การศึกษาประสิทธิภาพและความคงทนของสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน สูตรไมโครแคปซูลที่พ่นภายนอกอาคาร เพื่อพัฒนาแนวทางการควบคุมยุงพาหะมาลาเรียในประเทศไทย

Study on the Efficacy and Persistence of Microencapsulated Lambda-Cyhalothrin Applied on Outdoor Surfaces to Develop Malaria Vector-Control Approach in Thailand

ศิริพร ยงชัยตระกูล ปร.ด. (อายุรศาสตร์เขตร้อน) — *Siriporn Yongchaitrakul Ph.D. (Tropical Medicine)*
บุษราคัม สินาคม วท.บ. (กีฏวิทยา) — *Bussarakum Sinakom B.Sc. (Entomology)*
จิราภรณ์ เสวะนา วท.ม. (กีฏวิทยา) — *Jiraporn Sevana M.Sc. (Entomology)*
ขนิษฐา ปานแก้ว วท.ม. (กีฏวิทยา) — *Kanitta Pankeaw M.Sc. (Entomology)*
พรพิมล ประดิษฐ์ ส.ม. (การจัดการสร้างเสริมสุขภาพ) — *Pornpimon Pradit M.P.H. (Health Promotion Management)*
รัตนาภรณ์ หมายหมั้น วท.ม. (กีฏวิทยา) — *Rattanaporn Maimun M.Sc. (Entomology)*
สร้อยสุนีย์ ธนัญสถาพร วท.ม. (กีฏวิทยา) — *Soisunee Tanansathaporn M.Sc. (Entomology)*
ขวัญฤดี สุวะไกร วท.ม. (กีฏวิทยา) — *Kwanruedee Suwakrai M.Sc. (Entomology)*

กองโรคติดต่อนำโดยแมลง กรมควบคุมโรค — *Division of Vector Borne Diseases, Department of Disease Control*

Received: October 1, 2025
Revised: September 17, 2025
Accepted: March 9, 2026

บทคัดย่อ

โรคมาลาเรียยังคงเป็นปัญหาสำคัญในพื้นที่ชายแดนของประเทศไทยโดยเฉพาะชายแดนภาคตะวันตก ซึ่งพบพาหะหลัก ได้แก่ *Anopheles minimus, Anopheles dirus* และ *Anopheles maculatus* มาตรการหลัก เช่น มุ้งชุบสารเคมีชนิดออกฤทธิ์ยาวนาน และการพ่นสารเคมีชนิดมีฤทธิ์ตกค้างภายในอาคารยังไม่เพียงพอต่อการควบคุมการแพร่เชื้อนอกบ้าน การวิจัยเชิงทดลองภาคสนามนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการพ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูล บนพื้นผิวฝาผนังด้านนอกของอาคารหรือบ้านที่ทำจากไม้ ไม้ไผ่ และปูน เพื่อพัฒนากลยุทธ์ควบคุมยุงพาหะให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการหากินนอกบ้าน การศึกษาภาคสนามและห้องปฏิบัติการดำเนินการ 9 เดือน (สิงหาคม 2567–พฤษภาคม 2568) โดยเก็บข้อมูลทางกีฏวิทยาและทดสอบฤทธิ์ตกค้างของสารเคมีด้วยวิธี WHO cone bioassay test วิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป

ผลการศึกษาพบว่ายุง *An. minimus* มากที่สุด จำนวน 320 ตัว (ร้อยละ 53.1) และยืนยันความเสี่ยงเชิงระบาดวิทยา สารเคมีความเข้มข้น 80 มก./ตร.ม. คงฤทธิ์บนไม้ 5–6 เดือน ไม้ไผ่ 4–5 เดือน และปูน 2–3 เดือน ขณะที่ 40 มก./ตร.ม. มีประสิทธิภาพสั้นกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value <0.001) สรุปได้ว่าการใช้แลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูลที่ความเข้มข้น 80 มก./ตร.ม. เหมาะสมสำหรับการพ่นตกค้างภายนอกอาคารโดยเฉพาะ

Corresponding Author: ศิริพร ยงชัยตระกูล *E-mail: yooyongchai@gmail.com*

บนพื้นผิวไม้ และควรใช้เป็นมาตรการเสริมร่วมกับการพ่นสารเคมีชนิดมีฤทธิ์ตกค้างภายในอาคารและมุ้งชุบสารเคมีชนิดออกฤทธิ์ยาวนานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการแพร่เชื้อนอกบ้าน และเสริมความยั่งยืนของมาตรการควบคุมและกำจัดโรคมาลาเรียของประเทศไทย

คำสำคัญ: โรคมาลาเรีย การพ่นสารตกค้างภายนอก แลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูล

Abstract

Malaria remains a significant public health problem in Thailand's border areas, particularly along the western frontier, where the primary vectors are *Anopheles minimus*, *Anopheles dirus*, and *Anopheles maculatus*. Core interventions, including long-lasting insecticidal nets and indoor residual spraying, remain effective but are insufficient to control transmission occurring outdoors. This field experimental research aimed to assess the efficacy of outdoor residual spraying with a lambda-cyhalothrin microcapsule applied to the outer wall surfaces of houses made of wood, bamboo, and cement, to develop vector control strategies tailored to outdoor biting behavior. A combined field and laboratory study was conducted over nine months (August 2024–May 2025). Entomological data were collected, and the residual activity of the insecticide was evaluated using the WHO cone bioassay test. Data were analyzed using Generalized Linear Models.

The study found that *Anopheles minimus* was the most abundant species (53.1%), confirming the epidemiological risk in the area. At 80 mg/m^2, residual activity persisted for 5–6 months on wood, 4–5 months on bamboo, and 2–3 months on cement, while at 40 mg/m^2 it lasted 3–4 months, 2–3 months, and 1–2 months, respectively. Efficacy declined significantly over time (p-value<0.001). In conclusion, the use of a lambda-cyhalothrin microcapsule formulation at 80 mg/m^2 is appropriate for outdoor residual spraying, particularly on wooden surfaces, and should be considered as a complementary measure alongside indoor residual spraying and long-lasting insecticidal nets to enhance the effectiveness of outdoor malaria vector control and to strengthen the sustainability of malaria prevention and control strategies in Thailand.

