



การพัฒนาระบบนำทางที่ทนทานและการกู้คืนเส้นทางอัตโนมัติสำหรับหุ่นยนต์ทางการเกษตรด้วยการผสมผสานระบบ GNSS และ LiDAR: การศึกษาผ่านแบบจำลองสถานการณ์

Development of Robust Navigation and Automated Path Recovery System for Agricultural Robots Integrating GNSS and LiDAR: A Simulation Study

กายนกญจน์ จันทรวงศ์ไพศาล^{1*}, เจษฎา สายใจ¹

Department of Biosystems and Agricultural Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

*Corresponding author: E-mail: 67016008@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบนำทางที่มีความทนทาน (Robust Navigation System) สำหรับหุ่นยนต์ทางการเกษตรเพื่อแก้ปัญหาความท้าทายในการปฏิบัติงานภายใต้สภาพแวดล้อมแบบไร้โครงสร้าง ซึ่งมักประสบปัญหาสถานะชะงักงันจากการตัดสินใจของตัวควบคุมในพื้นที่ซับซ้อน ระบบที่พัฒนาขึ้นอาศัยการบูรณาการข้อมูลตำแหน่งจากดาวเทียม (GNSS) ร่วมกับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางผ่านแผนที่แสดงค่าน้ำหนักแบบพลวัต (Dynamic Local Costmap) ที่ประมวลผลจากเซนเซอร์ LiDAR พร้อมทั้งมีการนำเสนอระบบจัดการสถานะชะงักงันอัตโนมัติ (Automated Path Recovery System: APRS) ที่ออกแบบบนพื้นฐานของเครื่องจักรสถานะจำกัด (Finite State Machine: FSM) เพื่อทำหน้าที่เฝ้าระวังสถานะทางจลนศาสตร์เทียบกับคำสั่งควบคุม และสั่งการพฤติกรรมการกู้คืน (Recovery Behaviors) โดยอัตโนมัติเมื่อตรวจพบการหยุดนิ่งของหุ่นยนต์ ในส่วนของการทดสอบ ระบบดังกล่าวได้ถูกประเมินผลผ่านโปรแกรมจำลอง RViz บนระบบปฏิบัติการ ROS 2 Jazzy โดยใช้แบบจำลองสภาพแวดล้อมที่อ้างอิงจากภาพถ่ายดาวเทียมของแปลงเกษตรจริง ผลการศึกษาพบว่าระบบสามารถตรวจจับและแก้ไขสถานะติดขัดได้ด้วยตนเองอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับความเชื่อถือได้ (Reliability) ในการนำทางโดยอิสระ แต่ยังช่วยลดภาระในการเฝ้าระวังของผู้ใช้งานได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถปฏิบัติงานกิจต่อเนื่องได้อย่างราบรื่นในสภาพแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอนสูง

คำสำคัญ: หุ่นยนต์การเกษตร, แผนที่แสดงค่าน้ำหนักสิ่งกีดขวางแบบพลวัต, ตัวจัดการสถานะชะงักงัน, เครื่องจักรสถานะจำกัด

Abstract

This research presents the development of a Robust Navigation System for agricultural robots to address the challenges of operating in unstructured environments, where local planner decisions frequently lead to deadlock conditions in complex terrain. The developed system integrates Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning with obstacle avoidance through a Dynamic Local Costmap processed from LiDAR sensor data. Additionally, an Automated Path Recovery System (APRS) is introduced, designed on the basis of a Finite State Machine (FSM) to monitor kinematic states against control commands and automatically trigger recovery behaviors upon detection of robot stagnation. For evaluation, the system was tested in the RViz simulation environment running on the ROS 2 Jazzy platform, using environment models derived from satellite imagery of actual agricultural fields. The results demonstrate that the system can autonomously detect and resolve stuck conditions effectively, not only enhancing the reliability of autonomous navigation but also significantly reducing the monitoring burden on operators. This enables the robot to carry out missions continuously and seamlessly in highly uncertain environments.

Keywords: Agricultural Robot, Dynamic Local Costmap, Stagnation Manager, Finite State Machine

1 บทนำ

ประเทศไทยมีภาคการเกษตรเป็นรากฐานสำคัญที่ขับเคลื่อนทั้งระบบเศรษฐกิจและสังคมมาอย่างยาวนาน (Office of

Agricultural Economics, 2024) อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันภาคส่วนนี้กำลังเผชิญวิกฤตเชิงโครงสร้างจากการเข้าสู่สังคมสูงวัยและการลดลงของแรงงานภาคเกษตรอย่างมีนัยสำคัญ การเปลี่ยนผ่านสู่ยุคเกษตรอัจฉริยะด้วยการบูรณาการหุ่นยนต์และยานยนต์

อัตโนมัติ (AMR) จึงเป็นความจำเป็นเร่งด่วนในการยกระดับประสิทธิภาพโลจิสติกส์ในฟาร์มและรักษาขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (Lykas et al., 2024)

ความท้าทายหลักที่ทำให้การนำทางอัตโนมัติในพื้นที่เกษตรมีความซับซ้อนกว่าหุ่นยนต์ในโรงงานอุตสาหกรรม คือ สภาพแวดล้อมแบบไร้โครงสร้างที่มีความไม่แน่นอนสูง ทั้งลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและสิ่งกีดขวางแบบพลวัต เช่น กิ่งไม้หรือวัชพืชที่บดบังทัศนวิสัยของเซนเซอร์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มักทำให้ระบบนำทางแบบดั้งเดิมที่อาศัยเพียงแผนที่คงที่ล้มเหลวในการปฏิบัติงานจริง การพัฒนาระบบที่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมได้หลายมิติและตัดสินใจได้อย่างยืดหยุ่นจึงเป็นหัวใจสำคัญของงานวิจัยนี้ (Jiang et al., 2023; Santos et al., 2022)

ผู้วิจัยได้เลือกใช้ระบบปฏิบัติการ ROS 2 (Jazzy Jalisco) ในการพัฒนา โดยผสมผสานการทำงานของระบบดาวเทียม (GNSS) เพื่อระบุพิกัดตำแหน่งโลก ร่วมกับเซนเซอร์ LiDAR ความละเอียดสูงเพื่อสร้างแผนที่ค่าน้ำหนักสิ่งกีดขวางแบบเรียลไทม์ (Dynamic Local Costmap) (Zhu et al., 2024) สำหรับการวางแผนเส้นทาง ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Smac2D ร่วมกับตัวควบคุม MPPI (Model Predictive Path Integral) ที่มีความสามารถในการสุ่มวิถีการเคลื่อนที่เพื่อทำนายแนวโน้มในอนาคตภายใต้สถานะที่มีความเสี่ยงสูง ช่วยให้หุ่นยนต์รักษาระดับความเร็วและวงเลี้ยวที่เหมาะสมในพื้นที่จำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Ji et al., 2023)

แม้ว่า ROS 2 Navigation Stack (Macenski et al., 2022) จะเป็นระบบมาตรฐานที่มีประสิทธิภาพสูง แต่จากการศึกษาพบว่าเมื่อหุ่นยนต์เผชิญสิ่งกีดขวางที่ตรวจจับได้ยากหรือสภาวะล่อลวงจากสภาพพื้นผิว ระบบมักเข้าสู่สถานะหยุดนิ่ง (Stagnation) ซึ่งกลไกการกู้คืนพื้นฐานมักไม่เพียงพอและต้องพึ่งพาการแก้ไขจากมนุษย์ (Guarato et al., 2023) ผู้วิจัยจึงนำเสนอ ระบบจัดการสภาวะชะงักงันอัตโนมัติ (Automated Path Recovery System: APRS) โดยใช้โครงสร้างเครื่องจักรสถานะจำกัด (FSM) ทำหน้าที่เป็นโหนดเฝ้าระวังอิสระเพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนระหว่างคำสั่งควบคุมและสถานะการเคลื่อนที่จริง หากระบบตรวจพบความผิดปกติที่ขัดต่อภารกิจ จะเข้าแทรกแซงและสั่งการชุดพฤติกรรมการกู้คืนที่ออกแบบมาเฉพาะทางทันที เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถปฏิบัติการกิจต่อไปได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพิสูจน์หลักการผ่านการจำลองสถานการณ์เชิงฟิสิกส์บนโปรแกรม RViz โดยจำลองแรงเสียดทานของดินและสัญญาณรบกวนเซนเซอร์ให้ใกล้เคียงกับสภาพพื้นที่จริงของแปลงเกษตรสาธิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบชีวภาพ และเกษตร สจล. มากที่สุด ข้อมูลจากการทดลองจะเป็นพื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์สมรรถนะและความทนทานของระบบ ก่อนที่จะนำไปต่อยอดในการพัฒนาฮาร์ดแวร์จริงเพื่อใช้งานในระดับอุตสาหกรรมเกษตรอัจฉริยะต่อไป

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 สถาปัตยกรรมระบบและแบบจำลองหุ่นยนต์สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์การวางแผนเส้นทาง

เพื่อให้การควบคุมการเคลื่อนที่มีความถูกต้องตามหลักกายภาพ ผู้วิจัยกำหนดให้หุ่นยนต์มีคุณสมบัติทางจลนศาสตร์แบบขับเคลื่อนส่วนต่าง (Differential Drive) ซึ่งเคลื่อนที่รอบจุดหมุนชั่วขณะ (ICC) ดังแสดงใน Figure 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (ω) และความเร็วเชิงเส้น (v) กับความเร็วของล้อขวา (v_r) และล้อซ้าย (v_l) เป็นไปตามสมการที่ (1) และ (2)

$$\omega \left(R + \frac{L}{2} \right) = v_r \quad (1)$$

$$\omega \left(R + \frac{L}{2} \right) = v_l \quad (2)$$

โดยที่ L คือระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางล้อทั้งสอง (Wheelbase) สมการนี้ถูกใช้เป็นข้อจำกัดพื้นฐาน (Kinematic Constraints) ภายในตัวควบคุมมอเตอร์เพื่อให้การจำลองสอดคล้องกับฮาร์ดแวร์ต้นแบบ

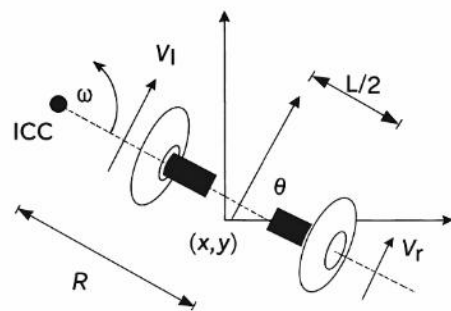


Figure 1 Kinematic model of a differential drive robot executing a turn around the Instantaneous Center of Curvature (ICC).

การพัฒนาระบบดำเนินการบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu 24.04 LTS โดยใช้ ROS 2 (Jazzy Jalisco) เป็นมิดเดิลแวร์หลักในการสื่อสารระหว่างกระบวนการ และจำลองสภาพแวดล้อมทางกายภาพผ่านซอฟต์แวร์ Gazebo (Harmonic) ภายในระบบจำลองประกอบด้วยหุ่นยนต์ตีนตะขาบ (Tracked Vehicle) ที่ติดตั้งเซนเซอร์ LiDAR สำหรับสร้างแผนที่ 2 มิติ และ IMU สำหรับวัดความเร่งและทิศทางเพื่อช่วยระบุตำแหน่งร่วมกับข้อมูลระยะทางจากล้อ (Odometry)

Farm Robot System Architecture

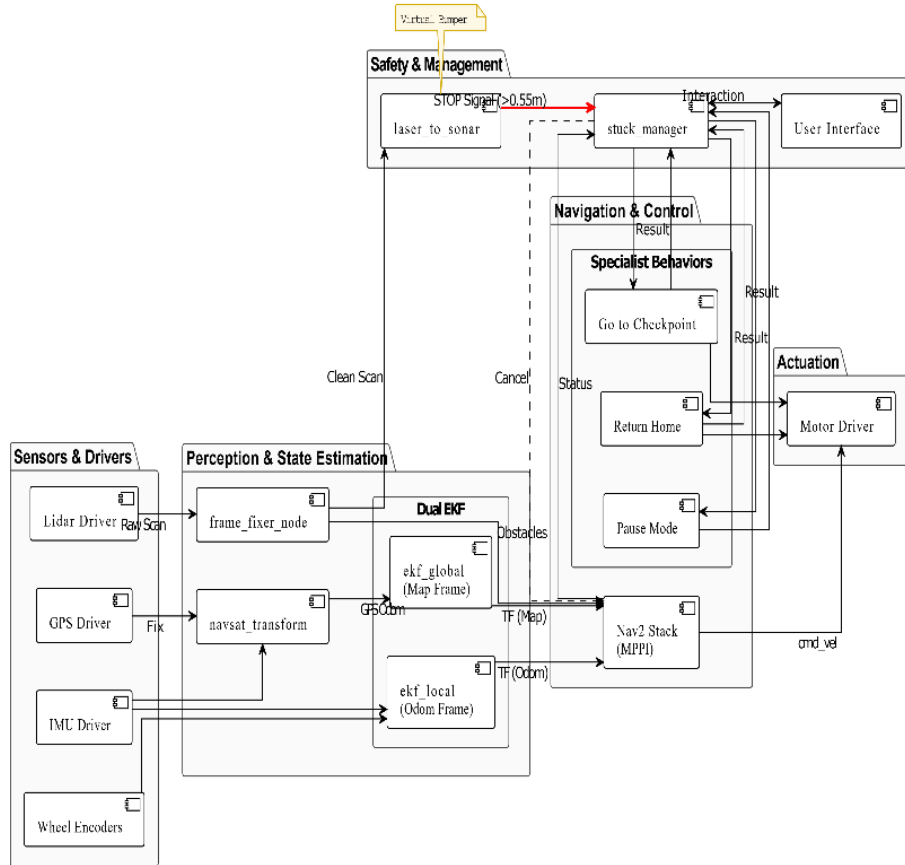


Figure 2 System block diagram

2.2 อัลกอริทึมการนำทางและการจัดการสถานะชะงักงัน

เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้โดยมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ผู้วิจัยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการสร้าง “Costmap” ซึ่งทำหน้าที่จำลองพื้นที่รอบตัวหุ่นยนต์ในรูปแบบตารางกริด (Occupancy Grid) โดยแต่ละช่องตารางจะถูกระบุค่าตัวเลขที่เรียกว่า “ค่าน้ำหนัก (Cost)” เพื่อแสดงถึงระดับความเสี่ยงในการเคลื่อนที่ และมีการสร้างพื้นที่กันชน (Inflation Layer) รอบสิ่งกีดขวาง เพื่อให้หุ่นยนต์รักษาระยะห่างที่ปลอดภัยสำหรับการวางแผนเส้นทางระยะไกล (Global Planning) ระบบใช้ Smac2D ซึ่งประยุกต์ใช้การค้นหาค่ากราฟแบบ A* รวมกับการคำนึงถึงความราบเรียบและขีดจำกัดทางจลนศาสตร์ (Kinematic Constraints) เพื่อสร้างเส้นทางที่ราบเรียบและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิม (NavFn ร่วมกับ RPP)

สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ระยะใกล้ (Local Planner) ระบบใช้อัลกอริทึม MPPI (Model Predictive Path Integral) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบทำนายอนาคตที่ทำงานโดยการสุ่มสร้างวิถีการเคลื่อนที่จำนวนมาก (Trajectories) และเลือกค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของเส้นทางที่ดีที่สุด (u_t^*) มาเป็นคำสั่งควบคุม ดังสมการที่ (3)

$$u_t^* = u_t + \frac{\sum_{k=1}^K w_k \cdot \epsilon_k}{\sum_{k=1}^K w_k} \quad (3)$$

โดย u_t คือค่าเฉลี่ยเริ่มต้น ϵ_k คือสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม และ w_k คือ ค่าน้ำหนักความสำคัญของเส้นทางจำลองแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งประเมินจาก $w_k \propto \exp(-\frac{1}{\lambda} S_k)$ โดยที่ S_k คือต้นทุนรวม (Total Cost) ที่ได้จากการสะสมค่าจาก Local Costmap ตลอดแนวเส้นทางจำลองที่ k กระบวนการนี้ช่วยให้หุ่นยนต์ให้น้ำหนักกับเส้นทางที่มีความเสี่ยงต่ำที่สุด กระบวนการนี้ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถรับมือกับพลวัตที่ซับซ้อนและลดการสั่นไหวในการเคลื่อนที่

ผู้วิจัยได้ออกแบบสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ให้มีลำดับการประมวลผลข้อมูล (Data Processing Pipeline) โดยเริ่มจากการรับข้อมูลดิบจากเซนเซอร์เข้าสู่กระบวนการระบุตำแหน่ง (Localization) และส่งต่อไปยังชุดคำสั่งการนำทาง (Nav2 Stack) เพื่อคำนวณความเร็วที่เหมาะสม ดังแสดงใน Figure 2 อย่างไรก็ตาม โดยพื้นฐานของ Nav2 เมื่อหุ่นยนต์เผชิญกับสถานะติดขัดหรือทำนายเส้นทางล้มเหลว ระบบจะพึ่งพาหน่วยควบคุมพฤติกรรมมาตรฐาน (Default Recovery Behaviors) เช่น การหมุนตัว (Spin) หรือการถอยหลัง (Back up) ซึ่งในสภาพแวดล้อมแบบไร้โครงสร้างหรือพื้นที่แปลงเกษตรที่มีความซับซ้อนสูง กลไกพื้นฐานเหล่านี้มักไม่เพียงพอต่อการแก้ไขปัญหา และอาจส่งผลให้หุ่นยนต์หยุดนิ่งถาวรหรือเกิดการคำนวณซ้ำโดยไม่สามารถ

เคลื่อนที่ต่อไปได้ (Stagnation) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้พัฒนา ระบบจัดการสภาวะชะงักงันอัตโนมัติ (Automated Path Recovery System: APRS) ขึ้นมาทำงานขนานไปกับระบบนำทางหลัก โดย APRS ทำหน้าที่เป็นโหนดตรวจสอบและแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าภายใต้โครงสร้างเครื่องจักรสถานะจำกัด (Finite State Machine: FSM) เพื่อเฝ้าระวังสภาวะทางจลนศาสตร์เทียบกับคำสั่งควบคุม เมื่อตรวจพบเงื่อนไขการหยุดนิ่งที่ผิดปกติ ระบบจะเข้าแทรกแซงเพื่อสั่งการพฤติกรรมการกู้คืน (Recovery Behaviors) ตามลำดับความเหมาะสมที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงกระบวนการทำงานใน Figure 3

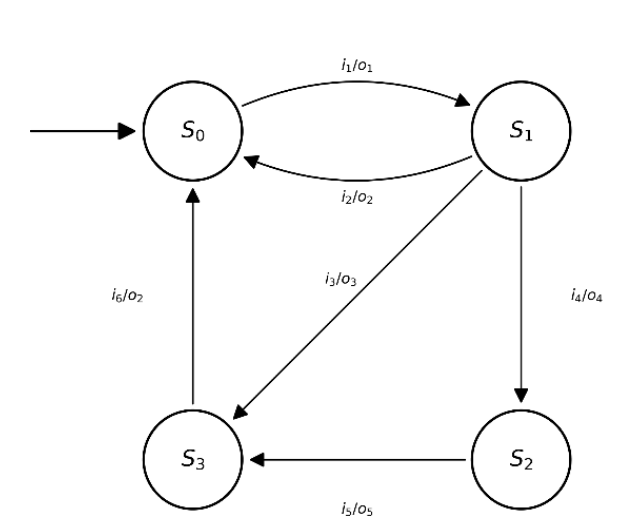


Figure 3 Functional block diagram illustrating the operation of the Stuck Manager Node based on a Finite State Machine (FSM) architecture.

Table 1 Variable in Finite State Machine.

Variable	Mean
S₀	สถานะปกติ ระบบเฝ้าระวังเซนเซอร์และสถานะการนำทาง
S₁	สถานะรอการตัดสินใจ ระบบแสดง UI Popup และรอ Input จากผู้ใช้
S₂	Canceling
S₃	สถานะกำลังยกเลิกงานเก่า รอ Service ตอบกลับ (Asynchronous Wait)
i₁	ได้รับสัญญาณหยุดจาก Sonar หรือ Nav2 Status เป็น ABORTED
i₂	ผู้ใช้กดปิดหน้าต่าง UI หรือเลือก “Cancel”
i₃	ผู้ใช้เลือกโหมดหยุดรอ (Wait)
i₄	ผู้ใช้เลือกโหมดเคลื่อนที่ (Go Home หรือ Go Checkpoint)
i₅	ได้รับ Callback ยืนยันว่า Nav2 ยกเลิก Goal เดิมเสร็จสมบูรณ์

Variable	Mean
i₆	ได้รับ Feedback ผลลัพธ์จาก Specialist (Result Topic)
O₁	Publish Topic /request_ui_popup เพื่อเรียกหน้าต่างคำสั่ง
O₂	รีเซ็ตค่าตัวแปร is_ui_active และ is_ignoring_sonar เป็น False
O₃	Publish คำสั่งเริ่มโหมดหยุด (/pause_mode/command)
O₄	ส่ง Request ไปยัง Service /cancel_goal ของ Nav2
O₅	Publish คำสั่งเริ่มโหมดเคลื่อนที่ (/return_to_home หรือ /go_checkpoint)

2.3 การสร้างแผนที่อ้างอิงจากภาพถ่ายดาวเทียม

ในการพัฒนาระบบนำทางสำหรับพื้นที่เกษตรกรรม ผู้วิจัยได้เลือกใช้ภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงในการสร้างแผนที่ความน่าจะเป็นของสิ่งกีดขวาง (Occupancy Grid Map) เพื่อใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำหรับกำหนดพิกัดโลก (Global Reference) และ พิกัดอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ให้แก่ระบบ GNSS แผนที่อ้างอิงนี้จะช่วยให้หุ่นยนต์สามารถวางแผนเส้นทางระยะไกลโดยคำนึงถึงขอบเขตพื้นที่และสิ่งกีดขวางที่คงที่ได้ อย่างแม่นยำ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1.ทำการบันทึกภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ทดลองบริเวณแปลงเกษตรสาธิตภาควิศวกรรมเกษตรสจล. ผ่านฐานข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Google Maps ดังที่แสดงใน Figure 4



Figure 4 Satellite imagery of the experimental site acquired from Google Maps, showing the physical boundaries and obstacles of the environment.

2. การประมวลผลภาพ (Image Processing) นำภาพที่ได้มาปรับแต่งด้วยโปรแกรม GNU Image Manipulation Program (GIMP) โดยทำการแปลงภาพสีเป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale) และปรับค่าความเข้มของแสง (Thresholding) เพื่อสร้างแผนที่แบบ Occupancy Grid Map โดยกำหนดให้ พื้นที่สีขาว (White region) แทนพื้นที่ว่าง (Free Space) ที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้, พื้นที่สีดำ (Black region) แทนสิ่งกีดขวาง (Obstacles) เช่น ต้นไม้ หรือขอบแปลง และ พื้นที่สีเทา (Gray region) แทนพื้นที่ที่ไม่ทราบสถานะ (Unknown Space) Figure 5

2.4 การจำลองระบบรับรู้และการกำหนดค่าเซนเซอร์

เพื่อให้แผนที่ความน่าจะเป็นของสิ่งกีดขวาง (Occupancy Grid Map) ที่สร้างขึ้นจากภาพถ่ายดาวเทียม (ดังแสดงใน Figure 4) มีความสอดคล้องกับพิกัดจริงบนพื้นโลก ผู้วิจัยได้กำหนดจุดกำเนิด (Origin) ของโลกจำลองใน Gazebo ให้ตรงกับค่าละติจูดและลองจิจูดของพื้นที่แปลงเกษตรสาธิตจริง กระบวนการเริ่มต้นจากการใช้ปลั๊กอิน libgazebo_ros_gps_sensor เพื่อจำลองการรับสัญญาณจากดาวเทียม (GNSS) ซึ่งจะส่งข้อมูลในรูปแบบพิกัดภูมิศาสตร์ (WGS84) ข้อมูลพิกัดนี้จะถูกส่งต่อไปยังโหนด navsat_transform_node เพื่อทำหน้าที่คำนวณและแปลงพิกัดจากรูปแบบละติจูด/ลองจิจูด ให้กลายเป็นพิกัดคาร์ทีเซียน (X, Y)



Figure 5 Image processing workflow using GNU Image Manipulation Program (GIMP) to convert the satellite imagery into a grayscale format for map generation.

