

การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของคาร์บอนด้วยพลาสมาความดันบรรยากาศ
สำหรับการแช่ด้วยน้ำมันหอมระเหยกานพลูเพื่อควบคุมไรศัตรูผึ้ง
Surface Modification of Carbon by Atmospheric-pressure Plasma
for Impregnation with Clove Essential Oil to Control Honeybee Mites

วีรนนท์ ไชยมณี^{1*}, พรพิมล พาชู¹, ประดุง สวนพุด², อีราพัฒน์ จักรเงิน³ และธรรมบุญ บุญมี¹

Veeranan Chaimanee^{1*}, Phonpimon Pasoo¹, Pradoong Suanpoot²

Theerapat Jakngern³ and Thummanoon Boonmee¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพทางอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ แพร่ 54140

²สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมป่าไม้ มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ แพร่ 54140

³สาขาวิชาการบัญชี มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ แพร่ 54140

¹Department of Agro-Industrial Biotechnology, Maejo University Phrae Campus, Phrae, Thailand 54140

²Department of Forest Industry Technology, Maejo University Phrae Campus, Phrae, Thailand 54140

³Department of Accounting, Maejo University Phrae Campus, Phrae, Thailand 54140

*Corresponding author: chveeranan@gmail.com

Abstract

Received: July 19, 2022

Revised: January 01, 2024

Accepted: January 23, 2024

Tropilaelaps spp. are ectoparasitic mites of honeybees. Mite parasitism can cause brood mortality and colony decline. In this study, the surface modification of carbon was performed using atmospheric of argon plasma jet with a 4.758 kV input voltage and a 829.901 kHz frequency to enhance material properties for mite control, absorption, evaporation and release rate of the clove (*Syzygium aromaticum*) essential oil. The results demonstrated that the absorption capacity was highest after plasma treatment at an argon flow rate of 1 L/min for 60 seconds (0.0080 ± 0.0003 μL of oil/mg of dry material). The plasma-treated carbon showed a higher release rate of clove oil at 4 and 8 h of incubation. The clove oil was released, at 17.127 ± 2.212 to 21.513 ± 2.330 $\mu\text{L/mL}$, after 72 h of incubation. The evaporation rate of essential oil was highest at 2 h of incubation in all treatments. The evaporation rate of plasma-untreated carbon (0.2442 ± 0.0807 $\mu\text{L/g}\cdot\text{hr}$) was higher than that of plasma-treated carbon. However, there was no significant difference among treatment groups. Thus, parameters related to the atmospheric pressure plasma should be further optimized to improve the material surfaces for use with essential oils to control honeybee mites.

Keywords: *Tropilaelaps*, honeybees, carbon, atmospheric-pressure plasma, clove essential oil

บทคัดย่อ

Tropilaelaps เป็นไรศัตรูผึ้งที่มีการแพร่ระบาดในอุตสาหกรรมเลี้ยงผึ้ง โดยไรชนิดนี้สามารถทำลายตัวอ่อนผึ้ง ทำให้ตัวอ่อนผึ้งตายและอาจส่งผลให้รังผึ้งล่มสลายในที่สุด ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของพลาสมาความดันบรรยากาศชนิดเจ็ทโดยแก๊สอาร์กอนด้วยแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 4.758 กิโลโวลต์ และความถี่ 829.901 กิโลเฮิร์ต ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดูดซับ การระเหย และการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจากแกนของคาร์บอน พบว่าคาร์บอนที่ผ่านการฉายพลาสมาที่อัตราไหลของแก๊สอาร์กอนเท่ากับ 1 ลิตร/นาที่นาน 60 วินาที มีค่าการดูดซับน้ำมันหอมระเหยจากแกนพลูได้สูงสุดเท่ากับ 0.0080 ± 0.0003 ไมโครลิตรต่อมิลลิกรัม น้ำหนักแห้งของวัสดุ น้ำมันหอมระเหยมีการปลดปล่อยสูงขึ้นในช่วงเวลาที่ 4-8 ชั่วโมงหลังผ่านพลาสมา และในช่วงเวลาที่ 72 ชั่วโมงมีการปลดปล่อยอยู่ในช่วง 17.127 ± 2.212 ถึง 21.513 ± 2.330 ไมโครลิตรต่อมิลลิกรัม นอกจากนั้นยังพบว่าอัตราการระเหยของน้ำมันจากแกนพลูบนวัสดุคาร์บอนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาที่ 2 ของการทดลอง ซึ่งคาร์บอนที่ไม่ได้ผ่านพลาสมามีอัตราการระเหยสูงสุด เท่ากับ 0.2442 ± 0.0807 ไมโครลิตรต่อกรัมต่อชั่วโมง แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง จากผลการวิจัยในครั้งนี้จะใช้เป็นแนวทางในการหาสภาวะที่เหมาะสมของพลาสมาในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุตัวกลางในการดูดซับและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยเพื่อใช้ในการควบคุมไรผึ้งได้

คำสำคัญ: *Tropilaelaps* ผึ้ง คาร์บอน เทคโนโลยีพลาสมาความดันบรรยากาศน้ำมันหอมระเหยจากแกนพลู

คำนำ

Tropilaelaps เป็นไรศัตรูผึ้งที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุตสาหกรรมเลี้ยงผึ้งพันธุ์ (*Apis mellifera*) เป็นอย่างมากทั้งในประเทศไทยและเอเชีย ไรจะดูดกินของเหลวภายในตัวอ่อนของผึ้ง ซึ่งอาจทำให้ตัวอ่อนผึ้งตายก่อนเจริญเติบโตเป็นตัวเต็มวัย ไรชนิดนี้สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้เร็วกว่าไร *Varroa* (Burgett *et al.*, 1983) ส่งผลให้ปัจจุบันประเทศไทยมีการระบาดของไร *Tropilaelaps* สูงกว่าไร *Varroa* ถึง 25 เท่า โดยสามารถพบการแพร่ระบาดของไรมากในช่วงฤดูการขยายพันธุ์ผึ้งที่มีตัวอ่อนจำนวนมาก (de Guzman *et al.*, 2017) ปัจจุบันมีการใช้สารเคมีในการควบคุมการแพร่ระบาดของไร เช่น อะมิทราซ ฟลูวาเลนต ฟลูเมทริน รวมทั้งกรดฟอรั่มิค (Burgett and Kitprasert, 1990; Camphor *et al.*, 2005; Kongpitak *et al.*, 2008) อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพของการใช้สารเคมีดังกล่าวมีความไม่สม่ำเสมอในการควบคุมไร อีกทั้งการใช้สารเคมีในรังผึ้งนั้นส่งผลต่อราชินีผึ้งและการดำเนินกิจกรรมของผึ้งภายในรัง และยังพบการตกค้างของสารเคมีในน้ำผึ้งและผลิตภัณฑ์จากผึ้งด้วย (Atwal and Goyal, 1971; Burley *et al.*, 2008; Haarmann *et al.*, 2002; Mullin *et al.*, 2010) ปัจจุบันจึงมีทางเลือกใหม่ คือ การใช้ไขมันหอมระเหยเพื่อนำมาใช้ในการควบคุมไรศัตรูผึ้ง *Varroa* และ *Tropilaelaps* (Bendifallah *et al.*, 2018; Chaimanee *et al.*, 2021; Damiani *et al.*, 2009) โดยไขมันหอมระเหยพืชหลายชนิดมีประสิทธิภาพในการควบคุมไรศัตรูผึ้งได้ในระดับห้องปฏิบัติการ เช่น น้ำมันหอมระเหยจากแกนพลูและกระวาน (Chaimanee *et al.*, 2021; Nuanjohn and Chaimanee, 2019) แต่เมื่อนำไปทดสอบในสภาวะจริงในรังผึ้งพบว่า ประสิทธิภาพของไขมันหอมระเหย

