย่างแม่นยำ ส่วนค่า C.V. (%) พบว่ามีค่าต่ำอยู่ในช่วงร้อยละ 1.33, 1.60, 1.80, 1.12 และ 2.43 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ 2 - 6 นั้นสามารถทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ ในสารสกัดหยาบจากมันเทศสีม่วงได้อย่างแม่นยำและน่าเชื่อถือ ในขณะที่การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุคูณของตัวแปรต้นทั้ง 4 ปัจจัย (A, B, C และ D) ในสมการที่ 2 - 6 เมื่อพิจารณาว่ามีอิทธิพลต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ หรือไม่โดยพิจารณาในส่วนของพจน์เชิงเส้น (A, B, C และ D) พจน์อิทธิพลร่วมกัน (AB, AC, AD, BC, BD และ CD) และพจน์กำลังสอง (A^2 , B^2 , C^2 และ D^2) แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการที่ 2 - 6 พบว่าพจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ได้แก่ (1) พจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ TPC ได้แก่ A, B, C, D, BD, A^2 และ C^2 (2) พจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ TFC ได้แก่ A, B, C, D, BC, BD, A^2 , B^2 และ D^2 (3) พจน์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณ TAC ได้แก่ A, B, C, D, BC, BD, CD และ B^2 ในขณะที่พจน์ที่มีอิทธิพลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ได้แก่ พจน์ A, B, C, D, AC, AD, BD, A^2 และ C^2 และพจน์ที่มีอิทธิพลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี ABTS⁺ คือ พจน์ A, B, D, BD, CD, A^2 , B^2 และ D^2 อย่างไรก็ตามปัจจัยในพจน์อื่น ๆ เป็นพจน์ที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ (ตารางที่ 2)

5. ผลของการสร้างพื้นผิวตอบสนองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ (3D-surface plot) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (A, B, C และ D) กับผลตอบสนอง (TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺) แสดงดังภาพที่ 3 (a) – (i) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง BD, BC, CD, AC และ AD ที่มีผลต่อการสกัด TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เมื่อปัจจัยอื่น ๆ อยู่ในระดับกลาง พบว่าที่อุณหภูมิของการสกัด 60 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากร้อยละ 0.2 เป็น 0.6 (ภาพที่ 3 (a), (d), (e) และ (i)) ร่วมกับการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 1 เป็น 5 ชั่วโมง (ภาพที่ 3 (d), (f) และ (g)) และเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วงจาก 20 เป็น 60 มิลลิลิตรต่อกรัม มันเทศสีม่วง ส่งผลให้การสกัด TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณ TPC เพิ่มขึ้นจาก 4.27 เป็น 6.27 mg GAE/g PSPP ปริมาณ TAC เพิ่มขึ้นจาก 1.03 เป็น 1.45 mg CGE/g PSPP และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP เพิ่มขึ้น 8.73 เป็น 11.38 mg TE/g PSPP อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิ ระยะเวลา ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก และอัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง ส่งผลให้การสกัด TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงดังภาพที่ 3 (a) และ (d) – (i)

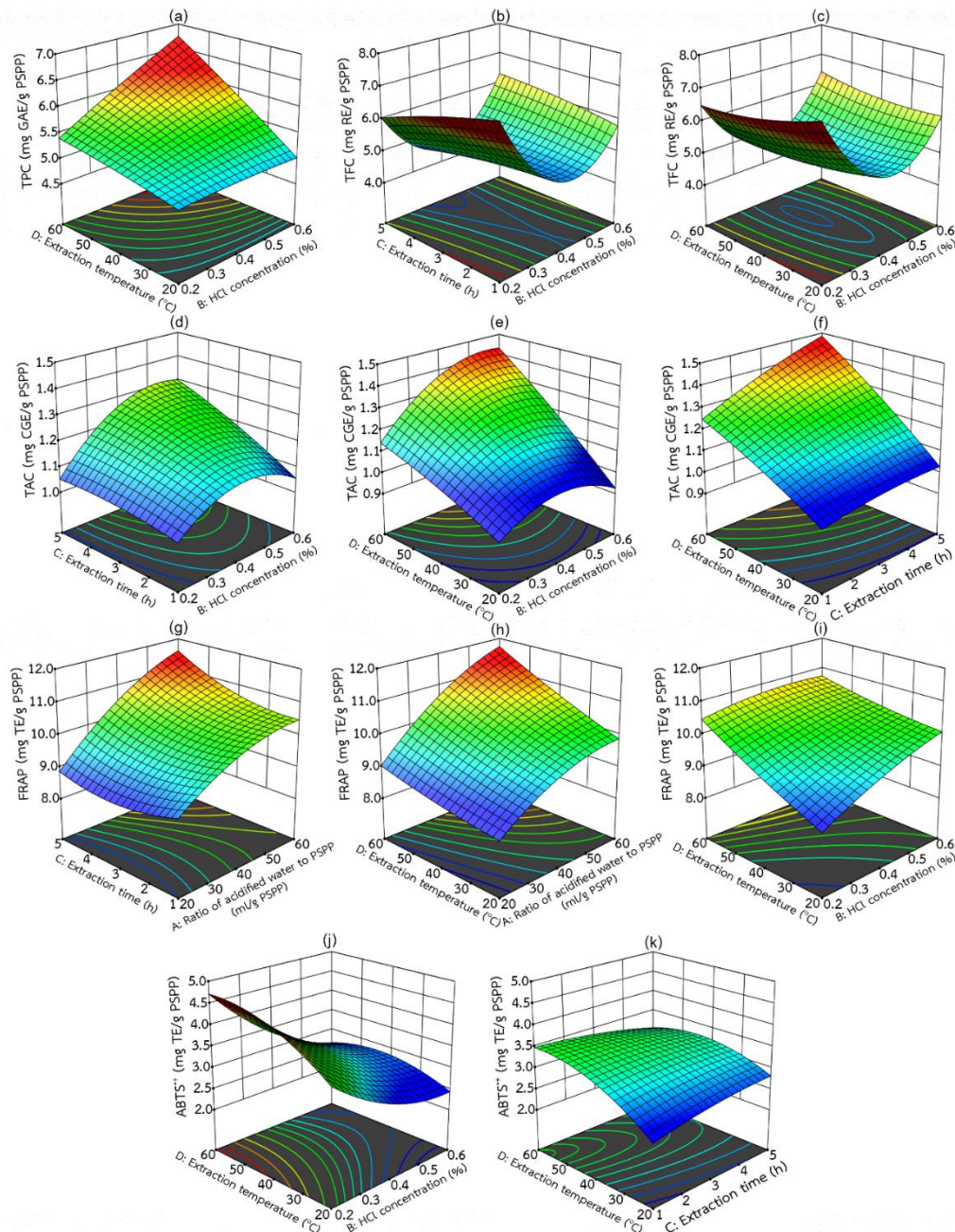
ในขณะภาพที่ 3 (b) และ (c) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง BC และ BD ที่มีผลต่อการสกัด TFC เมื่อปัจจัยอื่น ๆ อยู่ในระดับกลาง พบว่าการสกัดให้ได้ปริมาณ TFC เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จาก 4.34 เป็น 6.79 mg RE/g PSPP ต้องลดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเหลือร้อยละ 0.2 ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 1 ชั่วโมง และ 20 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 3 (j) และ (k) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่าง BD และ CD ที่มีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS⁺ เมื่อปัจจัยอื่น ๆ อยู่ในระดับกลาง พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ร่วมกับการลดความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกเหลือร้อยละ 0.2 และลดระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 5 เป็น 1 ชั่วโมง ส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS⁺ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จาก 2.61 เป็น 4.56 mg TE/g PSPP อย่างไรก็ตาม การลดระดับของอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดร่วมกับการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก ส่งผลให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS⁺ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ (a) TPC, (b) TFC, (c) TAC ที่สกัดได้จากมันเทศสีม่วง และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี (d) FRAP และ (e) ABTS^{•+} ของสารสกัดจากการทำนาย (Predicted) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และค่าที่ได้จากการทดลองจริง (Experimental)

6. ผลของการทวนสอบและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลของการทวนสอบและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการวิเคราะห์ระดับของแต่ละตัวแปรต้น ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) เวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) ที่เหมาะสมต่อค่าปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS^{•+} ที่ได้สูงสุด โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองด้วยสมการที่ 2 - 6 เพื่อทวนสอบและยืนยันผลของการใช้แบบจำลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดที่ทำให้ได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS^{•+} สูงที่สุด ประกอบด้วยปัจจัย A = 50.0 มิลลิกรัมต่อกรัมมันเทศสีม่วง ปัจจัย B = ร้อยละ 0.5 ปัจจัย C = 4.0 ชั่วโมง และปัจจัย D = 50 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมนี้ พบว่าได้ปริมาณ TPC เท่ากับ 6.28 mg GAE/g PSPP, TFC เท่ากับ 5.50 mg RE/g PSPP, TAC เท่ากับ 1.48 mg CGE/g PSPP, FRAP เท่ากับ 11.45 mg TE/g PSPP และ ABTS^{•+} เท่ากับ 3.05 mg TE/g PSPP ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองตามสมการที่ 2 - 6 เท่ากับ 6.24 mg GAE/g PSPP, 5.45 mg RE/g PSPP, 1.44 mg CGE/g PSPP, 11.26 mg TE/g PSPP และ 2.97 mg TE/g PSPP ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่าร้อยละความผิดพลาด (% error) พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 0.64, 0.91, 2.70, 1.66 และ 2.62 ตามลำดับ รวมทั้งมีความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบแทน (desirability) เท่ากับ 0.972



ภาพที่ 3 กราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติของปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ BD ต่อปริมาณ (a) TPC, (c) TFC, (e) TAC, (i) FRAP และ (j) ABTS⁺⁺ สำหรับ (b) และ (d) แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ BC ต่อปริมาณ TFC และ TAC ตามลำดับ ในขณะที่ (f) และ (k) คือ ปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ CD ต่อปริมาณ TAC และ ABTS⁺⁺ ตามลำดับ ส่วน (g) และ (h) คือ ปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของ AC และ AD ต่อปริมาณ FRAP ตามลำดับ

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธี RSM ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ CCD เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC, TFC, TACฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS⁺⁺ จากมันเทศสีม่วง พบว่าตัวแปรต้นที่ใช้ในการสกัดสาร ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) มีอิทธิพลต่อปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺⁺ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อยู่ในช่วง 4.72 - 6.27 mg GAE/g PSPP, 4.34-6.79 mg RE/g PSPP, 1.03-1.45 mg CGE/g

PSPP, 8.73-11.38 และ 2.61-4.56 mg TE/g PSPP ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cai และคณะ [19] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC, TFC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP จากมันเทศสีม่วง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดประกอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 90 นาที ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 80 และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.1 สามารถสกัดสารได้ปริมาณเท่ากับ 9.55 mg GAE/g PSPP, 0.41 mg quercetin equivalents/g PSPP, 2.17 mg CGE/g PSPP และ 12.99 mg TE/g PSPP ตามลำดับ ในขณะที่ Rodríguez-Mena และคณะ [20] ได้สกัดสาร TPC และ TFC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมประกอบด้วยพีเอช 2.5 แอมพลิจูด (amplitude) ร้อยละ 60 และระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 10 นาที สามารถสกัดสาร TPC และ TAC ได้ปริมาณเท่ากับ 21 mg GAE/g PSPP และ 9.76 mg CGE/g PSPP ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าการวิจัยในครั้งนี้ ทั้งนี้ปริมาณสารและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งวัตถุดิบมันเทศสีม่วง ตัวทำละลายและความเข้มข้นที่ใช้ในการสกัด วิธีการสกัดสาร ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด และความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน หลังจากที่ได้ข้อมูลจากการทดลองทั้ง 30 การทดลองให้นำข้อมูลมาตรวจสอบคุณภาพและความเหมาะสม เพื่อนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองสำหรับใช้ทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ พบว่าข้อมูลที่ได้มีคุณภาพและมีความเหมาะสม เนื่องจากเป็นไปตามสมมติฐาน คือ (1) ส่วนตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงปกติ (2) ข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน และ (3) ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน เมื่อตรวจสอบคุณภาพและความเหมาะสมของข้อมูลแล้ว นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจากผลสรุปทางสถิติเพื่อเลือกรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ รวมทั้งใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับผลตอบสนอง โดยพิจารณาจากค่า R^2 พบว่าแบบจำลองกำลังสองเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด และสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับผลตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า R^2 ของแบบจำลองอยู่ในช่วง 0.9793-0.9887 ซึ่งมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1.0 [21, 22] เมื่อได้รูปแบบของแบบจำลองแล้ว นำมาตรวจสอบคุณภาพและความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าโมเดล (model) และค่าความสมรูป (lack of fit) พบว่าแบบจำลองมีคุณภาพและความเหมาะสมเป็นแบบจำลองที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากโมเดลมีค่า $p < 0.05$ และความสมรูปมีค่า $p > 0.05$ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang และคณะ [23] พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความน่าเชื่อถือ โมเดลต้องมีค่า $p < 0.05$ ในขณะที่ความสมรูปมีค่า $p > 0.05$ ส่วนการตรวจสอบความแม่นยำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ จะพิจารณาจากค่า R^2 และ adjusted R^2 ซึ่งอยู่ในช่วง 0.9793-0.9887 และ 0.9599-0.9782 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำต้องมีค่า R^2 และ adjusted R^2 เข้าใกล้ 1 มากที่สุด [21, 22] และมีค่า C.V. (%) ไม่ควรเกินร้อยละ 10 ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่า C.V. (%) อยู่ในช่วงร้อยละ 1.12-2.43 สามารถอธิบายได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงมีความแตกต่างน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทำนาย แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ มีความแม่นยำสูง น่าเชื่อถือ และสามารถทำซ้ำได้ [22] เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนอง 3 มิติ สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นทั้ง 4 ปัจจัย กับค่าตอบสนอง พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วงจาก 20 เป็น 50 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง ส่งผลให้การสกัดได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อตัวอย่างเป็นปัจจัยที่มีสำคัญต่อการสกัด เนื่องจากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากพืชส่วนใหญ่จะสกัดออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยปริมาตรของตัวทำละลายที่เหมาะสม การใช้ตัวทำละลายในปริมาตรที่น้อยเกินไปจะส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ของสารเป้าหมาย ในทางกลับกันการใช้ตัวทำละลายที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดของเสียที่ไม่จำเป็น [24] โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอัตราส่วนน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วงที่ 20 - 60 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 50 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง สามารถสกัดได้สาร TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺ สูงที่สุด เนื่องจากปริมาตรของตัวทำละลายในอัตราส่วนนี้ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวทำละลายกับมันเทศสีม่วง ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสาร และเพิ่มการละลายของสารออกมาสู่ตัวทำละลาย ทำให้สาร TPC, TFC และ TAC ถูกสกัดจากมันเทศ



สีม่วงได้ในปริมาณมากขึ้น [15] ซึ่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้ที่ถูกสกัดออกมาในปริมาณมากจะสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS^{•+} ที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhu และคณะ [6] พบว่า TPC จากมันเทศสีม่วงที่สกัดได้ประกอบด้วยสาร quinic acid, chlorogenic acid, caffeic acid และ chlorogenic acid-3-glucose ในขณะที่ TAC ประกอบด้วย Peonidin-3-sophoroside-5-glucoside, Peonidin-3-p-hydroxybenzoyl sophoroside-5-glucoside, Peonidin-3-(6"-feruloyl sophoroside)-5-glucoside และ Peonidin-3-caffeoyl-p-hydroxybenzoyl sophoroside-5-glucoside สารเหล่านี้มีรายงานว่ามียฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี ทั้งนี้อัตราส่วนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดพืชและวิธีการสกัด ตัวอย่างเช่น Sai-Ut และคณะ [15] ได้ศึกษาการสกัดสาร TPC จากเมล็ดเสาวรสและเมล็ดเงาะ พบว่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณเอทานอลต่อตัวอย่าง (เมล็ดเสาวรสและเมล็ดเงาะ) เท่ากับ 40 มิลลิลิตรต่อกรัมตัวอย่างสามารถสกัด TPC ได้ปริมาณเท่ากับ 11.59 และ 14.55 mg GAE/g ตามลำดับ ส่วน Wang และคณะ [25] ได้สกัดสาร TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงร่วมกับการย่อยด้วยเอนไซม์ พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมเท่ากับ 15 มิลลิลิตรต่อกรัมมันเทศสีม่วง สามารถสกัดสารได้ปริมาณเท่ากับ 2.77 mg CGE/g PSPP และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่า IC₅₀ เท่ากับ 0.089 µg/mL ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากร้อยละ 0.2 เป็น 0.5 ช่วยเพิ่มการสกัดสาร TPC และ TAC จากมันเทศสีม่วง และเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP ยกเว้น TFC และ ABTS^{•+} โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.2-0.6 พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมเท่ากับร้อยละ 0.5 สามารถสกัดสาร TPC และ TAC ได้สูงสุด เนื่องจากพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารแอนโทไซยานิน โดยที่พีเอชต่ำ (พีเอช 1-4) สารแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูป flavylium cations แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของ flavylium cations ลดลง ส่งผลให้โครงสร้างของสารแอนโทไซยานินไม่เสถียรเปลี่ยนจาก flavylium cation ซึ่งมีสีแดงในสารละลายที่เป็นกรดไปอยู่ในรูปของ chalcone ที่ไม่มีสี [20] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [26] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TAC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าสาร TAC ที่สกัดได้จะมีความคงตัวที่พีเอชเป็นกรดมากกว่าพีเอชเป็นกลางและเบส และเมื่อใช้ตัวทำละลายเอทานอลที่มีสภาพเป็นกรด (พีเอช 2) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ทำให้สามารถสกัดสาร TAC ได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.31 mg CGE/g PSPP ในขณะที่ Zhu และคณะ [6] ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC และ TAC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าการปรับพีเอชของตัวทำละลายเอทานอลจากพีเอช 1 เป็น 2.5 มีผลทำให้สามารถสกัดสาร TPC และ TAC ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เท่ากับ 3.877 mg GAE/g PSPP และ 0.293 mg CGE/g PSPP ตามลำดับ ส่วน Ryu และ Koh [27] ได้สกัดสาร TPC และ TAC จากถั่วดำ (*Glycine max* [L.] Merr. Cheongja4ho) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกเป็นร้อยละ 0.359 มีผลทำให้สามารถสกัดสาร TPC, TAC และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ABTS^{•+} ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เท่ากับ 11.97 mg GAE/g, 1.37 mg CGE/g และ 2.11 mg TE/g ตามลำดับ ส่วนการเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการสกัดจาก 1 เป็น 4 ชั่วโมง ส่งผลให้การสกัด TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS^{•+} เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 1-5 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาของการสกัดที่เหมาะสมเท่ากับ 4 ชั่วโมง สามารถสกัดสาร TPC, TFC และ TAC ได้สูงสุด เนื่องจากระยะเวลาของการสกัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่อยู่ในมันเทศสีม่วงเกิดการแพร่หรือการถ่ายโอนมวลสารได้ยาวนานขึ้น ส่งผลให้สาร TPC, TFC และ TAC ถูกสกัดและแพร่ออกมาในตัวทำละลายได้เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้ระยะเวลาในการสกัด 5 ชั่วโมง ส่งผลให้ปริมาณ TPC, TFC และ TAC ถูกสกัดออกมาน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nguyen และคณะ [24] พบว่าการเพิ่มระยะเวลาจาก 30 เป็น 90 นาที สำหรับการสกัดสารไตรเทอร์พีนอยด์ทั้งหมด (total triterpenoid content, TTC) จากใบพลับ ทำให้สกัดสาร TTC ได้ปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากร้อยละ 6.09 เป็น 7.31 ในขณะที่การใช้ระยะเวลาของการสกัดให้นานขึ้น (120 นาที) ส่งผลให้ปริมาณ TTC ลดน้อยลง เนื่องจากการสลายตัวของสารเป้าหมาย [24] ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดจาก 20 เป็น 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การสกัดได้ปริมาณ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS^{•+} เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด 20-60

องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสาร TPC, TFC, TAC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ FRAP และ ABTS⁺⁺ สูงสุด เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความสามารถในการแพร่ (diffusion rate) การย่อยสลายโครงสร้างเนื้อเยื่อพืช (degradation of plant matrix) การแทรกซึมผ่านเข้าสู่เนื้อเยื่อพืช (penetration) และประสิทธิภาพของการละลาย (solubility) ของสารเพิ่มสูงขึ้น [6] สอดคล้องกับรายงานการวิจัยของ Fan และคณะ [28] ได้สกัดสาร TAC จากมันเทศสีม่วง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดจาก 40 เป็น 80 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสารได้ปริมาณเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.58 mg CGE/g PSPP ส่วน Huang และคณะ [23] ได้สกัดสาร TAC จากมันเทศสีม่วงด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 เป็น 64 องศาเซลเซียส สามารถสกัดสารได้ปริมาณเท่ากับ 1.58 mg CGE/g PSPP ส่วน Ilaiyaraja และคณะ [29] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดสาร TPC ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS⁺⁺ จากมะขวิด (*Feronia limonia*) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 29.16 เป็น 49.70 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การสกัดสาร TPC (7.21 mg GAE/g) และฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS⁺⁺) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 81.60 และ 85.20 ตามลำดับ ผลของการทวนสอบและความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่ามีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองเท่ากับ 0.972 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zainol และคณะ [21] ได้รายงานว่าการเลือกสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองดีที่สุดควรมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนองเข้าใกล้ 1

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสาร TPC, TFC, TAC จากมันเทศสีม่วง และ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเมื่อทดสอบด้วยวิธี FRAP และ ABTS⁺⁺ ด้วยตัวทำละลายน้ำที่มีสภาพเป็นกรดร่วมกับการวางแผนการทดลองด้วยวิธี CCD สำหรับ RSM พบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำที่มีสภาพเป็นกรดต่อมันเทศสีม่วง (A) ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (B) ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด (C) และอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (D) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากมันเทศสีม่วง โดยมีสภาวะของการสกัดที่เหมาะสมประกอบด้วย A เท่ากับ 50.0 มิลลิลิตรต่อกรัมผงมันเทศสีม่วง, B เท่ากับร้อยละ 0.5, C เท่ากับ 4.0 ชั่วโมง และ D เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส สามารถสกัดได้ TPC, TFC, TAC, FRAP และ ABTS⁺⁺ สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าร้อยละความผิดพลาดเท่ากับร้อยละ 0.64-2.62 ซึ่งเป็นไปได้ที่จะใช้องค์ความรู้นี้ไปพัฒนากระบวนการสกัดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากมันเทศสีม่วงในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำสารสกัดที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าในทางเภสัชกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 (FF2567/1) และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตรสมัยใหม่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยาที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Wu Q, Qu H, Jia J, Kuang C, Wen Y, Yan H, et al. Characterization, antioxidant and antitumor activities of polysaccharides from purple sweet potato. Carbohydr Polym 2015;132:31-40.
2. Tang C, Han J, Chen D, Zong S, Liu J, Kan J, et al. Recent advances on the biological activities of purple sweet potato anthocyanins. Food Biosci 2023;53:102670.
3. Yong H, Wang X, Sun J, Fang Y, Liu J, Jin C. Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China. Int J Biol Macromol 2018;120:1632-8.



4. Torres A, Noriega LG, Delgadillo-Puga C, Tovar AR, Navarro-Ocana A. Caffeoylquinic acid derivatives of purple sweet potato as modulators of mitochondrial function in mouse primary hepatocytes. *Molecules* 2021;26(2):319.
5. Wang A, Li R, Ren L, Gao X, Zhang Y, Ma Z, et al. A comparative metabolomics study of flavonoids in sweet potato with different flesh colors (*Ipomoea batatas* (L.) Lam). *Food Chem* 2018;260:124-34.
6. Zhu Z, Guan Q, Koubaa M, Barba FJ, Roohinejad S, Cravotto G, et al. HPLC-DAD-ESI-MS² analytical profile of extracts obtained from purple sweet potato after green ultrasound-assisted extraction. *Food Chem* 2017;215:391-400.
7. Tang C, Sun J, Zhou B, Jin C, Liu J, Kan J, et al. Effects of polysaccharides from purple sweet potatoes on immune response and gut microbiota composition in normal and cyclophosphamide treated mice. *Food Funct* 2018;9(2):937-50.
8. de Aguiar Cipriano P, Kim H, Fang C, Paula Venancio V, Mertens-Talcott SU, Talcott ST. In vitro digestion, absorption and biological activities of acylated anthocyanins from purple sweet potatoes (*Ipomoea batatas*). *Food Chem* 2022;374:131076.
9. Lim S, Xu J, Kim J, Chen TY, Su X, Standard J, et al. Role of anthocyanin-enriched purple-fleshed sweet potato p40 in colorectal cancer prevention. *Mol Nutr Food Res* 2013;57(11):1908-17.
10. Yang Y, Zhang Z, Zhou Q, Yan J, Zhang J, Su G. Hypouricemic effect in hyperuricemic mice and xanthine oxidase inhibitory mechanism of dietary anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). *J Funct Foods* 2020;73:104151.
11. Cai Z, Song L, Qian B, Xu W, Ren J, Jing P, et al. Understanding the effect of anthocyanins extracted from purple sweet potatoes on alcohol-induced liver injury in mice. *Food Chem* 2018;245:463-70.
12. Yang Y, Zhang JL, Shen LH, Feng LJ, Zhou Q. Inhibition mechanism of diacylated anthocyanins from purple sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) against α -amylase and α -glucosidase. *Food Chem* 2021;359:129934.
13. Qin S, Sun D, Mu J, Ma D, Tang R, Zheng Y. Purple sweet potato color improves hippocampal insulin resistance via down-regulating SOCS3 and galectin-3 in high-fat diet mice. *Behav Brain Res* 2019;359:370-7.
14. ละอองศรี ศิริเกษร, สุขาดา บุญเลิศนิรันดร์, วชิรญา เหลียวตระกูล. การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตและผลผลิตของมันเทศ 6 พันธุ์. *วารสารวิจัย มทร. ศรีวิชัย* 2561;10(3):411-23.
15. Sai-Ut S, Kingwascharapong P, Mazumder MAR, Rawdkuen S. Optimization of extraction of phenolic compounds and antioxidants from passion fruit and rambutan seeds using response surface methodology. *J Agr Food Res* 2023;14:100888.
16. สุพิชญา คำคม. ผลของการทดแทนแป้งสาลีบางส่วนด้วยแป้งมันเทศสีม่วงต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและกิจกรรมการต้านออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์หมั่นโถว. *ววบ* 2563;25(2):664-79.
17. Shao YXF, Sun X, Bao J, Beta T. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.). *J Cereal Sci* 2014;59(2):211-8.



18. Kubola J, Siriamornpun S, Meeso N. Phytochemicals, vitamin C and sugar content of Thai wild fruits. Food Chem 2011;126(3):972-81.
19. Cai Z, Qu Z, Lan Y, Zhao S, Ma X, Wan Q, et al. Conventional, ultrasound-assisted, and accelerated-solvent extractions of anthocyanins from purple sweet potatoes. Food Chem 2016;197:266-72.
20. Rodríguez-Mena A, Ochoa-Martínez LO, González-Herrera SM, Rutiaga-Quinones OM., González-Laredo RF, Olmedilla-Alonso B, et al. Coloring potential of anthocyanins from purple sweet potato paste: Ultrasound-assisted extraction, enzymatic activity, color and its application in ice pops. Food Chemistry Advances 2023;3:100358.
21. Zainol N, Aziz NH, Baharudin AS. Influence of agitation and solvent percentage on the extraction of phytochemical compound from *Asystasia gangetica*. Food Chemistry Advances, 2023;3:100538.
22. Zhang S, Xie H, Huang J, Chen Q, Li X, Chen X, et al. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from pine needles (*Pinus elliottii*): Comprehensive insights from RSM optimization, antioxidant activity, UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS analysis and kinetic model. Ultrason Sonochem 2024;102:106742.
23. Huang H, Xu Q, Belwal T, Li L, Aalim H, Wu Q, et al. Ultrasonic impact on viscosity and extraction efficiency of polyethylene glycol: A greener approach for anthocyanins recovery from purple sweet potato. Food Chem 2019;283:59-67.
24. Nguyen HV, Le NT, Le NTN, Duong TD, Le TT, Nguyen HTT, et al. Extraction, purification, and evaluation of bioactivities of total triterpenoids from Persimmon (*Diospyros kaki* L.f.) leaves. Process Biochem 2024;139:70-80.
25. Wang F, Zhang S, Deng G, Xu K, Xu H, Liu J. Extracting total anthocyanin from purple sweet potato using an effective ultrasound-assisted compound enzymatic extraction technology. Molecules 2022;27(14):4344.
26. Liu W, Yang C, Zhou C, Wen Z, Dong X. An improved microwave-assisted extraction of anthocyanins from purple sweet potato in favor of subsequent comprehensive utilization of pomace. Food Bioprod Process 2019;115:1-9.
27. Ryu D, Koh E. Application of response surface methodology to acidified water extraction of black soybeans for improving anthocyanin content, total phenols content and antioxidant activity. Food Chem 2018;261:260-6.
28. Fan G, Han Y, Gu Z, Chen D. Optimizing conditions for anthocyanins extraction from purple sweet potato using response surface methodology (RSM). LWT-Food Sci Technol 2008;41(1):155-60.
29. Ilaiyaraja N, Likhith KR, Babu GRS, Khanum F. Optimisation of extraction of bioactive compounds from *Feronia limonia* (wood apple) fruit using response surface methodology (RSM). Food Chem 2015;173:348-54.



การบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว

Cognitive Behavioral Therapy in Children with Anger and Aggression

ศิลป์ไทย ธรรมเรืองฤทธิ์

สาขาวิชาการพยาบาลจิตเวชและสุขภาพจิต สถาบันการพยาบาลศรีสวรินทิรา สภากาชาดไทย กรุงเทพมหานคร 10330

Silpthai Thamruangrit

Psychiatric and Mental Health Nursing Department, Srisavarindhira Thai Red Cross Institute of Nursing,
Bangkok 10330

Corresponding author: silpthai.t@stin.ac.th

Received: 22 April 2024/ Revised: 8 July 2024/ Accepted: 9 July 2024

บทคัดย่อ

การบำบัดความคิดและพฤติกรรมเป็นจิตบำบัดประเภทหนึ่งที่น่ามารักษผู้ป่วยที่มีภาวะผิดปกติทางจิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันความโกรธและความก้าวร้าวในเด็กได้เพิ่มสูงขึ้นดังเห็นได้จากข่าวสารและสื่อสังคมต่าง ๆ บทความวิชาการนี้มีจุดประสงค์เพื่อทบทวนความรู้เกี่ยวกับการบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็ก โดยมุ่งเน้นที่เด็กอายุ 8-16 ปี ที่มีความโกรธและความก้าวร้าวในฐานข้อมูลระดับชาติและนานาชาติ ในช่วงปี พ.ศ. 2541-2567 ผลการทบทวนพบว่า วิธีการบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว ประกอบไปด้วย 3 วิธี ได้แก่ วิธีการเรียนรู้ด้านอารมณ์ วิธีการจัดการปัญหา และวิธีการพัฒนาทักษะ ซึ่งแต่ละวิธีมีเทคนิคย่อยเพื่อเสริมให้บรรลุผลสำเร็จ โดยบทความวิชาการนี้ผู้เขียนได้ใช้ประสบการณ์จริงจากการเป็นนักบำบัดร่วมกับผลจากการทบทวนความรู้ สรุป และบรรยายเนื้อหาทั้ง 3 วิธีดังกล่าวรวมถึงเทคนิคย่อย พร้อมยกตัวอย่างการนำไปใช้ในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว ดังนั้นบทความนี้จึงเหมาะกับพยาบาล นักบำบัด บุคลากรทางการแพทย์ และผู้ที่สนใจทั่วไปที่ต้องการมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ CBT เพื่อใช้ในการบำบัดเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าวต่อไป

คำสำคัญ: การบำบัดความคิดและพฤติกรรม ความโกรธ ความก้าวร้าว จิตเวชเด็กและวัยรุ่น จิตบำบัด

Abstract

Cognitive behavioral therapy (CBT) is a type of psychotherapy that can be used to treat patients with mental disorders effectively. Today's anger and aggression among children have increased, as evidenced by news and social media. This academic article aims to review knowledge about CBT in children, focusing on children aged 8 – 16 years with anger and aggression in national and international databases from 1998-2024. The review results report three CBT methods for treating children with anger and aggression: affective education, problem-solving, and skill development. Each method has sub-techniques to enhance success. In this academic article, the author has used real experiences from being a therapist together with the results from reviewing knowledge, summarizing, and describing the content of all three mentioned methods,

including sub-techniques, along with examples of their use in children with anger and aggression. Accordingly, this article suits nurses, therapists, medical personnel, and those interested in general who want to have basic knowledge in CBT of children with anger and aggression for further use.

Keywords: cognitive behavioral therapy, anger, aggression, child and adolescent psychiatry, psychotherapy

บทนำ

ความโกรธและความก้าวร้าวพบได้บ่อยในเด็กเป็นสาเหตุสำคัญหนึ่งที่ทำให้ผู้ป่วยเด็กต้องเข้ารับการรักษาที่แผนกจิตเวชเด็ก สำหรับประเทศไทยยังไม่มีรายงานทางสถิติของเด็กกลุ่มนี้ที่แน่ชัด แต่มีรายงานว่าเด็กวัยเรียนจำนวน 900 คนของโรงเรียนแห่งหนึ่งในประเทศอิหร่าน มีเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าวระดับปานกลางถึง 29% (261 คน) และระดับสูงถึง 10% (90 คน) [1] ดังนั้นความโกรธและความก้าวร้าวจึงเป็นปัญหาสำคัญในเด็กวัยเรียน ปัจจุบันตามเกณฑ์คู่มือการวินิจฉัยและสถิติสำหรับความผิดปกติทางจิต (Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, DSM) ที่กำหนดโดยสมาคมจิตเวชศาสตร์สหรัฐอเมริกา (American Psychiatric Association) ฉบับที่ 5 หรือที่เรียกว่า DSM-5 ได้จัดให้ความโกรธ/ความหงุดหงิด (anger/irritability) เป็นเกณฑ์หลักอย่างหนึ่งในการวินิจฉัยโรคต่อต้าน (opposite defiant disorder) ส่วนความก้าวร้าว (aggressive behavior) เป็นเกณฑ์หลักอย่างหนึ่งในการวินิจฉัยโรคพฤติกรรมเกรี้ยวและก้าวร้าว (conduct disorder) [2] ความโกรธคืออารมณ์ ส่วนความก้าวร้าวคือพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อความโกรธ หากทั้งสองมีความรุนแรงและกระทบกับการใช้ชีวิตจำเป็นต้องได้รับการบำบัด

ความโกรธ เป็นหนึ่งในอารมณ์พื้นฐานอย่างหนึ่งของมนุษย์ จัดเป็นสภาวะอารมณ์เชิงลบจากความคิดตอบสนองต่อความไม่พึงพอใจหรือการถูกตำหนิ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาแล้วแสดงออกเป็นอาการทางร่างกาย เช่น หัวใจเต้นแรง หายใจถี่ หน้าแดง เหงื่อออก ตัวสั่น เป็นต้น และเพิ่มโอกาสที่จะเกิดความก้าวร้าวตามมา [3] ความโกรธถูกกระตุ้นโดยความคับข้องใจหรือถูกยั่ว มีระดับความรุนแรงแตกต่างกันออกไป ตั้งแต่รำคาญเล็กน้อยไปจนถึงโมโห โดยระยะเวลาการเกิดความโกรธอาจไม่เกินนาทีจนถึงหลายชั่วโมง [4] สำหรับเด็กระยะพัฒนาการมีผลต่อความโกรธและการแสดงออกของความโกรธที่ต่างกันออกไป เช่น เด็กสามารถแสดงอารมณ์โกรธผ่านทางสีหน้าได้ตั้งแต่อายุเพียง 2 เดือน และพัฒนาการการตระหนักรู้ถึงอารมณ์โกรธสามารถสื่อสารบอกอารมณ์นี้กับบุคคลอื่นได้เมื่ออายุประมาณ 2.5 ปี เริ่มมีพฤติกรรมต่อต้าน (tantrums) เมื่ออายุ 1.5-4 ปี โดยจะมีพฤติกรรมร้องไห้ กระแทกเท้า ผลัก ตี และเตะ จากการศึกษาพบว่าครอบครัวที่บุตรมีพฤติกรรมต่อต้าน จำนวน 335 คน อายุ 1-4 ปี มีค่าเฉลี่ยความถี่ที่เด็กมีพฤติกรรมต่อต้านอยู่ระหว่าง 5-9 ครั้งต่อสัปดาห์ ระยะเวลาเฉลี่ย 5-10 นาที [5, 6] ความรุนแรงของความโกรธและระยะเวลาโกรธมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้นจากพัฒนาการการควบคุมความโกรธและทำให้สามารถแสดงพฤติกรรมออกมาอย่างเหมาะสม [7] แม้ว่าความโกรธจะเป็นอารมณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เป็นอารมณ์ที่เกิดขึ้นภายในจิตใจ แต่ความโกรธมักมีความสัมพันธ์ต่อการเกิดความก้าวร้าวตามมาซึ่งส่งผลกระทบทั้งต่อตัวเด็กเองและบุคคลอื่น [8] ความโกรธไม่ใช่ปัญหาแต่การควบคุมความโกรธไม่ได้และแสดงความก้าวร้าวถือว่าเป็นปัญหาที่จำเป็นจะต้องได้รับการบำบัดรักษา

ความก้าวร้าว เป็นพฤติกรรมที่แสดงออกถึงการทำร้ายตัวเองหรือบุคคลอื่น [9] พบในเด็กที่มีพฤติกรรมต่อต้านได้มากถึงร้อยละ 85-90 และมักพบได้บ่อยในเด็กอายุ 3-5 ปี [10] พฤติกรรมนี้อาจพบได้ทั่วไปในเด็กวัยก่อนเรียน (preschool) แต่จะลดลงเมื่อเข้าโรงเรียน การแสดงออกของความก้าวร้าวเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบทั้งทางวาจาและร่างกาย ตั้งแต่การกระทำเล็ก ๆ น้อย ๆ เช่น การต่อว่า การผลัก จนถึงการทำที่รุนแรงขึ้น เช่น ตี เตะ ต่อย ไปจนถึงการทำที่รุนแรงที่สุด เช่น แทง ยิง ทำให้เสียชีวิต [11] โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ ความก้าวร้าวทางวาจา (verbal) และความก้าวร้าวทางร่างกาย (physical) พบว่าความก้าวร้าวทางร่างกาย เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้เกิดโรคพฤติกรรมเกรี้ยวและก้าวร้าว (conduct disorder) ตั้งแต่อายุยังน้อย อาจเกิดร่วมกับปัญหาสุขภาพจิตอื่น ๆ เช่น โรคสมาธิสั้น (attention deficit hyperactivity disorder, ADHD) และโรควิตกกังวล (anxiety disorder) [12] ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมความโกรธ



และความก้าวร้าวในเด็ก ได้แก่ รูปแบบการเลี้ยงดู อิทธิพลของกลุ่มเพื่อน การเลียนแบบสื่อ และเจตคติของเด็กเองที่มีต่อความโกรธและความก้าวร้าว [13] เด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าวอาจเริ่มจากการมีปัญหาลึกๆน้อยภายในครอบครัว หากไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกต้องอาจกลายเป็นปัญหาสังคมตั้งเห็นตัวอย่างได้จากสื่อสังคมออนไลน์ในปัจจุบัน จึงควรได้รับการบำบัดอย่างรวดเร็ว หากเด็กได้รับการจัดการความก้าวร้าวอย่างถูกต้อง พฤติกรรมนี้จะค่อย ๆ ลดลงเมื่อเด็กโตขึ้น ในทางกลับกันหากไม่ได้รับการแก้ไขหรือถูกละเลย เด็กจะเกิดการเรียนรู้ความก้าวร้าวมากขึ้นและเพิ่มความรุนแรงขึ้น จนเป็นปัญหาต่อสังคมตามมาในที่สุด ดังนั้นจึงควรจัดการทันทีเมื่อคิดว่าเริ่มเป็นปัญหา ส่วนการเรียนรู้พฤติกรรมก้าวร้าวของเด็ก หมายถึง การที่เด็กได้รับการตอบสนองในสิ่งที่เด็กต้องการเมื่อใช้ความรุนแรง เช่น เมื่อเด็กถูกเพื่อนล้อแล้วชกหน้าเพื่อนทำให้เพื่อนหยุดล้อ เด็กคิดว่าการกระทำนี้คือพฤติกรรมที่แก้ไขปัญหาก็ได้ และเรียนรู้ที่จะใช้ความรุนแรงในการแก้ปัญหาเพิ่มมากขึ้น

การจัดการปัญหานี้มีหลายวิธี เช่น หายอย่างอื่นทำ หายใจเข้าออกลึก ๆ นับ 1-10 การพูดคุยเพื่อแก้ปัญหา การฝึกผ่อนคลายกล้ามเนื้อ การนึกถึงเรื่องดี ๆ การออกกำลังกาย การนอนหลับ เป็นต้น แต่วิธีที่ได้รับการนิยมนิยมคือ การบำบัดความคิดและพฤติกรรม [14] วัตถุประสงค์ในการบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กอายุ 8 -16 ปี ที่มีความโกรธและความก้าวร้าว มี 2 ประเด็น ได้แก่ 1) เพื่อลดจำนวนครั้งและความรุนแรงของความโกรธและความก้าวร้าว และ 2) เพิ่มทักษะในการจัดการกับสถานการณ์ที่มีผลทำให้เกิดความโกรธและความก้าวร้าว [15] วิธีการบำบัดเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว ที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ การบำบัดความคิดและพฤติกรรม (Cognitive Behavior Therapy, CBT) ซึ่งเป็นรูปแบบการบำบัดและช่วยเหลือทางจิตรูปแบบหนึ่งที่มีพื้นฐานมาจากกลุ่มพฤติกรรมบำบัด (behavior therapy) [16] โดยมีการนำส่วนของความคิด (cognitive) เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการบำบัด ริเริ่มโดย Beck [17] ปัจจุบัน CBT ได้รับการยอมรับและมีความนิยมอย่างแพร่หลาย

บทความวิชาการนี้มีจุดประสงค์เพื่อทบทวนความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับการใช้ CBT ในเด็กอายุ 8-16 ปี ที่มีความโกรธและความก้าวร้าวจากฐานข้อมูลวิชาการทั้งในและต่างประเทศ ครอบคลุมประเด็นสำคัญ ได้แก่ แนวคิด วิธีการ เทคนิคที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคของ CBT ที่ประสบความสำเร็จในการบำบัดเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าวจากประสบการณ์ของผู้เขียนซึ่งเป็นนักบำบัดความคิดและพฤติกรรม และมีประสบการณ์ด้านจิตเวชเด็ก บทความวิชาการนี้เหมาะสำหรับพยาบาล บุคลากรทางการแพทย์ และผู้สนใจทั่วไปที่ทำงานเกี่ยวข้องกับสุขภาพจิตเด็กในการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

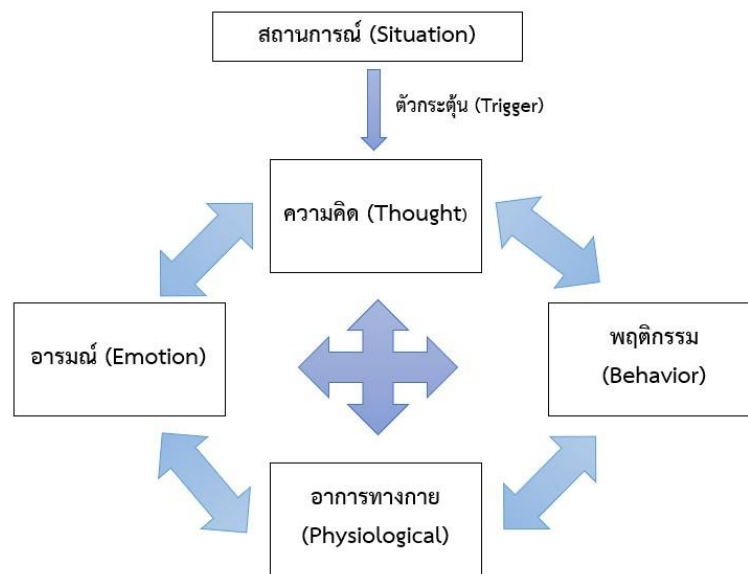
ระเบียบและวิธีการ

เพื่อสืบค้นวิธีการและเทคนิคของ CBT ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการบำบัดเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าวจากบทความที่เกี่ยวข้องระหว่างปี พ.ศ. 2541-2567 ได้กำหนดคำค้นภาษาไทย 4 คำในฐานข้อมูลวารสารไทยออนไลน์ (Thai Journals Online, ThaiJO) ได้แก่ ความโกรธ ความก้าวร้าว การบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็ก และการวิเคราะห์อภิมาน โดยหาทีละคำแล้วนำผลจากการสืบค้นมาพิจารณาถึงความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ ยังไม่พบบทความใดที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ แต่มีบางบทความที่สอดคล้องเพียงบางส่วน เช่น การบำบัดความคิดและพฤติกรรมของเด็กติดเกม [18] และเด็กออทิสติกที่มีความก้าวร้าว [19] ซึ่งกลุ่มเป้าหมาย วิธีการ และเทคนิคที่ใช้แตกต่างจากที่จะกล่าวถึงในบทความวิชาการนี้ แสดงให้เห็นว่าบทความทางด้าน CBT ในเด็กของไทยยังไม่แพร่หลายมากนัก จากการสืบค้นในฐานข้อมูลวารสารต่างประเทศ ได้แก่ PubMed, Google scholar, ScienceDirect และ PsycINFO โดยใช้คำค้น “anger” or “aggression” or “cognitive behavioral therapy” or “CBT” or “meta-analysis” พบบทความที่สอดคล้องกับคำค้นหามีจำนวนทั้งสิ้น 10 เรื่อง ประกอบด้วย การวิเคราะห์ทบทวนอภิมาน (meta-review analysis) จำนวน 3 เรื่อง การวิเคราะห์อภิมาน (meta-analysis) จำนวน 5 เรื่อง และหนังสือ (book) จำนวน 2 เรื่อง สาเหตุที่พิจารณาการวิเคราะห์อภิมานร่วมด้วยเนื่องจากในต่างประเทศมีงานวิจัย CBT ในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าวอย่างแพร่หลาย [20] ดังนั้นจะช่วยเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของบทความวิชาการนี้ด้วยเช่นกัน

1. แนวคิด CBT ในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว

การบำบัดความคิดและพฤติกรรม อยู่บนพื้นฐานแนวคิดที่ว่า ความคิดที่บิดเบือนไปจากความเป็นจริง (dysfunctional thinking) ทำให้เกิดผลกระทบต่ออารมณ์ของเด็ก ดังนั้น CBT จะเน้นการค้นหาความคิดที่บิดเบือนนั้นและปรับเปลี่ยนความคิดดังกล่าวให้ถูกต้องตามความเป็นจริง สำหรับการบำบัดด้วย CBT ในเด็ก เป็นการผสมผสานระหว่างเทคนิคการบำบัดความคิดและบำบัดพฤติกรรม เน้นการบำบัดรักษาโดยเพิ่มความสามารถในการควบคุมตนเองของเด็ก การตระหนักถึงความคิดในเชิงลบ เรียนรู้ทักษะในการแก้ไขปัญหา พร้อมทั้งฝึกทักษะทางสังคมเพื่อป้องกัน จัดการความโกรธและความก้าวร้าว ซึ่งแตกต่างจากในผู้ใหญ่ซึ่งเน้นการใช้เทคนิคผ่อนคลายและเทคนิคการจัดการความคิด [21]

การบำบัดด้วย CBT ให้ประสบความสำเร็จจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางความคิด (cognitive model) และแบบจำลองเอบีซี (ABC model) โดยแบบจำลองทางความคิดที่พัฒนาโดย Beck [22] ระบุว่าเมื่อเด็กพบเจอกับสถานการณ์ (situation) ที่มีตัวกระตุ้น (trigger) บางอย่าง จะนำไปสู่การเกิดความคิด (thought) ทางด้านลบ ส่งผลให้เกิดอารมณ์ (emotion) พฤติกรรม (behavior) และอาการทางกาย (physiological) ตามมา ซึ่งหากจัดการกับส่วนใดส่วนหนึ่งก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปยังส่วนอื่น ๆ ใน Model จึงใช้ลูกศรไปกลับซึ่งกันและกัน สำหรับ CBT ในเด็กวัยรุ่นนั้น เนื่องจากการพัฒนาการด้านความคิดของเด็กยังไม่สมบูรณ์ หากจัดการกับความคิดได้น้อย นักบำบัดสามารถจัดการกับส่วนอารมณ์ พฤติกรรม อาการทางกาย ก็จะส่งผลถึงความคิดได้เช่นกัน นักบำบัดต้องทำความเข้าใจแบบจำลองความคิดใน ภาพที่ 1 ของเด็กทั้งหมดเพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด



ภาพที่ 1 แบบจำลองทางความคิดตามแนวคิดของ Beck [22]

สำหรับแบบจำลองเอบีซี (ABC model) นำเสนอโดย Ellis [23] เป็นส่วนหนึ่งของการบำบัดแบบเน้นเหตุผล อารมณ์ และพฤติกรรม (Rational Emotional-Behavior Therapy, REBT) มุ่งเน้นการเปลี่ยนความเชื่อที่ไม่เป็นเหตุเป็นผลให้เป็นความเชื่อที่เป็นเหตุเป็นผล โดยแบบจำลองเอบีซีนี้นิยมนำมาใช้ใน CBT ร่วมกับแบบจำลองทางความคิดเพื่อช่วยให้เด็กกลุ่มนี้สามารถปรับ (reshape) ความคิดหรือความรู้สึกแง่ลบให้เป็นแง่บวกด้วยการฝึกให้เด็กตระหนักถึงผลเสียของความเชื่อซึ่งเป็นการคิดแง่ลบที่มีผลต่ออารมณ์และพฤติกรรมของตนเอง และพัฒนาการสร้างความคิดเชิงบวกเพื่อใช้อธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับตน โดยมีรายละเอียดของแบบจำลองดังนี้

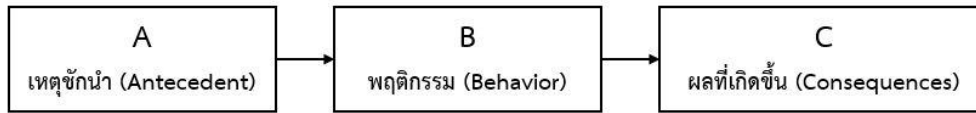
A (Antecedent) หมายถึง เหตุการณ์หรือสถานการณ์ที่เป็นตัวกระตุ้นที่นำมาซึ่งความโกรธ

B (Behavior) หมายถึง พฤติกรรมหรือการกระทำที่เด็กแสดงออกมา บางครั้ง B อาจหมายถึง ความเชื่อ (belief) หรือคำอธิบายที่ตนเองสร้างขึ้นมาเพื่อตอบคำถามว่าทำไมเหตุการณ์นั้นจึงเกิดขึ้นกับตน



C (Consequences) หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมหรือความเชื่อที่สร้างขึ้นและใช้อธิบายเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น โดยผลดังกล่าวอาจอยู่ในรูปของอารมณ์ พฤติกรรมที่แสดงออกมาภายนอก หรือความรู้สึกภายใน

แบบจำลองเอบีซีสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบจำลองเอบีซีตามแนวคิดของ Ellis [23]

วิธีการจัดการกับพฤติกรรม ภาพที่ 2 เริ่มจากให้เด็กพิจารณาตัวกระตุ้นหรือเหตุการณ์ที่เป็นเหตุชักนำ (A) ว่ามีเหตุมีผลมากน้อยเพียงใด ช่วยให้เด็กมีเวลาหยุดคิด ไม่ให้เชื่อไปตามความคิดอัตโนมัติ (automatic thought) จนเกิดพฤติกรรมที่ไม่เหมาะสมตามมา หลังจากนั้นให้เด็กทบทวนพฤติกรรมหรือความเชื่อที่เกิดขึ้น (B) รวมถึงผลที่เกิดขึ้นตามทางทั้งเชิงบวกและเชิงลบ (C) สุดท้ายแบบจำลองเอบีซีจะช่วยให้เด็กได้มองเห็นความบกพร่องของตนเองตลอดจนผลเสียของผลลัพธ์ที่เกิดจากสถานการณ์และพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนั้น

2. วิธีการและเทคนิคการบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว

วิธีการและเทคนิคจะถูกใช้ร่วมกับแบบจำลองความคิดและแบบจำลองเอบีซีเพื่อใช้ทำ CBT ในเด็กกลุ่มนี้ให้ประสบความสำเร็จ ต้องเข้าใจความเชื่อมโยงของแบบจำลอง CBT แบบจำลอง ABC วิธีการ และเทคนิค ในบทนี้จะอธิบายวิธีการและเทคนิคที่ใช้ใน CBT จากการทบทวนวรรณกรรมด้วยคำค้นหาข้างต้น พบว่ามีบทความ [8-10, 12, 23-29] ได้กล่าวถึงวิธีการและเทคนิคการทำ CBT ในเด็กกลุ่มนี้ ซึ่งมีมากมายหลายวิธีการและหลายเทคนิค อย่างไรก็ตามผู้เขียนสรุปหลักการสำคัญ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

2.1 วิธีการเรียนรู้ด้านอารมณ์ (affective education method) ประกอบไปด้วยเทคนิคย่อยได้แก่

2.1.1 เทคนิคการระบุอารมณ์ (identification moods) สำหรับเด็กวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะตระหนักรู้ (awareness) ว่าตัวเองมีความโกรธ ทำได้โดยการสังเกตอาการทางกายเช่น ใจสั่น หัวร้อน หูร้อน หน้าแดง หายใจเร็ว ฯลฯ และจากพฤติกรรม เช่น กำมือแน่น กัดฟัน เสียงดัง ต่ำ ฯลฯ ดังนั้นการใช้เทคนิคนี้ต้องฝึกให้เด็กตระหนักรู้ถึงอารมณ์โกรธของตัวเองที่เกิดขึ้นจากอาการทางกายและพฤติกรรมดังกล่าว

2.1.2 เทคนิคการประเมินระดับอารมณ์ความโกรธ (rating anger mood) อารมณ์โกรธในแต่ละเหตุการณ์มักไม่เท่ากันคือบางเหตุการณ์โกรธมาก แต่บางเหตุการณ์โกรธน้อย ซึ่งสามารถประเมินระดับอารมณ์โกรธได้โดยใช้วิธีการให้คะแนนเพื่อสื่อถึงระดับความรุนแรงของความโกรธ เช่น ในวัยรุ่น อาจใช้ระดับคะแนน 0 -10 โดย 0 หมายถึง ไม่โกรธเลย ในขณะที่ 10 หมายถึง โกรธมากที่สุด ส่วนในเด็กวัยเรียนอาจใช้รูปหน้าอารมณ์และสีเพื่อสื่อระดับอารมณ์ โดยสีเขียวหน้ายิ้ม หมายถึง ไม่โกรธเลย ส่วนสีแดงหน้าบึ้ง หมายถึง โกรธที่สุด ดังนั้นเทคนิคนี้ต้องฝึกให้เด็กรู้จักการประเมินระดับอารมณ์โกรธด้วยวิธีการดังกล่าว

2.1.3 เทคนิคการติดตามสำรวจตัวเอง (self-monitoring) เป็นการติดตามสถานการณ์ที่เกิดความโกรธ หรือความก้าวร้าวทำได้โดยการให้เด็กบันทึกทั้งความคิด อารมณ์ อาการทางกาย และพฤติกรรมในขณะนั้นเพื่อให้เด็กและผู้บำบัดใช้บันทึกดังกล่าวเพื่อวิเคราะห์ และประเมินผลการบำบัด ดังนั้นเทคนิคนี้ต้องฝึกให้เด็กอายุ 8-16 ปี รู้จักการบันทึกอาการ อารมณ์ ความคิดและพฤติกรรมของตนเองโดยใช้ร่วมกับเทคนิคการระบุอารมณ์ และเทคนิคการประเมินระดับอารมณ์

2.1.4 การใช้เทคนิคผ่อนคลาย (relaxation techniques) เป็นการเรียนรู้การจัดการอารมณ์ การผ่อนคลายจะช่วยลดระดับอารมณ์โกรธ อาการทางกาย และสามารถควบคุมพฤติกรรมขณะโกรธได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นเทคนิคนี้ต้องฝึกให้เด็กรู้จักการผ่อนคลาย ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น

1) การฝึกหายใจ (breathing exercise) เป็นการฝึกหายใจเข้าทางจมูกแล้วหายใจออกทางปาก เช่น ในวัยรุ่น ควรฝึกให้หายใจเข้าลึก ๆ ทางจมูกให้ท้องป่อง นับ 1-2-3 ในใจ แล้วหายใจออกทางปากช้า ๆ ให้ท้องค่อย ๆ แพน นับ 1-2-3-4-5 ในใจ ทำซ้ำหลายรอบจนอารมณ์โกรธลดลง [30] เน้นให้เด็กจดจ่อกับการนับและการหายใจแทนอารมณ์โกรธ ในวัยเรียน เพื่อให้หายใจเพิ่มให้ฝึกหายใจโดยจินตนาการขณะดมดอกไม้ตอนหายใจเข้า และเป่าลูกโป่งตอนหายใจออก เน้นให้เด็กจดจ่อกับจินตนาการเรื่องกลิ่นหอมของดอกไม้ขณะหายใจเข้าและลมที่ใช้เป่าลูกโป่งขณะหายใจออกแทนการจดจ่อกับความรู้สึกโกรธ

2) การผ่อนคลายกล้ามเนื้อ (progressive muscle relaxation) เป็นการฝึกผ่อนคลายกล้ามเนื้อส่วนต่าง ๆ ทั้งร่างกาย ทำได้โดยเกร็งกล้ามเนื้อส่วนต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้ มือและแขน ข้อศอก ไบหน้าและกราม คอ ไหล่และหลัง หน้าท้อง ต้นขา และส้นเท้า คือ น่อง เท้าและนิ้วเท้า ทีละส่วน นับ 1-5 จากนั้นคลายกล้ามเนื้อบริเวณนั้นนับ 1-10 ควบคู่กับการหายใจ เพื่อให้กล้ามเนื้อที่เกร็งและตึงจากอารมณ์โกรธคลายตัวลง [14] สามารถปฏิบัติได้ทั้งวัยเรียนและวัยรุ่น

การฝึกเทคนิคผ่อนคลายอย่างต่อเนื่องที่บ้านทุกวันจะช่วยให้เด็กสามารถดึงเอาเทคนิคดังกล่าวมาใช้ได้อย่างอัตโนมัติ เมื่อเกิดความโกรธและความก้าวร้าว ควรเน้นให้เด็กได้ฝึกอย่างต่อเนื่องที่บ้านทุกวัน

2.2 วิธีการจัดการปัญหา (problem solving method) ประกอบด้วยเทคนิคย่อยได้แก่

2.2.1 เทคนิคการปรับความคิด (cognitive restructuring) คือการจัดการกับความคิดที่บิดเบือนซึ่งต้องอาศัยกระบวนการดังต่อไปนี้

1) ค้นหาความคิดอัตโนมัติ (automatic thoughts) เป็นการค้นหาความคิดที่เกิดขึ้นทันทีก่อนที่จะผ่านกระบวนการคิดอย่างมีเหตุผลหรือแปลความหมาย ความคิดอัตโนมัติมีได้หลายรูปแบบ อาจจะเป็นคำสั้น ๆ เป็นวลี หรืออาจเป็นภาพในสมอง การหาความคิดอัตโนมัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์กับอารมณ์ พฤติกรรม เข้าใจความคิดและความเชื่อที่มีต่อเหตุการณ์นั้น ๆ ในเด็กการเข้าใจความคิดเป็นเรื่องยาก อาจจะใช้คำถามว่า “ตอนที่อารมณ์โกรธ มีคำพูดหรือภาพอะไรเกิดขึ้นในหัวบ้าง” [30]

2) การประเมินความคิด (evaluating thoughts) เมื่อได้ความคิดอัตโนมัติแล้ว พิจารณาว่าความคิดนั้นมีผลต่ออารมณ์โกรธได้อย่างไร เช่น ความคิดอัตโนมัติที่ว่า “เธอทำแบบนี้กับฉันได้ยังไง” เมื่อชวนเด็กเข้าใจความคิดอาจจะเห็นว่าเด็กคิดว่ากำลังถูกละเมิดสิทธิของตัวเองอยู่ จึงโกรธ เป็นต้น จากนั้นนำความคิดนั้นมาประเมินโดยแบ่งการประเมินออกเป็น 2 ด้าน คือ [30]

ด้านความถูกต้องตามความเป็นจริงของความคิด (validity) ประเมินว่าความคิดของเด็กนั้นตรงตามความจริง หรือบิดเบือน หากบิดเบือนอาจจะดำเนินการปรับความคิด (cognitive restructuring) ต่อไป

ด้านความเป็นประโยชน์ของความคิด (utility) บางครั้งพบว่าความคิดบางอย่างอาจตรงหรือถูกต้องตามความเป็นจริง แต่ไม่มีประโยชน์ ในกรณีที่ความคิดของเด็กตรงตามความเป็นจริง แต่ไม่ได้เป็นประโยชน์กับตัวเด็ก อาจจะดำเนินการช่วยเด็กจัดการปัญหา (problem-solving) ต่อไป

3) การปรับความคิด (cognitive restructuring) โดยใช้ทักษะการตั้งคำถามเพื่อทดสอบความมีเหตุผลในกระบวนการคิดของเด็ก ชวนหาข้อมูลสนับสนุนความคิดด้วยเหตุผล โดยให้เด็กคิดหาทางออกด้วยตนเองโดยการพิจารณาข้อดีข้อเสียของการที่จะคงความคิดทางลบนั่นไว้ และให้เด็กทดลองทำตามความคิดใหม่ ฝึกให้เด็กแปลการรับรู้ใหม่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งหากเปลี่ยนมุมมองของการรับรู้จะช่วยให้เกิดความคิดเกี่ยวกับตนเองในทางที่ดีและเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ [31]