ในหน่วย “m” โดยอิงตามเข็มทิศพิกัดโลก (UTM) กระบวนการนี้ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งตัวเองบนแผนที่ฐานได้อย่างแม่นยำ และทำให้พิกัดเป้าหมายทั้ง 8 จุด (Waypoints) ในระบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการทดสอบในสถานที่จริง ดังแสดงโครงสร้างสภาพแวดล้อมจำลองใน Figure 6

ในส่วน of ระบบความปลอดภัยและการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ผู้วิจัยได้ติดตั้งเซนเซอร์ LiDAR จำลองผ่านปลั๊กอิน libgazebo_ros_ray_sensor โดยกำหนดขอบเขตการตรวจจับรอบทิศทาง 360 องศา ข้อมูลที่ได้รับจะอยู่ในรูปแบบกลุ่มจุดสามมิติ (Point Cloud) ซึ่งจะถูกส่งเข้าสู่หน่วยประมวลผล Local Costmap ของชุดคำสั่ง Nav2 Stack ซึ่งหน้าที่หลักของเซนเซอร์ LiDAR ในสถาปัตยกรรมนี้คือการตรวจจับสิ่งกีดขวางที่ “ไม่ได้ระบุไว้ในแผนที่ภาพถ่ายดาวเทียม” (Unmapped Obstacles) หรือสิ่งกีดขวางแบบพลวัตที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ข้อมูลสิ่งกีดขวางแบบเรียลไทม์จะถูกส่งต่อไปยังตัวควบคุม MPPI เพื่อใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนัก (Cost) ของวิถีการเคลื่อนที่จำนวนมาก ระบบจะทำการคัดเลือกเส้นทางที่มีค่าน้ำหนักต่ำที่สุด (ปลอดภัยที่สุด) เพื่อส่งการหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่หลบหลีกอุปสรรคได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้นในสถานะที่ทัศนวิสัยจำกัด

2.5 การออกแบบการทดลอง

การทดลองนี้เปรียบเทียบสมรรถนะการนำทาง 6 รูปแบบ โดยเน้นวิธีที่น่าเสนอคือ Smac2D ร่วมกับ MPPI* เทียบกับอีก 5

รูปแบบ ได้แก่ NavFn ร่วมกับ RPP, NavFn ร่วมกับ DWB, NavFn ร่วมกับ MPPI, Smac2D ร่วมกับ DWB, และ Smac2D ร่วมกับ RPP

เพื่อศึกษาผลกระทบของการจับคู่ระหว่างตัววางแผนและตัวควบคุมที่แตกต่างกันเพื่อให้การเปรียบเทียบผลลัพธ์มีความยุติธรรมและสะท้อนประสิทธิภาพของอัลกอริทึมอย่างแท้จริง ผู้วิจัยได้กำหนดตัวแปรควบคุม (Control Variables) และวิธีการควบคุมตัวแปรดังนี้

1. ข้อจำกัดทางจลนศาสตร์ (Kinematic Constraints) กำหนดให้ทุกรูปแบบการนำทางมีความเร็วเชิงเส้นสูงสุด (v_{max}) เท่ากับ 1.0 m s^{-1} และความเร็วเชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) เท่ากับ 2.0 rad s^{-1} เพื่อควบคุมสมรรถนะพื้นฐานของหุ่นยนต์ให้เท่าเทียมกัน

2. สภาพแวดล้อมและขั้นตอนการทดลอง (Environment & Procedure) ดำเนินการทดสอบในแผนที่จำลองแบบคงที่ (Static Map) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งสิ่งกีดขวาง จุดเริ่มต้นหรือจุดเป้าหมายทั้ง 8 จุด ดังแสดงใน Figure 6 ในแต่ละชุดการทดลอง หุ่นยนต์จะถูกสั่งการให้เคลื่อนที่ไปยังแต่ละจุดเป้าหมายซ้ำกัน 3 ครั้ง เพื่อรวบรวมข้อมูลทางสถิติ



Figure 6 Simulation in RViz environment layout illustrating the configuration of static obstacles and the eight designated target waypoints used in the experimental

3 ผลและวิจารณ์

3.1 สมรรถนะการนำทาง

การเปรียบเทียบชุดคำสั่งการนำทางทั้ง 6 รูปแบบ โดยมุ่งเน้นที่ความสามารถในการเข้าถึงจุดเป้าหมาย (Waypoints) ทั้ง 5 จุด ด้วยความเร็วเชิงเส้น 1 m s^{-1} ที่แสดงใน Figure 7 และ Table 2 พบว่า จากการเปรียบเทียบสมรรถนะการนำทางพบว่ารูปแบบ Smac2D ร่วมกับ MPPI ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยมีความเร็วเฉลี่ย 0.99 m s^{-1} ซึ่งเร็วกว่าวิธี NavFn ร่วมกับ RPP ความเหนือกว่านี้มีสาเหตุหลักมาจากคุณสมบัติของอัลกอริทึม Smac2D ที่วางแผนเส้นทางโดยคำนึงถึงความราบเรียบและข้อจำกัดทางจลนศาสตร์ (Kinematic Constraints) ของหุ่นยนต์ดินตะขาบได้ดีกว่าวิธี NavFn แบบตารางกริดดั้งเดิม และตัวควบคุม MPPI สามารถทำนายเส้นทางในอนาคตด้วยและการสุ่มวิถีการเคลื่อนที่จำนวนมาก ทำให้สามารถประเมินต้นทุนความเสี่ยงจาก Costmap ได้ครอบคลุมกว่าตัวควบคุมแบบ Reactive เช่น DWB หรือ RPP ที่มักจะลดความเร็วลงมากเกินไป (Conservative) เมื่อเข้าใกล้สิ่งกีดขวาง แนวทางการทำงานดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Macenski et al. (2020) ที่ระบุว่า การผสมผสานตัววางแผนที่คำนึงถึงข้อจำกัดทางกายภาพของหุ่นยนต์ (Kinematic Constraints) ร่วมกับตัวควบคุมแบบทำนายอนาคต (Predictive Controller) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการนำทางในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบตอบสนองทั่วไป มักเผชิญปัญหาเรื่องการลดความเร็วมากเกินไปเมื่อเจอเส้นทางคดเคี้ยวหรือพื้นที่จำกัด

Table 2 Summary of the six navigation stack configurations used in the comparative experiments.
Note: Values followed by different letters in the same column are significantly different. ($P < 0.05$) according to Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

Planner	Time (sec)	Distance (m)	Velocity (m s^{-1})
Smac2D+MPPI	213.68 ^e	213.61	0.99 ^a
Smac2D+DWB	289.14 ^c	213.61	0.74 ^c
Smac2D+RPP	397.16 ^b	213.66	0.54 ^d
NavFn+MPPI	254.01 ^d	213.47	0.84 ^b
NavFn+DWB	379.99 ^b	213.63	0.56 ^d
NavFn+RPP	499.86 ^a	213.69	0.43 ^e

3.2 ผลการทดสอบระบบจัดการสถานะชะงักงันอัตโนมัติ (Automated Path Recovery System: APRS)

การทดสอบ APRS พบว่าสามารถตรวจจับอุปสรรคและเข้าสู่สถานะกู้คืนได้อย่างแม่นยำ การพัฒนาระบบแยกส่วน (Independent Monitoring Module) เช่นนี้สอดคล้องกับ

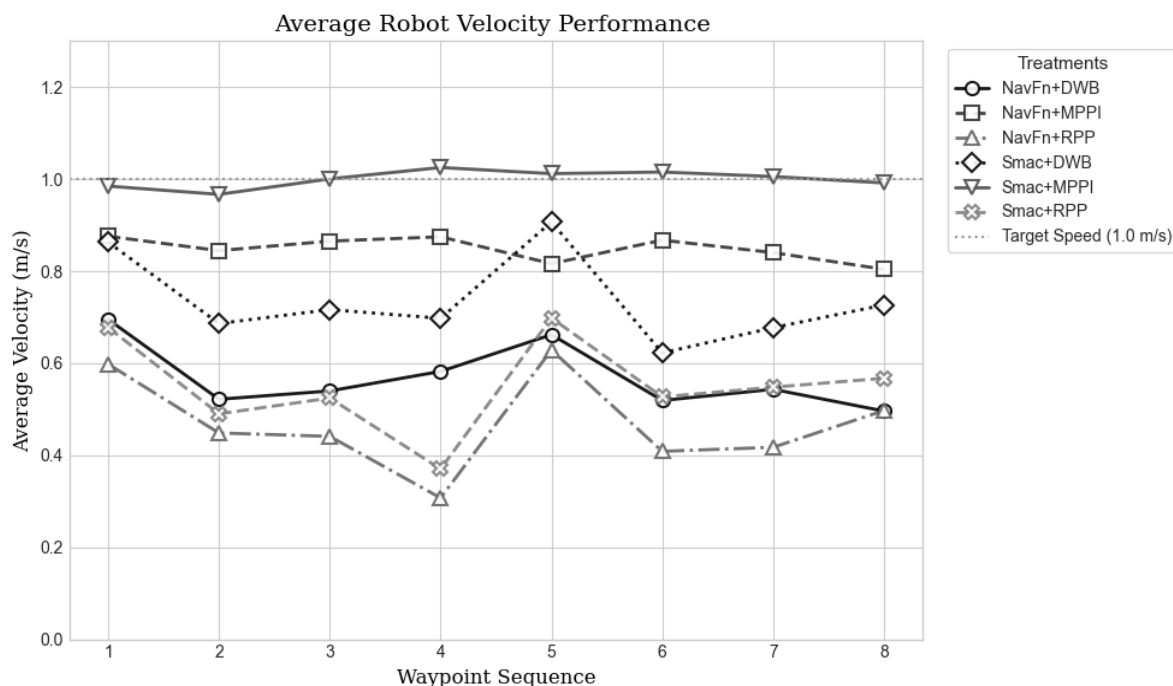


Figure 7 Comparative analysis of navigation performance metrics among six configurations.

แนวคิดของ Guarato et al. (2023) และ Lu et al. (2021) ที่เสนอว่าการพึ่งพาเพียงกลไกการกู้คืนพื้นฐานของระบบนำทาง (Standard Nav2 Recovery) อาจไม่เพียงพอต่อการปฏิบัติงานในพื้นที่เกษตรที่มีความไม่แน่นอนสูง การเสริมด้วยระบบจัดการสถานะชะงักงันที่ออกแบบมาเฉพาะ (Customized Recovery System) จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยยกระดับความน่าเชื่อถือ (Reliability) และลดอัตราการล้มเหลวถาวร (Fatal Failure) ของหุ่นยนต์ขณะปฏิบัติงานจริง โดยเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบอุปสรรคหรือสิ่งกีดขวางอย่างกะทันหันในระยะ 50 cm หุ่นยนต์จะหยุดทำการเคลื่อนที่เป็นเวลา 10 sec ซึ่งผู้ใช้งานสามารถดู

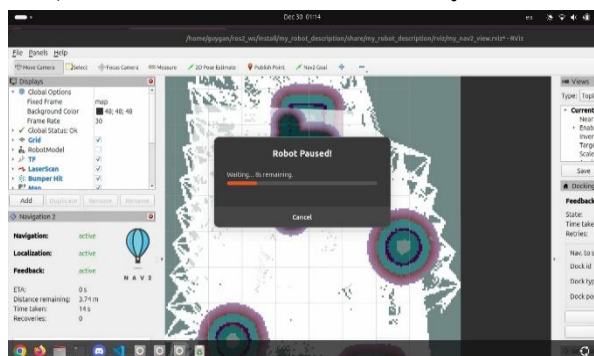


Figure 8 User interface displaying the countdown timer during the robot situation assessment pause.

4. สรุป

จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาประสิทธิภาพการนำทางหุ่นยนต์เกษตรด้วยการผสานแนวคิด Smac2D ร่วมกับ Model

เวลาได้จาก UI countdown alert ดังที่แสดงใน Figure 8 จากนั้นจะมีตัวเลือกสำหรับผู้ใช้งานให้ตัดสินใจทั้งหมด 3 ตัวเลือก ได้แก่ 1. Return to Checkpoint 2. Wait และ 3. Return to HOME ซึ่งผลของ: APRS เป็นดัง Figure 9-11

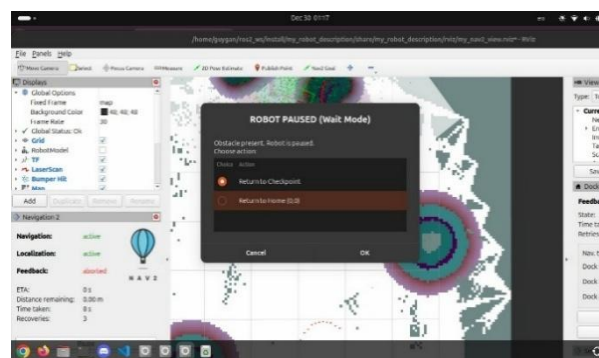


Figure 9 Interface for selecting a recovery action during a navigation stagnation

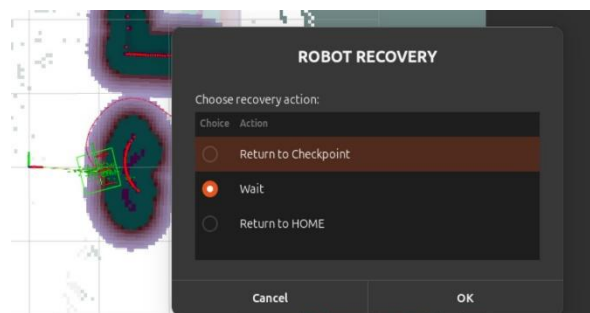


Figure 10 User interface during the "Wait" recovery operation.

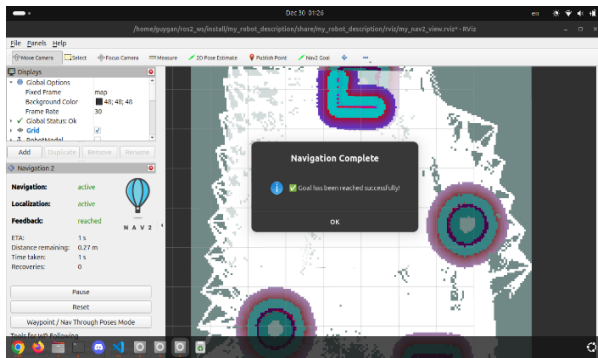


Figure 11 User interface displaying the navigation success status.

Predictive Path Integral (MPPI) และระบบกู้คืนสถานะอัตโนมัติ สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพการนำทางการทดสอบเปรียบเทียบชุดอัลกอริทึมทั้ง 6 รูปแบบ พบว่าการใช้ Smac2D ร่วมกับ MPPI เป็นวิธีการที่มีสมรรถนะดีที่สุด โดยสามารถนำทางผ่านจุดหมาย (Waypoints) ได้สำเร็จครบ 100% และรักษาระดับความเร็ว

เฉลี่ยได้แม่นยำที่สุดที่ $0.99 \pm 0.01 \text{ m s}^{-1}$ ผลการทดสอบทางสถิติ (One-way ANOVA) และ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ยืนยันว่าชุดคำสั่งที่นำเสนอมีความแตกต่างด้านเวลาและความเร็วอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) เมื่อเทียบกับวิธีการมาตรฐานอื่น แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพในการควบคุมที่เหนือกว่าในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

2. ระบบจัดการสถานะชะงักงันอัตโนมัติ (APRS) ระบบ Automated Path Recovery System (APRS) ที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับและตอบสนองต่อสถานะชะงักงันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีกระบวนการประเมินสถานการณ์ (Situation Assessment) ผ่านการหยุดรอ 10 sec เพื่อวิเคราะห์สิ่งกีดขวางที่เกิดขึ้นกะทันหัน ระบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (UI) ที่พัฒนาขึ้นช่วยให้สามารถตัดสินใจเลือกรูปแบบการกู้คืนเส้นทางได้ 3 รูปแบบ (Return to Checkpoint, Wait, และ Return to HOME) ซึ่งช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงาน

3. บทสรุปภาพรวมอัลกอริทึมพิสูจน์ให้เห็นว่า การเลือกใช้ Global Planner ที่มีความละเอียดสูงร่วมกับ Controller ที่มีความสามารถในการทำนายผลลัพธ์ล่วงหน้า (Predictive Control) และเสริมด้วยระบบจัดการสถานะชะงักงัน (Recovery System) เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติในพื้นที่เกษตรกรรม ช่วยให้หุ่นยนต์มีความปลอดภัย (Safety) และความน่าเชื่อถือ (Reliability) ในการทำงานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากภาควิชาวิศวกรรมระบบชีวภาพและเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และงบประมาณสำหรับการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Guarato, P., Gava, L., Nardi, F., Giallanza, A. 2023. Robust Navigation and Recovery Strategies for Field Robots in Complex Agricultural Scenarios. *Journal of Field Robotics* 40(5), 1120-1135.
- Ji, W., Pan, Y., & Pan, Hu. (2023). Model Predictive Path Integral Control for Autonomous Navigation in Unstructured Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8(2), 742-749. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3228381>
- Jiang, S., et al. 2023. Multimodal Perception and Navigation for Agricultural Robots: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture* 210, 107932.
- Lu, H., Shao, M., Gao, Y., Yang, L., Guan, Y., Zhan, S. 2021. Research on an Autonomous Navigation Method for Agricultural Robots in Unstructured Environments. *Agriculture* 11(10), 912.
- Lykas, G., et al. 2024. Autonomous Logistics in Agriculture: Trends and Challenges. *Agronomy* 14(1), 115.
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., Woodall, W. 2022. The Robot Operating System: SLC Edition. *Science Robotics* 7(66), eabm6074.
- Macenski, S., Moore, T., Nguyen, D.V., Coleman, D. 2020. From the Marathon 2: A Navigation 2 Analysis. *Proceedings of the 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3118-3125.
- Office of Agricultural Economics. 2024. Agricultural Statistics of Thailand 2023. Ministry of Agriculture and Cooperatives.
- Santos, L.C., et al. 2022. Navigation and Obstacle Avoidance in Unstructured Agricultural Environments. *Sensors* 22(14), 5241.
- Zhu, Y., et al. 2024. Dynamic Costmap Generation for Autonomous Robots in Dense Agricultural Fields. *Remote Sensing* 16(3), 482.



การศึกษาและพัฒนาเครื่องผ่าต้นกกสำหรับผลิตภัณฑ์จักสาน

A study and development of a cyperus splitting machine for woven products

นิรติศักดิ์ คงทน^{1*}, พีรภัทร สุขคำ¹, และมณฑิรา กิจสัมพันธ์วงศ์²Nirattisak Khongthon^{1*}, Peerapat Sukham¹, Monthira Kitsamphanwong²¹สาขาเครื่องจักรกลเกษตร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, จังหวัดสุรินทร์, 32000²สาขาการบัญชี คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, จังหวัดสุรินทร์, 32000¹Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin, 32000²Department of Accounting, Faculty of Management Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Surin, 32000*Corresponding author: Tel: +66-8-3874-9255, E-mail: nirattisak.kh@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องผ่าต้นกก เครื่องผ่าต้นกกที่พัฒนาขึ้นมีส่วนประกอบหลักได้แก่ โครงเครื่อง ถาดรองต้นกก ชุดควบคุมการทำงาน ชุดใบมีด ชุดลูกกลิ้ง ถาดรับเส้นกก โดยใช้ต้นกก้างจากมอเตอร์กระแสตรง 12V ส่งกำลังผ่านเฟืองโซ่ ทำการศึกษาจำนวนใบมีด 4 ระดับใบมีด ได้แก่ 1, 2, 4 และ 6 ใบมีด มีตัวชี้วัดคือ ความสามารถในการทำงาน ประสิทธิภาพในการทำงาน เปอร์เซ็นต์สูญเสียและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องผ่าต้นกก พบว่า จุดที่เหมาะสมคือ การใช้ใบมีดผ่าต้นกก 1 ใบมีด ได้ความสามารถในการทำงานสูงโดยมีค่าเฉลี่ย 522.62 ± 38.12 reeds h^{-1} มีประสิทธิภาพการผ่าค่อนข้างสูงโดยมีค่าเฉลี่ย $95.00 \pm 5\%$ มีเปอร์เซ็นต์สูญเสียต่ำเฉลี่ยที่ $5.00 \pm 5\%$ และมีการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดโดยเฉลี่ยที่ 95.99 ± 13.49 W ตามลำดับ

คำสำคัญ: ต้นกก, เครื่องผ่าต้นกก, ผลิตภัณฑ์จักสาน

Abstract

The objective of this research was to investigate and evaluate the performance of a cyperus splitting machine. The component of this machine consists of the machine frame, reed tray, control unit, blade unit, roller, and reed fiber collection tray. It is powered by a 12V DC motor transmitted via a chain gear. Four levels of splitting blades (1, 2, 4, and 6 blades) were studied. The performance indicators included working capacity, splitting efficiency, percentage of loss, and power consumption. Performance testing of the cyperus splitting machine revealed that the optimal setting was using a single blade, achieving a high working efficiency of 522.62 ± 38.12 reeds h^{-1} , high splitting efficiency of $95.00 \pm 5\%$, low loss of $5.00 \pm 5\%$, and minimal power consumption of 95.99 ± 13.49 W respective.

Keywords: Cyperus, Cyperus splitting machine, Woven products

1 บทนำ

ต้นกก มีชื่อวิทยาศาสตร์ : *Cyperus corymbosus* Rottb มักเจริญเติบโตบริเวณที่มีความชื้นสูงหรือบริเวณที่มีน้ำท่วมขัง กกมีหลายชนิดและหลายสายพันธุ์ พบได้แถวอเมริกาเขตร้อน แอฟริกา มาดากัสการ์ อินเดีย ศรีลังกา ภูมิภาคอินโดจีน และออสเตรเลียตอนบน ส่วนในประเทศไทยได้มีการสำรวจ พบว่า มี กกกระจายอยู่ตามภาคต่างๆ ประเทศไทยปลูกเพื่อใช้ทอเสื่อคุณภาพสูง และสานตะกร้า (นพพล และคณะ, 2559) ต้นกกได้ถูกนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปทั้งของใช้ ของตกแต่งภายในบ้าน เช่น เสื่อ หมอน กระเป๋า และอื่นๆ สามารถสร้าง

รายได้ให้คนในชุมชนมากขึ้น (วรารณ, 2556) การตัดต้นกกเพื่อทำผลิตภัณฑ์จักสานจะตัดเมื่ออายุประมาณ 3-4 เดือนเพื่อรอการจักกก (นพพล และคณะ, 2559)

การจักกกหรือการผ่าต้นกกมักจะใช้กกดเนื่องจากกกสดจะจักง่ายได้เส้นกกที่มีคุณภาพ (สามารถผ่าได้เส้นยาวต่อเนื่องไม่หักหรือขาดง่าย ซึ่งต่างจากการผ่าเส้นกกแห้งจะมีความเปราะและแตกหักง่าย) การผ่ากกมีขั้นตอนโดยเลือกต้นกกที่มีขนาดเท่ากัน มาผ่าเป็นเส้นเล็กๆ โดยใช้มีดปลายแหลมคม ขนาดของเส้นกกขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งาน ซึ่งยังไม่มีเกณฑ์ในการกำหนดขนาดที่ชัดเจน โดยเกษตรกรจะทำการผ่าครั้งต้นกกหากต้องการเส้นขนาดใหญ่เพื่อนำไปทอเป็นเสื่อรองนั่ง และผ่าเป็นเส้นขนาด

เล็กลงหากต้องการนำไปทอเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการ ลวดลายที่มีความละเอียด โดยต้นกก 1 ต้น จะผ่าเป็นเส้นได้ ประมาณ 6 เส้น จากนั้นนำเส้นกกที่ผ่าแล้วมาผึ่งแดดให้แห้ง ประมาณ 1 สัปดาห์ (หรือจนกว่าเส้นกกจะแห้ง) เมื่อเห็นว่ากก แห้งดีแล้วก็เก็บมัดรวมกันไว้เป็นมัดเพื่อความสะดวกในการทอ เสื่อ เส้นกกที่เตรียมไว้หากต้องการเสื่อมีลวดลายสวยงาม ต้องมีการย้อมสีต่างๆ หลังจากการย้อมสีแล้วจะนำเส้นกกผึ่งแดดอีกครั้งจนแห้งสนิทแล้วสามารถนำมาทอเสื่อเป็นผืนได้ (สุทธิตา, 2559) วิธีการผ่ากกเป็นขั้นตอนสำคัญ โดยเกษตรกรจะทำการผ่า กกโดยใช้มีดจกต้นกกให้เป็นเส้น ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์ หากขาดความเชี่ยวชาญจะทำให้ต้นกกขาดและมีความยาวไม่เท่ากัน ผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุ การปฏิบัติงานอาจมีข้อจำกัด เช่น เกิดความเมื่อยล้าจากการทำงาน ใช้เวลาในการปฏิบัติงาน มาก และอาจเกิดอันตรายจากการใช้มีดผ่าเส้นกก ซึ่งจะส่งผลต่อ กำลังการผลิตเพื่อให้ทันต่อความต้องการ จึงมีการสร้างเครื่องจักร ช่วยในการทำงานบางขั้นตอน เช่น เครื่องผ่าต้นกก เพื่อให้ได้เส้น กกตามขนาดที่ต้องการและได้ปริมาณเพียงพอต่อการทำไปแปรรู ปเป็นผลิตภัณฑ์จักสาน เป็นแนวทางช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนแรงงาน ลดความเมื่อยล้าจากการผ่าต้นกก ได้ต้นกกที่มี ขนาดหลากหลายและเพียงพอต่อความต้องการ แต่เครื่อง ดังกล่าวยังมีปัญหาในการทำงาน ขั้นตอนการป้อนเส้นกก ผู้ปฏิบัติงานต้องถือต้นกกไว้และป้อนเข้าเครื่องผ่าต้นกกทีละต้น หรือหาที่วางและเคลื่อนตัวไปหยิบต้นกกมาป้อนทีละต้น ทำให้เกิดความล่าช้าและเกิดความเมื่อยล้าในการทำงาน ส่งผลให้ต้อง ใช้เวลาในการผ่ากกมากขึ้นเพื่อให้ได้เส้นกกเพียงพอต่อความ ต้องการ

จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยเล็งเห็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับกลุ่ม ของเกษตรกรที่ทำการทอเสื่อที่ใช้มีดผ่าต้นกก และข้อจำกัดของ เครื่องผ่าต้นกก งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องผ่ากก เพื่อช่วยแก้ปัญหาในขั้นตอนการผ่าต้นกก เพื่อให้ได้ขนาดและ ปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ ลดปัญหาการขาดแคลน แรงงานและช่วยลดความเมื่อยล้าในขั้นตอนการผ่าต้นกก ซึ่งเป็ นการส่งเสริมการทอเสื่อ การผลิตผลิตภัณฑ์จากต้นกก เพิ่ม รายได้ให้ของกลุ่มเกษตรกร เพิ่มคุณภาพผลผลิตและ ความสามารถในการแปรรูปต้นกกให้เพียงพอต่อความต้องการ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง

เครื่องผ่าต้นกก (Figure 1) ได้ออกแบบและพัฒนาให้ทำงาน ได้สะดวก ประกอบด้วย ภาตวางต้นกกมีขนาดกว้าง 10 cm และ ยาว 60 cm พับขอบสูง 5 cm ซึ่งสามารถรองรับต้นกกได้หลาย ขนาด เพื่อไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานถือต้นกกก่อนป้อนไปยังชุดใบมีดผ่า ต้นกกซึ่งออกแบบให้สามารถเปลี่ยนจำนวนใบมีดผ่าเพื่อให้ได้ ขนาดเส้นกกตามต้องการ หลังจากต้นกกถูกผ่าเป็นเส้นแล้วจะมี ชุดลูกกลิ้งขนาด 10 cm จำนวน 2 ลูก สำหรับดึงเส้นกกไปยัง

ภาตรับเส้นกกหลังจากผ่าได้ โดยภาตรับเส้นกกกว้าง 25 cm ยาว 60 cm เพื่อความสะดวกต่อการเก็บรวบรวมเส้นกก โดยเครื่องผ่า ต้นกกออกแบบให้มีขนาดกระทัดรัด สูงจากพื้น 75 cm เคลื่อนย้ายสะดวกโดยติดตั้งล้อ 4 ล้อ ใช้ต้นก้ำาลังจากมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง 12V และมีกล่องควบคุมการทำงานที่ ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง (switching) แปลงจาก ไฟฟ้ากระแสสลับ 220V เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 12V 250 W เพื่อ ใช้ขับมอเตอร์ต้นก้ำาลัง และส่งกำลังไปยังลูกกลิ้งด้วยชุดเฟืองโซ่

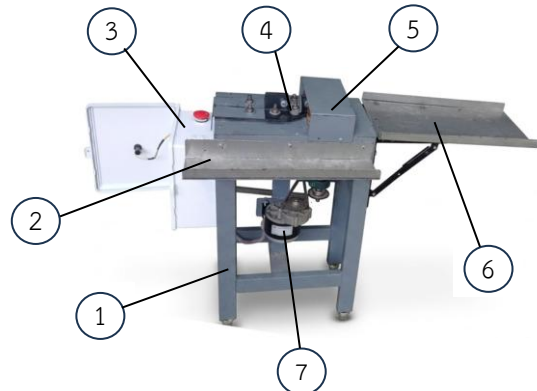


Figure 1 Cyperus splitting machine

ส่วนประกอบของเครื่องผ่าต้นกกที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. โครงเครื่อง
2. ภาตรองต้นกก
3. ชุดควบคุมการทำงาน
4. ชุดใบมีด
5. ชุดลูกกลิ้ง
6. ภาตรับเส้นกก
7. มอเตอร์กระแสตรง 12V 250W

2.2 หลักการทำงานของเครื่องผ่าต้นกก

เครื่องผ่าต้นกกที่พัฒนาขึ้น ผู้ปฏิบัติงานสามารถทำงานได้ สะดวก โดยเครื่องมีหลักการทำงานเริ่มจากการนำต้นกกที่ตัด เตรียมไว้มาวางที่ภาตรองต้นกกซึ่งติดอยู่ด้านข้างของเครื่อง เมื่อ ต้องการผ่าต้นกกเป็นเส้นสามารถทำได้โดยนำเส้นกกมาสอดผ่าน ช่องป้อนของชุดใบมีดผ่าต้นกก (Figure 2) ซึ่งสามารถปรับขนาด เส้นและจำนวนเส้นได้ตามความต้องการโดยการปรับจำนวน ใบมีดผ่าซึ่งวางใบมีดได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอนและยึดชุดใบมีด ด้วยแหวนรองและน็อตล็อก ใบมีดที่ใช้เป็นใบมีดคัตเตอร์ขนาดเล็กซึ่งผู้ใช้สามารถหามาใช้และสะดวกต่อการนำมาเปลี่ยนหาก เกิดปัญหา เส้นกกที่ได้จากการผ่าผ่านชุดใบมีดจะเคลื่อนที่มายัง ชุดลูกกลิ้งซึ่งมี 2 ลูกกลิ้ง (Figure 2) หมุนเข้าหากันเพื่อดึงเส้นกก ที่ผ่าได้ออกไปยังภาตรับเส้นกก โดยชุดลูกกลิ้งถูกส่งกำลังจาก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12V 250W ส่งกำลังผ่านชุดเฟืองโซ่ไป

ยังลูกกลิ้ง เส้นกกที่ผ้าได้จะเคลื่อนที่ผ่านไปยังถาดรับ โดยผู้ปฏิบัติงานสามารถป้อนเส้นกกจากถาดรองต้นกกทำให้เกิดการทำงานที่ต่อเนื่อง



Figure 2 Blade and roller set

2.3 การทดสอบและประเมินผล

การทดสอบและประเมินผลการทำงานของเครื่องผ้าต้นกก ใช้ต้นกกพันธุ์ราชินี ซึ่งเป็นต้นกกที่เกษตรกรผู้ทำเครื่องจักสานจากกกนิยมใช้ นำต้นกกสดมาหาความชื้นด้วยตู้อบหาความชื้นตามวิธีมาตรฐาน โดยนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) โดยปกติใช้อุณหภูมิ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ASABE, 1993) ซึ่งต้นกกที่นำมาทดสอบมีความชื้นเฉลี่ย 74% (w.b.) และตัดให้ยาวเท่าๆ กัน ต้นละ 60 cm ซึ่งเป็นขนาดที่เกษตรกรใช้ทอเป็นลวดลายสำหรับทำผลิตภัณฑ์จักสานการทดสอบการทำงานของเครื่องผ้าต้นกกกำหนดความเร็วรอบลูกกลิ้งเฉลี่ย 367 rpm ซึ่งจากการทดสอบป้อนต้นกกเบื้องต้น พบว่า ความเร็วรอบลูกกลิ้งเฉลี่ย 367 rpm เป็นความเร็วรอบที่ผู้ปฏิบัติงานสามารถควบคุมการทำงานได้และไม่เร็วจนก่อให้เกิดอันตรายในการป้อนต้นกก โดยศึกษาปัจจัยด้านจำนวนใบมีดผ้า 4 ระดับ ได้แก่ 1, 2, 4 และ 6 ใบมีด โดยค่าชี้ผลการศึกษามีดังนี้

1) ความสามารถในการทำงาน (C_w) คือ จำนวนต้นกกที่ใช้ผ้าเทียบกับเวลาที่ใช้ผ้า มีหน่วยเป็น (reeds h^{-1}) คำนวณได้จากสมการที่ 1 ดังนี้

$$C_w = \frac{P_g}{t} \quad (1)$$

เมื่อ C_w = ความสามารถในการทำงาน (reeds h^{-1})

P_g = จำนวนต้นกกที่ผ้าได้ (reeds)

t = เวลาที่ใช้ในการผ้า (h)

2) ประสิทธิภาพในการผ้า (Eff) คือ จำนวนต้นกกที่ผ้าได้เทียบกับต้นกกที่ใช้ทดสอบ มีหน่วยเป็น (%) คำนวณได้จากสมการที่ 2 ดังนี้

$$Eff = \left(\frac{P_g}{P_s} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ Eff = ประสิทธิภาพการผ้า (%)

P_g = จำนวนต้นกกที่ผ้าได้ (reeds)

P_s = จำนวนต้นกกที่ใช้ในการทดสอบ (reeds)

3) เปอร์เซ็นต์สูญเสีย (loss) คือ จำนวนต้นกกที่ผ้าไม่ได้เทียบกับจำนวนต้นกกที่ใช้ในการทดสอบ มีหน่วยเป็น (%) คำนวณได้จากสมการที่ 3 ดังนี้

$$Loss = \left(\frac{P_L}{P_s} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ loss = เปอร์เซ็นต์สูญเสีย (%)

P_L = จำนวนต้นกกที่ผ้าไม่ได้ (reeds)

P_s = จำนวนต้นกกที่ใช้ในการทดสอบ (reeds)

4) กำลังไฟฟ้าที่ใช้ (Power) คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปขณะที่เครื่องทำงาน มีหน่วยเป็น (W) ได้จากการวัดโดยใช้มิเตอร์และบันทึกข้อมูลกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเพื่อนำมาคำนวณกำลังไฟฟ้าจากสมการที่ 4 ดังนี้

$$P = I \times V \quad (4)$$

เมื่อ P = กำลังไฟฟ้า (W)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

V = แรงดันไฟฟ้า (V)

2.4 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องผ้าต้นกก เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงาน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมต้นกก ความยาว 60 cm แต่ละชุดใบมีดทำการทดสอบผ้าต้นกกจำนวน 5 ซ้ำ ซ้ำละ 20 ต้น
- 2) เตรียมเครื่องผ้าต้นกกโดยติดตั้งใบมีด 1 ใบมีด ทำการทดสอบเบื้องต้นเพื่อให้เครื่องพร้อมปฏิบัติงาน
- 3) ทำการทดสอบการทำงานโดยป้อนต้นกกครั้งละ 1 ต้น ต่อเนื่อง และบันทึกข้อมูลเวลาในการทำงาน และบันทึกจำนวนต้นกกที่ผ้าได้และจำนวนต้นกกที่ผ้าไม่ได้ เพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถในการทำงาน ประสิทธิภาพการผ้าและเปอร์เซ็นต์สูญเสีย
- 4) ขณะทำการทดสอบทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันกระแสไฟฟ้า เพื่อไปคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้
- 5) ทำการทดสอบผ้าต้นกกกับชุดใบมีดจำนวน 2 4 และ 6 ใบมีด โดยดำเนินการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบผ้าต้นกกด้วยใบมีด 1 ใบมีด ตามขั้นตอนที่ 1) ถึง 4)

3 ผลและวิจารณ์

การทดสอบการทำงานของเครื่องผ้าต้นกกเพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าชี้ผล ได้แก่ ความสามารถในการทำงาน ประสิทธิภาพการผ้า เปอร์เซ็นต์สูญเสียและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ผลการศึกษามีดังนี้ (Table 1.)

ผลการศึกษาความสามารถในการทำงาน พบว่า การผ้าต้นกกด้วยใบมีด 1 ใบมีด ให้ความสามารถในการผ้าสูงสุดที่ 522.62 reeds h^{-1} และการผ้าต้นกกด้วยใบมีด 4 ใบมีด ให้ความสามารถในการผ้าที่น้อยที่สุดที่ 500.92 reeds h^{-1}

ผลศึกษาประสิทธิภาพการผ้าต้นกก พบว่า การผ้าต้นกกด้วยใบมีด 1, 2, 4 และ 6 ใบมีด มีประสิทธิภาพในการผ้าใกล้เคียงกัน (อยู่ในช่วง 93.00 - 97.00%)

ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์สูญเสีย พบว่า การผ่าต้นกกด้วยใบมีด 1, 2, 4 และ 6 ใบมีด มีเปอร์เซ็นต์สูญเสียใกล้เคียงกันที่ (อยู่ในช่วง 3.00 - 7.00%)

ผลการศึกษากำลังไฟฟ้าที่ใช้ พบว่า การผ่าต้นกกด้วยใบมีด 1 ใบมีด มีการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ 95.99 W ส่วนการผ่าต้นกกด้วยใบมีด 6 ใบมีด มีการใช้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดที่ 125.58 W

Table 1. Results of the study on efficiency, percentage of loss and electrical power

Blades	Capacity (reeds h ⁻¹)	Efficiency (%)	Percent loss (%)	Power (W)
1	522.62±38.12	95.00±5	5.00±5	95.99±13.49
2	517.56±51.16	97.00±3	3.00±2	108.37±10.31
4	500.92±5.40	93.00±7	7.00±3	123.14±20.15
6	511.71±43.84	94.00±1	6.00±4	125.58±26.22

จาก Figure 3 แสดงอิทธิพลของจำนวนใบมีดที่มีต่อความสามารถในการทำงาน จากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อจำนวนใบมีดผ่าต้นกกเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 6 ใบมีด ส่งผลให้ความสามารถในการผ่าต้นกกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากจำนวนใบมีดที่น้อยกว่า การสอดต้นกกผ่านใบมีดทำได้ง่ายกว่า เมื่อเทียบกับการผ่าด้วยจำนวนใบมีดที่มากกว่า การสอดต้นกกให้ผ่านชุดใบมีดทำได้ยากกว่าจึงทำให้ความสามารถในการผ่าลดลง

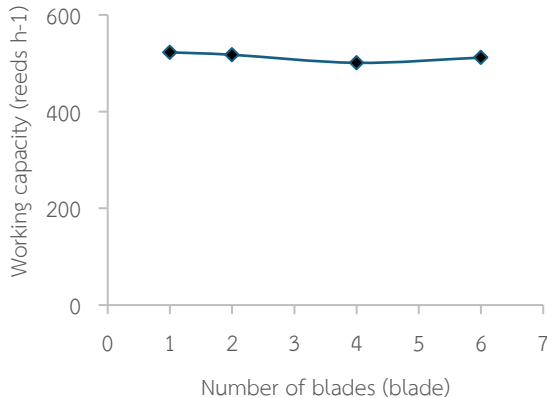


Figure 3 Effect of the number of blades on work capacity

Figure 4 แสดงอิทธิพลของจำนวนใบมีดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผ่าและเปอร์เซ็นต์สูญเสีย จากผลการทดสอบพบว่า ที่จำนวนใบมีดผ่าต้นกก 1 และ 2 ใบมีด มีประสิทธิภาพการผ่าต้นกกใกล้เคียงกัน คือ 95 และ 97% และมีเปอร์เซ็นต์สูญเสียต่ำที่ 5 และ 3% และเมื่อจำนวนใบมีดผ่าเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 6 ใบมีด พบว่ามีประสิทธิภาพในการผ่าลดลงเป็น 93 และ 94% และมีเปอร์เซ็นต์สูญเสียเพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 6% ตามลำดับ เห็นได้ว่า เมื่อจำนวนใบมีดเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการผ่าลดลง เนื่องจากการป้อนต้นกกผ่านชุดใบมีดที่มีจำนวนมากขึ้นทำ

ได้ยาก ต้องออกแรงดันต้นกกผ่านชุดใบมีดมากขึ้นซึ่งอาจทำให้ต้นกกหักและไม่สามารถป้อนผ่านใบมีดได้ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผ่าต้นกกลดลงและเกิดความสูญเสียมากขึ้น

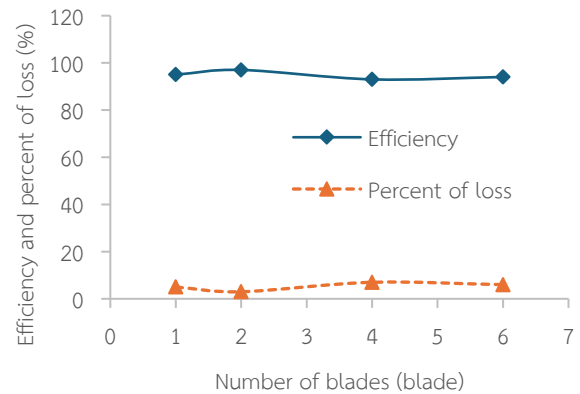


Figure 4 Effect of the number of blades on efficiency and percentage of loss

Figure 5 แสดงอิทธิพลของจำนวนใบมีดผ่าที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าที่ใช้ พบว่า เมื่อจำนวนใบมีดผ่าต้นกกเพิ่มขึ้นจาก 1 เป็น 6 ใบมีด กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผ่าต้นกกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 95.99 เป็น 125.58 W เนื่องจากจำนวนใบมีดที่เพิ่มขึ้นทำให้เส้นกกที่ผ่าได้มากขึ้น ส่งผลให้ลูกกลิ้งใช้การกำลังในการดึงเส้นกกซึ่งมีแรงต้านจากชุดใบมีดเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้กำลังไฟฟ้าที่ใช้มากขึ้นตามจำนวนใบมีด

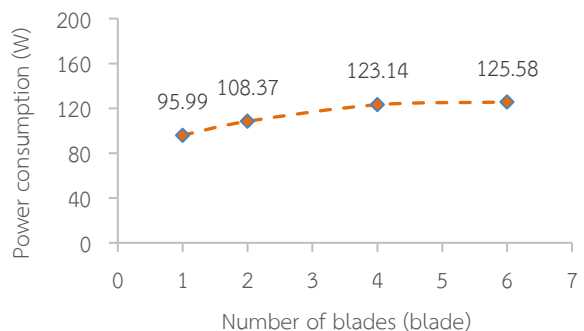


Figure 5 Effect of the number of blades on electric power consumption

4 สรุป

พัฒนาเครื่องผ่าต้นกกสำหรับทำผลิตภัณฑ์จักสาน ทำให้ได้เครื่องที่มีส่วนประกอบ ได้แก่ โครงเครื่อง ถาดรองต้นกก ชุดควบคุมการทำงาน ชุดใบมีด ชุดลูกกลิ้ง ถาดรับเส้นกก โดยใช้ต้นกกจากมอเตอร์กระแสตรง 12V ส่งกำลังผ่านเฟืองโซ่ การทำงานของเครื่องเริ่มจากการปรับตั้งชุดใบมีดและเดินเครื่อง จากนั้นป้อนต้นกกไปยังชุดใบมีดผ่าและผ่านไปยังชุดลูกกลิ้งที่ทำหน้าที่ดึงเส้นกกออกไปยังถาดรองรับ การศึกษาปัจจัยด้านจำนวนใบมีดผ่าต้นกก พบว่า จุดที่เหมาะสมคือ การใช้ใบมีดผ่าต้นกก 1 ใบมีด ได้ความสามารถในการทำงานสูงโดยมีค่าเฉลี่ย 522.62

reeds h^{-1} มีประสิทธิภาพการผ่าค่อนข้างสูงโดยมีค่าเฉลี่ย 95.00% มีเปอร์เซ็นต์สูญเสียต่ำเฉลี่ยที่ 5.00% ลักษณะต้นกกก่อนและหลังการผ่าแสดงใน Figure 7 และมีการใช้กำลังไฟฟ้าน้อยที่สุดโดยเฉลี่ยที่ 95.99 W ซึ่งต่ำกว่าการผ่าด้วยใช้มีด 4 และ 6 ใบมีด ทั้งนี้การเลือกใช้จำนวนใบมีดในการผ่าต้องพิจารณาประกอบกับความต้องการขนาดเส้นกกเพื่อนำไปใช้งานด้วย



Figure 7 Cyperus before and after splitting

อย่างไรก็ดี งานวิจัยนี้ยังเป็นการพัฒนาเครื่องต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อยอดให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่จะช่วยทำงานในการทำงานของเกษตรกรผู้ทำผลิตภัณฑ์จักสานจากกก เพื่อทดแทนปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคการเกษตรได้ในอนาคต

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการชุมชนนวัตกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีงบประมาณ 2568

6 เอกสารอ้างอิง

นพดล แดงพวง, หลุยส์ แก่นลา, เพ็ญจันทร์ ธาตุไพบูลย์, อรุณี แห่งทอง, ณัฐพล มากท่า, กมลภัทร ศิริพงษ์, ศิริลักษณ์ พุทธิวงศ์, นิธิกุล ทวีกุล, สรรเสริญ เสี่ยงใส, อุชฎา สุขจันทร์ และสมชาย บุญประดับ. 2559. โครงการวิจัยและพัฒนาการผลิตพืชพื้นที่ชุ่มน้ำที่มีศักยภาพเพื่อใช้ประโยชน์ด้านเกษตรและ อุตสาหกรรม, ค้นเมื่อ 17 มิ.ย. 2568 จาก <https://www.doa.go.th/plan/wp-content/uploads/2021/05/2741.1.pdf>

วรภรณ์ เทียนเงิน. 2556. ปรับโฉมเสื่อกก สู่ตลาดอาเซียน, ข่าวรอบรู้ วท. หนังสือพิมพ์โพสต์ทูเดย์, วันศุกร์ที่ 2 สิงหาคม 2556 หน้า 12

สุทธิดา สุพลสิงห์. 2559. การสร้างมูลค่าเพิ่มแปรรูปเสื่อกกเพื่อเศรษฐกิจชุมชน บ้านทุ่งสะแบง หมู่ที่ 7 ตำบลมะเกลือใหม่ อำเภอสว่างแดนดิน จังหวัดนครราชสีมา, รายงานวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา.

American Society of Agricultural and Biological Engineers. 1993. Standards engineering practices data, 4th edition., American society of agricultural engineering, USA.



การศึกษาผลกระทบของขนาดถังอัดอากาศต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำ

A Study of Effect of Air Chamber Size to Efficiency of Hydraulic Ram

จิระกานต์ ศิริวิชัยไมตรี^{1*}

Chirakarn Sirivitmaetrie^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, นครปฐม, 73140

¹Irrigation Department Faculty of Engineering Keamphangsean, Nakhonprathom, 73140

*Corresponding author: Tel: +66-8-9665-9984, Fax: +66-34-351-897, E-mail: fengcrk@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ตะบันน้ำมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีแหล่งน้ำและระดับความสูง สามารถพัฒนานำตะบันน้ำมาใช้งาน เนื่องจากตะบันน้ำเป็นปั๊มน้ำที่ไม่ต้องการพลังงานไฟฟ้าหรือน้ำมันในการปั๊มน้ำ ลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ ซึ่งการออกแบบและสร้าง ตะบันน้ำสามารถทำได้ง่าย โดยการนำชิ้นส่วนวัสดุประเภทที่มีขายตามท้องตลาดมาประกอบเป็นตะบันน้ำได้ ส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญ ของตะบันน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำคือถังอัดอากาศ (Air chamber) มีหน้าที่เก็บสะสมความดันที่เกิดจากวอเตอร์แฮมเมอร์ (Water hammer) ซึ่งเกิดจากการปิดวาล์วที่น้ำอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของถังอัดอากาศต่อ ประสิทธิภาพของตะบันน้ำ โดยทำการทดสอบตะบันน้ำที่ติดตั้งถังอัดอากาศขนาดต่างๆ 4 8 12 และ 16 ลิตร และแบบไม่มีถังอัด อากาศ จากผลการทดสอบตะบันน้ำแสดงให้เห็นว่าตะบันน้ำที่มีถังอัดอากาศมีประสิทธิภาพพลังงานมากกว่าตะบันน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศติด ตั้งอยู่ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ แต่ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานของตะบันน้ำที่มีถังอัดอากาศขนาดต่างๆ กลับไม่มีความ แตกต่างอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในถังอัดอากาศมีส่วนช่วยให้ตะบันน้ำสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ มากกว่าตะบัน น้ำแบบไม่มีถังอัดอากาศ

คำสำคัญ: ตะบันน้ำ, ถังอัดอากาศอัดความดัน, พลังงานน้ำ

Abstract

Hydraulic rams are widely used specially in area with source of water. The ram pump has ability to pump water without electricity or fuel, thus the cost energy reduced. Furthermore, hydraulic ram pumps can be easily constructed by using readily available plumbing components. The components of a hydraulic ram pump significantly affect its efficiency. The air chamber is a crucial component of a hydraulic ram, responsible for storing the pressure generated by water hammer, which occurs when the drain valve is rapidly closed. This research studied the effect of the air chamber sizes on the efficiency of a hydraulic ram. In the experiment, the hydraulic ram was tested with different air chamber sizes: 4, 8, 12, 16 liters, and without an air chamber. The results show that the ram pump with air chambers are approximately 5 percent more energy efficient than one without. However, a comparison of the energy efficiency of hydraulic ram with different air chamber sizes did not show a significant difference. This can be concluded that the air chambers help the hydraulic ram operate more efficiently than the one without.