กานพลู (ความเข้มข้น 0.5 และ 5.0 % (v/v)) และกระวาน (ความเข้มข้น 1.0 และ 10.0 % (v/v)) บนกระดาษแข็งออกฤทธิ์ควบคุมไรศัตรูพืชได้ไม่ดีเท่าที่ควร (Chaimanee *et al.*, 2021) ซึ่งอาจจะต้องมีการเลือกใช้วัสดุตัวกลางที่เหมาะสม หรือการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุตัวกลางให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้น โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสภาพผิววัสดุ คือ เทคโนโลยีพลาสมาความดันบรรยากาศ (Non-thermal atmospheric pressure plasma technology)

เทคโนโลยีพลาสมาเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ ที่นำมาประยุกต์ใช้ปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นผิวของวัสดุ หรือผลิตภัณฑ์ได้ โดยพลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุ (Ionized particles) เช่น อิเล็กตรอน ไอออน Reactive Oxygen Species (ROS) และ Reactive Nitrogen Species (RNS) (O , O_2^+ , O_3 , OH , NO และ NO_2) (Kaushik *et al.*, 2019; Yanling *et al.*, 2014) ซึ่งอนุภาคที่มีประจุเหล่านี้ถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของพื้นผิว โดย Liu and Liao (2021) ศึกษาการใช้ออกซิเจนพลาสมาในการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวของถ่านไม้ไผ่เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว (Polar functional groups) และเอาไปใช้ร่วมกับไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวด้วยแสง UV ที่ประกอบด้วยอนุภาคนาโนเงิน เพื่อให้วัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรียสำหรับการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ การประยุกต์ใช้พลาสมาชนิด Dielectric Barrier Discharge (DBD) โดยใช้แก๊สผสมระหว่างอาร์กอนและไอของแอมโมเนียที่อัตราการไหล 1 ถึง 7 ลิตรต่อนาที ระยะเวลา 1 นาที เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของ Activated carbon ให้มีความชอบน้ำมากขึ้น สำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Lubis *et al.*, 2019) รวมถึงการศึกษาออกซิเจนพลาสมาในการเปลี่ยนแปลงพื้นผิว Activated carbon fiber เพื่อให้มีการดูดซับน้ำได้ดีขึ้นด้วย (Huang *et al.*, 2021) ส่วนการประยุกต์ใช้พลาสมาในอุตสาหกรรมการเลี้ยงผึ้งนั้น Boonmee *et al.* (2022) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้

อาร์กอนพลาสมาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 0.25 และ 0.50 ลิตรต่อนาที ระยะเวลา 30 และ 60 วินาทีต่อตารางเซนติเมตร เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของกระดาษแข็งสำหรับใช้เป็นวัสดุตัวกลางในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยกระวานในการควบคุมไร *Tropilaelaps* ซึ่งพบว่าอาร์กอนพลาสมาส่งผลให้เกิดการฉีกขาดของพื้นผิววัสดุ แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของกระดาษแข็ง และสามารถควบคุมการระบาดของไรในรังผึ้งได้ แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มของกระดาษแข็งที่ไม่ได้ผ่านพลาสมา นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุอื่นด้วยพลาสมา เช่น การเปลี่ยนแปลงเส้นใยโพลีเอสเตอร์ โดยใช้พลาสมาที่มีอากาศผสมกับแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตั้งต้น เพื่อให้เกิดการติดของเม็ดสีในเส้นใยโดยการเพิ่มหมู่ที่มีขั้วที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ($C=O$, $C-OH$ และ $COOH$) (Zhang *et al.*, 2017) และการนำพลาสมาไปเปลี่ยนแปลงสภาพผิวของเทพลอนให้มีความชอบน้ำมากขึ้น โดยการเติมหมู่ที่มีขั้วบนผิววัสดุนั้น ๆ (Lopez-Garcia *et al.*, 2018)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการใช้คาร์บอนเป็นวัสดุตัวกลาง และปรับปรุงสภาพพื้นผิวของคาร์บอนด้วยเทคโนโลยีพลาสมาความดันบรรยากาศ เพื่อให้วัสดุคาร์บอนมีประสิทธิภาพในการดูดซับ การระเหย และปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยกานพลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมไรศัตรูผึ้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ระบบพลาสมาความดันบรรยากาศแบบเจ็ท

โครงสร้างของระบบพลาสมาความดันบรรยากาศแบบเจ็ทที่ใช้สำหรับงานวิจัย แสดงดัง Figure 1 อาร์กอนพลาสมาสร้างขึ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 4.758 กิโลโวลต์ และความถี่ 829.901 กิโลเฮิร์ต โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูง และรูปคลื่นสัญญาณความถี่ไฟฟ้าแรงสูงด้วย High Voltage Probe (Tektronix

P6015A, USA) ที่เชื่อมต่อกับ Oscilloscope (Teledyne LeCroy HDO4024, USA) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุในพลาสมาด้วย Optical Emission

Spectroscopy (AVANTES, USA) โดยวาง Reflection probes ห่างจากหัวเจ็ทประมาณ 2.0 ซม.

