

จลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกระชายดำที่อบแห้ง  
ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

**DRYING KINETIC AND QUALITY OF BLACK KAEMPFERIA DRYING  
USING MICROWAVE-VACUUM TECHNIQUE**

จามร ภัคดีศรีแพง<sup>1</sup> ดวงสิริ สยมภาค<sup>2</sup> และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตติ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษา, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน)

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, jamornpakseepaeng@gmail.com

<sup>2</sup>อาจารย์, หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, dhongsiri\_sa@rmutto.ac.th

<sup>3</sup>อาจารย์, หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน)

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก,

43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110, kittisak\_wi@rmutto.ac.th

Jamorn Pakseepaeng<sup>1</sup>, Dhongsiri Sayompark<sup>2</sup> and Kittisak Witinantakit<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Student, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and

Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, jamornpakseepaeng@gmail.com

<sup>2</sup>Lecturer, Bachelor of Science (Food Science and Technology) Faculty of Science and

Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, dhongsiri\_sa@rmutto.ac.th

<sup>3</sup>Lecturer, Master of Engineering Program (Energy Technology) School of Engineering and

Innovation, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, 43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Chonburi 20110, Thailand, kittisak\_wi@rmutto.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง ความเปลี่ยนแปลงพลังงานจำเพาะและคุณภาพของกระชายดำหลังจากการอบแห้ง ในด้านสี ปริมาณน้ำอิสระและการต้านอนุมูลอิสระ

กระชายดำมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 121.58% d.b. อบแห้งจนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 7.47-12.18% d.b. โดยความดันห้องอบแห้ง 3 ระดับ คือ ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 กิโลปาสกาล และแหล่งความร้อนจากไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ จากการศึกษพบว่า การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa ใช้เวลาในการอบสั้นที่สุด 150 นาที แต่การอบแห้งที่ความดัน 20 kPa จะมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำที่สุด 50.73 MJ/kg<sub>water evap.</sub> และความแตกต่างของสีโดยรวมต่ำที่สุด คือ 8.21 นอกจากนี้ ในทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคือ ไม่เกิน 0.6 และสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระชายดำสด ซึ่งกระชายดำหลังอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีสารฟีนอลิกรวม 2.73 mg GAE/g f.w. และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 1.00 mg AAE/g f.w. สูงที่สุด และมีค่าสูงกว่าการตากแดด สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัลที่สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำได้เหมาะสมที่สุดคือแบบจำลองของ Midilli โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) 0.99936 สูงที่สุด และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) 0.00737 ต่ำที่สุด

**คำสำคัญ:** กระชายดำ, การอบแห้ง, ไมโครเวฟ, สุญญากาศ

### ABSTRACT

The objective of this research was to study on drying kinetics, specific energy consumption, qualities were color and water activity, antioxidants and antioxidant activities, as well as mathematical modeling of drying of black kaempferia. The moisture content of black kaempferia was reduced from 121.58% to 7.47-12.18% d.b. by combined vacuum and microwave technique at three levels of drying pressure, i.e., atmospheric pressure, absolute pressure of 20 and 5 kPa using a microwave power of 800 Watts. The study found that the shortest drying time of 150 minutes using an absolute pressure of 5 kPa. Anyway, drying at 20 kPa absolute pressure had the lowest specific energy consumption of 50.73 MJ/kg<sub>water evap.</sub> and the lowest total color difference is 8.21. However, all experimental conditions had water activity within the standard, not more than 0.6, total phenolic compounds and antioxidant activity were decreased compared to fresh black kaempferia. Drying of black kaempferia at absolute pressure of 5 kPa had the highest total phenolic compounds at 2.73 mg GAE/g f.w. and the highest antioxidant activity of 1.00 mg AAE/g f.w., which were higher than sun drying. Midilli's empirical mathematical model is suitable to predict drying kinetics for drying black kaempferia. It has the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) 0.99936 and the lowest root mean square error (RMSE) 0.00737.

**KEYWORDS:** Black kaempferia, Drying, Microwave, Vacuum

## 1. บทนำ

กระชายดำ (*Kaempferia parviflora* Wallich. ex Baker) เป็นหนึ่งในพืชสมุนไพรที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งได้รับการส่งเสริมให้มีการส่งออกและถือเป็นหนึ่งในสมุนไพรโปรดักส์แชมเปียน ตามแผนแม่บทแห่งชาติว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย ฉบับที่ 1 ปี พ.ศ. 2559-2564 กระชายดำนั้นนอกจากผลิตเพื่อการบริโภคในประเทศแล้ว ยังมีการผลิตเพื่อส่งออกอีกด้วย โดยประเทศคู่ค้าที่สำคัญ คือ เกาหลี และญี่ปุ่น ซึ่งส่วนมากจะซื้อในลักษณะของกระชายอบแห้ง การผลิตเพื่อส่งออกต้องผลิตให้ได้คุณภาพและมาตรฐาน ตั้งแต่กระบวนการเพาะปลูก การเก็บเกี่ยวไปจนถึงการแปรรูปจึงสามารถส่งออกได้ [1] โดยจุดแข็งด้านการตลาดของกระชายดำ ได้แก่ ถิ่นเพาะปลูกที่ยังสามารถเพาะปลูกได้เฉพาะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้ประเทศอื่นเข้ามาแข่งขันได้ยาก โดยในประเทศไทยมีการปลูกกระชายดำตามแถบที่เป็นภูเขา มีการปลูกมากในจังหวัดเพชรบูรณ์ พิษณุโลก และจังหวัดเลย โดยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกกระชายดำคือ เป็นพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 500-700 เมตร ดินมีความร่วนซุย ระบายน้ำได้ดี ตลาดที่สำคัญของกระชายดำและสารสกัดจากกระชายดำ ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เสริมอาหาร มีอัตราการเติบโตของมูลค่าอุตสาหกรรมเฉลี่ยในช่วง 3 ปีเพิ่มขึ้นร้อยละ 19.52 และคาดว่าจะเติบโตได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกระชายดำมีสรรพคุณทางยาสูง ในเรื่องของ การบำรุงร่างกาย ช่วยในเรื่องของการไหลเวียนเลือดที่ดี การลดการอักเสบและมีการทำการตลาดว่ามีสรรพคุณเทียบเท่าโสมของเกาหลี ช่วยชะลอวัย ต้านอักเสบและเพิ่มความแข็งแรงของกล้ามเนื้อทำให้รู้สึกกระปรี้กระเปร่า และสมรรถภาพทางเพศ เป็นต้น [2] ในการนำกระชายดำไปบริโภคหรือใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ส่วนหนึ่งจะใช้กระชายดำแห้งที่สามารถเก็บรักษาได้นานทั้งระหว่างการขนส่งและการแปรรูป ดังนั้นกระบวนการทำแห้งจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญก่อนนำไปบริโภคหรือแปรรูป การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง ตลอดจนการควบคุมกระบวนการอบแห้งเพื่อคงคุณภาพของกระชายดำหลังการอบแห้งจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