2.2.2 เทคนิคการวิเคราะห์และปรับพฤติกรรม (behavioral analysis and modification) คือ เทคนิคการปรับพฤติกรรมโดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หน้าที่ของพฤติกรรม (functional analysis) หรือแบบจำลองเอบีซีซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาเหตุ ชักนำ พฤติกรรม และผลที่เกิดขึ้น การถามถึงผลกระทบเป็นการถามทั้งข้อดีและข้อเสีย เมื่อวิเคราะห์หน้าที่ของพฤติกรรมแล้ว การปรับพฤติกรรมจะเน้นการจัดการเหตุที่ทำให้เกิดพฤติกรรม

2.2.3 เทคนิคการฝึกจัดการปัญหา (problem-solving training) แบ่งออกเป็น 2 ประเด็นคือ 1) สถานการณ์ที่มากระตุ้นให้เกิดความโกรธและความก้าวร้าว นั้นสามารถหลีกเลี่ยงได้หรือไม่ หากสามารถหลีกเลี่ยงได้เท่ากับสามารถป้องกันได้



หากหลีกเลี่ยงไม่ได้เท่ากับไม่สามารถป้องกันได้ 2) สามารถเพิกเฉยต่อสถานการณ์ที่มากระตุ้นให้เกิดความโกรธและความก้าวร้าวได้หรือไม่ หากเหตุการณ์นั้นไม่ควรค่าแก่การทำให้เสียใจสามารถเพิกเฉยได้ แต่หากสถานการณ์นั้นเพิกเฉยไม่ได้ จะต้องฝึกจัดการปัญหา ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การระบุปัญหา (problem definition) ผู้บำบัดและเด็กช่วยกันตั้งโจทย์ ว่าปัญหาที่ต้องการจะแก้ไขคืออะไร มีความสอดคล้องกับเป้าหมายในการบำบัดอย่างไร

2) การหาทางเลือก (solution generation) ชวนเด็กคิดหาทางเลือกในการแก้ปัญหาออกมาให้ได้มากที่สุด สิ่งสำคัญในการหาทางเลือกในการแก้ปัญหา คือ การสร้างทางเลือกออกมาให้ได้มากที่สุดโดยไม่ต้องรีบประเมินว่าวิธีนั้นทำได้หรือไม่ได้ การใช้หลักการระดมสมอง (brainstorming) จะช่วยเปิดมุมมองให้กว้างขึ้นได้

3) การตัดสินใจ (decision making) การตัดสินใจที่ดีนั้นอาศัยการประเมินข้อดี-ข้อเสียของแต่ละทางเลือกอย่างรอบคอบและรอบด้าน อาจใช้ตารางเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียเพื่อช่วยให้กระบวนการนี้เป็นรูปธรรมมากขึ้น

4) การนำทางเลือกไปปฏิบัติ (solution implementation and verification) การนำทางเลือกของการแก้ปัญหาไปปฏิบัติให้ได้ผลจริงนั้นควรมีการทำแผนการปฏิบัติ (action plan) ให้เกิดความชัดเจน เป็นขั้นเป็นตอน การมีแผนปฏิบัติที่ชัดเจนจะช่วยเพิ่มโอกาสให้การไปทำภารกิจสำเร็จได้มากขึ้น [22,30]

2.3 วิธีการพัฒนาทักษะ (skill development method)

จากการทบทวนความรู้ทักษะที่มีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาเพื่อจัดการความโกรธและความก้าวร้าว ประกอบด้วยทักษะสำคัญ ได้แก่ การฝึกทักษะทางสังคม (social skill training) และการฝึกทักษะการกล้าแสดงออก (assertiveness training) [24-29] เป็นการจัดการที่มุ่งเน้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม เทคนิคที่ช่วยพัฒนาทั้ง 2 ทักษะที่กล่าวมา คือ เทคนิคการฝึกจินตนาการ (imagery) ซึ่งผู้บำบัดเป็นคนนำ (guide) และเทคนิคการซ้อมบทบาทสมมติ (role-play) ในการจัดการปัญหานั้นจากการจำลองสถานการณ์ที่ทำให้เกิดความโกรธ [32] วิธีการพัฒนาทักษะได้แก่

2.3.1 การฝึกทักษะสังคม (social skill training) คือ การเลือกและฝึกฝนการจัดการความโกรธในสถานการณ์ที่ถูกยั่วยั่วยุทั้งทางวาจาและทางร่างกายจากเพื่อนซึ่งกระตุ้นให้เกิดความโกรธและความก้าวร้าว การฝึกทักษะจะช่วยให้เด็กสามารถใช้ทักษะเหล่านี้เป็นไปโดยอัตโนมัติเมื่อเผชิญกับสถานการณ์ที่ทำให้เกิดความโกรธ โดยใช้เทคนิคแสดงบทบาทสมมติ โดยมีตัวอย่างการฝึกทักษะดังนี้ [14]

1) ฝึกการหลีกเลี่ยงสถานการณ์ สำหรับสถานการณ์ที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น เพื่อนที่ชอบแกล้งนั่งอยู่ใกล้ ๆ มีวิธีการฝึกโดยให้เด็กคิดหาวิธีการแก้ปัญหาในการหลีกเลี่ยง และแสดงบทบาทสมมติ โดยให้นักบำบัดแสดงบทบาทของครู เด็กแสดงบทบาทนักเรียน ขออนุญาตครูนั่งหน้าชั้นเรียน เพื่อให้ห่างจากเพื่อนที่รบกวนสมาธิ ฝึกการสื่อสารโดยแสดงและพูดคุยอิงตามสถานการณ์ที่เกิดขึ้นจริง โดยคาดการณ์ คำถามที่ครูจะสอบถาม ฝึกซ้อมการตอบคำถาม และการจัดการสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้น เช่น ถ้าเพื่อนตามมานั่งใกล้ ๆ จะบอกครูว่าอย่างไรต่อไป เพื่อให้การฝึกทักษะครอบคลุมสถานการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

2) ฝึกการเพิกเฉยสำหรับสถานการณ์ที่เพิกเฉยได้ เช่น ถูกเพื่อนยั่วยั่วยุด้วยวาจา ใช้วิธีการฝึกเพื่อสามารถเพิกเฉยได้หรือรับรู้ว่าการหรือข้อความเหล่านั้นไม่ควรค่าแก่การใส่ใจ โดยให้เด็กแสดงบทบาทสมมติ นักบำบัดแสดงบทบาทเพื่อนชวนจินตนาการถึงเหตุการณ์ นักบำบัดใช้คำพูดยั่วยั่วยุตามสถานการณ์ที่เด็กให้ข้อมูล ให้เด็กแสดงบทบาทสมมติในการเพิกเฉย ฝึกการบอกตัวเองว่า คำยั่วยั่วยุไม่ควรค่าแก่การใส่ใจ หรืออาจจะเบี่ยงเบนความสนใจ (distraction) ไปทำสิ่งที่สนใจ เช่น ฟังเพลง อ่านหนังสือ ตามที่เด็กสนใจ เป็นต้น

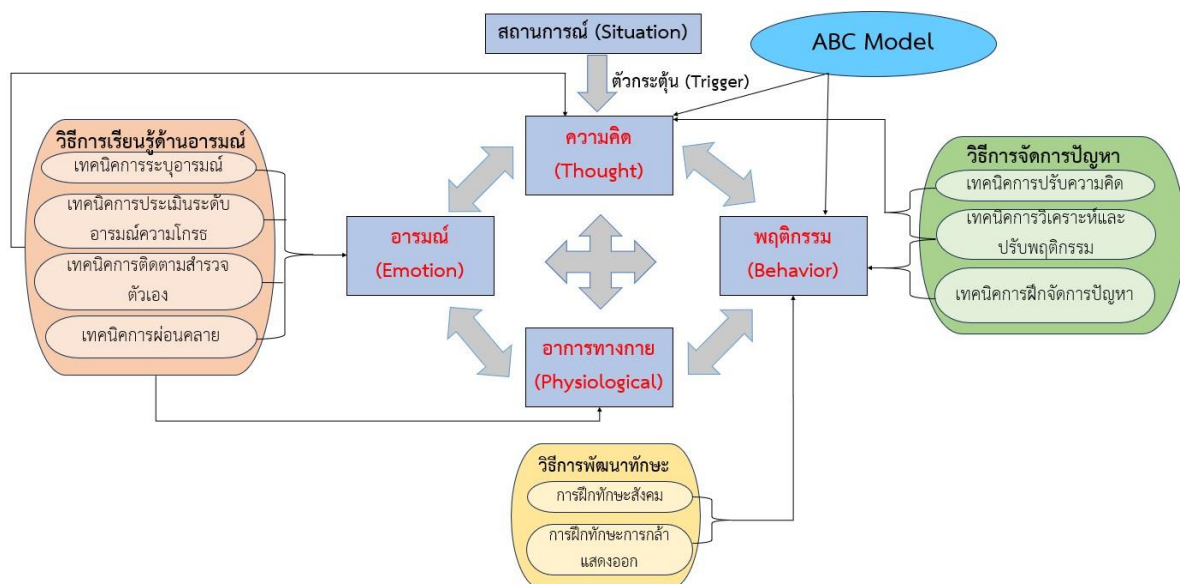
3) ฝึกการแสดงออกที่เหมาะสมสำหรับสถานการณ์ที่เพิกเฉยไม่ได้ ใช้วิธีการฝึกการแสดงออกที่เหมาะสม ฝึกทักษะการสื่อสาร เจรจา โดยให้แสดงบทบาทสมมติ นักบำบัดแสดงเป็นเพื่อนที่กระตุ้นให้เกิดความโกรธ และให้เด็กฝึกทักษะการสื่อสารเช่นบอกเพื่อนว่า “หยุดเถอะ ฉันไม่ชอบการกระทำแบบนี้ของเธอ ถ้าเธอยังไม่หยุด ฉันจะบอกครู” ทั้งนี้การฝึกเด็ก

จะต้องฝึกการใช้น้ำเสียงที่หนักแน่น แสดงท่าทางสงบ มั่นคง หากเด็กยังทำไม่ได้ นักบำบัดแสดงเป็นตัวอย่างและให้เด็กปฏิบัติตาม

การฝึกทักษะสังคม ในสถานการณ์อื่น ๆ ที่แตกต่างกันไปใช้วิธีการฝึกในแนวทางเดียวกัน แต่มีจุดเน้นในการฝึกที่ว่าทักษะทางสังคมเป็นแบบแผนที่คนในสังคมลงความเห็นว่าสิ่งนั้นเป็นสิ่งที่ดีงาม เป็นสิ่งที่ควรกระทำ

2.3.2 ทักษะการกล้าแสดงออก (assertiveness training) การกล้าแสดงออกเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของการสื่อสารบุคคล เพื่อแสดงออกถึงความสามารถของตนเองรวมถึงการเคารพในสิทธิและความเชื่อของผู้อื่น เทคนิคนี้ช่วยพัฒนาความมั่นใจ เพิ่มความสามารถในการเจรจา สร้างความสัมพันธ์อันดี และลดความขัดแย้งกับผู้อื่น โดยการแสดงออกต้องอยู่บนสิทธิขั้นพื้นฐานของบุคคลที่ว่า บุคคลสามารถแสดงความรู้สึกของตนได้โดยไม่ต้องไม่ทำร้ายความรู้สึกของผู้อื่น และทุกคนต้องรักษาสีห์ของตนเองโดยไม่ไปก้าวล่วงสิทธิของผู้อื่น

แบบจำลองทางความคิดในภาพที่ 1 แบบจำลองเอบีซีในภาพที่ 2 สามารถสรุปความเชื่อมโยงกับวิธีและเทคนิคในหัวข้อ 2.1-2.3 ได้แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความเชื่อมโยงของแบบจำลองทางความคิด แบบจำลองเอบีซี วิธีและเทคนิค

3. ตัวอย่างการนำ CBT ไปประยุกต์ใช้ในเด็กที่มีความโกรธและความก้าวร้าว

กรณีศึกษา: เด็กชายไทยอายุ 9 ปี มีความโกรธและความก้าวร้าว ข้อมูลจากผู้ปกครองแจ้งว่า เด็กมักจะหงุดหงิดและฉุนเฉียวกับปัญหาหรือเรื่องเล็ก ๆ น้อย ๆ เช่น การแบ่งของเล่นกับน้องชาย มีความก้าวร้าวที่โรงเรียนและทำร้ายร่างกายเพื่อน ครูแจ้งว่าเด็กมีพฤติกรรมก่อกวนเพื่อนในห้อง รวมทั้งตะคอกคำหยาบคายใส่เพื่อน อาการเป็นมาขึ้นจากที่ใช้ความรุนแรงทางวาจาเป็นใช้ความรุนแรงทางร่างกาย

สถานการณ์ล่าสุด: น้องมาเล่นหุ่นยนต์ตัวโปรดโดยที่เด็กไม่ได้อนุญาต จากนั้นชกหน้าน้อง

3.1 การสร้างแบบจำลอง CBT model ใช้ทำความเข้าใจว่าปัญหาของเด็กเกิดขึ้นได้อย่างไรและอะไรที่ทำให้ปัญหายังคงอยู่ เพื่อนำไปสู่การบำบัดที่เป็นระบบ จากนั้นใช้วิธีการและเทคนิค CBT จัดการอารมณ์ ความคิด พฤติกรรม และอาการทางกาย เพื่อลดความโกรธและความก้าวร้าว ข้อมูลที่ได้จากสถานการณ์ล่าสุด พบว่า

สถานการณ์ : น้องมาเล่นหุ่นยนต์ตัวโปรดโดยที่เด็กไม่ได้อนุญาตเป็นตัวกระตุ้นทำให้เกิดความโกรธและความก้าวร้าว

ความคิด : “ทำแบบนี้กับของของพี่ได้ยังไง” “น้องทำหุ่นพังแน่ ๆ เลย”



อารมณ์ : โกรธ คณน 10/10

พฤติกรรม : กัดฟัน กำมือ จากนั้นตรงเข้าไปตีของเล่นออกจากมือน้อง เมื่อน้องขัดขึ้น จึงชกไปที่หน้าของน้อง

อาการทางกาย : หัวใจเต้นเร็ว หายใจเร็ว หูร้อน

จากแผนภาพ CBT model นักบำบัดจะสามารถจัดการกับความโกรธและความก้าวร้าว จะต้องจัดการกับ 4 ส่วน ได้แก่ ความคิด อารมณ์ พฤติกรรม อาการทางกาย ซึ่งทั้ง 4 ส่วนเชื่อมโยงซึ่งกันและกัน หากจัดการที่ด้านใดด้านหนึ่งก็จะส่งผลไปยังด้านอื่น ๆ เช่นกัน ดังนั้นการใช้วิธีการ ทั้ง 3 วิธีได้แก่ การเรียนรู้ด้านอารมณ์ การจัดการปัญหา และการพัฒนาทักษะ ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคย่อย ทั้งวิธีการและเทคนิคทำให้เกิดการจัดการทั้ง 4 ส่วนดังแสดงความเชื่อมโยงในภาพที่ 3 และส่งผลให้เด็กสามารถจัดการความโกรธและความก้าวร้าวได้

3.2 การสร้างแบบจำลอง ABC model

จากข้อมูลในแบบจำลอง ABC ผู้บำบัดชวนเด็กมองความเชื่อมโยงของปัญหา หาผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เพื่อจัดการในส่วนความคิดและพฤติกรรมใน CBT model สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเหตุชักนำ พฤติกรรม ผลที่เกิดขึ้น ตามแบบจำลอง ABC

A: เหตุชักนำ	B: พฤติกรรม	C: ผลที่เกิดขึ้น
น้องเล่นหุ่นยนต์ที่ กลัวของเล่นพัง	ชกไปที่หน้าของน้อง	น้องได้รับบาดเจ็บ ถูกพ่อแม่ลงโทษ น้องโกรธ

3.3 การใช้วิธีการเรียนรู้ด้านอารมณ์ (affective education method)

ให้เด็กจินตนาการว่าขณะโกรธมีอาการทางกายอะไรเกิดขึ้น หรือมีพฤติกรรมอย่างไร โดยประเมินระดับความรุนแรงโดยใช้รูปหน้าอารมณ์ และสอนเทคนิคการหายใจโดยให้จินตนาการการดมดอกไม้ขณะหายใจเข้าและเป่าลูกโป่งขณะหายใจออก สาธิตและให้เด็กปฏิบัติตาม ให้การบ้าน (Homework) โดยให้เด็กบันทึกติดตามสำรวจสถานการณ์ที่ทำให้เกิดอารมณ์ โกรธ ความคิด อารมณ์ ระดับอารมณ์ และพฤติกรรม โดยการทำแบบบันทึกความคิด (Thought record) และฝึกเทคนิคผ่อนคลายทุกวัน วันละ 5 นาที และให้ใช้เทคนิคผ่อนคลายขณะที่รับรู้ว่าการโกรธ เป็นต้น วิธีการนี้จะช่วยจัดการส่วนของอารมณ์ ความคิด และอาการทางกายใน CBT Model

3.4 การใช้วิธีการจัดการปัญหา (problem solving method)

ทำการปรับความคิดจากการตรวจสอบความเป็นเหตุเป็นผลโดยเทคนิคการตั้งคำถาม จากการใช้แบบจำลองความคิด และแบบจำลองเอปี่ ช่วยให้เด็กได้มองเห็นผลเสียของผลลัพธ์ที่มีมากมาย จากเหตุชักนำเพียงแค่น้องเล่นหุ่นยนต์ของพี่ ทำให้เด็กตระหนักถึงผลของการกระทำ ความก้าวร้าว และคิดจะปรับเปลี่ยนความคิดและพฤติกรรม ชวนเด็กพิจารณาข้อดีข้อเสียของทางเลือกในหลากหลายทางเลือกและตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุด จากนั้นร่วมวางแผนสร้างแผนปฏิบัติการ ที่จะนำไปสู่การปฏิบัติจริงเป็นขั้นเป็นตอน อาจใช้การแสดงบทบาทสมมติในการฝึกตามแผนปฏิบัติการ โดยใช้เทคนิคการจัดการปัญหาดังนี้

ขั้นที่ 1 การระบุปัญหา : เด็กระบุปัญหาคือน้องแย่งของเล่นของตน กังวลว่าน้องจะทำของเล่นพัง และคิดว่าของเล่นเป็นของตน ตนเองจึงมีสิทธิ์เล่นได้คนเดียว

ขั้นที่ 2. หาทางเลือกที่จะทำให้น้องไม่แย่งของเล่น ได้แก่ แบ่งน้องเล่น เอาของเล่นออกมาเล่นตอนที่น้องไม่อยู่ พ่อแม่ซื้อของเล่นให้เหมือนกัน

ขั้นที่ 3 การตัดสินใจ โดยการพิจารณาข้อดี - ข้อเสีย
สามารถแสดงเป็นตัวอย่างทางเลือกเพื่อการพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียได้ดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 แสดงทางเลือกและการพิจารณาข้อดี-ข้อเสียของทางเลือก

ทางเลือก	ข้อดี	ข้อเสีย
แบ่งน้องเล่น	ได้เล่นด้วยกัน ไม่ทะเลาะกัน	น้องอาจทำของเล่นพัง
เอาของเล่นออกมาเล่นตอนที่น้องไม่อยู่	ของเล่นไม่พัง	ต้องหลบ ๆ ซ่อน ๆ น้องอยู่ด้วยตลอดเวลา อาจจะได้ไม่เล่น
พ่อกับแม่ซื้อของเล่นให้เหมือนกัน	ไม่ต้องแย่งกัน	ต้องใช้เงิน ต้องขอพ่อกับแม่ว่าจะอนุญาตหรือไม่

ขั้นที่ 4 การนำไปปฏิบัติ เด็กเลือกแบ่งน้องเล่น วางแผนการนำไปปฏิบัติ ในการจัดการกับอารมณ์ ความคิด พฤติกรรมและอาการทางกายอย่างไร โดยอาจใช้การฝึกทักษะร่วมด้วยเพื่อเพิ่มโอกาสในการนำไปปฏิบัติจริงได้สำเร็จ

3.5 การใช้วิธีการพัฒนาทักษะ (skill development method)

ฝึกทักษะทางสังคม พิจารณาว่าสถานการณ์น้องแย่งของเล่นสามารถหลีกเลี่ยงได้ไหม เช่น เอาหุ่นยนต์ตัวโปรดมาเล่น ตอนที่น้องไม่อยู่ หากน้องอยู่เก็บซ่อนไว้ เป็นต้น หากเด็กบอกว่าหลีกเลี่ยงไม่ได้เพราะต้องอยู่กับน้องตลอดเวลา สามารถเพิกเฉยได้หรือไม่ เช่น ปลอมให้น้องเล่นของเล่นไป หุ่นยนต์ถึงจะเป็นตัวโปรด แต่เดี๋ยวเราก็เบื่อ น้องทำพังกี่ไม่เป็นไร สามารถซื้อใหม่ได้ แต่หากเด็กไม่สามารถเพิกเฉยได้ ฝึกทักษะการสื่อสารกับน้อง เช่น เอาหุ่นยนต์มาให้พี่เดี๋ยวนี้นะ เรามาทำข้อตกลงกัน ถ้าน้องจะเล่นต้องขออนุญาตทุกครั้ง และต้องเล่นอย่างระมัดระวังไม่ให้หุ่นยนต์พัง ถ้าพังจะต้องให้พ่อกับแม่ซื้อให้ใหม่ โดยฝึกการต่อรองกับพ่อและแม่ เพื่อหาความลงตัวในการจัดการมากที่สุด

การฝึกทักษะการกล้าแสดงออก ให้เด็กมั่นใจในการเจรจาลดความขัดแย้ง โดยพิทักษ์สิทธิ์ของตัวเองในการเป็นเจ้าของของเล่น แต่ในขณะเดียวกันก็ไม่มีสิทธิ์ที่จะไปทำอันตรายน้อง เป็นต้น

ทั้งทักษะทางสังคมและทักษะการกล้าแสดงออก สามารถใช้การฝึกจินตนาการ (imagery) ซึ่งผู้บำบัดเป็นคนนำ (guide) กระตุ้นให้เด็กรู้สึกเหมือนว่าอยู่ในสถานการณ์ที่กำลังมีความโกรธและความก้าวร้าว จากนั้นผู้บำบัดชี้แนะวิธีการที่ได้บำบัดมา เช่น การฝึกหายใจ และสอบถามว่าความรู้สึกโกรธลดลงหรือไม่ หรือชี้แนะให้เด็กปรับความคิดและสอบถามว่าความรู้สึกโกรธลดลงหรือไม่ จากนั้นให้เด็กจินตนาการและจินตนาการการจัดการแล้วผลจะเปลี่ยนไปอย่างไร เป็นต้น และเทคนิคการซ้อมบทบาท สมมติ (role-play) โดยให้เด็กแสดงบทบาทตามที่ทำการวางแผนร่วมกันมา นักบำบัดแสดงบทบาทสมมติเป็นน้องให้เด็กได้ลองจัดการสถานการณ์ด้วยตนเองก่อนนำไปปัญหาที่พบมาฝึกและปรับปรุงเพื่อให้สามารถนำไปปฏิบัติจริงได้อย่างมั่นใจ

สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้รายงานผลการทบทวนความรู้ร่วมกับประสบการณ์การเป็นนักบำบัดของผู้เขียน พบว่าการบำบัดความคิดและพฤติกรรมในเด็กอายุ 8-16 ปี ที่มีความโกรธและความก้าวร้าวผ่านแบบจำลองความคิด (CBT model) และแบบจำลองเอบีซี มี 3 วิธี ได้แก่ วิธีการเรียนรู้ด้านอารมณ์ วิธีการจัดการปัญหา และวิธีการพัฒนาทักษะ โดยวิธีการเรียนรู้ด้านอารมณ์ประกอบด้วย 4 เทคนิคย่อยได้แก่ เทคนิคการระบุอารมณ์ เทคนิคการประเมินระดับอารมณ์ความโกรธ เทคนิคการติดตามสำรวจตัวเอง และเทคนิคการผ่อนคลาย ส่วนวิธีการจัดการปัญหาประกอบด้วยเทคนิคย่อย ได้แก่ เทคนิคการปรับความคิด เทคนิคการวิเคราะห์และปรับพฤติกรรม และเทคนิคการฝึกจัดการปัญหา ในขณะที่วิธีการพัฒนาทักษะประกอบด้วย 2 ทักษะ ได้แก่ การฝึกทักษะสังคม และการฝึกทักษะการกล้าแสดงออก การบำบัดความคิดและพฤติกรรมของเด็กกลุ่มนี้ให้ประสบความสำเร็จผู้บำบัดต้องทำความเข้าใจปัญหาความโกรธและความก้าวร้าวผ่านแบบจำลอง วิธีการ และเทคนิคย่อยต่าง ๆ ให้ถ่องแท้ และหมั่นฝึกกับกรณีศึกษาจริง ที่สำคัญที่สุดคือ ผู้ปกครองและครู ควรมีส่วนร่วมในการบำบัดด้วย ผู้เขียนเสนอแนะว่าการบำบัดจะสัมฤทธิ์ผล เด็กจะต้องได้รับการบำบัดอย่างต่อเนื่อง 8-12 ครั้ง ครั้งละ 1 ชั่วโมง และเด็กต้องนำเอาสิ่งที่ได้



เรียนรู้จากข้อโม่งบ่บ่ไปฝึกที่บ้านอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามในบทความนี้เป็นความรู้เบื้องต้นเท่านั้น หากปัญหามีความซับซ้อนจำเป็นต้องใช้การบำบัดความคิดและพฤติกรรมเชิงลึกจากผู้เชี่ยวชาญหรือจิตแพทย์เพื่อดำเนินการรักษาต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Slimi N, Shahanjarini AK, Shahkolai FR, Hamzeh B, Roshanaei G, Babamiri M. Aggression and its predictors among elementary students. *J Inj Violence Res* 2019;11(2):159-70.
2. American Psychiatric Association. Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders. 5th ed. Arlington: American Psychiatric Association; 2013.
3. Berkowitz L, Harmon-Jones E. Toward an Understanding of the Determinants of Anger. *Emotion* 2004;4(2):107-30.
4. Kassinove H, Sukhodolsky DG. Anger Disorders: Basic Science and Practice Issues. *Issues Compr Pediatr Nurs* 2009;18(3):173-205.
5. Potegal M, Davidson LP, Davidson RJ. Temper Tantrums in Young Children: 1. Behavioral Composition. *J Dev Behav Pediatr* 2003;14:140-7.
6. Potegal M, Kosorok MR, Davidson RJ. Temper Tantrums in Young Children: 2. Tantrum Duration and Temporal Organization. *J Dev Behav Pediatr* 2003;24(3):148-54.
7. Blanchard-Fields F, Coats AH. The experience of anger and sadness in everyday problems impacts age differences in emotion regulation. *Dev Psychol* 2008;44(6):1547-56.
8. Chereji SV, Pintea S, David D. The relationship of anger and cognitive distortions with violence in violent offenders' population: a meta-analytic review. *Eur J Psychol Appl Legal Context* 2012;4(1):59-77.
9. Connor DF. Aggression and antisocial behavior in children and adolescents: research and treatment. New York: Guilford Press; 2012.
10. Tremblay RE. Understanding development and prevention of chronic physical aggression: towards experimental epigenetic studies. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2008;363(1503):2613-22.
11. Allen JJ, Anderson CA. Aggression and Violence: Definitions and Distinctions. *The Wiley Handbook of Violence and Aggression*. 1st ed. Oxford: John Wiley & Son; 2017.
12. Loeber R, Green SM, Lahey BB, Kalb L. Physical fighting in childhood as a risk factor for later mental health problems. *Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2000;39(4):421-8.
13. ณัชชา ศรีมหาพรหม, สมศักดิ์ จีวัฒนา, กระพัน ศรีงาน. ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมก้าวร้าวของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 3. *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์* 2566;42(1):85-95.
14. ณัฏฐา พิชัยรัตน์เสถียร. โมโมโมโหแล้ว. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์คิดเทอเรซ; 2561.
15. Sukhodolsky DG, Scahill L. Cognitive-behavioral therapy for anger and aggression in children. New York: Guilford Press; 2012.
16. Lee AH, DiGiuseppe R. Anger and aggression treatments: a review of meta-analyses. *Current Opinion in Psychology*. *Curr Opin Psychol* 2018;19:65-74.
17. King R. Cognitive therapy of depression. Aaron Beck, John Rush, Brian Shaw, Gary Emery. New York: Guilford, 1979 Aust N Z J psychiatry 2002;36(2):272-5.



18. ชนกฤต ลิขิตธรากุล, ภาสกร คุ่มศิริ. จิตบำบัดความคิดและพฤติกรรมกับการติดยา. วารสารจิตวิทยาคลินิกไทย 2565;53(1):71-84.
19. จูตินันท์ อ้วนล้ำ, นรุตน์ แผงพรมมา. การพยาบาลเด็กออทิสติกที่มีพฤติกรรมก้าวร้าว. วารสารโรงพยาบาลมหาสารคาม 2563;17(2):68-76.
20. Borenstein M, Hedges LV, Higgins JP, Rothstein HR. Introduction to meta-analysis. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2021.
21. Del Vecchio T, O’Leary KD, Effective of anger treatments for specific anger problems: a meta-analytic review. Clin Psychol Rev 2004;24(1):15-34.
22. Beck JS. Cognitive behavior therapy: Basics and beyond. 3rd ed. New York: The Guilford Press; 2020.
23. Nunez K. ABC model of cognitive behavioral therapy: how it works. Healthline [Internet]. 2020. [citd 2024 April 10]. Available from: <https://www.healthline.com/health/abc-model>
24. Lee AH, DiGiuseppe R. Anger and aggression treatments: a review of meta-analyses. Curr Opin Psychol 2018;19(1):65-74.
25. Ho BPV, Carter M, Stephenson J. Anger management using a cognitive-behavioural approach for children with special education needs: a literature review and meta-analysis. J Disabil Dev Educ 2010;57(3):245-65.
26. Candelaria AM, Fedewa AL, Ahn S. The effects of anger management on children’s social and emotional outcomes: A meta-analysis. Sch Psychol Int 2012;33(6):596-614.
27. Sukhodolsky DG, Kassinove H, Gorman BS. Cognitive-behavioral therapy for anger in children and adolescents: a meta-analysis. Aggress Violent Behav 2004;9(3):247-69.
28. Beck R, Fernandez E. Cognitive-behavioral therapy in the treatment of anger: A meta-analysis. Cogn Ther Res 1998;22(1):63-74.
29. Fossum S, Handegård BH, Adolfsen F, Vis SA, Wynn R. A meta-Analysis of long-term outpatient treatment effects for children and adolescents with conduct problems. J Child Fam Stud 2015;25(1):15-29.
30. วัชร พิชัยรัตน์เสถียร. Basic Skill in CBT. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2565.
31. Kennerley H, Kirk J, Westbrook D. Introduction to Cognitive Behaviour Therapy: Skills & Applications. 3rd ed. London: Sage Publications; 2017.
32. Spence SH. Social skills training with children and young people: theory, evidence and practice. Child Adolesc Ment Health 2003;8(2):50-104.



การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์และน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออก มะเขือเทศสดของประเทศไทย

Assessing Water Footprint and Virtual Water Related to Export of Fresh Tomatoes of Thailand

มนัสวี พานิชนอก^{1*} สรัญญา ถีป้อม¹ และ นภาพร มีสะอาด²

¹สาขาวิชานาฏยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

²สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

Manuswee Phanichnok^{1*}, Sarunya Thiphom¹ and Napaporn Meesaard²

¹Environmental Health Program, Faculty of Public Health, Naresuan University, Phitsanulok, 65000

²Occupational Health and Safety Program, Faculty of Public Health, Naresuan University,
Phitsanulok, 65000

*Corresponding author: manusweep@nu.ac.th

Received: 7 May 2024/ Revised: 11 July 2024/ Accepted: 16 July 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศและเพื่อประเมินน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563 โดยการประเมินแบ่งออกเป็น วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว สีน้ำเงิน และสีเทา ผลการศึกษาพบว่า การปลูกมะเขือเทศในฤดูกลาง จังหวัดที่มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดน้อยที่สุดคือ แม่ฮ่องสอน (244.50 ลบ.ม.ต่อตัน) รองลงมาคือ หนองคาย (246.51 ลบ.ม.ต่อตัน) และสกลนคร (251.91 ลบ.ม.ต่อตัน) ตามลำดับ เมื่อพิจารณารายประเภทของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์พบว่า การปลูกมะเขือเทศมีการใช้น้ำสีน้ำเงินมากที่สุด รองลงมาคือ สีเทา และสีเขียว ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินมีความจำเป็นมากต่อการปลูกมะเขือเทศ เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาในพื้นที่ปลูกมะเขือเทศยังไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตตามปกติ ส่วนปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์สุทธิที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดพบว่ามีค่าเท่ากับ 163,692.61 ลบ.ม.ต่อปี ซึ่งน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์นี้ได้ไหลไปยังประเทศสิงคโปร์มากที่สุด รองลงมาคือ เมียนมาร์ และมาเลเซีย ตามลำดับ โดยน้ำถือเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าต่อประชาชนในประเทศ ในกรณีที่ประเทศผู้ส่งออกประสบภัยแล้งหรือมีปริมาณน้ำใช้ภายในประเทศน้อยอาจจำเป็นต้องวางแผนการผลิตสินค้าทางการเกษตรเพื่อการส่งออกในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อการบริโภคน้ำภายในประเทศ

คำสำคัญ: วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ น้ำเสมือน การปลูกมะเขือเทศ การส่งออก

Abstract

This research aimed to evaluate water footprint of tomato cultivation and virtual water related to the export of fresh tomatoes in Thailand, 2020 which is divided into green, blue, and grey water footprints. The results showed that among the provinces where seasonal tomatoes were planted, the lowest total water footprint was Mae Hong Son (244.50 m³/ton), followed by Nong Khai (246.51 m³/ton) and Sakon Nakhon (251.91 m³/ton) respectively. Considering each type of water footprint, the most water consumption for tomato cultivation is blue, followed by grey and green, respectively, indicating that the water use from surface and groundwater sources is essential for growing tomatoes. This is because the amount of rain falling on the tomato planting areas is not enough to grow. The net volume of virtual water related to fresh tomato export is 163,692.61 m³/year, with the most virtual water flowing to Singapore, followed by Myanmar and Malaysia, respectively. Water is considered a precious resource for the people of that country. In cases where there is a drought or the amount of water use is low in the exporter country, it may be necessary to plan the production of exports in moderation to reduce the potential impact on domestic water use.

Keywords: Water footprint, Virtual water, Tomato cultivation, Export

บทนำ

มะเขือเทศเป็นพืชที่นิยมบริโภคในหลายๆ ประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีรสชาติที่ดี และรับประทานง่าย [1] มะเขือเทศอุดมไปด้วยสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกายประกอบด้วย โปรตีน คาร์โบไฮเดรต แร่ธาตุ และวิตามิน [2] โดยแร่ธาตุและวิตามินที่มีมากได้แก่ ฟอสฟอรัส แคลเซียม เหล็ก โพแทสเซียม ไบโอฟลาวิน ไทอามีน ไนอะซิน กรดแอสคอร์บิก และวิตามินเอ [1] นอกจากนี้มะเขือเทศยังมีสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญคือ สารไลโคปีนที่มีคุณสมบัติช่วยลดความเสี่ยงของเซลล์และช่วยลดความเสี่ยงจากโรคมะเร็งชนิดต่างๆ เช่น มะเร็งกระเพาะอาหาร มะเร็งปอด มะเร็งต่อมลูกหมาก มะเร็งปากมดลูก รวมถึงลดความเสี่ยงต่อการป่วยเป็นโรคหัวใจ [3] ด้วยคุณประโยชน์ดังกล่าว มะเขือเทศจึงถูกนำมาบริโภคอย่างแพร่หลาย โดยนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหาร และนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในภาคอุตสาหกรรม เช่น น้ำมะเขือเทศเข้มข้น ซอสมะเขือเทศ มะเขือเทศแช่แข็ง และแยมมะเขือเทศ รวมทั้งยังสามารถนำมาผลิตเป็นอาหารเลี้ยงสัตว์ได้อีกด้วย

มะเขือเทศสามารถปลูกได้ในหลายประเทศทั่วโลก จากฐานข้อมูลสถิติการเกษตรขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database; FAOSTAT) [4] รายงานว่าปี พ.ศ. 2563 ประเทศที่มีผลผลิตมะเขือเทศมากที่สุด 5 อันดับแรกของโลกได้แก่ จีน อินเดีย ตุรกี สหรัฐอเมริกา และอียิปต์ ตามลำดับ ส่วนประเทศไทยมีผลผลิตเป็นอันดับที่ 74 ของโลก โดยประเทศไทยสามารถปลูกมะเขือเทศได้ทั่วประเทศทั้งภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคตะวันตก ในปี พ.ศ. 2563 สามารถสร้างผลตอบแทนให้แก่เกษตรกรสูงถึง 40,000 บาทต่อไร่ [5] และจากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร [6] พบว่าปี พ.ศ. 2563 ประเทศไทยมีกำลังการผลิตมะเขือเทศสดเท่ากับ 132,650 ตัน มีเนื้อที่เก็บเกี่ยวเท่ากับ 37,420 ไร่ และมีผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 3.54 ตันต่อไร่ จังหวัดที่มีกำลังการผลิตมะเขือเทศมากที่สุดคือ เชียงใหม่ รองลงมาคือ สกลนคร และหนองคาย ตามลำดับ ประเทศไทยปลูกมะเขือเทศเพื่อบริโภคภายในประเทศเป็นหลักและมีบางส่วนส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ โดยพบว่าส่งออกไปยังประเทศสิงคโปร์มากที่สุด รองลงมาคือ เมียนมาร์ และมาเลเซีย ตามลำดับ นอกจากนี้ในบางฤดูกาลที่ประเทศไทยไม่สามารถปลูกมะเขือเทศได้จึงมีการนำเข้ามะเขือเทศจากต่างประเทศซึ่งพบว่านำเข้าจากประเทศจีนและนิวซีแลนด์มากที่สุด [7]



มะเขือเทศเป็นพืชที่ใช้ระยะเวลาในการปลูกจนกระทั่งเก็บเกี่ยวเพียง 4-5 เดือน และต้องปลูกในพื้นที่ที่เหมาะสม จึงจะให้ผลผลิตที่ดีและมีคุณภาพ มะเขือเทศเป็นพืชที่ชอบอากาศค่อนข้างเย็น อุณหภูมิที่เหมาะสมช่วงกลางวันอยู่ระหว่าง 25-30 องศาเซลเซียส ช่วงกลางคืนอยู่ระหว่าง 16-20 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างของดินอยู่ระหว่าง 5.5-7.0 [8] ปริมาณน้ำฝนและความชื้นสูงเป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดโรคทางใบและรากในมะเขือเทศได้ และต้องการแสงแดดตลอดทั้งวัน [9] มะเขือเทศจึงนิยมปลูกในช่วงฤดูหนาว แต่เนื่องจากมะเขือเทศนิยมรับประทานตลอดทั้งปี จึงได้ส่งเสริมให้มีการปลูกนอกฤดูกาลเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค ทั้งนี้การปลูกมะเขือเทศนอกฤดูกาลให้ได้ผลผลิตดีควรปลูกในพื้นที่สูง สภาพอากาศที่ไม่ร้อนจัด มีวัสดุคลุมแปลงปลูกเพื่อลดการระเหยของน้ำในดิน ควรให้น้ำทุกวันอย่างสม่ำเสมอ และแปลงปลูกสามารถระบายน้ำได้ดี [10] การปลูกมะเขือเทศให้ได้ผลผลิตที่ดีมีคุณภาพนั้นปัจจัยด้านน้ำถือเป็นสิ่งสำคัญ การให้น้ำในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช โดยไม่น้อยจนกระทั่งพืชเหี่ยวเฉาและไม่มากจนก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทรัพยากรน้ำโดยเปล่าประโยชน์ ทั้งนี้ความต้องการใช้น้ำของพืชที่ปลูกในแต่ละพื้นที่จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน และคุณสมบัติของดิน น้ำจึงถือเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก หากเกษตรกรในแต่ละพื้นที่ทราบถึงปริมาณการให้น้ำที่เหมาะสมต่อความต้องการของพืชหรือปริมาณน้ำที่ควรใส่ลงในแปลงเพาะปลูกพืชเพื่อให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างเป็นปกติจะสะท้อนให้เห็นถึงความคุ้มค่าของการใช้น้ำทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ [11] วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ถือเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อประเมินปริมาณการใช้น้ำในกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ และปัจจุบันได้มีการนำแนวทางการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มาใช้ในการประเมินการใช้น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อมของการผลิตพืชในหน่วยปริมาณน้ำต่อหน่วยผลผลิตพืชเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศ รวมถึงการประเมินในรูปน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทย ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อการผลิตมะเขือเทศสดเหมือนเกิดการไหลออกนอกประเทศไปกับการส่งออก ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำคัญต่อการวางแผนการเพาะปลูกให้เหมาะสมทั้งในเชิงพื้นที่และฤดูกาลเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด รวมทั้งเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนการส่งเสริมการปลูกมะเขือเทศเพื่อการส่งออก โดยเฉพาะในแง่ของปริมาณการส่งออกที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ทรัพยากรน้ำภายในประเทศ ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศในฤดูกาลและนอกฤดูกาลปี พ.ศ. 2563 และเพื่อประเมินปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดปี พ.ศ. 2563

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศและประเมินปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2563 โดยทำการศึกษาในทุกจังหวัดที่มีการปลูกมะเขือเทศ ซึ่งผลลัพธ์ของการประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (Water Footprint; WF) อยู่ในรูปหน่วยปริมาณการใช้น้ำต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ได้ดำเนินการตามคู่มือ The water footprint assessment manual: setting the global standard 2011 [12] แบ่งการประเมินออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (Green water footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำที่อยู่ในรูปของความชื้นภายในดินอันเนื่องมาจากน้ำฝนที่ถูกใช้ในการปลูกพืช 2. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (Blue water footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำจากแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินที่ถูกใช้ในการปลูกพืช และ 3. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (Grey water footprint) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจางมลสารในน้ำเสียจากการปลูกพืชให้มีความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานกำหนด

การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศได้ทำการประเมินตามภาพที่ 1 มะเขือเทศที่ปลูกในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ มะเขือเทศบริโภค และมะเขือเทศโรงงาน สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ไม่ระบุชนิดของมะเขือเทศเนื่องจากข้อมูลพืช (Crop Data) ของมะเขือเทศที่ใช้ในการคำนวณค่าความต้องการใช้น้ำของพืชไม่ได้แยกชนิดหรือสายพันธุ์ และแบ่งการปลูกออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกปลูกในฤดูกาล นิยมปลูกตั้งแต่เดือนตุลาคมจนถึงเดือนกุมภาพันธ์ของปีถัดไป และ

ช่วงที่ 2 คือ การปลูกนอกฤดูกาล นิยมปลูกตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์จนถึงเดือนมิถุนายน [13] ลักษณะดินที่ปลูกเป็นดินร่วนปนทรายที่สามารถระบายน้ำได้ดี [9] การใส่ปุ๋ยจะใส่ทั้งหมด 4 ครั้ง ได้แก่ ระยะต้นกล้า ก่อนออกดอก ช่วงติดดอก และช่วงผลเริ่มโต โดยการปลูกในฤดูกาลใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 สูตร 46-0-0 และสูตร 13-13-21 จำนวน 100 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งเป็นปริมาณที่แนะนำให้ใช้กับการปลูกบนดินร่วนปนทราย ส่วนการปลูกนอกฤดูกาลจะใช้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 และสูตร 46-0-0 ในปริมาณเท่ากับปลูกในฤดูกาล แต่ปุ๋ยสูตร 13-13-21 จะใช้ในปริมาณที่มากกว่าการปลูกในฤดูกาลอีก 30 กิโลกรัมต่อไร่ ทั้งนี้เนื่องจากมะเขือเทศที่ปลูกนอกฤดูกาลต้องทนต่อสภาพอากาศที่อุณหภูมิสูงกว่าและเป็นการปลูกหลังจากทำการเก็บเกี่ยวผลผลิตของการปลูกในฤดูกาลซึ่งทำให้ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ของแร่ธาตุ [11]

การประเมินค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ครั้งนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CropWat 8.0 [14] ที่พัฒนาขึ้นโดยกองพัฒนาที่ดินและน้ำขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ โปรแกรมนี้ถูกพัฒนาดังแต่ปี พ.ศ. 2531 ได้รับความนิยมและใช้คำนวณหาการคายระเหยน้ำของพืชด้วยสมการ Penman-Monteith จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาความต้องการใช้น้ำของพืชและค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ตามลำดับ ส่วนการประเมินน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดใช้ข้อมูลค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหาคำนวณด้วยปริมาณการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทย วิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

1. การคำนวณค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศ

1.1 ค่าการคายระเหยน้ำของพืช (Evapotranspiration; ET) เป็นค่าการคายระเหยน้ำสะสมในพื้นที่เพาะปลูกตลอดช่วงอายุการเจริญเติบโตของพืช (Length of growing period; lgp) ค่า ET จะใช้โปรแกรม CropWat 8.0 ในการคำนวณและแสดงผลในหน่วยมิลลิเมตรคำนวณออกมาในรูปน้ำสีเขียว (ET_{green}) และน้ำสีน้ำเงิน (ET_{blue}) ใช้ข้อมูลทุติยภูมิซึ่งเป็นข้อมูลค่าเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละจังหวัดที่ปลูกมะเขือเทศ ประกอบด้วยข้อมูลสภาพอากาศ [15] ได้แก่ ค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด (องศาเซลเซียส) ความชื้นสัมพัทธ์ (%) ความเร็วลม (กิโลเมตรต่อวัน) ความยาวนานของแสงแดด (ชั่วโมง) และปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร) ข้อมูลพืชที่เกี่ยวข้องกับมะเขือเทศ [16] ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช (วัน) ความยาวของรากพืช (เมตร) ระดับการขาดน้ำของพืชที่ใกล้ถึงจุดเหี่ยวเฉา (%) ปัจจัยตอบสนองต่อการให้ผลผลิตพืช ความสูงของพืช (เมตร) และข้อมูลดิน [17] ได้แก่ ความชื้นที่เป็นประโยชน์ทั้งหมดในดิน (มิลลิเมตรต่อเมตร) อัตราการแทรกซึมน้ำผ่านดิน (มิลลิเมตรต่อวัน) ปริมาณความชื้นในดินที่เริ่มขาด (%) การหยั่งรากลึกในดินของพืช (เซนติเมตร)

1.2 ค่าความต้องการใช้น้ำของพืช (Crop Water Use; CWU) คำนวณได้จากค่าการคายระเหยน้ำสะสมในพื้นที่เพาะปลูกตลอดช่วงอายุการเจริญเติบโตของพืชซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม CropWat 8.0 จากข้อ 1.1 และค่า 1.6 เป็นค่าคงที่ในการเปลี่ยนหน่วยจากมิลลิเมตรเป็นลูกบาศก์เมตรต่อไร่ [18] การคำนวณค่าความต้องการใช้น้ำของพืชสีเขียวคำนวณได้ดังสมการที่ 1 และค่าความต้องการใช้น้ำของพืชสีน้ำเงินคำนวณได้ดังสมการที่ 2

$$CWU_{green} = 1.6 \sum_{d=1}^{lgp} ET_{green} \quad (1)$$

$$CWU_{blue} = 1.6 \sum_{d=1}^{lgp} ET_{blue} \quad (2)$$

โดย CWU_{green} และ CWU_{blue} คือ ค่าความต้องการใช้น้ำของพืชสีเขียวและสีน้ำเงิน (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)

ET_{green} และ ET_{blue} คือ ค่าการคายระเหยน้ำสีเขียวและสีน้ำเงิน (มิลลิเมตร)

1.3 ค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมด (Total water footprint) เป็นผลรวมปริมาณการใช้น้ำทั้งหมดในการปลูกพืชที่อยู่ในรูปน้ำสีเขียว สีน้ำเงิน และสีเทา โดยค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวคำนวณได้ดังสมการที่ 3 และค่าอวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินคำนวณได้ดังสมการที่ 4



$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (4)$$

โดย WF_{green} และ WF_{blue} คือ ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียวและสีน้ำเงิน (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

Y คือ ปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่ (ตันต่อไร่)

วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$WF_{Grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (5)$$

โดย WF_{grey} คือ ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

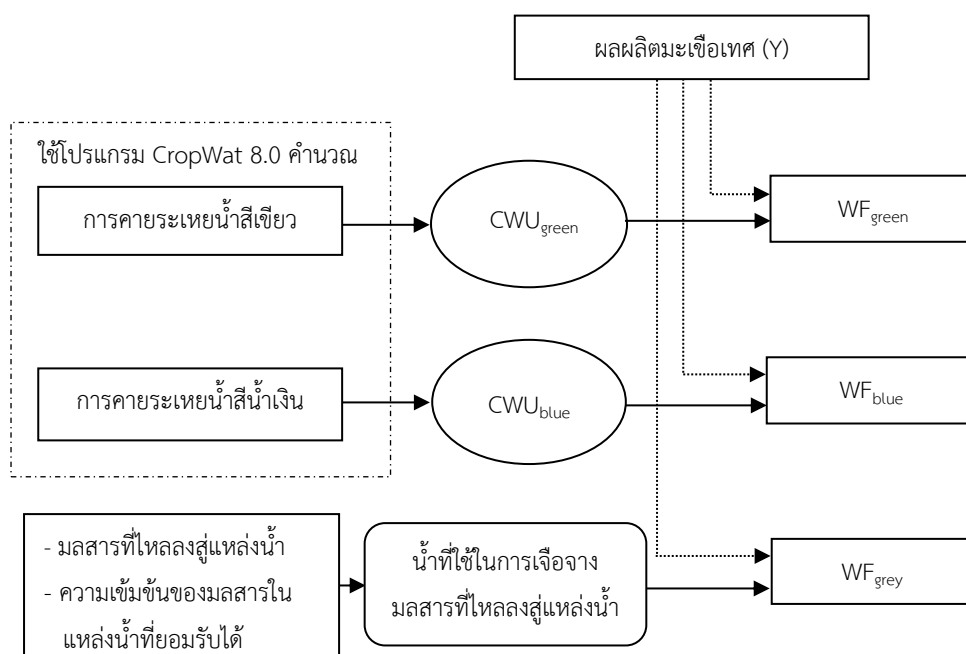
AR คือ อัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในพื้นที่เพาะปลูก (กิโลกรัมต่อไร่)

α คือ อัตราการชะล้างสารเคมีลงสู่แหล่งน้ำ งานวิจัยครั้งนี้คิดที่ร้อยละ 10 ของปริมาณการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในพื้นที่เพาะปลูก [19]

C_{max} คือ ค่าความเข้มข้นของมลสารในแหล่งน้ำผิวดินมากที่สุดที่ยอมรับได้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) งานวิจัยครั้งนี้ กำหนดค่ามาตรฐานความเข้มข้นของไนเตรทในหน่วยไนโตรเจนที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร [20]

C_{nat} คือ ค่าความเข้มข้นของมลสารตามธรรมชาติ งานวิจัยครั้งนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์ [21]

Y คือ ปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่ (ตันต่อไร่)



ภาพที่ 1 การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศ

2. การคำนวณค่าน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสด

น้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการส่งออก (Virtual Water Export; VW_{export}) คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่แฝงอยู่ในผลิตภัณฑ์ (ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตสินค้าเพื่อการส่งออก) ซึ่งเสมือนว่าน้ำได้ไหลออกนอกประเทศไปกับการส่งออกผลิตภัณฑ์



นั้นๆ ในการวิจัยครั้งนี้จึงหมายถึงปริมาณน้ำที่ใช้ในการผลิตมะเขือเทศเพื่อการส่งออก สามารถคำนวณค่าน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการส่งออกได้ดังสมการที่ 6

$$VW_{export} = CT_{export} \times WF_{product} \quad (6)$$

โดย VW_{export} คือ ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการส่งออก (ลูกบาศก์เมตรต่อปี)

CT_{export} คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ส่งออก (ตันต่อปี)

$WF_{product}$ คือ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

ทั้งนี้จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร [7] พบว่าประเทศไทยมีทั้งการส่งออกและนำเข้ามะเขือเทศเพื่อการบริโภคจึงต้องคำนวณค่าน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการนำเข้า (Virtual Water Import; VW_{import}) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7

$$VW_{import} = CT_{import} \times WF_{product} \quad (7)$$

โดย VW_{import} คือ ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการนำเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อปี)

CT_{import} คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่นำเข้า (ตันต่อปี)

$WF_{product}$ คือ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน)

นอกจากนี้ยังพบว่าประเทศไทยได้ส่งออกมะเขือเทศในปริมาณที่มากกว่าการนำเข้า ดังนั้นจึงคำนวณหาปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์สุทธิที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศ คำนวณได้ดังสมการที่ 8

$$VW_{net} = VW_{export} - VW_{import} \quad (8)$$

โดย VW_{net} คือ ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์สุทธิที่สัมพันธ์กับการส่งออก (ลูกบาศก์เมตรต่อปี)

ผลการวิจัย

1. ค่าความต้องการใช้น้ำของพืช

ค่าความต้องการใช้น้ำของพืช (CWU) สำหรับการปลูกมะเขือเทศทั้งในฤดูการและนอกฤดูการของประเทศไทยใช้โปรแกรม CropWat 8.0 ในการวิเคราะห์หาค่าการคายระเหยน้ำของพืช จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความต้องการใช้น้ำของพืชตามสมการที่ 1 และ 2 ค่าความต้องการใช้น้ำของพืชแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความต้องการน้ำของพืชรายจังหวัดของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563

จังหวัด	ค่า CWU ของการปลูกมะเขือเทศ ในฤดูการ (ลบ.ม.ต่อไร่)			ค่า CWU ของการปลูกมะเขือเทศ นอกฤดูการ (ลบ.ม.ต่อไร่)		
	สีเขียว	สีน้ำเงิน	รวม	สีเขียว	สีน้ำเงิน	รวม
ภาคเหนือ						
เชียงราย	50.40	579.04	629.44	219.52	737.28	956.80
เชียงใหม่	91.68	469.12	560.80	182.40	736.00	918.40
ตาก	93.12	544.32	637.44	179.04	847.20	1,026.24
พะเยา	93.28	486.72	580.00	251.36	754.08	1,005.44
เพชรบูรณ์	93.44	488.00	581.44	410.24	398.08	808.32
แม่ฮ่องสอน	194.88	318.08	512.96	243.84	606.40	850.24
ลำปาง	85.92	431.04	516.96	240.16	601.12	841.28



จังหวัด	ค่า CWU ของการปลูกมะเขือเทศ ในฤดูกาล (ลบ.ม.ต่อไร่)			ค่า CWU ของการปลูกมะเขือเทศ นอกฤดูกาล (ลบ.ม.ต่อไร่)		
	สีเขียว	สีน้ำเงิน	รวม	สีเขียว	สีน้ำเงิน	รวม
ลำพูน	111.36	420.64	532.00	223.36	717.44	940.80
อุทัยธานี	96.00	612.48	708.48	18.75	851.68	870.43
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ						
กาฬสินธุ์	113.60	594.08	707.68	256.00	636.32	892.32
ขอนแก่น	101.44	744.48	845.92	299.04	721.12	1,020.16
ชัยภูมิ	104.32	714.72	819.04	297.92	686.56	984.48
นครพนม	139.68	606.56	746.24	326.72	533.76	860.48
นครราชสีมา	87.52	670.72	758.24	273.44	756.16	1,029.60
บึงกาฬ	86.08	795.84	881.92	372.64	553.44	926.08
บุรีรัมย์	105.76	816.80	922.56	270.40	897.92	1,168.32
มุกดาหาร	95.84	638.08	733.92	217.28	751.68	968.96
ร้อยเอ็ด	102.08	702.40	804.48	256.32	793.60	1,049.92
เลย	83.68	589.28	672.96	268.48	698.40	966.88
ศรีสะเกษ	103.36	806.72	910.08	241.60	774.40	1,016.00
สกลนคร	133.92	554.88	688.80	363.52	541.60	905.12
หนองคาย	89.28	645.44	734.72	306.08	693.76	999.84
หนองบัวลำภู	82.40	666.56	748.96	299.52	692.64	992.16
อำนาจเจริญ	101.92	735.52	837.44	350.72	596.32	947.04
อุดรธานี	155.84	606.24	762.08	301.92	684.16	986.08
อุบลราชธานี	95.68	697.44	793.12	264.16	606.56	870.72
ภาคกลางและตะวันตก						
กาญจนบุรี	199.04	547.04	746.08	227.04	785.92	1,012.96
ชัยนาท	85.92	539.84	625.76	210.72	652.64	863.36
นครปฐม	180.96	515.52	696.48	198.08	717.60	915.68
ประจวบคีรีขันธ์	123.68	631.04	754.72	236.16	684.64	920.80
เพชรบุรี	144.64	725.76	870.40	106.88	1,022.56	1,129.44
ราชบุรี	125.44	646.08	771.52	234.24	708.32	942.56
ลพบุรี	92.16	707.52	799.68	211.52	843.68	1,055.20
สระบุรี	104.32	714.72	819.04	104.32	714.72	819.04
สุพรรณบุรี	101.76	658.08	759.84	137.92	814.40	952.32
ค่าเฉลี่ยทั้งประเทศ	110.01	617.74	727.75	245.75	708.92	954.67

ข้อมูลตารางที่ 1 ประเทศไทยสามารถปลูกมะเขือเทศได้เกือบทุกภูมิภาคยกเว้นภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ ข้อมูลค่าเฉลี่ย CWU รวมทั้งหมดของทั้งประเทศพบว่าการปลูกในฤดูกาล (727.75 ลบ.ม.ต่อไร่) มีค่าน้อยกว่าการปลูนอกฤดูกาล (954.67 ลบ.ม.ต่อไร่) เนื่องจากการปลูนอกฤดูกาลเป็นการปลูในช่วงฤดูร้อน (เริ่มปลูตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์เป็นต้นไป) จึงมีการคายระเหยน้ำในพื้นที่เพาะปลูมากกว่าการปลูในฤดูกาล (เริ่มปลูตั้งแต่เดือนตุลาคมเป็นต้นไป) เมื่อพิจารณารายภาค

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า CWU สีน้ำเงินทั้งการปลูในฤดูกาลและนอกฤดูกาลมีค่ามากกว่าน้ำสีเขียวเกือบทุกจังหวัด ยกเว้นการปลูนอกฤดูกาลของจังหวัดเพชรบูรณ์ที่มีค่า CWU สีน้ำเงินน้อยกว่าสีเขียว แสดงให้เห็นว่าการปลูมะเขือเทศนั้น



จำเป็นต้องใช้น้ำจากแหล่งผิวดินและใต้ดิน (น้ำสีน้ำเงิน) ในปริมาณที่สูงกว่าการใช้น้ำฝน (น้ำสีเขียว) หรือกล่าวได้ว่าปริมาณฝนที่ตกในพื้นที่ปลูกมะเขือเทศปี พ.ศ. 2563 ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืชจำเป็นต้องใช้น้ำจากแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินเพิ่ม ดังนั้นจึงควรมีการวางแผนการจัดสรรทรัพยากรน้ำโดยเฉพาะแหล่งน้ำสีน้ำเงินให้เพียงพอไม่ว่าจะเป็นการสูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติหรือระบบชลประทานเข้าสู่แปลงปลูกมะเขือเทศเพื่อให้พืชเจริญเติบโตได้ตามปกติและไม่เกิดการเหี่ยวเฉา หากเกษตรกรปลูกมะเขือเทศในพื้นที่ที่รองรับเฉพาะน้ำฝน ปริมาณน้ำที่ให้แก่พืชอาจไม่เพียงพอซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลผลิตมะเขือเทศได้

2. ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศ

การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดของการปลูกมะเขือเทศทั้งในฤดูกลางและนอกฤดูกลาง เป็นผลรวมของค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว สีน้ำเงิน และสีเทา คำนวณได้ตามสมการที่ 3, 4 และ 5 ผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลผลิตมะเขือเทศและค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศรายจังหวัดของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563