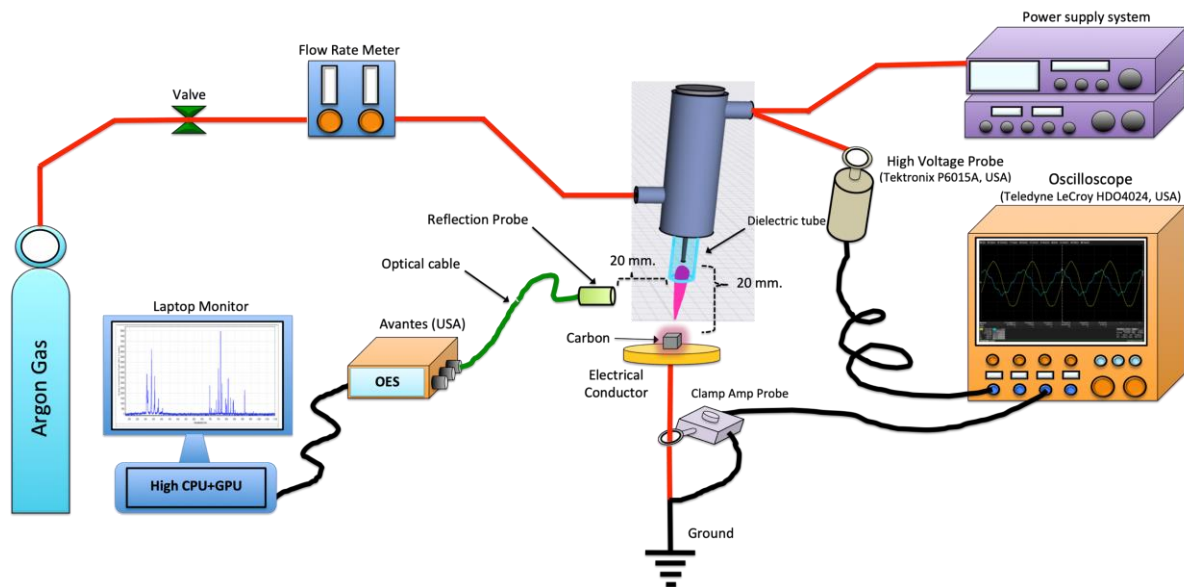


Figure 1 Schematic diagram of the atmospheric-pressure plasma jet system for the surface modification of carbon

การขึ้นรูปวัสดุคาร์บอน

นำก้อนคาร์บอนไปบดด้วยโม่ให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรูตะแกรงประมาณ 0.25 มิลลิเมตร จากนั้นนำคาร์บอนที่ผ่านการร่อนผสมด้วยแป้งมันสำปะหลังและน้ำ อัตราส่วนดังนี้ คาร์บอน 100 กรัม แป้ง 7 กรัม และน้ำปริมาตร 97 มิลลิลิตร โดยตม่น้ำให้เดือดแล้วนำแป้งมันที่เตรียมไว้ผสมลงไป ต้มจนแป้งมีสีใส นำผงคาร์บอนมาผสมกับแป้งเปียก ใช้แท่งแก้วคนจนส่วนผสมเข้ากันดี จากนั้นนำมาขึ้นรูปบนแม่พิมพ์ ที่มีความกว้าง 1 ซม. ความยาว 1 ซม. และความสูง 1 ซม. แล้วนำก้อนคาร์บอนไปผึ่งที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง นำวัสดุคาร์บอนไปอบที่อุณหภูมิ 50 °ซ. นาน 24 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่เพื่อไล่ความชื้นก่อนที่จะนำไปใช้ทดสอบต่อไป

การปรับปรุงพื้นผิววัสดุตัวกลางด้วยเทคโนโลยีพลาสมา ความดันบรรยากาศแบบเจ็ท

แบ่งวัสดุคาร์บอนออกเป็น 7 กลุ่มการทดลอง ๑ ละ 3 ชิ้น โดยวัสดุคาร์บอนแต่ละชิ้นจะถูกนำมาผ่านพลาสมาในสภาวะที่กำหนดจำนวน 6 สภาวะ คือ สภาวะที่มีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 และ 180 วินาที ตามลำดับ กำหนดระยะห่างระหว่างหัวพลาสมาเจ็ทกับพื้นผิวของวัสดุตัวกลางเท่ากับ 2.0 ซม. (Figure 1) และวัสดุคาร์บอนที่ไม่ได้ผ่านพลาสมาเป็นกลุ่มควบคุม

การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับและอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหย

ชั่งน้ำหนักวัสดุคาร์บอนแต่ละชิ้นก่อนและหลังการแช่ในน้ำมันหอมระเหยกานพลูนาน 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาตามที่กำหนด ชั่งน้ำหนักน้ำมันหอมระเหยส่วนเกินออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จดบันทึกค่าน้ำหนักก่อนและหลังแช่ โดยปริมาณการดูดซับน้ำมันหอมระเหยคำนวณเทียบจากกราฟมาตรฐานน้ำมันหอมระเหยกานพลู (ปริมาตรที่ใช้ตั้งแต่ 100-3,000 ไมโครลิตร) ซึ่งจะแสดงในหน่วยของไมโครลิตรของน้ำมันหอมระเหยต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้งของวัสดุ (μL of EO/mg of dry material) (Junka *et al.*, 2019) จากนั้นทำการวิเคราะห์อัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยโดยนำวัสดุแต่ละชิ้นไปวางในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30°C. ชั่งน้ำหนักวัสดุทุก ๆ 2 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นชั่งทุก ๆ 24 ชั่วโมง นับจากชั่วโมงที่ 0 เป็นระยะเวลา 14 วัน คำนวณหาปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เหลือในช่วงเวลานั้น ๆ เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน และคำนวณหาอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้ อัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหย ($\mu\text{L/g}\cdot\text{hr}$) = (ปริมาณน้ำมันหอมระเหย ณ เวลาก่อนหน้า - ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เหลือในช่วงเวลานั้น ๆ) / จำนวนชั่วโมง ดัดแปลงจาก Gaire *et al.* (2019)

การทดสอบคุณสมบัติการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหย

นำวัสดุคาร์บอนแต่ละชิ้นไปแช่น้ำมันหอมระเหยกานพลูเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาตามที่กำหนด ชั่งน้ำหนักน้ำมันหอมระเหยส่วนเกินออกด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำวัสดุคาร์บอนไปแช่ในพาราฟินเหลวปริมาตร 60 มล. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ในช่วงเวลาที่ 4, 8, 24, 36, 48, 56 และ 72 โดยใช้แท่งแก้วคนสารละลายให้เข้ากันดีก่อนนำไปวัดค่าดูดกลืนแสง และหลังจากการวัดค่าดูดกลืนแสงแล้วนั้นให้นำสารละลายใส่กลับลงไปในสารละลายเดิม นำค่าดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานระหว่างค่า

ดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหย โดยความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจะแสดงในหน่วยของไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร ($\mu\text{L/mL}$) (Junka *et al.*, 2019)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลการดูดซับ การระเหย และการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยมาวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม JMP® เวอร์ชัน 11.2 สำหรับ Mac (SAS Institute Inc.) ใช้วิธี Shapiro-Wilk test เพื่อทดสอบการแจกแจงปกติของชุดข้อมูล นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี One-way ANOVA และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดลองด้วยวิธี Tukey-HSD สำหรับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ และใช้การวิเคราะห์แบบ Non-parametric test (Kruskal-Wallis test) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดลองโดยวิธี Steel-Dwass posthoc multiple comparison test สำหรับข้อมูลที่ไม่ปกติ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$

ผลการวิจัย

สภาวะของพลาสมาและองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในพลาสมา

พลาสมาที่ใช้ในการวิจัยเกิดจากสร้างสนามไฟฟ้าแรงสูงบนสภาวะดังต่อไปนี้ แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่าย 4.758 กิโลโวลต์ สร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1.67 กิโลโวลต์ มีความถี่ 829.901 กิโลเฮิร์ต สร้างกระแสไฟฟ้าสลับ 88.76 มิลลิแอมแปร์ (Figure 2) และ Reactive species ที่ได้จากพลาสมาภายใต้สภาวะดังกล่าวแต่ละชนิดจะมีเส้นสเปกตรัมที่แตกต่างกัน จากการสร้างพลาสมาพบว่าทั้ง Reactive Oxygen Species (ROS) และ Reactive Nitrogen Species (RNS) คือ ไฮดรอกซิล (OH) และไนโตรเจน (N_2) โดยเมื่ออัตราการไหลของแก๊สอาร์กอนสูงขึ้นส่งผลให้ ROS และ RNS ที่ได้มีความเข้มข้นขึ้น (Figure 3)

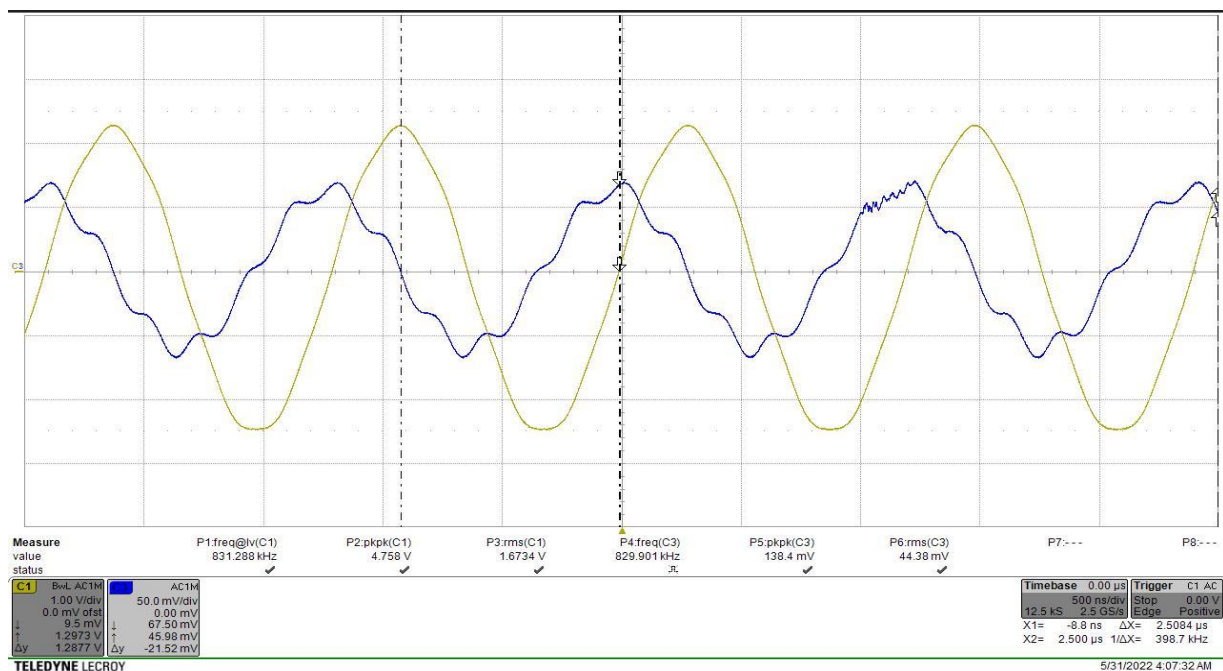


Figure 2 Current-voltage waveforms of the atmospheric-pressure argon plasma jet

การดูดซับน้ำมันหอมระเหยจากพลาสมาของวัสดุคาร์บอน

จากการทดลองการฉายพลาสมาบนพื้นผิววัสดุคาร์บอนโดยมีอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน เท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1 ลิตร/นาที่ เป็นระยะเวลา 60 และ 180 วินาที พบว่าวัสดุคาร์บอนที่ผ่านการฉายพลาสมา มีการดูดซับน้ำมันหอมระเหยอยู่ระหว่าง 0.0075 ± 0.0002 ถึง 0.0080 ± 0.0003 ไมโครลิตรต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้งของวัสดุ โดยวัสดุคาร์บอนที่ผ่านการฉายพลาสมาภายใต้อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 1.0 ลิตร/นาที่ นาน 60 วินาที มีการดูดซับน้ำมันหอมระเหยสูงสุดเท่ากับ 0.0080 ± 0.0003 ไมโครลิตรต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้งของวัสดุ ส่วนวัสดุที่ไม่ผ่านการฉายพลาสมา มีการดูดซับน้ำมันหอมระเหยเท่ากับ 0.0073 ± 0.0002 ไมโครลิตรต่อมิลลิกรัมน้ำหนักแห้งของวัสดุ (Figure 4a) อย่างไรก็ตามพบว่า การดูดซับน้ำมันหอมระเหยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง (Kruskal Wallis test, $p > 0.05$)

อัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยจากพลาสมาวัสดุคาร์บอน

น้ำมันหอมระเหยจากพลาสมามีอัตราการระเหยสูงสุดในชั่วโมงที่ 2 คือ 0.2442 ± 0.0807 ถึง 0.0385 ± 0.0003 ไมโครลิตรต่อกรัมต่อชั่วโมง โดยวัสดุคาร์บอนที่ไม่ผ่านพลาสมามีอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยสูงที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ผ่านพลาสมา (Kruskal Wallis test, $p > 0.05$) (Figure 4b) และอัตราการระเหยลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 2-4 จากนั้นน้ำมันหอมระเหยมีอัตราการระเหยค่อนข้างคงที่หลังจากชั่วโมงที่ 4 จนถึงวันที่ 4 ของการทดลอง และมีค่าลดลงอีกครั้งในวันที่ 4 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 14