สำหรับการอบแห้งด้วยไมโครเวฟนั้นเป็นกระบวนการทำให้เกิดความร้อนจากการที่วัสดุดูดซับพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากการมีคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งสนามไฟฟ้าจากคลื่นไมโครเวฟจะทำให้เกิดการหมุนและสั่นของอนุภาคไดโพลและของโมเลกุลน้ำภายในวัสดุ ทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นภายในวัสดุ [3] นอกจากนั้นคลื่นไมโครเวฟยังสามารถทะลุทะลวงผ่านชั้นเนื้อเยื่อของวัสดุเข้าสู่ชั้นในได้อย่างรวดเร็วในขณะที่ผิวชั้นนอกของวัสดุก็ยังไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนที่สูงมาก ดังนั้นจึงทำให้น้ำในวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นและระเหยอย่างรวดเร็วทั้งจากภายนอกและภายในวัสดุไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งทำให้สามารถรักษาโครงสร้างทางกายภาพส่วนอื่น ๆ ของวัสดุให้ยังคงมีสภาพใกล้เคียงวัสดุสดได้ดีพอสมควร และสำหรับการอบแห้งภายใต้สภาวะ

ความดันสุญญากาศเป็นการปรับสภาวะการทำงานของเครื่องอบแห้งให้มีสภาวะที่ทำให้อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำในวัสดุต่ำลง ทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้เร็วขึ้น และเมื่อน้ำจุดเด่นของไมโครเวฟและสุญญากาศมารวมกันในกระบวนการอบแห้ง จะส่งผลให้ประหยัดพลังงานและเวลาในการระเหยน้ำออกจากวัสดุ [4] ทำให้วัสดุได้รับความร้อนในระยะเวลาที่สั้นลง ซึ่งอาจจะส่งผลดีกับคุณสมบัติบางประการของวัสดุ เช่น สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสดีกว่าการใช้ความร้อนแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังรักษาคุณค่าทางโภชนาการ ประหยัดพลังงาน ควบคุมได้ง่าย ปลอดภัย ตัวเครื่องจักรมีขนาดเล็ก ใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย และยังสามารถผลิตได้เองในประเทศ [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟและคุณภาพทางกายภาพของกระชายดำที่ผ่านการอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง รวมถึงสารสำคัญในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร [6] และผลิตภัณฑ์เพื่อการดูแลสุขภาพ [2] ด้วยเทคนิคดังกล่าวข้างต้น

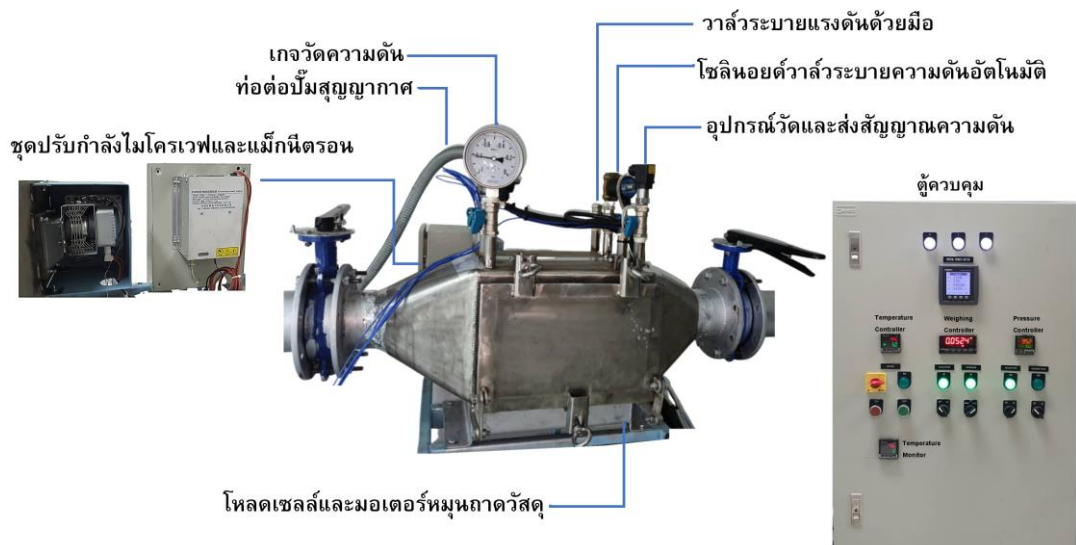
## 2. อุปกรณ์และการดำเนินการวิจัย

### 2.1 เครื่องอบแห้งแบบผสมผสาน

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการวิจัย เป็นเครื่องอบแห้งแบบผสมผสานระดับห้องปฏิบัติการ โดยเครื่องอบแห้งจะมีแหล่งความร้อนจากแมกนีตรอนไมโครเวฟยี่ห้อ LG ขนาด 1000 วัตต์ ระดับกำลังของไมโครเวฟทำการปรับตั้งผ่านชุดควบคุมกำลังไมโครเวฟแบบทำงานต่อเนื่อง รุ่น LCEL01D และมีสุญญากาศขนาด 1 แรงม้า สามารถสร้างความดันภายในห้องอบแห้งได้ที่มีความดันสัมบูรณ์ 2 กิโลปาสคาล ในส่วนระบบการอ่านค่าและควบคุม มีระบบวัดค่าความดันห้องอบแห้งด้วย Pressure Transmitter ยี่ห้อ Zega รุ่น PT9200W ช่วงการวัด -1 ถึง 1 บาร์ ความแม่นยำ  $\pm 0.5\%$  ที่ทำงานร่วมกับชุดควบคุมความดันเพื่อทำการตัดต่อปั๊มสุญญากาศ ยี่ห้อ Delta รุ่น DTA4848 ความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 บาร์ ใช้รูปแบบการควบคุมป้อนกลับแบบ PID ซึ่งสามารถควบคุมความดันให้อยู่ในระดับที่ต้องการ มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 0.2$  บาร์ ในการชั่งน้ำหนักของวัสดุที่นำมาอบแห้งจะวางถาดวัสดุบนแกนหมุนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขณะทำการอบแห้ง ซึ่งติดตั้งอยู่บนโพลดเซลล์ ยี่ห้อ Tedeo Huntleigh รุ่น 1022 พิกัด 2 กิโลกรัม แรงดันเอาท์พุท 2mV/V ที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์แสดงค่าน้ำหนัก ยี่ห้อ Eyecon รุ่น EICMC-1AB ความละเอียดในการอ่านค่า 0.1 กรัม ความแม่นยำ  $\pm 0.01\%$  จากนั้นจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 0-10 V<sub>dc</sub> เพื่อบันทึกค่าน้ำหนักด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Graphtech Midi Logger รุ่น GL220 ในส่วนค่ากำลังและพลังงานไฟฟ้าจะใช้เครื่องวัดและบันทึกแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Schneider รุ่น PM2200 ซึ่งวัดกระแสไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงกระแส ยี่ห้อ Qubix รุ่น MSQ-30 พิกัด 30/5A Class 1.0 ระบบการทำงานทั้งหมดถูก