จังหวัด	ผลผลิต (ตันต่อไร่)	ค่า WF ของการปลูกมะเขือเทศ ในฤดูกาล (ลบ.ม.ต่อตัน)				ค่า WF ของการปลูกมะเขือเทศ นอกฤดูกาล (ลบ.ม.ต่อตัน)			
		สีเขียว	สีน้ำเงิน	สีเทา	รวม	สีเขียว	สีน้ำเงิน	สีเทา	รวม
ภาคเหนือ									
เชียงราย	2.43	20.74	238.29	144.13	403.16	90.34	303.41	176.25	570.00
เชียงใหม่	3.58	25.61	131.04	97.70	254.35	50.95	205.59	119.48	376.02
ตาก	3.91	23.82	139.21	89.48	252.51	45.79	216.68	109.43	371.90
พะเยา	3.05	30.58	159.58	114.86	305.02	82.41	247.24	140.46	470.11
เพชรบูรณ์	2.10	44.50	232.38	166.56	443.44	195.35	189.56	203.68	588.59
แม่ฮ่องสอน	3.53	55.21	90.11	99.18	244.50	69.08	171.78	121.29	362.15
ลำปาง	3.43	25.05	125.67	101.91	252.63	70.02	175.25	124.63	369.90
ลำพูน	2.31	48.21	182.10	151.67	381.98	96.69	310.58	185.47	592.74
อุทัยธานี	1.29	74.22	473.51	270.59	818.32	14.50	658.44	330.89	1,003.83
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ									
กาฬสินธุ์	3.18	35.76	186.99	110.16	332.91	80.58	200.28	134.71	415.57
ขอนแก่น	2.57	39.47	289.66	136.18	465.31	116.35	280.57	166.53	563.45
ชัยภูมิ	1.97	53.02	363.22	177.87	594.11	151.40	348.91	217.51	717.82
นครพนม	3.99	35.05	152.19	87.82	275.06	81.98	133.93	107.39	323.30
นครราชสีมา	2.67	32.73	250.86	130.90	414.49	102.27	282.81	160.08	545.16
บึงกาฬ	4.62	18.62	172.11	75.69	266.42	80.59	119.69	92.56	292.84
บุรีรัมย์	2.33	45.47	351.15	150.47	547.09	116.25	386.02	184.00	686.27
มุกดาหาร	3.04	31.49	209.63	114.99	356.11	71.38	246.95	140.61	458.94
ร้อยเอ็ด	2.95	34.58	237.94	118.56	391.08	86.83	268.84	144.99	500.66
เลย	2.10	39.82	280.43	166.56	486.81	127.77	332.36	203.68	663.81
ศรีสะเกษ	2.21	46.75	364.92	158.32	569.99	109.29	350.30	193.60	653.19
สกลนคร	4.14	32.38	134.18	84.63	251.19	87.90	130.96	103.49	322.35
หนองคาย	4.40	20.29	146.68	79.54	246.51	69.56	157.66	97.26	324.48
หนองบัวลำภู	2.35	35.03	283.35	148.78	467.16	127.32	294.43	181.94	603.69
อำนาจเจริญ	1.57	64.97	468.89	223.13	756.99	223.58	380.15	272.85	876.58
อุดรธานี	2.60	59.90	233.01	134.52	427.43	116.04	262.96	164.50	543.50



จังหวัด	ผลผลิต (ตันต่อไร่)	ค่า WF ของการปลูกมะเขือเทศ ในฤดูกลาง (ลบ.ม.ต่อตัน)				ค่า WF ของการปลูกมะเขือเทศ นอกฤดูกลาง (ลบ.ม.ต่อตัน)			
		สีเขียว	สีน้ำเงิน	สีเทา	รวม	สีเขียว	สีน้ำเงิน	สีเทา	รวม
อุบลราชธานี	2.46	38.87	283.34	142.19	464.40	107.32	246.42	173.88	527.62
ภาคกลางและตะวันตก									
กาญจนบุรี	2.77	71.75	197.21	126.18	395.14	81.85	283.33	154.30	519.48
ชัยนาท	1.78	48.20	302.84	196.34	547.38	118.21	366.12	240.10	724.43
นครปฐม	2.96	61.19	174.31	118.35	353.85	66.98	242.64	144.72	454.34
ประจวบคีรีขันธ์	2.48	49.77	253.96	140.85	444.58	95.04	275.53	172.25	542.82
เพชรบุรี	2.70	53.63	269.08	129.76	452.47	39.63	379.12	158.68	577.43
ราชบุรี	2.70	46.53	239.65	129.82	416.00	86.89	262.73	158.76	508.38
ลพบุรี	3.19	28.91	221.97	109.80	360.68	66.36	264.68	134.27	465.31
สระบุรี	3.92	53.02	363.22	89.38	505.62	53.02	363.22	109.30	525.54
สุพรรณบุรี	2.42	42.08	272.14	144.74	458.96	57.03	336.78	176.99	570.80
ค่าเฉลี่ยทั่วประเทศ	-	46.34	238.57	134.09	419.00	94.42	275.86	163.97	534.24
ค่าเฉลี่ยทั่วประเทศ WF รวมในฤดูกลางและนอกฤดูกลาง						476.62			

ข้อมูลตารางที่ 2 พบว่าค่าเฉลี่ย WF รวมทั้งหมดทั้งประเทศของการปลูกมะเขือเทศในฤดูกลาง (419.00 ลบ.ม.ต่อตัน) มีค่าน้อยกว่าการปลูกนอกฤดูกลาง (534.24 ลบ.ม.ต่อตัน) เมื่อพิจารณาารายภาคของการปลูกในฤดูกลางพบว่าจังหวัดในภาคเหนือที่มีค่า WF รวมทั้งหมดมากที่สุดคือ อุทัยธานี (818.32 ลบ.ม.ต่อตัน) และจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ แม่ฮ่องสอน (244.50 ลบ.ม.ต่อตัน) จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีค่า WF รวมทั้งหมดมากที่สุดคือ อำนาจเจริญ (756.99 ลบ.ม.ต่อตัน) และจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ หนองคาย (246.51 ลบ.ม.ต่อตัน) จังหวัดในภาคกลางและตะวันตกที่มีค่า WF รวมทั้งหมดมากที่สุดคือ ชัยนาท (547.38 ลบ.ม.ต่อตัน) และจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ นครปฐม (353.85 ลบ.ม.ต่อตัน) ส่วนผลการศึกษาของการปลูกนอกฤดูกลางพบว่า จังหวัดในภาคเหนือที่มีค่า WF รวมทั้งหมดมากที่สุดคือ อุทัยธานี (1,003.83 ลบ.ม.ต่อตัน) และจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ แม่ฮ่องสอน (362.15 ลบ.ม.ต่อตัน) จังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีค่า WF รวมทั้งหมดมากที่สุดคือ อำนาจเจริญ (876.58 ลบ.ม.ต่อตัน) และจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ บึงกาฬ (292.84 ลบ.ม.ต่อตัน) จังหวัดในภาคกลางและตะวันตกที่มีค่า WF รวมทั้งหมดมากที่สุดคือ ชัยนาท (724.43 ลบ.ม.ต่อตัน) และจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ นครปฐม (454.34 ลบ.ม.ต่อตัน) ซึ่งจังหวัดที่มีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มากที่สุด เช่น อุทัยธานี และอำนาจเจริญ จะพบว่ามีค่าผลผลิตมะเขือเทศ (ตันต่อไร่) ในปริมาณที่น้อยมากในขณะที่ค่าความต้องการใช้น้ำของพืช (ลบ.ม.ต่อไร่) ตามตารางที่ 1 มีค่าสูงมากจึงส่งผลให้ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ (ลบ.ม.ต่อตัน) มีค่าสูงมากตามไปด้วย ดังนั้นหากมีการส่งเสริมให้เกษตรกรสามารถเพิ่มผลผลิตมะเขือเทศในปริมาณที่สูงขึ้นจะสามารถลดค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ลงได้

ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์จำแนกรายประเภทพบว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงินมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือสีเทา และสีเขียว ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปลูกมะเขือเทศของประเทศไทยมีความต้องการใช้น้ำจากแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินมากที่สุด รองลงมาคือน้ำที่ใช้ในการเจือจางมลสารหรือน้ำเสียที่เกิดจากการเพาะปลูกแล้วไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (ปริมาณของเสียคิดที่ร้อยละ 10 ของการใช้น้ำในโตรเจนทั้งหมด) เพื่อให้แหล่งน้ำนั้นมีค่ามลสารไม่เกินค่ามาตรฐานกำหนด การศึกษาค้นคว้านี้เทียบค่ามาตรฐานของแหล่งน้ำผิวดินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) เรื่องกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ที่ได้กำหนดให้ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในหน่วยไนโตรเจนที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเจือจางมลสารที่เข้มข้นที่สุดคือปุ๋ยไนโตรเจนจะถือว่าปริมาณน้ำที่สามารถเจือจางมลสารชนิดอื่นคือปุ๋ยฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมไปพร้อมกันด้วย และสุดท้ายมีการใช้น้ำฝนในปริมาณน้อยที่สุด



3. ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสด

การประเมินปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563 จำนวนตามสมการที่ 6, 7 และ 8 โดยค่าตัวแปรฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ ใช้ค่าเฉลี่ยตัวแปรฟุตพริ้นท์รวมทั้งหมดของการปลูกในฤดูกาลและนอกฤดูกาล (476.62 ลบ.ม.ต่อตัน) เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณ เนื่องจากข้อมูลปริมาณการส่งออกมะเขือเทศสด [7] เป็นข้อมูลการส่งออกรวมทั้งประเทศซึ่งไม่สามารถคำนวณแยกการส่งออกมะเขือเทศสดจากการปลูกในฤดูกาลหรือนอกฤดูกาลได้ ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการส่งออก (VW_{export}) และปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการนำเข้ามะเขือเทศสดแสดงดังตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ปริมาณการส่งออกและปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563

ประเทศ	ปริมาณการส่งออก (ตันต่อปี)	VW_{export} (ลบ.ม.ต่อปี)
กัมพูชา	55.07	26,247.59
มาเลเซีย	234.98	111,994.81
ลาว	83.92	39,996.72
สิงคโปร์	340.25	162,168.84
ฮ่องกง	3.33	1,585.25
เมียนมาร์	319.93	152,486.74
รวม	1,037.48	494,479.95

ข้อมูลตารางที่ 3 ประเทศไทยส่งออกมะเขือเทศสดทั้งสิ้น 1,037.48 ตัน โดยส่งไปยังประเทศสิงคโปร์ มากที่สุด (340.25 ตันต่อปี) รองลงมาคือเมียนมาร์ (319.93 ตันต่อปี) และมาเลเซีย (234.98 ตันต่อปี) ตามลำดับ ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการส่งออกมะเขือเทศสดพบว่ามีค่าทั้งหมดเท่ากับ 494,479.95 ลบ.ม.ต่อปี ซึ่งน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์นี้ได้ไหลออกไปยังประเทศสิงคโปร์เท่ากับ 162,168.84 ลบ.ม.ต่อปี ประเทศเมียนมาร์เท่ากับ 152,486.74 ลบ.ม.ต่อปี และประเทศมาเลเซียเท่ากับ 111,994.81 ลบ.ม.ต่อปี

ตารางที่ 4 ปริมาณการนำเข้าและปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการนำเข้ามะเขือเทศสดของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563

ประเทศ	ปริมาณการนำเข้า (ตันต่อปี)	VW_{import} (ลบ.ม.ต่อปี)
นิวซีแลนด์	10.43	4,970.69
สาธารณรัฐประชาชนจีน	683.60	325,816.65
รวม	694.03	330,787.34

ข้อมูลตารางที่ 4 ประเทศไทยนำเข้ามะเขือเทศทั้งสิ้น 694.03 ตัน โดยนำเข้าจากประเทศจีน (683.60 ตันต่อปี) และประเทศนิวซีแลนด์ (10.43 ตันต่อปี) ปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ของการนำเข้ามะเขือเทศสดเท่ากับ 330,787.34 ลบ.ม.ต่อปี ดังนั้นปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์สุทธิที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดมีค่าเท่ากับ 163,692.61 ลบ.ม.ต่อปี ซึ่งข้อมูลดังกล่าวแสดงถึงการส่งออกมะเขือเทศสดของประเทศไทยเกิดการไหลของน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ออกนอกประเทศพร้อมกับการส่งออก โดยน้ำถือเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่าต่อประชาชนในประเทศ หากในปีที่ประเทศผู้ส่งออกประสบภัยแล้งหรือมีปริมาณน้ำใช้ภายในประเทศน้อยอาจจำเป็นต้องวางแผนการผลิตสินค้าทางการเกษตรเพื่อการส่งออกในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นต่อการบริโภคน้ำภายในประเทศ

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การปลูกมะเขือเทศของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563 พบว่าค่าเฉลี่ยความต้องการใช้น้ำของพืชรวมทั้งหมดของการปลูกในฤดูกาล (727.75 ลบ.ม.ต่อไร่) มีค่าน้อยกว่าการปลูกนอกฤดูกาล (954.67 ลบ.ม.ต่อไร่) โดยการปลูกในฤดูกาลจังหวัดที่มีค่า



น้อยที่สุดคือ แม่ฮ่องสอน (512.96 ลบ.ม.ต่อไร่) รองลงมาคือ ลำปาง (516.96 ลบ.ม.ต่อไร่) ลำพูน (516.96 ลบ.ม.ต่อไร่) และ เชียงใหม่ (560.80 ลบ.ม.ต่อไร่) ตามลำดับ การปลูกนอกฤดูกาลจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ เพชรบูรณ์ (808.32 ลบ.ม.ต่อไร่) รองลงมาคือ สระบุรี (819 ลบ.ม.ต่อไร่) ลำปาง (841.28 ลบ.ม.ต่อไร่) และแม่ฮ่องสอน (850.24 ลบ.ม.ต่อไร่) ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยของต้นทุนทั้งหมดของการปลูกมะเขือเทศพบว่าการปลูกในฤดูกาล (419.00 ลบ.ม.ต่อตัน) มีค่าน้อยกว่า การปลูกนอกฤดูกาล (534.24 ลบ.ม.ต่อตัน) โดยการปลูกในฤดูกาลจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดของคือ แม่ฮ่องสอน (244.50 ลบ.ม.ต่อตัน) รองลงมาได้แก่ หนองคาย (246.51 ลบ.ม.ต่อตัน) สกลนคร (251.91 ลบ.ม.ต่อตัน) และตาก (252.51 ลบ.ม.ต่อตัน) ตามลำดับ การปลูกนอกฤดูกาลจังหวัดที่มีค่าน้อยที่สุดคือ บึงกาฬ (292.84 ลบ.ม.ต่อตัน) รองลงมาคือ สกลนคร (322.35 ลบ.ม.ต่อตัน) นครพนม (323.30 ลบ.ม.ต่อตัน) และหนองคาย (324.48 ลบ.ม.ต่อตัน) ตามลำดับ

ความต้องการใช้น้ำของพืชจำแนกรายประเภททั้งการปลูกในฤดูกาลและนอกฤดูกาลพบว่า น้ำสีน้ำเงินมีค่ามากกว่า สีเขียว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการปลูกมะเขือเทศจำเป็นต้องใช้น้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินในปริมาณที่มากกว่า การใช้น้ำฝน และช่วงเวลาปลูกมะเขือเทศเป็นช่วงที่พื้นที่เพาะปลูกได้รับน้ำฝนในปริมาณที่น้อยไม่เพียงพอต่อความต้องการของ พืชจึงจำเป็นต้องได้รับน้ำจากระบบชลประทานหรือการสูบน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเข้ามาในแปลงปลูกเพื่อให้มะเขือเทศ เจริญเติบโตได้ตามปกติโดยไม่เกิดการเหี่ยวเฉา และสิ่งสำคัญคือการให้น้ำแก่พืชในปริมาณที่มากกว่าค่าความต้องการใช้น้ำของ พืชอาจเป็นการสูญเสียโดยเปล่าประโยชน์ ส่วนของต้นทุนการปลูกในฤดูกาลและนอกฤดูกาล พบว่าของต้นทุนที่สีน้ำเงินมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ สีเทา และสีเขียว ตามลำดับ สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าความ ต้องการใช้น้ำของพืชที่พบว่าสีน้ำเงินมีค่ามากที่สุด แสดงให้เห็นว่าการปลูกมะเขือเทศอาจต้องมีค่าใช้จ่ายจากการสูบน้ำและ นำน้ำจากระบบชลประทานหรือจากแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดินเข้ามาในแปลงปลูกจึงเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตได้ รวมถึง การใช้น้ำจากแหล่งน้ำสีน้ำเงินในปริมาณมากอาจส่งผลกระทบต่อการจัดสรรปันส่วนน้ำอย่างเป็นธรรมเพื่อการเกษตรสำหรับพืชชนิด อื่นๆ ที่ปลูกในช่วงเวลาเดียวกันได้ ส่วนปริมาณน้ำสีเทาพบว่าการปลูกในฤดูกาล (134.09 ลบ.ม.ต่อตัน) มีค่าน้อยกว่าการปลูก นอกฤดูกาล (163.97 ลบ.ม.ต่อตัน) เนื่องจากมีการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในปริมาณที่น้อยกว่า และการศึกษาครั้งนี้เป็นการปลูก มะเขือเทศบนดินร่วนปนทรายซึ่งเป็นตัวแทนชนิดของดินทั่วประเทศ ทั้งนี้การปลูกมะเขือเทศสามารถปลูกบนดินชนิดอื่นได้ เช่น ดินร่วนปนดินเหนียว ดังนั้นพื้นที่เพาะปลูกที่เป็นดินร่วนปนดินเหนียวจึงมีการใส่ปุ๋ยในปริมาณที่แตกต่างและส่งผลให้ ค่าของต้นทุนที่สีเทาแตกต่างจากการศึกษานี้ได้

จังหวัดที่มีค่าของต้นทุนที่รวมทั้งหมดน้อยที่สุด เช่น แม่ฮ่องสอน หนองคาย สกลนคร และตาก ควรได้รับการ ส่งเสริมให้มีการปลูกมะเขือเทศในฤดูกาลเนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีการใช้น้ำในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับผลผลิตที่เกิดขึ้นจึงเกิดความ คุ่มค่าทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ หรืออาจพิจารณาร่วมเลือกส่งเสริมการปลูกในพื้นที่ที่มีการใช้น้ำสีน้ำเงิน น้อยเพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิตเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยจังหวัดที่มีค่าของต้นทุนที่สีน้ำเงินน้อยที่สุด คือได้แก่ แม่ฮ่องสอน (90.11 ลบ.ม.ต่อตัน) รองลงมาคือลำปาง (125.67 ลบ.ม.ต่อตัน) เชียงใหม่ (131.04 ลบ.ม.ต่อตัน) และ สกลนคร (134.18 ลบ.ม.ต่อตัน) นอกจากนี้ กรุง สีตะธนี [22] ได้กล่าวว่าพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการปลูกมะเขือเทศให้ได้ผลผลิต ที่ดีควรปลูกบนพื้นที่สูงและมีอากาศเย็นโดยเฉพาะในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งสอดคล้องกับจากผล การศึกษานี้ที่พบว่าจังหวัดที่มีค่าของต้นทุนที่น้อย (แม่ฮ่องสอน หนองคาย สกลนคร และตาก) เป็นจังหวัดที่มีพื้นที่สูง และมีอากาศค่อนข้างเย็นจึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมที่จะได้รับการส่งเสริมให้มีการปลูกมะเขือเทศ และธงไชย โรหิตะดิษฐ์ ศรีนพคุณ [23] ได้กล่าวถึงการศึกษาที่จะช่วยลดค่าของต้นทุนที่ลงได้นั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มผลผลิต (หน่วย ต้นต่อไร่) ให้สูงมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ค่าเฉลี่ยของการใช้น้ำ (หน่วย ลบ.ม.ต่อตัน) ลดลงได้ ส่วนการปลูกมะเขือเทศนอกฤดูกาลนั้นสามารถ กระทำได้โดยพิจารณาส่งเสริมให้ปลูกในจังหวัดที่มีค่าของต้นทุนที่นอกฤดูกาลน้อย เช่น บึงกาฬ สกลนคร นครพนม และ หนองคาย เป็นต้น

ค่าของต้นทุนของการปลูกมะเขือเทศในแต่ละจังหวัดมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากในแต่ละพื้นที่มีสภาพอากาศ (อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลม ความยาวนานของแสงแดด) ปริมาณน้ำฝน และผลผลิตต่อไร่ที่แตกต่างกัน และผลการศึกษา



ค่าวอเตอร์พวพรินท์ของการปลูกมะเขือเทศในต่างประเทศพบว่าบริเวณพื้นที่ลุ่มแม่น้ำ Pinios ตอนกลางของประเทศกรีซ [24] มีค่าวอเตอร์พวพรินท์อยู่ระหว่าง 37-131 ลบ.ม.ต่อตัน รวมไปถึงผลการศึกษาศึกษาการปลูกมะเขือเทศของประเทศออสเตรเลีย [25] มีค่าวอเตอร์พวพรินท์เท่ากับ 212.24 ลบ.ม.ต่อตัน ซึ่งแตกต่างจากผลการศึกษาของประเทศไทยที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 476.62 ลบ.ม.ต่อตัน ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของทวีปที่มีผลต่อสภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน ชนิดและคุณภาพของดินปลูกที่แตกต่างกันจึงมีผลให้ค่าวอเตอร์พวพรินท์แตกต่างกันไปด้วย

ประเทศไทยปลูกมะเขือเทศเพื่อบริโภคภายในประเทศเป็นหลัก หากเหลือจากการบริโภคจึงนำไปจำหน่ายยังต่างประเทศ ซึ่งพบว่ามีการส่งออกมะเขือเทศสดในปริมาณไม่สูงมากนักและส่งออกไปยังประเทศเพื่อนบ้านเป็นหลัก ดังนั้นปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์สุทธิที่สัมพันธ์กับการส่งออกมะเขือเทศสดจึงยังมีค่าไม่สูงมากนัก (163,692.61 ลบ.ม./ปี) ทั้งนี้การประเมินปริมาณน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ยังแสดงถึงการใช้น้ำเพื่อการผลิตสินค้าและบริการเพื่อการส่งออกไปยังต่างประเทศเกิดภาพการไหลของน้ำออกจากประเทศผู้ผลิตสินค้าไปยังประเทศผู้นำเข้าสินค้า หากน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ไหลไปยังประเทศที่ขาดแคลนน้ำใช้ก็จะเกิดผลดีต่อประเทศผู้นำเข้าสินค้าซึ่งเป็นการลดการใช้น้ำเพื่อการผลิตของตน สำหรับประเทศผู้ส่งออกจำเป็นต้องมีการวางแผนปริมาณการส่งออกให้เหมาะสม เนื่องจากการไหลของน้ำเสมือนผลิตภัณฑ์ออกนอกประเทศในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์น้ำของประชาชนภายในประเทศผู้ส่งออกได้โดยเฉพาะในปีที่เกิดการขาดแคลนน้ำหรือเกิดภัยแล้ง การประเมินวอเตอร์พวพรินท์ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญต่อการจัดสรรทรัพยากรน้ำอย่างเหมาะสมและเป็นธรรม เกิดประโยชน์ต่อการวางแผนการจําจัดรูปแบบการเพาะปลูกพืชที่หลากหลายชนิดในพื้นที่เดียวกันและในเวลาเดียวกันได้อย่างเหมาะสม การเลือกชนิดพืชที่ปลูกบนพื้นที่เขตรองรับทั้งน้ำฝนและน้ำชลประทานหรือเขตรองรับเฉพาะน้ำฝนได้อย่างเหมาะสมเพื่อให้ผลผลิตที่ดี คุ่มค่าทั้งในด้านเศรษฐศาสตร์และด้านทรัพยากรธรรมชาติ และไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้ในภาคส่วนอื่น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ 2565

เอกสารอ้างอิง

1. Sainju UM, Dris R, Singh B. Mineral nutrition of tomato. J Food Agric Environ 2003;1(2):176-83.
2. วันดี ทาตระกูล, วิภา หอมหวล, สนธยา นุ่มท้วม, รังสรรค์ เจริญสุข. การพัฒนาวัตถุดิบอาหารสัตว์แหล่งพลังงานจากกากมะเขือเทศและมันสำปะหลัง. พืชโลก: คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2557.
3. Haraira A, Mazhar HS, Ahmad A, Khalid MN, Tariq M, Nazir S, et al. Enhancing health benefits of tomato by increasing its antioxidant contents through different techniques: A review. Adv Life Sci 2022;9(2):131-42.
4. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Crops and livestock products. [Internet]. 2020 [cited 2024 Feb 23]. Available from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
5. กรมส่งเสริมการเกษตร. มะเขือเทศ ปี พ.ศ. 2563. [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 23 ก.พ. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.agriman.doae.go.th/home/news/2565/23potato.pdf>
6. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. มะเขือเทศ: ผลผลิต พื้นที่ปลูก ปี พ.ศ. 2563. [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 3 พ.ย. 2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/tomato%2063.pdf>



7. ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. มะเขือเทศ: ฐานข้อมูลปริมาณการส่งออกและนำเข้า ปีพ.ศ. 2563. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร; 2565.
8. กรุง สีตะธนี. การปลูกมะเขือเทศ: เอกสารเผยแพร่ อันดับที่ 70. นครปฐม: สถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน ศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; 2543.
9. สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 3. เทคโนโลยีการผลิตมะเขือเทศแบบผสมผสาน. [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 26 ก.พ. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.doa.go.th/share/showthread.php?tid=2440>
10. สมภพ ฐิตะวสันต์. การปลูกมะเขือเทศนอกฤดู. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 2526;1:40-9.
11. มนัสวี พานิชนอก, ภัทรนัย ไชยพรม. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของการปลูกมะเขือเทศโรงงานในจังหวัดลำปาง. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ครั้งที่ 4 วันที่ 28 สิงหาคม 2563. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา. ชลบุรี; 2563. หน้า 61-70.
12. Hoekstra AJ, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen M. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. London: Earthscan; 2011.
13. มูลนิธิโครงการหลวง. คู่มือการปลูกผักบนพื้นที่สูง. เชียงใหม่: สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน); 2557.
14. Land and Water Development. Software CropWat 8.0. Food and Agriculture Organization of the United Nations [Internet]. 2023 [cited 2023 Mar 7]. Available from: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>
15. กรมอุตุนิยมวิทยา. ฐานข้อมูลสภาพอากาศและปริมาณน้ำฝน ปี พ.ศ. 2563. กรุงเทพฯ: กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม; 2023.
16. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration, irrigation and drainage paper, No. 56. Rome: Development and Management Service; 2006.
17. สมปอง นิลพันธ์. การศึกษาปริมาณน้ำที่พืชใช้ประโยชน์ได้ ของชุดดินต่าง ๆ ในประเทศไทย เพื่อกำหนดระยะเวลาและปริมาณการให้น้ำแก่พืช. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน; 2553.
18. ทิพย์ภา สุขุมลชาติ, อติชัย พรพรมหมินทร์, สุรัชย์ ลิขวัฒนาการ. วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของชาวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย. วิศวกรรมสาร มช. 2556;40(1):67-78.
19. Franke NA, Boyacioglu H, Hoekstra AY. Grey water footprint accounting - tier 1 supporting guidelines: Value of water research report series, No. 65. Delft: UNESCO-IHE; 2013.
20. คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. ราชกิจจานุเบกษา [อินเทอร์เน็ต]. 2537 [เข้าถึงเมื่อ 3 พ.ย. 2565]. เข้าถึงได้จาก: <https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/1650004.pdf>
21. Mekonnen MM, Hoekstra AY. (2011). The green, blue, and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrol Earth Syst Sc 2011;15(5):1577-2011.
22. กรุง สีตะธนี. สภาพแวดล้อมและการปลูกมะเขือเทศในฤดูกาลต่างๆ. นครปฐม: สถาบันวิจัยและพัฒนากำแพงแสน ศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน; 2554.
23. ธงไชย โรหิตะดิษฐ ศรีนพคุณ. การประเมินวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ปาล์มน้ำมัน ไบโอดีเซล และผลิตภัณฑ์ยางพารา. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2560.
24. Evangelou E, Tsadilas C, Tserlikakis N, Tsiouras A, Kyritsis A. Water footprint of industrial tomato cultivations in the Pinios river basin: soil properties interactions. Water 2016;8(11):515
25. Iqbal H, Imteaz MA, Khastagir A. Water footprint: applying the water footprint assessment method to Australian agriculture. J Sci Food Agric 2021;101(10):4090-8.



การเปรียบเทียบการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยโดยตัวแบบ ARIMA และ ARIMAX

A comparison of Consumer Price Index Forecasting using ARIMA and ARIMAX Model

กานต์ณัฐ ณ บางช้าง* และ วันอากีฟ วันยะฟาร์

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Kannat Na Bangchang* and Wanarkif Wanyafar

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Pathumthani 12120

*Corresponding author: kannat@mathstat.sci.tu.ac.th

Received: 23 May 2024/ Revised: 3 September 2024/ Accepted: 10 September 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคจากตัวแบบ ARIMA และตัวแบบ ARIMAX โดยผลการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจกำหนดนโยบายการเงินและการคลัง การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาแบบรายเดือนตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2553 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565 โดยตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวแบบ ARIMAX ได้แก่ ดัชนีแลกเปลี่ยนเงินบาทที่แท้จริง อัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ดัชนีค่าปลีกของประเทศไทย ดัชนีค่าส่งของประเทศไทย และอัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย โดยผลการศึกษาตามวัตถุประสงค์สามารถอธิบายได้โดยการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) และ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) เพื่อหาตัวแบบที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด และยังทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Squared) เพื่ออธิบายประสิทธิภาพในการพยากรณ์อีกด้วย ผลจากการศึกษาพบว่าตัวแบบที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ ตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) ที่มีดัชนีค่าส่งของประเทศไทยเป็นตัวแปรอิสระในการพยากรณ์ ซึ่งให้ค่า MAD, MSE, MAPE (%) และ R-Squared (%) เท่ากับ 0.4216, 0.3435, 0.4166 % และ 84.1019 % ตามลำดับ

คำสำคัญ: การพยากรณ์ ดัชนีราคาผู้บริโภค ตัวแบบ ARIMA ตัวแบบ ARIMAX



Abstract

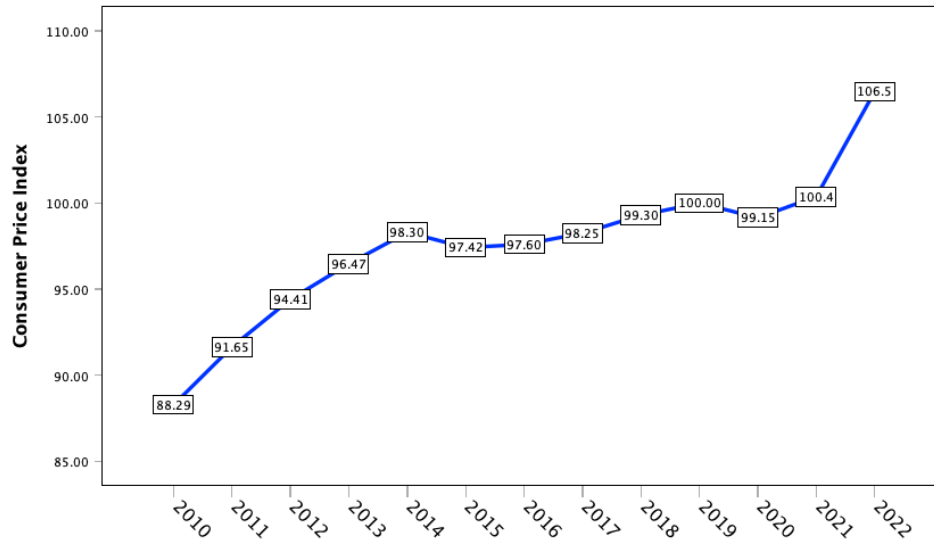
This research aims to study and consider the efficiency of forecasting the Consumer Price Index from the ARIMA model and the ARIMAX model. The Consumer Price Index forecast results can be used as information for deciding monetary and fiscal policy. This research study uses monthly time series data from 1 January 2010 to 31 December 2022. In addition, independent variables are included in the ARIMAX model analysis including Real Effective Exchange Rate, Unemployment Rate, Import Price Index, Export Price Index, and Policy Interest Rate. The criterion for comparison contained Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Square Error (MSE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Moreover, R-squared was used for consideration. The results of the study found that the ARIMA model that was most appropriate was the ARIMAX(2,1,(1,11)) model with the Export Price Index as the independent variable in forecasting, which gave MAD, MSE, MAPE (%) and R-squared (%) values equal 0.4216, 0.3435, 0.4166 % and 84.1019 % respectively.

Keywords: Forecasting, Consumer Price Index, ARIMA model, ARIMAX model

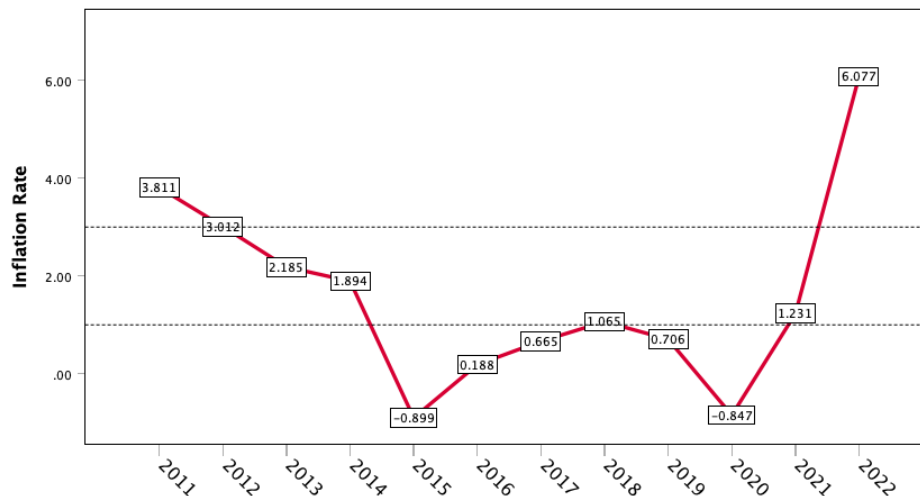
บทนำ

ดัชนีราคาผู้บริโภค (Consumer Price Index: CPI) เป็นดัชนีวัดระดับราคาสินค้าและบริการที่ผู้บริโภคมีการใช้จ่าย รวมถึงเป็นตัวชี้วัดอัตราเงินเฟ้อของประเทศ ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราเงินเฟ้อสะท้อนให้เห็นถึงสภาพเศรษฐกิจ ณ ช่วงเวลานั้น โดยสภาพเศรษฐกิจที่มีอัตราเงินเฟ้อในระดับต่ำและคงที่ จะส่งผลดีในการช่วยลดความรุนแรงของภาวะถดถอยทางเศรษฐกิจ แต่ถ้าหากสภาพเศรษฐกิจมีอัตราเงินเฟ้อที่สูงเกินไปอาจส่งผลเสีย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวม เช่น ลดความอยู่ดีกินดีของประชาชน เพิ่มภาระหนี้ครัวเรือน และลดความสามารถในการแข่งขันของภาคธุรกิจ โดยธนาคารแห่งประเทศไทยได้กำหนดให้อัตราเงินเฟ้อทั่วไปในช่วงร้อยละ 1-3 เป็นเป้าหมายนโยบายการเงินด้านเสถียรภาพราคาสำหรับระยะปานกลาง [1] จากปี ค.ศ. 2010 ถึงปี ค.ศ. 2022 แสดงดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2 ดัชนีราคาผู้บริโภคและอัตราเงินเฟ้อมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงตาม ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยในปี ค.ศ. 2022 จะเห็นได้ว่ามีอัตราเงินเฟ้อที่สูง ซึ่งอยู่นอกกรอบเป้าหมายของธนาคารแห่งประเทศไทยและอาจส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมได้ ความสามารถในการประเมินสภาพเศรษฐกิจ และการคาดการณ์อัตราเงินเฟ้อในอนาคต จึงมีความสำคัญในการรักษาเสถียรภาพทางเศรษฐกิจของประเทศ

การพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคจึงมีความสำคัญต่อภาครัฐและภาคเอกชน โดยภาครัฐสามารถใช้ข้อมูลการพยากรณ์เพื่อกำหนดนโยบายเศรษฐกิจ เช่น อัตราดอกเบี้ยนโยบาย มาตรการกระตุ้นเศรษฐกิจ และมาตรการควบคุมราคาสินค้า ส่วนภาคเอกชนสามารถใช้ข้อมูลการพยากรณ์เพื่อวางแผนการลงทุน และกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาด โดยการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคสามารถทำได้โดยใช้ตัวแบบทางสถิติต่างๆ เช่น ตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) ตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables (ARIMAX) และตัวแบบ Vector Autoregression (VAR) โดยตัวแบบเหล่านี้จะพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อราคาสินค้าและบริการ ได้แก่ ปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจ เช่น อัตราดอกเบี้ย ผลผลิตมวลรวมในประเทศ (GDP) และปริมาณเงินในระบบเศรษฐกิจ ปัจจัยทางด้านนโยบาย เช่น มาตรการควบคุมราคาสินค้า และปัจจัยทางด้านสภาพอากาศ ซึ่งการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคมีความท้าทาย เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลต่อราคาสินค้าและบริการมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้การพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคในระยะยาวก็มีความยากลำบาก และบริการในระยะยาวมีความซับซ้อน ดังนั้นการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคจึงมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากช่วยให้ภาครัฐและภาคเอกชนสามารถเตรียมพร้อมรับมือกับผลกระทบจากอัตราเงินเฟ้อที่อาจเกิดขึ้นได้



ภาพที่ 1 ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 – 2022



ภาพที่ 2 อัตราเงินเฟ้อของประเทศไทยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2011 - 2022

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ส่งผลต่อดัชนีราคาผู้บริโภคพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อดัชนีราคาผู้บริโภค คือ อัตราแลกเปลี่ยนเงิน และปริมาณเงินในความหมายกว้าง มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับดัชนีราคาผู้บริโภค อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 [2] นอกจากนี้ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย โดยใช้ตัวแบบ SARIMA และตัวแบบการถดถอยที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแบบ ARMA พบว่าตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด คือตัวแบบ ARMA(2,(6,20)) เมื่อวัดด้วยค่า MAPE ต่ำสุดเท่ากับ 1.7898 % [3] นอกจากนี้ยังมีผู้วิจัยที่ทำการศึกษาโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ตัวแบบ ARIMA ในการพยากรณ์เปรียบเทียบกับตัวแบบอื่น ได้แก่ พยากรณ์ภาวะเจริญพันธุ์ในประเทศไนจีเรียโดยใช้ตัวแบบ ARIMA และ ARIMAX [4] พยากรณ์อัตราการว่างงานในประเทศกานาโดยใช้ตัวแบบ VAR, ARIMA และ ARIMAX [5] และพยากรณ์จำนวนผู้ติดเชื้อโควิด 19 ในประเทศอินโดนีเซีย โดยใช้ตัวแบบ ARIMA และ ARIMAX [6]



ผู้วิจัยจึงสนใจและต้องการที่จะเปรียบเทียบตัวแบบ ARIMA และตัวแบบ ARIMAX โดยใช้ตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยเพื่อเป็นตัวช่วยในการกำหนดนโยบายเศรษฐกิจ และออกแบบกลยุทธ์ในการป้องกันความเสี่ยงจากอัตราเงินเฟ้อที่อาจส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจในประเทศ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเพื่อเปรียบเทียบตัวแบบการพยากรณ์อนุกรมเวลา มีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

การรวบรวมข้อมูล

การวิจัยครั้งนี้ได้เก็บรวบรวมมาจากเว็บไซต์ธนาคารแห่งประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรตาม คือ ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย และตัวแปรอิสระ 5 ตัวแปร ได้แก่ ดัชนีเงินบาทที่แท้จริง อัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ดัชนีค่าปลิกของประเทศไทย ดัชนีค่าส่งของประเทศไทย และอัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 รวมเป็นจำนวน 156 เดือน

การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2553 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561 มีสัดส่วนเป็นร้อยละ 70 ของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการสร้างตัวแบบ (Training Data) เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสมมากที่สุด และส่วนที่สองจะเป็นข้อมูลตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2562 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2565 มีสัดส่วนเป็นร้อยละ 30 ของข้อมูลทั้งหมด ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพในการพยากรณ์จากค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ในแต่ละตัวแบบ (Testing Data) โดยแต่ละตัวแบบ มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

การพยากรณ์โดยใช้ตัวแบบ ARIMA มีขั้นตอนดังนี้

1) ทดสอบคุณสมบัตินิ่งของข้อมูลอนุกรมเวลา (Stationary) โดยข้อมูลจะต้องมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งทดสอบด้วยวิธีการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ (Box-Cox Transformation) หากการทดสอบพบว่าข้อมูลมีความแปรปรวนไม่คงที่ จะต้องทำการแปลงข้อมูล โดยการแปลงด้วยลอการิทึมฐานธรรมชาติ (natural logarithms) ให้กับข้อมูล และนอกจากนี้ข้อมูลจะต้องมีค่าเฉลี่ยที่คงที่ ซึ่งทดสอบด้วยวิธี Augmented Dickey-Fuller Test (ADF) หากการทดสอบพบว่าข้อมูลมีค่าเฉลี่ยไม่คงที่ จะต้องทำการหาผลต่างอันดับที่ d แบบไม่มีฤดูกาล (nonseasonal difference) ให้กับข้อมูล

2) เมื่อปรับข้อมูลอนุกรมเวลาให้มีคุณสมบัตินิ่งแล้วจึงนำไปคำนวณค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (autocorrelation function, ACF) และค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเองส่วนย่อย (partial autocorrelation function, PACF) เพื่อหาอันดับของ q และ p

3) กำหนดตัวแบบ ARIMA ที่เป็นไปได้จากอันดับ q , p และ d ซึ่งแทนด้วย $ARIMA(p,d,q)$ โดยตัวแบบที่เป็นไปได้อาจมีมากกว่า 1 ตัวแบบ

4) นำตัวแบบที่เป็นไปได้แต่ละตัวแบบมาหาค่าประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และทดสอบพารามิเตอร์แต่ละตัวว่าอยู่ในสมการตัวแบบหรือไม่

5) คำนวณค่าพยากรณ์และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ของตัวแบบที่ผ่านการทดสอบพารามิเตอร์

6) ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ ARIMA ที่ผ่านการทดสอบพารามิเตอร์ โดยการวิเคราะห์ส่วนเหลือ (Residual Analysis) ได้แก่ ตรวจสอบสหสัมพันธ์ในตัวเองของความคลาดเคลื่อนสุ่ม ตรวจสอบการแจกแจงปกติของความคลาดเคลื่อนสุ่ม ตรวจสอบค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างจากศูนย์ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม และตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

7) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ในแต่ละตัวแบบที่เป็นไปได้ด้วยค่าความคลาดเคลื่อน MAD, MSE, MAPE และ R-Squared

โดยแต่ละเกณฑ์สำหรับวัดค่าความคลาดเคลื่อนมีรายละเอียดดังนี้

$$MAD = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{\sum \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \times 100}{n} \quad (3)$$

$$R-Squared = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

โดยที่ y_i คือ ค่าที่แท้จริงจากข้อมูล $\hat{y}_i$ คือ ค่าพยากรณ์ที่ได้จากตัวแบบ $\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล และ n คือ ขนาดของข้อมูล การพยากรณ์โดยใช้ตัวแบบ ARIMAX มีขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้ ตัวแปรตาม (dependent variable) คือ Y_t แทน ดัชนีราคาผู้บริโภค ณ เดือนที่ t และตัวแปรอิสระ 5 ตัวแปร ได้แก่ $X_{1,t}$ แทน ดัชนีเงินบาทที่แท้จริง ณ เดือนที่ t , $X_{2,t}$ แทน อัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ณ เดือนที่ t , $X_{3,t}$ แทน ดัชนีค่าปลีของประเทศไทย ณ เดือนที่ t , $X_{4,t}$ แทน ดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ณ เดือนที่ t และ $X_{5,t}$ แทน อัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

2) คัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการด้วยวิธี Stepwise variable selection และประมาณค่าพารามิเตอร์ในตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

3) คำนวณค่าพยากรณ์และค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น

4) นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นมาทดสอบคุณสมบัตินิ่ง (Stationary) ด้วยวิธีการ Augmented Dickey-Fuller Test (ADF Test) หากการทดสอบพบว่าข้อมูลมีค่าเฉลี่ยไม่คงที่จะต้องทำการหาผลต่างอันดับที่ d แบบไม่มีฤดูกาล (nonseasonal difference) ให้กับค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น

5) นำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัตินิ่งมาคำนวณค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเอง (autocorrelation function, ACF) และค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวเองส่วนย่อย (partial autocorrelation function, PACF) เพื่อหาอันดับของ q และ p

6) กำหนดตัวแบบ ARIMAX ที่เป็นไปได้ จากอันดับ q, p, d และตัวแปรอิสระที่ผ่านการคัดเลือกเข้าสมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นด้วยวิธี Stepwise variable selection มาวิเคราะห์ร่วมในตัวแบบ ซึ่งแทนด้วย ARIMAX(p, d, q) with X_t โดยตัวแบบที่เป็นไปได้จะมีมากกว่า 1 ตัวแบบ

7) ประมาณค่าพารามิเตอร์ ในตัวแบบด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และทดสอบพารามิเตอร์ ติดกันแต่ละตัวว่าอยู่ในสมการตัวแบบหรือไม่

8) คำนวณค่าพยากรณ์และค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ของตัวแบบที่ผ่านการทดสอบพารามิเตอร์



9) ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ ARIMAX ที่ผ่านการทดสอบพารามิเตอร์ โดยการวิเคราะห์ส่วนเหลือ (Residual Analysis) ได้แก่ ตรวจสอบสหสัมพันธ์ในตัวเองของความคลาดเคลื่อนสุ่ม ตรวจสอบการแจกแจงปกติของความคลาดเคลื่อนสุ่ม ตรวจสอบค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างจากศูนย์ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม และตรวจสอบความแปรปรวนคงที่ของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

10) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ในแต่ละตัวแบบที่เป็นไปได้ด้วยค่าความคลาดเคลื่อน MAD, MSE, MAPE และ R-Squared จากข้อมูล Testing

วิธีการทางสถิติที่ใช้ในงานวิจัย

1. ตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

การวิเคราะห์อนุกรมเวลาแบบ Box-Jenkins เป็นระเบียบวิธีทางสถิติสำหรับหาตัวแบบพยากรณ์ เทคนิคนี้อาศัยความสัมพันธ์จากข้อมูลในอดีตเพื่อหาตัวแบบแสดงพฤติกรรมของข้อมูลและใช้เป็นแนวทางในการพยากรณ์พฤติกรรมในอนาคต เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการพยากรณ์ในระยะสั้น ตัวแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์อนุกรมเวลาแบบ Box-Jenkins เรียกว่าตัวแบบ ARIMA ซึ่งย่อมาจากคำว่า Autoregressive Integrated Moving Average ตัวแบบ ARIMA มีข้อสมมติว่าค่าปัจจุบันของค่าสังเกตเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของค่าสังเกตและค่าความคลาดเคลื่อนสุ่มในอดีต [7]

โดยมีสมการตัวแบบดังนี้

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d Y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \varepsilon_t \quad (5)$$

โดยที่ Y_t คือ ค่าพยากรณ์ที่คาบเวลาที่ t

B คือ การดำเนินการย้อนกลับ

ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลาที่ t , $\varepsilon_t \sim Nid(0, \sigma^2)$

$\phi_{1,2,\dots,p}$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของ autoregressive process อันดับที่ $1, 2, \dots, p$

$\theta_{1,2,\dots,q}$ คือ ค่าพารามิเตอร์ของ moving average process อันดับที่ $1, 2, \dots, q$

p คือ อันดับที่ p ของกระบวนการ autoregressive

d คือ อันดับที่ d ของการหาผลต่าง

q คือ อันดับที่ q ของกระบวนการ moving average

2. ตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables (ARIMAX)

เทคนิควิธี ARIMAX เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรอิสระ (X) โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น [8] ซึ่งสมการถดถอยเชิงเส้นที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการพยากรณ์ข้อมูลที่ต้องการ แต่เนื่องจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องมา เป็นอนุกรมเวลา ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากตัวแบบการพยากรณ์มักมีสหสัมพันธ์ในตัวเอง ดังนั้นจึงได้มีการสร้างตัวแบบ ARIMAX ให้กับค่าความคลาดเคลื่อนในสมการถดถอยเชิงเส้นดังนี้

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{i,t} + \omega_t \quad (6)$$

โดยที่ Y_t คือ ค่าพยากรณ์ที่คาบเวลาที่ t

$X_{i,t}$ คือ ตัวแปรอิสระตัวที่ i ณ เวลาที่ t ; $i = 1, 2, \dots, k$

β_0 คือ พารามิเตอร์แสดงตัวคงที่ของการถดถอย

β_i คือ พารามิเตอร์แสดงสัมประสิทธิ์การถดถอย

ω_t คือ อนุกรมเวลาของความคลาดเคลื่อนจากสมการถดถอย โดยตัวแบบ ARIMA errors ของ ω_t คือ

$$\phi(B)\omega_t = \theta(B)\varepsilon_t$$

จะได้
$$\omega_t = \frac{\theta(B)}{\phi(B)} \varepsilon_t \quad (7)$$

นำสมการที่ (7) แทนในสมการที่ (6) จะได้ตัวแบบ ARIMAX คือ

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{i,t} + \frac{\theta(B)}{\phi(B)} \varepsilon_t \quad (8)$$

โดยที่ $\phi(B) = (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)$

$$\theta(B) = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)$$

ε_t คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลาที่ t , $\varepsilon_t \sim Nid(0, \sigma^2)$

ผลการวิจัย

การศึกษางานวิจัยในครั้งนี้ใช้โปรแกรม SPSS Version 29.0 และ โปรแกรม Minitab ในการประมวลผล ซึ่งได้ผลการวิจัย ดังนี้

1. ตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

การพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคด้วยตัวแบบ ARIMA มีขั้นตอนดังนี้

1.1 กำหนดตัวแบบ ARIMA ที่เป็นไปได้ จากค่า p , q และ d พบว่าข้อมูลดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย (Y_t) มีสหสัมพันธ์ในตัวเอง (ACF) ณ lag ที่ 1 และ 2 และมีสหสัมพันธ์ในตัวเองส่วนย่อย (PACF) ณ lag ที่ 1, 2 และ 10 จึงกำหนดตัวแบบที่เหมาะสมที่สุด คือ ตัวแบบ ARIMA(1,2,1) มีสมการคือ

$$\begin{aligned} (1 - \theta_1 B)\varepsilon_t &= (1 - \phi_1 B)(1 - B)^2 Y_t \\ &= (1 - \phi_1 B)(1 - B)(1 - B)Y_t \\ &= (1 - \phi_1 B)(1 - B - B + B^2)Y_t \\ &= (1 - \phi_1 B)(1 - 2B + B^2)Y_t \\ &= (1 - 2B + B^2 - \phi_1 B + 2\phi_1 B^2 - \phi_1 B^3)Y_t \\ \therefore Y_t - 2Y_{t-1} + Y_{t-2} - \phi_1 Y_{t-1} + 2\phi_1 Y_{t-2} - \phi_1 Y_{t-3} &= \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \end{aligned} \quad (9)$$

ดังนั้นจะได้ว่า
$$Y_t = 2Y_{t-1} - Y_{t-2} + \phi_1 Y_{t-1} - 2\phi_1 Y_{t-2} + \phi_1 Y_{t-3} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t \quad (10)$$

จากสมการข้างต้นเป็นสมการที่ใช้ในกรณีที่ทราบข้อมูลจริง ณ คาบเวลาต่างๆ ดังนั้นถ้านำไปใช้ในการพยากรณ์จะได้ว่า

$$\hat{Y}_t = 2\hat{Y}_{t-1} - \hat{Y}_{t-2} + \phi_1 \hat{Y}_{t-1} - 2\phi_1 \hat{Y}_{t-2} + \phi_1 \hat{Y}_{t-3} - \theta_1 e_{t-1} \quad (11)$$

โดยที่ $\hat{Y}_{t-k}$ คือ ค่าพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคด้วยตัวแบบ ARIMA ณ เดือนที่ $t-k$

e_{t-k} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบ ARIMA ณ เดือนที่ $t-k$

1.2 ประเมินค่าพารามิเตอร์ในตัวแบบ ARIMA(1,2,1) โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณของพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ค่าประมาณพารามิเตอร์ในตัวแบบ ARIMA(1,2,1)

ค่าประมาณพารามิเตอร์		ค่าความคลาดเคลื่อน	t	p-value
		มาตรฐาน		
Non-Seasonal lags AR 1	0.344	0.105	3.269	0.001
MA1	0.951	0.039	24.230	0.000

จากตารางที่ 1 จะได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ดังนี้

$$\hat{\phi}_1 = 0.344 \quad (t = 3.269, p\text{-value} = 0.001)$$

$$\hat{\theta}_1 = 0.951 \quad (t = 24.230, p\text{-value} = 0.000)$$

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าประมาณพารามิเตอร์ทุกตัวในตัวแบบ ARIMA(1,2,1) มี p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่าพารามิเตอร์ทุกตัวในตัวแบบ ARIMA(1,2,1) มีค่าแตกต่างจากศูนย์ กล่าวคือ มีพารามิเตอร์แต่ละตัวอยู่ในสมการตัวแบบ โดยตัวแบบ ARIMA(1,2,1) มีสมการพยากรณ์ดังนี้

$$\hat{Y}_t = 2\hat{Y}_{t-1} - \hat{Y}_{t-2} + 0.344\hat{Y}_{t-1} - 0.688\hat{Y}_{t-2} + 0.344\hat{Y}_{t-3} - 0.95e_{t-1} \quad (12)$$

โดยที่ $\hat{Y}_{t-k}$ คือ ค่าพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคด้วยตัวแบบ ARIMA ณ เดือนที่ $t-k$

$$e_{t-k} = Y_{t-k} - \hat{Y}_{t-k}$$

1.3 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ด้วยตัวแบบ ARIMA(1,2,1)

วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการพยากรณ์จากค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบ ARIMA(1,2,1) ผ่านชุดข้อมูล Testing Data โดยมีผลค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ดังแสดงในตารางที่ 2

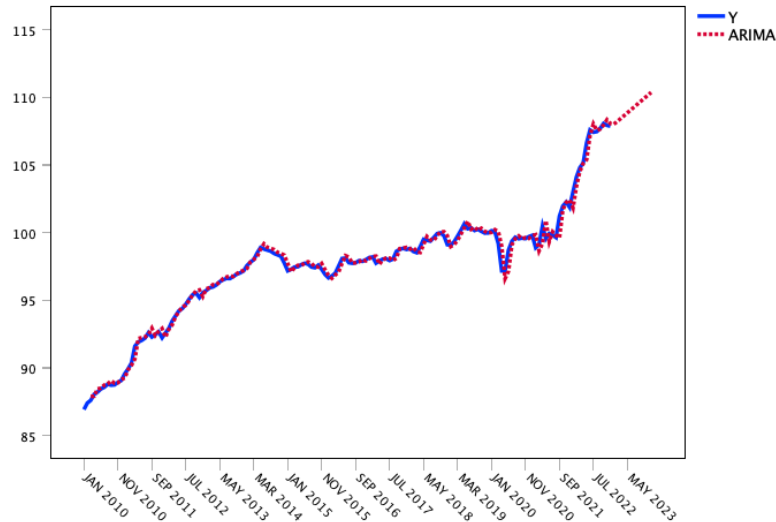
ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์โดยใช้ตัวแบบ ARIMA(1,2,1) ในข้อมูลชุดทดสอบ

ค่าความคลาดเคลื่อน	ARIMA(1,2,1)
MAD	0.4568
MSE	0.4436
MAPE (%)	0.4523 %
R-Squared (%)	79.9053 %

จากตารางที่ 2 พบว่า ตัวแบบ ARIMA(1,2,1) มีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ข้อมูลเมื่อวัดด้วยค่า MAD, MSE, MAPE (%) และ R-Squared (%) ผ่านชุดข้อมูล Testing Data เท่ากับ 0.4568, 0.4436, 0.4523 % และ 79.9053 % ตามลำดับ

1.4 การเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าที่แท้จริง (Y_t) กับค่าพยากรณ์ ($\hat{Y}_t$) ด้วยตัวแบบ ARIMA(1,2,1)

จากภาพที่ 3 พบว่า ค่าที่แท้จริง (Y_t) กับค่าพยากรณ์ ($\hat{Y}_t$) ของข้อมูลดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย รายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2010 ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2023 ด้วยตัวแบบ ARIMA(1,2,1) มีความใกล้เคียงกันและมีบางช่วงเวลาที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบค่าจริง และค่าพยากรณ์ ของดัชนีราคาผู้บริโภคในช่วงปี ค.ศ. 2010 – 2023 โดยใช้ตัวแบบ ARIMA(1,2,1)

2. ตัวแบบ Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous variables (ARIMAX)

การพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคด้วยตัวแบบ ARIMAX มีขั้นตอนดังนี้

2.1 กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

(1) ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

Y_t แทน ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

(2) ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ประกอบด้วย

$X_{1,t}$ แทน ดัชนีค่าเงินบาทที่แท้จริง ณ เดือนที่ t

$X_{2,t}$ แทน อัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ณ เดือนที่ t

$X_{3,t}$ แทน ดัชนีค่าปลีกของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

$X_{4,t}$ แทน ดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

$X_{5,t}$ แทน อัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

2.2 กำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระ โดยการเขียนแผนภาพการกระจายเพื่อดูแนวโน้มความสัมพันธ์ โดยการกระจายของตัวแปรตาม กับแต่ละตัวแปรอิสระแสดงดังในภาพที่ 4-8

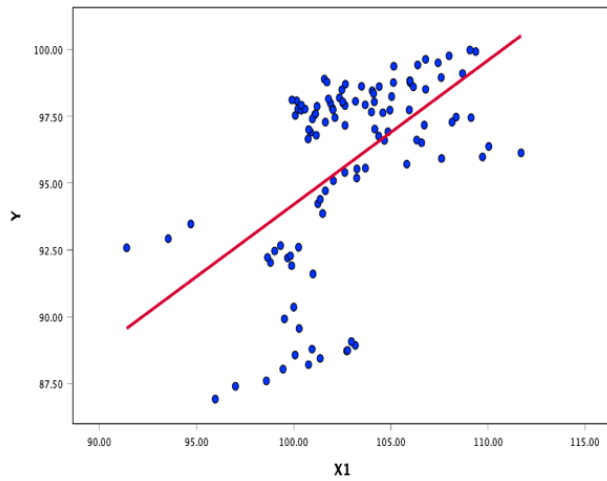
จากภาพที่ 4 ถึง 8 สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีราคาผู้บริโภค และดัชนีราคาผู้บริโภคได้ดังนี้

1) $R^2_{Y_t, X_{1,t}} = 28.72\%$ หมายถึง ดัชนีค่าเงินบาทที่แท้จริง ณ เดือนที่ t ($X_{1,t}$) และดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีระดับความสัมพันธ์ที่ร้อยละ 28.72 และมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน หมายความว่า หากดัชนีเงินบาทที่แท้จริง ณ เดือนที่ t ($X_{1,t}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

2) $R^2_{Y_t, X_{2,t}} = 3.96\%$ หมายถึง อัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{2,t}$) และดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีระดับความสัมพันธ์ที่ร้อยละ 3.96 และมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน หมายความว่า หากอัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{2,t}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

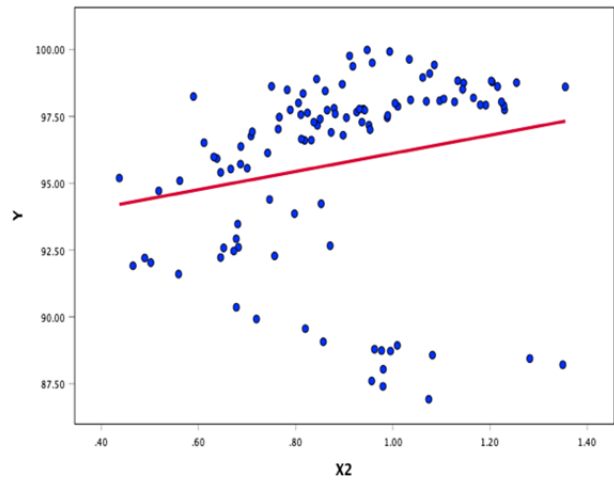


$$R^2_{Y_t, X_{1,t}} = 28.72 \%$$



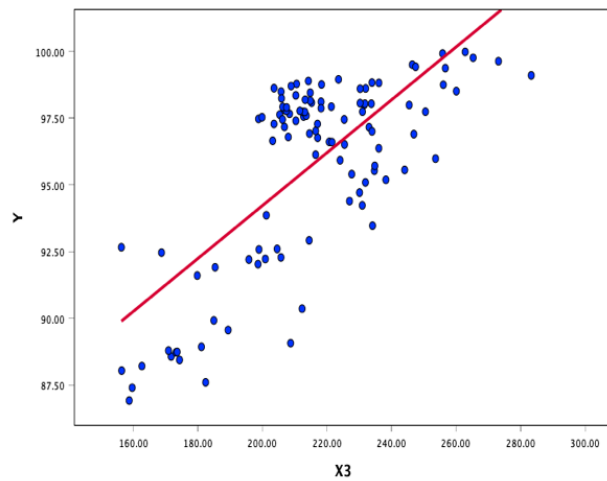
ภาพที่ 4 แผนภาพการกระจายของ Y_t กับ $X_{1,t}$

$$R^2_{Y_t, X_{2,t}} = 3.96 \%$$



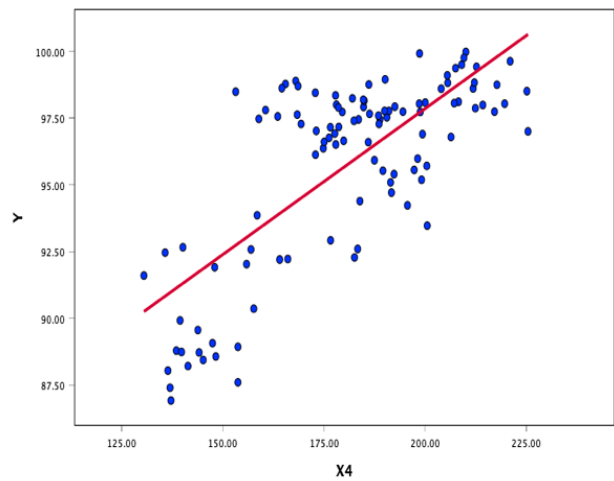
ภาพที่ 5 แผนภาพการกระจายของ Y_t กับ $X_{2,t}$

$$R^2_{Y_t, X_{3,t}} = 52.71 \%$$



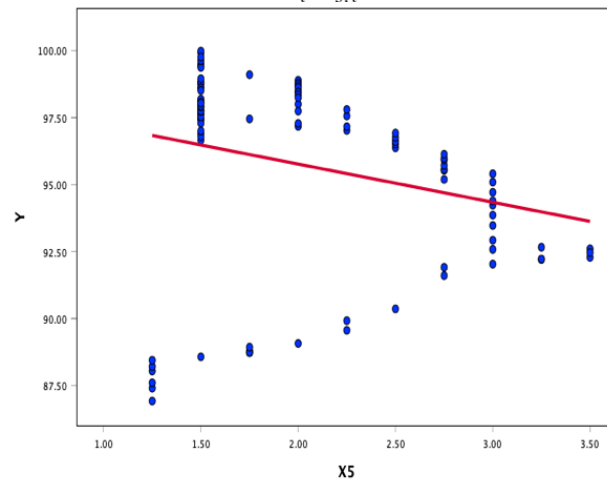
ภาพที่ 6 แผนภาพการกระจายของ Y_t กับ $X_{3,t}$

$$R^2_{Y_t, X_{4,t}} = 54.91 \%$$



ภาพที่ 7 แผนภาพการกระจายของ Y_t กับ $X_{4,t}$

$$R^2_{Y_t, X_{5,t}} = 6.71 \%$$



ภาพที่ 8 แผนภาพการกระจายของ Y_t กับ $X_{5,t}$

3) $R^2_{Y_t, X_{3,t}} = 52.71\%$ หมายถึง ดัชนีค่าปฏิกิริยาของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{3,t}$) และดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีระดับความสัมพันธ์ที่ร้อยละ 51.71 และมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน หมายความว่า หากดัชนีค่าปฏิกิริยาของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{3,t}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4) $R^2_{Y_t, X_{4,t}} = 54.91\%$ หมายถึง ดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{4,t}$) และดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีระดับความสัมพันธ์ที่ร้อยละ 54.91 และมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน หมายความว่า หากดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{4,t}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