Keywords: Malaria, Outdoor Residual Spraying, Lambda-cyhalothrin microcapsule

บทนำ

โรคมาลาเรียยังคงเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญของประเทศไทย แม้ว่าในทศวรรษที่ผ่านมาอัตราผู้ป่วยจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงพบรายงานผู้ป่วยในหลายพื้นที่ โดยเฉพาะชายแดนด้านตะวันตกที่ติดต่อกับประเทศเมียนมา ลักษณะภูมิประเทศที่เป็นป่าเขาและมีแหล่งน้ำ ทำให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการแพร่พันธุ์ของยุงก้นปล่อง พาหะนำโรคที่มีบทบาทสำคัญในพื้นที่ดังกล่าว ได้แก่ *Anopheles minimus*, *Anopheles dirus* และ *Anopheles maculatus* ซึ่งมีพฤติกรรมกัดกินเลือดและเกาะพักอาศัยทั้งภายในและภายนอกบ้าน นอกจากนี้ การเคลื่อนย้ายของประชากร โดยเฉพาะแรงงานข้ามชาติ ยิ่งทำให้การควบคุมโรคมีความซับซ้อนมากขึ้น ส่งผลให้การป้องกันและควบคุมโรคมาลาเรียยังคงเป็นความท้าทายสำคัญของประเทศ

ประเทศไทยมีเป้าหมายในการกำจัดโรคมาลาเรียให้สำเร็จภายในปี 2026 ภายใต้ยุทธศาสตร์การกำจัดโรคมาลาเรียแห่งชาติ 2017–2026[1] ซึ่งสอดคล้องกับยุทธศาสตร์กำจัดโรคมาลาเรียขององค์การอนามัยโลก 2016–2030[2] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลการเฝ้าระวังยังพบรายงานผู้ป่วยรายใหม่ในบางพื้นที่ที่เคยควบคุมได้แล้ว

และพบแหล่งแพร่เชื้อใหม่ (new foci) ในหลายจังหวัด แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของมาตรการป้องกันควบคุมโรคในปัจจุบัน นอกจากนี้พฤติกรรมการกินของยุงพาหะในประเทศไทยพบว่ามักมีการเกาะพักบริเวณภายนอกอาคารใกล้ที่อยู่อาศัยก่อนและหลังเข้ากัด และออกหากินนอกอาคาร (Outdoor biting) มาตรการหลักในปัจจุบัน เช่น การใช้มุ้งชุบสารเคมีชนิดออกฤทธิ์ยาวนาน (Long-Lasting Insecticidal Nets, LLINs) และการพ่นสารเคมีแบบมีฤทธิ์ตกค้างภายในอาคารหรือบ้าน (Indoor Residual Spraying; IRS) แม้มีประสิทธิภาพสูงในการลดการแพร่โรค แต่ยังไม่เพียงพอต่อการควบคุมการแพร่เชื้อนอกอาคาร สารไพรีทรอยด์สูตรทั่วไปเสื่อมสลายได้ง่ายเมื่อสัมผัสฝนและแสงแดด จึงไม่เหมาะสำหรับการพ่นบนพื้นผิวภายนอก เช่น ผนังด้านนอก รั้ว หรือวัสดุรอบอาคาร ซึ่งเป็นบริเวณที่ยุงก้นปล่องหลายชนิดเกาะพักก่อนและหลังดูดเลือดคน

การพ่นสารเคมีแบบมีฤทธิ์ตกค้างภายนอกอาคาร (Outdoor Residual Spraying; ORS) เป็นการพ่นสารบนพื้นผิวที่อยู่นอกหลังคาหรือผนังอาคาร เพื่อสร้างชั้นสารตกค้างที่คงทนต่อแสงแดดและฝน การใช้สูตรไมโครแคปซูลของแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน ซึ่งทนต่อการเสื่อมสลายและปลดปล่อยสารออกฤทธิ์อย่างต่อเนื่อง จึงช่วยลดความหนาแน่นของยุงพาหะและความเสี่ยงของการแพร่เชื้อมาลาเรีย โดยเฉพาะในผู้ที่มีกิจกรรมนอกอาคารก่อนเข้าบ้าน สูตรไมโครแคปซูล (microencapsulated formulation) ของแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินได้รับการพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีไมโครเอนแคปซูเลชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ห่อหุ้มสารออกฤทธิ์ด้วยชั้นพอลิเมอร์ขนาดไมโครเมตร เช่น ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ หรือพอลิยูรีเทน ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันการสลายตัวของสารจากแสง UV ความร้อน และความชื้น พร้อมควบคุมให้สารออกฤทธิ์ค่อย ๆ ปลดปล่อยออกอย่างต่อเนื่อง กลไกการแพร่ (diffusion) และการสลายตัวของผนังพอลิเมอร์อย่างช้า ๆ ภายใต้อุณหภูมิและความชื้นในธรรมชาติ ทำให้สูตรไมโครแคปซูลมีฤทธิ์ตกค้างยาวนานกว่าสูตรทั่วไป เช่น สูตร EC หรือ WP หลายเท่า รายงานของ WHO/WHOPES ระบุว่าสามารถคงประสิทธิภาพได้ถึง 6 เดือนบนพื้นผิวไม้ และ 3-4 เดือนบนพื้นผิวปูนซีเมนต์ คุณสมบัติด้านความคงทนและการปลดปล่อยช้าเช่นนี้จึงเหมาะสมต่อการใช้ในการพ่นแบบมีฤทธิ์ตกค้างภายนอกอาคาร ซึ่งต้องเผชิญกับแสงแดด ฝน และความชื้นสูง มากกว่าสภาพภายในอาคาร[3,4]

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินฤทธิ์ตกค้างภาคสนามของสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูล โดยพ่นบนพื้นผิวภายนอกบ้านบริเวณที่สัมผัสแสงแดดและฝน ได้แก่ ไม้ ไม้ไผ่ และปูน เพื่อเปรียบเทียบความคงทนและประสิทธิภาพของสารเคมีบนวัสดุแต่ละชนิดภายใต้สภาพแวดล้อมจริง ผลการศึกษาจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการกำหนดกลยุทธ์ควบคุมยุงพาหะให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการออกหากินนอกบ้าน และเสริมความเข้มแข็งให้กับมาตรการควบคุมยุงพาหะแบบเดิมภายใต้ยุทธศาสตร์กำจัดโรคมาลาเรียของประเทศไทย