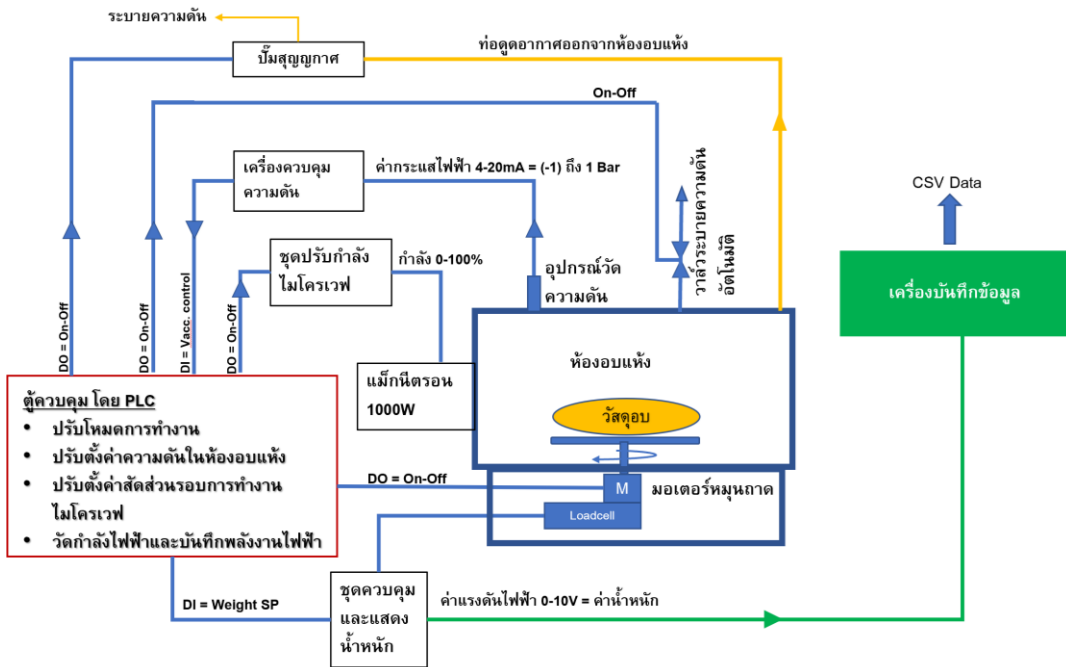
ควบคุม PLC ยี่ห้อ Siemens รุ่น LOGO! โดยเครื่องอบแห้งจะมีส่วนประกอบและระบบการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 1 และรูปที่ 2

สำหรับการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารอบแห้งกระชายดำโดยใช้เทคนิคสุญญากาศร่วมกับ ไมโครเวฟ ทำการปรับตั้งกำลังกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟไว้ที่ 800 วัตต์ และกำหนดเวลาเปิด-ปิด แมกนีตรอนเป็นช่วง ๆ แบบ 1:2 [7] ซึ่งเวลาเปิดต่อเวลาปิด คือ 20:40 วินาที ตลอดการทดลอง โดยปรับตั้งที่เครื่องควบคุมกำลังไมโครเวฟและอ่านค่ากำลังไฟฟ้าค่าจากมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า แบบดิจิตอล ในส่วนความดันห้องอบแห้งจะทำการปรับตั้งที่เครื่องควบคุมความดันเพื่อควบคุม การทำงานของปั๊มสุญญากาศผ่านระบบ PLC ให้ความดันในห้องอบแห้งคงที่



รูปที่ 1 ส่วนประกอบเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

ในการทดลองจะปรับตั้งความดันห้องอบแห้งเป็นค่าความดันสัมบูรณ์ตามเงื่อนไขการทดลอง คือ ความดันบรรยากาศ (101.325 kPa, ไม่เปิดปั๊มสุญญากาศ) ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa ตามลำดับ ค่าน้ำหนักทำการวัดด้วยโพลีเซลล์ภายในเครื่องอบแห้ง ส่งค่าน้ำหนักผ่านเครื่องแสดง น้ำหนักและส่งต่อเข้าเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ตลอดการทดลอง



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ

2.2 วิธีการทดลอง

กระชายดำที่ปลูกในพื้นที่อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งมีอายุหลังการเก็บเกี่ยวประมาณ 7-8 เดือน ถูกนำมาล้างทำความสะอาด จากนั้นนำมาหั่นเป็นแว่นมีความหนาประมาณ 5 มิลลิเมตร ทำการซั่งและบันทึกน้ำหนักก่อนทำการอบแห้ง และนำเข้าเครื่องอบแห้งโดยจัดเรียงบนจานแก้ว ครั้งละ 155.0±1.0 กรัม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การจัดเรียงกระชายดำบนจานแก้วเพื่อนำเข้าเครื่องอบแห้ง

นำตัวอย่างกระชายดำกลุ่มเดียวกันไปตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์เป็นระยะเวลา 2 วัน ตามวิธีทั่วไปของเกษตรกรเพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงระหว่างผลิตภัณฑ์จากทดลองและผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่าย

ในห้องทดลองด้วยวิธีการตากแดด และทุกเงื่อนไขการอบแห้งจะลดความชื้นกระชายดำให้ใกล้เคียงกับความชื้นตามมาตรฐานสินค้าเกษตรพืชสมุนไพร 10% d.b. [8] โดยให้มีความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงประมาณ 8-12% d.b.

เมื่อเริ่มทำการอบแห้ง จะทำการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าก่อนการอบแห้ง และบันทึกค่าน้ำหนักของกระชายดำระหว่างการทดลองทุก ๆ 15 นาที ด้วย Data logger เมื่อสิ้นสุดการทดลอง บันทึกค่าพลังงานไฟฟ้า หยุดบันทึกข้อมูลน้ำหนัก และนำกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งมาชั่งและบันทึกน้ำหนัก หลังจากนั้นคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและนำกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปทำการวัดคุณภาพ ได้แก่ การวัดค่าสี ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และนำกระชายดำบางส่วนไปอบแห้งต่อด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อคำนวณหาความชื้นตามมาตรฐาน AOAC [9] จากนั้นนำข้อมูลความชื้นมาวิเคราะห์หาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