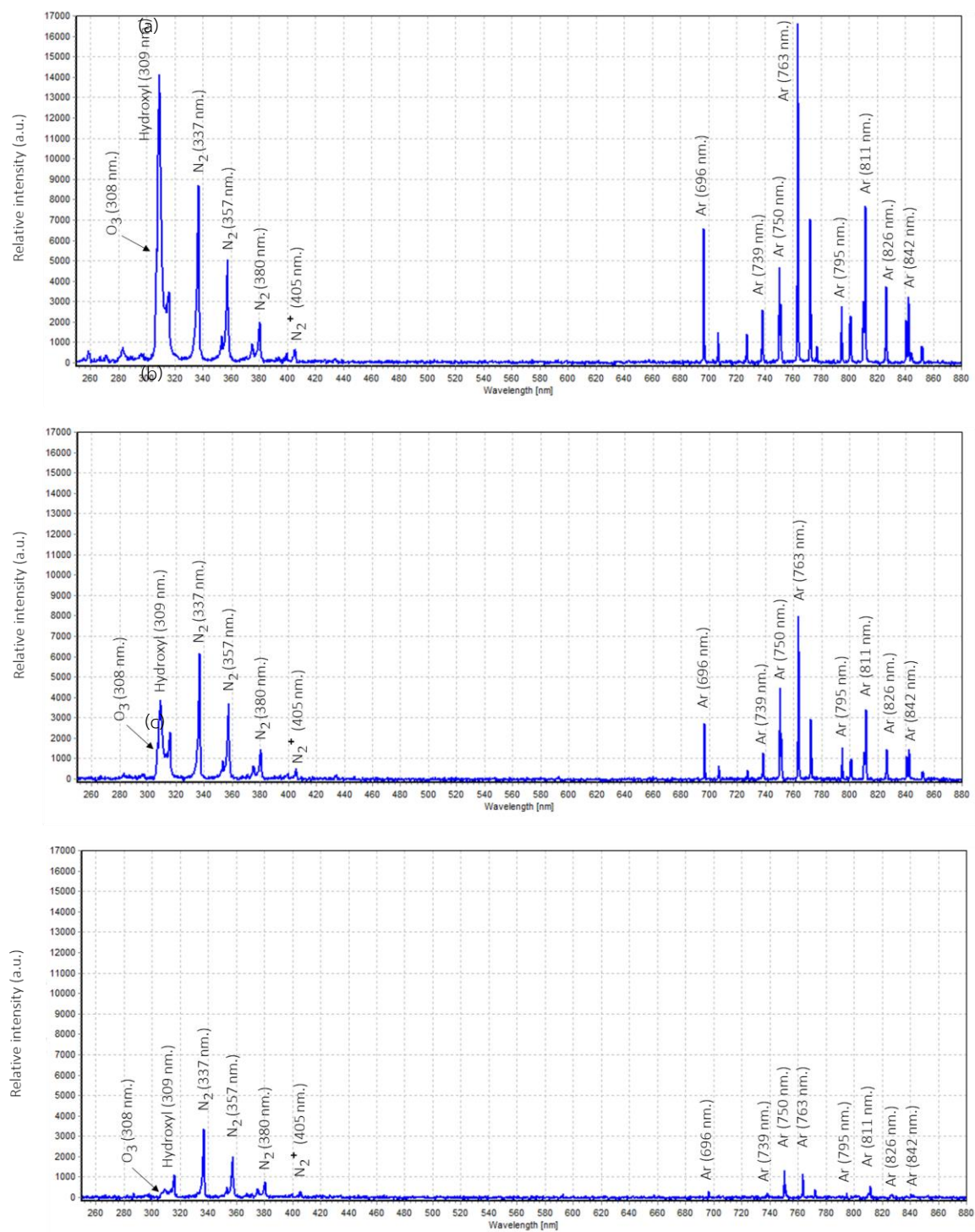
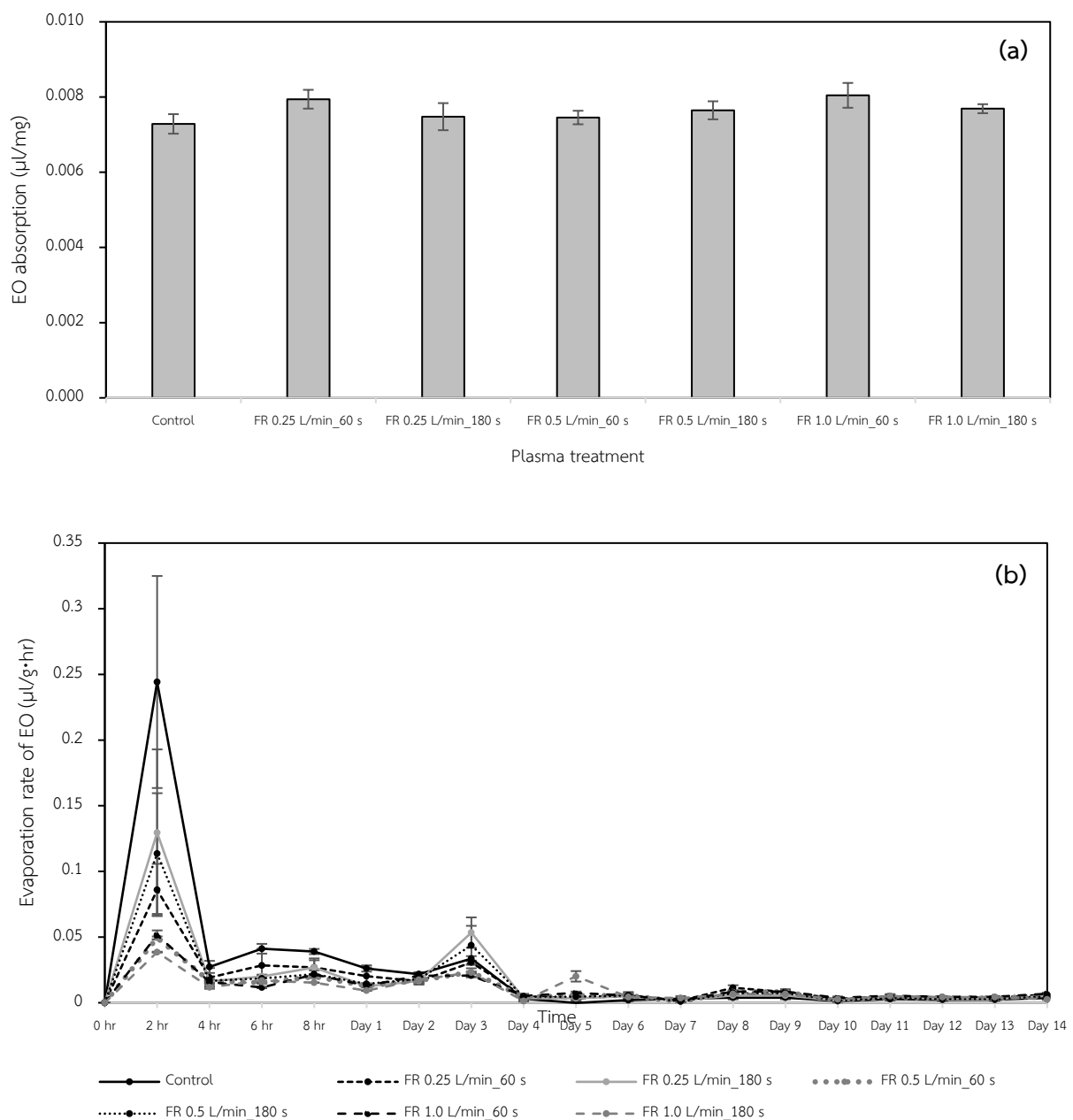