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและฤทธิ์ตกค้างของสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูล ที่ใช้พ่นแบบมีฤทธิ์ตกค้างภายนอกบ้านบนพื้นผิวไม้ ไม้ไผ่ และผนังปูนซีเมนต์
2. เพื่อศึกษาความคงทนและเปรียบเทียบระยะเวลาการออกฤทธิ์ตกค้างของสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูล บนวัสดุพื้นผิวชนิดต่าง ๆ ภายใต้สภาพแวดล้อมภาคสนามในพื้นที่แพร่เชื้อมาลาเรียของประเทศไทย
3. เพื่อพัฒนาแนวทางการใช้และข้อเสนอเชิงนโยบายในการพ่นสารแบบมีฤทธิ์ตกค้างภายนอกบ้านที่เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่แพร่เชื้อมาลาเรีย เพื่อเสริมมาตรการควบคุมยุงพาหะมาลาเรียของประเทศไทย

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองภาคสนาม (Field experimental research) ที่ใช้การเก็บข้อมูลเชิงปริมาณร่วมกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยดำเนินการในพื้นที่ชายแดนภาคตะวันตกของประเทศไทย

ซึ่งเป็นพื้นที่แพร่เชื้อมาลาเรียสำคัญ เก็บข้อมูลภาคสนามและติดตามผลต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 9 เดือน ระหว่างเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2568

ประชากรและพื้นที่ศึกษา

ประชากรศึกษา ประกอบด้วย ยุงก้นปล่องเพศเมีย *Anopheles minimus* อายุ 3–5 วัน สายพันธุ์ห้องปฏิบัติการของกองโรคติดต่อนำโดยแมลง กรมควบคุมโรค พื้นที่ศึกษาคือ หมู่ 8 ตะโกล่าง ตำบลสวนผึ้ง อำเภอสวนผึ้ง จังหวัดราชบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่มีการแพร่ของโรคมาลาเรียสูง (high transmission area) ทดสอบกับสารเคมีแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูล (lambda-cyhalothrin microencapsulated formulation; trade name Icon® 10 CS, Syngenta) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มไพรีทรอยด์ชนิดออกฤทธิ์ยาวนานที่ได้รับการรับรองจากองค์การอนามัยโลก คัดเลือกทดสอบบนผนังภายนอกของบ้านซึ่งทำจากไม้ ไม้ไผ่ และปูนซีเมนต์ จำนวนพื้นผิวละ 12 หลัง และบ้านควบคุมอีก 2 หลัง เพื่อติดตามประสิทธิภาพและระยะเวลาผลกระทบตกค้างของสารเคมีภายใต้สภาพการใช้งานจริง

การคัดเลือกตัวอย่าง

การคัดเลือกบ้านเข้าร่วมในการศึกษาใช้การรับสมัครแบบกำหนดโควตาโดยแบ่งชั้น (quota-based stratified enrolment) ตามชนิดผนังบ้าน (ไม้ ไม้ไผ่ ปูนซีเมนต์) จากครัวเรือนที่ผ่านเกณฑ์และสมัครใจเข้าร่วม โดยรับสมัครต่อเนื่องจนเต็มโควตา ชั้นละ 12 หลัง ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของ WHO (4–6 หลัง/ชนิดพื้นผิว)[5] เพื่อเพิ่มความแม่นยำและรองรับการสูญเสียตัวอย่าง การคัดเลือกเป็นการไม่อาศัยความน่าจะเป็นภายใต้โควตาแบ่งชั้น (non-probability, quota-based stratified enrolment) หากมีผู้ยินยอมเกินจำนวนในชั้นใดจะทำการสุ่มย่อยแบบไม่ใส่คืน (random subsampling without replacement) ภายในกลุ่มผู้ยินยอมเพื่อให้ครบตามโควตา ทั้งนี้มีการจัดทำรายชื่อสำรองในแต่ละชั้นเพื่อทดแทนกรณีถอนตัวภายหลัง การออกแบบคัดเลือกตัวอย่างนี้มุ่งเปรียบเทียบระหว่างชนิดพื้นผิวในกลุ่มที่เข้าร่วม ไม่ได้ตั้งใจอนุมานแทนประชากรของชุมชนทั้งหมด

เกณฑ์คัดเข้า

1. บ้านพักอาศัยที่มีผู้อยู่อาศัยจริงและยินยอมเข้าร่วมตลอดการศึกษา

2. ชนิดผนังหลักตรงตามชั้นที่กำหนด และมีพื้นที่ผนังภายนอกเพียงพอสำหรับติดตั้งกรวยทดสอบตามมาตรฐาน WHO

3. ไม่มีการทาสี/ซ่อมผนัง หรือพ่นสารกำจัดแมลงบนผนังภายนอกภายใน 6 เดือนก่อนเริ่มศึกษา

4. เข้าถึงได้ปลอดภัย และสามารถติดตามซ้ำตามแผนได้

เกณฑ์คัดออก

1. ปฏิเสธการเข้าร่วมหรือยกเลิกการเข้าร่วมการศึกษาในภายหลัง

2. พบการทาสี/ซ่อมผนัง หรือการพ่นสารกำจัดแมลงบนผนังภายนอก ระยะ 6 เดือนที่ผ่านมา

3. ไม่ปลอดภัยหรือไม่เอื้อต่อการติดตามซ้ำตามแผน

4. ไม่ใช่บ้านพักอาศัยถาวร

เครื่องมือที่ใช้

เครื่องมือภาคสนามประกอบด้วยอุปกรณ์ศึกษากีฏวิทยา ได้แก่ หลอดแก้วใส่ยุง ไฟฉาย LED สำลีชุบคลอโรฟอร์ม เทอร์โมมิเตอร์และไฮโกรมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิและความชื้น กรวยทดสอบ ถ้วยพลาสติกสำหรับพักยุง หลอดดูดยุง เครื่องพ่นสารเคมีชนิดอัดลม พร้อมอุปกรณ์ประกอบสำหรับพ่นสารออกฤทธิ์ตกค้างฝาผนัง และแบบฟอร์มบันทึกอัตราการตายของยุงที่ได้จากการทดสอบ