### 2.3 การหาความชื้น

การหาความชื้นมาตรฐานแห้ง (Moisture content,  $M_d$ ) ของกระชายดำ สามารถทำได้โดยชั่งน้ำหนักกระชายดำที่ต้องการหาความชื้น ( $w$ ) จากนั้นนำกระชายดำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC เพื่อหาค่าน้ำหนักกระชายดำแห้ง ( $d$ ) และนำค่าน้ำหนักมาคำนวณ ตามสมการที่ (1) [10]

$$M_d = 100 \times (w-d) / d \quad (1)$$

เมื่อ  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%d.b.),  $w$  คือ น้ำหนักของวัสดุสดที่ต้องการหาความชื้น ( $g$ ) และ  $d$  คือ น้ำหนักของวัสดุแห้ง ( $g$ )

### 2.4 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถหาได้จากการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้งที่ทำการวัดและบันทึกโดยเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบดิจิทัล ยี่ห้อ Schneider รุ่น PM2200 ต่อปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากกระชายดำ ตามสมการที่ (2) [11]

$$SEC = 3.6E_p / (m_f - m_i) \quad (2)$$

เมื่อ SEC คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ( $\text{MJ}/\text{kg}_{\text{water evap.}}$ ),  $E_p$  คือ ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh) และ  $m_i$  และ  $m_f$  คือ น้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังอบแห้ง (kg) ตามลำดับ

## 2.5 การทดสอบคุณภาพสี

การทดสอบคุณภาพด้านสีของกระชายดำทำโดยการวัดด้วยเครื่องวัดสี 3HN รุ่น NH310 ระบบสีที่ใช้คือ CIE ใช้แสงสว่างที่ 6500 K ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดสีน้อยกว่า 0.04 ( $\Delta E^*_{ab}$ ) ผลของการวัดค่าสีแต่ละครั้งจะให้ผลออกมาเป็น 3 ค่า คือ  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยจะทำการวัดค่าสีที่กึ่งกลางของชั้นกระชายดำ จำนวน 30 ตัวอย่าง ในแต่ละการทดลอง หลังจากนั้นนำค่าที่วัดได้มาวิเคราะห์ทางสถิติและคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับสีของกระชายดำสด โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3) [12]

$$\Delta E = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

เมื่อ  $\Delta E$  คือ ความแตกต่างของสีโดยรวม,  $(L_1^* - L_2^*)$  คือ ความแตกต่างของค่าความสว่างของกระชายดำสดและกระชายดำแห้ง,  $(a_1^* - a_2^*)$  คือ ความแตกต่างของค่าความเป็นสีแดงถึงสีเขียวของกระชายดำสดและกระชายดำแห้ง และ  $(b_1^* - b_2^*)$  คือ ความแตกต่างของค่าความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงินของกระชายดำสดและกระชายดำแห้ง

## 2.6 ปริมาณน้ำอิสระ

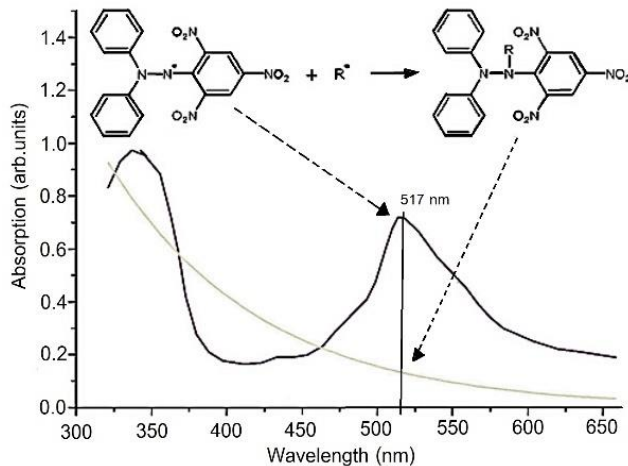
ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity,  $a_w$ ) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญ สร้างสปอร์ หรือปริมาณน้ำอิสระที่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและชีวเคมีต่าง ๆ ได้ เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาถึงมากกว่าค่าความชื้นในวัสดุ โดยวัสดุหลังอบแห้งควรมีค่าปริมาณน้ำอิสระน้อยกว่า 0.6 ซึ่งจุลินทรีย์จะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ [13] ซึ่งในการทดลองจะใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระยี่ห้อ Aqualab รุ่น Pre ช่วงการอ่านค่า 0.03-1 ที่อุณหภูมิ 25 °C ความแม่นยำในการวัด  $\pm 0.003$  โดยเตรียมตัวอย่างครั้งละประมาณ 5 กรัม ใส่ภาชนะเพื่อนำเข้าเครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

## 2.7 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) คืออนุมูลอิสระที่มีความเสถียร (Stable free radical) ซึ่งมีสีม่วงเข้มและดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร เมื่อรับอิเล็กตรอนจากสารต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดกระชายดำจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปออกซิไดซ์ (DPPH) ที่ไม่



ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งทำให้สีม่วงของสารละลายจางลงและสามารถตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระ DPPH ที่เหลืออยู่ได้ การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสามารถทำได้โดยการนำสารละลายมาตรฐาน ascorbic acid หรือสารสกัดที่เจือจางจนได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมปริมาตร 5 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ DPPH ความเข้มข้น 208 ไมโครโมลาร์ 5 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองเขย่านาน 60 วินาที เก็บที่อุณหภูมิ 25 °C ในที่มืดเป็นเวลา 40 นาที วัดค่า absorbance ที่ 517 นาโนเมตร และคำนวณ Ascorbic acid equivalent antioxidant capacity (AEAC) ของสารสกัดโดยการแทนค่า absorbance ลงในสมการของกราฟมาตรฐาน ascorbic acid และแสดงค่าในหน่วยน้ำหนักสมมูล มิลลิกรัมของ Ascorbic acid ต่อ 1 กรัม น้ำหนักสด (mg AA/g f.w.) [14]



รูปที่ 4 โครงสร้างทางเคมีและการเกิดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) [12]

การหาปริมาณรวมของสารโพลีฟีนอล (Total polyphenolic contents) เป็นการหาปริมาณของสารประกอบโพลีฟีนอลทั้งหมดที่มีในตัวอย่างทดสอบ ด้วยการใช้สารละลาย Folin-Ciocalteu (F-C reagent) มีส่วนประกอบสำคัญคือ Phosphomolybdate และ Phosphotungstate สารละลาย F-C reagent สำเร็จรูป และพร้อมใช้ในการทดสอบ ทำปฏิกิริยากับสารมาตรฐานของโพลีฟีนอล (นิยมใช้ garlic acid เป็นสารมาตรฐานของสารโพลีฟีนอล) หรือสารสกัดกระชายดำ จากนั้นเติมโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO<sub>3</sub>) บ่มปฏิกิริยาต่อไปเป็นเวลา 90 นาที ในที่มืด สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของโพลีฟีนอลกับ F-C reagent จะมีสีน้ำเงินเข้ม และดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร การรายงานค่าของปริมาณทั้งหมดของสารโพลีฟีนอล จะแสดงในหน่วย น้ำหนักสมมูล มิลลิกรัมของ gallic acid ต่อ 1 กรัม น้ำหนักสด (mg GAE/g f.w.) [15]