Keywords: Hydraulic ram, Air chamber, Hydropower

1 บทนำ

ตะบันน้ำสามารถนำมาใช้เพื่อปั๊มน้ำขึ้นที่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้รับการออกแบบอย่างถูกต้องและมีสภาพภูมิประเทศที่เหมาะสม โดยที่ตะบันน้ำสามารถสร้างได้จากวัสดุหลากหลายชนิด ท่อ PVC หรือ ท่อเหล็ก เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับ

ความนิยมมากเพราะสามารถนำมาประกอบเป็นตะบันน้ำได้ง่ายหาซื้อได้ทั่วไป มีความทนทาน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตะบันน้ำที่สร้างขึ้นเองจากเหล็ก รูปพรรณที่มีขายตามท้องตลาด เพื่อลดข้อจำกัดที่เกิดจากการใช้ท่อ PVC สำเร็จรูปซึ่งมีข้อจำกัดที่การนำข้อต่อมาต่อกันทำให้เกิดระยะทางที่มากขึ้นโดยไม่จำเป็น การสร้างตะบันด้วยเหล็กที่มีขายตามท้องตลาด ทำให้สามารถออกแบบได้อย่างอิสระ ส่งผลให้

เครื่องตะบันน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้น (วีระพงษ์ และคณะ, 2552)

ถังอัดอากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของตะบันน้ำ ซึ่งมีหน้าที่เก็บความดันที่เพิ่มขึ้นจากปรากฏการณ์วอเตอร์แฮมเมอร์ และทำให้การไหลของน้ำที่ผ่านวาล์วส่งน้ำคั่งที่มากขึ้น จะมีผลต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำโดยตรง (Ngolle and Enongene, 2019)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดถังอัดอากาศต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำ โดยทำการทดสอบตะบันน้ำที่มีถังอัดอากาศขนาด 16, 12, 8, 4 ลิตร และตะบันน้ำแบบที่ไม่มีถังอัดอากาศ แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งน้ำ และประสิทธิภาพพลังงานของตะบันน้ำ

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ถังอัดอากาศของตะบันน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ มีหน้าที่รับน้ำที่ส่งผ่านมาจากวาล์วส่งน้ำและเก็บสะสมความดัน เพื่อที่ตะบันน้ำจะสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ตะบันน้ำทำงานภายในถังอัดอากาศจะมีทั้งอากาศและน้ำอยู่ภายใน โดยที่ปริมาณน้ำและอากาศที่อยู่ภายในขึ้นอยู่กับความดันของน้ำที่ส่งขึ้นที่สูง และอัตราการเติมอากาศของวาล์วเติมอากาศ (Air valve)

ในช่วงเริ่มต้นการทำงานของตะบันน้ำ ภายในถังอัดอากาศจะยังไม่มีความดัน ตะบันน้ำจะยังไม่สามารถทำงานได้เองอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นภายในถังอัดอากาศจะมีความดันเท่ากับอากาศภายนอก แรงดันของน้ำที่เกิดขึ้นจากวอเตอร์แฮมเมอร์ จะเคลื่อนที่จากวาล์วขึ้นน้ำไปสูงแหล่งจ่ายน้ำ ส่วนหนึ่งจะเข้าไปในถังอัดอากาศผ่านทางวาล์วส่งน้ำ ซึ่งทำให้แรงดันลดลงไปอย่างมากเมื่อเดินทางผ่านวาล์วส่งน้ำที่ไม่มีความดันอยู่ภายในถังอัดอากาศ เมื่อความดันภายในตะบันน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว น้ำที่ไหลจากแหล่งจ่ายน้ำจะไหลเข้าตะบันน้ำอย่างต่อเนื่อง และทำให้วาล์วส่งน้ำที่ปิดอยู่ไม่สามารถเปิดได้ ตะบันน้ำจึงหยุดทำงาน

ในอีกทางหนึ่งหากในถังอัดอากาศถูกเติมเต็มด้วยน้ำ ไม่มีอากาศเหลืออยู่ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อทำงานตะบันน้ำไประยะเวลาหนึ่ง และไม่มีการเติมอากาศ อากาศในถังอัดอากาศจะถูกดูดซับโดยน้ำภายใต้ความดันอย่างช้าๆ ทำให้ในถังอัดอากาศเต็มไปด้วยน้ำ ตะบันน้ำจะทำงานผิดปกติโดยวาล์วส่งน้ำจะกระแทกอย่างรุนแรง (Watt S.B., 1974) และการทำงานของตะบันน้ำจะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ขนาดและรูปทรงของถังอัดอากาศนำมาคำนวณปริมาตรอากาศที่บรรจุอยู่ภายใน โดยอากาศที่อยู่ภายในถังอัดอากาศ มีหน้าที่ดูดซับความดันที่เพิ่มขึ้นจากการปิดวาล์วส่งน้ำอย่างรวดเร็วและเกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ อากาศภายในถังอัดอากาศที่เป็นปริมาตรคงที่ สามารถบีบอัดตัวหรือขยายตัวได้ตามความดันที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ทำให้อากาศสามารถดูดซับความดันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วไว้ได้อย่างดี และช่วยให้ตะบันน้ำสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Marcos and Raimundo, 2021)

เมื่อตะบันน้ำเริ่มต้นทำงาน อากาศที่อยู่ภายในถังอัดอากาศจะมีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของถังอัดอากาศ หลังจากนั้นเมื่อตะบันน้ำทำงานไปเรื่อยๆ ความดันภายในถังอัดอากาศจะเพิ่มขึ้นจากการที่น้ำไหลเข้าถังอัดอากาศ ปริมาตรของอากาศที่อยู่ในถังอัดอากาศจะลดลง ปริมาตรอากาศที่อยู่ในถังอัดอากาศที่ความดันต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการ ที่ 1 ตามทฤษฎีของ Boyle's Law (Finnemore and Franzini, 2016)

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (1)$$

P = ความดัน atm

V = ปริมาตร m³

จากสมการที่ 1 สามารถคำนวณปริมาตรของอากาศภายในถังอัดอากาศที่ความดันต่างๆได้ ดังแสดงในตารางที่ 1 ปริมาตรของอากาศจะลดลงอย่างมากเมื่อภายในถังอัดอากาศมีความดันสูง โดยที่อากาศจะถูกแทนที่ด้วยน้ำ ปริมาตรของอากาศจะลดลงเหลือเพียง หนึ่งในสี่ของปริมาตรเริ่มต้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น 4 atm ถึงแม้ว่าอากาศในถังอัดอากาศจะเหลือน้อยมาก แต่ตะบันน้ำยังคงสามารถทำงานได้อย่างปกติ

นอกจากความดันที่เพิ่มขึ้นในถังอัดอากาศจะทำให้ปริมาตรอากาศภายในถังลดลงแล้ว เมื่อความดันภายในถังอัดอากาศสูงขึ้น น้ำจะดูดซับอากาศได้มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อากาศภายในถังอัดอากาศลดลงอย่างรวดเร็ว

Table 1 Volume of air in the air chamber

Pressure Atm	Air volume in air chamber (Liter)			
	4L	8L	12L	16L
1*	4	8	12	16
2	2	4	6	8
3	1.3	2.7	4	5.3
4	1	2	3	4
5	0.8	1.6	2.4	3.2

*Atmosphere pressure

สมการที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานของตะบันน้ำสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 (ปริวิธส์ และคณะ 2555)

$$\eta_p = \frac{Qh}{(Q+Q_w)H} \quad (2)$$

η_p = ประสิทธิภาพพลังงาน (Power) %

Q = อัตราการไหลของน้ำส่งขึ้น l s⁻¹

Q_w = อัตราไหลของน้ำทิ้ง l s⁻¹

h = ความดันน้ำที่ส่งขึ้นที่สูง m

H = ความดันน้ำที่จ่ายเข้าเครื่อง m

สมการที่ใช้คำนวณประสิทธิภาพการส่งน้ำของตะบันน้ำ
แสดงในสมการที่ (Ngolle and Enongene, 2019)

$$\eta_w = \frac{Q}{Q_w} \times 100 \quad (3)$$

η_w = ประสิทธิภาพการส่งน้ำ (Delivery) %

Q = อัตราการไหลของน้ำส่งขึ้น L s^{-1}

Q_w = อัตราไหลของน้ำทั้ง L s^{-1}

3 อุปกรณ์และวิธีการ

ตะบันน้ำจะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ 1.ถังอัดอากาศ (Air chamber) 2.วาล์วส่งน้ำ (Delivery valve) 3. ท่อส่งน้ำ (Delivery pipe) 4.วาล์วทิ้งน้ำ (Waste valve) 5.ทางน้ำเข้า (Inlet) 6.วาล์วอากาศ (Air valve) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยที่อุปกรณ์ต่างๆของตะบันน้ำ เช่น วาล์วส่งน้ำ วาล์วทิ้งน้ำ ถังอัดอากาศ ข้องอและข้อต่อต่างๆ สามารถนำอุปกรณ์ท่อประปาที่มีขายตามท้องตลาด มาประยุกต์ใช้งานได้

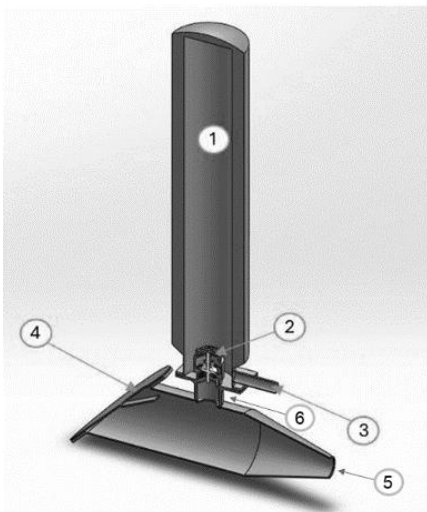


Figure 1. Hydraulic ram components

ตะบันน้ำที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ เลือกใช้ตะบันน้ำที่มีโครงสร้างหลักเป็นท่อเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 นิ้ว มีความหนา 3 มิลลิเมตร มีความยาวทั้งหมด 70 เซนติเมตร ท่อน้ำเข้าขนาด 2 นิ้ว วาล์วส่งน้ำขนาด 2 นิ้วทำมาจากวาล์วทางเดียวสำเร็จรูปทองเหลืองที่มีขายตามท้องตลาด และมีวาล์วทิ้งน้ำขนาด 2 นิ้วสร้างจากแผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตรติดบานพับสำหรับพับเปิด-ปิดได้ ดังแสดงในภาพที่ 2

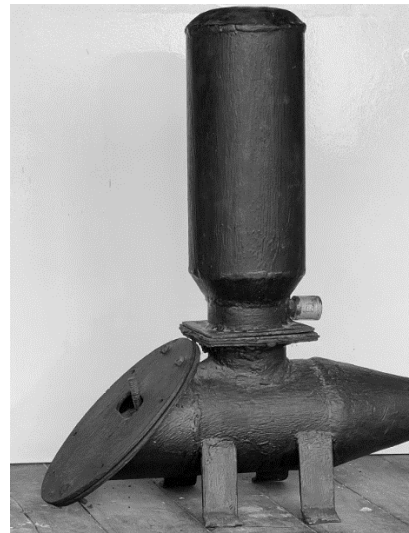


Figure 2. Hydraulic ram with 8 liters air chamber

อุปกรณ์ที่ติดตั้งเพื่อทดสอบตะบันน้ำในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ระบบจ่ายน้ำที่รักษาความดันคงที่แบบท่อน้ำล้น โดยที่มีถังจ่ายน้ำขนาด 200 ลิตรจ่ายน้ำโดยมีระดับน้ำอยู่สูงกว่าระดับวาล์วทิ้งน้ำของตะบันน้ำ 1.9 เมตร มีท่อน้ำล้นขนาด 2 นิ้วติดตั้งภายในถังจ่ายน้ำเพื่อรับน้ำที่ล้นเกินและระบายทิ้งลงถังรับน้ำใต้เครื่องตะบันน้ำ ทำให้สามารถควบคุมระดับน้ำที่จ่ายเข้าตะบันน้ำได้อย่างคงที่ ใช้ท่อส่งน้ำ PVC ขนาด 2 นิ้วยาว 16 เมตร ต่อเป็นเส้นตรงจากแหล่งจ่ายน้ำมาที่ตะบันน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 3

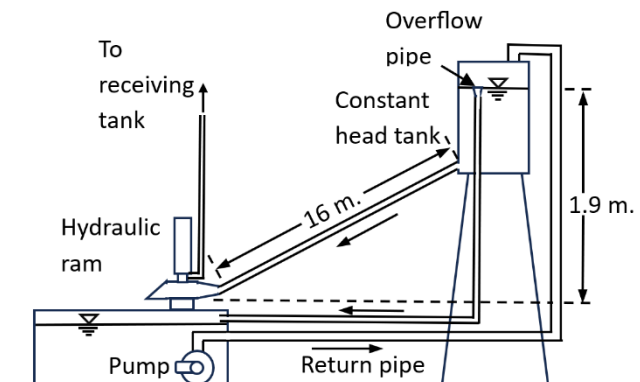


Figure 3. Experiment setup

เมื่อคำนวณอัตราส่วนความยาวท่อต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อจ่ายน้ำ (L/D) อยู่ที่ 300 ซึ่งอยู่ภายในช่วงอัตราส่วนที่แนะนำสำหรับการติดตั้งตะบันน้ำ (Watt S.B., 1974) ได้ตะบันน้ำมีถังรับน้ำขนาดใหญ่เพื่อรับน้ำที่ทิ้งจากตะบันน้ำและได้ติดตั้งเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำกลับไปยังถังจ่ายน้ำ เพื่อใช้น้ำวนหมุนเวียนไปเรื่อยๆ

การทดสอบตะบันน้ำจะมีการปรับเปลี่ยนถังอัดอากาศขนาดต่างๆ เพื่อดูประสิทธิภาพของตะบันน้ำ ได้มีการปรับเปลี่ยนถังอัดอากาศขนาด 4, 8, 12 และ 16 ลิตร โดยถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาดถูกสร้างมาจากท่อเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 8 นิ้ว มีความหนา 3 มิลลิเมตร ถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาดจะมีท่อส่งน้ำขนาด 3/4 นิ้ว ที่ด้านล่างของถังอัดอากาศเหมือนกันทุกใบ ดัง

แสดงในภาพที่ 4 ได้มีการทดสอบระบบน้ำแบบไม่มีถังอัดอากาศ โดยจะทำการถอดถังอัดอากาศออกแล้วต่อท่อส่งน้ำเข้ากับวาล์วส่งน้ำแทนที่ถังอัดอากาศ ดังแสดงใน Figure 5.

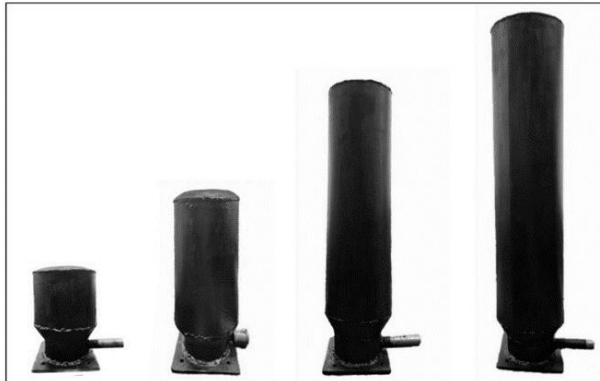


Figure 4. Air Chambers (4, 8, 12 and 16 Liters)

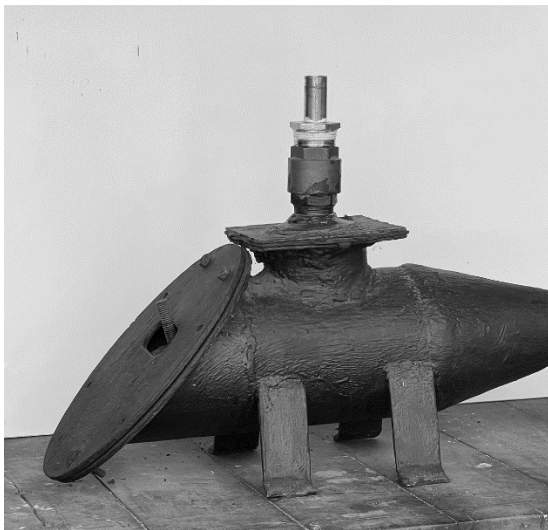


Figure 5 Hydraulic ram with no air chamber

ความดันส่งน้ำที่ใช้ในการทดสอบระบบน้ำ ได้เลือกทดสอบที่ความดัน 0.7, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 bar โดยเมื่อเปรียบเทียบกับความดันส่งน้ำต่อระดับน้ำที่จ่ายเข้าระบบน้ำจะได้อัตราส่วนที่ประมาณ 3.7-15.7

4 ผลและวิจารณ์

จากการทดสอบระบบน้ำที่ติดตั้งถังอัดอากาศขนาด 4, 8, 12 และ 16 ลิตรและระบบน้ำแบบไม่มีถังอัดอากาศพบว่า เมื่อติดตั้งระบบน้ำเสร็จเรียบร้อยแล้วและเริ่มทำการปล่อยน้ำเข้าระบบน้ำแล้ว แรงดันของน้ำจะดันให้วาล์วทั้งน้ำปิดตัวและไม่เปิดออก เนื่องจากภายในถังอัดอากาศยังไม่มีแรงดัน ความดันของน้ำที่ถูกสร้างขึ้นจากการปิดของวาล์วทั้งน้ำอย่างรวดเร็ว (วอเตอร์แฮมเมอร์) ไหลเข้าสู่ถังอัดอากาศที่ไม่มีแรงดันและลดลงอย่างรวดเร็ว ไม่สามารถหยุดการไหลของน้ำที่ไหลมาจากแหล่งจ่ายน้ำได้ ทำให้เกิดแรงดันของน้ำกระทำต่อวาล์วทั้งน้ำอย่างต่อเนื่อง วาล์วทั้งน้ำจึงไม่สามารถเปิดได้ ทั้งนี้ในช่วงเริ่มต้นจะต้องช่วยเปิดวาล์วทั้งน้ำของระบบน้ำ เพื่อที่แรงดันน้ำจะดันให้วาล์วทั้งน้ำปิดอีกครั้งและเกิดวอเตอร์แฮมเมอร์ ทำซ้ำๆไปเรื่อยๆ จนเมื่อภายในถังอัด

อากาศมีความดันสะสมที่เพียงพอ แรงดันของน้ำไหลเข้าวาล์วส่งน้ำจะลดลง ส่วนที่เหลือจะเคลื่อนไปสู่แหล่งจ่ายน้ำ และมีแรงมากพอที่จะสามารถหยุดการไหลของน้ำจากแหล่งจ่ายน้ำได้ เมื่อน้ำที่ไหลมาจากแหล่งจ่ายน้ำหยุดไหล แรงดันที่กระทำต่อวาล์วทั้งน้ำจะลดลง ทำให้วาล์วทั้งน้ำสามารถเปิดได้เอง เมื่อแรงดันน้ำที่ไหลไปสู่แหล่งจ่ายน้ำลดลง น้ำจากแหล่งจ่ายน้ำจะไหลเข้าสู่ระบบน้ำอีกครั้งหนึ่ง ทำให้วาล์วทั้งน้ำได้เองจากแรงดันน้ำ กระบวนการจะทำงานวนไปแบบนี้เรื่อยๆ โดยที่ระบบน้ำจะเริ่มต้นทำงานได้เองอย่างต่อเนื่องจะต้องมีความดันในถังอัดอากาศที่ประมาณ 0.4 bar เมื่อมีความดันเก็บอยู่ในถังอัดอากาศแล้ว การเริ่มต้นครั้งถัดไประบบน้ำจะสามารถทำงานได้เองทันทีเมื่อมีการปล่อยน้ำเข้าระบบน้ำอีกครั้งหนึ่ง

ระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศขนาดใหญ่ที่สุด 16 ลิตร ใช้เวลาและจำนวนครั้งในการช่วยเปิดวาล์วทั้งน้ำในช่วงเริ่มต้นทำงานมากกว่าระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศขนาดเล็กกว่า ทั้งนี้เนื่องจากถังอัดอากาศที่มีขนาดใหญ่มีปริมาตรมาก ทำให้ต้องใช้ปริมาณมากกว่าเติมเข้าไปในถังอัดอากาศเพื่อสร้างความดันภายในถังอัดอากาศ ซึ่งระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศขนาดเล็กสามารถสะสมความดันได้เร็วกว่า โดยที่ระบบน้ำแบบที่ไม่มีถังอัดอากาศสามารถเริ่มต้นการทำงานด้วยตนเองได้เร็วกว่าระบบน้ำแบบที่มีถังอัดอากาศ เนื่องจากการที่ไม่มีถังอัดอากาศ ไม่มีปริมาตรในส่วนถังอัดอากาศ จะมีแค่ปริมาตรของท่อส่งน้ำขึ้นที่สูง ซึ่งเป็นปริมาตรที่เล็กมาก ดังนั้นระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศจะสามารถสะสมความดันได้อย่างรวดเร็วและเริ่มต้นทำงานได้เองเร็วกว่าระบบน้ำแบบที่มีถังอัดอากาศ

ปริมาณน้ำที่ระบบน้ำสามารถส่งขึ้นที่สูงที่ความดัน 0.7, 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 bar ที่ทดสอบด้วยระบบน้ำติดตั้งถังอัดอากาศขนาด 4, 8, 12 และ 16 ลิตรและแบบที่ไม่มีถังอัดอากาศ ได้แสดงในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าที่ความดันต่ำ 0.7 bar ระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาดสามารถส่งน้ำได้มากกว่าระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศ แต่เมื่อความดันเพิ่มมากขึ้น ความแตกต่างของอัตราการไหลระหว่างระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศและระบบน้ำแบบไม่มีถังอัดอากาศค่อยๆลดลง จนที่ความดันสูงสุด 3 Bar ระบบน้ำทั้งแบบที่มีและไม่มีถังอัดอากาศมีอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกัน ในทุกๆความดัน ระบบน้ำแบบที่มีถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาด มีอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด

Table 2 Pressure vs flowrate for various air chamber sizes

	Delivery Discharge L.s ⁻¹					
Tank Size	0.7Bars	1 Bar	1.5 Bars	2 Bars	2.5 Bars	3 Bars
4 Liters	0.1205	0.0840	0.0563	0.0395	0.0249	0.0067
8 Liters	0.1268	0.0951	0.0568	0.0319	0.0257	0.0065
12 Liters	0.1164	0.0916	0.0590	0.0344	0.0243	0.0064
16 Liters	0.1185	0.0912	0.0567	0.0393	0.0243	0.0064
No Tank	0.0894	0.0704	0.0401	0.0292	0.0144	0.0064

การทดสอบระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาด และแบบไม่มีถังอัดอากาศเพื่อหาประสิทธิภาพการส่งน้ำขึ้นที่สูง ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าระบบน้ำที่ติดตั้งถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาด มีประสิทธิภาพพลังงานใกล้เคียงกันทั้งหมดในทุกๆความดัน และการทดสอบระบบน้ำแบบไม่มีถังอัดอากาศ ได้ประสิทธิภาพการส่งน้ำต่ำกว่าการทดสอบแบบมีถังอัดอากาศในทุกๆความดัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ความดันส่งน้ำ 3 bar ขนาดของถังอัดอากาศไม่ได้สร้างความแตกต่างต่อประสิทธิภาพการส่งน้ำและปริมาณของระบบน้ำ และผลการทดสอบระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศมีประสิทธิภาพลดลง อย่างมาก โดยเฉพาะที่ความดันส่งน้ำต่ำ 0.7-1.5 bar แต่ที่ความดันสูงสุด 3 bar ประสิทธิภาพของระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศใกล้เคียงกับระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศ โดยระบบน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้มีประสิทธิภาพพลังงานอยู่ในช่วง 16% – 29% ได้แสดงค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของระบบน้ำที่ใช้ถังอัดอากาศขนาด 4, 8, 12, 16 ลิตร และ แบบไม่มีถังอัดอากาศแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการส่งน้ำ และพลังงานของระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาด มีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกับระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า

ประสิทธิภาพการส่งน้ำของระบบน้ำที่ติดตั้งถังอัดอากาศจะอยู่ในช่วง 0.59% - 7.6% ส่วนระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศจะมีประสิทธิภาพพลังงานอยู่ในช่วง 0.59% - 4.8% กราฟประสิทธิภาพการส่งน้ำของระบบน้ำแสดงอยู่ในภาพที่ 6