5) $R^2_{Y_t, X_{5,t}} = 6.71\%$ หมายถึง อัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{5,t}$) และดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีระดับความสัมพันธ์ที่ร้อยละ 6.71 และมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม หมายความว่า หากอัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{5,t}$) มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t (Y_t) มีค่าลดลง

2.3 คัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการด้วยวิธี Stepwise variable selection และประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยมีผลการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่ตัวแบบโดยแต่ละวิธี พร้อมทั้งค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคัดเลือกตัวแปรเข้าสู่ตัวแบบโดยใช้วิธีการ Stepwise variable selection และค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้

Model	Unstandardized	Standard Error	Standardized	t	p-value	Collinearity Tolerance	Statistics VIF
1 (Constant)	75.975	1.753		43.342	<0.001		
X4	0.109	0.010	0.741	11.374	<0.001	1.000	1.000
2 (Constant)	48.984	6.283		7.797	<0.001		
X4	0.093	0.010	0.628	9.610	<0.001	0.846	1.181
X1	0.292	0.066	0.290	4.446	<0.001	0.846	1.181

จากตารางที่ 3 จะได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ดังนี้

$$\hat{\beta}_0 = 48.984 \quad (t = 7.797, p\text{-value} = < 0.001)$$

$$\hat{\beta}_1 = 0.093 \quad (t = 9.610, p\text{-value} = < 0.001)$$

$$\hat{\beta}_2 = 0.292 \quad (t = 4.446, p\text{-value} = < 0.001)$$

จากตารางที่ 3 เมื่อนำดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยมาวิเคราะห์ร่วมกับตัวแปรอิสระ และคัดเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการด้วยวิธี Stepwise variable selection ทดสอบพารามิเตอร์ในแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น พบว่ามีเพียง 2 ตัวแปรที่ผ่านการคัดเลือกเข้าสมการการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น ได้แก่ ดัชนีเงินบาทที่แท้จริง ณ เดือนที่ t ($X_{1,t}$) โดยมีค่า t เท่ากับ 4.446 และ p -value เท่ากับ < 0.001 และดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{4,t}$) โดยมีค่า t เท่ากับ 9.610 และ p -value เท่ากับ < 0.001 จะเห็นว่าพารามิเตอร์ทุกตัวมีค่า p -value น้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่าพารามิเตอร์ทุกตัวมีค่าแตกต่างจากศูนย์



จึงนำตัวแปรดังต่อไปนี้ คือ ดัชนีเงินบาทที่แท้จริง ณ เดือนที่ t ($X_{1,t}$) และดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ณ เดือนที่ t ($X_{4,t}$) มาใช้เป็นตัวแปรอิสระ จากผลลัพธ์ที่ได้จากการคัดเลือกตัวแปรด้วยวิธี Stepwise variable selection ถึงแม้ว่าจะมีการคัดเลือกตัวแปรอิสระ $X_{1,t}$ เข้ามาร่วมด้วยในแบบที่ 2 เนื่องจากการคัดเลือกตัวแปรอิสระ $X_{4,t}$ เข้ามาในลำดับแรกแล้ว การคัดเลือกตัวแปร $X_{1,t}$ ในลำดับถัดไป จึงพิจารณาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วน กรณีที่มีตัวแปรอิสระ $X_{4,t}$ อยู่ในแบบแล้ว จึงคัดเลือกตัวแปรอิสระ $X_{1,t}$ เข้ามาร่วมด้วยเป็นลำดับต่อมา ทำให้ได้ตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นดังนี้

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1,t} + \beta_2 X_{4,t} + \omega_t \quad (13)$$

และมีสมการพยากรณ์ คือ

$$Y_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1,t} + \hat{\beta}_2 X_{4,t} + \hat{\omega}_t \quad (14)$$

$$\hat{Y}_t = 48.984 + 0.093 X_{1,t} + 0.292 X_{4,t} \quad (15)$$

2.4 วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทยด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ตลอดจนค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าประมาณพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละตัวแบบ

Model	R	R-Squared	Adjusted R-Squared	Standard Error of the Estimate
1 ($X_{4,t}$)	0.741	0.549623	0.545	2.36658
2 ($X_{4,t}$ และ $X_{1,t}$)	0.788	0.620963	0.614	2.18138

จากตารางที่ 4 สมการพยากรณ์ด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.620963 ซึ่งหมายความว่าตัวแปรอิสระที่ผ่านการคัดเลือกเข้ามาในสมการการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น ได้แก่ ดัชนีเงินบาทที่แท้จริง ($X_{1,t}$) และดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ($X_{4,t}$) มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคได้ถูกต้องร้อยละ 62.0963 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน 2.18138

2.5 คำนวณค่าพยากรณ์ ($\hat{Y}_t$) และความคลาดเคลื่อนจากค่าพยากรณ์ด้วยตัวแบบการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น แทนด้วย

$$\hat{\omega}_t = Y_t - \hat{Y}_t$$

โดยที่ $\hat{\omega}_t$ คือ ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เดือนที่ t

Y_t คือ ค่าดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

$\hat{Y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย ณ เดือนที่ t

2.6 กำหนดตัวแบบ ARIMAX ที่เป็นไปได้ จากค่า p , q , d และตัวแปรอิสระที่ผ่านการคัดเลือกเข้ามาในสมการการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นด้วยวิธี Stepwise variable selection ได้แก่ ดัชนีเงินบาทที่แท้จริง ($X_{1,t}$) และดัชนีค่าส่งของประเทศไทย ($X_{4,t}$) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าพยากรณ์ด้วยตัวแบบพหุคูณ (ω_t) มีสหสัมพันธ์ในตัวเอง ณ lag ที่ 1, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 15, 19, 24 และ 25 และมีสหสัมพันธ์ในตัวเองส่วนย่อย ณ lag ที่ 1, 2, 9 และ 11 จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่ามี lag ที่ 1 และ 11 มีปรากฏทั้งในสหสัมพันธ์ในตัวเองและสหสัมพันธ์ในตัวเองส่วนย่อย จึงกำหนดตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดให้ความคลาดเคลื่อน (ω_t) คือ ตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) มีสมการ คือ



$$\begin{aligned}\theta_0 + (1 - \theta_1 B - \theta_{11} B^{11}) \varepsilon_t &= (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2) \omega_t \\ &= (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - B + \phi_1 B^2 + \phi_2 B^3) \omega_t\end{aligned}\quad (16)$$

จะได้ $\theta_0 + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_{11} \varepsilon_{t-11} = \omega_t - \phi_1 \omega_{t-1} - \phi_2 \omega_{t-2} - \omega_{t-1} + \phi_1 \omega_{t-2} + \phi_2 \omega_{t-3}$

$$\therefore \omega_t = \theta_0 + \omega_{t-1} + \phi_1 \omega_{t-1} - \phi_1 \omega_{t-2} + \phi_2 \omega_{t-2} - \phi_2 \omega_{t-3} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_{11} \varepsilon_{t-11} + \varepsilon_t \quad (17)$$

จาก $Y_t = \beta_2 X_{4,t} + \omega_t \quad (18)$

นำสมการที่ (17) แทนในสมการที่ (18) จะได้ตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4

$$Y_t = \theta_0 + \beta_2 X_{4,t} + \omega_{t-1} + \phi_1 \omega_{t-1} - \phi_1 \omega_{t-2} + \phi_2 \omega_{t-2} - \phi_2 \omega_{t-3} - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_{11} \varepsilon_{t-11} + \varepsilon_t \quad (19)$$

โดยที่ ε_t คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เดือนที่ t ในตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4

ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4 มีสมการพยากรณ์ คือ

$$\hat{Y}_t = \hat{\theta}_0 + \hat{\beta}_2 X_{4,t} + \omega_{t-1} + \hat{\phi}_1 \omega_{t-1} - \hat{\phi}_1 \omega_{t-2} + \hat{\phi}_2 \omega_{t-2} - \hat{\phi}_2 \omega_{t-3} - \hat{\theta}_1 e_{t-1} - \hat{\theta}_{11} e_{t-11} \quad (20)$$

โดยที่ $\hat{\omega}_{t-k}$ คือ ความคลาดเคลื่อนจากค่าพยากรณ์ด้วยตัวแบบถดถอยพหุคูณเชิงเส้น ณ เดือนที่ $t-k$

e_{t-k} คือ ความคลาดเคลื่อนจากค่าพยากรณ์ด้วยตัวแบบ ARIMAX ณ เดือนที่ $t-k$

2.7 ประเมินค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4 โดยใช้วิธีกำลังน้อยที่สุด โดยมีค่าประมาณพารามิเตอร์ในตัวแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าประมาณพารามิเตอร์ในตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดยมี X_4 อยู่ในตัวแบบ

Model	Estimates	Standard Error	T	p-value
Non-Seasonal AR1	1.189	0.160	7.429	0.000
AR2	-0.325	0.104	-3.133	0.002
MA1	0.810	0.131	6.194	0.000
MA11	-0.152	0.066	-2.306	0.023
Regression Coef.X4	-0.002	0.001	-2.016	0.046
Constant	0.114	0.057	2.002	0.048

จากตารางที่ 5 ได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ ดังนี้

$$\hat{\theta}_0 = 0.114 \quad (t = 2.002, \text{ p-value} = 0.048)$$

$$\hat{\beta}_2 = -0.002 \quad (t = -2.016, \text{ p-value} = 0.046)$$

$$\hat{\phi}_1 = 1.189 \quad (t = 7.429, \text{ p-value} = 0.000)$$

$$\hat{\phi}_2 = -0.325 \quad (t = -3.133, \text{ p-value} = 0.002)$$

$$\hat{\theta}_1 = 0.810 \quad (t = 6.194, \text{ p-value} = 0.000)$$

$$\hat{\theta}_{11} = -0.152 \quad (t = -2.306, \text{ p-value} = 0.023)$$



จากตารางที่ 5 พบว่าค่าประมาณพารามิเตอร์ทุกตัวในตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4 มี p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 สรุปได้ว่าพารามิเตอร์ทุกตัวในตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4 มีค่าแตกต่างจากศูนย์ กล่าวคือมีพารามิเตอร์แต่ละตัวอยู่ในสมการตัวแบบ โดยตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) X_4 มีสมการพยากรณ์ดังนี้

$$\hat{Y}_t = 0.114 - 0.002X_{4,t} + \omega_{t-1} + 1.189\omega_{t-1} - 1.189\omega_{t-2} - 0.325\omega_{t-2} + 0.325\omega_{t-3} - 0.810e_{t-1} + 0.152e_{t-11} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } \hat{\omega}_{t-k} &= Y_{t-k} - \hat{Y}_{t-k} \\ e_{t-k} &= \omega_{t-k} - \hat{\omega}_{t-k} \end{aligned}$$

2.8 ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ด้วยตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดยใช้ตัวแปร X_4

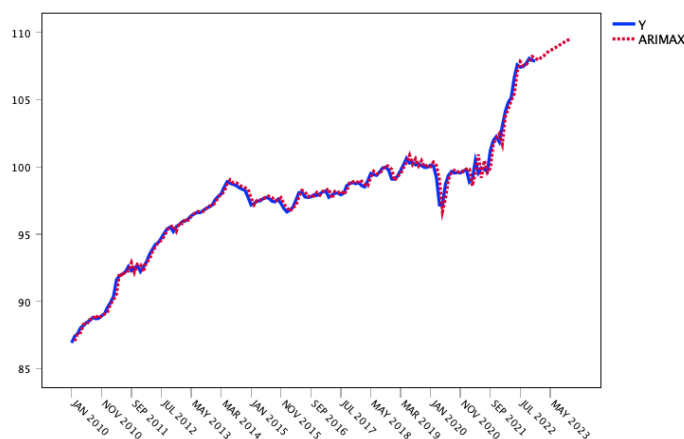
วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการพยากรณ์จากค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดยใช้ X_4 ผ่านชุดข้อมูลทดสอบ โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการพยากรณ์โดยใช้ตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดยมี X_4 อยู่ในตัวแบบสำหรับข้อมูลชุดทดสอบ

ค่าความคลาดเคลื่อน	ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4
MAD	0.4216
MSE	0.3435
MAPE (%)	0.4166 %
R-Squared (%)	84.1019 %

จากตารางที่ 6 พบว่าตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4 มีความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ข้อมูลเมื่อวัดด้วยค่า MAD, MSE, MAPE (%) และ R-Squared (%) ผ่านชุดข้อมูล Testing Data เท่ากับ 0.4216, 0.3435, 0.4166 % และ 84.1019 % ตามลำดับ

2.9 การเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าที่แท้จริง (Y_t) กับค่าพยากรณ์ ($\hat{Y}_t$) ด้วยตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดยใช้ตัวแปร X_4 โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงและค่าพยากรณ์ แสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปรียบเทียบค่าจริง และค่าพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภค ในปี ค.ศ. 2010 – 2023 โดยใช้ตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) ที่มี X_4 อยู่ในตัวแบบ

จากภาพที่ 9 พบว่าค่าที่แท้จริง (Y_t) กับค่าพยากรณ์ ($\hat{Y}_t$) ของข้อมูลดัชนีราคาผู้บริโภคของประเทศไทย รายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2566 ด้วยตัวแบบ ARIMAX(2,1,(1,11)) โดย X_4 มีความใกล้เคียงกันและมีบางช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้พบว่าตัวแบบ ARIMA และตัวแบบ ARIMAX มีความเหมาะสมสำหรับการพยากรณ์ค่าในระยะสั้นถึงปานกลาง โดยงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วยข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบ (Training data) ซึ่งมีจำนวนร้อยละ 70 ของข้อมูลทั้งหมด และข้อมูลที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพการพยากรณ์ของตัวแบบ (Testing data) ซึ่งมีจำนวนร้อยละ 30 ของข้อมูลทั้งหมด โดยผู้วิจัยอาจต้องทดลองเปลี่ยนวิธีการแบ่งข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ค่าของตัวแบบ เช่น แบ่งข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบเป็นร้อยละ 80 และข้อมูลที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของตัวแบบเป็นร้อยละ 20 ของข้อมูลทั้งหมด หรือแบ่งข้อมูลสำหรับการสร้างตัวแบบเป็นร้อยละ 90 และข้อมูลที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของตัวแบบเป็นร้อยละ 10 ของข้อมูลทั้งหมด รวมถึงทดลองปรับข้อมูล โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากบางช่วงเวลาของข้อมูลมีความแปรปรวนสูง ซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแบบ นอกจากนี้ผู้จัดทำได้ศึกษาตัวแปรอิสระ ได้แก่ ดัชนีค่าเงินบาทที่แท้จริง อัตราการว่างงานของคนในประเทศไทย ดัชนีค่าปลิกของประเทศไทย ดัชนีค่าส่งของประเทศไทย และ อัตราดอกเบี้ยนโยบายของประเทศไทย โดยตัวแปรอิสระเหล่านี้เป็นเพียงปัจจัยส่วนหนึ่งที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อดัชนีราคาผู้บริโภค ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการคาดการณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคในอนาคต ดังนั้นผู้วิจัยควรศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อดัชนีราคาผู้บริโภคเพิ่มเติมในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภค เช่น อัตราแลกเปลี่ยนเงิน หรือ ปริมาณเงินในความหมายกว้าง เป็นต้น เช่นเดียวกันกับตัวแบบที่ใช้ในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภค ผู้วิจัยควรคำนึงถึงการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เนื่องจากตัวแบบ ARIMA และตัวแบบ ARIMAX อาจไม่เพียงพอต่อการคาดการณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคในอนาคต ดังนั้นผู้วิจัยควรที่จะศึกษาให้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์ด้วยวิธีอื่นๆ เช่น ตัวแบบ Vector Autoregression (VAR) และตัวแบบ GARCH (General Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) รวมถึงตัวแบบการถดถอยฟูเรียร์ (Fourier Regression) [9] เป็นต้น

จากการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคระหว่างตัวแบบ ARIMA และตัวแบบ ARIMAX โดยพิจารณาจากความคลาดเคลื่อนผ่านชุดข้อมูล Testing data พบว่าตัวแบบ ARIMAX มีค่า MAD, MSE และ MAPE (%) ต่ำสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.42, 0.34 และ 0.42 % ตามลำดับ และมีค่า R-Squared (%) มากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 84 % สรุปได้ว่าตัวแบบ ARIMAX มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภคได้แม่นยำมากกว่าตัวแบบ ARIMA โดยผลการศึกษาข้างต้นสะท้อนให้เห็นว่าตัวแบบ ARIMAX ซึ่งเป็นตัวแบบที่มีการนำปัจจัยอื่นๆ ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์มาคิดรวมด้วยจะทำให้มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ได้แม่นยำมากกว่าตัวแบบ ARIMA ซึ่งเป็นตัวแบบที่ใส่ข้อมูลในอดีตของตัวแปรที่ต้องการพยากรณ์เพียงตัวแปรเดียว โดยมีผลการวิจัยที่ยืนยันถึงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของตัวแบบ ARIMAX ที่สูงกว่าตัวแบบ ARIMA [10] ดังนั้นตัวแบบ ARIMAX จึงเป็นตัวแบบที่มีความเหมาะสมในการพยากรณ์ดัชนีราคาผู้บริโภค เช่นเดียวกันกับผู้วิจัยใช้ตัวแบบ ARIMAX ในการพยากรณ์ยอดการส่งออกของประเทศไทย [11] และใช้ตัวแบบ ARIMAX ในการพยากรณ์ดัชนีชี้วัดระบบเศรษฐกิจของประเทศมาดากัสการ์ [12] จากผลสรุปของผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดนโยบายเศรษฐกิจ และออกแบบกลยุทธ์ในการป้องกันความเสี่ยงจากอัตราเงินเฟ้อที่อาจส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจในประเทศได้อีกด้วย



เอกสารอ้างอิง

1. ธนาคารแห่งประเทศไทย. ประกาศคณะกรรมการนโยบายการเงิน เป้าหมายของนโยบายการเงิน ประจำปี 2566. [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 20 เม.ย. 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://www.bot.or.th/content/dam/bot/documents/th/our-roles/monetary-policy/monetary-policy-target/AnnounceMPC_Target2566.pdf
2. พัทธราภรณ์ นิยมจิตร. ปัจจัยที่มีผลต่อดัชนีราคาผู้บริโภคในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาเศรษฐศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเศรษฐศาสตร์ธุรกิจ, คณะเศรษฐศาสตร์. มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย. กรุงเทพฯ; 2561.
3. นิฉา แก้วหาวงษ์. การพยากรณ์ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยโดยใช้ตัวแบบ SARIMA และตัวแบบการถดถอยที่มีความคลาดเคลื่อนเป็นตัวแบบ ARMA. J Sci Tech 2558;4(1):24-36.
4. Bolanle AD, Oluwadare A. ARIMA and ARIMAX stochastic models for fertility in Nigeria. J Math Comp 2017;7(5):1-20.
5. Adu WK, Appiahene P, Afrifa S. VAR, ARIMAX and ARIMA models for nowcasting unemployment rate in Ghana using Google trends. J Elect Inform Tech 2023;10(12):1-16.
6. Aji BS, Indwi I, Rohmawati AA. Forecasting Number of COVID-19 Cases in Indonesia with ARIMA and ARIMAX models. In: proceedings of the 9th International Conference on Information and Communication Technology, August 3-5, 2021; Yogyakarta, Indonesia; 2021. p.71-5.
7. พงษ์ศิริ ศิริพานิช. การพยากรณ์อนุกรมเวลาด้วยตัวแบบผสมระหว่าง ARIMA และเครือข่ายประสาทเทียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาคณิตศาสตร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. กรุงเทพฯ; 2550.
8. Andrews BH, Dean MD, Swain R, Cole C. Building ARIMA and ARIMAX Models for Predicting Long-Term Disability Benefit Application Rates in the Public/Private Sectors. 1st ed. Chicago: Society of Actuaries; 2013.
9. Yimnak K, Intaramo R. Fourier Regression and ARIMAX Model for Forecasting Monthong Durian Price Index. Curr Appl Sci Technol 2021;21(4):712-20.
10. Anggraeni W, Vinarti R, Kurniawati Y. Performance Comparisons Between ARIMA and ARIMAX method in Moslem Kids Clothes Demand Forecasting: Case Study. Procedia Comput Sci 2015;72:630-7.
11. Kongcharoen C, Kruangpradit T. Autoregressive Integrated Moving Average with Explanatory Variable (ARIMAX) Model for Thailand Export. In: proceedings of the 33rd International Symposium on Forecasting, June 23-26, 2013; Seoul, Korea; 2013. p.1-8.
12. Andrianady J, Randrimifidy F, Ranaivoson MH, Steffanie TM. Econometric Analysis and Forecasting of Madagascar's Economy: An ARIMAX Approach. [Internet]. 2023 [cited 2024 August 24]. Available from: https://mpr.ub.uni-muenchen.de/118763/1/MPRA_paper_118763.pdf



ผลของสารสกัดสมุนไพรและการพัฒนาตำรับครีมสมุนไพรในการยับยั้งการเจริญ
ของเชื้อแบคทีเรีย *Staphylococcus aureus*

Effects of Herbal Extracts and Herbal Cream Formula Development on the
Inhibition of *Staphylococcus aureus* Growth

ณัฏฐ์ ภัคดี¹ จตุพร ประทุมเทศ¹ ปานิชา พงศ์นราทร¹ สุรพงศ์ รัตนะ² และ รณชัย ภูวนา^{1*}

¹สาขาวิชาแพทย์แผนไทย คณะทรัพยากรธรรมชาติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร สกลนคร 47160

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม นครพนม 48000

Naruwat Pakdee¹, Jatuporn Prathumtet¹, Panicha Pongnaratorn¹, Surapong Rattana²
and Ronnachai Poowanna^{1*}

¹Department of Thai traditional Medicine, Faculty of Natural Resources,

Rajamangala University of Technology Isan Sakon Nakorn Campus, Sakon Nakorn 47160

²Division of Science Education, Faculty of Education Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48000

*Corresponding author: ronnachai.pw@rmuti.ac.th

Received: 11 July 2024/ Revised: 14 September 2024/ Accepted: 17 September 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรคผิวหนัง *S. aureus* และพัฒนาตำรับครีมสมุนไพร จากสารสกัดสมุนไพร 5 ชนิด ได้แก่ ใบกุ่มบก (*Crateva adansonii* DC.) ดอกกระเจียวแดง (*Curcuma sessilis* Gage.) ใบขันทองพญาบาท (*Suregada multiflorum* Baill.) ใบตำลึงทอง หรือกระทกรก (*Passiflora foetida* L.) และใบน้อยหน่า (*Annona squamosa* Linn.) ด้วยเอทานอลร้อยละ 70, 95 และน้ำ ทดสอบการต้านเชื้อ *S. aureus* และพัฒนาตำรับครีมพื้น 4 สูตร นำสูตรที่มีค่าความคงตัวทางกายภาพและชีวภาพเหมาะสมที่สุดมาผสมสารสกัดสมุนไพรในสัดส่วนต่างกัน 4 ตำรับ และทดสอบการยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. aureus* ผลการวิจัยพบว่าสารสกัดใบน้อยหน่าด้วยการต้มให้ร้อยละของผลผลิตสูงสุด รองลงมาคือ ใบตำลึงทองและดอกกระเจียวแดง (ร้อยละ 10.88, 5.59 และ 4.81 ตามลำดับ) การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ด้วยวิธี Agar well diffusion พบว่าสารสกัดใบกุ่มบกด้วยเอทานอลร้อยละ 95 ที่ความเข้มข้น 666.60 µg/ml มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อดีที่สุด (18.67±1.53 mm) รองลงมาคือ สารสกัดดอกกระเจียวแดงด้วยน้ำ และสารสกัดใบขันทองพญาบาทด้วยเอทานอลร้อยละ 70 (13.33±1.53 mm และ 10.67±1.15 mm) ค่า MIC ของสารสกัดใบกุ่มบกและใบขันทองพญาบาทเท่ากับ 500 µg/ml และค่า MBC มากกว่า 5 mg/ml สูตรครีมพื้นที่ 4 มีค่าความคงตัวเหมาะสมที่สุด ส่วนตำรับครีมสมุนไพรที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยสารสกัดใบกุ่มบกและใบขันทองพญาบาทในอัตราส่วน 1:1 (ร้อยละ 36 ในตำรับครีม) มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อดีที่สุด (15.33±4.51 mm) เทียบกับยา Dicloxacillin (36.25±0.54 mm, 40 µg/ml) ดังนั้นสารสกัดใบกุ่มบกด้วยเอทานอลร้อยละ 95% และใบขันทองพญาบาทด้วยเอทานอลร้อยละ 70 มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* สูงสุด และเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นตำรับครีมสมุนไพร

คำสำคัญ: กุ่มบก กระเจียวแดง ขันทองพญาบาท การยับยั้งแบคทีเรีย สแตปฟีโลคอคคัส ออเรียส



Abstract

This research aimed to study the antibacterial efficacy against *S. aureus* and develop herbal cream formulation from 5 herbs, including *Crateva adansonii* DC. (stem), *Curcuma sessilis* Gage. (flower), *Suregada multiflorum* Baill. (stem), *Passiflora foetida* L. (vine) and *Annona squamosa* Linn. (leaf) were extracted using 70% ethanol, 95% ethanol and water. The extracts were tested against *S. aureus*, and four cream base formulations were developed. The most physically and biologically stable formulation was mixed with the herbal extracts in different ratios to create four formulations, which were then tested against *S. aureus*. Results: The *Annona squamosa* extract produced the highest yield when boiled, followed by *Passiflora foetida* and *Curcuma sessilis* (10.88%, 5.59%, and 4.81%, respectively). Inhibition of *S. aureus* using the agar well diffusion method showed that *Crateva adansonii* extract with 95% ethanol at 666.60 µg/ml had the best inhibitory effect (18.67±1.53 mm), followed by *Curcuma aeruginosa* extract with water and *Suregada multiflorum* extract with 70% ethanol (13.33±1.53 mm and 10.67±1.15 mm, respectively). The MIC of *Crateva adansonii* and *Suregada multiflorum* extracts was 500 µg/ml, and the MBC was greater than 5 mg/ml. The fourth cream formulation was the most stable. Formulation 2, containing *Crateva adansonii* extract with 95% ethanol and *Suregada multiflorum* extract with 70% ethanol in a 1:1 ratio (36% in the cream formulation), showed the highest inhibitory effect against *S. aureus* (15.33±4.51 mm), compared to dicloxacillin (36.25±0.54 mm, 40 µg/ml). Therefore, *Crateva adansonii* extract with 95% ethanol and *Suregada multiflorum* extract with 70% ethanol have the highest efficacy in inhibiting *S. aureus* and are suitable for developing herbal cream formulations.

Keywords: *Crateva adansonii* DC., *Curcuma sessilis* Gage., *Suregada multiflorum* Baill., Anti-bacterial, *Staphylococcus aureus*

บทนำ

ผิวหนังเป็นอวัยวะขนาดใหญ่ที่สุดคิดเป็นร้อยละ 16 ของร่างกาย มีหน้าที่สำคัญในการป้องกันสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่ร่างกาย เป็นทางผ่านของน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต [1] และมักพบการติดเชื้อบริเวณผิวหนังผ่านทางบาดแผลจากเชื้อต่างๆ เช่น *Pseudomonas aeruginosa* และ Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เกิดโรคติดเชื้อและเกิดตุ่มหนองที่ผิวหนัง (Impetigo) ฝี (Furuncle) ฝีฝักบัว (Carbuncles) บางสายพันธุ์สามารถสร้างสารพิษ Exfoliative toxin ที่ทำให้เกิดโรคผิวหนังหลุดลอกที่เรียกว่า Staphylococcal scalded skin syndrome (SSSS) [2, 3] ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีสมุนไพรหลายชนิดมีสรรพคุณรักษาโรคผิวหนังดังกล่าวได้

สมุนไพรที่มีประสิทธิภาพในการรักษาโรคผิวหนัง เช่น กลุ่มบก (*Crateva adansonii* DC.) โดยสารสกัดใบกลุ่มบกในชั้นเอทิลอะซิเตทสามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* มีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียเท่ากับ 0.31 mg/ml [4] จากการศึกษาสารพฤกษเคมีจากการดำนจลิ้นทรีของใบกลุ่มบกพบ เทอร์ปีนอยด์ สเตียรอยด์ และสารสกัดอีเทอร์ มีฤทธิ์ด้านการอักเสบที่ความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ที่ 100 mg/kg การศึกษาน้ำมันหอมระเหยจากดอกกระเจียวแดง (*Curcuma sessilis* Gage.) โดยใช้ตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกชนิด *S. aureus* ได้ [5] สารสกัดจากใบน้อยหน่า (*Annona squamosa* Linn.) มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย ต้านอนุมูลอิสระ และต้านมะเร็ง [6, 7] และจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดน้อยหน่า พบว่ามีสาร Anonaine Alkaloid, Isocorydine สารกลุ่ม Acetogenin ชื่อ Annonacin A ส่วนใบน้อยหน่ามีสารสำคัญ ได้แก่ Linalool, Borneol, Eugenol, Farnesol และ Geraniol

เป็นต้น [8] และกระทกรก (*Passiflora foetida* L.) ที่สกัดจากใบพบว่ามีความเข้มข้น 0.5 - 5.0 µg/ml มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S. aureus* มีค่า Inhibition zone เท่ากับ 12±0.16-21±0.08 mm ตามลำดับ [9] สารสกัดจากใบและผลของกระทกรกมีคุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรียอื่นๆ ได้แก่ *Pseudomonas putida*, *Vibrio cholerae*, *S. flexneri* และ *S. pyogenes* เพื่อใช้รักษาโรคท้องเสีย ลำไส้อักเสบ การติดเชื้อไข และโรคผิวหนังได้ [10] นอกจากนั้นยังพบว่ามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดี [11] ซึ่งสมุนไพรทั้ง 5 ชนิดได้ถูกเขียนไว้ในตำราแพทย์แผนโบราณทั่วไป สาขาเภสัชกรรม มีสรรพคุณในการรักษาโรคผิวหนัง [12] อีกทั้งมีรายงานว่าสรรพคุณรักษาโรคผิวหนังตามภูมิปัญญาหมอพื้นบ้าน เช่น ใบน้อยหน่ารสเผื่อนมาตำให้ละเอียดพอกแก้ฟกบวม ขมิ้นพวยธิผิวหนัง รักษากลากเกลื้อน ใบตำกับเกลือใช้เป็นยาพอกฝี แผลพุพองเป็นหนอง [13] ใบกระทกรกนำมาตำให้ละเอียดผสมกับน้ำพอสสมควร นำมาทาวันละ 3-4 ครั้ง เพื่อใช้รักษาโรคผิวหนัง แก้อาการคัน [14] เป็นต้น

จากข้อมูลข้างต้นจึงมีความจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพของสมุนไพรดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการต้านการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* โดยแบ่งออกเป็นทดสอบคุณสมบัติการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ของสมุนไพร 5 ชนิด ได้แก่ ดอกกระเจียวแดง ใบกุ่มบก ใบชันทองพยาบาท ใบน้อยหน่า และใบตำลึงทอง หรือกระทกรก การพัฒนาตำรับครีมที่มีความคงตัวทางด้านกายภาพและชีวภาพ ที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* โดยคัดเลือกสารสกัดสมุนไพรที่มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ที่ดีที่สุด เพื่อนำไปพัฒนาเป็นครีมสมุนไพรได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ด้านสมุนไพรและการแพทย์แผนไทยต่อไปในอนาคต

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การสกัดสมุนไพร

นำสมุนไพรสดทั้ง 5 ชนิด คือ ดอกกระเจียวแดง ใบกุ่มบก ใบชันทองพยาบาท ใบน้อยหน่า และใบตำลึงทอง หรือกระทกรก (ใช้ใบพอสลาด) ซึ่งได้ตัวอย่างจากหมอพื้นบ้านในจังหวัดสกลนคร มาล้างทำความสะอาด ผึ่งลมให้แห้ง สับเป็นชิ้นเล็ก แล้วอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นบดให้ละเอียด แล้วชั่งสมุนไพร 250 กรัม มาผสมกับเอทานอลร้อยละ 70 และ 95 ในอัตราส่วน 1:5 และสกัดด้วยวิธีการต้มในน้ำในอัตราส่วน 1:5 ต้มเคี่ยวให้เหลือ 1 ใน 3 ส่วน แล้วกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำส่วนของสารละลายที่ได้ไประเหยด้วย Rotary evaporator จนตัวทำละลายแห้งสนิท และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาทดสอบ

2. การศึกษาฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ด้วยวิธี Agar well diffusion

ซึ่งอาหารเลี้ยงเชื้อ Mueller-Hinton agar (MHA) เติมน้ำกลั่นตามปริมาตร ละลายอาหารเลี้ยงเชื้อโดยการต้มและคนด้วยแท่งแก้วตลอดเวลา นำไปทำให้ปราศจากเชื้อโดยใช้หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 30 นาที ทิ้งให้เย็น ตรวจสอบความเป็นกรดของอาหารเลี้ยงเชื้อให้มีค่า pH 6.8-7.2 จากนั้นเทอาหารเลี้ยงเชื้อลงในจานเพาะเชื้อ ให้มีความหนา 4 มิลลิเมตร รอให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัว และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำจานเพาะเชื้อเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

เพาะเลี้ยงเชื้อ *S. aureus* ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MHA แล้วทำการบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 - 18 ชั่วโมง เชื้อแบคทีเรียที่เจริญแล้วจาก Tryptic soy broth (TSB) ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ปรับความขุ่นให้เท่ากับ 0.5 McFarland นำไม้พินสำลีปลอดเชื้อ จุ่มลงในหลอดที่มีเชื้อแบคทีเรียที่ปรับค่าความขุ่น จากนั้นป้ายเชื้อลงบน MHA ให้ทั่ว ใช้ Cork borer เบอร์ 3 เจาะลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เตรียมสารสกัดหยาบโดยชั่งสารสกัด 0.6666 mg แล้วเติม DMSO ร้อยละ 1 ปริมาตร 1 ml จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 666.60 µg/ml จากนั้นเจือจางสารสกัดหยาบด้วยวิธี two-fold dilution จนมีความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 83.33 µg/ml ทดสอบการยับยั้งเชื้อโดยปิเปตสารสกัดที่ปริมาตร หลุมละ 30 µl ใช้ยา Dicloxacillin ความเข้มข้น 40 µg/ml เป็นตัวควบคุมผลบวก (Positive control) และใช้ Dimethyl sulfoxide (DMSO) ร้อยละ 1 เป็นตัวควบคุมผลลบ (Negative control) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา



16 - 18 ชั่วโมง ตรวจสอบผลการทดสอบโดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางการยับยั้ง (Inhibition zone) ด้วยเวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์ ในหน่วยมิลลิเมตร บันทึกและวิเคราะห์ผลโดยการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง

3. การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ (Minimum inhibition concentration; MIC) โดยวิธี Macro broth dilution

เตรียมสารสกัดหยาบโดยชั่งสารสกัด 0.50 mg แล้วเติม DMSO ร้อยละ 1 ปริมาตร 1 ml จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 500 µg/ml ทำการทดสอบการยับยั้งเชื้อต่อสารสกัดกุ่มบก กระเจียวแดง และชันทองพญาบาท ด้วยวิธี Macro broth dilution ในหลอดทดลองขนาด 13 x 100 mm ที่ผ่านการทำให้ปลอดเชื้อ ทำการเจือจางสารสกัดหยาบแบบอนุกรม (serial dilution) ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 1 ml จำนวน 11 ความเข้มข้น (250, 125, 62.5, 31.25, 15.63, 7.81, 3.91, 1.95, 0.98, 0.49 และ 0.24 µg/ml) เติมน้ำเชื้อ *S. aureus* ที่เตรียมไว้ลงในหลอดทดลอง จำนวนหลอดละ 1 ml บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง ทำการอ่านผลการทดสอบค่า MIC โดยสังเกตหลอดสุดท้ายที่ไม่มีการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (อาหารเลี้ยงเชื้อในหลอดไม่ขุ่น) ความเข้มข้นของสารสกัดในหลอดนี้จะเป็นค่า MIC

4. การทดสอบความคงตัวของผลิตภัณฑ์

การทดสอบความคงตัวของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย 1) ประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ โดยสังเกตลักษณะเนื้อครีม การแยกชั้น การตกตะกอน และทดสอบความหนืด โดยใช้เครื่องวัดความหนืดของผลิตภัณฑ์ (Brookfield viscometer) 2) ประเมินคุณสมบัติทางเคมีโดยทำการทดสอบความเป็นกรด-ด่าง โดยใช้ pH meter และ 3) ประเมินความคงตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะเร่ง โดยวิธี Heating cooling จำนวน 5 รอบ โดยนำผลิตภัณฑ์เก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่ 4 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง เมื่อครบ 48 ชั่วโมง ให้ตั้งอุณหภูมิเป็น 45 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง นับเป็น 1 รอบ กำหนด 5 รอบ โดยดำเนินการทดสอบ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) โดยกำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย Inhibition zone ของสารสกัดสมุนไพรกับ Negative control ใช้สถิติ t-test และการเปรียบเทียบฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียของตำรับครีมสมุนไพรใช้สถิติ One-way analysis of variance (ANOVA) ตามด้วย Bonferroni test ด้วยโปรแกรม SPSS (Version 20, SPSS Inc. Chicago, IL, USA)

ผลการวิจัย

1. ผลของสารสกัดสมุนไพร

การสกัดสมุนไพรด้วยวิธีการหมักในเอทานอลร้อยละ 95 เอทานอลร้อยละ 70 และการต้มด้วยน้ำ ได้สารสกัดหยาบแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวหนืด พบปริมาณสารสกัดหยาบแตกต่างกันคิดเป็นร้อยละของผลผลิต (%Yield) อยู่ในช่วงร้อยละ 0.85 ถึงร้อยละ 3.36 ร้อยละ 0.88 ถึงร้อยละ 3.88 และร้อยละ 2.72 - 10.88 ตามลำดับ โดยสารสกัดจากการต้มด้วยน้ำมีปริมาณร้อยละของผลผลิตมากกว่าสารสกัดจากการหมักด้วยเอทานอลร้อยละ 70 และเอทานอลร้อยละ 95 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1

2. ผลการศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อ *S. aureus*

สารสกัดสมุนไพรด้วยเอทานอลร้อยละ 95 พบว่าความเข้มข้น 666.60 µg/ml สารสกัดกุ่มบกและชันทองพญาบาท มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อโดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 18.67 ± 1.53 และ 8.67 ± 1.53 mm ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น 333.30 µg/ml สารสกัดจากกุ่มบกมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อโดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 15.67 ± 1.53 mm ที่ความเข้มข้น 166.65 µg/ml สารสกัดจากกุ่มบกมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อโดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 13.00 ± 1.17 mm แต่ที่ความเข้มข้น 83.33 µg/ml ไม่มีสารสกัดใดที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อได้ ดังตารางที่ 2



ตารางที่ 1 ร้อยละของผลผลิตพืชสมุนไพรที่สกัดด้วยตัวทำละลายต่างๆ

สมุนไพร	ส่วนของพืช	ร้อยละของผลผลิตที่สกัดได้		
		เอทานอลร้อยละ 95	เอทานอลร้อยละ 70	ต้มยำ
กุ่มบก (<i>Crateva adansonii</i> DC.)	ใบ	0.85	0.88	2.80
กระเจียวแดง (<i>Curcuma sessilis</i> Gage.),	ดอก	1.34	2.25	4.81
ชันทองพญาบาท (<i>Suregada multiflorum</i> Baill.),	ใบ	0.85	1.64	2.72
ตำลึงทอง (กระทกรก) (<i>Passiflora foetida</i> L.)	ใบ	2.40	3.88	5.59
น้อยหน่า (<i>Annona squamosa</i> Linn.)	ใบ	3.36	3.63	10.88

สารสกัดสมุนไพรด้วยเอทานอลร้อยละ 70 พบว่าที่ความเข้มข้น 666.60 $\mu\text{g/ml}$ สารสกัดจากชันทองพญาบาทและกระเจียวแดงมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อ โดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 10.67 ± 1.15 และ 11.33 ± 0.58 mm ตามลำดับ ที่ความเข้มข้น 333.30 $\mu\text{g/ml}$ สารสกัดจากกระเจียวแดงมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อ โดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 8.33 mm แต่ที่ความเข้มข้น 166.65 และ 83.33 $\mu\text{g/ml}$ ไม่มีสารสกัดใดที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อได้ ดังตารางที่ 2

การศึกษาฤทธิ์การต้านเชื้อของสารสกัดสมุนไพรเดี่ยวที่สกัดจากการต้มด้วยน้ำ พบว่าที่ความเข้มข้น 666.60 $\mu\text{g/ml}$ สารสกัดจากกระเจียวแดงมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อ โดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 13.33 ± 1.53 mm ที่ความเข้มข้น 333.30 $\mu\text{g/ml}$ มีค่า Inhibition zone เท่ากับ 10.33 ± 2.31 mm แต่ที่ความเข้มข้น 166.65 และ 83.33 $\mu\text{g/ml}$ ไม่มีสารสกัดใดที่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อได้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ฤทธิ์การยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ของสารสกัดสมุนไพร โดยวิธี Agar well diffusion

สมุนไพร	ตัวทำละลาย	ค่าเฉลี่ย Inhibition zone (mm)			
		666.60 ($\mu\text{g/ml}$)	333.30 ($\mu\text{g/ml}$)	166.65 ($\mu\text{g/ml}$)	83.33 ($\mu\text{g/ml}$)
กุ่มบก (<i>C. adansonii</i> DC.)	เอทานอล ร้อยละ 95	$18.67 \pm 1.53^*$	$15.67 \pm 1.53^*$	$13.00 \pm 1.17^*$	NA
	เอทานอล ร้อยละ 70	NA	NA	NA	NA
	ต้มยำ	NA	NA	NA	NA
ชันทองพญาบาท (<i>S. multiflorum</i> Baill.)	เอทานอล ร้อยละ 95	$8.67 \pm 1.53^*$	NA	NA	NA
	เอทานอล ร้อยละ 70	$10.67 \pm 1.15^*$	NA	NA	NA
	ต้มยำ	NA	NA	NA	NA
ตำลึงทอง (กระทกรก) (<i>P. foetida</i> L.)	เอทานอล ร้อยละ 95	NA	NA	NA	NA
	เอทานอล ร้อยละ 70	NA	NA	NA	NA
	ต้มยำ	NA	NA	NA	NA



ตารางที่ 2 (ต่อ)

สมุนไพร	ตัวทำละลาย	ค่าเฉลี่ย Inhibition zone (mm)			
		666.60 ($\mu\text{g/ml}$)	666.60 ($\mu\text{g/ml}$)	666.60 ($\mu\text{g/ml}$)	666.60 ($\mu\text{g/ml}$)
กระเจียวแดง (<i>C. sessilis</i> Gage.)	เอทานอล ร้อยละ 95	NA	NA	NA	NA
	เอทานอล ร้อยละ 70	11.33 $\pm$ 0.58*	8.33 $\pm$ 0.58*	NA	NA
	ต้มยำ	13.33 $\pm$ 1.53*	10.33 $\pm$ 2.31*	NA	NA
น้อยหน่า (<i>A. squamosa</i> Linn.)	เอทานอล ร้อยละ 95	NA	NA	NA	NA
	เอทานอล ร้อยละ 70	NA	NA	NA	NA
	ต้มยำ	NA	NA	NA	NA
Positive control (Dicloxacillin 40 $\mu\text{g/ml}$)		36.25 $\pm$ 0.54	36.25 $\pm$ 0.54	36.25 $\pm$ 0.54	36.25 $\pm$ 0.54
Negative control (DMSO ร้อยละ 1)		NA	NA	NA	NA

หมายเหตุ: แสดงข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) * $p < 0.05$ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบกับ Negative control ที่ความเข้มข้นระดับเดียวกันของสารสกัดสมุนไพรต่างชนิดกันโดยใช้สถิติ t-test (NA คือ ไม่เกิดโซนการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย)

3. การศึกษาค่าความเข้มข้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารสกัดสมุนไพรเดี่ยว ด้วยวิธี Macro broth dilution

จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าสารสกัดกุ่มบกจากการหมักด้วยเอทานอลร้อยละ 95 สารสกัดชันทองพญาบาทจากการหมักด้วยเอทานอลร้อยละ 70 และสารสกัดกระเจียวแดงจากการต้มด้วยน้ำ เป็นสารสกัดสมุนไพรที่มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อ *S. aureus* ได้ดีที่สุด จึงเลือกนำสารสกัดดังกล่าวมาทำการทดสอบเพื่อหาค่า MIC ด้วยวิธี Broth dilution โดยใช้อาหารเหลว TSB เป็นชุดควบคุมเชิงลบ (Negative control) พบว่าสารสกัดกุ่มบกที่สกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 95 และสารสกัดชันทองพญาบาทที่สกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 สามารถยับยั้งเชื้อได้ โดยมีค่า MIC เท่ากับ 500 $\mu\text{g/ml}$

4. ผลการทดสอบความคงตัว และผลการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรีย *S. aureus* ของสูตรตำรับครีมสมุนไพร

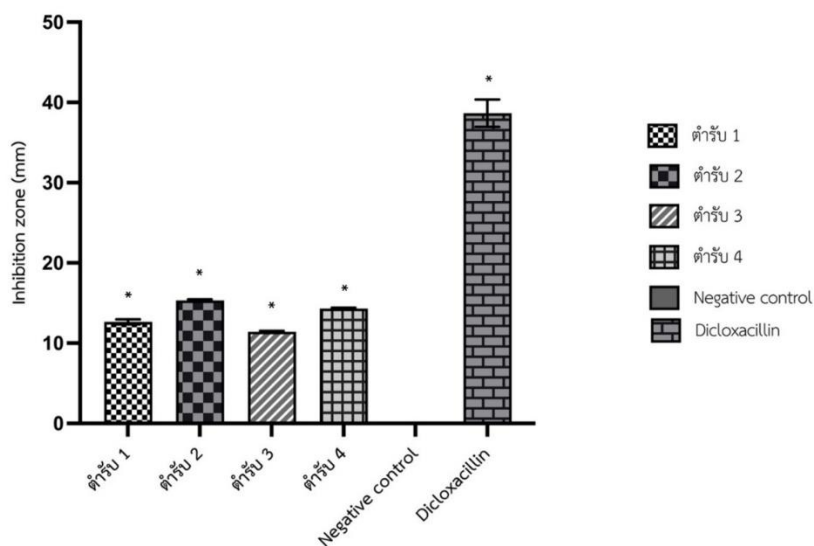
การทดสอบครีมพื้นที่จะใช้ในการทดสอบกับสารสกัดสมุนไพร โดยการทดสอบค่าความคงตัวของผลิตภัณฑ์ (Stability test by cooling heating test) พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ สี กลิ่น ความเนียน และการแยกชั้น ไม่แตกต่างกัน โดยค่าความหนืด เท่ากับ 4008.00 $\pm$ 799.17 cP และมีค่า pH เท่ากับ 6.23 $\pm$ 0.02 สูตรตำรับครีมสมุนไพร 4 สูตร ซึ่งมีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าตำรับที่ 2 มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียสูงสุด (15.33 $\pm$ 4.51 mm) เมื่อเปรียบเทียบกับตำรับอื่น โดยใช้สารสกัดจาก *C. adansonii* DC. และ *S. multiflorum* Baill. ในอัตราส่วน 1:1 (36% ในครีม) แสดงดังภาพที่ 1 ในขณะที่ Dicloxacillin มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียสูงสุดที่ 36.25 $\pm$ 0.54 mm

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากรายงานการวิจัยของ Wutithamawech และคณะ พบว่าสารสกัดจากชันทองพญาบาทที่สกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ของสารสกัดชันทองพญาบาทที่สกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 70 ในงานวิจัยนี้ซึ่งพบว่ามีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้เช่นกันโดยสามารถยับยั้งเชื้อ *S. aureus* มีค่า Inhibition zone อยู่ในช่วง 10.67 $\pm$ 1.15 mm และจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ได้ดี ได้แก่ Diterpene lactones, Diterpenoid และ Alkaloids [15]

ตารางที่ 3 ตำรับครีมสมุนไพรที่ผสมสารสกัดสมุนไพร

Ingredient (g)	สูตรตำรับครีมสมุนไพร (%w/w)			
	ตำรับที่ 1	ตำรับที่ 2	ตำรับที่ 3	ตำรับที่ 4
Cremophor RH 40 ®	6.0	6.0	6.0	6.0
Mineral oil	5.0	5.0	5.0	5.0
Cetyl alcohol	4.0	4.0	4.0	4.0
Stearyl alcohol	4.0	4.0	4.0	4.0
Hard paraffin	5.0	5.0	5.0	5.0
Isopropyl myristate	5.0	5.0	5.0	5.0
1% Carbopol940	2.0	2.0	2.0	2.0
Concentrated paraben	1.0	1.0	1.0	1.0
Glycerin	3.0	3.0	3.0	3.0
Propylene glycol	3.0	3.0	3.0	3.0
Dimethicone	4.0	4.0	4.0	4.0
<i>Suregada multiflorum</i> Baill. extract	1.0	1.5	-	1.5
<i>Curcuma sessilis</i> Gage. extract	1.0	-	1.5	1.5
<i>Crateva adansonii</i> DC. extract	1.0	1.5	1.5	-
Deionized water HDPE	100.0	100.0	100.0	100.0



ภาพที่ 1ฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียของตำรับครีมสมุนไพร

หมายเหตุ: แสดงข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) * $p < 0.05$, มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยเปรียบเทียบกับ Negative control ที่ความเข้มข้นระดับเดียวกันของสารสกัดสมุนไพรต่างชนิดกัน โดยใช้สถิติ One-way analysis of variance (ANOVA) ตามด้วย Bonferroni test ($n=3$)

สารสกัดด้วยเอทานอลร้อยละ 95 ของกลุ่มบักมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้ดีที่สุดจากสมุนไพรทั้งหมด 5 ชนิดโดยมีค่า Inhibition zone อยู่ในช่วง 18.67 ± 1.53 mm ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Parekh และ Chanda [16] ในขณะที่สารสกัดกลุ่มบักที่สกัดด้วยน้ำไม่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Agboke และคณะ



ซึ่งสามารถหาค่า MIC (Minimal Inhibitory Concentration) เท่ากับ 1.5 mg/ml และค่า MBC (Minimal Bactericidal Concentration) เท่ากับ >10 mg/ml [17] และจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ได้ดี ได้แก่ Flavonoids, Glycosides, Phenols, Terpenoids, Alkaloids, Anthraquinone, Saponins, Tannins และ Steroids [18, 19]

สารสกัดด้วยน้ำของกระเจียวแดงมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้โดยมีค่า Inhibition zone เท่ากับ 13.33 ± 1.53 mm ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jose และ Thomas ที่ทำการทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* โดยใช้ความเข้มข้นมากที่สุดที่ 5 mg/ml ซึ่งไม่สามารถยับยั้งเชื้อได้ [20] และจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ได้ดี ได้แก่ Phenols และ Flavonoids [21]

จากรายงานการวิจัยของ Al-Nemari และคณะ พบว่าสารสกัดด้วยเมทานอลของใบน้อยหน่ามีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ โดยมี Inhibition zone เท่ากับ 16.5 ± 0.5 mm ส่วนสารสกัดด้วยน้ำ อะซิโตน และ DMSO ไม่สามารถยับยั้งเชื้อได้ [7] ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ทำการทดลองโดยใช้สารสกัดใบน้อยหน่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 666.60 µg/ml ซึ่งไม่สามารถยับยั้งเชื้อได้ และจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ได้ดี ได้แก่ Alkaloids, Flavonoids, Terpenoids และ Acetogenins [22]

จากการศึกษาของ Emelda และคณะ พบว่าผลของสารสกัดใบกระทกรกในชั้นเอทานอลร้อยละ 95 มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้โดยใช้ความเข้มข้นที่ 4.00 mg/ml ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ทำการทดลองโดยใช้สารสกัดกระทกรกที่ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 666.60 µg/ml ซึ่งเป็นความเข้มข้นต่ำที่ไม่สามารถยับยั้งเชื้อได้ และจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ได้ดี ได้แก่ Steroids, Tannins, Polyphenols และ Flavonoids [23]

เมื่อนำสารสกัดที่ทำการทดสอบฤทธิ์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียเบื้องต้นด้วยวิธี Agar well diffusion แล้วมาทำการทดสอบหาค่า MIC ด้วยวิธี Broth dilution technique พบว่าในสารสกัดใบกุ่มบกด้วยเอทานอลร้อยละ 95 มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* โดยมีค่า MIC อยู่ที่ 500 µg/ml สารสกัดใบขันทองพยาบาทด้วยเอทานอลร้อยละ 70 มีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* โดยมีค่า MIC อยู่ที่ 500 µg/ml ในขณะที่สารสกัดดอกกระเจียวด้วยน้ำไม่สามารถหาค่า MIC ได้เนื่องจากกำหนดค่าความเข้มข้นของสารในปริมาณที่น้อยเกินไปคือ 500 µg/ml ซึ่งเชื้อแบคทีเรียยังสามารถเจริญเติบโตได้

ผลการทดสอบความคงตัวทางกายภาพของสูตรครีมพื้นทั้ง 4 สูตร มาทดสอบความคงตัวทางกายภาพโดยการทำการ Heating cooling cycle จำนวน 5 รอบ พบว่าครีมพื้นสูตรที่ 4 มีความคงตัวทางกายภาพดีที่สุด ไม่มีการแยกชั้นของเนื้อครีม ทั้งนี้เนื่องจากสาร Dimethicone ซึ่งเป็นสารที่สามารถคงสภาพได้ทั้งในอุณหภูมิต่ำและสูง เมื่อผ่านสภาวะเร่งทำให้ครีมพื้นทั้ง 4 สูตร สามารถคงสภาพได้ทั้งในอุณหภูมิต่ำและสูงในปริมาณที่เท่ากัน แต่ในสูตรที่ 3 และ 4 มีการปรับลดปริมาณ Hard paraffin, Cetyl alcohol และ Stearyl alcohol ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติเพิ่มความหนืดและการเพิ่มการคงตัวในสูตรครีม จึงทำให้สูตรที่ 4 มีเนื้อครีมที่ไม่เหนียวข้นเกินไป ซึมซาบได้เร็วขึ้น เนื้อครีมมีความมันเล็กน้อย เนื่องจากสารเคมีบางตัวที่ใช้ในการทำครีมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากสูตรเดิม ผลการทดสอบคุณสมบัติทางชีวภาพ พบว่าหลังการทดสอบตำรับครีมที่ 4 มีค่า pH 6.23 ± 0.02 ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้ที่ผิวหนัง [24]

ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าให้กับสมุนไพรไทย ได้แก่ กุ่มบก กระเจียวแดง และขันทองพยาบาท ซึ่งสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ดูแลผิวและยารักษาโรคผิวหนัง สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ โดยสามารถช่วยส่งเสริมการใช้สมุนไพรท้องถิ่นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและความงาม ซึ่งเป็นการสร้างรายได้ให้กับชุมชนที่ปลูกและเก็บเกี่ยวสมุนไพร รวมถึงเป็นการอนุรักษ์และส่งเสริมภูมิปัญญาท้องถิ่น อย่างไรก็ตามควรศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพอื่นๆ รวมทั้งควรมีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคการสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับสมุนไพรแต่ละชนิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารออกฤทธิ์ และลดการสูญเสียสารสำคัญในกระบวนการผลิต ซึ่งอาจนำไปสู่ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงขึ้น



กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคลากรและสถานที่ในการดำเนินงาน จาก โรงพยาบาลการแพทย์แผนไทยหลวงปู่เทสก์ เทษะพรหม และคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

เอกสารอ้างอิง

1. Ro BI, Dawson TL. The role of sebaceous gland activity and scalp microfloral metabolism in the etiology of seborrheic dermatitis and dandruff. J Investig Dermatol Symp Proc 2005;10(3):194-7.
2. Brewer JD, Hundley MD, Meves A, Hargreaves J, McEvoy MT, Pittelkow MR. Staphylococcal scalded skin syndrome and toxic shock syndrome after tooth extraction. J Am Acad Dermatol 2008;59(2):342-6.
3. Iwatsuki K, Yamasaki O, Morizane S, Oono T. Staphylococcal cutaneous infections: invasion, evasion and aggression. J Dermatol Sci 2006;42(3):203-14.
4. Lagnika L, Anago E, Atindehou M, Adjahoutonon B, Dramane K, Sanni A. Antimicrobial activity of *Crataeva religiosa* Forst against bacteria isolated from *Thryonomys swinderianus* Temminck. Afr J Biotechnol 2011;10(49):10034-9.
5. Rajamma AG, Bai V, Nambisan B. Antioxidant and antibacterial activities of oleoresins isolated from nine *Curcuma* species. Phytopharmacology 2012;2(2):312-7.
6. Jayshree P, Kumar V. *Annona squamosa* L.: phytochemical analysis and antimicrobial screening. J Pharm Res 2008;1(1):34-8.
7. Al-Nemari R, Al-Senaidy A, Semlali A, Ismael M, Badjah-Hadj-Ahmed AY, Ben Bacha A. GC-MS profiling and assessment of antioxidant, antibacterial, and anticancer properties of extracts of *Annona squamosa* L. leaves. BMC Complement Med Ther 2020;20(1):296.
8. Patel JD, Kumar V. *Annona squamosa* L.: phytochemical analysis and antimicrobial screening. J Pharm Res 2008;1(1):34-8.
9. Patil A, Paikrao H. Bioassay Guided Phytometabolites Extraction for Screening of Potent Antimicrobials in *Passiflora foetida* L. J App Pharm Sci 2012;2(9):137.
10. Mohanasundari C, Natarajan D, Srinivasan K, Umamaheswari S, Ramachandran A. Antibacterial properties of *Passiflora foetida* L.–a common exotic medicinal plant. Afr J Biotechnol 2007;6(23):2650-3.
11. Song Y, Wei XQ, Li MY, Duan XW, Sun YM, Yang RL, et al. Nutritional Composition and Antioxidant Properties of the Fruits of a Chinese Wild *Passiflora foetida*. Molecules 2018;23(2):459.
12. กองการประกอบโรคศิลปะ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. ตำราแพทย์แผนโบราณทั่วไป สาขาเภสัชกรรม นนทบุรี: ม.ป.พ.; 2541.
13. รุ่งระวี เต็มศิริฤกษ์กุล, พร้อมจิต ศรีลัมพ์, วงศ์สถิต ฉั่วกุล, วิชิต เปานิธิ, สมภาพ ประธานธรรักษ์, นพมาศ สุนทรเจริญนนท์. สมุนไพรไทยที่ควรรู้. กรุงเทพฯ: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน); 2542.
14. นิจศิริ เรืองรังษี, ธวัชชัย มังคละคุปต์. สมุนไพรไทย เล่ม 1. กรุงเทพฯ: บี เฮลท์ดี; 2547.
15. Wutithamawe W, Tantirungkij M, Liangsakul P. Antibacterial potential of some Thai medicinal plants. Int J Pharm Bio Sci 2014;5(1):412-21.
16. Parekh J, Chanda S. Antibacterial and phytochemical studies on twelve species of Indian medicinal plants. Afr J Biomed Res 2007;10(2):175-81.



17. Agboke AA, Attama AA, Momoh MA. Evaluation of the antimicrobial activities of crude extract of *Cryptolepis sanguinolenta* and *Crateva adansonii* leaves and their interactions. J App Pharm Sci 2011;1(10):85-9.
18. Thirumalaisamy R, Ammashi S, Muthusamy G. Screening of anti-inflammatory phytochemicals from *Crateva adansonii* leaf extracts and its validation by in silico modeling. J Genet Eng Biotechnol 2018;16(2):711-9.
19. Pervaiz I, Hasnat M, Ahmad S, Khurshid U, Saleem H, Alshammari F, et al. Phytochemical composition, biological propensities, and in-silico studies of *Crateva adansonii* DC.: A natural source of bioactive compounds. Food Bioscience 2022;49:101890.
20. Jose S, Thomas TD. High-frequency callus organogenesis, large-scale cultivation and assessment of clonal fidelity of regenerated plants of *Curcuma caesia* Roxb., an important source of camphor. Agroforest Syst 2015;89(5):779-88.
21. อัญชลี ศรีจำเริญ. การสกัดดอกกระเจียวแดงและประเมินกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ เปรียบเทียบสภาวะก่อนและหลังการเลียนแบบกระบวนการย่อยอาหาร. วารสารวิทยาศาสตร์ มข 2560;45(4):844-57.
22. Al Kazman BSM, Harnett JE, Hanrahan JR. Traditional Uses, Phytochemistry and Pharmacological Activities of Annonaceae. Molecules 2022;27(11):3462.
23. Emelda A, Arman, Yuliana D, Amin A. Antimicrobial Potency of *Passiflora Foetida* Linn from South Sulawesi Indonesia Against Bacteria In Vitro. Int J Pharm Technol 2015;7(3):9562-6.
24. Lukić M, Pantelić I, Savić SD. Towards Optimal pH of the Skin and Topical Formulations: From the Current State of the Art to Tailored Products. Cosmetics 2021;8(3):69.



ระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกร โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

Farrowing Monitoring System for Sows Using Deep Learning Techniques

สุธีรา พึงสวัสดิ์^{1*} จันเพ็ญ บางสำรวจ¹ พงศกร บำรุงไทย² และ พันธกร พนาพิทักษ์กุล³¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ชลบุรี 20230³คณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330Suteera Puengsawad^{1*}, Janpen Bangsumruaj¹, Pongsakon Bamrunghai², and
Pantagon Panapitukkul³¹Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn 10540²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Sriracha Campus,
Chonburi 20230³Faculty of Veterinary Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330

*Corresponding author: aj-tarn@hotmail.com

Received: 9 July 2024/ Revised: 10 October 2024/ Accepted: 15 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกรด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกร่วมกับการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการสัมภาษณ์และศึกษาพฤติกรรมแม่สุกรในฟาร์มสุกรที่จังหวัดนครปฐม โดยใช้อัลกอริทึม YOLOv7 และ Deep SORT ในการตรวจจับและติดตามการเคลื่อนไหวของวัตถุ จากนั้นแสดงผลไปยังโปรแกรมประยุกต์บนเว็บไซต์และแจ้งเตือนความผิดปกติผ่านแอปพลิเคชันไลน์ จากการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำโดยเปรียบเทียบกับจำนวนด้วยคนพบว่า การประมวลผลภาพและท่าทางมีความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 96.34 ส่วนการแจ้งเตือนผู้เลี้ยงสุกรมีความถูกต้องเฉลี่ยร้อยละ 96.50 แสดงให้เห็นว่าระบบนี้สามารถใช้งานได้จริงในสภาพแวดล้อมคอกสุกรทั่วไป อย่างไรก็ตามหากต้องการนำไปใช้ในโรงเรือนภาคอุตสาหกรรม จำเป็นต้องปรับการเรียนรู้ของโมเดลจากฟาร์มสุกรในสถานที่จริงอีกครั้งเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการตรวจจับมากขึ้น

คำสำคัญ: แม่สุกร การคลอดลูก การเรียนรู้เชิงลึก การติดตามวัตถุ การตรวจจับวัตถุ

Abstract

This research aims to develop a surveillance system for monitoring prepartum symptoms in sows using deep learning techniques combined with interviews and pig behavior observations in Nakhon Pathom province. The system uses YOLOv7 and Deep SORT for object detection and tracking. When a sow moves, the data was recorded via a web application, which sends abnormality alerts through the LINE application. For accuracy testing, the system data were compared with manually recorded data by human. The results



showed that achieved an average accuracy of 96.34%, while alert accuracy for pig farmers averaged 96.5%. These results indicated that the system is practically applicable in typical pig pen environments. However, to implement it in industrial-scale facilities, the model must be retrained with data from real farm environments.

Keyword: Sows, Farrowing, Deep learning, Deep Sort, YOLO

บทนำ

การเลี้ยงสุกรถือเป็นธุรกิจที่สามารถสร้างรายได้และมีความสำคัญต่อเกษตรกรไทย ปัจจุบันรูปแบบการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน จากระบบการเลี้ยงแบบพื้นบ้านสู่การเลี้ยงในรูปแบบเชิงพาณิชย์หรืออุตสาหกรรม [1] ในการผลิตสุกร ช่วงการคลอด (Farrowing หรือ Parturition) ถือเป็นช่วงที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของทั้งแม่สุกรและลูกสุกร ปัญหาหลายอย่างสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในช่วงก่อน ระหว่างและหลังคลอด ซึ่งอาจนำไปสู่การตายของแม่สุกรหรือลูกสุกร ในกรณีที่เลวร้ายที่สุดอาจทำให้เกิดปัญหาสุขภาพหลังคลอด เช่น ลูกสุกรมีน้ำหนักแรกคลอดต่ำ หรือแม่สุกรมีระยะฟื้นตัวหลังคลอดนานขึ้น ดังนั้นการเฝ้าระวังอาการผิดปกติตั้งแต่ระยะก่อนคลอดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถวินิจฉัยและแก้ไขปัญหาได้อย่างทันท่วงที โดยทั่วไปผู้เลี้ยงสุกรมักนอนเฝ้าดูแม่สุกรในคอก แต่ไม่สามารถติดตามอาการของแม่สุกรได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางคืนทำให้แม่และลูกสุกรมีความเสี่ยงที่จะได้รับอันตรายในช่วงเวลาดังกล่าว [2] มีการศึกษาพบว่าอัตราการตายของลูกสุกรก่อนหย่านมทั่วโลกอยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 [3-7] ส่วนในประเทศไทยจากการศึกษาของมรกดและเผด็จ [8] ในระหว่างเดือนมกราคม 2552 ถึงเดือนธันวาคม 2555 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอัตราการตายประมาณร้อยละ 14.50 โดยส่วนมากร้อยละ 50-80 มักพบอัตราการตายในช่วงสัปดาห์แรกหลังคลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 3 วันแรกถือเป็นช่วงวิกฤติที่สุด [9] ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการตายของลูกสุกรแรกคลอดสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ลูกสุกร (เช่น ความอ่อนแอ เพศ และน้ำหนักแรกคลอด) แม่พันธุ์ (เช่น นม น้ำเหลือง ลำดับท้อง ความเครียด และอาหาร) และสิ่งแวดล้อม (เช่น ฤดูกาล อุณหภูมิ โรคเชื้อ และการจัดการ) [10] แต่สาเหตุหลักของการตายมักเกิดจากการคลอดและการถูกแม่สุกรทับ รองลงมาคือความอ่อนแอเนื่องจากน้ำหนักแรกคลอดต่ำ และอันดับสามคือการตายเนื่องจากโรค

เพื่อป้องกันความเสียหายดังกล่าวผู้เลี้ยงสุกรจึงเฝ้าสังเกตอาการต่าง ๆ และการเคลื่อนไหวของแม่สุกรแต่อย่างไรก็ตามผู้เลี้ยงไม่สามารถเฝ้าสังเกตได้ตลอดเวลา ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการเลี้ยง เช่น การใช้เทคโนโลยีลอราแวนเป็นตัวกลางในการสื่อสารข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้น กำลังไฟฟ้า และการวัดน้ำหนักของสุกรจากกล้อง รวมถึงติดตามพฤติกรรมของสุกรและสภาพแวดล้อม [11] ในสัตว์ชนิดอื่นก็มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเช่นกัน เช่น การควบคุมระบบฟาร์มไก่ด้วยมือถือ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) ในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นเพื่อควบคุมผลผลิตให้มีประสิทธิภาพสูง [12]

นอกจากนี้ยังมีการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการเฝ้าระวังสัตว์ต่าง ๆ รัก น้ำใสและคณะ [13] ได้ทดลองใช้ You Only Look Once (YOLO) เพื่อจดจำวัตถุซึ่งในกรณีนี้คือ ฐ แล้วแจ้งเตือนไปยังเจ้าของบ้านทันทีเมื่อมีบุกรุกเข้ามาซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากมีความรวดเร็ว แม่นยำ และให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 80 นอกจากนี้ยังมีการนำ YOLO ไปใช้งานอีกหลาย ๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นการนับจำนวนนกแอ่นกินรังด้วย YOLO Object Detection ร่วมกับการใช้เทคโนโลยี IoT โดยใช้บอร์ด Raspberry Pi ร่วมกับกล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR Lepton 3.5 แล้วนำภาพที่ถ่ายได้มาผ่านกระบวนการตรวจจับวัตถุด้วยภาพ (Image Detection) โดยใช้ YOLOv3 เพื่อตรวจจับจำนวนนกบนภาพ [14] การติดตามการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ที่มีความแม่นยำสูงในการแยกประเภทยานพาหนะ (รถยนต์ รถจักรยานยนต์ และรถบรรทุก) โดยใช้ YOLOv5 ร่วมกับ DeepSORT [15] และยังพบว่าการใช้ YOLOv8 ร่วมกับ ByteTrack หรือ BoT-SORT สามารถตรวจจับและจำแนกประเภทยานพาหนะแบบอัตโนมัติได้ถึง 11 ประเภท [16] อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นว่าการใช้

เทคโนโลยีเพื่อช่วยเฝ้าระวังการคลอดของสุกรก่อนช่วงน้อยและการใช้ลอร่าแวนนั้นมิข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งการติดตั้งที่อาจจะไม่สะดวกต่อการทำความสะอาดคอก ปัญหาด้านความร้อน และการหาแหล่งพลังงานที่ไม่เหมาะสมภายในคอก ส่วน YOLO นั้นยังไม่มีนำมาประยุกต์ใช้ในการเฝ้าระวังติดตามสุกร

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกร โดยใช้ YOLO ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกในการตรวจจับตำแหน่งและจำแนกท่าทางการเคลื่อนไหวของแม่สุกรก่อนคลอด การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) [17] เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) และมีพื้นฐานมาจากโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network: ANN) ซึ่งเป็นวิธีที่ออกแบบมาเพื่อให้เครื่องจักรสามารถเรียนรู้ได้โดยอิงจากระบบประสาทของมนุษย์ ข้อมูลจะถูกป้อนเข้าสู่ชั้นรับข้อมูล (Input Layer) จากนั้นจะถูกประมวลผลในชั้นซ่อน (Hidden Layer) และผลลัพธ์จะถูกนำเสนอในชั้นแสดงผล (Output Layer) โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษาครั้งนี้คือเพื่อพัฒนาเครื่องมือในการเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกรจากท่าทางการเคลื่อนไหว และทำการประเมินผลระบบ ระบบที่พัฒนาจะใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกในการตรวจจับตำแหน่ง ท่าทางเคลื่อนไหวของแม่สุกร และบันทึกข้อมูลเพื่อแสดงสถิติผ่านเว็บไซต์ นอกจากนี้ยังแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ของผู้เลี้ยงสุกร ในกรณีพบความผิดปกติ ผู้เลี้ยงสุกรจะได้รับข้อมูลการเคลื่อนไหวของแม่สุกรและการแจ้งเตือนเพื่อให้ความช่วยเหลือในการช่วยคลอดได้ทันเวลาที่ ลดความสูญเสียที่จะเกิดกับแม่และลูกสุกร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.1 พฤติกรรมแม่สุกรก่อนคลอด

แม่สุกรอุ้มท้องประมาณ 114 วัน หลังจากการผสมพันธุ์จะถูกแยกมาเลี้ยงในชองอุ้มท้องเพื่อความสะดวกในการดูแลความปลอดภัยของแม่และลูกสุกรในท้อง เมื่อใกล้ถึงช่วงคลอดประมาณ 7-15 วันก่อนครบกำหนดคลอด แม่สุกรจะถูกย้ายจากชองอุ้มท้องไปยังชองคลอดที่สะอาด มีอากาศถ่ายเทและมีน้ำหยดช่วยให้เย็นสบาย มีผู้เลี้ยงที่มีประสบการณ์ในการดูแลอย่างใกล้ชิด พร้อมให้ความช่วยเหลือในการช่วยคลอดได้ทันเวลาที่ เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดกับแม่และลูกสุกร

แม่สุกรที่ใกล้คลอดจะแสดงอาการหลายอย่าง เช่น กระวนกระวาย ไม่อยู่นิ่ง ผุดลุกผุดนอน กัดคอก และตะกุกพินคอก นอกจากนี้ยังอาจมีพฤติกรรมอื่น ๆ ในแม่สุกรบางตัว เช่น ส่งเสียงร้อง เวลาต็มน้ำ ถ่ายปัสสาวะหรือถ่ายอุจจาระบ่อยขึ้น เป็นต้น พฤติกรรมมารยาของแม่สุกรในช่วงก่อนคลอด 8 ชั่วโมง จะพบว่าแม่สุกรยืนมากที่สุดถึง 28 ครั้ง นอกจากนี้ยังแสดงพฤติกรรมการสร้างรัง กล้ามเนื้อสวาป พันท้องและหางหดตัว อัตราการหายใจเพิ่มขึ้นจากปกติที่ 25-30 ครั้งต่อนาที เป็นมากกว่า 80 ครั้งต่อนาที [18, 19]

1.2 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning)

การเรียนรู้เชิงลึก คือวิธีการเรียนรู้แบบอัตโนมัติที่เลียนแบบการทำงานของโครงข่ายประสาทของมนุษย์ โดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้นในการเรียนรู้จากข้อมูลตัวอย่าง ข้อมูลที่เรียนรู้จะถูกนำไปใช้ในการตรวจจับรูปแบบหรือจัดหมวดหมู่ [20] ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การเรียนรู้เชิงลึกในการวิเคราะห์รูปร่างและท่าทางของสุกร เช่น ทำยืน ทำนอน และทำนั่ง ทำให้ระบบสามารถเข้าใจและประเมินข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 DeepSORT

DeepSORT เป็นอัลกอริทึมสำหรับการติดตามวัตถุ (Object Tracking) ในภาพเคลื่อนไหว ซึ่งรวมการตรวจจับและติดตามเข้าด้วยกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การเรียนรู้เชิงลึกเป็นพื้นฐาน อัลกอริทึมนี้ได้รับความนิยมในการติดตามวัตถุ เช่น รถยนต์ในระบบรักษาความปลอดภัยทางถนน หรือบุคคลในวิดีโอที่มีคนจำนวนมาก [21]

การติดตามใช้วิธีการแบบ two-step โดยเริ่มจากการตรวจจับวัตถุในภาพและสร้างคุณลักษณะ (Feature) เพื่อกำหนดตำแหน่ง จากนั้นใช้แบบจำลองเชื่อมต่อ (Matching Model) เพื่อจับคู่ระหว่างเฟรม โดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจจับและคุณลักษณะในการปรับปรุงการจับคู่และติดตามในเฟรมถัดไป [22]



1.4 YOLO Model

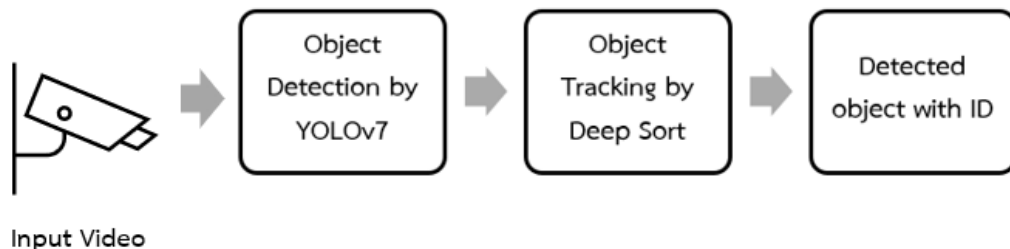
YOLO (You Only Look Once) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการตรวจจับวัตถุในภาพ ซึ่งพัฒนาโดยใช้โปรแกรม C++ สำหรับปัญญาประดิษฐ์แบบโครงข่ายประสาท (Neural Network) ด้วยความสามารถในการทำงานบนหน่วยประมวลผล CUDA ของ GPU ทำให้สามารถประมวลผลภาพได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วภายใต้โครงข่ายประสาทชุดเดียว YOLO สามารถทำนายชนิดของวัตถุและตำแหน่งได้พร้อมกัน อีกทั้งยังสามารถแยกแยะภาพวาด ภาพถ่าย หรือวัตถุจากพื้นหลัง รวมถึงคาดเดาวัตถุที่กระจัดกระจายในภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [23]

2. ประชากรและพื้นที่วิจัย

แม่สุกระยะอุ้มท้อง จำนวน 5 ตัว จากฟาร์มสุกร จังหวัดนครปฐม และ ศูนย์สัตว์ทดลอง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การพัฒนาปัญญาประดิษฐ์

จากการศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้รวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาปรับใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงอัลกอริทึมที่เหมาะสม โดยเลือกใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับการเคลื่อนไหว ด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งจำลองรูปแบบการประมวลผลของสมองมนุษย์ โดยมีขั้นตอนวิธีแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการทำงานของปัญญาประดิษฐ์

3.1 การตรวจจับวัตถุด้วยอัลกอริทึม YOLOv7 (Object Detection by YOLOv7)

ในการตรวจจับวัตถุ เลือกใช้อัลกอริทึม YOLOv7 เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับวัตถุในงานที่ต้องการทั้งความเร็วในการประมวลผลและความแม่นยำสูง ทำให้สามารถใช้ในการงานที่ต้องการการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์ได้ รวมถึงใช้ทรัพยากรในการประมวลผลน้อยและมีความยืดหยุ่นในการปรับขนาดของโมเดล ซึ่งเหมาะสมกับงานวิจัยที่ใช้ภาพเคลื่อนไหวที่ต้องการการตรวจจับแบบเรียลไทม์ [24] ขั้นตอนประกอบด้วย

1) **การตั้งค่าการทดลอง** ผู้วิจัยมีความสนใจในการเก็บข้อมูลแม่สุกในโรงเรือน โดยทำเก็บรวบรวมท่าทางของแม่สุกจากกล้องวงจรปิดทางด้านหน้า ภาพที่ได้จะเป็นภาพเคลื่อนไหวและเฉพาะส่วนที่ทำการตรวจจับได้เท่านั้น เพื่อการจำแนกที่แม่นยำและรวดเร็ว ท่าทางการเคลื่อนไหวที่เก็บข้อมูล ประกอบด้วย 3 ท่าทาง ได้แก่ ทำยืน ทำนอน และทำนั่ง จำนวน 60 วัน ได้วิดีโอจำนวน 120 ไฟล์

2) **การปรับขนาด** ในกระบวนการเก็บ dataset จะทำการรับภาพจากกล้อง โดยแต่ละภาพถูกปรับขนาดความละเอียดเป็น 640x640 พิกเซล ด้วยเครื่องมือ Roboflow

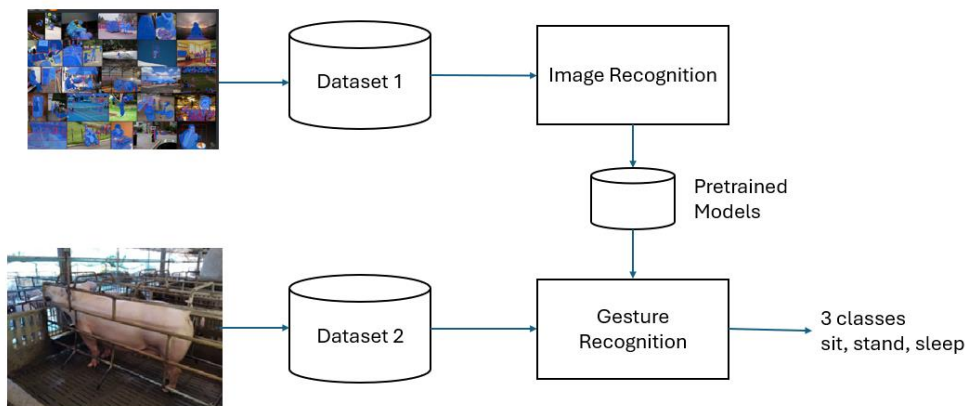
3) **การอนุมาน** ชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นสามส่วน ได้แก่ ชุดฝึกฝน ชุดตรวจสอบความถูกต้อง และสำหรับชุดทดสอบ โดยใช้เครื่องมือ Roboflow หลังจากที่ได้โมเดลได้รับการฝึกฝนด้วยชุดฝึกฝนแล้ว ชุดตรวจสอบความถูกต้องจะใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลและปรับปรุงพารามิเตอร์ จากนั้นชุดทดสอบจะถูกใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลต่อข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยเห็นมาก่อน ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพ จำนวน 4,190 ภาพ และเพิ่มเติมภาพจาก Coco dataset จำนวน 1,943 ภาพ โดยแบ่งท่าทางเป็น ทำนั่ง จำนวน 2,086 ภาพ ทำนอน จำนวน 1,979 ภาพ และทำยืน จำนวน 2,068 ภาพ เพื่อให้มีท่าทาง ลักษณะจากภายนอกที่มากขึ้น

4) การปรับแต่งและเพิ่มประสิทธิภาพของไฮเปอร์พารามิเตอร์ ใช้การกำหนดค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์สามชุด

- (1) ไฮเปอร์พารามิเตอร์ชุดที่ 1 มีอัตราการเรียนรู้ (LR) 0.01 ขนาดแบทช์ 64 และจำนวนรอบ 50
- (2) ไฮเปอร์พารามิเตอร์ชุดที่ 2 มีอัตราการเรียนรู้ 0.02 ขนาดแบทช์ 32 และจำนวนรอบ 75
- (3) ไฮเปอร์พารามิเตอร์ชุดที่ 3 มีอัตราการเรียนรู้ 0.03 ขนาดแบทช์ 16 และจำนวนรอบ 100

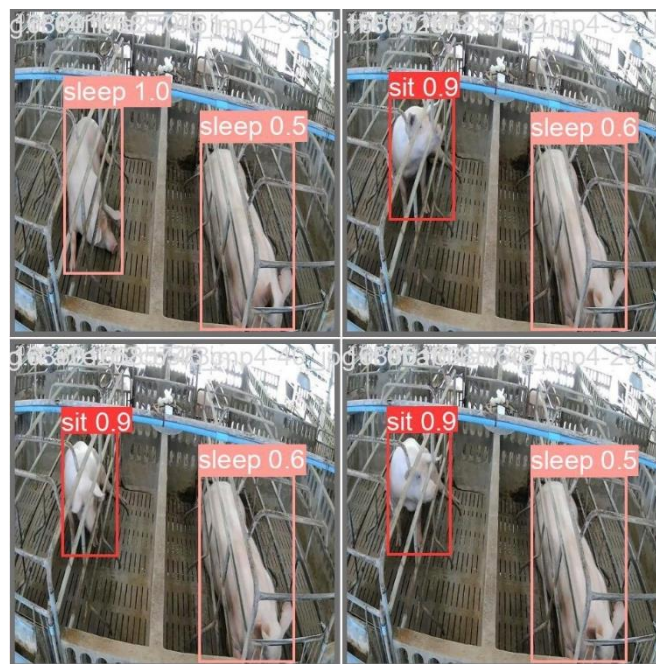
5) **Data Augmentation** ทำการเพิ่มปริมาณและความหลากหลายของข้อมูล ด้วยการปรับเปลี่ยนด้วยการหมุนภาพ กลับภาพซ้ายขวา ย่อ ปรับสี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของข้อมูลสำหรับการฝึกฝน และทำให้เป็นบรรทัดฐาน (Normalize) ก่อนนำเข้าโปรแกรมผลในโมเดล

6) **การฝึกฝนโมเดล** ทำการแปลงภาพที่ได้จากขั้นตอนการเก็บ dataset เป็นข้อมูลเวกเตอร์เฉพาะของแต่ละท่าทาง โดยยึดหลักการทำงานของ YOLOv7 [25] สามารถแบ่งได้ 3 Classes ประกอบไปด้วย ท่ายืน ท่านอน และท่านั่ง ด้วยการเรียนรู้เชิงถ่ายโอนข้อมูล (Transfer Learning) เพื่อช่วยลดระยะเวลาในการฝึกระบบคอมพิวเตอร์ [26] ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพรวมของการเรียนรู้เชิงถ่ายโอนข้อมูล (Transfer Learning)

จากภาพที่ 2 หากมีโมเดลที่ถูกฝึกมาแล้วในการจำแนกภาพท่าทาง โดยที่โมเดลยังคงใช้ความรู้พื้นฐานที่ได้รับจากการฝึกฝนเดิมในการจำแนกวัตถุในภาพ



ภาพที่ 3 ผลลัพธ์การตรวจจับวัตถุด้วย อัลกอริทึม YOLOv7



7) **ทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล** ระบบจะรับภาพจากกล้องเพื่อค้นหาท่าทาง โดยเปรียบเทียบท่าทางของสุกร จากกล้องกับต้นแบบทั้งหมดที่เก็บไว้ โดยใช้วิธีทางสถิติจากค่าเวกเตอร์เฉพาะระหว่างท่าทางจากกล้องและต้นแบบ จากนั้นจะนำท่าทางที่มีความคล้ายคลึงมากที่สุดมาแสดงผล จากการตรวจสอบความแม่นยำของโมเดลพบว่า ค่า mAP (Mean Average Precision) มากกว่า 0.75 โดยผลลัพธ์ที่ได้คือ Boundary box ในภาพ ซึ่งจะนำไปใช้ต่อไปในการตรวจจับวัตถุตามโมเดลที่แสดงในภาพที่ 3 และทำการตรวจสอบความแม่นยำ ในแต่ละชุดข้อมูลที่ถูกแบ่งด้วยวิธี K-fold cross validation โดยตามแนวแถวของตารางแสดงจำนวนรอบของ K คือจำนวน 10 รอบ และตามแนวคอลัมน์ของตารางแสดงค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความถูกต้องของ Model โดยพิจารณาแยกทีละคลาส สามารถแยกค่าประสิทธิภาพของระบบประกอบไปด้วย ท่านั่ง ท่านอน และทำอื่น สามารถสรุปผลประสิทธิภาพของระบบโดยแยกตามท่าทาง ได้ดังตารางที่ 1

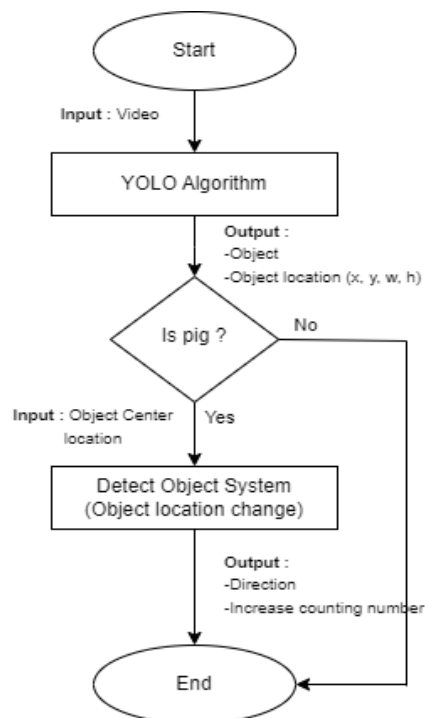
ตารางที่ 1 ผลการวัดประสิทธิภาพการจำแนกข้อมูล

		Predicted class		
		1 (sit)	2 (sleep)	3 (stand)
Actual class	1 (sit)	0.951	0.049	0
	2 (sleep)	0.026	0.913	0.061
	3 (stand)	0	0.012	0.988

จากตารางที่ 1 พบว่า ท่าทางการยืนมีความแม่นยำมากที่สุด โดยมีท่านั่ง และท่านอน แม่นยำน้อยตามลำดับ

3.2 การติดตามวัตถุด้วยอัลกอริทึม Deep Sort (Object Tracking by Deep Sort)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัลกอริทึม Deep SORT ซึ่งเป็นการติดตามวัตถุหลายวัตถุโดยอาศัยการเรียนรู้เชิงลึก โดยสามารถติดตามวัตถุได้ตลอดเวลา แม้ว่าวัตถุเหล่านั้นจะถูกบดบังหรือมองเห็นได้เพียงบางส่วนก็ตาม ระบบนี้ใช้ข้อมูลลักษณะที่ปรากฏและสัญญาณการเคลื่อนไหวร่วมกันเพื่อติดตามวัตถุแบบเรียลไทม์ โดยการรวม YOLOv7 เข้ากับ Deep SORT จะทำงานโดยใช้ YOLOv7 เพื่อตรวจจับวัตถุในแต่ละเฟรมของสตรีมวิดีโอ จากนั้นจึงส่งวัตถุที่ตรวจจับได้ไปยัง Deep SORT ซึ่งจะเชื่อมโยงวัตถุต่าง ๆ ในแต่ละเฟรมและติดตามวัตถุเหล่านั้นเมื่อเวลาผ่านไป การรวมการตรวจจับวัตถุทั้งสองเข้าด้วยกันทำให้ระบบสามารถติดตามวัตถุหลายรายการแบบเรียลไทม์ได้ แม้จะอยู่ในภาพที่ซับซ้อน

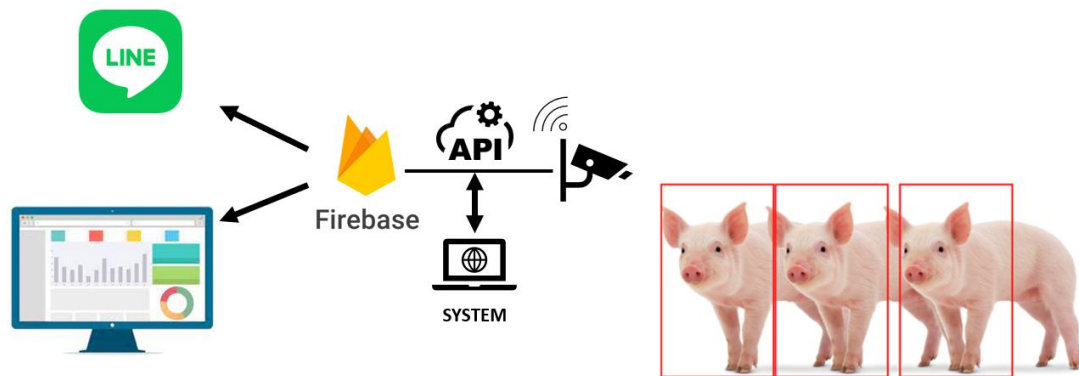


ภาพที่ 4 ขั้นตอนการติดตามแบบหลายวัตถุ

จากภาพที่ 4 เมื่อทำการตรวจจับวัตถุด้วย YOLOv7 จะได้ผลลัพธ์เป็นค่าตำแหน่งพื้นที่ของวัตถุ (x, y, w, h) และจำแนกท่าทางของสุกร Deep SORT จะประมาณค่าตำแหน่งถัดไปเพื่อเชื่อมโยงกับตำแหน่งและขอบเขตของวัตถุที่ตรวจพบ โดยจะมีการอัปเดตข้อมูลและค่าต่าง ๆ ในระบบ เมื่อมีการเปลี่ยนท่าทางการเคลื่อนไหวของแม่สุกร ระบบจะทำการจัดเก็บข้อมูลจำนวนท่าทางการเคลื่อนไหวและหมายเลขสุกรลงในฐานข้อมูล Firebase Realtime เพื่อแสดงผลผ่านเว็บไซต์ นอกจากนี้ ระบบจะส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ในกรณีที่มีจำนวนการเคลื่อนไหวผิดปกติ หรือหากไม่มีการเคลื่อนไหวของสุกร

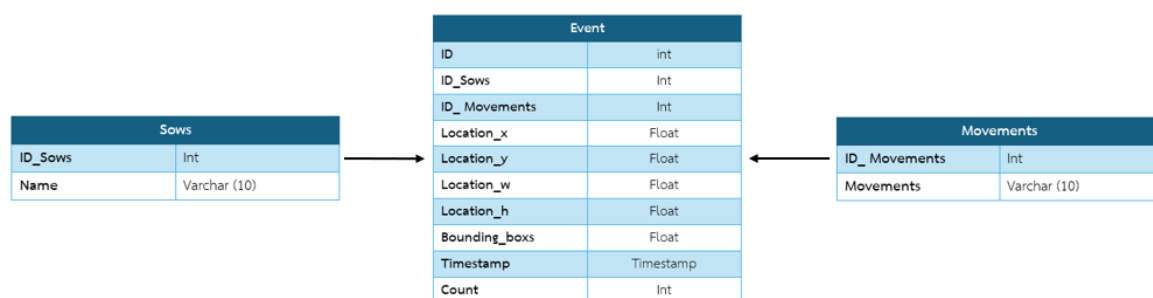
4. การพัฒนาระบบ

จากการวิเคราะห์ระบบงาน ทำให้ได้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ ซึ่งผู้พัฒนาได้ออกแบบ ระบบงานทั้งในส่วนของแผนภาพการออกแบบภาพรวมของระบบ แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ภาพรวมของระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกร โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

ในส่วนของอุปกรณ์ ผู้ใช้งานทำการติดตั้งกล้องวงจรปิดภายในโรงเรือนของสุกร ระบบจะทำการติดต่อผ่าน API ของกล้องวงจรปิด เพื่อทำการเรียกดูข้อมูลภาพแบบเรียลไทม์จากกล้อง ผ่านการประมวลผลของระบบ ระบบจะทำการตรวจจับตำแหน่ง และท่าทางการเคลื่อนไหวของแม่สุกร เก็บเข้าสู่ฐานข้อมูล Firebase Realtime ที่มีโครงสร้าง ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างฐานข้อมูลของระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกรโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

ผลการวิจัย

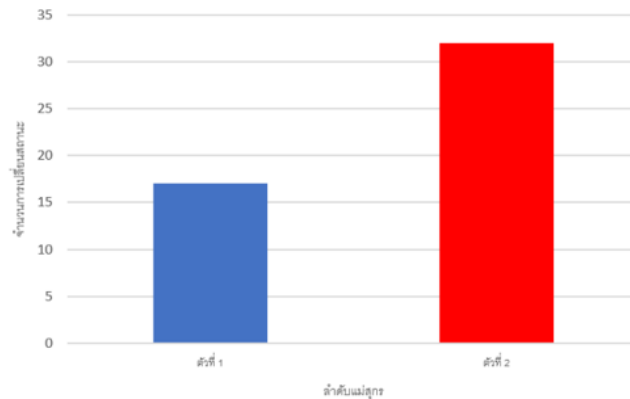
ผลการดำเนินงานของการพัฒนาเครื่องมือในการเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกรจากท่าทางการเคลื่อนไหว

ผู้วิจัยได้พัฒนาเว็บไซต์สำหรับการแสดงสถิติข้อมูลการเคลื่อนไหวท่าทางของแม่สุกร โดยทำการติดต่อกับฐานข้อมูล Firebase Realtime โดยแสดงข้อมูลตารางประจำวันและแสดงสถิติในรูปแบบแผนภูมิแท่งดังภาพที่ 7



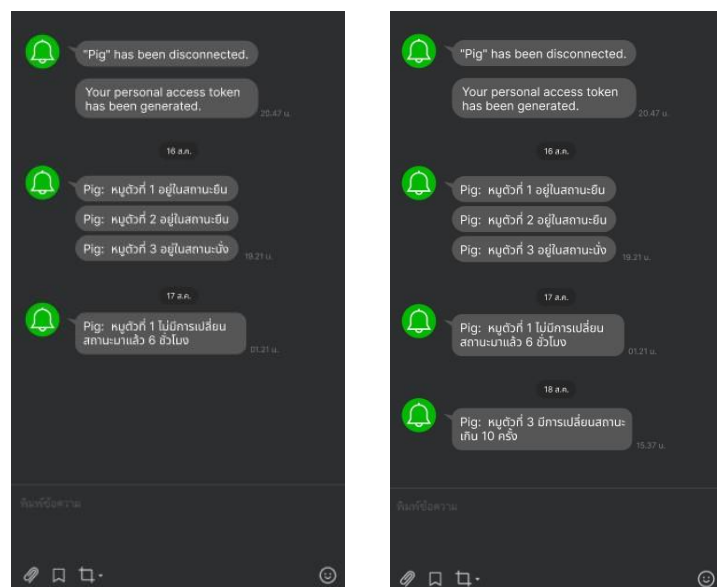
Day: 28 Month: มิถุนายน Year: 2566

วันที่	ตัวที่	จำนวนการเปลี่ยนสถานะ	จำนวนการนั่ง	จำนวนการนอน	จำนวนการอื่น
วันที่ 28 มิถุนายน 2566	1	17	3	8	6
วันที่ 28 มิถุนายน 2566	2	32	14	10	8



ภาพที่ 7 หน้าจอการแสดงผลสถิติการเคลื่อนไหวของแม่สุกรในรูปแบบตารางและแผนภูมิแท่ง

ระบบจะส่งการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ ในกรณีที่มีจำนวนการเคลื่อนไหวผิดปกติ หรือหากไม่มีการเคลื่อนไหวของแม่สุกร ซึ่งการแจ้งเตือนมี 2 กรณี ได้แก่ 1) แม่สุกรไม่มีความเคลื่อนไหวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และ 2) แม่สุกรมีจำนวนการนั่งมากกว่า 10 ครั้งต่อวัน ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์

ผู้ดูแลสุกรสามารถเรียกดูข้อมูลการเคลื่อนไหวของแม่สุกรในรูปแบบสถิติผ่านเว็บไซต์ โดยแบ่งข้อมูลเป็นท่าทางการเคลื่อนไหวในรูปแบบตาราง และมีการรวมสถิติในรูปแบบแผนภูมิแท่ง

**ผลการประเมินการประมวลผลภาพและแสดงท่าทาง**

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองตรวจสอบการจำแนกจำนวนการเคลื่อนไหวของระบบเปรียบเทียบกับการจำแนกจำนวนการเคลื่อนไหวจากกล้องด้วยคน ในระยะเวลา 7 วัน จากกล้องตัวที่ 2 ซึ่งมีแม่สุกรจำนวน 2 ตัว ประกอบไปด้วย 1) แม่สุกรท้องอ่อน 2) แม่สุกรใกล้คลอด มีกำหนดคลอดในวันที่ 28 มิถุนายน 2566 ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องจำนวนการเคลื่อนไหวของแม่สุกรโดยเปรียบเทียบระหว่างการจำแนกด้วยคนกับการจำแนกด้วยระบบ

วันที่	ลำดับสุกร	การจำแนกจำนวนด้วยระบบ	การจำแนกจำนวนด้วยคน	ความถูกต้อง
22 มิถุนายน 2566	1	13	12	91.70
	2	22	20	90.00
23 มิถุนายน 2566	1	12	12	100.00
	2	34	33	96.97
24 มิถุนายน 2566	1	13	13	100.00
	2	36	36	100.00
25 มิถุนายน 2566	1	11	10	90.00
	2	33	35	94.30
26 มิถุนายน 2566	1	13	12	91.70
	2	30	29	96.60
27 มิถุนายน 2566	1	13	13	100.00
	2	36	36	100.00
28 มิถุนายน 2566	1	17	17	100.00
	2	40	39	97.50
ค่าเฉลี่ยความถูกต้อง				96.34

จากตารางที่ 2 พบว่า ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการนับจำนวนการเคลื่อนไหวของแม่สุกรโดยการเปรียบเทียบระหว่างการจำแนกด้วยคนกับการจำแนกด้วยระบบ มีค่าเฉลี่ยความถูกต้องอยู่ที่ร้อยละ 96.34 โดยแม่สุกรที่ตั้งท้องอ่อนมีอัตราการเคลื่อนไหวน้อยกว่าแม่สุกรที่ใกล้คลอด

ผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ผู้เลี้ยงสุกร

การทดลองตรวจสอบการแจ้งเตือนของระบบผ่านแอปพลิเคชันไลน์เปรียบเทียบกับการติดตามการเคลื่อนไหวของแม่สุกรจากกล้องด้วยคน การแจ้งเตือนแบ่งออกเป็น 2 กรณี 1) กรณีที่แม่สุกรไม่มีความเคลื่อนไหวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง 2) แม่สุกรมีจำนวนการนั่งมากกว่า 10 ครั้งต่อวัน

กรณีที่ 1 การทดสอบเมื่อแม่สุกรไม่มีความเคลื่อนไหวเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยนำวิดีโอจำนวน 3 ไฟล์มาวิเคราะห์พบว่าระบบสามารถส่งการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชันไลน์ได้อย่างถูกต้องเมื่อไม่พบความเคลื่อนไหวของแม่สุกร โดยมีค่าเฉลี่ยความถูกต้องอยู่ที่ร้อยละ 100 ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องการแจ้งเตือนการไม่เคลื่อนไหวของแม่สุกร

ลำดับไฟล์	เวลาของไฟล์	แสดงการแจ้งเตือน	ความถูกต้อง
1	3 ชั่วโมง 9 นาที	1 ครั้ง	100.00
2	4 ชั่วโมง 32 นาที	1 ครั้ง	100.00
3	3 ชั่วโมง 47 นาที	1 ครั้ง	100.00
ค่าเฉลี่ยความถูกต้อง			100.00



กรณีที่ 2 แม่สุกรมีการนั่งมากกว่า 10 ครั้งต่อวัน ได้ทำการทดลองตรวจสอบจำนวนการนั่งของแม่สุกรที่ใกล้คลอด เพียงตัวเดียวผ่านระบบ และเปรียบเทียบกับจำนวนการนั่งที่บันทึกได้จากกล้องด้วยตนเอง ดังที่แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องการแจ้งเตือนจำนวนการนั่งของแม่สุกรโดยเปรียบเทียบระหว่างการนับจากคนกับการนับด้วยระบบ

วันที่	การนับจำนวนการนั่งด้วยระบบ	การนับจำนวนการนั่งด้วยคน	ความถูกต้อง
22 มิถุนายน 2566	10	8	75.00
23 มิถุนายน 2566	14	14	100.00
24 มิถุนายน 2566	14	14	100.00
25 มิถุนายน 2566	12	14	86.00
26 มิถุนายน 2566	11	10	90.00
27 มิถุนายน 2566	12	12	100.00
28 มิถุนายน 2566	18	18	100.00
ค่าเฉลี่ยความถูกต้อง			93.00

โดยสรุปได้ว่า ระบบได้ส่งการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชันไลน์เมื่อแม่สุกรมีจำนวนการนั่งครบตามที่กำหนด ค่าเฉลี่ยความถูกต้องอยู่ที่ร้อยละ 93.00 โดยพบว่าความคลาดเคลื่อนในการนับของระบบเกิดขึ้นจาก 2 กรณี ได้แก่ 1) การเปลี่ยนท่าจากทำยืนเป็นทำนอน หรือจากทำนอนเป็นทำยืน ซึ่งบางครั้งแม่สุกรจะขยับตัวเป็นทำนั่งเพื่อรอเปลี่ยนท่า ทำให้ระบบเกิดการนับผิดพลาด และ 2) การที่แม่สุกรลุกนั่งในช่วงเวลาสั้น ๆ ทำให้ระบบไม่นับเป็นทำนั่ง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนาระบบเฝ้าระวังอาการก่อนคลอดของแม่สุกรด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อตรวจจับท่าทางการเคลื่อนไหว พบว่าการติดตั้งกล้องวงจรปิดจากด้านหน้าเพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวมีความแม่นยำในระดับดีมาก ระบบสามารถประมวลผลข้อมูลเพื่อตรวจสอบอาการผิดปกติได้อย่างถูกต้อง นอกจากนี้ยังแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชันไลน์และแสดงข้อมูลสถิติในเว็บไซต์ เพื่อให้ผู้เลี้ยงสุกรวิเคราะห์ข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของวิรัช กาฬภักดี และเยาวเรศ กาฬภักดี [27] ทำการศึกษาเรื่องระบบการเฝ้าระวังอาการผิดปกติของแม่สุกรอุ้มท้อง โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ร่วมกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต เพื่อพัฒนาระบบ พบว่าสามารถพัฒนาระบบที่บริหารจัดการข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้ ประกอบด้วย ข้อมูลกรแม่สุกร ข้อมูลการแจ้งเตือนการเปลี่ยนพฤติกรรม ส่วนการประเมินผลการทำงานของระบบพบว่าระบบทำงานถูกต้องร้อยละ 100 สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้อัลกอริทึม YOLOv7 และ Deep Sort ที่มีประสิทธิภาพในโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการติดตามยานพาหนะและการตรวจจับจากภาพเคลื่อนไหว ภายใต้ภาวะต่าง ๆ เช่น การจราจรหนาแน่น เวลากลางวันได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ โดยอัลกอริทึมมีความแม่นยำในการติดตามสูง [28, 29] กล่าวคือระบบตรวจจับตำแหน่งและจำแนกท่าทางการเคลื่อนไหวของแม่สุกรทำการจัดเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหว การแจ้งเตือนหากมีความผิดปกติของแม่สุกร ซึ่งระบบที่พัฒนาส่งผลให้ผู้เลี้ยงสุกรสามารถให้ความช่วยเหลือในการช่วยคลอดได้ทันท่วงทีลดความสูญเสียที่จะเกิดกับลูกสุกรได้

เอกสารอ้างอิง

1. กรมปศุสัตว์. แผนที่แสดงความหนาแน่นในการเลี้ยงสัตว์. ระบบเผยแพร่ภูมิสารสนเทศด้านปศุสัตว์ [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 29 สิงหาคม 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://region7.dld.go.th/webnew/images/region7-2562/Yuttasart/dataanimal/province/pig.jpg>



2. ดำรง กิตติชัยศรี, อัจฉรา ภาณุรัตน์, จรัส สว่างทัฬห, นฤมล สมคณา. การพัฒนารูปแบบการเลี้ยงสุกรพื้นเมืองตามปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงของเกษตรกรรายย่อยในลุ่มน้ำโขงตอนล่างโดยกระบวนการมีส่วนร่วม. แก่นเกษตร 2554;39(1):389-98.
3. Tuchscherer M, Puppe B, Tuchscherer A, Tiemann U. Early identification of neonates at risk: Traits of newborn piglets with respect to survival. Theriogenology 2000;54(3):371-88.
4. Koketsu Y, Takenobu S, Nakamura R. Prewaning mortality risks and recorded causes of death associated with production factors in swine breeding herds in Japan. J Vet Med Sci 2006;68(8):821-6.
5. KilBride AL, Mendl M, Statham P, Held S, Harris M, Cooper S, et al. A cohort study of weaning piglet mortality and farrowing accommodation on 122 commercial pig farms in England. Prev Vet Med 2012(3);104:281-91.
6. Kirkden RD, Broom DM, Andersen IL. Piglet mortality: The impact of induction of farrowing using prostaglandins and oxytocin. Anim Reprod Sci 2013;138(1):14-24.
7. Muns R, Nuntapaitoon M, Tummaruk P. Non-infectious causes of preweaning mortality in piglets. Livestock Sci 2016;184:46-57.
8. มรกต นันทไพฑูรย์, เเผด็จ ธรรมรักษ์. อัตราการตายของลูกสุกรก่อนหย่านมในฟาร์มสุกรในประเทศไทยสัมพันธ์กับฤดูกาลจำนวนลูกที่เลี้ยง ลำดับท้องของแม่สุกรและน้ำหนักแรกคลอดของลูกสุกร. ใน: เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51 วันที่ 5-7 กุมภาพันธ์ 2556. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ; หน้า 58-64.
9. Nuntapaitoon M, Tummaruk P. Piglets pre-weaning mortality in a commercial swine herd in Thailand. Trop Anim Health Prod 2015;47:1539-46.
10. Muns R, Tummaruk P. Management strategies in farrowing house to improve piglet preweaning survival and growth. Thai J Vet Med 2016;46(3):347-54.
11. วิทวัส สิริภูกุล, ฤทธิญา พนมเชิง, ลัญฉกร วุฒิสัทกุลกิจ, วิทยากร อัครวิเศษ, ชัยรัตน์ พงศ์พันธุ์ภณี. การพัฒนาด้านแบบด้วยฟาร์มหมูอัจฉริยะด้วยลอราแวน. วารสารวิชาการ กสทช 2564;215-36.
12. ปวีญา สมทรง, สรณศิริ คณิตคิด, สุภาพร บรรดาศักดิ์. ระบบฟาร์มไก่ไข่อัจฉริยะที่ทำงานอัตโนมัติด้วยเซนเซอร์และควบคุมได้ด้วยมือถือ. RJST 2563;2(3):167-75.
13. จันธิรัก น้ำใส, ศรศักดิ์ ทาวงษ์, ภาณุ ดงทอง, ธนะพัฒน์ เขียวชาญวัฒนา, ศรุติ อัสวเรืองสุข. ระบบตรวจจับด้วยวิธีการ YOLO ในกรณีตัวอย่างงูเข้าที่ฟักอาศัย. UJET 2565;1(1):59-72.
14. สิริทัศน์ เลิศตระกูลถาวร. การพัฒนาระบบนับจำนวนนกแอ่นกินรังด้วย YOLO Object Detection ผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ, บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น. กรุงเทพฯ; 2563.
15. วิษณุ, โกเมศ, ธนภัทร, ชังคะจิตร. การติดตามการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนเครื่องคอมพิวเตอร์สมรรถนะต่ำ โดยใช้โมเดลการเรียนรู้เชิงลึกและการติดตามแบบหลายวัตถุ. วารสารบัณฑิตวิทยาลัย 2565;1:18-30.
16. อัฐพงศ์, สังข์เพชร, วีระ, สอ้ง. ระบบตรวจจับและจำแนกประเภทยานพาหนะแบบอัตโนมัติ สำหรับถนนในเขตเมือง ด้วยหลักการโครงข่ายแบบคอนโวลูชัน. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิทยาการข้อมูล ครั้งที่ 3 วันที่ 30 เมษายน 2566. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. กรุงเทพฯ; หน้า 109-31.
17. Qi D, Jianqin Y, Bin W, Wenqing Z. Deep learning based 2D human pose estimation: A survey. TST 2019;24(6):663-76.



18. Mazzoni C, Scollo A, Righi F, Bigliardi E, Di Ianni F, Bertocchi M, et al. Effects of three different designed farrowing crates on neonatal piglets crushing: Preliminary study. *Ital J Anim Sci* 2018;17(2):505-10.
19. Danholt L, Moustsen VA, Nielsen MBF, Kristensen AR. Rolling behaviour of sows in relation to piglet crushing on sloped versus level floor pens. *Livestock Sci* 2011;141(1):59-68.
20. Lee DH, Yoon SN. Application of artificial intelligence-based technologies in the healthcare industry: Opportunities and challenges. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(1):1-18.
21. Du Y, Zhao Z, Song Y, Zhao Y, Su F, Gong T, et al. StrongSORT: Make DeepSORT Great Again [Internet]. 2022 [cited 2024 Aug 29]. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2202.13514.pdf>
22. Wojke N, Bewley A, Paulus D. Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric. In: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, September 17-20, 2017; Beijing, China; 2017. p. 3645-9.
23. Kharchenko V, Chyrka I. Detection of Airplanes on the Ground Using YOLO Neural Network. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*; Jul 2-5, 2014; Kyiv, Ukraine; 2018. p. 294-7.
24. Zhu D, Wang M, Zou Q, Shen D, Luo J. Research on Fruit Category Classification Based on Convolution Neural Network and Data Augmentation. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)*; Oct 25-7, 2019; Xiamen, China; 2019. p. 46-50.
25. Ge Z, Liu S, Wang F, Li Z, Sun J. YOLOX: Exceeding YOLO series in 2021. [Internet]. 2021 [cited 2024 Aug 29]. Available from: <https://arxiv.org/abs/2107.08430>
26. Liang G, Zheng L. A transfer learning method with deep residual network for pediatric pneumonia diagnosis. *CMPB* 2020;187:1049-64.
27. วิรัช กาฬภักดิ์, เขียวเรศ กาฬภักดิ์. ระบบการเฝ้าระวังอาการผิดปกติของแม่สุกรอุ้มท้อง. *APHE Journal* 2563;9(1):9-20.
28. Yadav VK, Yadav P, Sharma S. An Efficient Yolov7 and Deep Sort are Used in a Deep Learning Model for Tracking Vehicle and Detection. *J Xi'an Shiyou Univ Nat Sci Ed* 2022;18(11):759-63.
29. Yang F, Zhang X, Liu B. Video object tracking based on YOLOv7 and DeepSORT. *J Latex Class Files* 2015;14(8):2015-8.



การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาล
บริเวณโดยรอบสถานที่ฝังกลบขยะชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

Health Risk and Contamination Assessment of Heavy Metals in Groundwater
around Municipal Landfill, Ayutthaya Province

สมคิด ตันแก้ง* และ ศิริภัสสร พันธะสา

สาขาการจัดการสาธารณภัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปทุมธานี 13180

Somkid Tangkan* and Sirapassorn Phanthasa

Department of Disaster Management, Faculty of Science and Technology,
Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathum Thani 13180

*Corresponding author: somkid.tan@vru.ac.th

Received: 8 August 2024/ Revised: 11 October 2024/ Accepted: 17 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู แคดเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล และตะกั่วในน้ำบาดาลบริเวณสถานที่กำจัดขยะองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก 2) ประเมินผลกระทบทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาล โดยการดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนดังนี้ 1) เก็บตัวอย่างน้ำบาดาลด้วยวิธีการแบบจ้วงจากบ่อสังเกตการณ์ด้วยเบลเลอร์ 2) สกัดโลหะหนักในน้ำบาดาลด้วยกรดตามวิธีการสกัดด้วยไมโครเวฟ และวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินดักทีฟ คัปเปิลพลาสมา-อะตอมมิกอิมมูนิสชัน สเปกโตรสโกปี (ICP-AES) ตามวิธีมาตรฐาน USEPA 3015A และ USEPA 6010D ตามลำดับ สำหรับผลการวิเคราะห์การปนเปื้อน พบว่าชนิดของโลหะหนักที่ไม่เกินค่ามาตรฐานการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลของ USEPA, WHO และ NOAA คือ แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และ ตะกั่ว ทั้ง 2 ฤดูกาล ชนิดของโลหะหนักและร้อยละของจำนวนตัวอย่างที่มีค่าเกินมาตรฐานโลหะหนักในน้ำบาดาลของ USEPA, WHO และ NOAA คือ สารหนู (100%) แมงกานีส (50%) ในฤดูแล้ง และ สารหนู (50%) แมงกานีส (75%) ในฤดูน้ำหลาก ผลการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพรวมจากโลหะหนักรวมที่ก่อให้เกิดโรคอื่นที่ไม่ใช่โรคมะเร็งและก่อให้เกิดมะเร็ง พบว่าการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลก่อให้เกิดความเสี่ยงทางสุขภาพทั้ง 2 ฤดูกาล โดยมีค่าความเสี่ยงสูงสุดในเด็กจากตัวอย่างน้ำบาดาลในฤดูแล้ง โดยมี Hazard index (HI) = 35.85 และ Total carcinogenic risk (TCR) = 0.16 ดังนั้นข้อมูลงานวิจัยนี้จึงมีประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องสำหรับนำไปใช้ในการจัดการสถานที่กำจัดขยะให้ดีขึ้นเพื่อลดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลและลดความเสี่ยงทางสุขภาพ

คำสำคัญ: การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ น้ำบาดาล โลหะหนัก สถานที่กำจัดขยะชุมชน พระนครศรีอยุธยา



Abstract

This research aims to: 1) investigate heavy metal contamination, including arsenic, cadmium, copper, manganese, nickel, and lead in groundwater at the municipal solid waste landfill of the Phra Nakhon Si Ayutthaya Provincial Administrative Organization during the dry and wet seasons; 2) assess the human health risk of heavy metal contamination of groundwater. The research methodology consists of the following steps: 1) groundwater samples were collected using grab sampling method from monitoring wells with a bailer; 2) heavy metals in the groundwater were extracted using microwave-assisted acid digestion and analyzed with an Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) according to USEPA standard methods USEPA 3015A and USEPA 6010D, respectively. The analysis results indicate that the levels of heavy metals not exceeding the contamination standards for groundwater set by USEPA, WHO, and NOAA are Cadmium, Copper, Nickel, and Lead during both seasons. Heavy metals and the percentage of samples exceeding the standards of USEPA, WHO, and NOAA for groundwater are Arsenic (100%), manganese (50%) in the dry season, and Arsenic (50%), Manganese (75%) in the wet season. The assessment of cumulative health risk from heavy metals, including non-carcinogenic and carcinogenic health risks, exceeded acceptable limits in both seasons, with the highest risk observed in children during the dry season, showing a Hazard Index (HI) of 35.85 and a Total Carcinogenic Risk (TCR) of 0.16. Therefore, this research data may be helpful for responsible agencies in improving the effective management of waste disposal sites, in order to reduce metal contamination and health risk factors from groundwater.