Figure 3 OES spectra of the atmospheric-pressure argon plasma jet at a gas flow rate of 1.0 L/min (a), 0.5 L/min (b) and 0.25 L/min (c)

การปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจากพลาสมาของวัสดุคาร์บอน

วัสดุคาร์บอนที่ผ่านและไม่ผ่านพลาสมาพบว่ามีการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ชั่วโมงที่ 4 ถึง ชั่วโมงที่ 72 ของการทดลอง โดยหลังผ่านพลาสมาภายใต้สภาวะที่กำหนดส่งผลให้วัสดุคาร์บอนมีการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจากพลาสมาเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 4 และ 8 (Figure 4c) แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านพลาสมา (Kruskal Wallis test, $p>0.05$) โดยในชั่วโมงที่ 4 คาร์บอนมีการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยอยู่ในช่วง 1.274 ± 1.204 ถึง 9.482 ± 2.988 ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร จนกระทั่งในชั่วโมงที่ 72 มีการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยอยู่ในช่วง 17.127 ± 2.212 ถึง 21.513 ± 2.330 ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตร โดยวัสดุคาร์บอนที่ไม่ได้ผ่านพลาสมา มีการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยสูงสุด



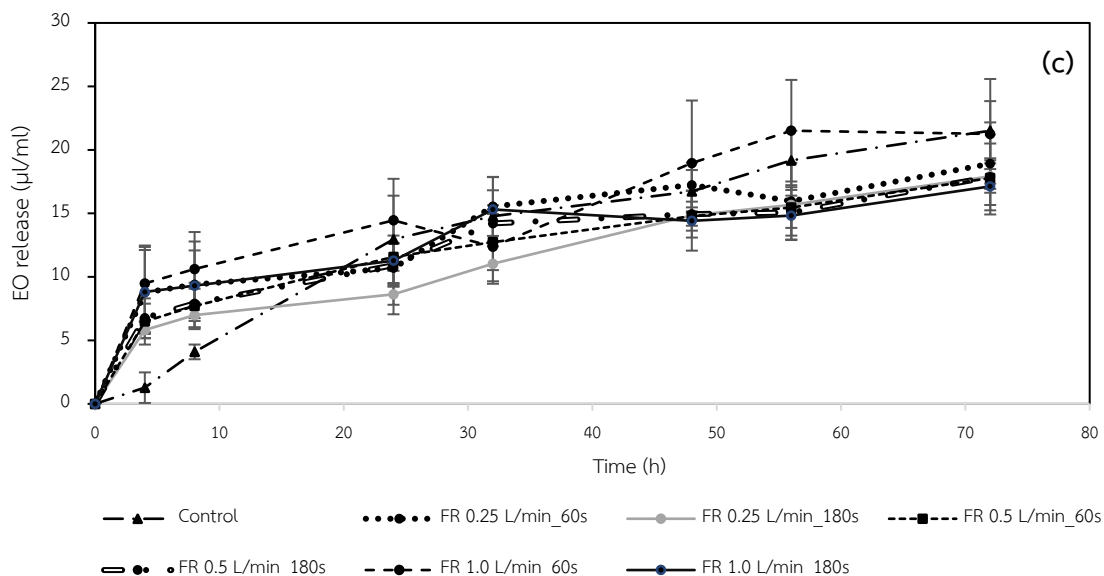


Figure 4 Absorption capacity (a) evaporation rate (b) and release rate (c) of clove EO by carbon materials. The data shown are the mean $\pm$ standard deviation. Comparisons of the evaporation rate and release of essential oil between treatments were made at each time interval.

วิจารณ์ผลการวิจัย

ปัจจุบันมีการรายงานวิจัยเกี่ยวกับน้ำมันหอมระเหยหลายชนิดที่มีคุณสมบัติในการฆ่าโรคศัตรูพืชได้ในการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ เช่น กานพลู กระวาน ตะไคร้หอม และยูคาลิปตัส เป็นต้น (Chaimanee *et al.*, 2021; Nuanjohn and Chaimanee, 2019) แต่เมื่อนำมาทดสอบในรังผึ้งจริงนั้นพบว่าประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยยังไม่คงที่ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหลายปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม รวมถึงพฤติกรรมของผึ้งภายในรัง อีกทั้งหากมีการใช้น้ำมันหอมระเหยในปริมาณที่มากเกินไปก็ส่งผลให้ผึ้งตายได้ ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาเลือกใช้วัสดุตัวกลาง ปริมาณของน้ำมันหอมระเหย และวิธีการนำไปใช้ในรังผึ้งที่มีความเหมาะสม และเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการยับยั้งไรผึ้ง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุคาร์บอนต่อการดูดซับการระเหย และการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจากกานพลู

โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาเพื่อช่วยเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น จากผลการวิจัยพบว่า การนำวัสดุคาร์บอนไปผ่านพลาสมาส่งผลให้วัสดุมีการดูดซับและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจากกานพลูได้เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านพลาสมา อย่างไรก็ตามพลาสมาทำให้คาร์บอนมีอัตราการระเหยของน้ำมันหอมระเหยลดลง ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าพลาสมาอาจส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพของคาร์บอนได้ ทั้งนี้ อาจจะต้องวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิด Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วย Boonmee *et al.* (2022) ได้รายงานว่าพลาสมาเจ็ทที่เกิดจากการใช้แก๊สอาร์กอนส่งผลให้พื้นผิวของกระดาษแข็ง (Cardboard) และกระดานรองวาดรูป (Drawing board) มีลักษณะแตกและฉีกขาดเล็กน้อย หมู่ฟังก์ชันของพื้นผิววัสดุไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อวิเคราะห์ด้วย Fourier-Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยการ

เปลี่ยนแปลงทางกายภาพไม่ได้ส่งผลต่อคุณสมบัติการดูดซับและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยกระวาน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นโดยพลาสมานั้นไม่น่าจะเกิดจากความร้อนเนื่องจากการทดลองได้ใช้ระบบพลาสมาเย็น แต่อาจจะเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานบนพื้นผิวของวัสดุโดยการรวมตัวกันของกลุ่มเคมีต่าง ๆ ในช่วงที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างพลาสมากับวัสดุ (Denes and Manolache 2004)

จากงานวิจัยครั้งนี้มีการกำหนดอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน และระยะเวลาฉายพลาสมาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Boonmee *et al.* (2022) ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส และระยะเวลาก็ไม่ได้ส่งผลให้วัสดุมีการดูดซับและปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยกลูบูลเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามชนิดของแก๊สก็อาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุด้วย เช่น การใช้แก๊สอาร์กอนร่วมกับไอของแอมโมเนียที่อัตราการไหล 1, 3, 6 และ 7 ลิตรต่อนาทีสามารถเปลี่ยนพื้นผิวของ Activated carbon ได้โดยมีค่า Contact angle ลดลงจาก 74° เป็นน้อยกว่า 15° โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากหมู่อะมิโน (Amino group) ที่ได้จากพลาสมาเข้าจับกับคาร์บอนอะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ Activated carbon มีคุณสมบัติชอบน้ำและเอาไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับในระบบบำบัดน้ำเสียได้ (Lubis *et al.*, 2019) นอกจากนั้น Kim *et al.* (2021) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้แก๊สดังต้นจำนวน 3 ชนิด ในการผลิตพลาสมา โดยมีอัตราการไหลของแก๊สและระยะเวลาการฉายพลาสมาแตกต่างกัน เพื่อเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของคาร์บอนไฟเบอร์สำหรับนำไปเป็นส่วนผสมของซีเมนต์ พบว่าออกซิเจนพลาสมาที่มีอัตราการไหลของแก๊ส 0.1 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการฉายนาน 3 นาที และไนโตรเจนพลาสมาที่มีอัตราการไหลของแก๊ส 0.1 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการฉายนาน 20 นาที สามารถที่จะเพิ่มความหยาบของพื้นผิวคาร์บอนได้ ในขณะที่อาร์กอนพลาสมาที่มีอัตราการไหลของแก๊ส 0.2 ลิตรต่อนาที ระยะเวลาในการฉายนาน 20 นาที ไม่ส่งผล

ต่อการเพิ่มความหยาบของวัสดุ แต่การฉายพลาสมาโดยใช้แก๊สดังต้นทั้ง 3 ชนิด สามารถทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำบนผิวของคาร์บอนไฟเบอร์ได้ ทำให้มีอัตราของความชุ่มชื้นสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างซีเมนต์มีความหนาแน่นมากขึ้นด้วย ดังนั้นสำหรับการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวกลางในการปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยเพื่อการยับยั้งไรศัตรูพืชได้นั้นอาจจะต้องทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาที่อาจจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุ เช่น ความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ชนิดและอัตราการไหลของแก๊ส ระยะห่างของหัวเจ็ทกับวัสดุ และระยะเวลาการฉายพลาสมา เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพลาสมาในการเปลี่ยนแปลงพื้นผิววัสดุหลายชนิด เช่น การลดคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (Superhydrophobic) ของ Polytetrafluoroethylene (PTFE) ด้วยพลาสมาที่มีอากาศเป็นแก๊สดังต้น เนื่องจากออกซิเจนในพลาสมาไปเพิ่มพลังงานให้แก่พื้นผิวและทำให้เกิดหมู่ที่ชอบน้ำขึ้น (Lopez-Garcia *et al.*, 2018) การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของเส้นใยโพลีเอสเตอร์โดยใช้พลาสมาที่มีอากาศผสมกับแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สดังต้น เพื่อให้เกิดการติดของเม็ดสีในเส้นใยโดยการเพิ่มความหยาบของพื้นผิวเส้นใยและเพิ่มหมู่ที่มีขั้วที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ($C=O$, $C-OH$ และ $COOH$) (Zhang *et al.*, 2017) และการประยุกต์ใช้ออกซิเจนหรือแอมโมเนียพลาสมากับเส้นใยนาโนชนิด Poly(lactic-co-glycolic acid) เพื่อให้มีคุณสมบัติชอบน้ำมากขึ้นโดยการเพิ่มหมู่ที่มีขั้วบนผิวเส้นใย ซึ่งส่งผลทำให้มีการยึดเกาะเซลล์ของ Fibroblasts ของหนูเมาส์ดีขึ้น และเซลล์มีการเพิ่มจำนวนได้สูงขึ้น โดยอาจจะสามารถนำไปพัฒนาด้านการตกแต่งเนื้อเยื่อเพื่อใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ได้ (Park and Lee, 2007) อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์น้ำมันหอมระเหยเพื่อยับยั้งไรศัตรูพืชนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้สามารถออกฤทธิ์ฆ่าไรได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงวงจรชีวิตของไรในรังผึ้ง

สรุปผลการทดลอง

การฉายอาร์กอนพลาสมาโดยใช้อัตราการไหลของแก๊ส เท่ากับ 0.25, 0.5 และ 1.0 ลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 และ 180 วินาที มีอิทธิพลต่อการดูดซับการระเหย และปลดปล่อยน้ำมันหอมระเหยจากพลูบับวัสดุคาร์บอนได้ อย่างไรก็ตามควรที่จะทำทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยบนวัสดุคาร์บอนต่อการควบคุมไรในรังผึ้งด้วย เพื่อให้งานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงได้ในอุตสาหกรรมการเลี้ยงผึ้ง และอาจต้องทำการศึกษาชนิดของแก๊สตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊ส และระยะเวลาของการฉายพลาสมา รวมถึงชนิดของวัสดุตัวกลางอื่น ๆ ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2565 (รหัสโครงการวิจัย มจ.1-65-007)

เอกสารอ้างอิง

Atwal, A.A. and N.P. Goyal. 1971. Infestation of honey bee colonies with *Tropilaelaps*, and its control. **Journal of Apicultural Research** 10: 137-142.