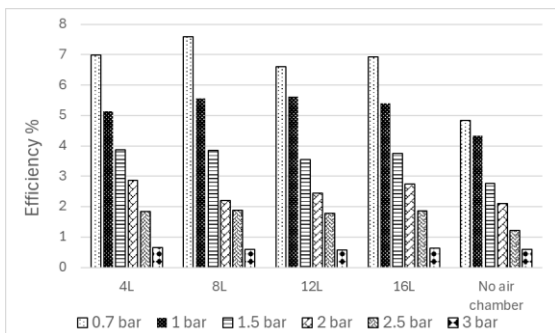


Figure 6 Efficiency for various delivery pressure and air chamber size

ระบบน้ำที่ทดสอบมีประสิทธิภาพพลังงานคำนวณจากสมการที่ 4 โดยแสดงในภาพที่ 7 โดยที่ระบบน้ำที่ติดตั้งถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาด มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในทุกความดันที่ทดสอบ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ความดัน 1-1.5 Bar แตกต่างกับระบบน้ำที่ไม่ได้ติดตั้งถังอัดอากาศ จะมีประสิทธิภาพลดลงอย่างชัดเจนในทุกๆความดัน โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง 1-2 Bar ยกเว้นที่ความดัน 3 Bar ระบบน้ำทั้งแบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งถังอัดอากาศมีประสิทธิภาพพลังงานที่ใกล้เคียงกันทั้งหมด

การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพพลังงานและประสิทธิภาพการส่งน้ำแสดงใน ตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพพลังงานและประสิทธิภาพการส่งน้ำ ระบบน้ำที่

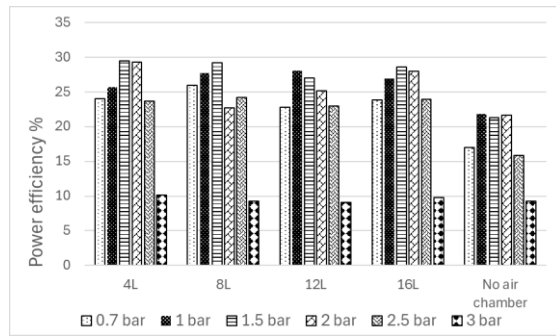


Figure 7. Power efficiency for various delivery pressure and air chamber size

ติดตั้งถังอัดอากาศมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันทั้งหมด อยู่ที่ประมาณ 23% สำหรับประสิทธิภาพพลังงานและ 3.5% สำหรับประสิทธิภาพการส่งน้ำ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบน้ำที่ไม่มีถังอัดอากาศอย่างชัดเจน

Table 3 The efficiencies of hydraulic ram

Air chamber volume	Average efficiency (%)	
	Power (η_p)	Delivery (η_w)
4L	23.74	3.56
8L	23.19	3.61
12L	22.53	3.43
16L	23.59	3.55
No air chamber	17.81	2.64

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพพลังงานของระบบน้ำเพื่อทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) โดยการคำนวณค่า Correlation Coefficient (r_0) ของชุดข้อมูลประสิทธิภาพพลังงาน ได้ผลออกมาได้ r_0 เท่ากับ 0.868 เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่จุดวิกฤต (Critical Points) สำหรับชุดข้อมูล (Sample Size) ที่มีจำนวนทั้งหมด 120 ข้อมูลและที่ระดับนัยสำคัญ (Significance Level) เท่ากับ 0.05 หรือที่ความเชื่อมั่น 95% จะได้ค่าจุดวิกฤตอยู่ที่ ประมาณ 0.9889 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.868 ดังนั้นจึงปฏิเสธสมมติฐานว่าชุดข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

การวิเคราะห์ทางสถิติแบบหลายตัวแปร เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ชุดข้อมูลด้วยวิธี Friedman Test (O'Gorman, 2001) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบหลายตัวแปร ได้ตั้งสมมติฐานว่า ระบบน้ำที่มีถังอัดอากาศทั้ง 4 ขนาด 4, 8, 12 และ 16 ลิตร มีความแตกต่างของประสิทธิภาพ จากชุดข้อมูลประสิทธิภาพของระบบน้ำ สามารถคำนวณ Chi-Square โดยมีค่า Degree of Freedom เท่ากับ 3 จะได้ χ^2 เท่ากับ 3.8 และเมื่อคำนวณค่า p-value จะได้ $P(\chi^2_3 > 3.8)$ จะมีค่าประมาณ $p = 0.284$ ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสามารถ

สรุปผลการวิเคราะห์ได้ว่า ปฏิเสธสมมุติฐานที่ว่าตะบันน้ำที่มีถึงอากาศขนาดต่าง ๆ กันมีประสิทธิภาพแตกต่างกัน

สรุป

จากผลการทดลองตะบันน้ำทั้งแบบที่มีถึงอัดอากาศขนาด 4, 8, 12, 16 ลิตรและไม่มีถึงอัดอากาศ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ตะบันน้ำที่มีถึงอัดอากาศทั้ง 4 ขนาดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าตะบันน้ำที่ไม่มีถึงอัดอากาศ แสดงให้เห็นว่าอากาศที่อยู่ในถึงอัดอากาศ เป็นส่วนประกอบสำคัญและส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการทำงานของตะบันน้ำ

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของตะบันน้ำที่มีถึงอัดอากาศขนาดแตกต่างกัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของตะบันน้ำไม่ได้แปรผันตามปริมาตรของถึงอัดอากาศ แต่ประสิทธิภาพของตะบันน้ำกลับมีการแปรผกผันกับความดันที่เกิดขึ้นภายในถึงอัดอากาศ โดยที่ความดันในถึงอัดอากาศต่ำ ตะบันน้ำจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ความดันในถึงอัดอากาศสูง

ปริมาตรอากาศในถึงอัดอากาศจะลดลงได้จากความดันที่เพิ่มขึ้นขณะที่ตะบันน้ำทำงาน และสามารถลดลงได้ด้วยการดูดซับของน้ำภายใต้แรงดัน ตามทฤษฎี Henry's Law การใช้งานตะบันน้ำในระยะยาวจะต้องมีวาล์วอากาศเพื่อที่จะเติมอากาศให้มีปริมาตรเพียงพอต่อการทำงานของตะบันน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทดสอบตะบันน้ำต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน จึงไม่สามารถตรวจวัดปริมาตรอากาศที่ลดลงจากการดูดซับอากาศของน้ำได้

สามารถสรุปได้ว่าตะบันน้ำติดตั้งถึงอัดอากาศมีผลดีต่อประสิทธิภาพการทำงานของตะบันน้ำอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ถึงอัดอากาศที่ขนาดต่างแตกต่างกันไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำอย่างชัดเจน แต่ตะบันน้ำที่ติดตั้งถึงอัดอากาศจะสูญเสียอากาศภายในถึงจากการที่อากาศไหลออกไปในท่อส่งน้ำ หรือถูกดูดซับโดยน้ำได้ ฉะนั้นภายในถึงอัดอากาศต้องมีปริมาตรอากาศภายในถึงอัดอากาศที่เพียงพอ มีการเติมอากาศอย่างต่อเนื่องเมื่อตะบันน้ำทำงาน เพื่อที่ตะบันน้ำจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ถ้าไม่มีอากาศภายในถึงอัดอากาศหรือไม่ถึงอัดอากาศติดตั้งอยู่จะทำให้ตะบันน้ำมีประสิทธิภาพลดลงอย่างชัดเจน

อีกหนึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำคือความแตกต่างระหว่างความดันที่อยู่ในถึงอัดอากาศและความดันที่เกิดขึ้นจากวอเตอร์แฮมเมอร์ โดยความดันในถึงอัดอากาศจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของน้ำที่ส่งขึ้น ความดันที่เกิดขึ้นจากวอเตอร์แฮมเมอร์ที่แปรผันตามอัตราการไหลและความเร็วการปิดวาล์วซึ่งเป็นความดันที่เกิดขึ้นเพียงชั่วขณะหนึ่ง ผลต่างของความดันทั้งสองจะทำให้วาล์วส่งน้ำเปิดออกและน้ำไหลเข้าไปในถึงอัดอากาศ ยิ่งผลต่างของความดันมาก น้ำจะไหลเข้าสูงถึงอัดอากาศได้มาก ดังนั้นที่ความดันในถึงอัดอากาศ 0.7 Bar ซึ่งเป็นความดันที่น้อยที่สุดจึงมีประสิทธิภาพทั้งพลังงานและการส่งน้ำมากกว่าที่ 3 Bar

ในบทความของ Ngolle and Enongene (2019) ได้ทำการทดลองตะบันน้ำที่มีถึงอัดอากาศหลายขนาด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าขนาดของถึงอัดอากาศไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของตะบันน้ำเหมือนกับการทดลองนี้

การศึกษาปริมาตรของอากาศน้อยที่สุดที่จำเป็นที่จะทำให้ตะบันน้ำยังคงสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องค้นหาจากการศึกษาทดลองในอนาคตต่อไป

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยชลศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ บุคลากรและอุปกรณ์เครื่องมือในการทำการวิจัยนี้

6 เอกสารอ้างอิง

- วีระพงษ์ เฟื่องแจ่ม, ชญาณี น้อมนพและจิระกานต์ ศิริวิชัยไมตรี, 2552. การศึกษาและพัฒนาเครื่องตะบันน้ำจากวัสดุที่มีจำหน่ายทั่วไป, ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- ปรีวิรส เอื้อนสะอาด, อิสรา โพพิลาม, วราวุธภูมิวิชัยและจิระกานต์ ศิริวิชัยไมตรี. 2555. การวิจัยและพัฒนาเครื่องตะบันน้ำแบบประหยัด. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทานคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- Finnemore E. J., Franzini J. B., 2016. Fluid mechanics with engineering applications. (10th ed.) Boston: McGraw-Hill. Chicago. 112-120.
- Marcos V., Reis d. O., L d. S., Raimundo T. L., Cledson S., Wendel K. O., João L. R., 2021. Performance of Hydraulic Ram Built with Different Volume of Air Chamber, Revista Engenharia na Agricultura. Amazonas, 17-27.
- Mohammed, S.N., 2007. Design and Construction of a Hydraulic Ram Pump. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. Department of Mechanical Engineering, Federal University of Technology, Minna, Nigeria.
- Ngolle, E. E. G., and S. Hong, 2019. The effect of air chamber size on the efficiency of a hydraulic ram pump. Master's thesis, Hankyong National University, 55-61.
- O'Gorman, T.W., 2001, A comparison of the F-test, Friedman's test, and several aligned rank tests for

the analysis of randomized complete blocks. J. Agric.
Biol. Environ. Stat.

Rajaonison A. and Rakotondramiarana H.T. 2019.

Theoretical Study of the Behavior of a Hydraulic
Ram Pump with Springs System. American Journal of
Fluid Dynamics 9 (1): 1-12.

Watt S. B. 1974. "A manual of information on the
automatic hydraulic ram for pumping water.
Intermediate Technology Development Group Water
Development Unit, National College of Agricultural
Engineering, 8-9.



เทคโนโลยีการวัดความเข้มข้นก๊าซในการรมยากำจัดศัตรูผลผลิตการเกษตร: บทความปริทัศน์

Monitoring technology of gas concentration in fumigation: a review

ชูเกียรติ โชติกเสถียร¹, อธิวัฒน์ บุญมี², วรญา เนืองมัจฉา², วัชรพล ชยประเสริฐ^{3*}Chukiat Chotikasatian¹, Atiwat Boonmee², Woraya Neungmatcha², Watcharapol Chayaprasert^{3*}¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, นครปฐม, 73000¹Industrial Education, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140³ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140³Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University - Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140*Corresponding author: Tel: +66-34-351897, E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การรมยาถือเป็นวิธีการสำคัญในการควบคุมกำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บ ช่วยลดการสูญเสียในระหว่างการเก็บรักษาผลผลิตและผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตร เพื่อให้การรมยาประสบผลสัมฤทธิ์และปฏิบัติงานได้รับความปลอดภัย อุปกรณ์การตรวจวัดความเข้มข้นของสารรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น บทความปริทัศน์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการการทำงานของเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นสารรม และข้อพิจารณาในการเลือกงาน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการปฏิบัติงานเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติสำหรับนักวิจัย ผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม และผู้สนใจทั่วไป โดยครอบคลุมอุปกรณ์ลักษณะต่างๆ ได้แก่ หลอดวัดก๊าซเปลี่ยนสี, เซนเซอร์การนำความร้อน, เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า, เซนเซอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจาย และเซนเซอร์ออปติคัลอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ เนื้อหาของบทความมุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้ด้านเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการตรวจติดตามความเข้มข้น ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการประเมินผลสัมฤทธิ์ของการรมยา ในช่วงท้ายบทความ มีการวิเคราะห์ถึงแนวโน้มการพัฒนาระบบตรวจวัดความเข้มข้นสารรม เช่น การประยุกต์ใช้ Internet of Things และเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งจะมามีบทบาทสำคัญในการยกระดับมาตรฐานการรมยาในอนาคต

คำสำคัญ: การรมยา, ความเข้มข้นก๊าซ, การตรวจติดตามความเข้มข้นสารรม, เซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซ

Abstract

Fumigation is one of the most effective methods for controlling insect pests and reducing postharvest losses in stored products. Since accurate measurements of fumigant concentrations are keys to achieving high fumigation efficacy and ensuring personnel safety, this review article aims to provide overall understanding of different technologies in fumigant gas sensors. The working principles as well as criteria for selecting fumigant monitoring devices are discussed. The types of devices discussed include colorimetric tubes, thermal conductivity sensors, electrochemical sensors, non-dispersive infrared sensors and optical interferometers. This article primarily focuses on efficacy monitoring while briefly addressing safety and clearance monitoring to provide contextual comparisons. Future trends toward integrated monitoring systems and wireless sensors are also discussed.

Keywords: fumigation, gas concentration, fumigation concentration monitoring, gas sensor

1 บทนำ

ปัญหาแมลงศัตรูในโรงเก็บ (stored product insect) ที่กัดกินผลผลิตโดยเฉพาอย่างยิ่งธัญพืช (ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี) ผลิตภัณฑ์แปรรูป (แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง) หรือกากเมล็ดธัญพืชที่เหลือจากการผลิตเอทานอล (ethanol) (distillers

dried grains with solubles - DDGS) ในไซโล โกดัง หรือแม้แต่ระหว่างการขนส่ง เป็นต้นเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมาก (Affognon et al., 2015; Nath et al., 2024) วิธีการกำจัดแมลงดังกล่าวที่ได้รับการยอมรับว่ามีผลสัมฤทธิ์ (efficacy) มากที่สุดวิธีหนึ่งคือ การรมยา หรือ fumigation (Bond, 1984) ซึ่งเป็นการปล่อยก๊าซพิษเข้าสู่

ปริมาตรปิดสนิทเรียกว่า โครงสร้างการรวม (enclosure) เพื่อให้โมเลกุลก๊าซแทรกซึมเข้าไปตามช่องว่างและรอยแตกต่างๆ ภายในโครงสร้างการรวมได้อย่างทั่วถึง ในอดีต เมทิลโบรไมด์ (methyl bromide - CH_3Br) ถือเป็นสารรมที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม ภายใต้ข้อตกลงของพิธีสารมอนทรีออล (Montreal Protocol) (UNEP, 2026) ว่าด้วยสารทำลายชั้นบรรยากาศโอโซน เมทิลโบรไมด์ได้ถูกจัดเป็นสารควบคุมและถูกสั่งลดทอนการใช้งานจนถึงปัจจุบันถูกยกเลิกการใช้ในการรวมผลิตผลและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเพื่อการเก็บรักษาทั้งหมด โดยจะสามารถใช้ได้ในการรวมเพื่อการกักกันพืชและก่อนการส่งออก (quarantine and pre-shipment - QPS) เท่านั้น การเปลี่ยนผ่านนี้ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมเกษตรต้องหันมาพึ่งพาสารรมอื่นๆ มากขึ้นเช่น ฟอสฟีน (phosphine - PH_3) และ ซัลฟิวริลฟลูออไรด์ (sulfuryl fluoride - SO_2F_2) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สารรมอื่นๆ ก็มีคุณสมบัติเฉพาะซึ่งอาจทำให้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานได้ ยกตัวอย่างเช่น หากถูกใช้งานอย่างไม่เหมาะสม (การใช้สารรมในอัตราที่ไม่เหมาะสม, การรวมยาไม่ครบระยะเวลา, การควบคุมความเข้มข้นของก๊าซที่ไม่สม่ำเสมอ) แผลงจะมีความต้านทานต่อก๊าซฟอสฟีนเพิ่มขึ้นได้ (แผลงคือยา) (Reichmuth et al., 2004; Nayak et al., 2013; Pengkum et al., 2018) สำหรับซัลฟิวริลฟลูออไรด์ เนื่องจากยังคงมีต้นทุนที่สูง จึงทำให้การใช้งานยังอยู่ในวงจำกัด อีกทั้งสารดังกล่าวยังถูกจัดอยู่ในกลุ่มก๊าซเรือนกระจกที่มีค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนสูง (global warming potential) (Mühle et al., 2009) ส่งผลให้มีการเฝ้าระวังในการใช้งานมากขึ้น จะเห็นได้ว่า การพึ่งพาสูตรสำเร็จในการปฏิบัติงานรมยาที่ใช้แนวทางเดียวกันกับทุกสารรมในทุกสถานการณ์อาจไม่เพียงพอ แนวคิดการรวมยาแบบแม่นยำ (precision fumigation) จึงถูกพัฒนาขึ้น (Williams et al., 2000; Schneider et al., 2003) เพื่อยกระดับให้การดำเนินการรวมยาอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลการรวมยาจริงมากขึ้นกว่าการอาศัยประสบการณ์หรือค่ามาตรฐานทั่วไปเพียงอย่างเดียว แนวคิดการรวมยาแบบแม่นยำสามารถปรับใช้ได้กับทุกๆ สารรม โดยมีหัวใจสำคัญคือ การตรวจวัดความเข้มข้นสารรมอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการรวม เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับประเมินผลสัมฤทธิ์การกำจัดแมลง โดยทั่วไป ผลสัมฤทธิ์ของการรวมยาจะถูกประเมินจากร้อยละการตายของแมลง (percent mortality) ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถคาดการณ์ได้จากค่า Ct product (concentration-time product) (ความเข้มข้นสะสมตามเวลา) (Gandy and Chanter, 1976; Annis, 1999) ดังแสดงใน Eq. 1

$$Ct = \frac{-C_i \cdot HLT \cdot \left(2^{-\frac{t}{HLT}} - 1\right)}{\ln(2)} \quad (1)$$

ซึ่งก็คือ การหาปริพันธ์ (integration) ของสมการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นก๊าซในระหว่างการรวมยา ซึ่งอยู่ในรูปของการประมาณค่าจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง (first-order kinetic approximation) ดังแสดงใน Eq. 2 (Cryer, 2008; Chayaprasert and Maier, 2024)

$$C_t = \frac{C_i}{2^{\frac{t}{HLT}}} \quad (2)$$

โดยที่ C_i คือ ความเข้มข้นสารรม ณ เวลาเริ่มต้น (initial concentration), t คือ ระยะเวลาการรวมยาที่ผ่านไป (elapsed time), C_t คือ ความเข้มข้นสารรม ณ เวลา t และ HLT คือ half-loss time หรือระยะเวลาความเข้มข้นสารรมลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าคงที่

ในระหว่างการรวมยา หากความเข้มข้นสารรมลดต่ำกว่าระดับวิกฤตในช่วงเวลาใดช่วงเวลานึง อาจทำให้ค่า Ct product ไม่ถึงระดับที่สามารถกำจัดแมลงได้ทั้งหมด ซึ่งในระยะยาวจะเป็นการเร่งกระบวนการคัดเลือกประชากรแมลงที่ต้านทานสารรม นอกจากนี้ ผลการวัดความเข้มข้นสารรมยังเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงการสูญเสียสารรมจากการรั่วไหลออกจากโครงสร้างการรวม และการที่ก๊าซสารรมถูกดูดซับเข้าสู่วัสดุที่ถูกรวมยาอยู่ ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถปรับปริมาณการปล่อยสารรมหรือระยะเวลาการรวมให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมจริงที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ช่วยลดความเสี่ยงของการใช้สารรมเกินความจำเป็น ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อคุณภาพของผลิตผลจากการมีสารพิษตกค้างเกินค่ามาตรฐานความปลอดภัย (maximum residue limit - MRL) การเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานโดยไม่จำเป็น รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานจากการระบายก๊าซส่วนเกินสู่บรรยากาศ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การตรวจติดตามความเข้มข้นสารรม (fumigant concentration monitoring) จึงมีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จของการรวมยา ทั้งในแง่ของการประเมินผลสัมฤทธิ์การกำจัดแมลง และการใช้สารรมอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ ผู้ปฏิบัติงานจึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในหลักการทำงานและเงื่อนไขการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซแต่ละประเภทเช่น ช่วงการวัด (measurement range) หรือช่วงอายุการ (lifespan) ของเซนเซอร์ เป็นต้น เพื่อให้การรวมยาประสบผลสำเร็จ ทั้งในมิติของผลสัมฤทธิ์ทางชีวภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเชิงเทคนิคของอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นมักกระจุกตัวกระจายอยู่ในคู่มือของผู้ผลิตหรือเอกสารการใช้งานเฉพาะกิจ และแหล่งข้อมูลที่แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะและข้อจำกัดภายใต้บริบทของการรวมยากำจัดศัตรูผลผลิตทางการเกษตรยังคงมีอยู่น้อย บทความปริทัศน์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอหลักการทำงานของเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซในงานรมยากำจัดแมลงศัตรูในโรงเก็บ และข้อพิจารณาในการเลือกงาน เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการ

ปฏิบัติงานเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติสำหรับนักวิจัย ผู้ปฏิบัติงานภาคสนาม และผู้สนใจทั่วไป

2 บริบทการใช้งานอุปกรณ์วัดความเข้มข้นสารรม

การตรวจวัดความเข้มข้นสารรมในการรมยาสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทตามวัตถุประสงค์ได้แก่ (1) การวัดเพื่อตรวจติดตามผลสัมฤทธิ์ (efficacy monitoring) และ (2) การวัดเพื่อความปลอดภัย (safety/clearance monitoring) โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อจุดประสงค์หนึ่งมักไม่สามารถนำไปใช้เพื่ออีกวัตถุประสงค์ได้ (Chayaprasert and Maier, 2024) อุปกรณ์วัดเพื่อตรวจติดตามผลสัมฤทธิ์สามารถวัดค่าความเข้มข้นในย่านที่สูง โดยปกติอยู่ในช่วงหลักร้อยถึงหลักหมื่นส่วนในล้านส่วน (part per million - ppm) การวัดเพื่อความปลอดภัยมีเป้าหมายเพื่อยืนยันว่า หลังเสร็จสิ้นการรมยาโครงสร้างการรมได้รับการระบายอากาศ (ventilation) จนกระทั่งความเข้มข้นของสารรมลงถึงระดับปลอดภัยและสามารถอนุญาตให้ผู้ปฏิบัติงานกลับเข้าปฏิบัติ (re-entry) ในโครงสร้างการรมได้ อุปกรณ์ในกลุ่มนี้จึงต้องมีเซนซิวิตี (sensitivity) สูงเพื่อให้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นในระดับต่ำมากได้อย่างแม่นยำ ค่าความเข้มข้นระดับปลอดภัยดังกล่าวมักอ้างอิงจากค่า threshold limit value (TLV) ซึ่งกำหนดแตกต่างกันไปตามชนิดของสารรม ตัวอย่างเช่น ก๊าซฟอสฟีนมีค่า TLV ต่ำเพียง 0.3 ppm ทั้งนี้ บทความปริทัศน์นี้มุ่งเน้นการรวบรวมองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเข้มข้นสารรมเพื่อการตรวจติดตามผลสัมฤทธิ์ของการรมยาเป็นหลัก

3 หลักการและเทคนิคการวัดความเข้มข้นสารรม

อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซในงานรมยาผลิตผลและผลิตภัณฑ์แปรรูปทางการเกษตรมีหลักการทำงานที่หลากหลายแตกต่างกัน เทคโนโลยีที่พบได้บ่อยได้แก่

3.1 หลอดวัดก๊าซเปลี่ยนสี (colorimetric tube - CT)

หลอดวัดก๊าซเปลี่ยนสีเป็นหลอดแก้วบรรจุสารเคมีที่ทำหน้าทีเป็นรีเอเจนต์ (reagent) ติดตั้งใช้งานร่วมกับปั๊มดูดที่ใช้มือบีบหรือดึง ซึ่งได้รับการออกแบบให้มีปริมาตรการดูดคงที่และสอบเทียบมาเฉพาะสำหรับการวัดความเข้มข้นก๊าซ (Figure 1) เมื่อปั๊มดูดก๊าซสารรมที่ผสมอยู่ในอากาศผ่านหลอดวัดก๊าซ สารเคมีในหลอดจะทำปฏิกิริยากับสารรมและเปลี่ยนสี ความเข้มข้นสารรมจะเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับความยาวหรือความเข้มของแถบสีที่ปรากฏ ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากสเกล (scale) ที่พิมพ์กำกับบนหลอด วิธีการนี้มีข้อดีคือ โครงสร้างอุปกรณ์เรียบง่าย ไม่ต้องพึ่งพาระบบไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษาต่ำ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานภาคสนาม อย่างไรก็ตาม หลอดวัดก๊าซเป็นอุปกรณ์ใช้ครั้งเดียว (single-use) ทำให้ค่าใช้จ่ายในการใช้งานต่อครั้งสูงกว่าอุปกรณ์ลักษณะอื่น อีกทั้งอาจมีความไม่แน่นอนของการอ่านค่าด้วยสายตาของผู้ปฏิบัติงาน

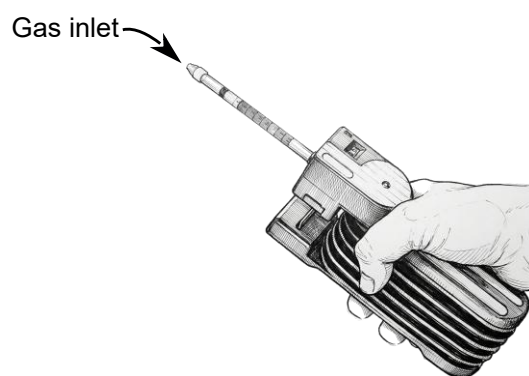


Figure 1 A hand pump with a colorimetric tube.