Keywords: Health risk assessment, Groundwater, Heavy metals, Municipal solid waste landfill, Phra Nakhon Si Ayutthaya

บทนำ

น้ำบาดาลมีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและความมั่นคงด้านอาหารของแต่ละประเทศ เนื่องจากน้ำบาดาลถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย ทั้งในภาคครัวเรือน ภาคอุตสาหกรรม และภาคการเกษตร [1] ปัจจุบันในพื้นที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา กำลังเผชิญหน้ากับปัญหาด้านปริมาณและคุณภาพของน้ำบาดาล โดยมีสาเหตุมาจากการใช้ประโยชน์ของน้ำบาดาลที่มากเกินไปและกิจกรรมของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของมลพิษในน้ำบาดาล [2] หนึ่งในกิจกรรมของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของน้ำบาดาลคือ กิจกรรมการฝังกลบขยะที่มีการรั่วไหลของน้ำชะขยะจากระบบบำบัดหรือมีการปล่อยน้ำชะขยะจากระบบบำบัดที่ไม่ได้มาตรฐานสู่สิ่งแวดล้อม [3] ซึ่งน้ำชะขยะที่มีการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมมักมีองค์ประกอบของสารมลพิษในปริมาณสูง ได้แก่ สารมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์ และสารมลพิษที่เป็นสาร อนินทรีย์ โดยสารมลพิษดังกล่าวจะเกิดจากการย่อยสลายขยะอันตรายปะปนมากับขยะชุมชน ดังนั้น การรั่วไหลของน้ำชะขยะที่ปนเปื้อนสารมลพิษจึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำบาดาลที่น้ำชะขยะแพร่กระจายไปถึง [4] จากการศึกษาพบอีกว่าผลกระทบต่อคุณภาพน้ำบาดาลจากปัญหาการรั่วไหลของน้ำชะขยะมีการปนเปื้อนสารมลพิษ โดยเฉพาะโลหะหนักกำลังเกิดขึ้นทั่วโลก [5] อาทิ หลุมฝังกลบขยะ Tehran ประเทศอิหร่าน หลุมฝังกลบขยะ Oti ประเทศกานา และหลุมฝังกลบขยะ El Hajab ประเทศโมร็อกโก [6-8] และจากการศึกษาของ Mohamed [9] พบว่าการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลที่ปนเปื้อนโลหะหนักจากหลุมฝังกลบขยะมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ อาทิ การสร้างความเสียหายต่ออวัยวะ (ตับ, ไต, กระเพาะอาหาร, ลำไส้ และหัวใจ) และสามารถก่อให้เกิดมะเร็งได้ ดังนั้นทำให้ในปัจจุบันจึงมีแนวโน้มการศึกษาในหัวข้อการศึกษาระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาล และการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในพื้นที่สถานที่กำจัดขยะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อติดตาม ตรวจสอบ

และนำข้อมูลไปใช้ในการจัดหามาตรการลดการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลอย่างเหมาะสม อาทิ การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในพื้นที่หลุมฝังกลบขยะ Port Harcourt และ Keffe ประเทศไนจีเรีย หลุมฝังกลบขยะ Bhalaswa ประเทศอินเดีย และหลุมฝังกลบขยะ Al-Akaider ประเทศจอร์แดน [10-13] จากปัญหาและความสำคัญข้างต้น ทำให้คณะผู้วิจัยจึงได้เลือกการตรวจติดตามสถานะการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลที่สถานที่กำจัดขยะ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เนื่องจากในพื้นที่ศึกษามีปัญหาการไหลบ่าหน้าดินของน้ำชะขยะที่ไม่เข้าสู่ระบบบำบัดจากกิจกรรมภายในหลุมฝังกลบขยะและจากปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้ในน้ำชะขยะที่ไหลบ่าหน้าดินยังมีการปนเปื้อนโลหะหนักเนื่องจากในสถานที่ฝังกลบขยะมีแหล่งกำเนิดที่ก่อให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักมาจากการย่อยสลายขยะอันตรายที่ปะปนมา กับขยะชุมชนและขยะอันตรายที่ตกค้างรอการจัดการในพื้นที่ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนัก ได้แก่ สารหนู (As) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และตะกั่ว (Pb) ในน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลระดับตื้น ในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก 2) ประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการได้รับโลหะหนักผ่านการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในพื้นที่สถานที่กำจัดขยะ ณ สถานที่กำจัดขยะองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อ 1) ใช้เป็นฐานข้อมูลสำคัญให้ภาครัฐกำหนดนโยบายการจัดการและปรับปรุงสถานที่ฝังกลบขยะให้มีคุณภาพดีขึ้น 2) เป็นข้อมูลให้ภาคประชาชนในการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลได้อย่างเหมาะสม 3) ลดความเสี่ยงทางสุขภาพจากการใช้น้ำบาดาลที่ปนเปื้อนโลหะหนักให้ภาคประชาชน

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษาและการเก็บตัวอย่าง

พื้นที่ศึกษาในการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาล คือ สถานที่กำจัดขยะองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา อำเภอบางบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สถานที่กำจัดขยะองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น 112 แห่งและกำจัดขยะอันตรายให้หน่วยงานภาครัฐ 16 แห่ง โดยในปีพ.ศ. 2564 มีขยะอันตรายสะสมในพื้นที่ 6.83 ตัน และในปีพ.ศ. 2565 มีขยะอันตรายสะสมในพื้นที่ 2.3 ตัน [14, 15] ดังนั้นจึงทำให้น้ำชะขยะที่เกิดจากกระบวนการภายในหลุมฝังกลบขยะมีโอกาสปนเปื้อนโลหะหนักและหากมีการรั่วไหลของน้ำชะขยะสู่สิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดผลกระทบน้ำบาดาลได้ อย่างไรก็ตามสถานที่ฝังกลบขยะมีมาตรการป้องกันการรั่วซึมของน้ำชะขยะสู่น้ำบาดาล อาทิ การใช้แผ่นดินเหนียวสังเคราะห์ (geosynthetic clay liner) แต่สถานที่ฝังกลบขยะยังไม่มีระบบป้องกันการไหลบ่าหน้าดินของน้ำชะขยะสู่สิ่งแวดล้อม [16] ทำให้เกิดกระบวนการไหลบ่าหน้าดินของน้ำชะขยะจากสถานที่กำจัดขยะฯ สู่สิ่งแวดล้อมและน้ำบาดาล

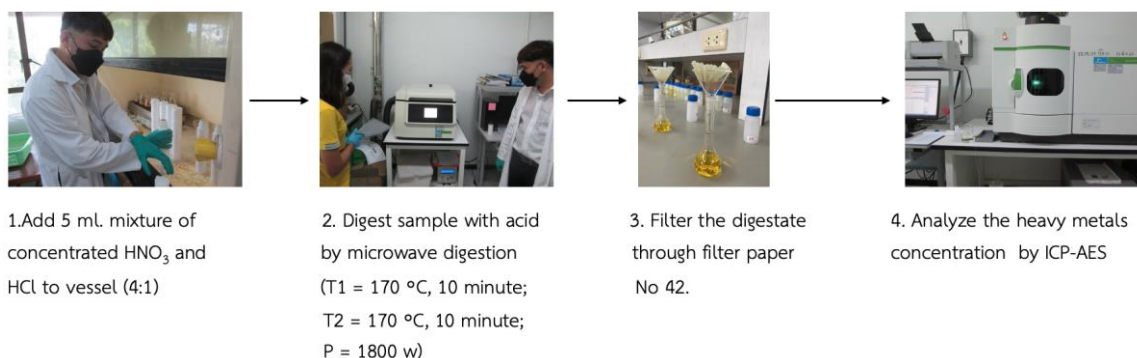
การดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำบาดาลจะเก็บตัวอย่างในฤดูแล้ง (มกราคม 2566) และ ฤดูน้ำหลาก (พฤษภาคม 2566) โดยการกำหนดฤดูกาลเป็นไปตามที่วิเคราะห์ปริมาณฝนสะสมของกรมอุตุนิยมวิทยา [17] น้ำบาดาลตัวอย่างจะถูกเก็บในชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นที่ระดับความลึก 6.74-7.87 เมตร ในฤดูแล้ง และ ที่ระดับความลึก 5.70-7.31 เมตร ในฤดูน้ำหลาก ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยวิธีการเก็บแบบจ้วง (Grab sampling) โดยใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำบาดาล (bailer) ตามมาตรฐาน USEPA [18] น้ำบาดาลตัวอย่างทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ในแต่ละฤดูกาลจะถูกเก็บที่บ่อสังเกตการณ์ทั้งหมด 4 บ่อ บ่อละ 3 ตัวอย่าง (N=3) ซึ่งบ่อสังเกตการณ์ที่เก็บตัวอย่างจะครอบคลุมทุกทิศทางของสถานที่กำจัดขยะที่มีขนาดพื้นที่ 299 ไร่ ได้แก่ บ่อสังเกตการณ์ที่ 1 (GW01/ทิศตะวันตก), บ่อสังเกตการณ์ที่ 2 (GW02/ทิศเหนือ), บ่อสังเกตการณ์ที่ 3 (GW03/ทิศตะวันออก), บ่อสังเกตการณ์ที่ 4 (GW04/ทิศใต้) ตัวอย่างน้ำบาดาลที่เก็บได้จะถูกนำไปใส่ในขวด HDPE หยอดกรดไนตริกเข้มข้นจนกระทั่งมีค่า pH<2 การเก็บรักษาตัวอย่างในระหว่างการขนส่งและก่อนดำเนินการในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างจะถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 °C [19] พิกัดภูมิศาสตร์ของบ่อสังเกตการณ์, ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง และระดับความลึกของน้ำบาดาลแสดงไว้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 พิกัดภูมิศาสตร์ ตำแหน่งจุดเก็บตัวอย่าง และความลึกของระดับน้ำบาดาล ณ สถานที่กำจัดขยะองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา

การเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์โลหะหนัก

การเตรียมตัวอย่างโดยการสกัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวอย่างของเหลว ดำเนินการตามระเบียบวิธีวิจัยมาตรฐาน USEPA 3015A [21] ด้วยเครื่อง Microwave digester ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Titan MPS แล้วนำตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 (Whatman) ปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร และวิเคราะห์โลหะหนัก (As, Cd, Cu, Mn, Ni และ Pb) ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น 8300 ตามวิธีการมาตรฐาน USEPA 6010D [22] กระบวนการสกัดโลหะหนักและการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำบาดาลแสดงไว้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการสกัดโลหะหนักและการวิเคราะห์โลหะหนัก

การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาล

งานวิจัยนี้ใช้การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักตามวิธีการของ USEPA [22] การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความเสี่ยงทางสุขภาพจากการได้รับสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogenic Health Risk Assessment) และก่อให้เกิดโรคร้ายที่ไม่ใช่มะเร็ง (Non-Carcinogenic Health Risk Assessment) ผ่านการสัมผัสโลหะหนัก 2 เส้นทาง คือ ผ่านทางเดินอาหาร (Ingestion) และการสัมผัส (Dermal Contact) [23, 24] ในกลุ่มประชากร 2 กลุ่มคือ เด็ก (<6 ปี) และผู้ใหญ่ (>15 ปี)

ขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพ สามารถคำนวณและแปลผลได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ 1) การประเมินการสัมผัส (Exposure Assessment) ผ่านทางเดินอาหารและการสัมผัสโดยการคำนวณค่า Average daily dose ผ่านทางเดินอาหาร (ADD_{ing}) ดังสมการที่ (1) และ ค่า Average daily dose ผ่านการสัมผัส (ADD_{der}) ดังสมการที่ (2) 2) ประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคร้ายที่ไม่ใช่โรคมะเร็ง (Non-Carcinogenic Risk Assessment) จากการได้รับ As, Cd, Cu, Mn, Ni และ Pb โดยการคำนวณค่า Hazard Quotient (HQ) เพื่อประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคร้ายที่ไม่ใช่โรคมะเร็งแต่ละชนิดผ่านทางเดินอาหาร (HQ_{ing}) ดังสมการที่ (3) ผ่านการสัมผัส (HQ_{der}) ดังสมการที่ (4) ค่ารวมค่า Hazard Index (HI) เพื่อประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคร้ายที่ไม่ใช่โรคมะเร็งจากการได้รับสารมากกว่า 1 ชนิด ดังสมการที่ (5) โดยหากค่า HI, HQ>1 แสดงว่าปริมาณโลหะที่เข้าสู่ร่างกายมีมากพอที่จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ และหากค่า HQ, HI<1 แสดงว่าปริมาณโลหะที่เข้าสู่ร่างกายมีไม่มากพอที่จะก่อให้เกิดผลกระทบ และ 3) การประเมินความเสี่ยงจากสารที่ก่อให้เกิดมะเร็ง (Carcinogenic Risk Assessment) จากการได้รับ As, Cd, Ni และ Pb ผ่านทางเดินอาหาร และ As กับ Ni ผ่านการสัมผัส โดยใช้การคำนวณค่า Carcinogenic Risk (CR) เพื่อประเมินความเสี่ยงจากสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งแต่ละชนิดผ่านทางเดินอาหาร (CR_{ing}) ดังสมการที่ (6) ผ่านการสัมผัส (CR_{der}) ดังสมการที่ (7) ค่ารวมค่า Total Carcinogenic Risk (TCR) เพื่อประเมินความเสี่ยงจากสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งจากการได้สารที่ก่อให้เกิดมะเร็งมากกว่า 1 ชนิด ดังสมการที่ (8) โดยหากค่า CR, TCR < 1.0×10⁻⁶ แสดงว่าไม่มีความเสี่ยงที่โลหะหนักที่ได้รับจะสร้างผลกระทบจนกระทั่งก่อให้เกิดมะเร็งได้ ค่า CR, TCR มีค่า 1.0×10⁻⁶-1.0×10⁻⁴ แสดงว่ามีความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดมะเร็งแต่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ และ ค่า CR, TCR > 1.0×10⁻⁴ แสดงว่าความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับไม่ได้ เนื่องจากปริมาณโลหะหนักที่ได้รับจะสร้างผลกระทบจนกระทั่งก่อให้เกิดมะเร็ง [26-28] โดยค่าคงที่ในการคำนวณทั้งหมดได้แสดงไว้ดังตารางที่ 1

$$\text{ADD}_{\text{ing}} (\text{mg/kg.day}) = \frac{C_w \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

$$\text{ADD}_{\text{der}} (\text{mg/kg.day}) = \frac{C_w \times \text{SA} \times \text{Kp} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

$$\text{HQ}_{\text{ing}} = \frac{\text{ADD}_{\text{ing}}}{\text{RfD}_{\text{ing}}} \quad (3)$$

$$\text{HQ}_{\text{der}} = \frac{\text{ADD}_{\text{der}}}{\text{RfD}_{\text{der}}} \quad (4)$$

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^n \text{HQ}_i \quad (5)$$

$$\text{CR}_{\text{ing}} = \text{ADD}_{\text{ing}} \times \text{Slope factor} \quad (6)$$

$$\text{CR}_{\text{der}} = \text{ADD}_{\text{der}} \times \text{Slope factor} \quad (7)$$

$$\text{TCR} = \sum_{i=1}^n \text{CR}_i \quad (8)$$



ตารางที่ 1 ค่าคงที่สำหรับการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการได้รับโลหะหนัก

Symbol	Description	Unit	Value for Children				Value for Adult	Reference
ADD	Average Daily Dose by ingestion (ADDing) and dermal contact (ADDder)	mg/kg/day						
Cw	Concentration of metals in groundwater	mg/L						
HQ	Hazard quotient through dermal (HQder) and ingestion exposure (HQing)	-						
HI	Hazard index	-						
CR	Carcinogenic risk through ingestion (CRing) and dermal exposure (CRder)	-						
TCR	Total carcinogenic risk	-						
EF	Exposure frequency	day/year	365					[28]
ED	Exposure duration	year	6				70	[29]
AT	Average time	day	EDx365					[30]
IngR	Ingestion rate of water	L/day	1.8				2.2	[31]
SA	Exposed skin surface area	cm ²	6600				18000	
Kp	Dermal permeability coefficient	cm/hr	As, Cd, Cu, Mn=0.001	Ni=0.0002			Pb=0.004	[22,31-32]
ET	Exposure time per day	h/day	1.0				0.58	[33]
CF	Conversion factor	L/cm ³	10 ⁻³					[34]
BW	Body weight	kg	15				70	[35]
RefDing	Reference dose for ingestion	mg/kg-bw/day	As=3.0x10 ⁻⁴ , Cd=1.00x10 ⁻³ , Cu=4x10 ⁻² , Mn=4.70x10 ⁻² , Ni=2.00x10 ⁻² , Pb=1.4x10 ⁻³					[36-39]
RefDder	Reference dose for dermal contact		As=1.23x10 ⁻⁴ , Cd=2.5x10 ⁻⁵ , Cu=1.2x10 ⁻² , Mn=1.84 x 10 ⁻³ , Ni=5.40x10 ⁻³ , Pb=5.24x10 ⁻⁴					
SF	Slope factor for ingestion	mg/kg/day	As=1.5, Cd=0.0038, Ni=1.7, Pb=0.0085					
	Slope factor for dermal contact		As=3.66, Ni=42.5					

การวิเคราะห์ทางสถิติ

งานวิจัยนี้ใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สถิติเชิงอ้างอิง โดยการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient, r) เพื่อวิเคราะห์หาแหล่งกำเนิดของการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลจากความสัมพันธ์ของโลหะหนักแต่ละชนิด โดยหากค่าสัมประสิทธิ์ของคู่โลหะหนักมีความสัมพันธ์เชิงบวก ($r > 0$) แปลผลได้ว่า โลหะคู่นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากแหล่งเดียว และหากค่าสัมประสิทธิ์ของคู่โลหะหนัก



มีความสัมพันธ์เชิงลบ ($r < 0$) แปลผลได้ว่า แหล่งกำเนิดของโลหะหนักนั้นมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน [41, 42] และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของการปนเปื้อนโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำบาดาลระหว่างฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากด้วยวิธีทางสถิติ Independent sample t-test โดยการวิเคราะห์สถิติทั้งหมดในงานวิจัยนี้คำนวณด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS (version 26)

การควบคุมคุณภาพของผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

การตรวจสอบความใช้ได้ในการวิเคราะห์ (Method Validation) ใช้การตรวจสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linearity) จากการสร้างกราฟสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 ppm โดยพบว่าค่าความผันแปร (r^2) ของโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่า $r^2 > 0.995$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ผลการทดสอบความแม่นยำ (accuracy) ของการทดสอบใช้การวัดร้อยละการคืนกลับ (%recovery) พบว่าอยู่ในช่วง 102.32-109.70% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ที่ 80-120% [43] สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดได้แก่ HNO_3 (Kemaus, lot no. 2209165609) HCl (Fisher, lot no. 2192020) และสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน ซึ่งเป็น Certified reference material (CRM) ของบริษัท Sigma-Aldrich (lot no. bcch2638) สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยทุกชนิดต้องเป็นสารเคมีที่ผ่านการทดสอบคุณภาพจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรอง ISO17034 การเตรียมเครื่องแก้วที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ เครื่องแก้วจะถูกแช่ใน 14% HNO_3 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงและล้างออกด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง (Milli-Q water) ก่อนนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการ การรายงานผลการวิเคราะห์ทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้การวิเคราะห์ในรูปแบบ Triplicate Determination เพื่อเป็นตัวแทนของผลการทดสอบที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบ

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลและผลการวิเคราะห์สถิติ

ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำบาดาลในฤดูแล้ง (summer season) และฤดูน้ำหลาก (rainy season) เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานโลหะหนักในน้ำบาดาล และเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นโลหะหนักเฉลี่ยในน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาปี.ศ. 2565 (ตรวจวัดโดยองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา) [44] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำบาดาลในฤดูแล้ง ฤดูน้ำหลาก และค่ามาตรฐานโลหะหนักในน้ำบาดาล

Season	Sample site	Concentration (mg/L)					
		As	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb
Summer (Jan 2023)	GW01 (N=3)	0.060±0.016	BDL	0.013±0.001	0.314±0.002	BDL	BDL
	GW02 (N=3)	0.108±0.028	BDL	0.017±0.002	0.001±0.004	BDL	BDL
	GW03 (N=3)	0.105±0.021	BDL	0.004±0.002	0.002±0.000	BDL	0.001±0.0005
	GW04 (N=3)	0.079±0.004	BDL	0.006±0.004	0.051±0.021	BDL	0.001±0.0009
	Average	0.088	BDL	0.010	0.092	BDL	5×10^{-4}
Rainy (May 2023)	GW01 (N=3)	BDL	BDL	0.010±0.001	0.954±0.003	0.003±0.003	BDL
	GW02 (N=3)	0.007±0.003	BDL	0.010±0.001	0.009±0.001	0.011±0.0022	0.006±0.007



Season	Sample site	Concentration (mg/L)					
		As	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb
	GW03 (N=3)	0.025±0.005	0.001±0.001	0.009±0.003	0.058±0.04	0.016±0.0025	BDL
	GW04 (N=3)	0.029±0.028	BDL	0.008±0.007	0.724±0.004	0.005±0.0019	BDL
	Average	0.015	2.5×10^{-4}	9.3×10^{-3}	0.436	0.009	1.5×10^{-3}
Average concentration of heavy metals in groundwater in study area during March 2022 [43]							
		-	< 0.001	< 0.05	0.86	< 0.02	< 0.01
USEPA standard [44-46]							
		0.01	0.005	1.3	0.05	0.1	0.015
WHO standard [47]							
		0.01	0.003	2	-	0.07	0.01
Maximum contaminant levels (MCLs) [48]							
		0.05	0.005	1.3	0.05	0.1	0.015

BDL, below detection limit; N, number of samples

ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของระดับความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำบาดาล พบว่าปริมาณการปนเปื้อนของ As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb ฤดูแล้งมีค่า 0.088, BDL, 0.01, 0.092, BDL, 5×10^{-4} ตามลำดับ ส่วนในฤดูน้ำหลากมีค่า 0.015, 2.5×10^{-4} , 9.25×10^{-3} , 0.436, 0.009, 1.5×10^{-3} ตามลำดับ ซึ่งในฤดูแล้งมีค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนของ As และ Cu สูงกว่าในฤดูน้ำหลาก ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลระหว่างฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากทางสถิติด้วย Independent sample t-test (ตารางที่ 3) พบว่าโลหะหนักที่มีการปนเปื้อนแตกต่างกันในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก คือ As (p-value = 0.000), Mn (p-value = 0.020) และ Ni (p-value = 0.000) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

ผลการเปรียบเทียบการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลในแต่ละบ่อสังเกตการณ์กับค่ามาตรฐาน พบว่า ชนิดของโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐานของ USEPA, WHO, NOAA คือ As (GW01, GW03, GW04), Mn (GW01, GW04) ในฤดูแล้ง และ As (GW03, GW04), Mn (GW01, GW03, GW04) ในฤดูน้ำหลาก ชนิดของโลหะในน้ำบาดาลที่มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน คือ Cd (GW01-GW04), Cu (GW01-GW04), Mn (GW02, GW03), Ni (GW01-GW04), Pb (GW01-GW04) ในฤดูแล้ง และ As (GW01, GW02), Cd (GW01-GW04), Cu (GW01-GW04), Mn (GW02), Ni (GW01-GW04) และ Pb (GW01-GW04) ในฤดูน้ำหลาก

ผลการเปรียบเทียบการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลแต่ละบ่อสังเกตการณ์ของงานวิจัยนี้กับค่าเฉลี่ยความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำบาดาลปีพ.ศ. 2565 ที่ตรวจวัดโดยองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่าการปนเปื้อน Cd, Ni, Pb จากทุกบ่อสังเกตการณ์ในฤดูน้ำหลากและฤดูแล้งมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนในปี 2565 ยกเว้น Mn ใน GW01 (0.954) จากฤดูน้ำหลากที่มีการปนเปื้อนสูงกว่าในปีพ.ศ. 2565 (0.86)



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำบาดาลระหว่างฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากด้วยสถิติแบบ Independent sample t-test

	As	Cd	Cu	Mn	Ni	Pb
t-value	7.953**	-1.399	0.384	-2.647*	-5.312**	-0.816
p-value (2-tailed)	0.000	0.189	0.705	0.020	0.000	0.423

** . very significant differences at the 0.01 level (2-tailed); * . significant difference at the 0.05 level (2-tailed).

ผลการวิเคราะห์แหล่งกำเนิดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาลด้วย Pearson correlation coefficient (ตารางที่ 4) พบว่า As-Mn มีค่า $r = -0.535$, As-Ni มีค่า $r = -0.579$ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.01 และ Cd-Ni มีค่า $r = 0.488$ ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นการปนเปื้อนของ As-Mn, As-Ni ในน้ำบาดาลมีสาเหตุมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน และ Cd-Ni ในน้ำบาดาลมีสาเหตุการปนเปื้อนมาจากการแหล่งกำเนิดเดียวกัน

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient)

	Arsenic (As)	Cadmium (Cd)	Copper (Cu)	Manganese (Mn)	Nickel (Ni)	Lead (Pb)
Arsenic (As)	1	-.201	.025	-.535**	-.579**	-.172
Cadmium (Cd)		1	-.162	-.168	.488*	-.098
Copper (Cu)			1	.005	-.052	-.060
Manganese (Mn)				1	-.106	-.247
Nickel (Ni)					1	.235
Lead (Pb)						1

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

ผลการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาล

ผลการคำนวณค่า ADD (ADDing และ ADDder), HQ (HQing และ HQder) , HI, CR (CRing และ CRder) และ TCR เพื่อประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพจากการได้รับโลหะหนักในน้ำบาดาลแสดงไว้ดังตารางที่ 5 ผลการประเมินการรับสัมผัสโลหะหนักแต่ละชนิดเข้าสู่ร่างกาย (ADD) พบว่าในฤดูแล้งมีค่า ADD สูงสุด คือ As (1.06×10^{-2}) และในฤดูน้ำหลากคือ As (1.83×10^{-3}) ชนิดของโลหะหนักที่มีค่า ADD ต่ำสุดในฤดูแล้งคือ Cd, Ni (0) และฤดูน้ำหลากคือ Cd (3.87×10^{-8}) ผลการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคร้ายที่ไม่ใช่โรคมะเร็งของโลหะหนักแต่ละชนิด (HQ) พบว่าชนิดของโลหะหนักที่มีค่า HQ สูงสุดในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก คือ As (ฤดูแล้ง = 35.2, ฤดูน้ำหลาก = 6.1) ชนิดของโลหะหนักที่มีค่า HQ ต่ำที่สุดคือ Cd, Ni (0) ในฤดูแล้ง Ni (5.00×10^{-5}) ในฤดูน้ำหลาก ผลการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคร้ายที่ไม่ใช่โรคมะเร็งจากการได้รับโลหะหนักมากกว่าหนึ่งชนิด (HI) พบว่าในฤดูแล้งมีค่า HI ในเด็กคือ 35.85, ผู้ใหญ่คือ 9.42 ในฤดูน้ำหลากมีค่า HI ในเด็กคือ 7.62, ผู้ใหญ่คือ 2.01 ผลการประเมินความเสี่ยงสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง (CR) พบว่า 1) Cu, Mn จากการได้รับผ่านการสัมผัสและทางเดินอาหาร และ Cd, Ni ผ่านการสัมผัสไม่มีความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งเนื่องจากไม่มีค่า slope factor เพราะเป็นสารที่ไม่จัดว่าเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งผ่านช่องทางดังกล่าว และ 2) ชนิดของโลหะหนักที่มีค่า CR สูงสุดในฤดูแล้ง คือ As (1.58×10^{-2}) ในฤดูน้ำหลาก คือ As (2.75×10^{-3}) ชนิดของโลหะหนักที่มีค่า CR ต่ำสุดในฤดูแล้งคือ Ni, Cd (0) ฤดูน้ำหลากคือ As (1.01×10^{-8}) ผลการประเมินความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งจากการได้รับโลหะหนักมากกว่าหนึ่งชนิด (TCR) พบว่าในฤดูแล้งมีค่า TCR ในเด็กคือ 1.60×10^{-2} ผู้ใหญ่คือ 4.20×10^{-3} ส่วนฤดูน้ำหลากมีค่า TCR ในเด็กคือ 4.56×10^{-3} , ผู้ใหญ่คือ 1.20×10^{-3}



ตารางที่ 5 การประเมินการรับสัมผัส (mg/kg/day), การประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคอื่นที่นอกเหนือโรคมะเร็ง และการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก

Exposure assessment								
Element	Summer season (Jan 2023)				Rainy season (May 2023)			
	Children		Adult		Children		Adult	
	ADDing	ADDder	ADDing	ADDder	ADDing	ADDder	ADDing	ADDder
As	1.06x10 ⁻²	3.87x10 ⁻⁵	2.77x10 ⁻³	1.36x10 ⁻⁵	1.83x10 ⁻³	6.71x10 ⁻⁶	4.80x10 ⁻⁴	2.35x10 ⁻⁶
Cd	0	0	0	0	3.00x10 ⁻⁵	1.10x10 ⁻⁷	7.88x10 ⁻⁶	3.87x10 ⁻⁸
Cu	1.20x10 ⁻³	4.40x10 ⁻⁶	3.10x10 ⁻⁴	1.54x10 ⁻⁶	1.11x10 ⁻³	4.07x10 ⁻⁶	2.90x10 ⁻⁴	1.43x10 ⁻⁶
Mn	1.10x10 ⁻²	4.05x10 ⁻⁵	2.89x10 ⁻³	1.42x10 ⁻⁵	5.24x10 ⁻²	1.92x10 ⁻⁴	1.37x10 ⁻²	6.73x10 ⁻⁵
Ni	0	0	0	0	1.05x10 ⁻³	7.70x10 ⁻⁷	2.80x10 ⁻⁴	2.70x10 ⁻⁷
Pb	6.00x10 ⁻⁵	8.80x10 ⁻⁷	1.57x10 ⁻⁵	3.09x10 ⁻⁷	1.80x10 ⁻⁴	2.64x10 ⁻⁶	4.71x10 ⁻⁵	9.26x10 ⁻⁷
Non-carcinogenic health risk assessment								
Element	Summer season (Jan 2023)				Rainy season (May 2023)			
	Children		Adult		Children		Adult	
	HQing	HQder	HQing	HQder	HQing	HQder	HQing	HQder
As	35.20	3.15x10 ⁻¹	9.22	1.10x10 ⁻¹	6.10	5.46x10 ⁻²	1.60	1.91x10 ⁻²
Cd	0	0	0	0	3.01x10 ⁻²	4.41x10 ⁻³	7.88x10 ⁻³	1.55x10 ⁻³
Cu	3.00x10 ⁻²	3.70x10 ⁻⁴	7.86x10 ⁻³	1.30x10 ⁻⁴	2.78x10 ⁻²	3.40x10 ⁻⁴	7.27x10 ⁻³	1.20x10 ⁻⁴
Mn	2.35x10 ⁻¹	2.20x10 ⁻²	6.15x10 ⁻²	7.72x10 ⁻³	1.11	1.04x10 ⁻¹	2.92x10 ⁻¹	3.66x10 ⁻²
Ni	0	0	0	0	5.25x10 ⁻²	1.40x10 ⁻⁴	1.38x10 ⁻²	5.00x10 ⁻⁵
Pb	4.29x10 ⁻²	1.68x10 ⁻³	1.12x10 ⁻²	5.90x10 ⁻⁴	1.29x10 ⁻¹	5.04x10 ⁻³	3.37x10 ⁻²	1.77x10 ⁻³
HI	35.85		9.42		7.62		2.01	
Carcinogenic health risk assessment								
Element	Summer season (Jan 2023)				Rainy season (May 2023)			
	Children		Adult		Children		Adult	
	CRing	CRder	CRing	CRder	CRing	CRder	CRing	CRder
As	1.58x10 ⁻²	1.40x10 ⁻⁴	4.15x10 ⁻³	4.97x10 ⁻⁵	2.75x10 ⁻³	2.89x10 ⁻⁸	7.20x10 ⁻⁴	1.01x10 ⁻⁸
Cd	0	NC	0	NC	1.14x10 ⁻⁷	NC	3.00x10 ⁻⁸	NC
Ni	0	0	0	0	1.79x10 ⁻³	3.27x10 ⁻⁵	4.70x10 ⁻⁴	1.15x10 ⁻⁵
Pb	5.10x10 ⁻⁷	NC	1.34x10 ⁻⁷	NC	1.53x10 ⁻⁶	NC	4.01x10 ⁻⁷	NC
TCR	1.60x10 ⁻²		4.20x10 ⁻³		4.56x10 ⁻³		1.20x10 ⁻³	

NC, not calculated; ADDing, average Daily Dose by ingestion; ADDder, average Daily Dose by dermal contact; HQing, hazard quotient through ingestion exposure; HQder, hazard quotient through dermal exposure; HI, hazard index; CRing, carcinogenic risk through ingestion exposure; CRder, carcinogenic risk through dermal exposure; TCR, total carcinogenic risk

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำบาดาลในพื้นที่สถานที่กำจัดขยะฯ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา พบว่าการปนเปื้อนของ As ใน GW01-GW04 ในฤดูแล้งและ GW03 กับ GW04 ในฤดูน้ำหลาก มีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานของ

WHO (0.01), USEPA (0.01), ค่า MLC (0.05) ของ NOAA และการปนเปื้อนของ Mn ใน GW01, GW04 ในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากเกินค่ามาตรฐานน้ำบาดาลของ USEPA (0.05), ค่า MLC (0.05) ของ NOAA สาเหตุที่ทำให้ความเข้มข้นของ As และ Mn ในน้ำบาดาลมีค่าเกินมาตรฐาน เนื่องจากปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศ (ปริมาณฝน, หยาดน้ำฟ้า) และปัจจัยด้านกิจกรรมในสถานที่กำจัดขยะ (กิจกรรมการใช้น้ำดับเพลิงเมื่อเกิดเพลิงไหม้หลุมฝังกลบขยะ) โดยปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยนี้จะก่อให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินของน้ำชะขยะแพร่กระจายสู่ชั้นน้ำบาดาล ส่งผลให้น้ำบาดาลในบริเวณสถานที่ฝังกลบขยะมีความเข้มข้นของ As และ Mn เกินค่ามาตรฐาน ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาระดับการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำชะขยะและน้ำไหลบ่าหน้าดินที่รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม ปีพ.ศ. 2566 โดย นิสา พักตร์วิไล และคณะ [49] พบว่าน้ำชะขยะและน้ำไหลบ่าหน้าดินมีการปนเปื้อน As และ Mn ในปริมาณสูง โดยค่าความเข้มข้นของ Mn ในน้ำชะขยะมีค่าความเข้มข้นสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของ USEPA และ As มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ปัจจัยด้านสภาพภูมิอากาศและกิจกรรมภายในหลุมฝังกลบขยะในปีพ.ศ. 2566 ยังส่งผลให้ความเข้มข้นของ Mn จาก GW01 ในฤดูน้ำหลากมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนของ Mn ในน้ำบาดาล ปีพ.ศ. 2565 โดยสาเหตุที่ทำให้ความเข้มข้นของ Mn ใน GW01 มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนของ Mn ในน้ำบาดาล ปีพ.ศ. 2565 เนื่องจากความเข้มข้นของ Mn ในน้ำชะขยะที่มีการรั่วไหลสู่ชั้นน้ำบาดาลมีค่าสูง โดยความเข้มข้นของ Mn ในน้ำชะขยะมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของ USEPA ถึง 2 เท่า และสาเหตุที่ทำให้มีเพียงน้ำบาดาลใน GW01 เท่านั้นที่มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยการปนเปื้อนของ Mn ในน้ำบาดาล ปีพ.ศ. 2565 เนื่องจากระดับความลึกของน้ำบาดาลใน GW01 มีค่าน้อยที่สุด ส่งผลให้สารมลพิษจะซึมผ่านผิวดินลงไปยังชั้นน้ำบาดาลได้ง่าย

การวิเคราะห์แนวโน้มผลกระทบทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากโดยการคำนวณค่า HQ พบว่าในฤดูกาลเดียวกันโลหะหนักจะมีค่า HQ จากการได้รับโลหะหนักผ่านระบบทางเดินอาหารมากกว่าการสัมผัสและในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่ ผลการเปรียบเทียบค่า HQ ระหว่างฤดูแล้งและฤดูน้ำหลาก พบว่าค่า HQ ของ Cd, Mn, Ni และ Pb ในฤดูน้ำหลากสูงกว่าฤดูแล้ง ส่งผลให้โลหะดังกล่าวมีความเสี่ยงทางสุขภาพจากการได้รับ Cd, Mn, Ni และ Pb เข้าสู่ร่างกายในฤดูน้ำหลากสูงกว่าฤดูแล้ง ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคอื่นนอกจากโรคเมร็งแต่ละชนิด (HQ) พบว่าชนิดของโลหะหนักที่มีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับไม่ได้ คือ 1) As ผ่านทางเดินอาหารในเด็ก (35.20), ผู้ใหญ่ (9.22) ในฤดูแล้ง 2) As ผ่านทางเดินอาหารในเด็ก (6.10), ผู้ใหญ่ (1.60), Mn ผ่านทางเดินอาหารในเด็ก (1.11) ในฤดูน้ำหลาก การวิเคราะห์ผลกระทบทางสุขภาพจากการได้รับ As และ Mn ($HQ > 1$) พบว่า As มีผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหาร, ระบบหมุนเวียนโลหิต (หัวใจ), ระบบประสาท, สมอ, ระบบพันธุกรรม (ทำลายสารพันธุกรรม) และ Mn มีผลกระทบต่อระบบประสาท (โรคพาร์กินสัน), ระบบหัวใจ และส่งผลต่อความดันโลหิตโดยทำให้มีภาวะความดันต่ำ [50] ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดโรคอื่นนอกจากเมร็งผ่านการสัมผัสสารมากกว่าหนึ่งชนิด (HI) พบว่าความเสี่ยงทางสุขภาพในฤดูน้ำหลากและฤดูน้ำแล้งในเด็ก, ผู้ใหญ่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับไม่ได้ทั้งหมด โดยมีแนวโน้มความเสี่ยงทางสุขภาพจากค่า HI ดังนี้ 1) ความเสี่ยงในเด็กจากการได้รับโลหะหนักมากกว่าผู้ใหญ่ โดยมีปัจจัยมาจากค่า ET ของเด็กที่มากกว่าผู้ใหญ่ จึงทำให้เด็กได้รับสารพิษเข้าสู่ร่างกายมากกว่าผู้ใหญ่ [51] และ 2) ความเสี่ยงในฤดูแล้งมากกว่าฤดูน้ำหลาก โดยมีปัจจัยมาจากระดับการปนเปื้อนของ As ในฤดูแล้งที่สูงกว่าฤดูน้ำหลากหลายเท่า

ผลการประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพที่ก่อให้เกิดเมร็งจากการได้รับโลหะหนักแต่ละชนิด (CR) ในฤดูแล้ง พบว่า Cd Ni และ Pb ไม่มีความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดเมร็งจากการได้รับเข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินอาหารและการสัมผัส ซึ่งแตกต่างจากผลการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพของ As โดยได้รับ As ผ่านทางเดินอาหาร (1.58×10^{-2}) ในเด็ก, ผ่านการสัมผัส (1.40×10^{-4}) ในเด็ก, ผ่านทางเดินอาหาร (4.15×10^{-3}) ในผู้ใหญ่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับไม่ได้ และ As ผ่านการสัมผัสในผู้ใหญ่ (4.97×10^{-5}) อยู่ในเกณฑ์ที่มีความเสี่ยงแต่ยอมรับความเสี่ยงได้ ผลการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพที่เกิดเมร็งแต่ละชนิด (CR) ในฤดูน้ำหลาก พบว่า 1) Cd ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายไม่มีความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดเมร็งผ่านทางเดินอาหาร 2) Ni ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายมีความเสี่ยงที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับไม่ได้ผ่านทางเดินอาหารในเด็ก (1.79×10^{-3}), ผู้ใหญ่ (4.7×10^{-4})



และมีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ผ่านการสัมผัสในเด็ก (3.27×10^{-5}), ผู้ใหญ่ (1.15×10^{-4}) 3) Pb ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายไม่มีความเสี่ยงทางสุขภาพที่จะก่อให้เกิดมะเร็งในผู้ใหญ่แต่พบความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ผ่านทางเดินอาหารในเด็ก (1.53×10^{-6}) 4) As ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายอยู่ในเกณฑ์ยอมรับไม่ได้ผ่านทางเดินอาหารในเด็ก (2.75×10^{-3}), ผู้ใหญ่ (7.20×10^{-4}) และไม่พบความเสี่ยงจากการได้รับ As ผ่านการสัมผัส ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดมะเร็งจากการได้รับโลหะหนักในฤดูแล้ง, ฤดูน้ำหลากในเด็ก, ผู้ใหญ่ พบว่าความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดมะเร็งจากการได้รับโลหะหนักเข้าสู่ร่างกายจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในเด็กสูงกว่าผู้ใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Pui และคณะ [52] นอกจากนั้นผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการได้รับโลหะหนักจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลผ่านช่องทางการสัมผัสและทางเดินอาหารยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Omobolaji และคณะ [53] ที่พบว่าความเสี่ยงสุขภาพที่ก่อให้เกิดมะเร็งผ่านช่องทางการย่อยอาหารจะมีค่าความเสี่ยงสูงกว่าการได้รับผ่านสัมผัส ผลการวิเคราะห์ค่าความเสี่ยงทางสุขภาพที่ก่อให้เกิดมะเร็งจากการได้รับสารมากกว่าหนึ่งชนิด (TCR) พบว่าความเสี่ยงในฤดูแล้งและฤดูน้ำหลากของสองกลุ่มประชากรมีความเสี่ยงอยู่ในเกณฑ์รับไม่ได้ทั้งหมด ซึ่งความเสี่ยงในเด็กมากกว่าผู้ใหญ่และในฤดูแล้งมากกว่าฤดูน้ำหลาก โดยมีผลมาจากปัจจัยเดียวกับการประเมินความเสี่ยงทางสุขภาพโดยค่า HI

จากการศึกษาระดับการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำบาดาลและการประเมินความเสี่ยงจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลข้างต้น ทำให้คณะผู้วิจัยมีข้อเสนอเชิงนโยบาย (policy implementation) ดังนี้ 1) ด้านการใช้ประโยชน์ข้อมูลจากงานวิจัย หน่วยงานที่รับผิดชอบดูแลสถานที่กำจัดขยะชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ควรมีการนำข้อมูลการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลของชั้นน้ำบาดาลระดับตื้นจากงานวิจัยนี้ไปจัดทำเป็นฐานข้อมูลร่วมกับข้อมูลการตรวจวัดการปนเปื้อนโลหะหนักในชั้นน้ำบาดาลของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล เพื่อนำเสนอข้อมูลต่อองค์การบริหารส่วนจังหวัดพระนครศรีอยุธยาและจัดหาแนวทางบริหารการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษาได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังควรมีการศึกษาข้อมูลการปนเปื้อนโลหะหนักในชั้นต่างๆเพิ่มเติม เพื่อประเมินผลกระทบทางสุขภาพจากการใช้ประโยชน์น้ำบาดาลจากชั้นน้ำต่างๆเพิ่มเติม และ 2) ด้านการจัดการสถานที่ฝังกลบขยะ หน่วยงานที่รับผิดชอบสถานที่กำจัดขยะชุมชน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ควรมีการสร้างระบบการรวบรวมน้ำไหลบ่าหน้าดินของน้ำชะขยะ และสร้างระบบลำเลียงน้ำไหลบ่าหน้าดินที่รวบรวมได้ผ่านทางน้ำเปิด (open channel) หรือท่อระบายน้ำ (drainage pipe) เพื่อไปบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำชะขยะ อันจะนำไปสู่การลดปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำบาดาลที่มีสาเหตุมาจากหลุมฝังกลบขยะได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยประจำปีงบประมาณ 2566 (รหัสโครงการ: ววน. 005/2566)

เอกสารอ้างอิง

1. Haipeng G, Muzi L, Lu W, Yunlong W, Xisheng Z, Xiaobing Z, et al. Evaluation of Groundwater Suitability for Irrigation and Drinking Purposes in an Agricultural Region of the North China Plain. *Water* 2021;13:3426.
2. Shinichiro O, Satoshi T, Yasuka K, Tetsuo K, Gemanu H, Keishiro H, et al. Sustainable Groundwater Management in Asian Cities. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies; 2007.
3. Bhalla B, Saini M, Jha M. Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill. *Int J Res Eng Technol* 2013;2:223–32.
4. Kjeldsen P, Barlaz MA, Rooker AP, Baun A, Ledin A, Christensen TH. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2002;32(4):297–336.



5. Victor FS, Christina F, Fikira K. Heavy metal pollution in leachates and its impacts on the quality of groundwater resources around Iringa municipal solid waste dumpsite. *Environ Sci Pollut Res Int* 2023;30(3):8110-22.
6. Seyyed MHB, Hossein H, Hamed MA, Ali H. Concentration of heavy metals in leachate, soil, and plants in Tehran's landfill: Investigation of the effect of landfill age on the intensity of pollution. *Heliyon* 2023;9:13017.
7. Thomas KB, Francis O, Osei A. Heavy metal contamination assessment of groundwater quality: a case study of Oti landfill site, Kumasi. *Appl Water Sci* 2019;9:33.
8. Gamar A, Zair T, Kabriti MF, Hilali E. Contamination of heavy metals and metalloids of groundwater in the vicinity to the wild landfill of El Hajeb city (Morocco). *Int J Eng Sci Tech* 2020;12(4):41-53.
9. Mohamed HE, Mustafa E, Essam AM, Hatem SR, Madarász T, Attila K, et al. New approach into human health risk assessment associated with heavy metals in surface water and groundwater using Monte Carlo Method. *Scientific reports* 2024;14:1008.
10. Omobolaji OA, Elekwachi W, Eze C, Maureen CO, Victoria OE, Lilian CB, et al. Potential environmental pollution and human health risk assessment due to leachate contamination of ground water from anthropogenic impacted site. *Environ Chall* 2022;9:100627.
11. Kyari UD, Limin M, Chengcheng B, Lartey YG. Impact and Health Risk Assessment of Groundwater in the Vicinity of Dumpsites in Keffi Metropolis, Nigeria. *J Geosci Environ Prot* 2023;11:85-113.
12. Janardhana RN, Gossel W, Sudhakar M. Management of Natural Resources in a Changing Environment. New York: Springer; 2015.
13. Ibrahim A, Tareq AA. Assessment of Groundwater Pollution with Heavy Metals at the Al-Akaider Landfill Area, North Jordan. *Res J of Environ and Earth Sci* 2018;10(1):16-23.
14. Department of Pollution Control. Report on the Situation of Hazardous Waste from Communities in 2022. [Internet]. 2022 [cited 2023 May 15]. Available from: <https://www.pcd.go.th/publication/25971/>
15. Department of Pollution Control. Report on the Situation of Hazardous Waste from Communities in 2021. [Internet]. 2021 [cited 2023 May 15]. Available from: <https://www.pcd.go.th/publication/29745/>
16. Department of Pollution Control. Project for Managing Waste Issues (Phra Nakhon Si Ayutthaya). [Internet]. 2014 [cited 2023 May 17]. Available from: <https://thaimsw.pcd.go.th/service/uploads/report-waste-file/d0bcfc3d-0c82-4b69-9bc1-07e9181af7b6.pdf>
17. Department of Meteorological. Forecasting the Weather Patterns for the Rainy Season in Thailand in 2023. [Internet]. 2023 [cited 2023 Aug 15]. Available from: <http://climate.tmd.go.th/content/file/2681>
18. US Environmental Protection Agency. Exposure Point Concentrations in Groundwater. [Internet]. 1991 [cited 2023 Oct 2]. Available from: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/exposure_point_conc.pdf
19. Rodger BB, Andrew ED, Eugene WR. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington: American public health association; 2017.



20. US Environmental Protection Agency. Method 3015A: Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts. [Internet]. 2007 [cited 2023 Oct 1]. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3015a.pdf>
21. US Environmental Protection Agency. Method 6010D: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry. [Internet]. 2018 [cited 2023 Oct 1]. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/6010d.pdf>
22. US Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund (Volume I) Human health evaluation manual (Part A). Washington: Office of Emergency and Remedial Response; 1989.
23. Liu N, Zhu QY, Qing X, Yang L, Dai MZ, Jiang XQ, et al. Non-carcinogenic Risk Induced by Heavy Metals in Water from a Chinese River. Polish J Environ Stud 2012;21(4):967–72.
24. Shafiuddin AAS, Belal BM, Omar FBSM, Moshir RMD, Shafiqul ISMD. Human health risk assessment of heavy metals in water from the subtropical river, Gomti, Bangladesh. Environ Nanotechnol Monit Manag 2021;15:100416.
25. US Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund (Volume I) Human Health Evaluation Manual (Part B). Washington: Office of Emergency and Remedial Response; 1991.
26. US Environmental Protection Agency. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment. [Internet]. 2005 [cited 2023 Nov 12]. Available from: https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-09/documents/cancer_guidelines_final_3-25-05.pdf
27. US Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS). [Internet]. 2010 [cited 2023 Nov 11]. Available from: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2010-10-18/html/2010-26159.htm>
28. Wongsasuluk P, Chotpantarat S, Siri Wong W, Robson M. Heavy Metal Contamination and Human Health Risk Assessment in Drinking water from Shallow Groundwater Wells in an Agricultural Area in Ubon Ratchathani Province, Thailand. Environ Geochem 2014;36:169–82.
29. US Environmental Protection Agency. Default Exposure Parameters and Definitions. [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 15]. Available from: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/404322.pdf>
30. US Environmental Protection Agency. Exposure Factors Handbook 2011 edition (final report). [Internet]. 2011 [cited 2023 Oct 23]. Available from: https://ordspub.epa.gov/ords/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=522996
31. Anim-Gyampo M, Anornu GK, Appiah-Adjei EK, Agodzo SK. Quality and health risk assessment of shallow groundwater aquifers within the Atankwidi basin of Ghana. Groundw Sustain Dev 2019;9:100217.
32. Mohammadi AA, Zarei A, Majidi S, Ghaderpoury A, Hashempour Y, Saghi MH, et al. Carcinogenic and non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals in drinking water of Khorramabad, Iran. MethodsX 2019;6:1642–51.
33. Wang, J, Liu G, Liu Q, Lam S. Multivariate statistical evaluation of dissolved trace elements and a water quality assessment in the middle reaches of Huaihe River, Anhui, China. Sci Total Environ 2017;583:421–31.



34. Osei A, Ampomah S, Larbi G, Osei A, Agyekumwaa S, Joseph A, et al. Assessment of groundwater quality from some hostels around Kwame Nkrumah University of Science and Technology. *Scientific African* 2022;17:01361.
35. Mahmoud T, Mostafa D, Maryam M, Hadi E, Reza AF, Ahmad Z. Ecological risk assessment of trace elements (TEs) pollution and human health risk exposure in agricultural soils used for saffron cultivation. *Scientific report* 2023;14:4556.
36. US Environmental Protection Agency. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites. [Internet]. 2002 [cited 2023 Oct 22]. Available from: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175878.pdf>
37. Muhammad N, Nafee M. Geo-chemical investigation and health risk assessment of potential toxic elements in industrial wastewater irrigated soil: A geo-statistical approach. *J Biodivers Environ Sci* 2018;12:367–80.
38. Matthew TK, Mayeen UK, Yusoff MA, Wan H, Binti A, David AB, et al. Assessment of health risk due to the exposure of heavy metals in soil around mega coal-fired cement factory in Nigeria. *Results Phys* 2018;11:755–62.
39. Adimalla N. Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. *Environ Geochem Health* 2020;42:59–75.
40. Giri S, Singh AK. Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India. *Environ Monit Assess* 2015;187(3):4265.
41. Haodong Z, Yan W, Xiping L, Yuhong Y, Xiaonan W, Liyu D. Comprehensive assessment of harmful heavy metals in contaminated soil in order to score pollution level. *Scientific Reports* 2022;12:3552.
42. US Association of Official Agricultural Chemists. AOAC Guidelines for Single Laboratory Validation of Chemical Methods for Dietary Supplements and Botanicals. [Internet]. 2002 [cited 2023 Oct 1]. Available from: https://s27415.pcdn.co/wp-content/uploads/2020/01/64ER20-7/Validation_Methods/dAOAC_Guidelines_For_Single_Laboratory_Validation_Dietary_Supplements_and_Botanicals.pdf
43. Division of Public Health and Environment. Annual monitoring, inspecting, and evaluating report in Phra Nakhon Si Ayutthaya Provincial Administrative Organization landfill (Report). Phra Nakhon Si Ayutthaya: Phra Nakhon Si Ayutthaya Provincial Administrative Organization; 2023.
44. US Environmental Protection Agency. Lead and copper rule fact sheet. [Internet]. 1995 [cited 2023 Oct 16]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10003HZ1.PDF?Dockey=10003HZ1.PDF>
45. US Environmental Protection Agency. National primary drinking water standards. [Internet]. 1995 [cited 2023 Nov 3]. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20001S06.PDF?Dockey=20001S06.PDF>
46. US Environmental Protection Agency. Technical factsheet on nickel. [Internet]. 1995 [cited 2023 Nov 2]. Available from: <https://archive.epa.gov/water/archive/web/pdf/archived-technical-fact-sheet-on-nickel.pdf>
47. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality Vol. 1. 4th ed. Geneva: World Health Organization press; 2006.



48. National Oceanic and Atmospheric Administration. Screening quick reference table. [Internet]. 1999 [cited 2023 Nov 2]. Available from: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/9327>
49. Nisa P, Nitipon N, Datchpol J, Archai K, Somkid T, Sirapassorn P. Environmental impact and flood risk mitigation by capacity building in flood resilience communities on the drainage area of Bang Ban-Bang Sai flood diversion channel project. Research report no. 005/2566. Pathumthani: Valaya Alongkorn Rajabhat University; 2023.
50. Jessica B, Emmanuel S, Renald B. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 2020;6:04691.
51. US Environmental Protection Agency. Guidance on Selecting Age Groups for Monitoring and Assessing Childhood Exposures to Environmental Contaminants. [Internet]. 2005 [cited 2023 Nov 7]. Available from: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2013-09/documents/agegroups.pdf>
52. Piu S, Kundil KS, Manoj K, Sumi H. Assessment of health risk and pollution load for heavy and toxic metal contamination from leachate in soil and groundwater in the vicinity of dumping site in Mid-Brahmaputra Valley, India. *Tot Environ Res Themes* 2023;8:100076.
53. Omobolaji O, Elekwachi W, Eze I, Maureen O, Victoria E, Lilian C, et al. Potential environmental pollution and human health risk assessment due to leachate contamination of groundwater from anthropogenic impacted site. *Environ Chall* 2022;9:100627.



ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่ว ในสารละลายด้วยวิธีโพเทนชิโอเมตริก

Carbon paste electrode modified with biochar for the determination of lead ion in aqueous solution by potentiometric method

ธนวัฒน์ พงษ์ศักดิ์ อรนวล หาญเม่ง และ เขมาวดี อุดมพันธ์*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

Thanawat Phongsak Oranual Hanmeng and Kemawadee Udomphan*

Science Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Thepsatri University, Lopburi 15000

*Corresponding author: kemawadee.u@lawasri.tru.ac.th

Received: 29 July 2024/ Revised: 10 October 2024/ Accepted: 28 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประกอบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายด้วยวิธีโพเทนชิโอเมตริก การตรวจหาคุณลักษณะของถ่านชีวภาพที่ใช้ประกอบขั้วไฟฟ้าสามารถศึกษาได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD), เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) กับการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (elemental analysis, EA) จากการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพนี้มีเฟสของคาร์บอนอสัณฐาน และแกรไฟต์ โดยมีลักษณะพื้นผิวเป็นรูพรุนและมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนมากที่สุด คือ ร้อยละ 89.46 และออกซิเจนร้อยละ 9.60 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยพบธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับ ร้อยละ 75.58 และออกซิเจนร้อยละ 22.18 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตริกพบว่าขั้วไฟฟ้านี้มีการตอบสนองต่อไอออนตะกั่วที่ดีโดยมีค่าความชันเท่ากับ 30.36 ± 1.21 mV ซึ่งเป็นไปตามสมการเนิร์นสต์ ความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนตะกั่วที่สามารถวิเคราะห์ได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ 5.69×10^{-6} M และช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 5×10^{-5} - 0.1 M อัตราส่วนของการประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้มีความเที่ยงและมีความเลือกจำเพาะต่อไอออนตะกั่วที่ดี

คำสำคัญ: ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ ไอออนตะกั่ว ถ่านชีวภาพ วิธีโพเทนชิโอเมตริก

Abstract

A carbon paste modified with biochar electrode was constructed to determine lead ion in aqueous solution by potentiometric method. Biochar was characterized by using X-ray diffraction spectroscopy (XRD), scanning electron microscope with energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS)



and elemental analysis (EA) techniques. XRD analysis result exhibited that biochar was amorphous phase carbon along with graphite structure. SEM-EDS result showed the morphology of biochar has porous and composed of carbon at highest content with 89.46% and oxygen 9.60 %, this result corresponding with EA analysis which found carbon and oxygen with 75.58% and 9.60% respectively. Potentiometric analysis revealed that the electrode showed best response to lead ion with slope 30.36 ± 1.21 mV which conformed with Nernst's equation. Limit of detection was 5.69×10^{-6} M within linear concentration range 5×10^{-5} - 0.1 M and composition of electrode with biochar:nujol:graphite at 28:12:60 % wt provided good slope for lead determination. This carbon paste modified with biochar potentiometric electrode showed good precision and selective to lead ion.

Keywords: Carbon paste electrode, Lead ion, Biochar, Potentiometric method

บทนำ

ถ่านชีวภาพ (biochar) คือ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักสามารถผลิตได้จากชีวมวล (biomass) โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสหรือกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนหรือในสภาวะที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน [1] สมบัติที่สำคัญของถ่านชีวภาพ ได้แก่ พื้นที่ผิวมาก ปริมาตรของรูพรุนสูงและมีความเสถียรทางเคมีที่ดี นอกจากนี้ยังมีต้นทุนที่ใช้ในการผลิตต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีการนำถ่านชีวภาพมาประยุกต์ใช้เป็นสารปรับปรุงดินเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร ใช้เป็นตัวดูดซับสารพิษจำพวกยาฆ่าหญ้า ยาฆ่าแมลง สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และโลหะหนักในดินหรือน้ำได้ [2-5] นอกจากนี้ยังพบว่าการนำถ่านชีวภาพไปประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลังงาน เช่น ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) โดยมีการปรับปรุงพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยเบส KOH และกรด HNO_3 เพื่อให้มีพื้นที่ผิวและปริมาตรของรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บประจุและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า [6] และในปัจจุบันมีการผลิตแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวดจากถ่านชีวภาพจากขยะผลไม้ (fruit waste) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และให้ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีอีกทั้งยังเป็นการกำจัดของเสียที่เกิดจากผลไม้และทำให้เกิดการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [7]

การปนเปื้อนของโลหะในสิ่งแวดล้อม เช่น การปนเปื้อนในน้ำ อากาศและดิน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากการเติบโต การพัฒนาด้านเศรษฐกิจ การขยายตัวของตัวเมืองและการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม โลหะ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม และปรอท ซึ่งจัดเป็นธาตุที่อันตรายและไม่มีความจำเป็นต่อระบบการทำงานในร่างกายของมนุษย์ [8] ตะกั่วเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มนุษย์มีการใช้งานมาตั้งแต่สมัยโบราณ เนื่องจากสมบัติทางกายภาพของตะกั่ว เช่น มีการนำไฟฟ้าต่ำ มีความเหนียว สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตสี การก่อสร้าง ปิโตรเคมี เซรามิกส์ และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น อย่างไรก็ตามตะกั่วไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ถ้ำร่างกายเกิดการสะสมโดยการกิน หายใจ หรือการสัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดปัญหาการทำงานของระบบสมอง โรคไตหรือความดันโลหิตสูงได้ องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (The United States Environmental Protection Agency, USEPA) ระบุว่าตะกั่วเป็นโลหะเป็นพิษ มีความสำคัญต้องได้รับการตรวจสอบและควบคุม [9] โดยองค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) และองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) โดยระบุว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำดื่มที่ยอมรับได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.015 มิลลิกรัมต่อลิตร [10, 11] ในปัจจุบันการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในตัวอย่างประเภทต่าง ๆ สามารถทำได้โดยวิธีแกรฟิต์เฟอร์เนอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี (graphite furnace atomic absorption spectrometry, GFAAS) [12], ไฮโดรด์เจเนอเรชัน อะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี (hydride generation atomic absorption spectrometry) [13] และเฟลมอะตอมมิก

แอบซอร์บชัน สเปกโตรเมตรี (flame atomic absorption spectrometry, FAAS) [14] สำหรับการหาปริมาณตะกั่วด้วยเทคนิค FAAS มีข้อดีคือ มีการวิเคราะห์กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ มีความไวในการวิเคราะห์สูง การใช้งานเครื่องมือสามารถทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อย่างไรก็ตามข้อเสียของเทคนิค FAAS นี้ก็มีปัญหาเกี่ยวกับ nebulizer โดยตัวอย่างจะถูกดูดเข้าไปที่ atomizer มีเพียงประมาณ 10% เท่านั้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ลดลง [15] เทคนิคโพเทนชิโอเมตรีเป็นเทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าเทคนิคหนึ่งที่สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้แม่นยำ ให้ค่าความจำเพาะเลือกต่อตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ที่ดี ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ สามารถวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ได้ในระดับที่ต่ำมาก ๆ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างทางคลินิก สิ่งแวดล้อม และอาหารได้อีกด้วย [16, 17] ปัจจุบันมีการศึกษาการนำถ่านชีวภาพมาพัฒนาเป็นตัวตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) เพิ่มมากขึ้น เช่น การเตรียมขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพเพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณของไอออนโลหะหนัก เช่น สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม และสารอินทรีย์ ด้วยวิธีโวลแทมเมตรีในตัวอย่างจริง เช่น กระสุนครีม เครื่องดื่มชูกำลัง น้ำมะพร้าว น้ำเสีย เป็นต้น ผลการทดลองพบว่าปริมาณของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้มีค่า LOD ต่ำ ช่วงการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ได้กว้างและสามารถวิเคราะห์หาปริมาณในตัวอย่างจริงได้ [18-21] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดของขั้วไฟฟ้าจากถ่านชีวภาพ โดยปรับปรุงกับอนุภาคของทองเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไฮโดรควิโนน (hydroquinone) กับแคทเทคคอล (catechol) ซึ่งเป็นไอโซเมอร์กันในตัวอย่างน้ำประปาได้ [22] และการเตรียมขั้วไฟฟ้าจากถ่านชีวภาพที่ปรับปรุงกับรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (reduced graphene oxide) โดยเตรียมเป็นสารประกอบนาโนคอมโพสิต (nanocomposite) เพื่อวิเคราะห์คาร์เบนดาซิม (carbendazim) ในน้ำส้ม ผักกาดหอม น้ำดื่ม และน้ำเสีย จากการทดลองพบว่าค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำมาก คือ 7.7 nM [23] และจากเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวไปนั้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจหาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่เพื่อประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี เนื่องจากไอออนตะกั่วจัดเป็นมลพิษชนิดหนึ่งซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตได้ [24, 25] ตัวอย่างเช่น ถ้ำร่างกายได้รับไอออนตะกั่วเข้าไปจะทำให้ระบบต่าง ๆ ที่สำคัญในร่างกายของสิ่งมีชีวิตผิดปกติ เช่น การดูดซึมในระบบทางเดินอาหารลดลง ระบบขับถ่ายทำงานผิดปกติ และถ้ำร่างกายได้รับในปริมาณ 30-100 ไมโครกรัมต่อลิตร จะก่อให้เกิดอาการจุกแน่นหน้าอกหรือโรคไตอักเสบได้ [26]

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การตรวจหาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

งานวิจัยนี้ใช้ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ของบริษัท Bamboo Reform อำเภอชะอำ จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งเตรียมจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิมากกว่า 1,000 °C สำหรับประกอบขั้วไฟฟ้าชนิดโพเทนชิโอเมตรี โครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพสามารถศึกษาได้โดยเครื่องเอกซเรย์-ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ รุ่น Smart lab SE ยี่ห้อ Rigaku แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เท่ากับ 40 kV, 30 mA, Cu-K β (= 1.54 nm) มุมการเลี้ยวเบนสแกนอยู่ในช่วง 10° - 60° การศึกษาลักษณะพื้นผิวและองค์ประกอบของถ่านชีวภาพวิเคราะห์ได้โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำแสงส่องกราดกับเทคนิค energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ยี่ห้อ FEI รุ่น quanta 450 ที่ 15 kV การวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ C, H และ N (elemental analysis, EA) วิเคราะห์โดยเครื่อง CHNS/O, LECO 628 Series

2. การประกอบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพ

ซึ่งถ่านชีวภาพอบที่อุณหภูมิ 110 °C แล้วจำนวน 0.28 กรัม ผสมกับแกรไฟต์ 0.12 กรัม ในครกบดสารอาเกต เดิม น้ำมันจุล (binder) 0.60 กรัม บดให้เป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 15 นาที จะได้ electroactive material สำหรับใช้ประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าทำงานชนิดโพเทนชิโอเมตรี จากนั้นนำ electroactive material นี้ใส่หลอดฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร และใช้หลอดทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้า



3. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงานคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพตามข้อที่ 2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) สารละลายของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์และเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (potentiostat/galvanostat, PGSTAT) รุ่น 797 VA Computrace analyzer ยี่ห้อ Metrohm

3.1 การศึกษาการตอบสนองของขั้วไฟฟ้าทำงานต่อไอออนต่าง ๆ สามารถทำได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50 % โดยน้ำหนัก จากนั้นวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M สารเคมีของไอออนที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดเป็น analytical grade ยี่ห้อ Carlo Erba และแกรไฟต์ยี่ห้อ Acros organics

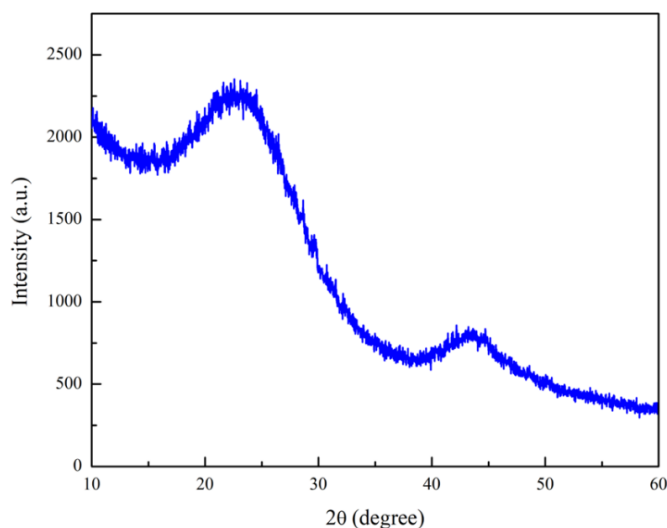
3.2 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการประกอบขั้วไฟฟ้า งานวิจัยนี้ได้เตรียมขั้วไฟฟ้า 3 อัตราส่วน โดยมีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50, 28:12:60 และ 30:20:50 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าแต่ละอัตราส่วนวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M และหาค่าความชัน

3.3 การศึกษาความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้า ศึกษาได้โดยทำสภาพการทวนซ้ำได้ (reproducibility) โดยเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนัก จำนวน 5 ขั้ว วัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M และเปรียบเทียบค่าความชัน สำหรับการศึกษาสถานะทำซ้ำได้ของขั้วไฟฟ้า (repeatability) ทำได้โดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออนตะกั่วความเข้มข้นจาก 1×10^{-4} , 1×10^{-3} และ 1×10^{-2} M วิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งได้จากการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4 การศึกษาความเลือกจำเพาะ (selectivity) ของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนของโลหะอื่น ๆ ศึกษาโดยใช้ขั้วไฟฟ้าทำงานที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนัก วัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี คำนวณหาค่า selectivity coefficient ($K_{A,B}^{\text{pot}}$) ด้วยวิธี separate solution method (SSM) [27]