เครื่องพ่นสารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเครื่องพ่นชนิดอัดลม (compression sprayer; trade name Hudson® X-Pert, H.D. Hudson Manufacturing Company, USA) ซึ่งได้รับการสอบเทียบก่อนการทดลองทุกครั้ง เพื่อให้ปริมาณสารเคมีที่พ่นสม่ำเสมอ โดยใช้เทคนิคการวัดปริมาตรการพ่นตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก[6] และควบคุมคุณภาพการพ่นด้วยการตรวจสอบ อัตราการไหลของหัวพ่นให้อยู่ในช่วง ±5% ของค่ามาตรฐาน ผู้ทำหน้าที่พ่นสารเคมีและเก็บตัวอย่างได้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล (Personal Protective Equipment; PPE) ได้แก่ หน้ากากกรองสารเคมี ถุงมือยาง หน้ากาก

ป้องกันตา และเสื้อคลุมแขนยาว เพื่อป้องกันการสัมผัสสารเคมีโดยตรง และดำเนินการตามมาตรการความปลอดภัยด้านสารเคมีขององค์การอนามัยโลก[7]

ขั้นตอนการดำเนินการ

1) การสำรวจยุงก้นปล่องตัวเต็มวัยดำเนินการโดยเจ้าหน้าที่กีฏวิทยาที่ผ่านการอบรม ตามมาตรฐาน WHO เพื่อศึกษาพฤติกรรมยุงที่เข้าหาคน โดยใช้การเข้าเกาะคน (Human Landing Catch; HLC) ทั้งในและนอกบ้านของพื้นที่ศึกษา ร่วมกับการใช้กับดัก (CDC light trap) เก็บตัวอย่างเวลา 18.00–24.00 น. ติดต่อกัน 3 คืนต่อเดือน รวม 9 เดือน ยุงที่จับได้จำแนกชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์ตามคู่มือการจำแนกชนิดยุงในประเทศไทย[8] และบันทึกในแบบรายงานกีฏวิทยารวมทั้งระบบรายงานมาลาเรียออนไลน์ของกรมควบคุมโรค

2) การทดสอบความไวต่อสารเคมี (WHO Susceptibility test) ใช้ยุง *An. minimus* เพศเมียที่จับได้จากธรรมชาติ ทดสอบกับกระดาษชุบสารไพรีทรอยด์มาตรฐาน คัดเลือกเฉพาะสารเคมีที่เคยมีประวัติการใช้ในพื้นที่ศึกษา ได้แก่ deltamethrin 0.05%, alphacypermethrin 0.05% และ lambda-cyhalothrin 0.05% ตามวิธีการและเกณฑ์การแปลผลขององค์การอนามัยโลก[9] โดยพิจารณาอัตราการตายร้อยละ 98–100 เป็นกลุ่มไวต่อสารเคมี

3) การพ่นสารเคมีตกค้างภายนอก (Outdoor Residual Spraying; ORS) ใช้สารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน สูตรไมโครแคปซูล 10% CS (ICON® 10CS, Syngenta) ที่ 40 และ 80 mg a.i./m² ปรับปริมาตรพ่นและความเร็วหัวฉีดให้ได้อัตราสารออกฤทธิ์ตามมาตรฐานองค์การอนามัยโลก[8] ที่อัตรา 40 mg/m²[10] ส่วนอัตราระดับสูงเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสารกับประสิทธิผลและรองรับการเสื่อมสภาพจากสภาพอากาศภายนอกที่ 80 mg/m²[6,10,11] การพ่นภายนอกอาคารมุ่งที่ผนังด้านนอกของบ้านบริเวณนอกชายคาที่สัมผัสแสงแดด ฝน และความชื้นโดยตรง เพื่อจำลองการเสื่อมสลายตามธรรมชาติของการพ่นกลางแจ้ง เปรียบเทียบความคงทนและประสิทธิภาพของสารเคมีในสภาพแวดล้อมต่างกันได้อย่างแม่นยำ ซึ่งแตกต่างจากการพ่นภายในอาคารที่เน้นควบคุมยุงเกาะพักในพื้นที่อาศัย เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการศึกษาต่อกรณีใช้พ่นวัสดุอื่นนอกบ้านเพื่อเป็นกับดักยุงพาหะ เช่น รั้ว กำแพง พืชรอบบ้าน

4) การทดสอบฤทธิ์คงทนของสารเคมี (WHO Cone bioassay test) ดำเนินการตามแนวทางขององค์การอนามัยโลก[5,10] โดยเลือกบ้านที่มีพื้นผิวฝาผนังด้านนอกเป็นตัวแทนวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ ไม้ ไม้ไผ่ และปูนซีเมนต์ อย่างละ 12 หลัง และบ้านควบคุมชนิดละ 2 หลัง ทดสอบทุก 1 เดือนหลังการพ่น โดยใช้ยุงก้นปล่อง *Anopheles minimus* เพศเมียอายุ 3–5 วัน สายพันธุ์ห้องปฏิบัติการของกองโรคติดต่อนำโดยแมลง ยุงถูกใส่ในกรวยทดสอบที่ติดตั้งบนผนังด้านนอกบ้าน หลังละ 5 กรวย กรวยละ 10 ตัว ทำการทดสอบต่อเนื่องจนกว่าอัตราการตายเฉลี่ยของยุงจะต่ำกว่าร้อยละ 80 จึงยุติการทดสอบ

การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ จำนวน ร้อยละ เพื่ออธิบายชนิดและจำนวนยุงก้นปล่อง สถิติเชิงอนุมานใช้แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (Generalized Linear Model; GLM) แบบ Binomial logistic regression เพื่อประเมินอิทธิพลของขนาดสารเคมี วัสดุ และเวลา หลังการพ่นต่ออัตราการตายของยุงพาหะ การสร้างสมการเริ่มจากการใส่ตัวแปรอิสระทั้งหมดด้วยวิธี Enter method แล้วปรับสมการด้วยวิธี Backward Elimination โดยคัดตัวแปรที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value >0.05) ตามค่าสถิติ Wald และเลือกสมการที่มีค่า Akaike Information Criterion (AIC) ต่ำที่สุด ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองด้วยค่า Deviance และ Pearson Chi-square ต่อ df พร้อมประเมิน Nagelkerke R^2 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ปรับแล้ว (EMMeans) ด้วยวิธี Bonferroni adjustment กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05

ผลการศึกษา

1. ผลการสำรวจยุงก้นปล่องในพื้นที่ศึกษา

ระหว่างเดือนสิงหาคม 2567 ถึงพฤษภาคม 2568 พบยุงทั้งหมด 664 ตัว จาก 9 ชนิด โดยยุงพาหะหลักที่มี

ความสำคัญทางระบาดวิทยา ได้แก่ *Anopheles minimus* (ร้อยละ 53.2) *An. dirus* (ร้อยละ 12.3) และ *An. maculatus* (ร้อยละ 8.0) รวมคิดเป็นร้อยละ 73.4 ของยุงทั้งหมดที่จับได้ ซึ่งยืนยันความเสี่ยงการแพร่เชื้อมาลาเรียในพื้นที่ศึกษา เมื่อจำแนกตามวิธีการเก็บ พบว่า Human Landing Catch (HLC) แบบนอกบ้าน พบยุงมากที่สุด (ร้อยละ 55.9) รองลงมาคือ HLC แบบในบ้าน (ร้อยละ 26.0) และ CDC Light Trap (ร้อยละ 17.4) ผลการศึกษานี้สะท้อนพฤติกรรมการหากินนอกบ้านของยุงพาหะที่เป็นเป้าหมายหลักของการพ่นสารตกค้างภายนอก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จำนวนและร้อยละของยุงก้นปล่องที่จับได้จำแนกตามชนิดและวิธีการเก็บ พื้นที่ศึกษา สิงหาคม 2567–พฤษภาคม 2568

ชนิดยุง	Human Landing Catch		CDC Light Trap	รวม	ร้อยละ	ชนิดพาหะ
	ในบ้าน	นอกบ้าน				
An. minimus	108 (62.1)	169 (45.3)	76 (65.5)	353	53.2	พาหะหลัก
An. dirus	15 (8.6)	56 (15.0)	11 (9.5)	82	12.3	พาหะหลัก
An. maculatus	13 (7.5)	33 (8.8)	7 (6.0)	53	8.0	พาหะหลัก
An. barbirostris	27 (15.5)	77 (20.6)	13 (11.2)	117	17.6	พาหะสงสัย
An. aconitus	4 (2.3)	18 (4.8)	4 (3.4)	26	3.9	พาหะรอง
An. hyrcanus	2 (1.1)	9 (2.4)	2 (1.7)	13	2.0	ไม่ใช่พาหะ
An. jamesii	3 (1.7)	11 (2.9)	2 (1.7)	17	2.6	ไม่ใช่พาหะ
An. campestris	1(0.6)	0	1 (0.9)	2	0.3	พาหะสงสัย
An. varuna	1 (0.6)	0	0	1	0.15	ไม่ใช่พาหะ
รวมทั้งสิ้น	174 (26.0)	373 (55.9)	116 (17.4)	664	100.0	

2. สถานะความไวของยุงพาหะต่อสารเคมี ทดสอบความไวของยุงพาหะหลัก *An. minimus* ที่จับได้จากพื้นที่ศึกษา นำยุงไปสัมผัสกับกระดาษชุบสารเคมีกลุ่มไพรีทรอยด์ 3 ชนิด ซึ่งเคยมีประวัติการใช้ในพื้นที่ศึกษา ตามมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก ได้แก่ deltamethrin 0.05%, alphacypermethrin 0.05% และ lambda-cyhalothrin 0.05% ดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาอัตราการตายที่เวลา 24 ชั่วโมง ของยุงชุดทดสอบ พบว่าสถานะของยุงทดสอบยังมีความไวสูงต่อสารเคมีทั้งสามชนิด สนับสนุนความเหมาะสมในการใช้ สารเคมีแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูลสำหรับการศึกษา ORS

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความไวของ *An. minimus* ต่อสารเคมีกลุ่มไพรีทรอยด์

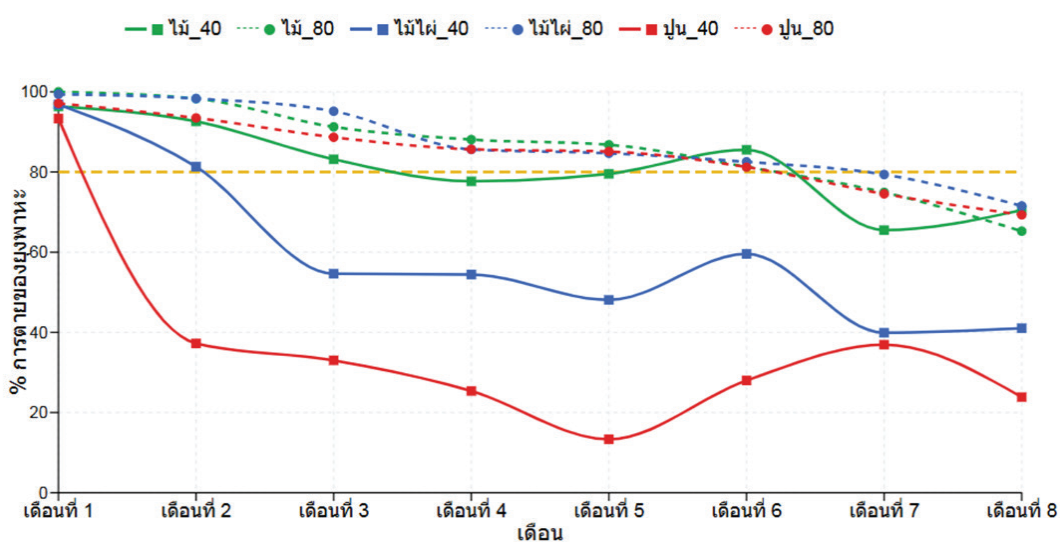
สารเคมี (ความเข้มข้น)	อัตราการตายของยุงทดสอบ (%)	การแปลผลตามเกณฑ์ WHO
Deltamethrin 0.05%	100.0	ความไวสูง
Alphacypermethrin 0.05%	100.0	ความไวสูง
Lambda cyhalothrin 0.05%	100.0	ความไวสูง