## 2.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของกระชายดำ จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งโดยใช้สมการเอมพิริคัล โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาให้ศึกษาในงานวิจัยนี้มีจำนวน 5 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งโดยทั่วไปสมการเอมพิริคัลที่นำมาใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) ที่เป็นฟังก์ชันของค่าความชื้น ณ เวลาใด ๆ (Moisture content,  $M_t$ ) และค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content,  $M_{eq}$ ) แต่เนื่องจากค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความชื้นที่เวลาใด ๆ และค่าความชื้นเริ่มต้น (Initial moisture content,  $M_i$ ) ดังนั้นจึงประมาณให้ค่าความชื้นสมดุลมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (4) [16]

$$MR = (M_t - M_{eq}) / (M_i - M_{eq}) = M_t / M_i \quad (4)$$

เมื่อ MR คือ ค่าอัตราส่วนความชื้น,  $M_i$  คือ ค่าความชื้นเริ่มต้น (d.b.),  $M_t$  คือ ค่าความชื้นที่เวลาใด ๆ (d.b.) และ  $M_{eq}$  คือค่าความชื้นสมดุล (d.b.)

### ตารางที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

No.	Name of Model	Model equation	Reference
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	[17]
2	Modified Page I	$MR = \exp(-(kt)^n)$	[18]
3	Handerson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	[19]
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	[20]
5	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + (bt)$	[21]

\*a b c k และ n คือ ค่าคงที่จากการวิเคราะห์สมการเอมพิริคัล และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (min)

ในการหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลที่เหมาะสม โดยนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในการอบแห้ง ไปวิเคราะห์สมการโดยวิธีถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) จากผลการหาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลรูปแบบต่างๆ ในตารางที่ 1 จะมีดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของแต่ละสมการในการทำนายจลนพลศาสตร์ในการอบแห้ง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination,  $R^2$ ) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6) โดยสมการที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นสมการที่ให้ค่า  $R^2$  สูงที่สุด และค่า RMSE ต่ำที่สุด [22]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (6)$$

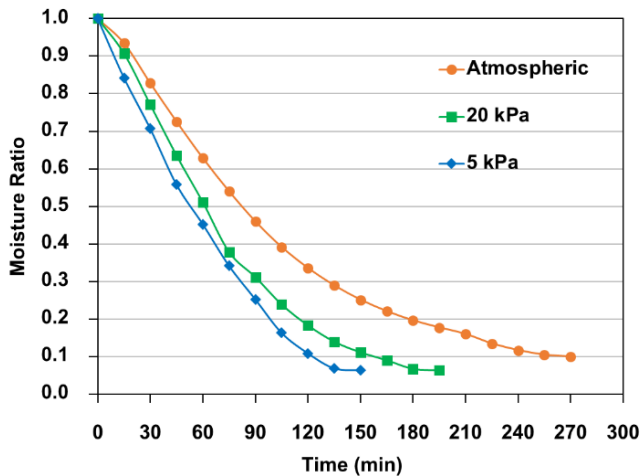
เมื่อ  $MR_{exp,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง,  $\overline{MR}_{exp}$  คือ ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง,  $MR_{pre,i}$  คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการเอมพิริคัล และ  $N$  คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง

### 3 ผลการการวิจัย

#### 3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งกระชายดำที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 121.58% มาตรฐานแห้ง จนมีความชื้นสุดท้ายประมาณ 7.47-12.18% มาตรฐานแห้ง โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 800 W (ปิด:เปิด = 20:40 วินาที) ที่ความดันบรรยากาศ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa พบว่าความดันภายในห้องอบแห้งมีผลต่ออัตราการลดความชื้น กล่าวคือเมื่ออบแห้งกระชายดำที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 5 kPa ใช้เวลาในการอบแห้ง 150 นาที มีความชื้นสุดท้ายที่ 7.47% มาตรฐานแห้ง แต่เมื่ออบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้ง 20 kPa ใช้เวลาอบแห้ง 195 นาที มีความชื้นสุดท้ายที่ 7.87% มาตรฐานแห้ง และเมื่ออบแห้งที่ความดันบรรยากาศ ใช้เวลาในการอบแห้ง 270 นาที และมีความชื้นสุดท้ายที่ 12.18% มาตรฐานแห้ง การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของกระชายดำ ดังรูปที่ 5

การอบแห้งภายใต้ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะสามารถลดความชื้นได้เร็วที่สุด เนื่องจากที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จุดเดือดของน้ำจะมีค่าเพียง 32.87 °C ซึ่งต่ำกว่าที่ระดับความดันสัมบูรณ์ 20 kPa และความดันบรรยากาศซึ่งมีจุดเดือดของน้ำ 60.06 และ 99.97 °C ตามลำดับ ดังนั้นการลดความชื้นในห้องอบแห้งจึงทำให้น้ำในวัสดุระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า [23] จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นลง และอัตราส่วนความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงแรกที่วัสดุยังคงมีความชื้นสูงความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นจะลดลงเรื่อย ๆ และคงที่ในที่สุด [24]

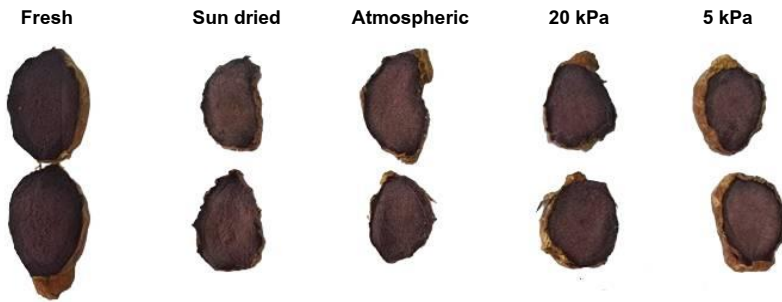


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของกระชายดำในกระบวนการอบแห้งที่ความดันบรรยากาศ และความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa

### 3.2 คุณภาพของกระชายดำ

หลังจากการทดลองอบแห้งกระชายดำด้วยเงื่อนไขต่างๆ รวมถึงการตากแดด ได้ทำการตรวจวัดค่าคุณภาพด้าน สี ปริมาณน้ำอิสระ ค่าสารสำคัญและการออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดลองพบว่ากระชายดำที่ผ่านการอบแห้งมีค่าความสว่าง ( $L^*$ ) เพิ่มขึ้นจากกระชายดำสด ซึ่งการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นจากกระชายดำมากที่สุด และค่าสีแดง ( $a^*$ ) จะมีค่าลดลงจากกระชายดำสดและมีค่าสูงขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยความดันสัมบูรณ์ที่ลดลง ส่วนค่าสีน้ำเงิน ( $b^*$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากกระชายดำสดตามความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งที่ลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ในการทดลองอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa มีการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมจากค่าสีของกระชายดำสดน้อยที่สุด ( $\Delta E$ ) 8.21 และมีค่าการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยกว่าการตากแดด ส่วนการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะมีการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมสูงที่สุด 10.55 ทั้งนี้การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟจะสร้างความร้อนในการอบแห้งค่อนข้างคงที่ [25] ทำให้ห้องอบแห้งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันทุกเงื่อนไขการทดลอง แต่เมื่อพิจารณาจุดเดือดของน้ำที่ความดันต่างๆ จะพบว่าที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa จุดเดือดของน้ำมีค่า 60.06 °C ขณะที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จุดเดือดของน้ำมีค่าต่ำที่สุด 32.87 °C ซึ่งความร้อนส่วนใหญ่ใช้ในการระเหยน้ำจากกระชายดำ ทำให้กระชายดำมีอุณหภูมิไม่สูงและใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้น ทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล [12] ซึ่งอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความสว่างเพิ่มขึ้นจากกระชายดำสด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของกระชายดำที่อบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จึงมีค่าสูงที่สุด ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 6 ในส่วนของปริมาณน้ำอิสระทุกเงื่อนไข

การทดลองมีค่าต่ำกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้งที่สามารถเก็บรักษาโดยที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้และมีแนวโน้มต่ำลงตามความดันห้องอบแห้งที่ลดลง



รูปที่ 6 สีของกระชายดำที่เงื่อนไขการอบแห้งต่าง ๆ

ตารางที่ 2 คุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำอิสระของกระชายดำ

Condition	Moisture (%d.b.)	Color				a <sub>w</sub>
		L*	a*	b*	ΔE	
Fresh	121.58	32.68 ± 2.18 <sup>a</sup>	10.68 ± 0.63 <sup>a</sup>	-2.68 ± 1.07 <sup>a</sup>	N/A	N/A
Sun dried	8.10	42.28 ± 2.94 <sup>bc</sup>	8.68 ± 0.82 <sup>b</sup>	-1.77 ± 0.78 <sup>b</sup>	9.95 ± 2.78 <sup>ab</sup>	0.471 ± 0.05 <sup>ab</sup>
Atmospheric	12.18	40.31 ± 3.07 <sup>b</sup>	7.47 ± 0.70 <sup>c</sup>	-2.74 ± 1.17 <sup>a</sup>	8.55 ± 2.55 <sup>ab</sup>	0.550 ± 0.01 <sup>b</sup>
20 kPa	7.87	40.16 ± 3.55 <sup>b</sup>	8.42 ± 1.03 <sup>b</sup>	-3.01 ± 1.54 <sup>a</sup>	8.21 ± 3.09 <sup>b</sup>	0.399 ± 0.08 <sup>a</sup>
5 kPa	7.47	42.97 ± 3.44 <sup>c</sup>	9.00 ± 0.90 <sup>b</sup>	-3.46 ± 1.00 <sup>a</sup>	10.55 ± 3.38 <sup>a</sup>	0.378 ± 0.02 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ในการตรวจสอบการต้านอนุมูลอิสระโดยการตรวจวัดสารฟีนอลิกรวมและทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งจะทำให้สารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระลดลงจากกระชายดำสด โดยกระชายดำที่ผ่านการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะมีสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด 2.73±0.15 mg GAE/g f.w. และ 1.00±0.02 mg AAE/g f.w. ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าทุกๆ เงื่อนไขการทดลองรวมถึงการตากแดด ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa ใช้เวลาอบแห้งสั้นกว่าเงื่อนไขการอบแห้งอื่น ๆ เป็นผลทำให้สารต้านอนุมูล

อิสระคงตัวได้ดีกว่า เนื่องจากระยะเวลาการอบแห้งที่สั้นลงช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชันและการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระได้ [26] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณ Total phenolic content และ Antioxidant activity ของกระชายดำที่อบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Condition	Total phenolic content as gallic acid equivalent (mg GAE/g f.w.)	Anitioxidant activity as ascorbic acid equivalent (mg AAE/g f.w.)
Fresh	3.41 ± 0.10 <sup>a</sup>	1.09 ± 0.10 <sup>a</sup>
Sun dried	2.34 ± 0.19 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.06 <sup>bc</sup>
Atmospheric	2.34 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.85 ± 0.01 <sup>c</sup>
20 kPa	2.68 ± 0.10 <sup>b</sup>	0.98 ± 0.02 <sup>b</sup>
5 kPa	2.73 ± 0.15 <sup>b</sup>	1.00 ± 0.04 <sup>ab</sup>

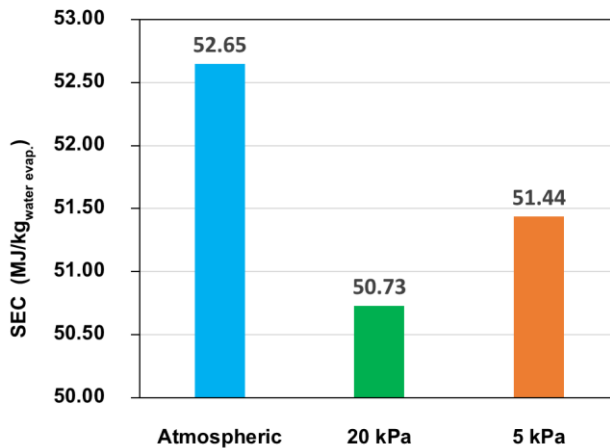
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยตามหลังด้วยตัวอักษรที่เหมือนกันภายในคอลัมน์เดียวกันไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่าการอบแห้งกระชายดำด้วยกำลังไมโครเวฟ 800 W ที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการอบแห้งเพื่อการรักษาคุณภาพประโยชน์ในเชิงสมุนไพร และแม้ว่าการอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกันจะมีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีจากการวัดที่แตกต่างกัน แต่เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพแล้วสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งในทุกเงื่อนไขไม่แตกต่างกันมากนัก

### 3.3 ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งที่ความดันบรรยากาศมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงที่สุด 52.65 MJ/kg<sub>water evap.</sub> เนื่องจากใช้เวลาอบแห้งนานกว่าการทดลองอื่นๆ และการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa พบว่ามีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 51.44 MJ/kg<sub>water evap.</sub> ซึ่งสูงกว่าการอบแห้งที่ความดัน 20 kPa ที่มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 50.73 MJ/kg<sub>water evap.</sub> เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการสร้างความดันสุญญากาศมากกว่าเพื่อให้ได้ความดันที่กำหนด บัณฑิตสุญญากาศจึงสิ้นเปลืองพลังงานในการดูดอากาศออกจากห้องอบแห้งมากกว่า ดังรูปที่ 7 โดยเวลาที่ใช้ในการ