Bendifallah, L., R. Belguendouz, L. Hamoudi and K. Arab. 2018. Biological activity of the *Salvia officinalis* L. (Lamiaceae) essential oil on *Varroa destructor* infested honeybees. **Plants** 7: 44.

Boonmee, T., L. Wongthaveethong, C. Sinpoo, T. Disayathanoowat, J.S. Pettis and V. Chaimanee. 2022. Surface modification of materials by atmospheric-pressure plasma to improve impregnation with essential oils for the control of *Tropilaelaps* mites in honeybees (*Apis mellifera*). **Applied Sciences** 12: 5800.

Burgett, D.M. and C. Kitprasert. 1990. Evaluation of ApistanTM as a control for *Tropilaelaps clareae* (Acari, Laelapidae), an Asian honey bee brood mite parasite. **American Bee Journal** 130: 51-53.

Burgett, M., P. Akwatanakul and R.A. Morse. 1983. *Tropilaelaps clareae*: a parasite of honeybees in South-East Asia. **Bee World** 64: 25-28.

Burley, L.M., R.D. Fell and R.G. Saacke. 2008. Survival of honey bee (Hymenoptera: Apidae) spermatozoa incubated at room temperature from drones exposed to miticides. **Journal of Economic Entomology** 101: 1081-1087.

Camphor, E.S.W., A.A. Hashmi, W. Ritter and I.D. Bowen. 2005. Seasonal changes in mite (*Tropilaelaps clareae*) and honeybee (*Apis mellifera*) populations in apistan treated and untreated colonies. **Apiacta** 40: 34-44.

- Chaimanee, V., N. Warrit, T. Boonmee and J.S. Pettis. 2021. Acaricidal activity of essential oils for the control of honeybee (*Apis mellifera*) mites *Tropilaelaps mercedesae* under laboratory and colony conditions. **Apidologie** 52: 561-575.
- Damiani, N., L.B. Gende, P. Bailac, J.A. Marcangeli and M.J. Eguaras. 2009. Acaricidal and insecticidal activity of essential oils on *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). **Parasitology Reserach** 106: 145-152.
- de Guzman, L.I., G.R. Williams, K. Khongphinitbunjong and P. Chantawannakul. 2017. Ecology, Life History, and Management of *Tropilaelaps* Mites. **Journal of Economic Entomology** 110: 319-332.
- Denes, F.S. and S. Manolache. 2004. Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science. **Progress in Polymer Science** 29: 815-885.
- Gaire, S., M.E. Scharf and A.D. Gondhalekar. 2019. Toxicity and neurophysiological impacts of plant essential oil components on bed bugs (Cimicidae: Hemiptera). **Scientific Reports** 9: 3961.
- Haarmann, T., M. Spivak, D. Weaver, B. Weaver and T. Glenn. 2002. Effects of fluvalinate and coumaphos on queen honey bees (Hymenoptera: Apidae) in two commercial queen rearing operations. **Journal of Economic Entomology** 95: 28-35.
- Huang, Y., Q. Yu, M. Li, S. Jin, J. Fan, L. Zhao and Z. Yao. 2021. Surface modification of activated carbon fiber by low-temperature oxygen plasma: textural property, surface chemistry, and the effect of water vapor adsorption. **Chemical Engineering Journal** 418: 129474.
- Junka, A., A. Zywicka, G. Chodaczek, M. Dziadas, J. Czajkowska, A. Duda-Madej, M. Barttoszewicz, K. Mikolajewicz, G. Krasowski, P. Szymczyk and K. Fijalkowski. 2019. Potential of biocellulose carrier impregnated with essential oils to fight against biofilms formed on hydroxyapatite. **Scientific Reports** 9: 1256.
- Kaushik, N.K., N. Kaushik, N.N. Linh, B. Ghimire, A. Pengkit, J. Sornsakdanuphap, S.-J. Lee and E.H. Choi. 2019. Plasma and nanomaterials: fabrication and biomedical applications. **Nanomaterials** 9: 98.

- Kim, J.H., J.H. Han, S. Hong, D.-W. Kim, S.H. Park, J.-H. Wee, K.S. Yang, Y.A. Kim. 2021. Effect of plasma surface modification on pullout characteristics of carbon fiber-reinforced cement composites. **Carbon Trends** 3: 100030.
- Kongpitak, P., G. Polgar and J. Heine. 2008. The efficacy of Bayvarol[®] and Checkmite+[®] in the control of *Tropilaelaps mercedesae* in the European honey bee (*Apis mellifera*) in Thailand. **Apiacta** 43: 12-16.
- Liu, S.-J. and S.-C. Liao. 2021. Surface modification of bamboo charcoal by O₂ plasma treatment and UV-grafted thermos-sensitive AgNPs hydrogel to improve antibacterial properties in biomedical application. **Nanomaterials** 11: 2697.
- López-García, J., F. Cupessala, P. Humpolíček and M. Lehocký. 2018. Physical and morphological changes of poly(tetrafluoroethylene) after using non-thermal plasma treatments. **Materials** 11: 2-10.
- Lubis, R.W., T.E. Saraswati, U.H. Setiawan and K. Kusumandari. 2019. Surface modification of activated carbon using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge (DBD) plasma jet. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 578: 012010.
- Mullin, C.A., M. Frazier, J.L. Frazier, S. Ashcraft, R. Simonds, D. vanEngelsdorp and J.S. Pettis. 2010. High levels of miticides and agrochemicals in North American apiaries: implications for honey bee health. **PLoS ONE** 5: e9754.
- Nuanjohn, T. and V. Chaimanee. 2019. Effectiveness of some essential oils for control of *Tropilaelaps mercedesae* mites in honeybees (*Apis mellifera*). **King Mongkut's Agricultural Journal** 37: 43-50. [in Thai]
- Park, H. and K.Y. Lee. 2007. Plasma-treated poly(lactic-co-glycolic acid) nanofibers for tissue engineering. **Macromolecular Research** 15: 238-243.
- Yanling, C., W. Yingkuan, P. Chen, S. Deng and R. Ruan. 2014. Non-thermal plasma assisted polymer surface modification and synthesis: a review. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 7: 1-9.
- Zhang, C., M. Zhao, L. Wang, L. Qu and Y. Men. 2017. Surface modification of polyester fabrics by atmospheric-pressure air/He plasma for color strength and adhesion enhancement. **Applied Surface Science** 400: 304-311.