Adapted from: Wuensch Sales (2026)

3.2 เซนเซอร์การนำความร้อน (thermal conductivity sensor - TC)

เซนเซอร์การนำความร้อนอาศัยการวัดความแตกต่างของค่าการนำความร้อนระหว่างสารรมและก๊าซอ้างอิง (มักเป็นอากาศ) ภายในโครงสร้างเซนเซอร์จะประกอบด้วยเส้นลวดนำความร้อน (heated filament) หรือเทอร์มิสเตอร์ที่ได้รับกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง และถูกจัดเรียงในวงจรวิสต์อนบริดจ์ (Wheatstone bridge) (Figure 2a) เมื่อก๊าซสารรมผสมอากาศไหลผ่านเซนเซอร์ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากเส้นลวดจะเปลี่ยนไปตามความสามารถในการนำความร้อนเฉพาะตัวของก๊าซชนิดนั้นๆ ส่งผลให้อุณหภูมิและค่าความต้านทานไฟฟ้าของเส้นลวดเปลี่ยนแปลง ก่อให้เกิดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage signal) ในวงจรที่แปรผันตรงกับความเข้มข้นสารรม เซนเซอร์ลักษณะนี้เหมาะกับการวัดในย่านความเข้มข้นสูงระดับ % (เปอร์เซ็นต์) หรือ g/m^3 (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) เช่น เครื่อง Fumiscope (Key Chemical & Equipment Co, 2022) ดังแสดงใน Figure 2b เนื่องจากเซนเซอร์ทำงานบนหลักการทางอุณหพลศาสตร์โดยปราศจากปฏิกิริยาเคมีหรืออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ทำให้เซนเซอร์ไม่เสื่อมสลายไปตามปริมาณการใช้งาน (non-depleting) ส่งผลให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ตอบสนองค่อนข้างรวดเร็ว และมีค่าบำรุงรักษาต่ำ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ก๊าซตัวอย่างมีส่วนประกอบเป็นสารรมหลากหลายชนิด (mixtures of fumigants) เซนเซอร์การนำความร้อนมักให้ผลการวัดคลาดเคลื่อน (Bond, 1984) เนื่องจากเซนเซอร์มีความจำเพาะเจาะจงต่ำ (low selectivity) จึงไม่สามารถแยกแยะชนิดของก๊าซได้อย่างเด็ดขาดหากมีก๊าซแปลกปลอมหรือก๊าซหลายชนิดผสมกัน

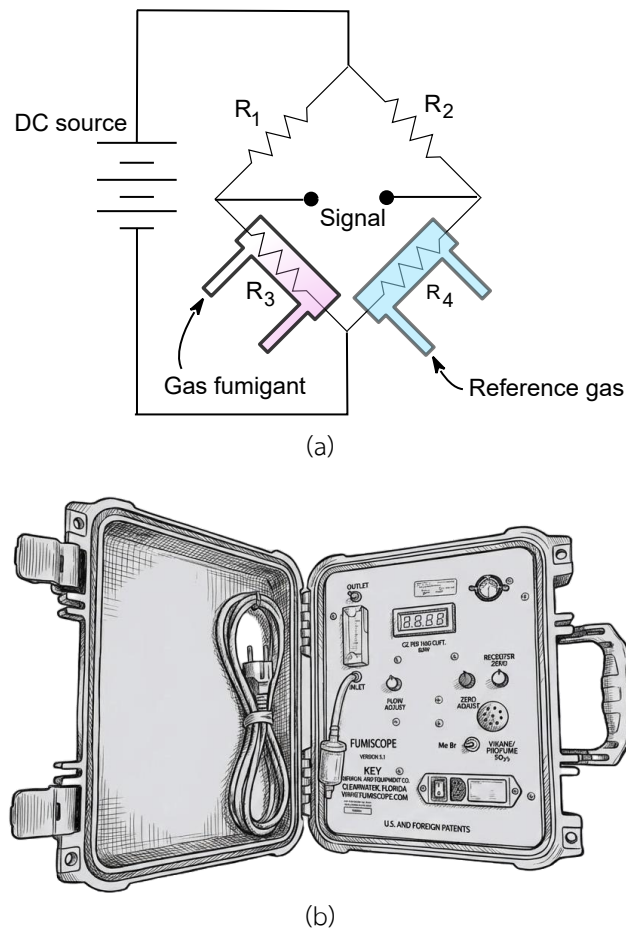


Figure 2 (a) An example of a Wheatstone bridge circuit of a thermal conductivity gas sensor and (b) Fumiscope.

Adapted from: (a) Wikimedia Commons contributors (2020) and (b) SGT Service (2026)

3.3 เซนเซอร์เคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor - EC)

เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) โดยภายในกระเปาะเซนเซอร์จะประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้าได้แก่ working electrode (WE), reference electrode (RE) และ counter electrode (CE) ซึ่งถูกห่อหุ้มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) (Figure 3) เมื่อสารมลพิษอากาศไหลผ่านเยื่อแผ่นเมมเบรน (membrane) โมเลกุลก๊าซจะแพร่ผ่านไปขั้ว WE และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน ส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนและสร้างกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กในระดับไมโครแอมแปร์ (microampere) ที่ขั้ว CE จะเกิดปฏิกิริยาสมดุลในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อรักษาสมาดุลประจุของระบบ ขั้ว RE ทำหน้าที่ควบคุมและคงค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงให้เสถียร ช่วยให้การควบคุมศักย์ที่ขั้ว WE มีความแม่นยำมากขึ้น ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของสารมลพิษ กระแสระดับไมโครแอมแปร์นี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันผ่านวงจรโพเทนชิโอสแตต (potentiostat) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว WE และ RE ให้คงที่

พร้อมทั้งขยายสัญญาณเอาต์พุต (output signal) ก่อนส่งต่อไปยังระบบแสดงผลหรือบันทึกข้อมูลต่อไป

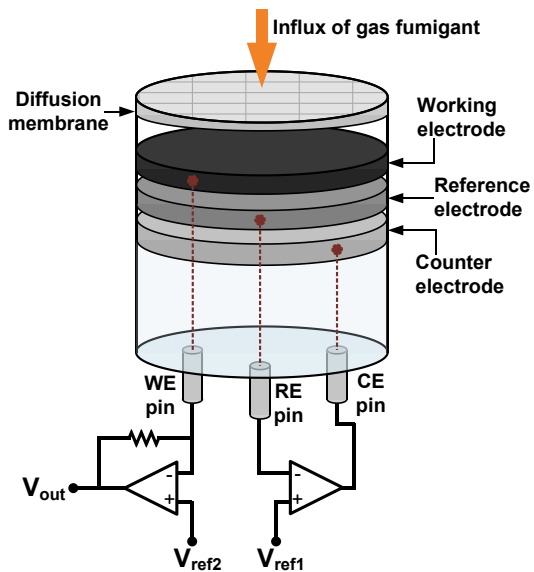


Figure 3 A simplified schematic of an electrochemical gas sensor.

จุดเด่นของเซนเซอร์เคมีไฟฟ้ามีเซนซิวิตีที่มีความละเอียดของการวัดถึงระดับ 1 ppm หรือต่ำกว่า สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะเป็นเชิงเส้นสะดวกต่อการคำนวณประมวลผล เซนเซอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ (low power consumption) จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ไร้สายหรือเครื่องมือพกพาที่ทำงานผ่านแบตเตอรี่ได้ต่อเนื่องยาวนาน อีกทั้ง ยังมีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้เซนเซอร์กลุ่มนี้ จำเป็นต้องพิจารณาถึง ครอสเซนซิวิตี (cross-sensitivity) หรือความอ่อนไหวต่อก๊าซที่ไม่ใช่ก๊าซเป้าหมาย เนื่องจาก โดยทั่วไปวัสดุอิเล็กโทรดมักตอบสนองต่อก๊าซชนิดอื่นที่ไม่ใช่ก๊าซเป้าหมาย ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์ที่ถูกออกแบบสำหรับวัดความเข้มข้นก๊าซฟอสฟีน อาจแสดงค่าผิดพลาดหากมีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ปะปนอยู่ในก๊าซตัวอย่าง ข้อพิจารณาประการถัดมาคือ ความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิและความชื้น (temperature and humidity dependence) ซึ่งทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีความผิดพลาดจากค่าที่สอบเทียบไว้เมื่อเซนเซอร์ถูกใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ร้อนหรือแห้งจัด นอกจากนี้ เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเสื่อมสภาพตามปริมาณการใช้งาน อายุการใช้งานของเซนเซอร์กลุ่มนี้จึงจำกัดอยู่ในช่วง 1-3 ปี

3.4 เซนเซอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจาย (non-dispersive infrared - NDIR)

เซนเซอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจายมีหลักการทำงานตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ซึ่งอธิบายว่า ความเข้มแสงที่ถูกดูดกลืนจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นก๊าซและระยะทางที่แสงเดินทางผ่านก๊าซนั้น ดังแสดงใน Eq. 3

$$A = \varepsilon \cdot c \cdot l \quad (3)$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance), ε คือ ค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี (molar absorptivity), c คือ ความเข้มข้นก๊าซเป้าหมาย และ l คือ ระยะทางเชิงแสง (optical path length) ที่แสงต้องเดินทางผ่านก๊าซ Figure 4 แสดงโครงสร้างหลักของเซนเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซด้วยเทคนิค NDIR ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคือ แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR source) ที่ส่องแสงผ่านหลอดนำแสง (optical tube) ผนังภายในหลอดจะถูกเคลือบด้วยวัสดุสะท้อนแสง ที่ปลายหลอดจะมีตัวกรองแสง (optical filter) ซึ่งจะยอมให้แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นตรงกับความถี่การสั่นพ้องของโมเลกุลก๊าซเป้าหมาย (vibrational resonance) ผ่านได้ แสงที่ส่องผ่านตัวกรองจะวัดความเข้มด้วยตัวตรวจจับ (IR detector) Eq. 3 สามารถถูกจัดให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง ณ แหล่งกำเนิด (I), ความเข้มแสง ณ ตัวตรวจจับ (I_0) และความเข้มข้นก๊าซเป้าหมาย (c) ได้ดังแสดงใน Eq. 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นจำเพาะส่องผ่านก๊าซสารรวมโมเลกุลก๊าซจะดูดกลืนพลังงาน ทำให้ความเข้มแสงที่ตรวจจับได้ลดลงตามสัดส่วนของความเข้มข้น

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot c \cdot l} \quad (4)$$

เมื่อ $k = \ln(10) \cdot \varepsilon$

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของก๊าซเป้าหมาย ณ ความยาวคลื่นเฉพาะ (absorption coefficient)

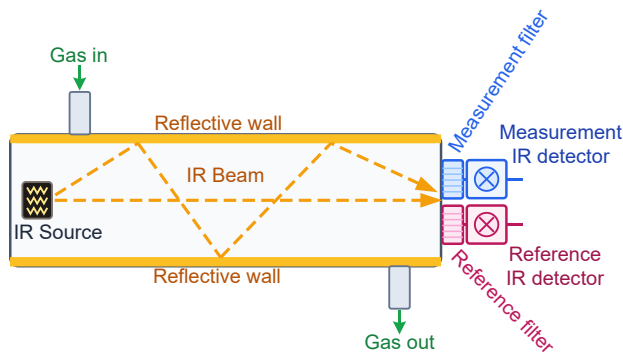


Figure 4 A simplified schematic of an NDIR gas sensor.

เซนเซอร์ NDIR วัดคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซตัวอย่างโดยไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ จึงแทบไม่เกิดการเสื่อมสภาพของเซนเซอร์ ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเซนเซอร์ประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ เซนเซอร์ NDIR จะมีคอสเซนซิวิตีต่ำ เนื่องจาก สามารถเลือกใช้ตัวกรองแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นให้ตรงกับความถี่การสั่นพ้องของโมเลกุลก๊าซสารรวมได้ และมักไม่มีก๊าซอื่นที่มีความถี่การสั่นพ้องอยู่ในช่วงเดียวกัน เพื่อแก้ปัญหาความเสื่อมของแหล่งกำเนิดแสงตามกาลเวลา เซนเซอร์ NDIR ขึ้น

สูงมักออกแบบให้มีช่องสัญญาณอ้างอิง (reference channel) ซึ่งวัดแสงในย่านความยาวคลื่นที่ไม่มีก๊าซใดดูดกลืน เพื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบและหักล้างค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการวัด ในการประมวลผลสัญญาณจำเป็นต้องมีการชดเชยผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดัน และปริมาณความชื้นในอากาศ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้คือต้องการพลังงานไฟฟ้าในการขับแหล่งกำเนิดแสง จึงอาจทำให้อุปกรณ์ใช้งานในลักษณะพกพามีน้ำหนักมาก ณ ปัจจุบันเซนเซอร์ NDIR ยังคงมีราคาสูงกว่าเซนเซอร์ประเภทอื่นๆ อยู่ ถึงแม้ว่าจะมีการปรับตัวลดลงอย่างต่อเนื่อง

3.5 เซนเซอร์ออปติคัลอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (optical interferometer - OI)

เป็นเทคนิคที่ใช้หลักการวัดความแตกต่างของดัชนีหักเหแสง (refractive index) ระหว่างก๊าซตัวอย่างกับก๊าซอ้างอิง (มักเป็นอากาศ) เป็นตัวแปรหลักในการคำนวณความเข้มข้น กลไกหลักของการวัดคือ การแยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดออกเป็นสองเส้นทางได้แก่ ช่องตัวอย่าง (sample cell) และช่องอ้างอิง (reference cell) (Figure 5) เมื่อองค์ประกอบของก๊าซในช่องตัวอย่างเปลี่ยนแปลง ดัชนีหักเหแสงก็จะเปลี่ยนตาม ทำให้ระยะทางเชิงแสง (optical path length) แตกต่างจากช่องอ้างอิง ผลที่เกิดตามมาคือ การเลื่อนเฟส (phase shift) ของคลื่นแสง และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของลวดลายการแทรกสอด (interference pattern) ที่ตรวจจับได้ด้วยตัวรับสัญญาณแสง สัญญาณที่ได้จะได้รับการประมวลผลเชิงดิจิทัล (digital processing) ร่วมกับการแปลงฟูเรียร์ (Fourier transform) เพื่อวิเคราะห์การเลื่อนเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป และคำนวณความเข้มข้นของก๊าซได้

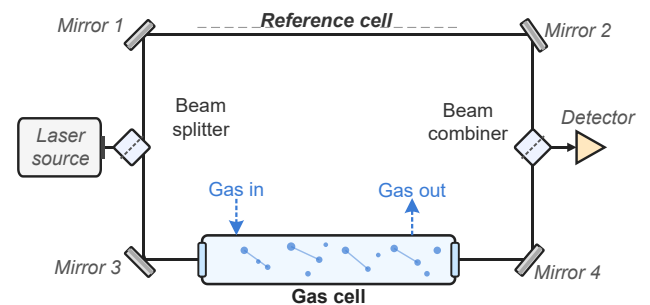


Figure 5 A simplified schematic of an OI gas sensor.

เทคโนโลยีนี้ไม่พึ่งพาปฏิกิริยาเคมีจึงมีเสถียรภาพสูง อีกทั้งยังมีความสามารถในการรองรับก๊าซหลายชนิดภายในเครื่องเดียว (multi-gas capability) เนื่องจากเทคนิค OI ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเหแสงโดยรวม จึงสามารถกำหนดสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับก๊าซแต่ละชนิดหรือส่วนผสมแต่ละแบบไว้ในซอฟต์แวร์ ผู้ใช้งานเพียงเลือกชนิดก๊าซในโปรแกรม เซนเซอร์จะประมวลผลด้วยพารามิเตอร์ (parameter) ของแบบจำลองที่สอดคล้องกัน โดยไม่จำเป็นต้อง

เปลี่ยนโมดูลเซนเซอร์ นอกจากจะใช้วัดความเข้มข้นของก๊าซ เมทิลโบรไมด์และฟอสฟีนแล้ว เครื่องวัดความเข้มข้นด้วยหลักการ OI ยังสามารถใช้ได้กับก๊าซอีเทนไดไนล์ (ethanedinitrile) ซึ่งเป็นสารรมที่ใช้ในการรมท่อนซุง (log fumigation) (Environmental Protection Authority, 2019) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญของหลักการ OI อยู่ที่ความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดัน เนื่องจากดัชนีหักเหของก๊าซแปรผันตามความหนาแน่นของก๊าซ หากไม่มีการควบคุมหรือการชดเชยที่แม่นยำ ความผันผวนของอุณหภูมิ และ/หรือความดันบรรยากาศ อาจส่งผลต่อค่าความเข้มข้นก๊าซที่วัดได้

4 หน่วยวัดความเข้มข้นสารรม

นอกจากหน่วย ppm แล้ว ความเข้มข้นสารรมมักถูกแสดงในหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m^3) กล่าวคือ หน่วยความเข้มข้นโดยปริมาตร โดยที่การแปลงค่าระหว่างทั้งสองหน่วยสามารถทำได้โดยใช้ Eq. 5 (Chayaprasert and Maier, 2024)

$$ppm = \frac{c \cdot R \cdot T}{M \cdot P} \cdot 10^6 \quad (5)$$

โดยที่ c คือ ความเข้มข้นสารรม (g/m^3), R คือ ค่าคงที่ก๊าซอุดมคติ ($82.05 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$), T คือ อุณหภูมิ (K), M คือ มวลโมเลกุลสารรม (g/mol), P คือ ความดัน (atm) หน่วยความเข้มข้นโดยปริมาตร อีกหนึ่งหน่วยที่นิยมใช้คือ ออนซ์ต่อพันลูกบาศก์ฟุต (oz/Mcf หรือ oz/1,000 ft^3) ทั้งนี้ สัดส่วนระหว่างหน่วย กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และหน่วย ออนซ์ต่อพันลูกบาศก์ฟุต มีค่าประมาณ 1 (1.0012) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการแปลงหน่วยความเข้มข้นสารรมใดๆ อย่างแม่นยำ จำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิ ความดัน และมวลโมเลกุลของสารรมนั้นๆ

1 Table 1 Comparison of gas concentration monitoring technologies used in fumigation applications

Type	Fumigant (Example)	Application	Examples of commercial models	Measurement range	Accuracy	Features	Usage considerations
CT	PH ₃	Efficacy	Dräger tubes (Dräger, 2022)	25 - 10,000 ppm	±10 - 15% (standard deviation)	Low initial cost, and no power source needed	Single-use, and low accuracy
	Multiple	Clearance		0.1 - 3, 1 -5, 0.1 - 50 ppm*	±15 - 30% (standard deviation)*		
TC	CH ₃ Br and SO ₂ F ₂	Efficacy	Fumiscopes (Key Chemical & Equipment Co, 2022)	0 - 2,999 g/m ³	±2% (full scale)	Simple and rugged construction	Low gas selectivity
EC	PH ₃	Efficacy	Silo-Chek (The Canary Company, 2022)	0 - 2,000 ppm	Data not available	High sensitivity and low power consumption	Prone to cross-sensitivity, and short lifespan
	PH ₃	Clearance	DrägerSensor XXS PH ₃ (Dräger, 2026)	0 - 20 ppm	±2%		
NDIR	PH ₃	Efficacy	PM100 (Spectros Instruments, 2026)	0 - 10,000 ppm	±3% (full scale)	High accuracy, non-depleting sensors, and low cross-gas interference	High equipment cost, and consumes more electrical power
	SO ₂ F ₂	Clearance	Fumispec Lo (Uniphos Envirotronic, 2026)	0 - 100 ppm	±2%		
OI	CH ₃ Br, SO ₂ F ₂ and PH ₃	Efficacy	FI-8000 (Riken Keiki Co, 2021)	0 - 50 to 0 - 200 g/m ³ *	±3%	Multiple-gas capability	Compensation for environmental effects needed

2 *Depending on the model targeting a specific fumigant

3

Table 2 Threshold limit values (TLV) and typical working concentrations of some common fumigants

Fumigant	TLV	Typical concentrations during fumigation
CH ₃ Br	1.0 ppm (Graver, 2004)	515 - 25,700 ppm (Graver, 2004)
PH ₃	0.3 ppm (Graver, 2004)	70 - 3,500 ppm (Graver, 2004)
SO ₂ F ₂	5.0 ppm* (NIOSH, 2014)	30,720 ppm** (Douglas Products, 2017a)

*One of the product labels (Douglas Products, 2017a) require below 1.0 ppm for re-entry

**Maximum allowed concentration

5 ข้อพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์วัดความเข้มข้นในงานรมยา

ในการเลือกอุปกรณ์วัดความเข้มข้นสารรม คุณสมบัติทางเทคนิคของเซนเซอร์ไม่ใช่ปัจจัยสำคัญเพียงปัจจัยเดียวที่ต้องคำนึงถึงเท่านั้น การเลือกใช้งานเซนเซอร์ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยรอบด้านอื่นๆ ร่วมด้วย ข้อดี ข้อจำกัด และบริบทการใช้งานที่เหมาะสมของเซนเซอร์แต่ละประเภทถูกสรุปอยู่ใน Table 1 ซึ่งสามารถใช้เป็นกรอบเบื้องต้นในการพิจารณาเลือกใช้งานเซนเซอร์ในงานรมยา ประเด็นพื้นฐานที่สุดในการเลือกอุปกรณ์คือ การเลือกอุปกรณ์สอดคล้องกับชนิดของสารรม สารรมแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่กำหนดข้อจำกัดของเทคโนโลยีการตรวจวัดโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ฟอสฟีนมีคุณสมบัติกัดกร่อนโลหะบางชนิดแต่สามารถตอบสนองได้ดีกับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า ในกรณีของ เมทิลโบรไมด์และซัลฟิวไรลฟลูออไรด์ซึ่งมีเสถียรภาพทางเคมีสูง อาจไม่เหมาะกับเซนเซอร์เคมีไฟฟ้า การวัดจึงมักใช้เซนเซอร์การนำความร้อน หรือฟิงพาเทคโนโลยี NDIR หรือ OI ประเด็นพื้นฐานถัดมาคือ การพิจารณาช่วงการวัดที่ต้องสอดคล้องกับระดับความเข้มข้นเป้าหมายที่ต้องการวัด Table 2 แสดงตัวอย่างความเข้มข้นสำหรับการรมยาโดยทั่วไป และความเข้มข้นระดับปลอดภัยของเมทิลโบรไมด์, ฟอสฟีน และซัลฟิวไรลฟลูออไรด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าระดับความเข้มข้นสารรมเพื่อหวังผลสัมฤทธิ์ (efficacy) ของการรมยา และระดับความเข้มข้นปลอดภัยมีความแตกต่างกันหลายเท่า ดังนั้น อุปกรณ์วัดความเข้มข้นสารรมสำหรับสองวัตถุประสงค์นี้จึงไม่สามารถใช้งานร่วมกันได้ นอกจากนี้ ช่วงการวัดของอุปกรณ์ต้องสอดคล้องกับอัตราการให้สารรม (dose rate) ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นก๊าซโดยตรง หากอุปกรณ์มีช่วงการวัดแคบเกินไป ความเข้มข้นสารรมในช่วงเริ่มต้นอาจมีค่าสูงเกินกว่าที่อุปกรณ์จะวัดค่าได้ ยกตัวอย่างเช่น เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าสำหรับก๊าซฟอสฟีนโดยทั่วไปมีช่วงวัดที่ 0 - 2,000

ppm ซึ่งหากมีการใช้สารรมที่อัตราสูง จะไม่สามารถวัดความเข้มข้นในช่วงเริ่มต้นของการรมได้ ความแม่นยำ (accuracy) เป็นปัจจัยสำคัญในการยืนยันผลสัมฤทธิ์การรมยาและความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องพิสูจน์ผลการรมยาเพื่อการส่งออกหรือการตรวจสอบย้อนกลับ (traceability) ตามระบบคุณภาพ (quality system) หากอ้างอิงข้อมูลจากผู้ผลิต สำหรับอุปกรณ์ใหม่โดยทั่วไปจะมีความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 2\%$ ถึง $\pm 3\%$ full-scale (Riken Keiki Co, 2021; Spectros Instruments, 2022; Uniphos Envirotronic, 2022) ในระหว่างอายุการใช้งาน อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซทุกประเภทต้องได้รับการสอบเทียบ (calibration) ตามรอบระยะเวลาที่กำหนด (โดยทั่วไป 1 - 2 ครั้งต่อปี) นอกจากนี้ ก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งาน อุปกรณ์ควรได้รับทวนสอบ (verification) โดยการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซที่ทราบค่า เพื่อยืนยันความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ก่อนการใช้งานในแต่ละครั้ง เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซมักมีการติดตั้งฟิวเตอร์ (filter) และตัวดักความชื้น (moisture trap) เพื่อกำจัดฝุ่นละอองและความชื้นส่วนเกินก่อนที่ก๊าซสารรมจะเข้าสู่เครื่อง ผู้ปฏิบัติงานจึงควรให้ความสำคัญกับการตรวจสอบและเปลี่ยนวัสดุชุดความชื้นรวมถึงฟิวเตอร์อย่างสม่ำเสมอตามรอบการบำรุงรักษาและสภาพการใช้งานจริง (Regulation and Assurance Branch, 2018) นอกจากนี้ประเด็นที่กล่าวถึงข้างต้นแล้ว ปัจจัยอื่นๆ ที่ควรพิจารณาได้แก่ ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (ราคาจัดซื้อ รวมถึงค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบและการซ่อมบำรุง), ความทนทานของอุปกรณ์, ความง่ายต่อการใช้งานภาคสนาม, ความสามารถอื่นๆ เช่น การทำงานโดยอัตโนมัติ หรือการเชื่อมต่อกับ Internet of Things (IoT) เพื่อการเข้าถึงข้อมูลระยะไกล เป็นต้น