3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพสารเคมีตกค้างภายนอกบ้านบนพื้นผิววัสดุ

3.1 การเปรียบเทียบความเข้มข้นและชนิดวัสดุ ผลการทดสอบฤทธิ์คงทนของสารเคมีแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูลต่อยุง *Anopheles minimus* ด้วยวิธี WHO cone bioassay test แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของสารเคมีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเคมีและประเภทของวัสดุที่ใช้พ่น ความเข้มข้น 80 mg a.i./m² มีประสิทธิภาพสูงกว่าความเข้มข้น 40 mg a.i./m² อย่างชัดเจนในทุกประเภทวัสดุ โดยสามารถรักษาอัตราการตายของยุงให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน WHO (ร้อยละ 80.0) ได้นาน 6 เดือน ในขณะที่ความเข้มข้น 40 mg a.i./m² มีประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็วและต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังภาพที่ 1

3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ จำแนกตามประเภทพื้นผิว

การศึกษาประสิทธิภาพความคงทนของฤทธิ์สารเคมีแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูลบนพื้นผิวต่าง ๆ แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ดังภาพที่ 1 โดยพื้นผิวไม้มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถรักษาอัตราการตาย ≥ ร้อยละ 80 ได้นาน 5-6 เดือนที่ความเข้มข้น 80 mg a.i./m² และ 3-4 เดือนที่ความเข้มข้น 40 mg a.i./m² พื้นผิวไม้ไผ่แสดงประสิทธิภาพรองลงมา โดยคงอัตราการตาย ≥ร้อยละ 80.0 ได้ 4-5 เดือนและ 2-3 เดือน สำหรับความเข้มข้น 80 และ 40 mg a.i./m² ขณะที่พื้นผิวปูนซีเมนต์มีประสิทธิภาพต่ำสุดคงอัตราการตาย ≥ร้อยละ 80.0 ได้เพียง 2-3 เดือนและ 1-2 เดือน สำหรับความเข้มข้น 80 และ 40 mg a.i./m² โดยความเข้มข้น 40 mg a.i./m² บนพื้นผิวปูนซีเมนต์แสดงการเสื่อมสลายเร็วที่สุด มีประสิทธิภาพลดลงต่ำกว่าร้อยละ 40.0 ตั้งแต่เดือนที่ 2 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวต่อการดูดซับและการคงอยู่ของสารออกฤทธิ์



ภาพที่ 1 อัตราการตายของยุง *An. minimus* หลังสัมผัสแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน ที่อัตราผสม 40 mg a.i./m² และ 80 mg a.i./m² บนพื้นผิววัสดุไม้ ไม้ไผ่ และปูน

3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป ชนิด Binomial logistic regression บนพื้นผิวไม้ ความเข้มข้น 40 mg/m² เดือนที่ 1 พบว่า ความเข้มข้นของสารเคมี ประเภทวัสดุและระยะเวลาหลังพ่น มีอิทธิพลต่ออัตราการตายของยุงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากการทดสอบ 2,160 ชุด แบบจำลองมีความเหมาะสมสูง (χ^2 = 5,025.4, *df* = 8, *p*-value < 0.001, Pseudo-R^2 = 0.73, Dispersion parameter = 1.02) ทั้งนี้ รายงานทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) และค่า Odds Ratio (OR = e^β) เพื่อแสดงผลการเปลี่ยนแปลงทั้งเชิงสถิติและเชิงชีวภาพ โดยค่า OR ใช้เพื่อแสดงความน่าจะเป็นสัมพัทธ์ของการตายของยุงเมื่อเทียบกับกลุ่มอ้างอิง ซึ่งช่วยให้การตีความผลของแบบจำลองโลจิสติกชัดเจนยิ่งขึ้น ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการตายของยุง *Anopheles minimus* ด้วยแบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป แบบ Binomial logistic regression

ตัวแปร	สัมประสิทธิ์การถดถอย			Odds Ratio (95% CI)	p-value
	β	SE	Wald χ^2		
(Intercept: 40ml, ไม้, เดือนที่ 1)	4.08	0.25	273.9	59.15 (36.30-96.35)	<0.001
ความเข้มข้น (80 vs 40 mg/m²)	0.98	0.16	37.5	2.66 (1.95-3.64)	<0.001
วัสดุ: ไม้ไผ่ (vs ไม้)	-0.46	0.15	9.6	0.63 (0.47-0.84)	0.002
วัสดุ: ปูน (vs ไม้)	-1.10	0.15	52.0	0.33 (0.25-0.44)	<0.001
เวลา (เดือน)	-0.19	0.01	269.2	0.83 (0.81-0.85)	<0.001
ความเข้มข้น x ไม้ไผ่	0.11	0.19	0.34	1.12 (0.77-1.62)	0.561
ความเข้มข้น x ปูน	0.36	0.19	3.58	1.43 (0.99-2.07)	0.059
ความเข้มข้น x เวลา	-0.05	0.02	6.34	0.95 (0.91-0.99)	0.012
ไม้ไผ่ x เวลา	-0.06	0.01	16.5	0.94 (0.91-0.97)	<0.001

การใช้สารเคมีที่ความเข้มข้น 80 mg/m² เพิ่มโอกาสการตายของยุง 2.66 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ 40 mg/m² (95% CI: 1.95-3.64, *p*-value <0.001) โดยความเข้มข้น 80 มิลลิลิตรให้ค่าอัตราการตายสูงกว่ากลุ่ม 40 มิลลิลิตรในทุกประเภทพื้นผิววัสดุ โดยพบว่า ไม้ไผ่มีประสิทธิภาพลดลง ร้อยละ 37.0 (OR = 0.63, 95% CI: 0.47-0.84, *p*-value = 0.002) ปูนมีประสิทธิภาพลดลง ร้อยละ 67.0 (OR = 0.33, 95% CI: 0.25-0.44, *p*-value <0.001) ระยะเวลาหลังการพ่น ประสิทธิภาพลดลง ร้อยละ 17.0 ในทุกเดือนที่ผ่านไป (OR = 0.83, 95% CI: 0.81-0.85, *p*-value < 0.001)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ พบความสัมพันธ์ที่สำคัญ 2 ประการ ได้แก่