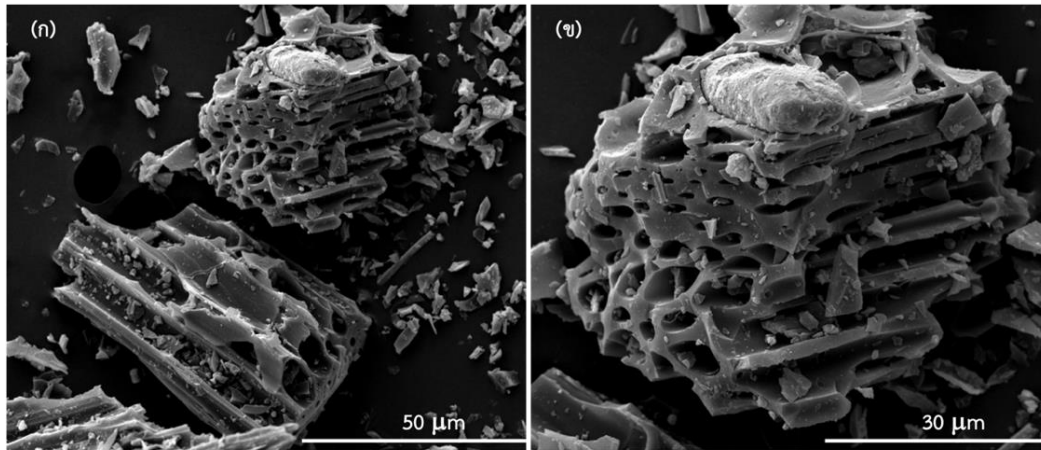
ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพแสดงดังภาพที่ 1 จากผลการวิเคราะห์พบยอดพีคที่ระนาบ d_{002} ในช่วงมุม 20° - 30° ซึ่งเป็นโครงสร้างของสัณฐานคาร์บอนที่เกิดจากการเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและมีการเกิดพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนและซิลิกอนภายในโครงสร้างด้วย สำหรับพีคที่ระนาบ d_{001} ที่มุม 43.40° เป็นเฟสของโครงสร้างแกรไฟต์ [28]



ภาพที่ 1 XRD pattern ของถ่านชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและลักษณะโครงสร้างของถ่านชีวภาพด้วยเทคนิค SEM แสดงดังภาพที่ 2 จากการวิเคราะห์พบว่าถ่านชีวภาพ มีลักษณะพื้นผิวเป็นโพรงและมีรูพรุนที่แตกออกเป็นช่อง ๆ อย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดของโครงสร้างอะโรมาติกของถ่านชีวภาพ การสลายตัวของสารอินทรีย์อย่างรวดเร็วและการสลายตัวของไม้เมื่อได้รับความร้อน [29]

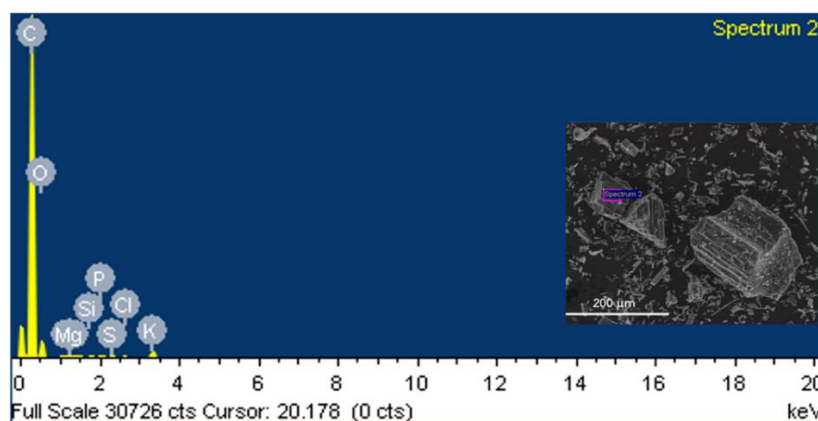


ภาพที่ 2 โครงสร้างจุลภาคของถ่านชีวภาพที่กำลังขยายเท่ากับ (ก) 700 และ (ข) 1,400 เท่า

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านชีวภาพแสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 3 จากการวิเคราะห์พบว่า องค์ประกอบของถ่านชีวภาพมีธาตุที่สูงเป็น 4 อันดับแรก ได้แก่ คาร์บอนร้อยละ 89.46 ออกซิเจนร้อยละ 9.60 โพแทสเซียม ร้อยละ 0.51 และฟอสฟอรัสร้อยละ 0.12 ตามลำดับ โดยถ่านชีวภาพนี้มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงแสดงว่า ถ่านชีวภาพนี้มีความบริสุทธิ์ของคาร์บอนสูงเช่นเดียวกัน [30] นอกจากนี้ยังพบซิลเฟอร์ แมกนีเซียม ซิลิกอนและคลอรีนเป็น องค์ประกอบด้วย

ตารางที่ 1 ปริมาณธาตุของถ่านชีวภาพที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy

ตัวอย่าง	ธาตุ (atomic %)							
	C	O	Mg	Si	P	S	Cl	K
Biochar	89.46	9.60	0.07	0.06	0.12	0.10	0.06	0.51



ภาพที่ 3 สเปกตรัม EDS ของถ่านชีวภาพ

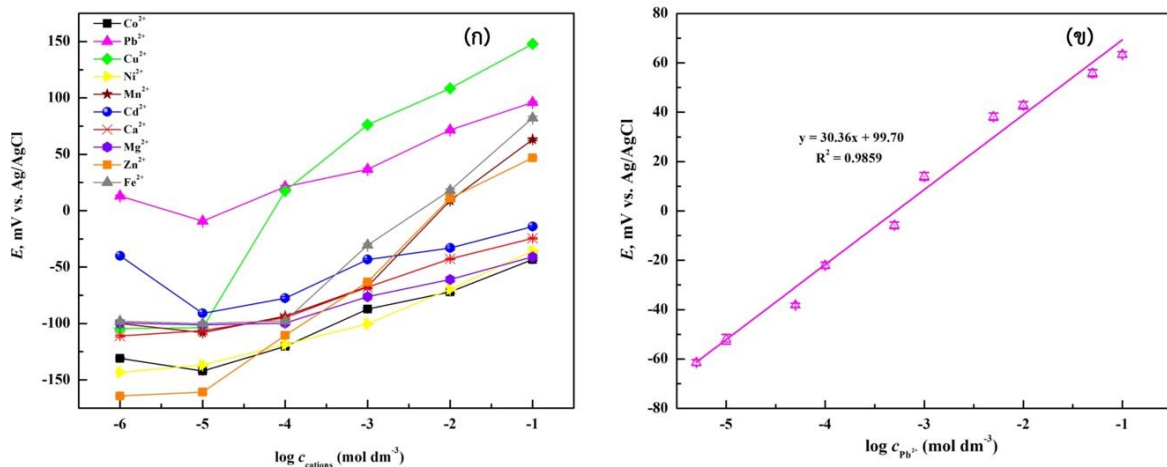


ผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (elemental analysis, EA) พบว่ามีคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก คือ มีคาร์บอนร้อยละ 75.58 ออกซิเจนร้อยละ 22.18 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.81 และไนโตรเจนร้อยละ 0.43 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ EDS

ผลการศึกษาการตอบสนองต่อของไอออนเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอเมตรี ผู้วิจัยได้เตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50 % โดยน้ำหนัก เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออน Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} และ Pb^{2+} ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M ให้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 และภาพที่ 4 (ก)

ตารางที่ 2 ค่าความชันและช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรง เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนช่วงความเข้มข้น 10^{-6} – 0.1 M

ชนิดไอออน	ความชัน (mV decade ⁻¹)	ช่วงความเข้มข้นที่ วิเคราะห์เป็นเส้นตรง (mol dm ⁻³)	ชนิดไอออน	ความชัน (mV decade ⁻¹)	ช่วงความเข้มข้นที่ วิเคราะห์เป็นเส้นตรง (mol dm ⁻³)
Zn^{2+}	53.70±1.07	10^{-5} - 0.1	Co^{2+}	19.50±1.06	10^{-6} - 0.1
Fe^{2+}	58.85±1.33	10^{-4} - 0.1	Cu^{2+}	55.94±0.81	10^{-6} - 0.1
Ni^{2+}	21.21±0.96	10^{-6} - 0.1	Ca^{2+}	18.57±0.86	10^{-6} - 0.1
Mn^{2+}	54.63±0.98	10^{-4} - 0.1	Mg^{2+}	19.18±1.04	10^{-4} - 0.1
Cd^{2+}	19.85±1.02	10^{-5} - 0.1	Pb^{2+}	26.20±0.82	10^{-5} - 0.1



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log c_{\text{cations}}$ (ก) เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนชนิดต่าง ๆ ในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} -0.1 M และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ

$\log c_{\text{Pb}^{2+}}$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} - 0.1 M

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่ว ค่าความชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 26.20 ± 0.82 mV decade⁻¹ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีตามสมการของเนินสต์ คือ 29.50 mV decade⁻¹ แสดงตามสมการที่ (1)

$$E_{\text{ind}} = K \pm \frac{0.0592}{n} \log c_i \quad (1)$$



เมื่อ E_{ind} คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าทำงานหรือขั้วไฟฟ้าชีบอก n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 2 K คือ ผลรวมของค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ($L - E_{ref} + E_j$) c_i คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะ [31] สำหรับช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-5} - 0.1$ M ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเลือกวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว

ผลการศึกษาการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการประกอบขั้วไฟฟ้าวิเคราะห์ไอออนตะกั่ว งานวิจัยนี้เตรียมขั้วไฟฟ้า 3 อัตราส่วน โดยมีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 25:25:50, 28:12:60 และ 30:20:50 % โดยน้ำหนักตามลำดับ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าแต่ละอัตราส่วนวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่ว ในช่วงความเข้มข้น $10^{-6} - 0.1$ M โดยแต่ละขั้ววัดซ้ำวัดละ 4 ครั้ง ($n = 4$) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความชันและช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรง เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

อัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความชัน (mV decade^{-1})	ช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ เป็นเส้นตรง (mol dm^{-3})
25:25:50	26.20 ± 0.82	$10^{-5} - 0.1$
30:20:50	23.89 ± 1.34	$10^{-5} - 10^{-2}$
28:12:60	30.36 ± 1.21	$10^{-5} - 0.1$

จากการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนักพบว่ามีความชันเท่ากับ $30.36 \pm 1.21 \text{ mV decade}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกับสมการของเนินสต์มากที่สุดคือ $29.5 \text{ mV decade}^{-1}$ ตามสมการที่ (1) ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (limit of detection, LOD) มีค่าเท่ากับ $5.69 \times 10^{-6} \text{ M}$ และช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-5} - 0.1 \text{ M}$ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ $\log c_{\text{Pb}^{2+}}$ เมื่อวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น $10^{-6} - 0.1 \text{ M}$ แสดงดังภาพที่ 4 (ข)

ผลการศึกษาความเที่ยง (precision) ของขั้วไฟฟ้าสามารถศึกษาได้จากสภาพทวนซ้ำได้ (reproducibility) ของขั้วไฟฟ้า เมื่อเตรียมขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันงูจอล เท่ากับ 28:12:60 % โดยน้ำหนัก จำนวน 5 ขั้ว และวัดศักย์ไฟฟ้าในสารละลายไอออนตะกั่วในช่วงความเข้มข้น $10^{-6} - 0.1 \text{ M}$ พบว่าขั้วไฟฟ้าจำนวน 5 ขั้ว ให้ค่าความชันเฉลี่ยเท่ากับ $29.47 \pm 0.33 \text{ mV decade}^{-1}$ และมีค่าร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% relative standard deviation, % RSD) เท่ากับ 0.0113 จากผลการทดลองพบว่าค่าความชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าเป็นไปตามสมการของเนินสต์ และมีค่า % RSD ที่ต่ำ แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความชันและร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) ของขั้วไฟฟ้าจำนวน 5 ขั้ว

ขั้วไฟฟ้าหมายเลขที่	ความชัน (mV decade^{-1})	% RSD
1	28.59 ± 0.25	0.0086
2	29.66 ± 0.38	0.0126
3	29.13 ± 0.44	0.0149
4	30.96 ± 0.34	0.0111
5	28.99 ± 0.27	0.0094
ค่าเฉลี่ย	29.47 ± 0.33	0.0113

*หมายเหตุ จำนวนครั้งของการวิเคราะห์แต่ละขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 4 ($n = 4$)



ผลการศึกษาสถานะทำซ้ำได้ (repeatability) ของขั้วไฟฟ้า เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} , 1×10^{-3} และ 1×10^{-2} M ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ -22.03 ± 0.93 , 14.73 ± 0.90 และ 44.73 ± 0.80 mV decade⁻¹ ตามลำดับ

ผลการศึกษาความเลือกจำเพาะ (selectivity) ของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนอื่น ๆ เมื่อวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงความเข้มข้น 10^{-6} -0.1 M โดยค่าความเลือกจำเพาะ (selectivity coefficient) หรือ $K_{A,B}^{\text{pot}}$ ของขั้วไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ด้วยวิธี separate solution method ตามสมการของ Nicolsky-Eisenman ดังสมการที่ (2) และค่า selectivity coefficient ($K_{A,B}^{\text{pot}}$) แสดงดังตารางที่ 5

$$K_{A,B}^{\text{pot}} = a_A^{(1-Z_A/Z_B)} e^{(E_B - E_A)Z_A F / (RT)} \quad (2)$$

เมื่อ $K_{A,B}^{\text{pot}}$ คือ ค่า selectivity coefficient ของขั้วไฟฟ้า E_A , E_B , Z_A , Z_B คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า, ประจุของของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์และไอออนรบกวนตามลำดับ F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ $96,485$ C mol⁻¹, R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.3145 J K⁻¹ mol⁻¹ T คือ อุณหภูมิที่ 25 °C และ a_A คือ ความเข้มข้นของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ [27]

ตารางที่ 5 ค่าความเลือกจำเพาะ (selectivity coefficient, $K_{A,B}^{\text{pot}}$) ของขั้วไฟฟ้าโพเทนชิโอเมตริกจากถ่านชีวภาพไม้ไผ่

ไอออนรบกวน (interfering ions)	$K_{A,B}^{\text{pot}}$	ไอออนรบกวน (interfering ions)	$K_{A,B}^{\text{pot}}$
Zn ²⁺	3.02×10^{-7}	Ca ²⁺	3.34×10^{-2}
Fe ²⁺	2.42×10^{-9}	Mg ²⁺	3.20×10^{-2}
Ni ²⁺	2.37×10^{-5}	F ⁻	3.00×10^{-53}
Mn ²⁺	3.10×10^{-4}	Cl ⁻	3.55×10^{-60}
Cd ²⁺	5.30×10^{-2}	NO ₃ ⁻	3.55×10^{-71}
Co ²⁺	2.90×10^{-2}	SO ₄ ²⁻	3.10×10^{-49}
Cu ²⁺	3.15×10^{-2}		

ในทางทฤษฎีถ้าค่าความเลือกจำเพาะ ($K_{A,B}^{\text{pot}}$) ของขั้วไฟฟ้ามากกว่า 1 หมายความว่า ขั้วไฟฟ้านั้นจะตอบสนองต่อไอออนรบกวนได้ดีกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่า ขั้วไฟฟ้านั้นจะตอบสนองต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ได้ดีกว่าไอออนรบกวน ดังนั้นขั้วไฟฟ้าที่มีความเลือกจำเพาะที่ดีควรมีค่า $K_{A,B}^{\text{pot}}$ น้อยกว่า 1 [27] จากการทดลองพบว่าค่า $K_{A,B}^{\text{pot}}$ ของขั้วไฟฟ้านี้ต่อไอออนชนิดต่าง ๆ มีค่าน้อยกว่า 1 จึงสรุปได้ว่าขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ตอบสนองต่อไอออนตะกั่วได้ดีแต่ไม่ตอบสนองต่อไอออนรบกวน ยกเว้นเมื่อทำการวิเคราะห์ในสารละลายไอออนของ Cd²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Ca²⁺ และ Mg²⁺ ค่า $K_{A,B}^{\text{pot}}$ ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียง 1 อย่างไรก็ตามจากการทดลองเบื้องต้นในการใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 25:25:50 % โดยน้ำหนักวิเคราะห์ในสารละลายของไอออนเหล่านี้ ค่าความชันที่ได้ยังไม่เป็นไปตามทฤษฎีของเนินสต์ ซึ่งควรมีค่าใกล้เคียงกับ 29.5 mV decade⁻¹ แสดงว่าขั้วไฟฟ้านี้สามารถตอบสนองต่อไอออนตะกั่วได้ดี

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจหาคุณลักษณะของถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่เพื่อประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดโพเทนชิโอเมตริกสำหรับวิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลาย จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างผลึกของถ่านชีวภาพไม้ไผ่มีเฟสของคาร์บอนอสัณฐานและแกรไฟต์ เนื่องจากพบพีคที่ระนาบ d_{002} ในช่วงมุม 20° - 30° และพีคที่ระนาบ d_{001}

ที่มุม 43.40° ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าถ่านชีวภาพนี้มีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรูพรุน โดยมีโครงสร้างของรูพรุนที่แตกออกอย่างชัดเจนและจาก EDS สเปกตรัมพบว่ามีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนมากที่สุด คือ ร้อยละ 89.46 และออกซิเจนร้อยละ 9.60 นอกจากนี้ยังพบธาตุแมกนีเซียม ซิลิกอน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ คลอรีน และโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยพบธาตุคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 75.58 ออกซิเจนร้อยละ 22.18 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.81 และไนโตรเจนร้อยละ 0.43 ตามลำดับ

เมื่อประกอบชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพและศึกษาการตอบสนองของชีวไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนซิโอเมตรี พบว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้ตอบสนองต่อไอออนตะกั่วได้ดีที่สุด เป็นได้ว่าเนื่องจากการเกิดหมู่ฟังก์ชันของ $C=S$, $-NH_2$, $C=O$ บริเวณพื้นผิวของถ่านชีวภาพทำให้เกิดการดูดซับทางเคมี (chemisorption) กับไอออนตะกั่วได้ดี [32] โดยลักษณะการดูดซับทางเคมีนี้จะเกิดแบบสารประกอบโคออร์ดิเนชัน [33, 34] และชีวไฟฟ้าที่มีอัตราส่วนของถ่านชีวภาพ:แกรไฟต์:น้ำมันจุล เท่ากับ 28:12:60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประกอบชีวไฟฟ้าชนิดโพเทนซิโอเมตรี โดยค่าความชันที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ $30.36 \pm 1.21 \text{ mV decade}^{-1}$ ความเข้มข้นต่ำสุดที่วิเคราะห์ได้ (limit of detection, LOD) เท่ากับ $5.69 \times 10^{-6} \text{ M}$ และช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง $5 \times 10^{-5} - 0.1 \text{ M}$ อย่างไรก็ตามค่า LOD สำหรับการวิเคราะห์ไอออนตะกั่วในงานวิจัยนี้ยังมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าที่มีการใช้ชีวไฟฟ้าไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพและบิสมีที่มีโครงสร้างระดับนาโนสำหรับการวิเคราะห์ไอออนตะกั่วด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์ แอดซอร์บทีฟสตรipping โวลแทมเมตรี (differential pulse adsorptive stripping voltammetry, DPAdSV) ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 1.41 nM ซึ่งมีค่าต่ำมาก [35] เช่นเดียวกับงานวิจัยในปี 2023 [36] ที่มีการใช้ชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพจากเปลือกกาแฟ สำหรับการวิเคราะห์ไอออนแคดเมียมและตะกั่วด้วยเทคนิค DPAdSV ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 1.7 และ $0.2 \mu\text{g L}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากองค์ประกอบของชีวไฟฟ้าและเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ไอออนมีความเหมาะสมและมีความจำเพาะมากกว่างานวิจัยนี้ สำหรับเวลาที่ใช้ในการตอบสนองของชีวไฟฟ้า (response) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีค่าประมาณ 5 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงจะเริ่มคงที่ แสดงให้เห็นว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้มีการตอบสนองต่อการวิเคราะห์ไอออนตะกั่วที่รวดเร็ว ผลการศึกษาความแม่นยำของชีวไฟฟ้าโดยการศึกษาสภาพทวนซ้ำ (reproducibility) และสถานะทำซ้ำ (repeatability) โดยพบว่าเมื่อเตรียมชีวไฟฟ้าจำนวน 5 ชั่ว ค่าความชันเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ $29.47 \pm 0.33 \text{ mV decade}^{-1}$ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเนินสต์ ($29.50 \text{ mV decade}^{-1}$) และชีวไฟฟ้าทั้งหมดนี้ให้สภาพทวนซ้ำที่ดี เมื่อใช้ชีวไฟฟ้าวัดค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายของไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} , 1×10^{-3} และ $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ โดยวัดซ้ำ 4 ครั้ง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเท่ากับ -22.03 ± 0.93 , 14.73 ± 0.90 และ $44.73 \pm 0.80 \text{ mV decade}^{-1}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ แสดงให้เห็นว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพของสถานะทำซ้ำที่ดี การศึกษาความเลือกจำเพาะของชีวไฟฟ้าโดยวิธี separate solution method (SSM) พบว่าชีวไฟฟ้ามีความจำเพาะต่อไอออนตะกั่วที่ดี เนื่องจากค่า K_{AB}^{pot} มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าชีวไฟฟ้าชนิดนี้ตอบสนองต่อไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) ได้ดีกว่าไอออนรบกวน (interfering ions) ถึงแม้ว่าในการวิเคราะห์สารละลายไอออนของ Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ค่า K_{AB}^{pot} ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียง 1 แต่อย่างไรก็ตามจากการผลการศึกษาเบื้องต้น ค่าความชันที่วิเคราะห์ได้เมื่อวิเคราะห์ในสารละลายเหล่านี้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีของสมการเนินสต์ จึงสรุปได้ว่าชีวไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพนี้ สามารถใช้วิเคราะห์ไอออนตะกั่วในสารละลายได้เนื่องจากให้ค่าความชันที่เป็นไปตามทฤษฎีของเนินสต์ ช่วงความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้เป็นเส้นตรงกว้าง มีค่า LOD ต่ำ มีความแม่นยำและความเลือกจำเพาะที่ดีต่อไอออนตะกั่ว ถึงแม้ว่าในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาและทดลองในตัวอย่างจริง อย่างไรก็ตามในอนาคตข้างหน้า ผู้วิจัยได้มีการวางแผนการประยุกต์ใช้งานวิจัยนี้สำหรับการศึกษาและทดลองในตัวอย่างจริงโดยเฉพาะตัวอย่างตัวอย่างดินและน้ำจากภาคการเกษตร เพื่อเป็นการช่วยเหลือเกษตรกรในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและดินสำหรับการ



ทำเกษตรกรรม เพิ่มความระมัดระวังในการใช้ยาปราบศัตรูพืช วัชพืชหรือปุ๋ยเคมีลดปัญหาการเกิดสารพิษตกค้างในผลผลิตทางการเกษตรและลดค่าใช้จ่ายในการส่งน้ำและดินตรวจวิเคราะห์

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประกอบขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเพสต์ที่ปรับปรุงด้วยถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ สำหรับวิเคราะห์ไอออนตะกั่วในสารละลาย ในอนาคตข้างหน้าอาจมีการนำขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่วในน้ำตัวอย่างจริงที่มีตัวรบกวนซับซ้อน เช่น ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือตัวอย่างน้ำที่ใช้สำหรับการเกษตร โดยวิธีการเติมสารละลายสารมาตรฐานหรือโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นมานี้ได้ นอกจากนี้ยังอาจมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเลือกจำเพาะของขั้วไฟฟ้าโดยใช้วิธีการเติมไอออนรบกวนลงไปในการวิเคราะห์ที่ต้องการวิเคราะห์ เพื่อวิเคราะห์ค่าความเลือกจำเพาะของขั้วไฟฟ้าให้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น มีการศึกษาการประกอบขั้วไฟฟ้าจากถ่านชีวภาพชนิดอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ว่าถ่านชีวภาพ ชนิดใดที่จะให้ผลการวิเคราะห์ได้ดีที่สุดหรือใช้วิธีเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าชนิดอื่นในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น เทคนิคโวลแทมเมตรี เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีการให้ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมกับตัวอย่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้ดี และมีความเลือกจำเพาะที่ดีขึ้นได้ หรือมีการสังเคราะห์ลิแกนด์ชนิดใหม่โดยเตรียมเป็น modified electrode เพื่อเพิ่มความสามารถในการวิเคราะห์ไอออน เช่น ค่า LOD ที่วิเคราะห์ได้มีค่าต่ำ ความแม่นยำและความเลือกจำเพาะของขั้วไฟฟ้าต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ได้สูง นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้ electroactive material ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างที่สนใจในรูปแบบของสกรีน-พริ้นท์ อิเล็กโทรด (screen-printed electrode) เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในภาคสนาม ใช้สารที่ต้องการวิเคราะห์ในปริมาณน้อยและมีความรวดเร็วในการวิเคราะห์ได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Lu Y, Hu Y, Tang L, Xie Q, Liu Q, Zhong L et al. Effects and mechanisms of modified biochars on microbial iron reduction of *Geobacter sulfurreducens*. *Chemosphere* 2021;283:130983.
2. Wang X, Gu Y, Tan X, Liu Y, Zhou Y, Hu X et al. Functionalized biochar/clay composites for reducing the bioavailable fraction of arsenic and cadmium in river Sediment. *Environ Toxicol Chem* 2019;38(10):2337-47.
3. Li L, Lai C, Huang F, Cheng M, Zeng G, Huang D et al. Degradation of naphthalene with magnetic bio-char activate hydrogen peroxide: Synergism of bio-char and Fe-Mn binary oxides. *Water Res* 2019;160:238-48.
4. Li Y, Wang Z, Xie X, Zhu J, Li R, Qin T. Removal of Norfloxacin from aqueous solution by clay-biochar composite prepared from potato stem and natural attapulgite. *Colloid Surface A* 2017;514:126-36.
5. Sackey EA, Song Y, Yu Y, Zhuang H. Biochars derived from bamboo and rice straw for sorption of basic red dyes. *Plos One* 2021;16(7):e0254637.
6. Jin H, Wang X, Gu Z, Polin J. Carbon materials from high ash biochar for supercapacitor and improvement of capacitance with HNO_3 surface oxidation. *J Power Sources* 2013;236:285e292.
7. Ehsani A, Parsimehr H. Electrochemical energy storage electrodes from fruit biochar. *Adv Colloid Interface Sci* 2020;284:102263.



8. Kafouris D, Christoforou E, Stefani D, Sarandi A, Stavroulakis G, Christou E et al. Lead, cadmium and mercury determination and human health risk assesement in foods from Cyprus. J Food Compos Anal 2024;128:10600.
9. Karaman DN, Serbest H, Bahçivan A, Korkunç ÜP, Bakirdere S. Development of an analytical strategy for the determination of trace lead in hibiscus tea extract by double slotted quartz tube assisted flame atomic absorption spectrometry after manganese ferrite based dispersive solid phase extraction. Microchem J 2023;195:10936.
10. Ensafi AA, Khayamian T, Benvidi A, Mirmomtaz E. Simultaneous determination of copper, lead and cadmium by cathodic adsorptive stripping voltammetry using artificial neural network. Anal Chim Acta 2006;561(1-2):225-32
11. El Mhammedi MA, Achak M, Chtaini A. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ -modified carbon-paste electrode for the determination of trace lead(II) by square-wave voltammetry. J Hazard Mater 2009;161(1):55-61.
12. Ataman OY. Vapor generation and atom traps: Atomic absorption spectrometry at the ng/L level. Spectrochim Acta B: At Spectrosc 2008;63(8):825-34
13. Lu P, Nuhfer NT, Kelly S, Li Q, Konishi H, Elswick E et al. Lead coprecipitation with iron oxyhydroxide nano-particles. Geochim Cosmochimi Ac 2011;75(16):4547-61.
14. Hopkins AL, Lamm MG, Funk JL, Ritenbaugh C. *Hibiscus sabdariffa* L. in the treatment of hypertension and hyperlipidemia: a comprehensive review of animal and human studies. Fitoterapia 2013;85:84-94.
15. Chen G, Zhang X, Gao Y, Zhu G, Cheng Q, Cheng X. Novel magnetic $\text{MnO}_2/\text{MnFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite as a heterogeneous catalyst for activation of peroxymonosulfate (PMS) toward oxidation of organic pollutants. Sep Purif Technol 2019;213: 456-64.
16. Jasiński A, Guziński M, Lisak G, Bobacka J, Bocheńska M. Solid-contact lead(II) ion-selective electrodes for potentiometric determination of lead(II) in presence of high concentrations of Na(I), Cu(II), Cd(II), Zn(II), Ca(II) and Mg(II). Sens Actuators B Chem 2015;218:25-30.
17. Krikstolaityte V, Ding R, Ruzgas T, Björklund S, Lisak G. Characterization of nano-layered solid-contact ion selective electrodes by simultaneous potentiometry and quartz crystal microbalance with dissipation. Anal Chim Acta 2020;1128:19-30
18. Suguihiro TM, de Oliveira PR, de Rezende EI, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. An electroanalytical approach for evaluation of biochar adsorption characteristics and its application for Lead and Cadmium determination. Bioresour Technol 2013;143:40–5.
19. Oliveira PR, Lamy-Mendes AC, Rezende EI, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. et al. Electrochemical determination of copper ions in spirit drinks using carbon paste electrode modified with biochar. Food Chem 2015;171:426–31.
20. Kalinke C, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. Carbon paste electrode modified with biochar for sensitive electrochemical determination of Paraquat. Electroanalysis 2016;28:764-9.
21. Wang J, Yang J, Xu P, Liu H, Zhang L, Zhang S et al. Gold nanoparticles decorated biochar modified electrode for the high-T performance simultaneous determination of hydroquinone and catechol. Sens Actuators B Chem 2020;306:127590.



22. Sant'Anna MVS, Carvalho SWMM, Gevaerd A, Silva JOS, Santos E, Carregosa ISC et al. Electrochemical sensor based on biochar and reduced graphene oxide nanocomposite for carbendazim determination. *Talanta* 2020;220:121334.
23. Oliveira GA, Gevaerd A, Mangrich AS, Marcolino LH Jr, Bergamini MF. Biochar obtained from spent coffee grounds: Evaluation of adsorption properties and its application in a voltammetric sensor for lead (II) ions. *Microchem J* 2021;165:106114.
24. World Health Organization. Preventing disease through healthy environments. Exposure to lead: A major public health concern. [Internet].2023 [cited 2024 August 27]. Available from: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/372293/9789240078130-eng.pdf?sequence=1>
25. Flora SJ, Flora G, Saxena G. Environmental occurrence, health effects and management of lead poisoning. *Lead. Chemistry, Analytical Aspects, Environmental Impacts and Health Effects*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science, Inc.; 2006.
26. Papanikolaou NC, Hatzidaki EG, Belivanis S, Tzanakakis GN, Tsatsakis AM. Lead toxicity update. A brief review. *Med Sci Monit* 2005;11(10):RA329-36.
27. Umezawa Y, Bühlmann P, Umezawa K, Tohda K, Amemiya S. Potentiometric selectivity coefficients of ion-selective electrodes part I. Inorganic cations (technical report). *Pure Appl Chem* 2000;72(10):1851-2082.
28. Armynah B, Tahir D, Tandilayuk M, Djafar Z, Piarah WH. Potentials of biochars derived from bamboo leaf biomass as energy sources: effect of temperature and time of heating. *Int J of Biomat* 2019;2019(1):3526145.
29. Sahoo SS, Vijay VK, Chandra R, Kumar H. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Clean Eng Technol* 2021;3:100101.
30. Ioannidou O, Zabaniotou A (2007) Agricultural residues as precursors for activated carbon production- A review. *Renew Sust Energ Rev* 2007; 11:1966–2005.
31. เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2561.
32. Wang Y, Chen D, Xue X, Aihemaiti A, Yin J, Zhu H. Surface functionalized biochar for the effective capacitive deionization of lead ions. *Sep Purif Technol* 2024;350:127907.
33. Abubshait HA, Farag AA, El-Raouf MA, Negm NA, Mohamed EA. Graphene oxide modified thiosemicarbazide nanocomposite as an effective eliminator for heavy metal ions. *J Mol Liq* 2021;327:114790.
34. Huang Z, Lu L, Cai Z, Ren ZJ. Individual and competitive removal of heavy metals using capacitive deionization. *J Hazard Mater* 2016;302:323-31.
35. Agustini D, Mangrich AS, Bergamini MF, Marcolino LH Jr. Sensitive voltammetric determination of lead released from ceramic dishes by using of bismuth nanostructures anchored on biochar. *Talanta* 2015;142:221-7.
36. Mendonça MZM, de Oliveira FM, Petroni JM, Lucca BG, da Silva RAB, Cardoso VL et al. Biochar from coffee husks: a green electrode modifier for sensitive determination of heavy metal ions. *J Appl Electrochem* 2023;53:1461-71.



การเพิ่มประสิทธิภาพการสุ่มเพิ่มข้อมูลสำหรับข้อมูลไม่สมดุลในการจำแนกประเภท

Enhancing Random Oversampling for Imbalanced Classification

นพมาศ อัครจันทโชติ* ศิลา เต็มศิริฤกษ์กุล วรณυχ มีภูมิรู้ และ ยุวธิดา ชิวปรีชา

สาขาวิชาวิทยาการคำนวณและเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

Noppamas Akarachantachote*, Sila Temsirirkkul, Woranuch Meepoomroo,
and Yuwathida ChiwpreecharDivision of Computing Science and Digital Technology, Faculty of Science and Technology,
Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn 10540

*Corresponding author: a_noppamas@yahoo.com

Received: 3 August 2024/ Revised: 29 October 2024/ Accepted: 11 November 2024

บทคัดย่อ

การดำเนินงานกับปัญหาการจำแนกประเภท ข้อมูลที่ไม่สมดุลเป็นความท้าทายที่พบได้บ่อย ซึ่งตัวจำแนกประเภทมีแนวโน้มที่จะจำแนกหน่วยตัวอย่างใหม่เป็นกลุ่มส่วนใหญ่ ทำให้การทำนายกลุ่มส่วนน้อยมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นจึงควรคำนึงถึงการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุล การสุ่มเพิ่มข้อมูลเป็นวิธีการหนึ่งที่ไม่ซับซ้อนในการจัดการกับข้อมูลไม่สมดุล แต่หน่วยตัวอย่างที่ถูกสุ่มซ้ำบางตัวอาจไม่ได้เป็นหน่วยตัวอย่างที่สำคัญต่อการจำแนกประเภท งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการจัดการกับข้อมูลที่ไม่สมดุลด้วย Hotelling Important Data Point Oversampling Algorithm (HIDPO) ซึ่งเป็นการปรับปรุงแนวทางการสุ่มเพิ่มข้อมูล วัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกประเภท เมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลจากการสุ่มเพิ่มข้อมูลระหว่างวิธีสุ่มเพิ่มข้อมูลกลุ่มส่วนน้อย (Random Oversampling: ROS) และวิธีที่นำเสนอใหม่ HIDPO บนข้อมูลจำลอง 96 สถานการณ์ของ 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ 1) อัตราความไม่สมดุล (IR) 2) จำนวนตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกประเภท (RelVar) 3) ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกระหว่างกลุ่มส่วนน้อยกับกลุ่มส่วนใหญ่ (ClassDif) และ 4) ขนาดตัวอย่าง (n) โดยจำแนกประเภทด้วยการสร้างตัวแบบการถดถอยลอจิสติก ผลการทดลองพบว่า วิธี HIDPO ให้ค่าการวัดประสิทธิภาพสูงสุดในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกันน้อยระหว่างกลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนใหญ่ โดยเฉพาะเมื่อมีความไม่สมดุลกันมาก อันเป็นสถานการณ์ที่มีความยากในการจำแนกประเภท ส่วนอัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อย และอัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนใหญ่ วิธี HIDPO ให้ค่าปานกลาง

คำสำคัญ: ข้อมูลที่ไม่สมดุล วิธีการสุ่มเพิ่มข้อมูล โฮเทลลิงที่สำคัญ การจำแนกประเภท

Abstract

In classification problems, imbalanced data is a common challenge, as classifiers often exhibit a tendency to assign new sample points to the majority class. This leads to suboptimal prediction performance for the minority class. Therefore, it is imperative to mitigate the imbalanced data problem.



Random oversampling is a simple employed technique to address class imbalance in datasets. Nevertheless, a subset of the sampled data points may prove inconsequential for the classification process. This research introduces a novel approach: the Hotelling Important Data Point Oversampling Algorithm (HIDPO), an improved version of Random Oversampling. This study aimed to compare classification performance using original data and data from oversampling techniques between Random Oversampling method and the proposed HIDPO method across 96 simulated scenarios. These scenarios varied in four parameters: 1) imbalance rate (IR), 2) the number of relevant predictor variables (RelVar), 3) the difference in means of predictor variables between the minority and majority groups (ClassDif), and 4) sample size (n). Logistic regression models were employed to perform classification tasks. The empirical findings demonstrated that the HIDPO method yields the highest F-measure in scenarios with minimal differences between the minority and majority classes, particularly in cases of severe imbalance, which present challenges for classification. Regarding true positive rate and true negative rate, the HIDPO method yielded moderate values.

Keywords: imbalanced data, random oversampling, Hotelling's T-squared, classification

บทนำ

ข้อมูลที่ไม่สมดุล (Imbalanced Data) หมายถึง ชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัวของแต่ละกลุ่มไม่เท่ากัน โดยกลุ่มส่วนใหญ่ (Majority Class) มีจำนวนหน่วยตัวอย่างมากกว่ากลุ่มส่วนน้อย (Minority Class) อย่างมาก อันจะทำให้เกิดความยากในการสร้างตัวแบบจำแนกประเภท เนื่องจากตัวแบบอาจให้ความสำคัญกับกลุ่มส่วนใหญ่มากเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพในการทำนายกลุ่มส่วนน้อยลดลง สาเหตุของข้อมูลไม่สมดุลอาจเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น การตรวจพบการฉ้อโกง ซึ่งรายการที่มีการฉ้อโกงจะมีจำนวนน้อยกว่าการไม่ฉ้อโกง การเป็นโรคร้ายก็มักมีจำนวนคนที่เป็นโรคร้ายน้อยกว่าไม่เป็น ข้อมูลไม่สมดุลอาจเกิดจากข้อจำกัดในการรวบรวมข้อมูล มีค่าใช้จ่ายสูง หรือความยากลำบากในการเก็บรวบรวม ตัวอย่างเช่น การรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสายพันธุ์ที่หายากนั้นมีต้นทุน และความยากกว่าการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสายพันธุ์ทั่วไป นอกจากนี้ข้อมูลไม่สมดุลอาจเกิดจากการให้คำจำกัดความของกลุ่มที่อาจนำไปสู่ความไม่สมดุลได้ เช่น การกำหนดกลุ่มเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีข้อบกพร่อง และไม่มีข้อบกพร่อง ซึ่งผลิตภัณฑ์ในกลุ่มที่มีข้อบกพร่องจะมีหน่วยตัวอย่างน้อยกว่ากลุ่มที่ไม่มีข้อบกพร่อง ข้อมูลไม่สมดุลเป็นปัญหาที่พบบ่อยในสถานการณ์จริงหลายอย่าง และต้องใช้เทคนิคเฉพาะในการจัดการ [1-4]

ค่าที่ใช้วัดระดับความไม่สมดุลของข้อมูล วัดด้วยอัตราความไม่สมดุล (Imbalanced Ratio: IR) คำนวณจาก $IR = \frac{n_{pos}}{n_{neg}}$ โดยที่ n_{pos} แทนจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มส่วนน้อย และ n_{neg} แทนจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มส่วนมาก ถ้าอัตราความไม่สมดุลมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มส่วนน้อยมีจำนวนน้อยกว่ากลุ่มส่วนใหญ่มาก และถ้าอัตราความไม่สมดุลมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าทั้งสองกลุ่มมีจำนวนใกล้เคียงกัน ถ้า $IR < 0.2$ จะมีโอกาสที่จะเกิดปัญหา แต่ก็ไม่ได้มีเกณฑ์ตายตัวสำหรับระดับความไม่สมดุลที่เป็นปัญหา แต่อัตราความไม่สมดุลที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มีแนวโน้มที่จะทำให้การจำแนกประเภททำได้ยากขึ้น [5]

แนวทางการจัดการข้อมูลไม่สมดุลสำหรับปัญหาการจำแนกประเภทโดยทั่วไปมี 2 แนวทาง ได้แก่ 1) แนวทางในระดับข้อมูล (Data-level Approach) และ 2) แนวทางในระดับของขั้นตอนวิธี (Algorithm-level Approach) แนวทางแรกเป็นแนวทางที่ปรับความสมดุลของแต่ละกลุ่มให้มีจำนวนใกล้เคียงกันในกระบวนการก่อน (Pre-processing step) ซึ่งเป็นขั้นตอนก่อนนำข้อมูลไปเรียนรู้เพื่อสร้างตัวแบบ แนวทางหลังเป็นแนวทางแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลในขั้นตอนการสร้างตัวแบบ โดยจะปรับแต่งตัวแบบเพื่อปรับปรุงการเรียนรู้ โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับกลุ่มส่วนน้อย [6] การจัดการข้อมูลไม่สมดุลด้วยแนวทางในระดับข้อมูลเป็นแนวทางที่ไม่ซับซ้อน และสามารถนำไปใช้กับการสร้างตัวแบบแบบใด ๆ ได้ โดยสามารถดำเนินการ

ผ่านการสุ่มลดข้อมูลกลุ่มส่วนใหญ่ (Random Undersampling: RUS) หรือสุ่มเพิ่มข้อมูลกลุ่มส่วนน้อย (Random Oversampling: ROS) เพื่อที่จะลดอัตราความไม่สมดุล การสุ่มลดข้อมูลจะเป็นการนำหน่วยตัวอย่างของกลุ่มส่วนใหญ่ออกจากชุดข้อมูลแบบสุ่ม เหมาะกับข้อมูลที่มีจำนวนมาก สำหรับการสุ่มเพิ่มข้อมูลจะเป็นการเพิ่มข้อมูลของกลุ่มส่วนน้อยโดยการสุ่มซ้ำข้อมูลจากกลุ่มส่วนน้อย เหมาะกับข้อมูลที่มีขนาดเล็ก

ROS เป็นวิธีการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลที่มีความง่าย ไม่ซับซ้อน เหมาะกับข้อมูลที่มีจำนวนไม่มาก Firuz และคณะ [7] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ ROS กับวิธีการสุ่มตัวอย่างขั้นสูงอื่น ๆ ได้แก่ Synthetic Minority Oversampling Technique (SMOTE), Borderline-SMOTE และ Variational Autoencoder (VAE) ด้วยข้อมูลส่วนหนึ่งของชุดข้อมูล MNIST ซึ่งเป็นภาพของตัวเลขที่เขียนด้วยลายมือ และจำแนกประเภทด้วย Convolutional Neural Network (CNN) ผลการวิจัยพบว่า ROS มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีอื่น โดยมีค่าความแม่นยำ ความเที่ยง และอัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อยที่สูงที่สุดในสถานการณ์ส่วนใหญ่ นอกจากนี้ Jagelid and Movin [8] ได้ทำนายการใช้บริการสตรีมเพลงดิจิทัลพอดแคสต์ และวิดีโอ โดยมีบริการแบบฟรี และบริการแบบเสียเงิน ในงานวิจัยต้องการทำนายการเปลี่ยนจากบริการฟรีเป็นบริการเสียเงิน โดยแบ่งลูกค้าเป็นกลุ่มที่เปลี่ยนและไม่เปลี่ยน กลุ่มที่เปลี่ยนมีเพียง 2% ของลูกค้าที่ใช้บริการฟรี มีลักษณะของข้อมูลไม่สมดุล จึงใช้วิธี ROS, RUS และ SMOTE เพื่อสุ่มตัวอย่างซ้ำ และจำแนกประเภทด้วยการถดถอยลอจิสติก ต้นไม้ตัดสินใจ และ Gradient Boosting Trees ผลวิจัยพบว่า การสุ่มตัวอย่างซ้ำช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนก โดยวิธี ROS ร่วมกับการถดถอยลอจิสติกและ Gradient Boosting Trees มีประสิทธิภาพสูงสุด

เนื่องจาก ROS เป็นการสุ่มข้อมูลซ้ำจากข้อมูลเดิมอย่างสุ่ม ซึ่งบางหน่วยตัวอย่างอาจไม่ได้เป็นหน่วยตัวอย่างที่มีความสำคัญต่อการจำแนกประเภท คณะผู้วิจัยได้เสนออัลกอริทึมใหม่ที่พัฒนาจากการสุ่มเพิ่มข้อมูลอย่างสุ่ม โดยปรับค่าน้ำหนักของแต่ละหน่วยตัวอย่างในการสุ่มเพิ่มเพื่อให้ได้หน่วยตัวอย่างที่เป็นประโยชน์ต่อการจำแนกประเภท (Hotelling Important Data Point Oversampling Algorithm: HIDPO) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนก เมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลจากการสุ่มเพิ่มข้อมูลระหว่างวิธี ROS และวิธี HIDPO บนข้อมูลจำลอง

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อเปรียบเทียบวิธีการสุ่มเพิ่มข้อมูลประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

- 1) จำลองข้อมูลตามสถานการณ์ที่กำหนด
- 2) แบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลฝึกฝน (Training Set) และข้อมูลทดสอบ (Test Set) ด้วยอัตรา 70:30
- 3) คัดเลือกตัวแปรทำนายด้วยสถิติทดสอบ t (Statistical t-test) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 โดย

$$t_i = \frac{\bar{x}_{1i} - \bar{x}_{2i}}{\sqrt{\frac{s_{1i}^2}{n_1} + \frac{s_{2i}^2}{n_2}}}$$

เมื่อ t_i แทน ค่าสถิติทดสอบ t ของตัวแปรทำนายที่ i

$\bar{x}_{1i}$ และ $\bar{x}_{2i}$ แทน ค่าเฉลี่ยของกลุ่มส่วนใหญ่และกลุ่มส่วนน้อยของตัวแปรทำนายที่ i ตามลำดับ

s_{1i}^2 และ s_{2i}^2 แทน ค่าความแปรปรวนของกลุ่มส่วนใหญ่และกลุ่มส่วนน้อยของตัวแปรทำนายที่ i ตามลำดับ

- 4) สุ่มเพิ่มข้อมูลกลุ่มส่วนน้อยสำหรับข้อมูลฝึกฝน โดย
 - การสุ่มเพิ่มข้อมูลอย่างสุ่ม (Random Oversampling)
 - Hotelling Important Data Point Oversampling Algorithm (HIDPO Algorithm)
- 5) จำแนกประเภทกลุ่มส่วนน้อย และกลุ่มส่วนใหญ่ ด้วยตัวแบบการถดถอยลอจิสติก (Logistic Regression Model) สำหรับ



- ข้อมูลดั้งเดิม
 - ข้อมูลที่ได้รับการสุ่มเพิ่มข้อมูลโดย ROS สำหรับตัวแปรทำนายที่ถูกคัดเลือก
 - ข้อมูลที่ได้รับการสุ่มเพิ่มข้อมูลโดย HIDPO Algorithm สำหรับตัวแปรทำนายที่ถูกคัดเลือก
- 6) ประเมินประสิทธิภาพของการจำแนกจากวิธีการสุ่มแต่ละวิธีและข้อมูลดั้งเดิม บนข้อมูลทดสอบของข้อมูลแต่ละชุด ด้วยค่าความแม่นยำ (Accuracy) อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อย (True Positive Rate) อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนใหญ่ (True Negative Rate) และค่าการวัดเอฟ (F-measure)

การจำลองข้อมูล

ขั้นตอนนี้เป็นกรสร้างข้อมูล โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสถานการณ์จำลอง ได้แก่

- 1) อัตราความไม่สมดุล (Imbalanced Ratio: IR) ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนของจำนวนสมาชิกในกลุ่มส่วนน้อยต่อจำนวนสมาชิกในกลุ่มส่วนใหญ่ โดยกำหนด 4 ระดับ ได้แก่ 0.05, 0.07, 0.1 และ 0.2
- 2) จำนวนตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้องกับการจำแนก (Relevant Variable: RelVar) 2 ระดับ ได้แก่ 2 และ 5 ตัวแปร
- 3) ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้องกับการจำแนก ระหว่างกลุ่มส่วนน้อยกับกลุ่มส่วนใหญ่ (Class Mean Difference: ClassDif) กำหนด 3 ระดับ ได้แก่ 1 (ยาก), 2 (ปานกลาง) และ 5 (ง่าย)
- 4) ขนาดตัวอย่าง 4 ระดับ ได้แก่ 80, 150, 210 และ 300

สถานการณ์จำลองมีจำนวนรวม 96 สถานการณ์

ขั้นตอนของการสร้างข้อมูลจำลอง ดังนี้

- 1) สร้างข้อมูลตัวแปรทำนาย
 - กลุ่มส่วนใหญ่ มีการแจกแจงปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย 0 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1
 - กลุ่มส่วนน้อย สำหรับตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้อง มีการแจกแจงปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย μ ซึ่งกำหนดเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 1, 2 และ 5 ตามที่กำหนดใน ClassDif และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1 สำหรับตัวแปรทำนายที่ไม่เกี่ยวข้อง มีการแจกแจงปกติ โดยมีค่าเฉลี่ย 0 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1 (การกำหนดตัวแปรทำนายให้มีทั้งตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้อง และตัวแปรทำนายที่ไม่เกี่ยวข้อง เพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์จริงที่ชุดข้อมูลอาจมีตัวแปรทำนายทั้งที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับการจำแนกประเภท)
- 2) กำหนดตัวแปรตามของแต่ละกลุ่ม โดยกลุ่มส่วนน้อยกำหนดเป็น 1 และกลุ่มส่วนใหญ่ กำหนดเป็น 0
- 3) ในแต่ละสถานการณ์ทำซ้ำ 1,000 รอบ

การสุ่มเพิ่มข้อมูล

การสุ่มเพิ่มข้อมูล เป็นการแก้ปัญหาข้อมูลไม่สมดุลในระดับข้อมูล โดยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างของกลุ่มส่วนน้อยให้มีจำนวนเท่ากับกลุ่มส่วนใหญ่ ซึ่งจะเลือกหน่วยตัวอย่างซ้ำอย่างสุ่มแบบคืนที่จากชุดข้อมูลเดิมในกลุ่มส่วนน้อย การสุ่มเพิ่มข้อมูลอย่างสุ่ม (Random Oversampling) นั้น อาจทำให้ได้หน่วยตัวอย่างที่ไม่เหมาะสมในการจำแนก จึงควรมีการวัดความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่างในการจำแนก และกำหนดโอกาสที่แต่ละหน่วยตัวอย่างจะได้รับการสุ่มให้สอดคล้องกับสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างอัลกอริทึมใหม่สำหรับการสุ่มเพิ่มข้อมูลตามความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่าง โดยการวัดความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่างจะใช้วิธีการ Hotelling's T-squared ร่วมด้วย

Hotelling's T-squared เป็นวิธีการหนึ่งของการวิเคราะห์หลายตัวแปร (Multivariate Analysis) ที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย 2 กลุ่ม ในกรณีที่มีตัวแปรตามหลายตัว โดยมีข้อมูลที่น่าวิเคราะห์ต้องมีการแจกแจงปกติหลายตัวแปร ซึ่งกำหนดสมมติฐานว่าง และสมมติฐานทางเลือก ดังนี้ [9]

$$H_0: \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{21} \\ \vdots \\ \mu_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{12} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{p2} \end{bmatrix} \quad H_1: \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{21} \\ \vdots \\ \mu_{p1} \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} \mu_{12} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{p2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{หรือ} \quad H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

สถิติทดสอบ T^2 เป็นดังนี้

$$T^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)' S^{-1} (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \quad (2)$$

เมื่อ T^2 แทน สถิติทดสอบ T^2

p แทน จำนวนตัวแปรทำนาย

n_i แทน ขนาดตัวอย่างของกลุ่ม i โดยที่ $i = 1, 2$

μ_i แทน เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่ม i โดยที่ $i = 1, 2$

$\bar{x}_i$ แทน เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของตัวอย่างกลุ่ม i โดยที่ $i = 1, 2$

S แทน เมทริกซ์ความแปรปรวนรวมของตัวอย่าง (Pooled Variance)

ในกรณีที่ความแปรปรวนประชากรทั้งสองกลุ่มมีข้อสมมติว่าไม่แตกต่างกัน (ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจำลอง) ประมาณความแปรปรวนรวมได้ดังนี้

$$S = \frac{(n_1 - 1)}{(n_1 + n_2 - 2)} S_1 + \frac{(n_2 - 1)}{(n_1 + n_2 - 2)} S_2 \quad (3)$$

S_1 แทน เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของตัวอย่างกลุ่ม 1

S_2 แทน เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วมของตัวอย่างกลุ่ม 2

โดยที่

$$\frac{n_1 + n_2 - p - 1}{(n_1 + n_2 - 2)p} \sim F(p, n_1 + n_2 - p - 1) \quad (4)$$

ในการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ p-value จะถูกใช้เป็นการเปรียบเทียบกับระดับนัยสำคัญ (α) ที่กำหนด ถ้า $p\text{-value} < \alpha$ จะนำไปสู่การสรุปผลว่า มีหลักฐานเพียงพอที่จะสรุปผลตามสมมติฐานทางเลือก หรือในกรณีนี้ก็คือมีหลักฐานเพียงพอที่จะสรุปว่าเวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ มิฉะนั้นจะสรุปผลว่าไม่มีหลักฐานเพียงพอที่เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มแตกต่างกัน

p-value หรือ Probability Value คือ ระดับนัยสำคัญต่ำสุดที่ทำให้ค่าสถิติทดสอบที่สังเกตได้มีนัยสำคัญทางสถิติ [10] ถ้า p-value น้อย แสดงถึงการมีหลักฐานอันแข็งแกร่งในการสรุปผลว่าเกิดความต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทำให้มั่นใจว่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ไม่ใช่เพียงการบังเอิญ ซึ่งปกติใช้ในการทดสอบสมมติฐาน สำหรับในงานวิจัยนี้ได้อาศัย p-value มาใช้เป็นแนวทางเพื่อเป็นค่าวัดความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่าง

Hotelling Important Data Point Oversampling Algorithm (HIDPO Algorithm) เป็นขั้นตอนวิธีใหม่ที่ใช้สำหรับการสุ่มเพิ่มข้อมูลสำหรับกลุ่มส่วนน้อย โดยกำหนดความน่าจะเป็นของแต่ละหน่วยตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่าง ซึ่งใช้กับปัญหาการจำแนกประเภท 2 กลุ่ม โดยอาศัย p-value ที่ได้จาก Hotelling's T-squared ในการเป็นค่าวัดความสำคัญของหน่วยตัวอย่าง แสดงขั้นตอนวิธีโดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) นำเข้าข้อมูลกลุ่มส่วนน้อยจำนวน n_1 และกลุ่มส่วนมากจำนวน n_0
- 2) กำหนดเกณฑ์จุดตัดความสำคัญ (threshold) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดที่ 0.00001
- 3) ตัดหน่วยตัวอย่างที่ i ของกลุ่มส่วนน้อย เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n_1$
- 4) ใช้วิธีการของ Hotelling's T-squared ในการเปรียบเทียบเวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายระหว่างกลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนใหญ่ ซึ่งกลุ่มส่วนน้อยจะเหลือจำนวน $n_1 - 1$ และหา p-value สำหรับการตัดหน่วยตัวอย่าง



ที่ i ซึ่ง p -value ที่น้อย (p -value < threshold) แสดงถึงข้อมูลที่เหลือหลังจากมีการตัดหน่วยตัวอย่าง i ยังคงสามารถจำแนกประเภทระหว่าง 2 กลุ่มได้อย่างถูกต้อง หรือก็คือการไม่มีหน่วยตัวอย่าง i ก็ยังคงทำให้สามารถพบความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้ ดังนั้นหน่วยตัวอย่างนี้จึงไม่ได้มีความสำคัญต่อการจำแนกประเภท

- 5) ดำเนินการขั้นที่ 3 และ 4 จนครบทุกหน่วยตัวอย่างของกลุ่มส่วนน้อย
- 6) คำนวณน้ำหนักสำหรับหน่วยตัวอย่างที่ i คำนวณ ดังนี้

$$w_i = \begin{cases} \frac{p - value_i}{\sum_{j=1}^{m_1} p - value_j} & ; p - value_i \geq \alpha \\ 0 & ; p - value_i < \alpha \end{cases} \quad (5)$$

โดยที่ w_i แทน น้ำหนักของหน่วยตัวอย่างที่ i ของกลุ่มส่วนน้อย

m_1 แทน จำนวนหน่วยตัวอย่างของกลุ่มส่วนน้อยที่มี $p - value_i \geq \alpha$

ในกรณีที่ไม่มีพบหน่วยตัวอย่างที่มี $p - value_i \geq \alpha$ จะกำหนดความน่าจะเป็นที่แต่ละหน่วยตัวอย่างจะถูกสุ่มเพิ่มข้อมูล ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันซึ่งจะให้ผลเหมือนกับวิธี ROS

- 7) สุ่มเพิ่มข้อมูลกลุ่มส่วนน้อย จำนวนเท่ากับ $n_0 - n_1$ จากหน่วยตัวอย่างในกลุ่มส่วนน้อย ด้วยความน่าจะเป็นของแต่ละหน่วยตัวอย่างที่จะถูกสุ่ม ตามที่ได้ในขั้นที่ 6
- 8) ส่งออกข้อมูลที่เพิ่มจำนวนแล้ว

การจำแนกประเภท

ในงานวิจัยนี้กำหนดตัวจำแนกประเภทโดยใช้ตัวแบบการถดถอยลอจิสติก (Logistic Regression Model) ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติในการสร้างตัวแบบความน่าจะเป็นของตัวแปรตามที่มีค่าแบบไม่ต่อเนื่อง เมื่อกำหนดค่าตัวแปรทำนาย โดยตัวแปรตามที่มีค่าไม่ต่อเนื่องนี้อาจมีสองค่า หรือมากกว่าสองค่าได้ แต่ที่ใช้ส่วนใหญ่มักเป็นลักษณะที่มีผลลัพธ์ได้สองค่า (Binary Outcome) เช่น เป็นโรค-ไม่เป็นโรค เป็นหนี้-ไม่หนี้ บกพร่อง-ไม่บกพร่อง เป็นต้น การถดถอยลอจิสติกเป็นเทคนิคที่มีประโยชน์สำหรับปัญหาการจำแนกประเภท สามารถสร้างตัวแบบในการทำนายกลุ่มของตัวอย่างใหม่ โดยการสร้างลอจิสติกฟังก์ชัน (Logistic Function) ในการหาค่าความน่าจะเป็นที่ตัวแปรตามจะอยู่ในกลุ่มที่สนใจ ($y=1$) เป็นดังนี้ [9]

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k)}} \quad (6)$$

p แทน ความน่าจะเป็นที่ผลลัพธ์ของตัวแปรตามจะตกอยู่ในกลุ่มที่สนใจ ($y = 1$)

x_i แทน ตัวแปรทำนายที่ i

k แทน จำนวนตัวแปรทำนาย

β_i แทน สัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรทำนายที่ i

ตัวแบบลอจิสติกจะแสดงในรูปของ log odds ดังนี้

$$\log \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (7)$$

โดยทั่วไปจะใช้วิธีของ Maximum Likelihood ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

ในปัญหาการจำแนกประเภทแบบสองกลุ่ม ตัวแบบถดถอยลอจิสติกเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมสำหรับการแก้ปัญหาในหลากหลายแขนง [8, 11-14] และมีการพัฒนาเพื่อใช้ในกรณีที่ข้อมูลไม่สมดุลอย่างมาก [15]



การประเมินประสิทธิภาพ

การวัดประสิทธิภาพของการจำแนกโดยสร้าง Confusion Matrix และคำนวณค่าความแม่นยำ (Accuracy) อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อย (True Positive Rate) อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนใหญ่ (True Negative Rate) และค่าการวัดเอฟ (F-measure) บนข้อมูลทดสอบ โดยแสดงการสร้าง Confusion Matrix และคำนวณค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 [16]

ตารางที่ 1 แสดง Confusion Matrix ของค่าจริงและผลการทำนาย ดังนี้

ค่าจริง	ผลการทำนาย	
	1 (กลุ่มส่วนน้อย)	0 (กลุ่มส่วนใหญ่)
1 (กลุ่มส่วนน้อย)	TP	FN
0 (กลุ่มส่วนมาก)	FP	TN

โดยที่ TP หมายถึง True Positive แสดงถึงจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มส่วนน้อย และทำนายว่าอยู่ในกลุ่มส่วนน้อย

FN หมายถึง False Negative แสดงถึงจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มที่ส่วนน้อย แต่ทำนายว่าอยู่ในกลุ่มส่วนมาก

FP หมายถึง False Positive แสดงถึงจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มส่วนมาก แต่ทำนายว่าอยู่ในกลุ่มส่วนน้อย

TN หมายถึง True Negative แสดงถึงจำนวนหน่วยตัวอย่างที่อยู่ในกลุ่มส่วนมาก และทำนายว่าอยู่ในกลุ่มส่วนมาก

1) ค่าความแม่นยำ (Accuracy) แสดงถึงความถูกต้องในการทำนายในภาพรวม ทั้งกลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนมาก ซึ่งคำนวณได้ ดังนี้