6 แนวโน้มการพัฒนาในอนาคต

ในต่างประเทศ ทิศทางการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นสารรมกำลังเปลี่ยนผ่านจากเครื่องมือวัดเชิงเดี่ยว (stand alone) ไปสู่ระบบตรวจติดตามแบบบูรณาการ (integrated monitoring system) ที่เชื่อมโยงข้อมูลความเข้มข้นสารรม เข้ากับการวิเคราะห์ และการควบคุมกระบวนการรมยาอย่างเป็นระบบ ยกตัวอย่างเช่น Fumiguide (Douglas Products, 2017b) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ (software) เพื่อการวางแผน บริหารจัดการ ควบคุม วิเคราะห์และติดตามผลการรมยาด้วยสารรมซัลฟิวไรลฟลูออไรด์ ในขั้นตอนการวางแผนระบบจะช่วยกำหนดปริมาณการปล่อยสารรมหรือโดส (dose) ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากชนิดและช่วงชีวิต (life stage) ของแมลงเป้าหมายที่ต้องการกำจัด ด้านการบริหารจัดการ ข้อมูลทั้งปริมาณและตำแหน่งที่มีการปล่อยสารรม รวมถึงจัดเก็บข้อมูลผลการวัดความเข้มข้นก๊าซจากจุดต่างๆ จะถูกบันทึกไว้ในซอฟต์แวร์อย่างเป็นระบบ ในขณะที่ส่วนของการควบคุม (control) ระบบจะทำการประมวลผลเพื่อประมาณอัตราการรั่วไหล (leakage rate) ของสารรม ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงาน

สามารถตัดสินใจเกี่ยวกับความจำเป็นในการปล่อยสารรมเพิ่มเติม (top-up) เพื่อรักษาความเข้มข้นให้เป็นไปตามเกณฑ์ ในมิติของการวิเคราะห์ผล ระบบจะคำนวณค่า Ct product เพื่อประเมินร้อยละการตายของแมลง

ความก้าวหน้าด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (microelectronics) และ IoT ช่วยสนับสนุนให้เกิดการพัฒนา ระบบตรวจวัดก๊าซอัตโนมัติเชิงพาณิชย์สามารถเชื่อมต่อข้อมูลไปยังเว็บหรือสมาร์ตโฟนแอปพลิเคชัน (web or smartphone applications) (Spectros Instruments, 2022; Uniphos Envirotronic, 2022) ซึ่งทำให้การเข้าถึงข้อมูลการรมยาสะดวกรวดเร็วกว่าขึ้น ระบบดังกล่าวยังช่วยลดข้อผิดพลาดในการปฏิบัติงานจากความสามารถในการส่งสัญญาณเตือน หากตรวจพบการลดลงของความเข้มข้นก๊าซอย่างผิดปกติ นอกจากนี้ ในอนาคต ระบบอาจถูกพัฒนาให้บูรณาการเข้ากับการตรวจสอบย้อนกลับ, ระบบบริหารจัดการคุณภาพ (quality management system), ระบบวางแผนทรัพยากรองค์กร (enterprise resource planning) หรือระบบออกใบรับรองสุขอนามัยพืชในรูปแบบดิจิทัล ต่อไปอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่กำลังได้รับการพัฒนา คือ เทคโนโลยีเซนเซอร์ไร้สาย (wireless sensor) (Brabec et al., 2019; Brabec et al., 2022; Centaur Analytics, 2023) โดยโครงสร้างของเซนเซอร์ถูกออกแบบให้สามารถป้องกันก๊าซ (gas proof) ไม่สามารถรั่วซึมเข้าถึงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในได้ การกำหนดตำแหน่งตรวจวัดความเข้มข้นสารรมจึงมีความสะดวกมากขึ้นจากเดิมที่ต้องอาศัยการวางท่อพลาสติกจากภายในโครงสร้างการรมออกมาสู่อุปกรณ์วัดความเข้มข้นก๊าซภายนอก อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีเซนเซอร์ไร้สายดังกล่าวยังคงอยู่ในช่วงระหว่างการพัฒนา และพัฒนา ซึ่งยังมีประเด็นเชิงเทคนิคที่ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น การับสัญญาณเมื่อต้องติดตั้งเซนเซอร์ภายในโครงสร้างโรงเก็บที่เป็นโลหะ เป็นต้น พัฒนาการต่างๆ ข้างต้นสะท้อนให้เห็นว่าเทคโนโลยีการตรวจวัดความเข้มข้นสารรมมีส่วนสำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความโปร่งใสของกระบวนการรมยาโดยรวม อีกทั้ง ยังเป็นการยกระดับมาตรฐานการรมยา ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร

7 เอกสารอ้างอิง

Affognon, H., Mutungi, C., Sanginga, P., Borgemeister, C. 2015. Unpacking postharvest losses in sub-Saharan Africa: a meta-analysis. *World Development* 66, 49-68.

Annis, P.C. 1999. The relative effects of concentration, time, temperature and other factors in fumigant treatments. In: Jin, Z., Liang, Q., Liang, Y., Tan, X., Guan, L. (Eds). *Proceedings of the Seventh International Working Conference on Stored Product Protection*, 331-337. Sichuan

Publishing House of Science and Technology, Chengdu, China. 14-19 October 1998, Beijing, China.

Bond, E.J. 1984. *Manual of fumigation for insect control*, FAO Plant Production and Protection Papers - 54, Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Brabec, D., Kaloudis, E., Athanassiou, C.G., Campbell, J., Agrafioti, P., Scheff, D.S., Bantas, S., Sotioudas, V. 2022. Fumigation Monitoring and Modeling of Hopper-Bottom Railcars Loaded with Corn Grits. *Journal of Biosystems Engineering* 47, 358-369.

Brabec, D.L., Campbell, J., Arthur, F., Casada, M., Tilley, D., Bantas, S. 2019. Evaluation of Wireless Phosphine Sensors for Monitoring Fumigation Gas in Wheat Stored in Farm Bins. *Insects* 10(5), 121.

Centaur Analytics. 2023. Intelligent pest management and fumigation. Centaur Analytics Inc. Available at: <https://centaur.ag/pest-control-and-fumigations/>. Accessed on 19 March 2023.

Chayaprasert, W., Maier, D.E. 2024. Fumigation process using chemicals and controlled or modified atmospheres. In: Jayas, D.S. (Ed.), *Control and Management of Pests in Stored Products* (pp. 190-240). Boca Raton, Florida: CRC Press.

Cryer, S.A. 2008. Predicted gas loss of sulfuryl fluoride and methyl bromide during structural fumigation. *Journal of Stored Products Research* 44(1), 1-10.

Douglas Products. 2017a. Applicator manual for ProFume[®] gas fumigant. (Liberty, Missouri, United States of America: Douglas Products and Packaging Co LLC.

Douglas Products. 2017b. Maximizing resources: Fumiguide[™] program helps flour mill achieve fumigation success. (Liberty, Missouri, United States of America: Douglas Products and Packaging Company LLC.

Dräger. 2022. Dräger short-term tubes. Drägerwerk AG & Co. KGaA. Available at: https://www.draeger.com/en_seeur/Products/Short-term-Tubes?s=354. Accessed on 22 February 2022.

- Dräger. 2026. DrägerSensor® XXS PH₃. Drägerwerk AG & Co. KGaA. Available at: <https://static.draeger.com/www/sensors/en/6810886.pdf>. Accessed on 30 April 2026.
- Environmental Protection Authority. 2019. Application for approval to import EDN for release. (Wellington, New Zealand: Environmental Protection Authority, New Zealand Government.
- Gandy, D.G., Chanter, D.O. 1976. Some effects of time, temperature of treatment and fumigant concentration on the fungicidal properties of methyl bromide. *Annals of Applied Biology* 82(2), 279–290.
- Graver, J.v.S. 2004. Guide to Fumigation Under Gas-Proof Sheets. (Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Key Chemical & Equipment Co. 2022. Fumiscope Version 5.1 Manual. Key Chemical & Equipment Co. Available at: <http://www.fumiscope.com/pdf/51englishlanguagefumiscopemanual.pdf>. Accessed on 25 February 2022.
- Mühle, J., Huang, J., Weiss, R.F., Prinn, R.G., Miller, B.R., Salameh, P.K., Harth, C.M., Fraser, P.J., Porter, L.W., Grealley, B.R., O'Doherty, S., Simmonds, P.G., Krummel, P.B., Steele, L.P. 2009. Sulfuryl fluoride in the global atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114, D05306.
- Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C.M., Zare, D. 2024. Research and technologies to reduce grain postharvest losses: a review. *Foods* 13(12), 1875.
- Nayak, M.K., Holloway, J.C., Emery, R.N., Pavic, H., Bartlett, J., Collins, P.J. 2013. Strong resistance to phosphine in the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae): its characterisation, a rapid assay for diagnosis and its distribution in Australia. *Pest Management Science* 69, 48–53.
- NIOSH. 2014. Sulfuryl fluoride: Immediately dangerous to life or health concentrations (IDLH). The National Institute for Occupational Safety and Health. Available at: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/2699798.html>. Accessed on 24 February 2026.
- Pengkum, K., Uraichuen, J., Suthisut, D. 2018. The Proper Phosphine Fumigation to Control Flat Grain Beetle Resistance Strains. (Bangkok, Thailand: Postharvest and Processing Research and Development Division, Department of Agriculture. (in Thai)
- Regulation and Assurance Branch. 2018. Methyl bromide fumigation enclosure gas monitoring. Ministry for Primary Industries, New Zealand Government. Available at: <https://www.mpi.govt.nz/dmsdocument/29825/sitemap>. Accessed on 29 April 2026.
- Reichmuth, C.H., Klementz, D., Rassmann, W., Stenglein, M., Münzel, M. 2004. Phosphine resistance in the stored product insect pests the rusty grain beetle *Cryptolestes ferrugineus* and the granary weevil *Sitophilus granarius*. In: Donahaye, E.J., Navarro, S., Bell, C., Jayas, D., Noyes, R., Phillips, T.W. (Eds). *Proceedings of the International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products*, 613. FTIC Ltd. Publishing, Israel, Gold-Coast, Australia.
- Riken Keiki Co, L. 2021. Optical Interferometric Gas Monitor: Model FI-8000. Riken Keiki Co., Ltd. Available at: https://product.rikenkeiki.co.jp/assets/img/products/62/cat/PC3E-0421-250400S_FI-8000.pdf. Accessed on 30 January 2026.
- Schneider, B., Voglewede, C., Shodrock, D. 2003. Developing precision fumigation plans using the ProFume Fumiguide. In. 2003 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, San Diego, CA.
- SGT Service. 2026. Fumiscope. SGT Service (Thailand) Co., Ltd. Available at: <https://www.sgt-service.co.th/products/0-5-FUMISCOPE>. Accessed on 20 January 2026.
- Spectros Instruments. 2022. PM400 phosphine monitor. Spectros Instruments Inc. Available at: https://www.spectrosinstruments.com/prod_pm400.html. Accessed on 14 February 2022.

- Spectros Instruments. 2026. PM100 series: phosphine monitor. Spectros Instruments Inc. Available at: <https://www.spectrosinstruments.com/pm100>. Accessed on 30 April 2026.
- The Canary Company. 2022. Silo-Chek. The Canary Company Pty. Ltd. Available at: <http://www.canaryco.com.au/silo-chek/>. Accessed on 14 February 2023.
- UNEP. 2026. The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer. United Nations Environment Programme. Available at: <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol>. Accessed on 7 November 2022.
- Uniphos Envirotronic. 2022. FumiTrack Multiport with Expansion Module. Uniphos Envirotronic Pvt. Ltd. Available at: <https://uniphos-envirotronic.com/fumigation-monitoring-equipment/phosphine/multi-port-with-expansion-module/>. Accessed on 14 February 2022.
- Uniphos Envirotronic. 2026. Fumispec Lo. Uniphos Envirotronic Pvt. Ltd. Available at: <https://uniphos-envirotronic.com/fumigation-monitoring-equipment/sulphuryl-fluoride/fumispec-lo/>. Accessed on 25 February 2026.
- Wikimedia Commons contributors. 2020. File:Thermal Conductivity Detector nl.svg. Wikimedia Commons. Available at: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Thermal_Conductivity_Detector_nl.svg&oldid=498660584. Accessed on 20 February 2026.
- Williams, R.E., Prabhakaran, S., Schneider, B.M. 2000. Monitoring for precision fumigant application in food-processing plants. In. 2000 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. 6-9 November 2000, Orlando, FL.
- Wuensch Sales. 2026. Draeger Accuro pump. Wuensch Sales Company. Available at: <https://www.wuenschsales.com/product/draeger-accuro-pump/?srsltid=AfmBOorYz4CwaR1mkZoLv2dl5>
- [tBwfWkp28lAtWEVm62CH5JjyYigye5X](#). Accessed on 20 February 2026.



Influence of Carrying Agents on the Physicochemical Properties of Freeze-Dried Black Garlic Powder as a Functional Ingredient

Wanida Thongklay^{1*}, Pimpen Pornchaloempong¹

¹Department of Food Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

*Corresponding author: Tel: +66-6-3196-3625, E-mail: 64601120@kmitl.ac.th

Abstract

Black garlic is widely recognized for its high antioxidant content and potential health benefits, making it a valuable functional ingredient in the food and pharmaceutical industries. This study investigated the effects of different carrier agents maltodextrin, isomaltodextrin, and fructooligosaccharide at concentrations of 20%, 25%, and 30% on the physicochemical properties of freeze-dried black garlic powder. The parameters evaluated included total soluble solids, color, moisture content, water activity, bulk density, flowability, and antioxidant activity (DPPH, ABTS, and FRAP). The results indicated that both the type and concentration of the carrier significantly influenced ($p < 0.05$) the quality of black garlic powder. Among the tested carriers, 25% maltodextrin showed the greatest potential by improving powder stability, reducing moisture content (4.53 %w.b.), enhancing flowability (33.14°), and maintaining high antioxidant activity. These findings provide valuable insights into optimizing carrier selection for the production of black garlic powder with improved quality and stability.

Keywords: Black garlic, Freeze-drying, Carrier

1 Introduction

Garlic (*Allium sativum* Linn.) has been widely recognized for its numerous health benefits, including its ability to reduce cholesterol levels, regulate blood pressure, and enhance immune function (Alvino Granados et al., 2021). However, fresh garlic has a limited shelf life and a pungent odor that may be undesirable for some consumers. To overcome these challenges, fermentation has been widely used to produce black garlic, a functional food ingredient with enhanced bioactivity and improved sensory characteristics (Kaewpiboon & Boonnak, 2020). During processing, black garlic undergoes a non-enzymatic browning reaction known as the Maillard reaction, resulting in the formation of bioactive compounds such as polyphenols, flavonoids, and S-allyl cysteine, which contribute to its strong antioxidant activity (Kim et al., 2013).

Despite its potential as a functional food, black garlic presents challenges in processing and storage due to its sticky texture and high sugar content (Orefice et al., 2022). These issues become particularly

pronounced during powder production, where hygroscopic properties can lead to clumping and caking, thereby reducing flowability and shelf stability. To address these concerns, freeze-drying has been identified as an effective drying technique because it retains bioactive compounds and minimizes thermal degradation (Shrestha et al., 2007). However, the presence of low-molecular-weight sugars in black garlic contributes to increased stickiness, particularly when the product approaches its glass transition temperature (T_g) (Alvino Granados et al., 2021).

To enhance the physical stability of freeze-dried black garlic powder, carrier agents are commonly employed. These carriers prevent caking, improve powder flow properties, and enhance the reconstitution ability of the final product (Fang et al., 2008). Moreover, some carriers may provide additional health benefits, aligning with the growing demand for functional food ingredients. However, limited studies have systematically investigated the influence of different carrier agents and their concentrations on the physicochemical properties and stability of freeze-dried black garlic powder. Therefore, further

investigation is needed to optimize carrier selection for improving powder quality and functionality.

The objective of this study is to evaluate the effects of different carrier agents, maltodextrin (MD),

2 Material and Methods

2.1 Material

Black garlic (*Allium sativum* L.) was provided by GRAZIE & AVIKA Co., Ltd., Thailand. Maltodextrin (DE 10-11, Maxway Co., Ltd., Thailand), Isomaltodextrin (Hayashibara Co., Japan), Fructooligosaccharide (COSUCRA, Belgium), 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH), 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS), 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride (TPTZ) and 6-Hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) were purchased from Thermo Fisher Scientific Co., Ltd., Japan. All other chemicals and reagents were of analytical grade.

2.2 Freeze-dried black garlic powder preparation

Black garlic, prepared at room temperature was blended using a manual industrial mincer (SW98, Kolbe Foodtec, Germany). Each of maltodextrin (MD), isomaltodextrin (IMD), and fructooligosaccharides (FOS) was prepared as a 50% (w/w) solution. The carrier solutions were then mixed with finely ground black garlic at black garlic to carrier solution ratios of 60:40, 50:50, and 40:60 (w/w), respectively, to obtain final formulations containing 20%, 25%, and 30% (w/w) carrier solids. The resulting samples were designated as MD 20, MD 25, and MD 30, depending on the carrier solid content. The black garlic samples were dehydrated using a freeze dryer (Kryo 'D' Freezer, ITC, Thailand) as shown in Fig. 2. The samples were loaded into trays and spread to a thickness of 1 cm from the tray bottom. The samples were frozen at -50 °C, and the core temperature was monitored using an RTD probe. During the primary drying stage, the system was

isomaltodextrin (IMD), and fructooligosaccharides (FOS), at varying concentrations on the physicochemical properties and stability of freeze-dried black garlic powder.

operated at a pressure below 40 Pa, while the shelf temperature was gradually increased from -20 °C to 20 °C. In the secondary drying phase, the shelf temperature was further increased to 40 °C (Fig. 3). The dried product was ground and stored in aluminum foil bags under controlled conditions at 25 °C and 30-40% relative humidity until further analysis.

2.3 Total soluble solids content (TSS)

For the TSS 1 g of sample was dissolved in 10 mL distilled water. And mixed for 1 min, the solution was measured using digital hand pocket refractometer (PAL-1, ATAGO, Japan). The TSS value was then multiplied by the number of dilutions to obtain the final TSS value.

2.4 Moisture content (M.C.)

The moisture content was determined by the hot air oven (AOAC, 2000). Samples were dried at 70 °C until a constant weight was achieved (defined by three consecutive readings) Then, the following relation was used:

$$\text{Moisture content} = \frac{(W1-W2)}{W1} \times 100 \quad (1)$$

Where: W1 = initial weight of the sample before drying (g); W2 = final weight of the sample after drying (g)

2.5 Water activity

The water activity of the black garlic powder was measured using an AquaLab 4TE (Meter Group Inc., USA). Three replications of water activity were performed for each sample.

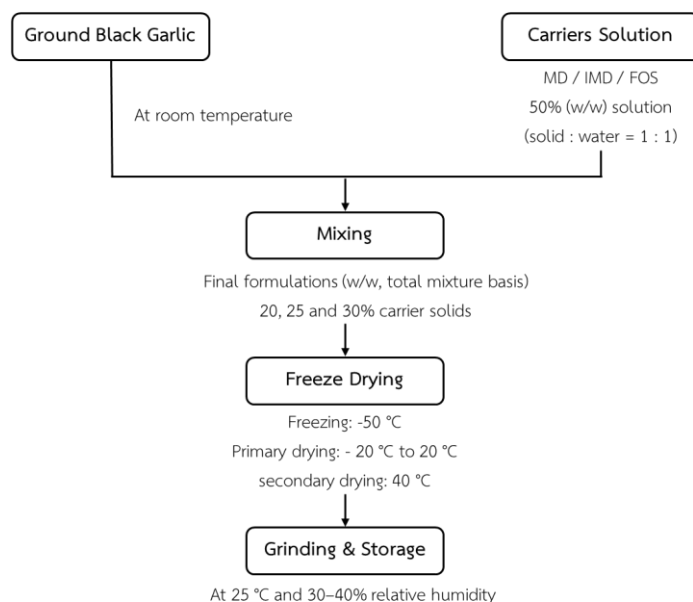


Fig. 1. Preparation of the freeze - dried black garlic powder

2.6 Bulk density

The samples were placed in a container of known volume and weighed. The bulk density was calculated using the following formula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Where ρ is bulk density (g cm^{-3}), m is the mass of samples (g) and V is the volume (cm^3).

2.7 Color

The color of the powder was measured using spectrophotometer (ColorFlex, Hunter Lab, UK). The color difference was calculated according to Equation.

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

Where L^* represents the lightness (0 - 100), a^* represents the scale of greenness (-) to redness (+),

and b^* represents the scale of blueness (-) and yellowness (+).

2.8 Flowability (angle of repose)

The flowability of freeze-dried black garlic powder was determined using the angle of repose method. A fixed cone height was established, and a known quantity of powder was measured. The powder was then poured onto a horizontal surface (Camacho et al., 2022), after which the height and diameter of the formed cone were measured.

$$AoR = \arctan \times \frac{2h}{d} \quad (4)$$

where h = height from the top of the formed product cone to the horizontal surface (cm); d = maximum cone product diameter (cm).

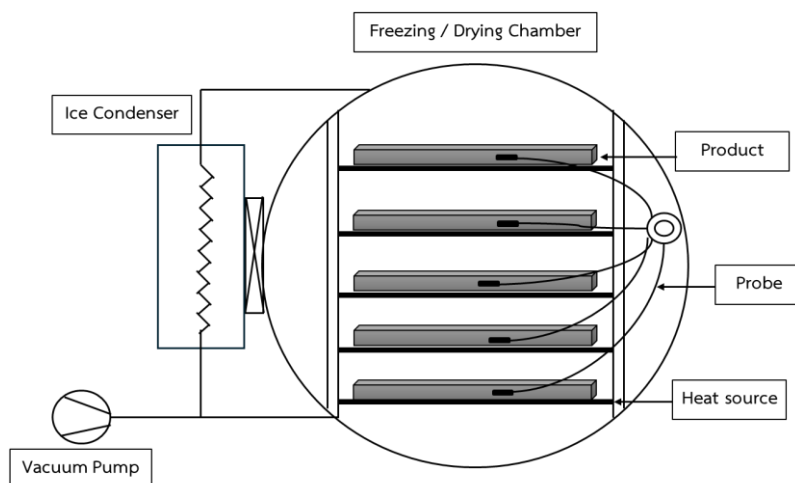


Fig. 2. Freeze dryer, Kryo 'D Fz - Itc (1993) co. ltd

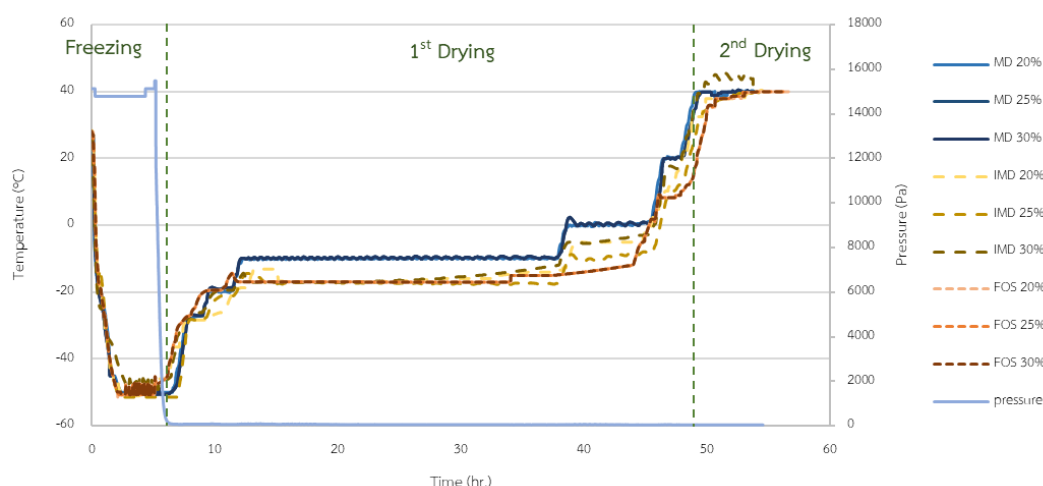


Fig. 3. The setting temperature and pressure operation of freeze dry machine.