ความเข้มข้นกับเวลา (OR = 0.95, *p*-value = 0.012) โดยความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ที่ 80 mg/m² มีการเสื่อมสภาพเร็วกว่า 40 mg/m² เล็กน้อย แสดงว่าความเข้มข้นสูงให้ประสิทธิภาพเริ่มต้นสูงแต่ลดลงเร็วขึ้น ไม้ไผ่กับเวลา (OR = 0.94, *p*-value < 0.001) ไม้ไผ่มีการเสื่อมสภาพเร็วกว่าไม้ สะท้อนคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันในการดูดซับและคงสารเคมี

ทั้งนี้ ระหว่างความเข้มข้นกับประเภทวัสดุมีความสัมพันธ์กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าผลของความเข้มข้นมีความสม่ำเสมอในทุกประเภทวัสดุ

สรุปและอภิปรายผล

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการพ่นสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทรินสูตรไมโครแคปซูลภายนอกอาคาร (Outdoor Residual Spraying; ORS) ที่ความเข้มข้น 80 mg/m² มีประสิทธิภาพสูงกว่าความเข้มข้น 40 mg/m² อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value < 0.001) โดยมีฤทธิ์คงทนบนพื้นผิวไม้และไม้ไผ่ได้นาน 4–6 เดือน ขณะที่พื้นผิวปูนซีเมนต์มีความคงทนสั้นกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาของรัฐกะเหรี่ยง ประเทศเมียนมา ที่พบว่าการพ่นพื้นผิวภายนอกอาคารด้วยสารแลมบ์ดา-ไซฮาโลทริน สามารถลดอัตราการกัดของยุงก้นปล่องได้ 70–80% ภายใน 6 เดือน[11] และใกล้เคียงกับผลในรัฐซาราวัก ประเทศมาเลเซีย ซึ่งใช้เดลตาเมทรินสูตร PolyZone ที่เคลือบโพลีเมอร์ช่วยยึดเกาะพื้นผิว ทำให้อัตราการตายของยุงคงที่ถึง 100% ในช่วง 25 สัปดาห์ และลดอุบัติการณ์มาลาเรียได้อย่างมีนัยสำคัญ[4]

การศึกษาของ Joshua Mutagahywa และคณะ[12] ในทวีปแอฟริกาพบว่าสารเคมีสูตรไมโครแคปซูลให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันตามชนิดพื้นผิว โดยพื้นผิวที่มีรูพรุนสูง เช่น ปูนซีเมนต์จะคงฤทธิ์สั้นกว่าไม้ ที่มีความพรุนต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ ขณะที่ Fuqiang Yu และคณะ[13] รายงานว่าสูตรโพลียูรีอาไมโครแคปซูลสามารถปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ต่อเนื่องรักษาความเข้มข้นได้ยาวนานในสภาพแวดล้อมจริงและช่วยลดการเสื่อมสลายของสาร

จากหลักฐานทั้งในและต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าการพ่นภายนอกอาคารด้วยสารสูตรไมโครแคปซูลที่มีความคงทนสูงเป็นมาตรการเสริมที่มีศักยภาพในการเสริมประสิทธิภาพและความครอบคลุมของมาตรการควบคุมโรคที่มีอยู่ เช่น การใช้มุ้งชุบสารเคมีและการพ่นสารออกฤทธิ์ตกค้างภายในอาคารโดยเฉพาะในพื้นที่ที่ยุงพาหะมีพฤติกรรมกัดและเกาะพักนอกอาคาร[14,15] การดำเนินงานดังกล่าวสามารถสนับสนุนยุทธศาสตร์การกำจัดมาลาเรียแห่งชาติ พ.ศ. 2560–2569 และช่วยให้ประเทศไทยบรรลุเป้าหมายการกำจัดโรคภายในปี พ.ศ. 2569 ได้อย่างยั่งยืน นอกจากนี้ สารเคมีสูตรไมโครแคปซูลชนิดนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้พ่นบนวัสดุอื่นรอบบ้าน เช่น รั้ว กำแพง หรือโครงสร้างภายนอก เพื่อช่วยลดจำนวนยุงที่มาเกาะพักก่อนหรือหลังเข้าบ้าน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมยุงพาหะในพื้นที่เสี่ยงสูง การศึกษานี้ดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมจริง โดยใช้ขนาดตัวอย่างที่มากเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นและชนิดพื้นผิว อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ยังจำกัดอยู่ในพื้นที่เฉพาะแห่ง จึงควรตีความในบริบทของพื้นที่ชายแดนที่มีการแพร่เชื้อมาลาเรียต่อเนื่อง

ผลการศึกษานี้สามารถใช้ประกอบการกำหนดแนวทางเชิงนโยบายของกรมควบคุมโรคและกระทรวงสาธารณสุข ในการบูรณาการการพ่นสารภายนอกอาคารเข้ากับมาตรการควบคุมยุงพาหะระดับชาติ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองต่อพฤติกรรมการกัดนอกอาคารของยุงก้นปล่อง และสนับสนุนเป้าหมายการกำจัดมาลาเรียของประเทศไทยภายในปี พ.ศ. 2569

ข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารเคมีสูตรไมโครแคปซูลที่มีความคงทนต่อสิ่งแวดล้อม สามารถนำมาพ่นฤทธิ์ตกค้างกับวัสดุที่อยู่ด้านนอกบ้าน เช่น พื้นผิวฝาผนังด้านนอก รั้ว กำแพง หรือพืชรอบบ้านที่ยุงอาจมาเกาะพัก ทำหน้าที่เสมือนกับดักเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมยุงก้นปล่องได้ วิธีนี้มีศักยภาพในการใช้เป็นมาตรการเสริมควบคู่กับมาตรการหลักที่มีอยู่ ได้แก่ มุ้งชุบสารเคมีชนิดออกฤทธิ์ยาวนานและการพ่นสารตกค้างภายในอาคารหรือบ้าน