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (8)$$

2) อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อย (True Positive Rate: TP Rate) แสดงถึงความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อยว่าอยู่กลุ่มส่วนน้อย

$$True Positive Rate = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

3) อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนใหญ่ (True Negative Rate: TN Rate) แสดงถึงความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนใหญ่ว่าอยู่กลุ่มส่วนใหญ่

$$True Negative Rate = \frac{TN}{TN + FP} \quad (10)$$

4) ค่าการวัดเอฟ (F-measure) เป็นการวัดความถูกต้องโดยการใช้ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิระหว่าง True Positive Rate และ Precision

$$F - measure = \frac{2 \times (TP rate \times Precision)}{TP rate + Precision} \quad (11)$$

โดยที่ Precision หมายถึง ความเที่ยง ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของการทำนายกลุ่มส่วนน้อย เมื่อเทียบกับผลการทำนายกลุ่มส่วนน้อยทั้งหมด ซึ่งคำนวณจาก $Precision = \frac{TP}{TP + FP}$

การวัดประสิทธิภาพด้วยค่าความแม่นยำเพียงอย่างเดียวอาจไม่สะท้อนความเป็นจริง โดยเฉพาะถ้าข้อมูลไม่สมดุล เนื่องจากค่าความแม่นยำจะเอนเอียงไปตามกลุ่มส่วนมาก ค่าการวัดเอฟเป็นตัววัดประสิทธิภาพที่เป็นทางเลือกที่ดีกว่า โดยค่าการวัดเอฟจะพิจารณาทั้งความเที่ยง และอัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อย มีแนวโน้มน้อยกว่าที่จะเอนเอียงไปทางกลุ่มส่วนใหญ่หรือกลุ่มส่วนน้อย [13]



ผลการวิจัย

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกประเภท เมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลจากการสุ่มเพิ่มข้อมูลระหว่างวิธี ROS และวิธี HIDPO บนข้อมูลจำลองโดยกำหนดพารามิเตอร์ ได้แก่ อัตราความไม่สมดุล จำนวนตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้อง ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกระหว่างกลุ่มส่วนน้อยกับกลุ่มส่วนใหญ่ และขนาดตัวอย่างรวม 96 สถานการณ์ จำแนกประเภทด้วยตัวแบบการถดถอยลอจิสติก โดยวัดประสิทธิภาพของการจำแนกด้วยค่าความแม่นยำ อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนน้อย อัตราความถูกต้องในการทำนายกลุ่มส่วนใหญ่ และค่าการวัดเอฟ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2 – 5

จากตารางที่ 2 เป็นสถานการณ์ที่ $n = 80$ พบว่าเมื่อ $IR = 0.05$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 95.62 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.63 – 100.00 สำหรับ TP Rate จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 44.80 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1 และ RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 56.03 ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS

เมื่อ $IR = 0.07$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 95.37 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.25 – 100.00 สำหรับ TP Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 50.20 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1, RelVar = 2 และสถานการณ์ ClassDif = 2, RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 18.26 และ 87.89 ตามลำดับ ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS

เมื่อ $IR = 0.10$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 91.62 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.00 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS ให้ค่าสูงสุดในสถานการณ์ ClassDif = 1 และ 2 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 54.80 – 95.00 ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี ROS และวิธี HIDPO จะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ ClassDif = 2 และ RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 67.88 ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS

เมื่อ $IR = 0.20$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 84.53 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 96.66 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS จะสูงสุดในสถานการณ์ส่วนใหญ่ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 63.43 – 100.00 สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ ClassDif = 1, RelVar = 5 และสถานการณ์ ClassDif = 2, RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 63.17 และ 78.30 ตามลำดับ ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS

จากตารางที่ 3 เป็นสถานการณ์ที่ $n = 150$ พบว่าเมื่อ $IR = 0.05$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 95.41 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.64 – 100.00 สำหรับ TP Rate จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 52.45 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1 และสถานการณ์ ClassDif = 2, RelVar = 2 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 19.92 – 59.93 ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS

เมื่อ $IR = 0.07$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 93.28 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.34 – 100.00 สำหรับ TP Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 59.93 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 28.98 – 48.30 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS



ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างวิธี ROS และวิธี HIDPO (หน่วยเป็น %) เมื่อ $n = 80$

IR	ClassDiff	RelVar	Accuracy			Stat test	TP Rate			Stat test	TN Rate			F-measure			Stat test
			original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO	original	ROS	HIDPO	
0.05	1	2	95.62	80.71	86.71	a, b	3.50	44.80	32.90	a, b	99.63	82.27	89.05	3.40	17.58	16.65	a
		5	95.95	87.55	92.04	a, b	11.20	52.00	40.30	a, b	99.64	89.10	94.29	11.03	27.70	27.69	a
	2	2	97.23	93.62	96.30	a, b	39.60	77.40	67.10	a, b	99.73	94.32	97.57	38.93	53.60	56.03	a, b
		5	98.71	98.82	99.15	a, b	70.80	91.40	88.80	a, b	99.92	99.14	99.60	70.33	86.07	86.20	a
	5	2	99.89	99.97	99.97	a	97.40	99.80	99.80	a	100.00	99.98	99.97	97.40	99.63	99.60	a
0.07	1	2	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
		5	95.37	78.36	86.04	a, b	6.20	50.20	37.80	a, b	99.25	79.59	88.14	5.90	16.81	18.26	a, b
	2	2	95.90	87.11	91.88	a, b	19.00	60.00	47.40	a, b	99.24	88.29	93.82	17.80	30.49	31.53	a
		5	97.35	93.15	96.11	a, b	49.00	80.30	72.20	a, b	99.46	93.71	97.15	47.03	53.02	58.69	a, b
	5	2	99.94	99.98	99.98	a	98.60	99.90	99.90	a	100.00	99.99	99.99	98.60	99.80	99.80	a
0.1	1	2	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
		5	91.62	77.23	83.78	a, b	10.45	54.80	41.50	a, b	99.00	79.26	87.62	12.29	29.41	29.77	a
	2	2	92.82	86.08	90.21	a, b	28.45	64.90	53.90	a, b	98.67	88.01	93.51	32.06	45.38	46.45	a
		5	95.55	92.38	94.47	a, b	54.50	80.70	72.95	a, b	99.28	93.44	96.43	60.01	65.82	67.88	a, b
	5	2	98.64	98.74	98.78	ไม่แตกต่าง	85.20	95.00	95.00	a	99.86	99.08	99.13	88.59	92.85	92.98	a
0.2	1	2	99.91	99.97	99.98	a	98.90	99.85	99.90	a	100.00	99.98	99.98	99.27	99.82	99.85	a
		5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	2	2	84.53	74.78	78.98	a, b	23.90	63.43	53.33	a, b	96.66	77.05	84.11	29.68	45.85	45.17	a
		5	88.98	84.76	87.09	a, b	50.40	73.95	67.68	a, b	96.70	86.92	90.97	57.28	62.32	63.17	a, b
	5	2	93.46	91.57	91.89	a, b	70.35	85.95	85.50	a, b	98.09	92.70	93.17	76.22	77.88	78.30	a, b
หมายเหตุ	1	2	98.59	98.43	98.45	ไม่แตกต่าง	92.60	96.68	96.93	a, b	99.79	98.78	98.75	95.12	95.43	95.53	ไม่แตกต่าง
		5	99.94	99.99	99.98	a	99.65	99.95	99.93	a	100.00	100.00	100.00	99.80	99.96	99.95	a
	2	2	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
		5	84.53	74.78	78.98	a, b	23.90	63.43	53.33	a, b	96.66	77.05	84.11	29.68	45.85	45.17	a
	5	2	93.46	91.57	91.89	a, b	70.35	85.95	85.50	a, b	98.09	92.70	93.17	76.22	77.88	78.30	a, b

หมายเหตุ IR – อัตราความไม่สมดุล RelVar – จำนวนตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้อง ClassDiff – ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย a - HIDPO แตกต่างจาก original อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

b - HIDPO แตกต่างจาก ROS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างวิธี ROS และวิธี HIDPO (หน่วยเป็น %) เมื่อ n = 150

IR	ClassDif	RelVar	Accuracy			Stat test	TP Rate			Stat test	TN Rate			Stat test	F-measure			Stat test
			original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO					
0.05	1	2	95.41	78.61	86.92	a, b	4.35	52.45	36.45	a, b	99.64	79.83	89.27	a, b	5.17	18.81	19.92	a, b
	1	5	95.94	87.62	92.95	a, b	19.85	62.40	48.00	a, b	99.48	88.79	95.04	a, b	23.15	33.66	37.29	a, b
	2	2	97.19	93.37	95.69	a, b	45.00	80.90	72.30	a, b	99.62	93.95	96.78	a, b	50.77	55.48	59.93	a, b
	2	5	99.02	98.90	98.90	a	79.15	94.30	94.25	a	99.95	99.11	99.12	a	84.10	89.36	89.34	a
	5	2	99.92	99.98	99.98	a	98.25	99.85	99.85	a	100.00	99.99	99.99	a	98.83	99.78	99.78	a
0.07	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	1	2	93.28	76.96	85.25	a, b	8.53	59.93	44.47	a, b	99.34	78.17	88.16	a, b	11.29	26.64	28.98	a, b
	1	5	94.49	87.48	91.82	a, b	31.27	69.40	58.17	a, b	99.01	88.78	94.22	a, b	37.57	44.48	48.30	a, b
	2	2	96.48	92.65	93.43	a, b	55.93	84.80	82.90	a, b	99.37	93.21	94.19	a, b	63.50	62.88	64.51	b
	2	5	98.93	98.77	98.78	a	85.63	95.37	95.50	a	99.88	99.01	99.01	a	90.08	91.69	91.80	a
0.1	5	2	99.94	99.97	99.97	a	99.10	99.93	99.93	a	100.00	99.98	99.98	a	99.46	99.82	99.82	a
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	1	2	91.32	76.42	83.72	a, b	14.35	65.58	51.78	a, b	98.82	77.47	86.84	a, b	19.06	33.60	36.11	a, b
	1	5	93.25	86.88	89.30	a, b	41.83	75.05	69.10	a, b	98.26	88.04	91.27	a, b	48.46	51.61	53.86	a, b
	2	2	95.93	92.32	92.38	a	63.88	86.30	85.90	a, b	99.06	92.90	93.01	a	71.05	68.25	68.25	a
0.2	2	5	98.90	98.70	98.69	a	89.33	96.53	96.60	a	99.83	98.92	98.89	a	92.74	93.36	93.32	ไม่แตกต่าง
	5	2	99.95	100.00	100.00	a	99.48	99.98	99.98	a	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	99.70	99.97	99.97	a
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	1	2	86.08	75.43	78.45	a, b	30.71	70.04	63.87	a, b	96.28	76.42	81.14	a, b	38.65	47.24	47.94	a, b
	1	5	90.72	86.27	86.29	a	60.37	82.00	81.53	a, b	96.31	87.06	87.17	a	65.84	65.57	65.41	ไม่แตกต่าง
0.2	2	2	94.40	91.75	91.67	a	75.49	89.01	88.94	a	97.88	92.25	92.17	a	79.97	77.59	77.40	a
	2	5	98.85	98.54	98.57	a	94.71	97.34	97.36	a	99.62	98.76	98.79	a	96.11	95.52	95.60	a
	5	2	99.97	99.96	99.96	ไม่แตกต่าง	99.80	99.90	99.91	a	100.00	99.97	99.97	a	99.89	99.87	99.87	ไม่แตกต่าง
0.2	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง

หมายเหตุ IR – อัตราความไม่สมดุล RelVar – จำนวนต้นปรมาณายที่เกี่ยวข้อง ClassDif – ความแตกต่างจาก original อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

b - HIDPO แตกต่างจาก ROS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างวิธี ROS และวิธี HIDPO (หน่วยเป็น %) เมื่อ $n = 210$

IR	ClassDif	RelVar	Accuracy			Stat test	TP Rate			Stat test	TN Rate			F-measure			Stat test
			original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO	original	ROS	HIDPO	
0.05	1	2	95.15	78.07	87.24	a, b	5.43	60.63	43.93	a, b	99.64	78.94	89.41	7.43	21.79	25.24	a, b
	1	5	95.85	88.60	93.12	a, b	24.47	68.77	56.33	a, b	99.42	89.59	94.96	30.38	38.66	44.24	a, b
	2	2	97.23	93.28	94.00	a, b	50.20	84.47	83.37	a, b	99.58	93.72	94.53	58.14	57.31	59.46	b
	2	5	99.12	98.96	98.95	a	83.07	94.83	94.77	a	99.92	99.17	99.16	88.28	90.53	90.38	a
	5	2	99.95	99.98	99.98	a	98.97	99.90	99.90	a	100.00	99.99	99.99	99.38	99.81	99.84	a
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
0.07	1	2	93.62	76.95	85.38	a, b	9.98	66.13	50.48	a, b	99.29	77.68	87.75	13.59	27.32	30.86	a, b
	1	5	94.97	87.43	89.91	a, b	36.00	75.68	69.53	a, b	98.97	88.23	91.29	43.96	44.81	47.90	a, b
	2	2	96.78	92.51	92.55	a	59.58	86.20	86.35	a	99.31	92.94	92.97	67.40	61.24	61.47	a
	2	5	99.12	98.82	98.81	a	87.55	95.98	95.95	a	99.90	99.02	99.01	91.77	91.75	91.70	ไม่แตกต่าง
	5	2	99.97	99.98	99.98	ไม่แตกต่าง	99.48	99.98	99.98	a	100.00	99.98	99.98	99.70	99.84	99.83	ไม่แตกต่าง
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
0.1	1	2	90.77	76.65	82.85	a, b	14.05	67.72	55.40	a, b	98.85	77.59	85.74	19.97	36.06	38.17	a, b
	1	5	93.37	86.99	87.52	a, b	44.93	78.72	77.22	a, b	98.47	87.86	88.60	54.02	54.40	54.86	b
	2	2	95.66	92.19	92.10	a	64.42	87.68	87.55	a	98.94	92.67	92.58	72.30	69.32	69.09	a
	2	5	98.97	98.75	98.74	a	91.12	96.85	96.97	a	99.79	98.95	98.93	94.02	93.93	93.89	ไม่แตกต่าง
	5	2	99.95	99.97	99.97	a	99.45	99.93	99.92	a	100.00	99.98	99.98	99.69	99.87	99.86	a
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
0.2	1	2	86.19	75.85	76.91	a, b	31.14	72.13	70.27	a, b	96.57	76.55	78.16	39.99	48.99	49.37	a, b
	1	5	90.86	86.46	86.44	a	61.59	82.99	82.76	a	96.38	87.11	87.13	67.43	66.54	66.35	a
	2	2	94.47	91.94	91.90	a	76.53	89.84	89.68	a	97.85	92.34	92.32	81.07	78.45	78.32	a
	2	5	98.86	98.55	98.57	a	94.86	97.43	97.44	a	99.61	98.76	98.78	96.24	95.61	95.67	a
	5	2	99.96	99.97	99.97	ไม่แตกต่าง	99.76	99.92	99.92	a	100.00	99.98	99.98	99.86	99.92	99.91	ไม่แตกต่าง
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง

หมายเหตุ IR – อัตราความไม่สมดุล RelVar – จำนวนตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้อง ClassDif – ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย a - HIDPO แตกต่างจาก original อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

b - HIDPO แตกต่างจาก ROS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างวิธี ROS และวิธี HIDPO (หน่วยเป็น %) เมื่อ $n = 300$

IR	ClassDif	RelVar	Accuracy			Stat test	TP Rate			Stat test	TN Rate			F-measure			Stat test
			original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO		original	ROS	HIDPO	original	ROS	HIDPO	
0.05	1	2	95.52	77.63	86.95	a, b	6.35	65.13	47.90	a, b	99.67	78.21	88.76	9.14	21.30	25.36	a, b
	1	5	96.27	87.99	90.21	a, b	30.53	74.58	69.00	a, b	99.32	88.62	91.20	38.16	37.58	40.37	a, b
	2	2	97.48	92.88	92.94	a	53.65	86.53	86.35	a	99.52	93.17	93.25	62.43	54.58	54.76	a
	2	5	99.31	98.97	98.98	a	86.28	95.80	95.83	a	99.92	99.12	99.12	90.73	90.03	90.08	ไม่แตกต่าง
	5	2	99.96	99.98	99.98	a	99.13	99.95	99.95	a	100.00	99.98	99.98	99.50	99.76	99.79	a
0.07	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	99.98	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	1	2	93.48	76.45	83.24	a, b	10.68	68.90	56.22	a, b	99.40	76.99	85.17	15.85	28.60	31.56	a, b
	1	5	94.98	87.29	87.48	a, b	40.12	78.57	78.15	a	98.90	87.92	88.15	49.28	46.52	46.73	a
	2	2	96.74	92.33	92.38	a	61.02	88.33	88.30	a	99.29	92.62	92.68	69.85	62.13	62.18	a
	2	5	99.15	98.82	98.82	a	89.43	96.30	96.28	a	99.85	99.00	99.00	92.92	91.96	91.97	a
0.1	5	2	99.96	99.97	99.98	a, b	99.35	99.88	99.90	a	100.00	99.98	99.98	99.64	99.81	99.84	a, b
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	1	2	91.49	76.24	79.87	a, b	15.43	70.96	64.28	a, b	98.91	76.75	81.39	22.24	35.07	36.67	a, b
	1	5	93.90	86.94	87.00	a	47.74	81.39	81.34	a	98.41	87.49	87.56	56.56	53.48	53.55	a
	2	2	96.05	92.06	92.08	a	67.18	89.30	89.28	a	98.86	92.33	92.36	74.18	67.76	67.83	a
0.2	2	5	99.07	98.78	98.79	a	91.83	97.05	97.08	a	99.78	98.95	98.96	94.39	93.67	93.71	a
	5	2	99.98	99.98	99.98	ไม่แตกต่าง	99.74	99.99	99.99	a	100.00	99.98	99.98	99.86	99.91	99.92	ไม่แตกต่าง
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	1	2	85.63	75.48	75.42	a	30.93	73.31	73.03	a	96.57	75.91	75.89	40.56	50.05	49.88	a
	1	5	90.76	86.10	86.11	a	61.95	83.37	83.37	a	96.52	86.64	86.65	68.55	66.95	66.95	a
หมายเหตุ	2	2	94.30	91.83	91.78	a	77.51	90.43	90.58	a	97.66	92.11	92.03	81.62	78.97	78.91	a
	2	5	98.87	98.57	98.57	a	95.18	97.69	97.76	a	99.61	98.74	98.73	96.50	95.84	95.85	a
	5	2	99.97	99.98	99.98	ไม่แตกต่าง	99.85	99.99	99.98	a	100.00	99.98	99.98	99.91	99.94	99.94	ไม่แตกต่าง
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง
	5	5	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	ไม่แตกต่าง

หมายเหตุ IR – อัตราความไม่สมดุล RelVar – จำนวนตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้อง ClassDif – ความแตกต่างของค่าเฉลี่ย a - HIDPO แตกต่างจาก original อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

b - HIDPO แตกต่างจาก ROS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



เมื่อ $IR = 0.10$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 91.32 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 98.82 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS ให้ค่าสูงสุดในสถานการณ์ ClassDif = 1 และสถานการณ์ ClassDif = 2, RelVar = 2 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 65.58 – 86.30 ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี ROS และวิธี HIDPO จะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 36.11 – 53.86 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับ ROS

เมื่อ $IR = 0.20$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 86.08 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 96.28 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS ให้ค่าสูงสุดในสถานการณ์ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 70.04 – 89.01 ส่วนสถานการณ์อื่น วิธี ROS และวิธี HIDPO จะมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ ClassDif = 1 และ RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 47.94 และข้อมูลดั้งเดิมให้ค่าสูงสุดเมื่อ ClassDif = 2 ส่วนสถานการณ์อื่นทุกวิธีให้ผลไม่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4 เมื่อ $n = 210$ พบว่าเมื่อ $IR = 0.05$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 95.15 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.64 – 100.00 สำหรับ TP Rate จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 60.63 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25.24 – 44.24 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับวิธี ROS

เมื่อ $IR = 0.07$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 93.62 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.29 – 100.00 สำหรับ TP Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 66.13 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30.86 – 47.90 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่แต่ละวิธีให้ผลไม่แตกต่างกัน

เมื่อ $IR = 0.10$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 90.77 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 98.85 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS จะสูงสุดเมื่อ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 67.72 – 78.72 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ วิธี HIDPO จะให้ผลใกล้เคียงกับวิธี ROS สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 38.17 – 54.86 และข้อมูลดั้งเดิมมีค่าสูงสุดเมื่อ ClassDif = 2, RelVar = 2 ส่วนสถานการณ์อื่น แต่ละวิธีส่วนใหญ่ให้ผลไม่แตกต่างกัน

เมื่อ $IR = 0.20$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 86.19 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 96.57 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS จะสูงสุดเมื่อ ClassDif = 1, RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 72.13 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ วิธี ROS และวิธี HIDPO จะสูงสุดโดยมีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ ClassDif = 1, RelVar = 2 โดยมีค่าร้อยละ 49.37 เมื่อ ClassDif = 5 วิธีทั้งสามให้ผลไม่แตกต่างกัน ส่วนสถานการณ์อื่นข้อมูลดั้งเดิมให้ค่าสูงสุด โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 67.43 – 96.24

จากตารางที่ 5 เมื่อ $n = 300$ พบว่าเมื่อ $IR = 0.05$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 95.52 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.67 – 100.00 สำหรับ TP Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุด เมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 65.13 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ ClassDif = 1 โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25.36 – 40.37 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ วิธี HIDPO ให้ผลใกล้เคียงกับวิธี ROS



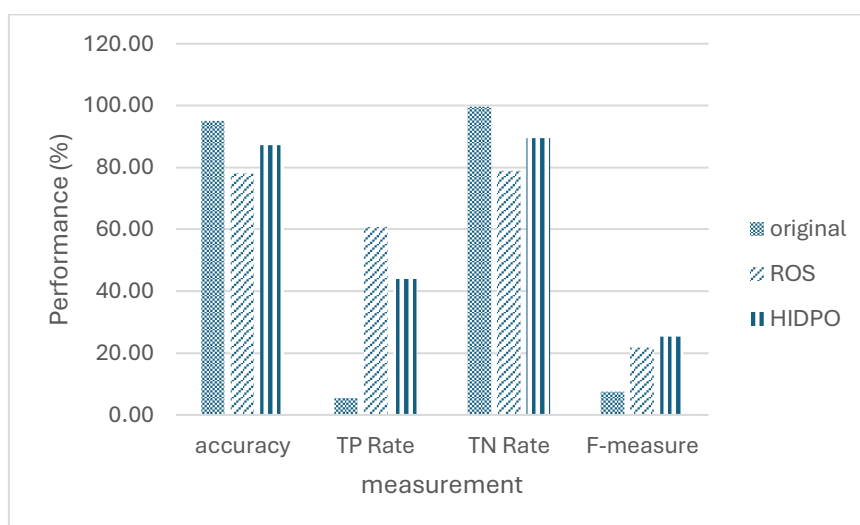
เมื่อ $IR = 0.07$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุดเมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 93.48 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 99.40 – 100.00 สำหรับ TP Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุดเมื่อใช้วิธี ROS โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 68.90 – 100.00 และค่า F-measure สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้วิธี HIDPO ในสถานการณ์ $ClassDif = 1$ และ $RelVar = 2$ โดยมีค่าร้อยละ 31.56 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ข้อมูลดั้งเดิมให้ค่าสูงสุด

เมื่อ $IR = 0.10$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุดเมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 91.49 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 98.91 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี ROS ส่วนใหญ่จะสูงสุดโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 70.96 – 100.00 สำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อ $ClassDif = 1$ และ $RelVar = 2$ โดยมีค่าร้อยละ 36.67 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ข้อมูลดั้งเดิมให้ค่าสูงสุด

เมื่อ $IR = 0.20$ ค่า Accuracy และ TN Rate ส่วนใหญ่จะสูงสุดเมื่อเป็นข้อมูลดั้งเดิม โดย Accuracy อยู่ในช่วงร้อยละ 85.63 – 100.00 และ TN Rate อยู่ในช่วงร้อยละ 96.57 – 100.00 สำหรับ TP Rate วิธี HIDPO ส่วนใหญ่จะสูงสุดแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 73.03 – 100.00 และสำหรับค่า F-measure วิธี HIDPO จะสูงสุดแต่ไม่มีนัยสำคัญเมื่อ $ClassDif = 1$ และ $RelVar = 2$ โดยมีค่าร้อยละ 49.88 ส่วนสถานการณ์อื่นส่วนใหญ่ข้อมูลดั้งเดิมให้ค่าสูงสุด

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนก เมื่อใช้ข้อมูลดั้งเดิม ข้อมูลจากการสุ่มเพิ่มข้อมูลระหว่างวิธี ROS และวิธี HIDPO บนข้อมูลจำลอง พบว่าวิธี HIDPO มักให้ค่าการวัดเอฟสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกันน้อยระหว่างกลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนใหญ่ ($ClassDif = 1$) อันเป็นสถานการณ์ที่มีความยากต่อการจำแนกประเภท โดยให้ผลดีเป็นพิเศษในสถานการณ์ที่มีความไม่สมดุลอย่างมาก (IR มีค่าน้อย) ซึ่งหากปัญหาการจำแนกประเภทนั้นต้องนำไปใช้กับข้อมูลไม่สมดุล ค่าวัดประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการสะท้อนความเป็นจริงควรใช้ค่าการวัดเอฟ [17] ดังนั้นในสถานการณ์ดังกล่าววิธี HIDPO จึงเหมาะสมในการใช้เป็นอัลกอริทึมเพื่อสุ่มเพิ่มข้อมูลให้มีความสมดุล ภาพที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าวัดประสิทธิภาพทั้ง 4 ระหว่างข้อมูลดั้งเดิม ROS และ HIDPO สำหรับสถานการณ์ $IR = 0.05$, $ClassDif = 1$, $RelVar = 2$ และ $n = 210$ ซึ่งจะพบว่าวิธี HIDPO ให้ค่าการวัดเอฟสูงสุด ส่วนค่าวัดอื่น ๆ ให้ค่าปานกลาง



ภาพที่ 1 การเปรียบเทียบ Accuracy, TP Rate, TN Rate และ F-measure ระหว่างข้อมูลดั้งเดิม ROS และ HIDPO

สำหรับสถานการณ์ $IR = 0.05$, $ClassDif = 1$, $RelVar = 2$ และ $n = 210$

อย่างไรก็ตามเมื่อ $n = 80$ พบว่าวิธี HIDPO ไม่ได้ให้ค่าการวัดเอฟสูงสุดสำหรับสถานการณ์ที่ $\text{ClassDif} = 1$ ถึงแม้ $\text{IR} = 0.05$ ทั้งนี้เนื่องจากในสถานการณ์ดังกล่าว กลุ่มส่วนน้อยมีจำนวนเพียงประมาณ 4 หน่วยตัวอย่าง และเมื่อแบ่งข้อมูลเป็นข้อมูลฝึกฝนจะเหลือหน่วยตัวอย่างเพียงประมาณ 3 หน่วยตัวอย่าง โดยเป็นจำนวนที่น้อยมาก การสุ่มเพิ่มข้อมูลด้วยวิธี HIDPO จึงให้ผลลัพธ์ไม่ค่อยแตกต่างจากวิธี ROS ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ $n = 150$ ในสถานการณ์ดังกล่าวแล้ว พบว่าขนาดตัวอย่างที่นำไปใช้ฝึกฝนไม่ควรมีจำนวนน้อยกว่า 5

กรณีที่กลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันมาก หรือ $\text{ClassDif} = 5$ การวัดความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่างด้วยวิธี HIDPO จะมีโอกาสมากที่ไม่สามารถพบความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่างได้ เนื่องจากข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างกลุ่ม ดังนั้นเมื่อมีการตัดหน่วยตัวอย่างหนึ่งตัวออกก็ยังคงพบความแตกต่างระหว่างกลุ่มได้ ทำให้ไม่สามารถแสดงอิทธิพลหรือความสำคัญของหน่วยตัวอย่างที่ถูกตัดทิ้งได้ และมีโอกาสมากที่จะพบว่าไม่มีหน่วยตัวอย่างใดเลยที่มีความสำคัญตามเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งในกรณีเช่นนี้ HIDPO จะถ่วงน้ำหนักแบบสุ่มด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากันเช่นเดียวกับ ROS จึงทำให้ได้ผลใกล้เคียงกันมาก

ข้อเสนอแนะ

วิธี HIDPO เป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาการจำแนกประเภทสำหรับข้อมูลไม่สมดุล เนื่องจากให้ค่าการวัดเอฟที่สูงสุดในสถานการณ์ที่มีความแตกต่างกันน้อยระหว่างกลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนใหญ่ ในสถานการณ์ที่มีความไม่สมดุลมาก ถึงแม้ค่าวัดประสิทธิภาพอื่นจะไม่ได้ให้ค่าสูงสุด แต่ในสถานการณ์ของการไม่สมดุลของกลุ่มส่วนน้อยและกลุ่มส่วนมาก ค่าวัดที่เหมาะสมควรใช้ค่าการวัดเอฟ

การคัดเลือกตัวแปร เป็นกระบวนการหนึ่งที่จะช่วยให้การจำแนกประเภทมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลไม่สมดุล การระบุเฉพาะตัวแปรทำนายที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการสร้างตัวแบบจะช่วยให้สามารถสร้างขอบเขตการตัดสินใจที่ชัดเจนเกี่ยวกับแต่ละกลุ่มได้ ซึ่งจะช่วยให้ตัวแบบสามารถจำแนกประเภทได้แม่นยำขึ้น [18] โดยกระบวนการนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิธี HIDPO ซึ่งการคัดเลือกตัวแปรทำนายให้เหลือเฉพาะตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกับการจำแนกประเภท จะทำให้สามารถวัดความสำคัญของแต่ละหน่วยตัวอย่างได้ถูกต้องมากขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การคัดเลือกตัวแปรโดยใช้สถิติทดสอบที่ช่วยระดับนัยสำคัญ 0.10 จึงควรมีการศึกษาต่อไปถึงวิธีการคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมในการใช้ร่วมกับวิธี HIDPO

เอกสารอ้างอิง

1. Sara F, Shahrokh A, Michael WK. A comprehensive data level analysis for cancer diagnosis on imbalanced data. J Biomed Inf 2019;90:103089.
2. Soh WW, Rika MY. Predicting Credit Card Fraud on an Imbalanced Data. Int J Data Sci Adv Anal 2019;1(1):12-7.
3. Meryem C, Mohamed H. A sight on defect detection methods for imbalanced industrial data. ITM Web of Conferences 2022;43:01012.
4. กิตติภาพ แซ่เตีย, จิรภัทร หยกรัตนศักดิ์. การจัดการข้อมูลไม่สมดุลของการทำกลยุทธ์เสนอขายประกันต่อยอดสำหรับผู้ถือบัตรเครดิต. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 13 วันที่ 8 - 9 กรกฎาคม 2564. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม. นครปฐม; 2564. หน้า 514-23.
5. Andrea B. Imbalanced Data Classification with Neural Networks and Classifiers. [Internet]. 2021 [cited 2024 Apr 14]. Available from: <https://aboskovic21.github.io/projects/thesis.pdf>



6. Aida A, Siti MS, Anca LR. Classification with class imbalance problem: A Review. *Int J Advance Soft Compu Appl* 2015;7(3):176-204.
7. Firuz K, Ho-Hon L, Aswani KC. Keep it simple: random oversampling for imbalanced data. In: *proceedings of Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, February 20-23, 2023; Dubai, United Arab Emirates; 2023. p. 1-4.
8. Michelle J, Maria M. A Comparison of Resampling Techniques to Handle the Class Imbalance Problem in Machine Learning Conversion prediction of Spotify Users - A Case Study. [Internet]. 2017 [cited 2024 Apr 14]. Available from: <https://www.kth.se/social/files/5a5ad14056be5b323d61de10/MJagelid.MMovin.pdf>
9. กัลยา วานิชย์บัญชา. การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร. กรุงเทพฯ: บริษัทธรรมสารจำกัด; 2552.
10. Ronald EW, Raymond HM. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. 5th ed. New York: Macmillan Publishing Company; 1993.
11. Qianyou M. Recent Applications and Perspectives of Logistic Regression Modelling in Healthcare. In: *proceedings of the 2nd International Conference on Mathematical Physics and Computational Simulation*, August 9, 2024; Glasgow, UK; 2024. p.185-90.
12. Mingze S. Research on Influencing Factors of Video Game Sales using Binary Logistic Regression. In: *3rd International Conference on Applied Mathematics, Modeling Simulation and Automatic Control (AMMSAC 2024)*, June 22-23, 2024; San Diego, USA; 2024. p. 65-70.
13. Abdulrashid S, Zahriya LH, Anas TB. A Logistic Regression-based Model for Identifying Credit Card Fraudulent Transactions. *Asian J Res Com Sci* 2024;17(7):41-54.
14. Prabhakaran N, Nedunchelian R. Combined Feature Set with Logistic Regression Model to Detect Credit Card Frauds in Real Time Applications. *J Mach Comput* 2024;4(3):804-12.
15. Art BO. Infinitely Imbalanced Logistic Regression. *J Mach Learn Res* 2007;8:761-73.
16. Pang-Ning T, Michael S, Vipin K. *Introduction to Data Mining*. Boston: Pearson Education, Inc.; 2006.
17. Lian Y, Nengfeng Z. Survey of Imbalanced Data Methodologies. [Internet]. 2021 [cited 2024 Apr 14]. Available from: <https://arxiv.org/pdf/2104.02240>
18. Himanshu T. What Is Balanced And Imbalanced Dataset?. [Internet]. 2019 [cited 2024 Apr 14]. Available from: <https://medium.com/analytics-vidhya/what-is-balance-and-imbalance-dataset-89e8d7f46bc5>



คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ใน วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

(Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานวิชาการทางด้าน
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยสาขาวิชาต่าง ๆ ดังนี้

1. วิทยาศาสตร์ชีวภาพ ได้แก่ จุลชีววิทยา ชีววิทยา พันธุศาสตร์ และเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น
2. วิทยาศาสตร์กายภาพ ได้แก่ เคมี ฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ และสถิติ เป็นต้น
3. วิทยาศาสตร์สุขภาพ ได้แก่ แพทยศาสตร์ สัตวแพทยศาสตร์ เภสัชศาสตร์ เทคนิคการแพทย์ กายภาพบำบัด

พยาบาลศาสตร์ และสาธารณสุขศาสตร์ เป็นต้น

4. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
5. วิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

โดยรับพิจารณาตีพิมพ์บทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (review article) ทั้งรูปแบบภาษาไทย
และภาษาอังกฤษ ทั้งนี้ผลงานวิชาการที่ส่งมาจะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ระหว่างการรอพิจารณาตีพิมพ์จากวารสารวิชาการอื่น

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ มีกำหนดออกวารสารปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 มกราคม-
มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม ซึ่งจะรับพิจารณาตีพิมพ์ผลงานวิชาการทั้งจากบุคคลภายในและภายนอก
มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความ

บทความที่ส่งมาพิจารณาควรมีคุณค่าทางวิชาการ โดยผู้เขียนเป็นผู้ทำการทดลอง สร้างสรรค์ หรือเกี่ยวข้องกับงาน
โดยปราศจากการคัดลอกผลงานวิจัยหรือบทความของผู้อื่นนำเสนอถึงแนวความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ซึ่งสอดคล้อง
กับทฤษฎี และนำไปสู่การพัฒนาหรือเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการวิจัย มีความสมบูรณ์ในเนื้อหา ภาษา ตลอดจนความ
ชัดเจนของสมมติฐานหรือวัตถุประสงค์

บทความจะได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 คน ซึ่งกองบรรณาธิการสงวน
สิทธิ์ในการตรวจแก้ไขบทความ และอาจส่งกลับคืนให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่ แล้วแต่กรณี เพื่อปรับปรุง
บทความให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นก่อนการตีพิมพ์ ทั้งนี้ต้นฉบับที่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์ของการเขียนที่กำหนดเท่านั้นจึงจะได้รับการ
พิจารณา และดำเนินการประเมินบทความก่อนการตีพิมพ์

การยอมรับบทความที่จะตีพิมพ์เป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการไม่รับผิดชอบความถูกต้องของ
เนื้อหา หรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง

ข้อกำหนดทั่วไปของการพิมพ์บทความ

1. พิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Windows
2. พิมพ์บนกระดาษ A4 หนึ่งหน้าเดียว โดยมีระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว (2.54 เซนติเมตร) และจัดพิมพ์
เป็น 1 คอลัมน์
3. ใช้ตัวอักษรแบบ TH Sarabun New
4. ระยะห่างของการพิมพ์แบบ 1.5 line space พิมพ์แบบเสมอนหน้า-หลัง (justified)
5. การกำหนดขนาดและชนิดตัวอักษร



ข้อความ	ขนาด	ชนิด	การจัดหน้ากระดาษ
ชื่อเรื่อง (ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)	18	ตัวหนา	กึ่งกลาง
ชื่อผู้เขียน	16	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
ที่อยู่หรือหน่วยงานสังกัดของผู้เขียน	14	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
อีเมลติดต่อเฉพาะผู้เขียนประสานงาน (corresponding author)	14	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
หัวข้อบทคัดย่อ (abstract)	16	ตัวหนา	ชิดซ้าย
หัวข้อเรื่องใหญ่	14	ตัวหนา	ชิดซ้าย
หัวข้อเรื่องย่อย	14	ตัวหนา	ชิดซ้าย
บทคัดย่อ คำสำคัญ เนื้อเรื่อง (วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย อภิปราย และสรุปผลการวิจัย กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง)	14	ตัวปกติ	ชิดซ้ายขวา
คำบรรยายรูปภาพ	14	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
คำบรรยายตาราง	14	ตัวปกติ	ชิดซ้าย

รายละเอียดการจัดเตรียมต้นฉบับ

- ชื่อเรื่อง** มีทั้งชื่อเรื่องภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายตรงกับเรื่องที่ทำ สำหรับชื่อภาษาอังกฤษนั้น อักษรตัวแรกของภาษาอังกฤษให้พิมพ์ด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่
- ชื่อผู้เขียนและสถานที่ทำงาน** ชื่อผู้เขียนใช้ชื่อ-นามสกุลเต็ม ไม่ต้องระบุตำแหน่งชื่อ ตำแหน่งทางวิชาการ และคุณวุฒิ โดยให้มีการกำกับเลขยกกำลังต่อท้ายชื่อ สำหรับผู้เขียนประสานงาน (corresponding author) ให้ทำเครื่องหมายดอกจัน (*) ไว้ท้ายชื่อ พร้อมระบุหมายเลขโทรศัพท์และอีเมล สำหรับชื่อสถานที่ทำงานควรพิมพ์ให้ตรงกับตัวเลขยกกำลังที่กำกับไว้ท้ายชื่อผู้เขียน กรณีมีผู้เขียน จำนวน 2 คน ให้ใช้ “และ/and” คั่น สำหรับผู้เขียนมากกว่า 2 คน ขึ้นไป กรณีภาษาไทยให้เว้นวรรค 2 ครั้ง คั่น กรณีภาษาอังกฤษให้ใส่จุลภาค (,) คั่น และเว้นวรรค 1 ครั้ง ระหว่างแต่ละคน กรณีบทความเป็นรูปแบบภาษาไทย ให้จัดลำดับบทคัดย่อภาษาไทยขึ้นต้น และกรณีบทความเป็นรูปแบบภาษาอังกฤษ ให้จัดลำดับบทคัดย่อภาษาอังกฤษขึ้นต้น
- บทคัดย่อ** มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยนำเสนอสาระสำคัญของเรื่อง ครอบคลุมถึงวัตถุประสงค์ บทนำ วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย อภิปรายและสรุปผลการวิจัย มีความยาวไม่เกิน 250 คำ
- คำสำคัญ** ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษอย่างละ 3-5 คำ ทั้งนี้ควรเลือกคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบทความ
- เนื้อหา** รายละเอียดของการเตรียมต้นฉบับบทความแต่ละประเภทมีดังนี้

5.1 บทความวิจัย (research article) ความยาวไม่เกิน 12 หน้า (รวมเอกสารอ้างอิง ตาราง รูปภาพ และแผนภูมิ)

- **บทนำ** นำเสนอความสำคัญหรือที่มาของปัญหาวิจัย สาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสำหรับวัตถุประสงค์ของการวิจัยให้นำเสนอไว้ตอนท้ายของบทนำ
- **วิธีดำเนินการวิจัย** นำเสนอรายละเอียดที่เป็นของการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล
- **ผลการวิจัย** นำเสนอผลการวิจัยที่สมบูรณ์ ชัดเจน โดยอาจนำเสนอด้วยตาราง แผนภูมิ หรือรูปภาพ พร้อมมีการบรรยายประกอบ
- **อภิปรายและสรุปผลการวิจัย** เป็นการวิเคราะห์ ประเมิน และตีความผลการวิจัยว่าสอดคล้องกับวัตถุประสงค์หรือไม่ มีการเทียบเคียงผลการวิจัยกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง พร้อมการอ้างอิงหลักวิชาการหรือทฤษฎี และอาจมีข้อเสนอแนะประเด็นที่ควรทำวิจัยต่อไป



- **กิตติกรรมประกาศ** แสดงความขอบคุณต่อองค์กรหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยหรือให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

- **เอกสารอ้างอิง** ควรเป็นบทความที่ได้รับการตีพิมพ์หรือกำลังจะได้รับการตีพิมพ์ และระบุรายการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วน โดยใช้ Vancouver style

5.2 บทความวิชาการ (review article) ความยาวไม่เกิน 12 หน้า (รวมเอกสารอ้างอิง ตาราง รูปภาพ และแผนภูมิ) นำเสนอเนื้อหาทางวิชาการที่ได้จากเอกสารวิชาการทั่วไป สามารถสอดแทรกความคิดเห็นของผู้เขียนที่มีการอ้างอิงจากหลักวิชาการประกอบบทความได้ ประกอบไปด้วย บทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทนำ เนื้อหา บทสรุป และเอกสารอ้างอิง

6. รูปภาพและตาราง

รูปภาพ

ความละเอียดของรูปภาพไม่น้อยกว่า 600 dpi สำหรับภาพขาว-ดำ และไม่น้อยกว่า 300 dpi สำหรับภาพสี ระบุลำดับที่ของรูปภาพ โดยใช้คำว่า “ภาพที่.....” (Figure.....) และคำบรรยายใต้ภาพอยู่ส่วนล่างกึ่งกลางของภาพ ส่วนที่เป็นสัญลักษณ์ให้นำเสนอในส่วนของคำบรรยายใต้ภาพ พร้อมทั้งแนบไฟล์รูปภาพที่ประกอบในเนื้อหาร่วมกับไฟล์เอกสารปกติดด้วย

ตาราง

ระบุลำดับที่ของตาราง โดยใช้คำว่า “ตารางที่.....” (Table.....) และคำบรรยายตารางอยู่ส่วนบนชิดขอบซ้ายของตาราง การนำรูปภาพ แผนภูมิ หรือตารางมาอ้างอิงประกอบในบทความจะต้องมีการอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของข้อมูลให้ถูกต้อง ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น

การเขียนเอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหา

การอ้างอิงในเนื้อหาใช้ระบบ Vancouver style ให้อ้างเลขลำดับที่ที่กำกับชื่อผู้แต่ง โดยระบุเลขลำดับที่ไว้ในวงเล็บท้ายข้อความตามลำดับการอ้างอิงก่อน-หลัง เช่น จิราวรรณ และคณะ [1] พบว่า *Geobacillus stearothermophilus* PTL38 ผลิตภัณฑ์เอนไซม์ไลเปสที่สามารถทำงานได้ดีที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 60 องศาเซลเซียส หรือมีการค้นพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกมะกรูดและกระชายมีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรียก่อโรคแกรมบวกที่ดีที่สุด [2]

2. การอ้างอิงเอกสารท้ายบทความ

การอ้างอิงท้ายบทความใช้ระบบ Vancouver style โดยเรียงลำดับให้ตรงกับหมายเลขในเอกสารอ้างอิงที่ได้ทำการอ้างอิงในเนื้อหา

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

1. หนังสือหรือตำรา

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. พิมพ์ครั้งที่. เมืองหรือสถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์.

1. สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล. พันธุวิศวกรรมเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2548.

2. Watson JD, Baker TA, Bell SP, Gann A, Levine M, Losick R. Molecular biology of the gene. 5th ed. San Francisco: Pearson Education, Inc.; 2004.

2. วารสาร

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่องหรือชื่อบทความ. ชื่อวารสาร. ปีที่พิมพ์. ปีที่ (ฉบับที่): หน้า.

1. วรางคณา วิเศษมณี, กาญจนา หิรัญเพ็ง. ความเป็นพิษเฉียบพลันและการกลายพันธุ์จากสารมลพิษรวมในน้ำและตะกอนดิน กรณีศึกษาคลองขุดหมัน จังหวัดสมุทรปราการ. วารสาร มฉก. วิชาการ 2554;14(28):153-73.



2. Supakdamrongkul P, Bhumiratana A, Wiwat C. Characterization of an extracellular lipase from the biocontrol fungus, *Nomuraea rileyi* MJ and its toxicity toward *Spodoptera litura*. J Invertebr Pathol 2010;105(3):228-35.

3. รายงานจากการประชุมวิชาการ

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ใน: ชื่อคณะกรรมการ, editors. ชื่อเอกสารรายงานการสัมมนา วันที่ เดือน ปี; เมืองที่สัมมนา, ประเทศ. เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. หน้า.

1. วรณา ศักดิ์สงส์, หิรัญญา จันทร์เกลี้ยง, ปิยาภรณ์ สุภักด์ดำรงกุล. การศึกษาประสิทธิภาพของเจลล้างมือผสมสารสกัดจากธรรมชาติในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 2 วันที่ 21 มีนาคม 2557. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. กรุงเทพฯ; 2557. หน้า 289-97.

2. Supakdamrongkul P, Wongthong A, Komkaew S. Production and characterization of a novel high-alkaline and thermal stable lipase from *Bacillus* sp. HCU3-2 and potential application as detergent formulation. In: proceedings of the 7th AOHUPO Congress and 9th International Symposium of the Protein Society of Thailand, August 6-8, 2014; Bangkok, Thailand; 2014. p. 259-68.

3. Deci EL, Ryan RM. A motivational approach to self: Integration in personality. In: Dienstbier R, editor. Nebraska Symposium on Motivation: Vol. 38. Perspectives on Motivation. Lincoln: University of Nebraska Press; 1991. p. 237-88.

4. พจนานุกรม

ชื่อพจนานุกรม. พิมพ์ครั้งที่. เมืองหรือสถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. คำศัพท์; หน้า.

1. พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542. กรุงเทพฯ: นานมีบุ๊คพับลิเคชัน; 2546. หน้า 1488.

2. Stedmin's medical dictionary. 26th ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1995. Apraxia; p. 119-20.

5. วิทยานิพนธ์

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อวิทยานิพนธ์. ระดับปริญญาของวิทยานิพนธ์, ชื่อมหาวิทยาลัย. จังหวัด; ปีที่พิมพ์.

1. อัจฉรา คอประเสริฐศักดิ์. การศึกษาแบคทีเรียผลิตเอนไซม์ไลเปสที่มีผลต่อการย่อยสลายน้ำมันและน้ำเสียประเภทไขมันสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ; 2542.

2. Darling CW. Giver of due regard: the poetry of Richard Wilbur. Ph.D. Thesis, University of Connecticut. USA; 1976.

6. หนังสือพิมพ์

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือพิมพ์ วัน เดือน ปี; หน้า.

1. สายใจ ดวงมาลี. มาลาเรียลาม 3 จว.ได้ตอนบน สธ.เร่งคุมเข้มกันเชื้อแพร่หนัก. คม-ชัด-ลึก 7 มิถุนายน 2548; 25.

2. Di Rado A. Trekking through college: Classes explore modern society using the world of Star Trek. Los Angeles Time March 15, 1995; p. A3.

7. เว็บไซต์

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อวารสาร [ประเภทของสื่อ]. ปีที่พิมพ์ [เข้าถึงเมื่อ]; ปีที่: [หน้า]. เข้าถึงได้จาก: URL ของเว็บไซต์
ที่อ้างอิงข้อมูลสืบค้น



1. ชีรเกียรติ เกิดเจริญ. นาโนเทคโนโลยีความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ [อินเทอร์เน็ต]. 2542 [เข้าถึงเมื่อ 13 ก.ค. 2558]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.nanotech.sc.mahidol.ac.th/index.html>

2. Macia E, Paris S, Chabre M. Binding of the pH and polybasic C-terminal domains of ARNO to phosphoinositides and to acidic lipids. Biochemistry [Internet]. 2001 [cited 2004 May 19]. Available from: <http://pubs.acs.org/cgibin/article.cgi/bichaw/2001/40/05pdf/bi005123a.pdf>

การส่งบทความ

การส่งบทความเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร ให้ผู้เสนอจัดเตรียมต้นฉบับบทความและแบบเสนอบทความ โดยดำเนินการจัดส่งเอกสารดังกล่าวแบบออนไลน์ทางเว็บไซต์ของวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index> ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กำหนดไฟล์เอกสารที่ต้องส่งทั้งแบบ MS Document และ PDF ไฟล์ ประกอบด้วย

1. แบบเสนอบทความ
2. ต้นฉบับบทความ
3. ไฟล์ภาพประกอบบทความ
4. เอกสารแสดงผลการตรวจการลอกวรรณกรรม (Plagiarism checking report) เช่น ระบบตรวจสอบอักขระวิสุทธิ และ

Turnitin

5. เอกสารการขอจริยธรรมงานวิจัย (โดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบในคนและสัตว์ทดลอง)

ทั้งนี้หากพบปัญหาในการส่งเอกสารแบบออนไลน์ โปรดติดต่อสอบถามมายังกองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

การติดต่อสอบถามข้อมูล

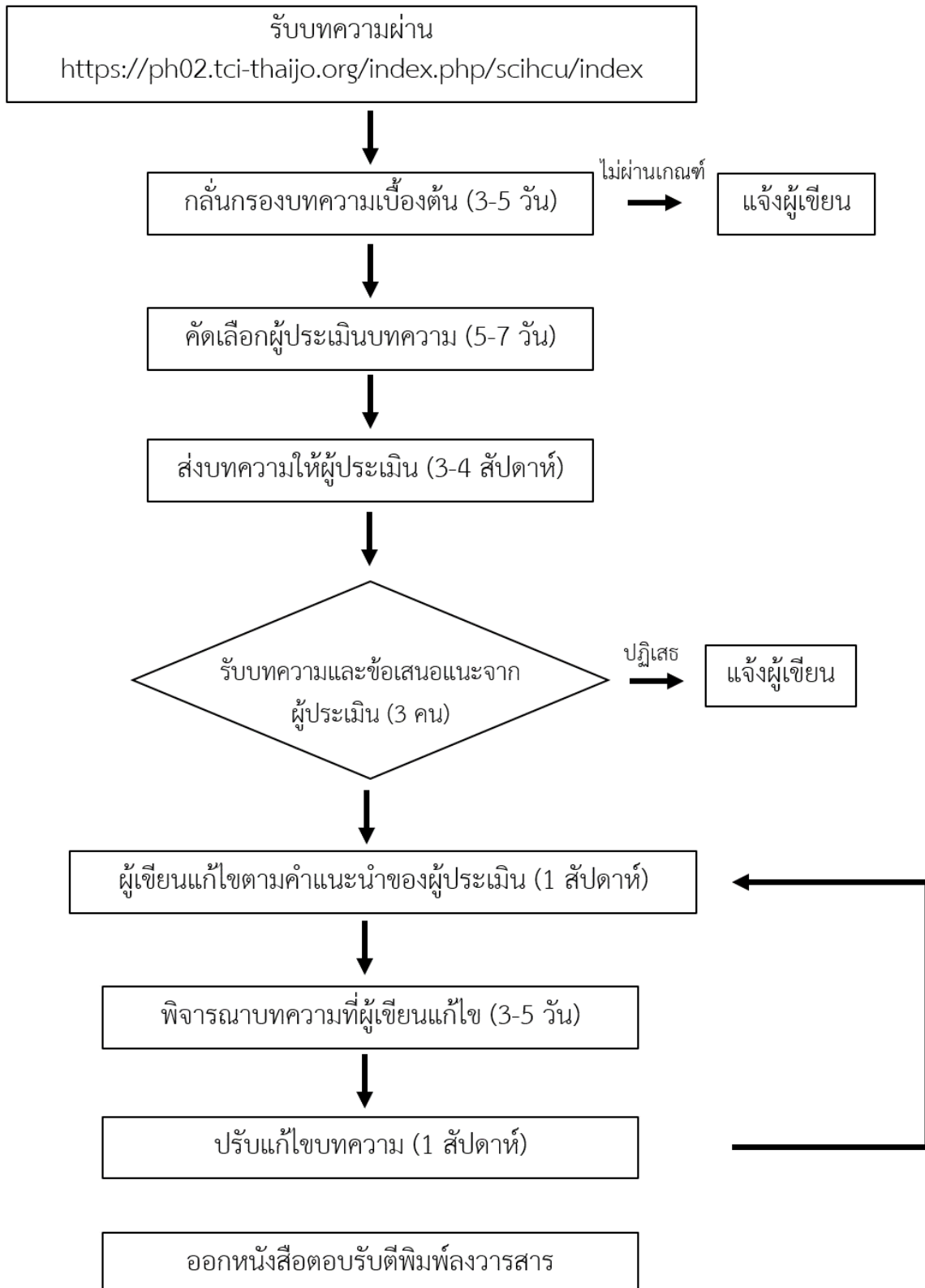
สามารถติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เลขที่ 18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 ตำบลบางโฉลง อำเภอบางพลี สมุทรปราการ 10540 โทรศัพท์ 02-312-6300 ต่อ 1180, 1213 โทรศัพท์มือถือ 084-9091766 อีเมล hcujournal.sci@gmail.com



เว็บไซต์วารสาร: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index>



ขั้นตอนการส่งบทความลงวารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ





แบบเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ใน
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
(Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal)



วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ข้าพเจ้า [นาย/นาง/น.ส./ดร./ผศ./รศ./ศ./อื่น (ระบุ)].....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขา ☐ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ ☐ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ☐ วิทยาศาสตร์สุขภาพ

☐ วิทยาศาสตร์กายภาพ ☐ วิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

ชื่อเรื่อง(ภาษาไทย).....

ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

คำสำคัญ (ภาษาไทย).....

(ภาษาอังกฤษ).....

ผู้เขียนทั้งหมด (ภาษาไทย) เรียงลำดับตามรายชื่อในบทความ

- | | |
|---------|---------|
| 1. | 5. |
| 2. | 6. |
| 3. | 7. |
| 4. | 8. |

อีเมลทั้งหมดของผู้แต่ง เรียงลำดับตามรายชื่อในบทความ

- | | |
|---------|---------|
| 1. | 5. |
| 2. | 6. |
| 3. | 7. |
| 4. | 8. |

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้.....

โทรศัพท์.....โทรศัพท์มือถือ.....

ชื่อ-นามสกุลของผู้ประสานงาน (corresponding author).....อีเมล.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามที่ระบุในบทความ

โดยบทความนี้ยังมิเคยได้รับการตีพิมพ์และไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมยอมรับหลักเกณฑ์การพิจารณาต้นฉบับ ทั้งยินยอมให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์พิจารณาและตรวจแก้ไขต้นฉบับได้ตามที่เห็นสมควร พร้อมทั้งมอบลิขสิทธิ์บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ให้แก่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ และหากมีการฟ้องร้องในเรื่องการละเมิดลิขสิทธิ์เกี่ยวกับ ส่วนหนึ่งหรือส่วนใด ๆ ในบทความ ให้ถือเป็นความรับผิดชอบของข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมแต่เพียงฝ่ายเดียว

ลงชื่อ.....

(.....)

วันที่.....



คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

มุ่งเน้นผลิตบัณฑิตให้มีความรู้และทักษะปฏิบัติในการพัฒนาซอฟต์แวร์และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการคอมพิวเตอร์

โอกาสในการประกอบอาชีพ

1. โปรแกรมเมอร์ (Programmer)
2. นักพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Developer)
3. วิศวกรซอฟต์แวร์ (Software Engineer)
4. นักวิเคราะห์ระบบ (System Analyst)
5. ผู้ทดสอบซอฟต์แวร์ (Software Tester)
6. นักพัฒนาเว็บเต็มรูปแบบ (Full stack Web Developer)
7. ผู้ดูแลเว็บไซต์ (Webmaster)
8. ผู้ดูแลฐานข้อมูล (Database Administrator)
9. นักพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Application Developer)
10. วิศวกรเครือข่าย (Network Engineer)
11. ผู้ดูแลและจัดการเครือข่าย (Network Administrator)
12. ผู้วิเคราะห์ข้อมูลดิจิทัล (Digital data Analyst)
13. ผู้เชี่ยวชาญด้านไอที (IT Specialist)
14. นักเทคโนโลยีดิจิทัล (Digital Technologist)
15. นักวิจัยทางด้านคอมพิวเตอร์ (Computer Researcher)



COMPUTING AND DIGITAL
TECHNOLOGY, HCU





คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

มุ่งเน้นผลิตบัณฑิตให้มีความรู้และทักษะปฏิบัติ

ในการเขียนโปรแกรมและประยุกต์ใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์ สามารถบูรณาการความรู้ในศาสตร์ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับความรู้ในศาสตร์อื่น



โอกาสในการประกอบอาชีพ

- 1.วิศวกรปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Engineer)
- 2.นักวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Scientist)
- 3.วิศวกรข้อมูล (Data Engineer)
- 4.วิศวกรระบบ (System Engineer)
- 5.นักวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Researcher)
- 6.ผู้ชำนาญการด้านดิจิทัล (Digital Specialist)
- 7.นักนวัตกรรม (Innovative Designer)
- 8.นักวิทยาศาสตร์เชิงบูรณาการ (Integrated Scientist)



COMPUTING AND DIGITAL
TECHNOLOGY, HCU





คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์

มุ่งเน้นการผสมผสานความรู้ด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์กับศาสตร์ด้านเทคโนโลยี
ที่ทันสมัย

โอกาสในการประกอบอาชีพ

1. นักวิทยาศาสตร์ นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ นักวิจัย
นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ปฏิบัติการ นักวิชาการ และ
ผู้ช่วยวิจัย ในหน่วยงานต่าง ๆ เช่น กรมวิทยาศาสตร์
การแพทย์ กรมควบคุมโรค สถาบันมะเร็งแห่งชาติ
ศูนย์เทคโนโลยีด้านการแพทย์และสาธารณสุข สถาบัน
พยาธิวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข ศูนย์
วิทยาศาสตร์การแพทย์ และโรงพยาบาล เป็นต้น
2. ผู้ประกอบการด้านธุรกิจผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ การนำ
เข้าและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น ยา
สารเคมี ชุดตรวจ เครื่องมือ อุปกรณ์ทางการแพทย์
รวมทั้งผู้ประกอบการด้านการให้บริการทางสุขภาพ
3. ผู้บริหาร/พนักงานหน่วยงานภาคเอกชนด้านธุรกิจ
การแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการบริการตรวจวิเคราะห์
สารเคมี ยา เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้านการ
แพทย์



MEDICAL SCIENCE HCU





คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ (นานาชาติ)

มุ่งเน้นผลิตบัณฑิตให้มีความรู้และทักษะปฏิบัติงานจริงในการพัฒนานวัตกรรม
ออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทางด้านดูแลสุขภาพ
ผู้ป่วยหรือช่วยเหลือผู้สูงอายุในการใช้ชีวิต บุคลากรความรู้กับศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง
ทางวิศวกรรมปัญญาประดิษฐ์และวิทยาการคอมพิวเตอร์

โอกาสในการประกอบอาชีพ

1. นักวิทยาการหุ่นยนต์ที่มีศักยภาพในการออกแบบและควบคุมระบบกลไกการทำงาน ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในด้านสุขภาพ
2. ผู้ประกอบการด้านเทคโนโลยีทางด้านสุขภาพที่มี ความรู้ในกลไกหุ่นยนต์ดูแลสุขภาพ
3. นักเทคนิคด้านเครื่องมือและหุ่นยนต์ที่เกี่ยวข้องกับการดูแลสุขภาพ
4. ผู้จัดการเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์



DINSAW ROBOT FOR
ELDERLY ENTERTAINMENT
AND FACE-TO-FACE
CALLS [1]



ROBEAR-A ROBOTIC BEAR NURSE
TO LIFT PATIENTS IN JAPAN [2].

1. HURST, D. JAPAN LAYS GROUNDWORK FOR BOOM IN ROBOT CARERS. THE GUARDIAN.
2. QUANTIGENCE REPORT, ROBOTICS AND AI ASSIST IN CARING FOR THE ELDERLY. NANALYZE INT. J. ENVIRON. RES. PUBLIC HEALTH 2020, 17(11),381.



HEALTH ROBOTICS-SCI.HCU



คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

หลักสูตรที่เปิดสอน

1. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

Bachelor of Science Program in Artificial Intelligence

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

วท.บ. (ปัญญาประดิษฐ์)

Bachelor of Science (Artificial Intelligence)

B.Sc. (Artificial Intelligence)

2. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

Bachelor of Science Program in Computer Science

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

วท.บ. (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

Bachelor of Science (Computer Science)

B.S. (Computer Science)

3. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์

Bachelor of Science Program in Medical Science

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การแพทย์)

วท.บ. (วิทยาศาสตร์การแพทย์)

Bachelor of Science (Medical Science)

B.Sc. (Medical Science)

4. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ (นานาชาติ)

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต วิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ (หลักสูตรนานาชาติ)

Bachelor of Science Program in Health Robotics

(International Program)

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ)

วท.บ. (วิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ)

Bachelor of Science (Health Robotics)

B.Sc. (Health Robotics)

สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

เลขที่ 18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 ตำบลบางโจลง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

โทรศัพท์ 02-713-8100 ต่อ 1180, 1213

เว็บไซต์ : <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index>

Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University
18/18 Debaratana Road k.m. 18 Samutprakarn 10540 Thailand

Tel : +662-713-8100 ext. 1180, 1213

Website : <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index>



Contact