อบแห้งที่ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ 20 และ 5 kPa คือ 270, 195 และ 150 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 7 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งกระชายดำ

### 3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

จากผลการทดลองด้านจลนพลศาสตร์การอบแห้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใน 5 รูปแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) อยู่ในช่วง 0.98436-0.99936 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในช่วง 0.00737-0.03887 ดังตารางที่ 4 โดยพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกระชายดำที่ให้ค่า  $R^2$  สูงที่สุด และค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ สมการของ Midilli โดยให้ค่า  $R^2 = 0.99936$  และ  $RMSE = 0.00737$

แบบจำลองเอมพิริคัลดังตารางที่ 1 เป็นรูปแบบของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเป็นรูปแบบที่คล้ายกับเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ ทำให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.97 ทุกแบบจำลอง โดยเฉพาะแบบจำลองเอมพิริคัลของ Modified Page I และ Midilli ซึ่งมีรูปแบบของสมการเทอมแรกคล้ายกันโดยมีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.99 แต่สมการ Midilli จะมีค่า  $R^2$  สูงกว่าเล็กน้อย เมื่อพิจารณาแบบจำลองเอมพิริคัลของ Midilli จะประกอบด้วยสมการที่เป็นฟังก์ชันของเวลาสองเทอมรวมกัน คือ สมการเอ็กซ์โพเนนเชียลและสมการเชิงเส้น โดยค่าคงที่ของสมการเชิงเส้นมีค่าค่อนข้างน้อยในช่วงแรกของการอบแห้งจึงไม่ส่งผลต่อการทำนายความชื้นมากนัก แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงท้ายของการอบแห้งความชื้นของวัสดุเปลี่ยนแปลงน้อยหรือมีความชื้นของกราฟน้อย ความชื้นของกราฟที่ได้จากการคำนวณของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลจะมีค่ามากกว่าผลการทดลอง ดังนั้นเทอมของสมการ

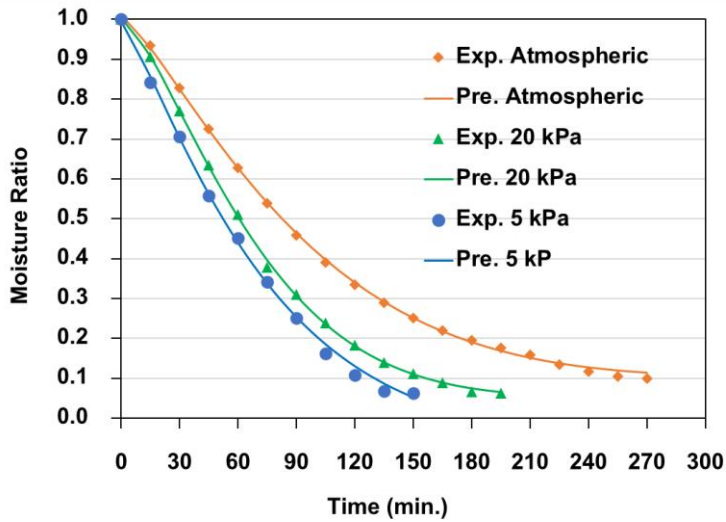
เชิงเส้นซึ่งมีค่ามากขึ้นในช่วงท้ายจะช่วยชดเชยค่าที่ได้จากเทอมของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียลส่งผลให้สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล

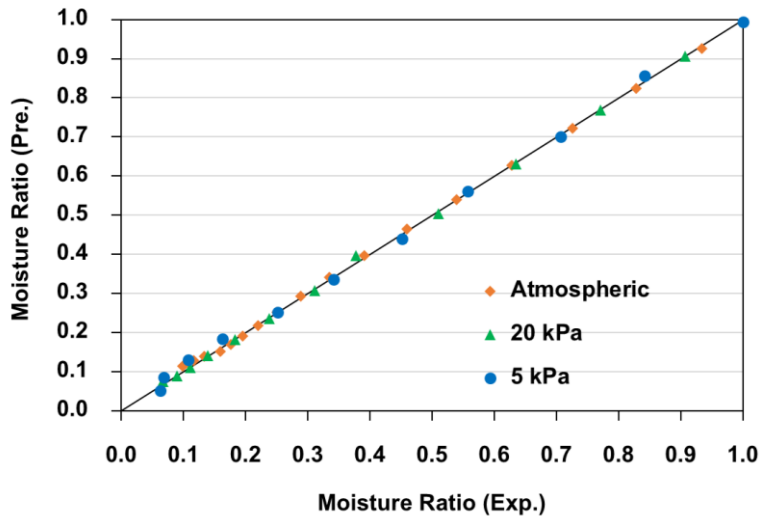
Model	Condition	Constant	R <sup>2</sup>	RMSE
Newton	Atmospheric	k=0.00860	0.99195	0.02570
	20 kPa	k=0.01264	0.97922	0.04550
	5 kPa	k=0.01475	0.98191	0.04541
	<b>Average</b>		<b>0.98436</b>	<b>0.03887</b>
Modified Page I	Atmospheric	k=0.00855 n=1.11512	0.99597	0.01806
	20 kPa	k=0.01237 n=1.30476	0.99855	0.01192
	5 kPa	k=0.01449 n=1.27552	0.99818	0.01316
	<b>Average</b>		<b>0.99756</b>	<b>0.01438</b>
Handerson and Pabis	Atmospheric	k=0.00905 a=1.04838	0.99547	0.01915
	20 kPa	k=0.01360 a=1.07594	0.98694	0.03572
	5 kPa	k=0.01551 a=1.04990	0.98587	0.03661
	<b>Average</b>		<b>0.98943</b>	<b>0.03049</b>
Logarithmic	Atmospheric	k=0.00905 a=1.04845 c=-0.00013	0.99547	0.01915
	20 kPa	k=0.01090 a=1.15732 c=-0.10562	0.99218	0.02765
	5 kPa	k=0.01179 a=1.18012 c=-0.14984	0.99656	0.01805
	<b>Average</b>		<b>0.99474</b>	<b>0.02162</b>
Midilli	Atmospheric	k=0.00314 a=1.00963 b=0.00028 n=1.24082	0.99954	0.00611
	20 kPa	k=0.00250 a=1.00341 b=0.00020 n=1.38029	0.99968	0.00557
	5 kPa	k=0.00549 a=0.99456 b=-0.00028 n=1.21081	0.99885	0.01045
	<b>Average</b>		<b>0.99936</b>	<b>0.00737</b>

การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการทำนายตามสมการของ Midilli ดังรูปที่ 8 และเมื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับเส้นตรงที่มีความชัน 45 องศา ดังรูปที่ 9 แสดงว่าแบบจำลองเอมพิริคัล Midilli สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี





รูปที่ 8 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นจากการทดลองและจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Midilli



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นระหว่างการทดลองและผลการทำนายด้วยแบบจำลองของ Midilli