เนื่องจากสารเคมีสูตรไมโครแคปซูลมีหลายชนิดและได้รับการรับรองให้ใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร จึงสามารถนำมาทดแทนสูตรเดิมเพื่อเพิ่มความสะดวกในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม การนำไปประยุกต์ใช้จริงควรกำหนด รอบการพ่นที่เหมาะสมกับฤดูกาล และควรมีการติดตามเฝ้าระวังการต้านทานสารเคมี รวมถึงควรศึกษาเพิ่มเติมด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การยอมรับของชุมชน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อการควบคุมโรคอย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาผลของการพ่นสารเคมีสูตรไมโครแคปซูลในพื้นที่และฤดูกาลที่หลากหลาย เพื่อยืนยันประสิทธิภาพและความคงทนของสารภายใต้สภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน รวมถึงการติดตามผลในระยะยาวต่อความหนาแน่นของยุงและอัตราการแพร่เชื้อมาลาเรียในภาคสนาม

2. ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงในระดับพื้นที่ โดยประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ การยอมรับของชุมชน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับสูตรสารเคมีชนิดอื่น เช่น เดลตาเมทรินสูตรโพลีเมอร์ หรือคลอธิอานิดินสูตรไมโครแคปซูล เพื่อคัดเลือกแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้อำนวยการกองโรคติดต่อนำโดยแมลง และผู้อำนวยการสำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 5 จังหวัดราชบุรี ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณกวี โพธิ์เงิน หัวหน้ากลุ่มโรคติดต่อ คุณสุปราณี จงหมื่นไวย์ หัวหน้าศูนย์ควบคุมโรคติดต่อนำโดยแมลงที่ 5.2 จังหวัดเพชรบุรี และคุณคนึงจิต พุ่มดอกไม้ หัวหน้าศูนย์ควบคุมโรคติดต่อนำโดยแมลงที่ 5.4 จังหวัดราชบุรี ที่สนับสนุนบุคลากรและการประสานงานภาคสนาม รวมทั้งขอขอบคุณทีมกีฏวิทยาทุกท่านที่ร่วมดำเนินการวิจัยอย่างดียิ่ง

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมโรค. ยุทธศาสตร์การกำจัดโรคมาลาเรียแห่งชาติ พ.ศ. 2560-2569. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย; 2560.
2. World Health Organization. Global technical strategy for malaria 2016-2030. Geneva: World Health Organization; 2015.
3. Protopopoff N, Mosha JF, Lukole E, Charlwood JD, Wright A, Mwalimu CD, et al. Effectiveness of a long-lasting piperonyl butoxide-treated insecticidal net and indoor residual spray interventions, separately and together, against malaria transmitted by pyrethroid-resistant mosquitoes: a cluster, randomised controlled, two-by-two factorial design trial. Lancet 2018; 391(10130): 1577-88. doi: 10.1016/S0140-6736(18)30427-6.
4. Rowland M, Boko P, Odjo A, Asidi A, Akogbeto M, N'Guessan R. A new long-lasting indoor residual formulation of the organophosphate insecticide pirimiphos methyl for prolonged control of pyrethroid-resistant mosquitoes: an experimental hut trial in Benin. PLoS One 2013; 8(7): e69516. doi: 10.1371/journal.pone.0069516.
5. World Health Organization. Guidelines for testing mosquito adulticides for indoor residual spraying and treatment of mosquito nets. Geneva: World Health Organization; 2006.
6. World Health Organization. Equipment for vector control: specification guidelines. 4th ed. Geneva: World Health Organization; 2019.
7. World Health Organization. Manual for indoor residual spraying: application of residual sprays for vector control. 3rd ed. Geneva: World Health Organization; 2015.
8. Rattanarithikul R, Harrison BA, Harbach RE, Panthusiri P, Coleman RE. Illustrated keys to the mosquitoes of Thailand. IV. *Anopheles*. Southeast Asian J Trop Med Public Health 2006;37(Suppl 2): 1-128.
9. World Health Organization. Test procedures for insecticide resistance monitoring in malaria vector mosquitoes. 2nd ed. Geneva: World Health Organization; 2022.
10. World Health Organization. Guidelines for malaria vector control. Geneva: World Health Organization; 2019.

11. Chaumeau V, Cerqueira D, Zadrozny J, Kittiphanakun P, Andolina C, Chareonviriyaphap T, et al. Insecticide resistance in malaria vectors along the Thailand-Myanmar border. Parasit Vectors. 2017; 10(1): 165. doi: 10.1186/s13071-017-2102-z.
12. Mutagahywa J, Ijumba JN, Pratap HB, Molteni F, Mugarula FE, Magesa SM, et al. The impact of different sprayable surfaces on the effectiveness of indoor residual spraying using a microencapsulated formulation of lambda-cyhalothrin against *Anopheles gambiae s.s.* Parasit Vectors 2015; 8: 79. doi: 10.1186/s13071-015-0795-4.
13. Yu F, Wang Y, Zhao Y, Chou J, Li X. Preparation of polyurea microcapsules by interfacial polymerization of isocyanate and chitosan oligosaccharide. Materials 2021; 14(13): 3753. doi: 10.3390/ma14133753.
14. Mmbando AS, Ngowo HS, Kilalangongono M, Abbas S, Matowo NS, Moore SJ, et al. Small-scale field evaluation of push-pull system against early-and outdoor-biting malaria mosquitoes in an area of high pyrethroid resistance in Tanzania. Wellcome Open Res 2017; 2: 112. doi: 10.12688/wellcomeopenres.13006.1.
15. Wong ML, Chua TH, Leong CS, Khaw LT, Fornace K, Wan-Sulaiman WY, et al. Seasonal and spatial dynamics of the primary vector of Plasmodium knowlesi within a major transmission focus in Sabah, Malaysia. PLoS Negl Trop Dis 2015; 9(10): e0004135. doi: 10.1371/journal.pntd.0004135.