2.9 Antioxidant activity

2.9.1 DPPH radical scavenging activity

The DPPH assay was conducted following the method of Singh et al. (2002) with slight modifications. An aliquot (10 μ L) of the extract was mixed with 2.99 mL of DPPH working solution in the dark for 60 min before measuring absorbance at 515 nm using a spectrophotometer (Libra S12, Biochrom, England). Results were expressed as mg Trolox equivalents (TE)/g dry matter.

2.9.2 ABTS Radical Scavenging activity

The ABTS assay was conducted following the method of Kriengsak et al. (2006) with slight modifications. An aliquot (10 μ L) of the extract was mixed with 2.99 mL of ABTS working solution and incubated in the dark for 10 min before measuring absorbance at 734 nm using a spectrophotometer (Libra S12, Biochrom, England). Results were expressed as mg Trolox equivalents (TE)/g dry matter.

2.9.3 Ferric reducing antioxidant power (FRAP)

The FRAP assay was conducted following the method of Benzie and Strain (1996) with slight modifications. An aliquot (10 μ L) of the extract was mixed with 2.99 mL of FRAP reagent and incubated in the dark for 30 min prior to measuring absorbance at 593 nm using a spectrophotometer (Libra S12, Biochrom, England). Results were expressed as mg Trolox equivalents (TE)/g dry matter.

2.10 Statistical analysis

All results were presented as mean $\pm$ standard deviation (SD). The experimental data were analyzed using a 3 $\times$ 3 factorial design and subjected to two-way analysis of variance (ANOVA) to evaluate the effects of carrier type and concentration. Statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics version 20. Significant differences among means ($p < 0.05$) were determined using Duncan's new multiple range test.

3 Results and Discussion

3.1 Drying time and TSS of black garlic powder

Drying time ranged from 53.25 to 56.77 hr, while total soluble solids (TSS) varied from 76.4 to 83.3 %Brix depending on carrier type and concentration (Table 1). Black garlic exhibits an amorphous structure and contains a high concentration of low-molecular-weight sugars, which makes it susceptible to structural changes during drying. Powdered products may transition into a sticky, viscous state when exposed to temperatures above the glass transition temperature (T_g) or when additional moisture is absorbed. Therefore, the incorporation of carrier agents or stabilizers can increase the glass transition temperature (T_g), thereby preventing melting during the freeze-drying process and reducing the stickiness of the resulting powder (Mani et al., 2002; Shrestha et al., 2007). In addition, the inclusion of carrier agents generally increases the total soluble solids (TSS) content of the formulation. The drying time is

influenced by several factors, including moisture content, structural characteristics, solute concentration, thermal conductivity of the material, and freezing temperature (Rattanapanon, 2015). As shown in Table 1, samples containing fructooligosaccharides exhibited longer drying times than those containing maltodextrin and isomaltodextrin. This trend corresponds with the total soluble solids content, where higher soluble solid concentrations result in longer drying times. Materials with higher TSS typically exhibit increased viscosity, which can slow down moisture diffusion and consequently extend the drying duration (Ratti, 2001).

3.2 Quality of black garlic powder

The moisture content and water activity of black garlic powder are presented in Table 1., ranging from 4.07 - 5.96 %w.b. and 0.2536 - 0.2955. Both parameters decreased as the concentration of carrier agents increased. Among the samples, the powder containing maltodextrin exhibited the lowest moisture content and water activity, followed by the sample containing isomaltodextrin, while the sample containing fructooligosaccharide showed the highest moisture content. These results indicate that the type of carrier agent significantly influences the moisture content of the powder after drying due to differences in water-holding capacity (Michalska-Ciechanowska et al., 2021). In addition, all black garlic powder samples showed water activity values below 0.6 (Table 1). Water activity is an important parameter for evaluating the availability of water in food systems, as it directly affects shelf life, microbial growth, and overall food safety (Ganaie et al., 2021).

The bulk density of black garlic powder showed variations among carrier types and concentrations, with values ranging from 0.94 to 0.88 for maltodextrin, 0.95 to 0.93 for isomaltodextrin, and 1.01 to 1.00 for fructooligosaccharide, depending on carrier concentration. The bulk density decreased with increasing concentrations of carrier agents. This phenomenon can be attributed to the density difference between black garlic and carrier materials, as black garlic possesses a higher density than the carriers. Consequently, the addition of carriers reduced the proportion of black garlic solids in the formulation, resulting in increased porosity and void formation within the powder structure and, therefore, a lower bulk density (Jaya &

Das, 2004; Cano-Chauca et al., 2005). During the freeze-drying process, structural modifications may occur in the sample, particularly due to the partial dissolution of carrier materials. This effect becomes more pronounced during the secondary drying stage, where the product may undergo partial structural collapse (Shrestha et al., 2007), which subsequently influences the bulk density and overall physical properties of the powder.

A comparison among samples containing different carriers indicated that black garlic powder formulated with maltodextrin and isomaltodextrin exhibited similar bulk density values, both of which were lower than those of the samples containing fructooligosaccharide. Maltodextrin and isomaltodextrin are carbohydrates with molecular structures that facilitate polymer formation and possess relatively high-water retention capacity, promoting the development of a more porous structure during the drying process. In contrast, fructooligosaccharide exhibits different intermolecular interactions, resulting in structural variations in the final product and consequently leading to a higher bulk density.

The flow properties of powders are important material characteristics and play a crucial role in the production process, as they influence processing efficiency, product uniformity, and shelf life. The results of the flow property analysis of freeze-dried black garlic powder are presented in Table 1. For maltodextrin, isomaltodextrin, and fructooligosaccharide, the values at 20%, 25%, and 30% carrier concentrations ranged from 36.42 to 30.09, 36.59 to 31.55, and 44.45 to 40.67, respectively. The flowability index increased from cohesive to easy flowing as the carrier concentration increased. Samples with lower carrier content exhibited poorer flowability, which can be attributed to their lower glass transition temperature (T_g) and higher hygroscopicity. A lower T_g increases molecular mobility, leading to particle stickiness and agglomeration, while higher hygroscopicity promotes moisture absorption, further reducing flow performance (Roos, 1995; Fitzpatrick et al., 2004). Among the carrier agents, maltodextrin generally exhibited better flowability due to its ability to form a stable matrix with reduced stickiness (Gharsallaoui et al., 2007). Isomaltodextrin showed

comparable but slightly lower flow performance, which may be related to its more highly branched structure affecting particle packing and matrix compactness. In contrast, fructooligosaccharide demonstrated poorer flowability, likely due to its lower molecular weight and higher hygroscopicity, which enhance moisture uptake and promote particle cohesion (Franck, 2002). Increasing carrier

concentration improved flowability across all carriers by increasing Tg and reducing moisture-related interactions. Similar findings were reported by Nurhadi and Roos (2017), who observed improved flowability in honey powder with increasing maltodextrin concentration.

Table 1 Quality characteristics of black garlic powder

Sample	Drying time (hr.)	M.C. (%w.b.)	Water activity	TSS (%Brix)	Bulk density (g cm ⁻³)	AoR (°)
MD 20	53.25	4.85 ± 0.16 ^d	0.2742 ± 0.0110 ^{abcd}	76.4 ± 0.1 ^h	0.94 ± 0.03 ^b	36.42 ± 0.73 ^c
MD 25	53.58	4.53 ± 0.04 ^e	0.2683 ± 0.0127 ^{bcd}	78.1 ± 0.1 ^f	0.92 ± 0.00 ^b	33.14 ± 0.35 ^d
MD 30	53.93	4.07 ± 0.03 ^f	0.2536 ± 0.0126 ^d	79.1 ± 0.0 ^{de}	0.88 ± 0.00 ^c	30.09 ± 2.37 ^e
IMD 20	54.08	5.19 ± 0.08 ^c	0.2799 ± 0.0089 ^{abc}	76.8 ± 0.0 ^g	0.95 ± 0.01 ^b	36.59 ± 0.26 ^c
IMD 25	54.38	4.93 ± 0.05 ^d	0.2744 ± 0.0106 ^{abcd}	78.9 ± 0.2 ^e	0.94 ± 0.01 ^b	33.21 ± 2.27 ^d
IMD 30	54.65	4.42 ± 0.17 ^e	0.2639 ± 0.0118 ^{cd}	79.3 ± 0.1 ^d	0.93 ± 0.01 ^b	31.55 ± 0.37 ^d
FOS 20	56.18	5.96 ± 0.07 ^a	0.2955 ± 0.0218 ^a	80.8 ± 0.2 ^c	1.01 ± 0.02 ^a	44.45 ± 0.25 ^a
FOS 25	56.52	5.63 ± 0.04 ^b	0.2894 ± 0.0088 ^{ab}	81.9 ± 0.1 ^b	1.00 ± 0.01 ^a	41.38 ± 0.03 ^b
FOS 30	56.77	5.25 ± 0.05 ^c	0.2817 ± 0.0095 ^{abc}	83.3 ± 0.2 ^a	1.00 ± 0.02 ^a	40.67 ± 1.69 ^b

Data are presented as mean ± standard deviation (n=3). a-d superscripts represent a significant difference within the same column (p<0.05) according to Duncan's multiple range test.

3.3 Color of black garlic powder

The color characteristics of black garlic powder are presented in Table 2. The addition of carrier agents prior to drying increased the lightness (L*) and yellowness (b*) of freeze-dried black garlic powder. This observation is consistent with previous studies by Caliskan and Dirim., 2016; Moolwong et al., 2023 who reported that higher levels of maltodextrin added during both freeze-drying and spray-drying processes resulted in powders with greater lightness. Similarly,

increasing the maltodextrin ratio has been shown to enhance the lightness of avocado powder. This effect can be attributed to maltodextrin forming a white powder upon drying, thereby increasing the overall lightness of the final product. Among the carrier agents tested, samples containing maltodextrin exhibited the highest lightness values, followed by those containing isomaltodextrin, whereas samples containing fructooligosaccharide showed the lowest lightness.

Table 2 Color properties of black garlic powder

Sample	Before Freeze drying			After Freeze drying			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
MD 20	5.61 $\pm$ 0.18 ^b	7.48 $\pm$ 0.23 ^a	4.78 $\pm$ 0.39 ^a	38.62 $\pm$ 0.24 ^{cd}	7.89 $\pm$ 0.25 ^b	22.25 $\pm$ 0.43 ^c	37.36 $\pm$ 0.33 ^d
MD 25	5.84 $\pm$ 0.27 ^{ab}	7.50 $\pm$ 0.25 ^a	4.64 $\pm$ 0.47 ^a	41.47 $\pm$ 0.92 ^b	8.78 $\pm$ 0.19 ^a	21.24 $\pm$ 0.09 ^d	39.33 $\pm$ 0.35 ^c
MD 30	5.52 $\pm$ 0.46 ^b	8.01 $\pm$ 0.81 ^a	4.89 $\pm$ 0.29 ^a	45.21 $\pm$ 0.43 ^a	8.92 $\pm$ 0.49 ^a	22.17 $\pm$ 0.12 ^c	43.30 $\pm$ 0.32 ^b
IMD 20	5.41 $\pm$ 0.73 ^b	7.52 $\pm$ 0.65 ^a	4.66 $\pm$ 0.59 ^a	38.08 $\pm$ 0.38 ^d	7.80 $\pm$ 0.38 ^b	20.09 $\pm$ 0.58 ^e	36.14 $\pm$ 0.81 ^e
IMD 25	5.63 $\pm$ 0.31 ^b	7.45 $\pm$ 0.13 ^a	4.53 $\pm$ 0.51 ^a	39.47 $\pm$ 0.11 ^c	7.91 $\pm$ 0.57 ^b	23.18 $\pm$ 0.17 ^b	38.65 $\pm$ 0.48 ^c
IMD 30	6.45 $\pm$ 0.56 ^a	7.33 $\pm$ 0.77 ^a	4.71 $\pm$ 0.33 ^a	46.36 $\pm$ 0.44 ^a	7.78 $\pm$ 0.17 ^b	23.75 $\pm$ 0.07 ^a	44.23 $\pm$ 0.28 ^a
FOS 20	5.59 $\pm$ 0.27 ^b	7.67 $\pm$ 0.38 ^a	4.81 $\pm$ 0.72 ^a	15.91 $\pm$ 0.97 ^f	5.44 $\pm$ 0.67 ^c	9.34 $\pm$ 0.58 ^g	11.52 $\pm$ 0.72 ^h
FOS 25	5.38 $\pm$ 0.14 ^b	7.31 $\pm$ 0.12 ^a	4.42 $\pm$ 0.39 ^a	17.05 $\pm$ 1.31 ^f	5.23 $\pm$ 0.85 ^c	11.21 $\pm$ 0.23 ^f	13.70 $\pm$ 0.72 ^g
FOS 30	5.45 $\pm$ 0.36 ^b	7.22 $\pm$ 0.56 ^a	4.67 $\pm$ 0.83 ^a	21.48 $\pm$ 0.63 ^e	5.61 $\pm$ 0.43 ^c	10.97 $\pm$ 0.14 ^f	17.30 $\pm$ 0.01 ^f

Data are presented as mean $\pm$ standard deviation (n=3). a-d superscripts represent a significant difference within the same column (p<0.05) according to Duncan's multiple range test. L*, lightness; a*, greenness to redness; b*, blueness to yellowness.

3.4 antioxidant capacities

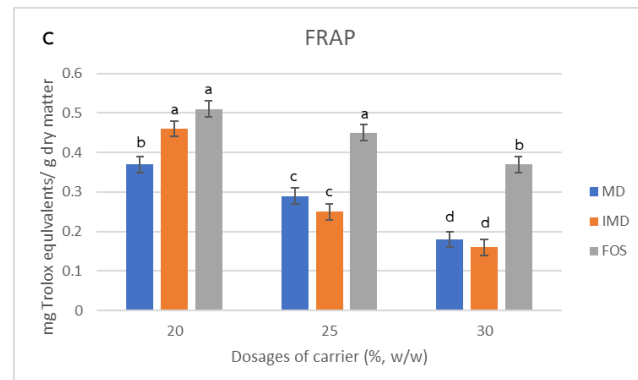
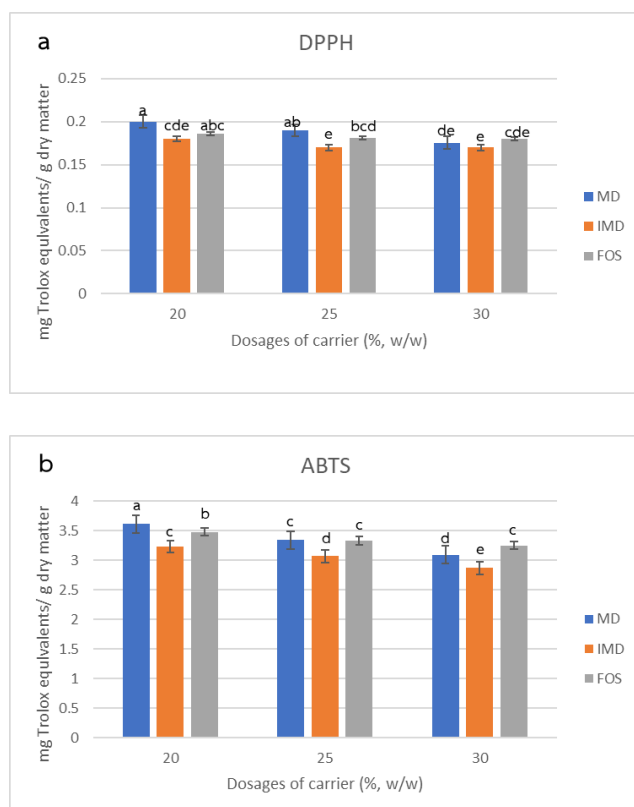


Fig. 4. DPPH (a), ABTS (b), and FRAP (c) assay of different types and quantity of black garlic samples with carriers. Values are expressed as mean $\pm$ SD (n=3) with significantly different at p < 0.05

The antioxidant capacities of black garlic powder, determined by DPPH, ABTS, and FRAP assays, are presented in Fig. 4. The results showed a decreasing trend with increasing carrier ratio. This reduction can be attributed to a dilution effect, as fresh black garlic contains high concentrations of bioactive compounds with strong antioxidant properties. The incorporation of carrier agents reduces the relative proportion of these active compounds per unit mass, leading to

lower measured antioxidant activity. Similar observations were reported by Chuaychan and Benjakul (2016), who investigated the effect of maltodextrin as a carrier agent on the antioxidative properties of spray-dried gelatin powder. Their results demonstrated that increasing the concentration of maltodextrin resulted in decreased antioxidant activity due to the reduced availability of bioactive compounds in the final powder. Likewise, Lachowicz et al. (2020) reported that increasing maltodextrin content significantly reduced the antioxidant capacity of vacuum-dried Saskatoon berry powder as evaluated by ABTS and FRAP assays. In addition, Maltodextrin showed relatively better antioxidant retention, likely due to its effective film-forming ability and stable encapsulating matrix (Vargas et al., 2024), while isomaltodextrin exhibited similar but slightly lower performance. In contrast, fructooligosaccharide provided weaker physical protection due to its hygroscopic nature and lower molecular weight. However, it showed the highest FRAP values, which may be attributed to its intrinsic reducing capacity, as the FRAP assay measures electron-donating ability rather than radical scavenging (Benzie & Strain, 1996). Additionally, thermal degradation during drying may further reduce antioxidant activity (Coskun et al., 2024). Overall, antioxidant capacity is governed by the combined effects of dilution, carrier-dependent encapsulation, thermal degradation, and assay-specific mechanisms.

4 Conclusion

This study investigated the effects of different carrier agents (maltodextrin, isomaltodextrin, and fructooligosaccharide) and carrier ratios (20%, 25%, and 30%) on the physical and chemical properties of black garlic powder. The results demonstrated that both the type and concentration of carrier agents significantly influenced the properties of the resulting powders. Among the tested conditions, 25% maltodextrin provided the optimal balance, demonstrating improved physical properties while maintaining relatively high antioxidant activity

compared to other carrier agents. These findings provide useful information for the selection of appropriate carrier agents in the production of black garlic powder. Further studies are recommended to evaluate the shelf life and long-term stability of the developed powders.

5 Acknowledgements

This research was supported by FACTory Classroom, Department of Food Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. and Grazie and Avika Co., Ltd. For supplying black garlic during the research period.

6 References

- Alvino Granados, A.E., Mochizuki, T., Kawai, K. 2021. Effect of Glass Transition Temperature Range on the Caking Behavior of Freeze-Dried Carbohydrate Blend Powders. *Food Engineering Reviews*. 13, 204–214.
- AOAC. 2000. Feeds. In: *Official Methods of Analysis of AOAC International*. Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Benzie, I.F., Strain, J.J. 1996. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of Antioxidant Power: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry*. 239(1), 70–76.
- Caliskan, G., Dirim, S.N., 2016. The Effect of Different Drying Processes and the Amounts of Maltodextrin Addition on the Powder Properties of Sumac Extract Powders. *Powder Technology*. 287, 308–314.
- Camacho, M.M., Silva-Espinoza, M.A., Martínez Navarrete, N. 2022. Flowability, Rehydration Behaviour and Bioactive Compounds of an Orange Powder Product as Affected by Particle Size. *Food and Bioprocess Technology*. 15(3), 683–692.
- Cano-Chauca, M., Stringheta, P.C., Ramos, A.M., Cal-Vidal, J. 2005. Effect of the Carriers on the Microstructure of Mango Powder Obtained by Spray Drying and its Functional Characterization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 6(4), 420–428.

- Coskun, N., Sartas, S., Jaouhari, Y., Bordiga, M., Karav, S. 2024. The Impact of Freeze Drying on Bioactivity and Physical Properties of Food Products. *Applied Sciences*. 14(20), 9183.
- Chuaychan, S., Benjakul, S. 2016. Effect of Maltodextrin on Characteristics and Antioxidative Activity of Spray-Dried Powder of Gelatin and Gelatin Hydrolysate from Scales of Spotted Golden Goatfish. *Journal of Food Science and Technology*. 53, 3583–3592.
- Franck, A. 2002. Technological Functionality of Inulin and Oligofructose. *British journal of Nutrition*. 87(S2), S287-S291.
- Fitzpatrick, J. J., Barringer, S. A., Iqbal, T. 2004. Flow Property Measurement of Food Powders and Sensitivity of Jenike’s Hopper Design Methodology to the Measured Values. *Journal of Food Engineering*. 61(3), 399-405.
- Ganaie, T.A., Masoodi, F.A., Rather, S.A., Gani, A. 2021. Exploiting Maltodextrin and Whey Protein Isolate Macromolecules as Carriers for the Development of Freeze-Dried Honey Powder. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2, 100040.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., Saurel, R. 2007. Applications of Spray-Drying in Microencapsulation of Food Ingredients: An Overview. *Food research international*. 40(9), 1107-1121.
- Jaya, S., Das, H. 2004. Effect of Maltodextrin, Glycerol Monostearate and Tricalcium Phosphate on Vacuum Dried Mango Powder Properties. *Journal of Food Engineering*. 63(2), 125–134.
- Kaewpiboon, C., Boonnak, N. 2021. Evaluation of the Antioxidant Activities of Black Single Bulb form of Elephant Garlic (*Allium ampeloprasum* var. *ampeloprasum*). *Thai Science and Technology Journal*. 29(1), 111–117.
- Kim, J.S., Kang, O.J., Gweon, O.C. 2013. Comparison of Phenolic Acids and Flavonoids in Black Garlic at Different Thermal Processing Steps. *Journal of Functional Foods*. 5(1), 80–86.
- Kriengsak, T., Unaro, J.B., Kevin, C. 2006. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC Assays for Estimating Antioxidant Activity from Guava Fruit Extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*. 19, 669–675.
- Lachowicz, S., Michalska-Ciechanowska, A., Oszmianski, J. 2020. The Impact of Maltodextrin and Inulin on the Protection of Natural Antioxidants in Powders made of Saskatoon Berry Fruit, Juice, and Pomace as Functional Food Ingredients. *Molecules*. 25(8), 1805.
- Mani, S., Jaya, S., Das, H. 2002. Sticky Issues on Spray Drying of Fruit Juices. Paper No. MBSK 02-201. Saskatoon, SK, Canada: ASAE/CSAE Meeting.
- Michalska-Ciechanowska, A., Hendrysiak, A., Brzezowska, J., Wojdyło, A., Gajewicz-Skretna, A. 2021. How do the Different Types of Carrier and Drying Techniques Affect the changes in Physico-Chemical Properties of Powders from Chokeberry Pomace Extracts. *Foods*. 10(8), 1864.
- Moolwong, J., Klinthong, W., Chuacharoen, T. 2023. Physicochemical Properties, Antioxidant Capacity, and Consumer Acceptability of Ice Cream Incorporated with Avocado (*Persea americana* Mill.) pulp. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 73(3), 289-296.
- Nurhadi, B., Roos, Y.H. 2017. Influence of Anti-Caking Agent on the Water Sorption Isotherm and Flowability Properties of Vacuum Dried Honey Powder. *Journal of Food Engineering*. 210, 76–82.
- Orefice, C., Morganella, N., Gallo, M., Garella, I., Marzocchella, A., Nigro, R. 2022. Black Garlic: an Innovative Additive for Food Formulations. *Chemical Engineering Transactions*. 93, 331–336.
- Vargas, V., Saldarriaga, S., Sánchez, F. S., Cuellar, L. N., Paladines, G. M. 2024. Effects of the Spray-Drying Process using Maltodextrin on Bioactive Compounds and Antioxidant activity of the Pulp of the Tropical Fruit Açai (*Euterpe oleracea* Mart.). *Heliyon*. 10(13).
- Ratti, C. 2001. Hot Air and Freeze-Drying of High-Value Foods: a review. *Journal of Food Engineering*. 49(4), 311–319.

- Roos, Y. H., Drusch, S. 2015. Phase Transitions in Foods. Academic Press.
- Shrestha, A.K., Ua-Rak, T., Adhikari, B.P., Howes, T., Bhandari, B.R. 2007. Glass Transition Behaviour of Spray Dried Orange Juice Powder Measured by Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermal Mechanical Compression Test. International Journal of Food Properties. 10, 661–673.
- Singh, R.P., Chidambara, K.N., Jayaprakasha, G.K. 2002. Studies on the Antioxidant Activity of Pomegranate (*Punica granatum*) Peel and Seed Extracts Using in Vitro Model. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 50, 81–86..