#### 4. สรุป

การอบแห้งกระชายดำที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 121.58% มาตรฐานแห้ง ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ที่ความดันบรรยากาศ ความดัน

สัมบูรณ์ 20 kPa และ 5 kPa ตามลำดับ จนกระทั่งมีความชื้นสุดท้าย ที่ 7.47-12.18% มาตรฐานแห้ง พบว่าเมื่อความดันสัมบูรณ์ในห้องอบแห้งลดลงส่งผลให้ระยะเวลาการอบแห้งลดลงด้วย โดยการอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa จะใช้เวลาการอบแห้งสั้นที่สุดคือ 150 นาที การอบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 20 kPa มีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะน้อยที่สุด คือ 50.73 MJ/kg<sub>water evap.</sub> และมีค่าความเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสีของกระชายดำสด คือมีค่า  $\Delta E = 8.21$  และปริมาณน้ำอิสระที่ตกค้างมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คืออยู่ในช่วง 0.378-0.550 สารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีค่าลดลงจากกระชายดำสดในทุก ๆ เงื่อนไขการอบแห้งคืออยู่ในช่วง 2.34-2.73 mg GAE/g f.w. และ 0.83-1.00 mg AAE/g f.w. ตามลำดับ และกระชายดำที่อบแห้งที่ความดันสัมบูรณ์ 5 kPa มีสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดและใกล้เคียงกับกระชายดำสดมากที่สุด คือ  $2.73 \pm 0.15$  mg GAE/g f.w. และ  $1.00 \pm 0.04$  mg AAE/g f.w. ตามลำดับ และสูงกว่าการตากแดดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการเอมพิริคัล Midilli สามารถทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งในชุดการทดลองนี้ได้แม่นยำที่สุด ซึ่งให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุด  $R^2 = 0.99936$  และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุด  $RMSE = 0.00737$

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก และภาควิชาเกษตรเคมี คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

### References

- [1] Department of Agricultural Extension. Krachaidum production for export. Agricultural Extension Journal 2020;295:27-9. (In Thai)
- [2] National Science and Technology Development Agency. Project to study the market opportunity of targeted. Thai Herbs Journal 2018:61-72. (In Thai)
- [3] Li Z, Raghavan GSV, Orsat V. Optimal power control strategies in microwave drying. Journal of Food Engineering 2010;99:263-8.
- [4] Lv HF, Ma XX, Zhang B, Chen XF, Liu XM, Fang CH, et al. Microwave-vacuum drying of round bamboo: a study of the physical properties. Construction and Building Materials 2019;211:44-51.

- [5] Songsermpong S. Microwave Processing of Food. Bangkok: Danex Intercorporation; 2016. (In Thai)
- [6] Chahbani A, Fakhfakh N, Baltia MA, Mabrouk M, El-Hatmi H, Zouari N, et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.). *Food Bioscience* 2018;25:32-8.
- [7] Keser D, Guclu G, Kelebek H, Keskin H, Soysal Y, Sekerli YE, et al. Characterization of aroma and phenolic composition of carrot (*Daucus carota* 'Nantes') powders obtained from intermittent microwave drying using GC-MS and LC-MS/MS. *Food and Bioproducts Processing*. 2020;119:350-9.
- [8] National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. Thai agricultural Standard. TAS 3005 PART 2-2020. (In Thai)
- [9] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analysis Chemists. 17<sup>th</sup> ed. Maryland: Gaithersburg; 2000.
- [10] Manangan W, Witinantakit K. Water lily drying using pulsed vacuum-infrared combined with silica sand embedding, *Kasem Bundit Engineering Journal* 2020;10(3):84-98. (In Thai)
- [11] Tirawanichakul S, Chanchiew S, Tirawanichakul Y. Pennywort drying using infrared radiation drying kinetics, energy consumption and quality aspect. *KKU Research Journal* 2013;18(2):311-24. (In Thai)
- [12] Zhoua YH, Pei YP, Sutar PP, Liu DH, Deng LZ, Duan X, et al. Pulsed vacuum drying of banana: Effects of ripeness on drying kinetics and physicochemical properties and related mechanism. *Food and Science Technology* 2022;161:113362.
- [13] Devahastin S. *Drying of Foods and Biomaterials*. Bangkok: Top Publishing; 2012. (In Thai)
- [14] Magalhaes LM, Segundo MA, Reis S, Lima JL. Methodological aspects about in vitro evaluation of antioxidant properties. *Analytica Chimica Acta* 2008;613(1):1-19.
- [15] Ainsworth EA, Gillespie KM. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. *Nature Protocol* 2007;2(4):875-7.
- [16] Rungsawang S, Jaekhom S, Uengkimbuan N, Witinantakit K. Shiitake mushroom drying using vacuum and infrared radiation technique. *SWU Engineering Journal* 2019;14(3):1-13. (In Thai)

- [17] Lui Q, Bakker-Arkema FW. Stochastic modeling of grain drying: part 2 mode development. *Journal of Agricultural Research* 1997;66:275-80.
- [18] Diamante LM, & Munro PA. Mathematical modeling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy* 1993;51:271-6.
- [19] Doymaz I. Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 2004;61:359-64.
- [20] Togrul IT, Pehlivan D. Mathematical modeling of soar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering* 2002;55:209-16.
- [21] Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. A new model for single- layer drying. *Drying Technology* 2002;20(7):1503-13.
- [22] Faruq AA, Zhang M, Fan D. Modeling the dehydration and analysis of dielectric properties of ultrasound and microwave combined vacuum frying apple slices. *Drying Technology* 2019;37(3):409-23.
- [23] Song C, Wu T, Li Z, Li J, Chen H. Analysis of the heat transfer characteristics of blackberries during microwave vacuum heating. *Journal of Food Engineering* 2018;22:70-8.
- [24] Cuccurullo G, Giordano L, Metallo A, Cinquanta L. Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples. *Biosystems Engineering* 2018;180:24-30.
- [25] Poogungploy P. Effect of black galingale drying by microwave-hot air combination on drying behavior, temperature, color, shrinkage and specific energy consumption. *Journal of Science & Technology MSU* 2017;36(6):661-7.
- [26] Zeng S, Wang B, Lv W, Wu Y. Effects of microwave power and hot air temperature on the physicochemical properties of dried ginger (*Zingiber officinale*) using microwave hot-air rolling drying. *Food Chemistry* 2023;404(Pt B):134741.

### ประวัติผู้เขียนบทความ



จามร ภัคดีศรีแพง ตำแหน่ง นักศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 ม.6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 088-282-9959 Email: jamornpakseepaeng@gmail.com



**ดวงสิริ สยมภาค** ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เลขที่ 43 ม.6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 089-562-9894 Email: dhoungsiri\_sa@rmutto.ac.th



**กิตติศักดิ์ วิวิณหทกิตต์** ตำแหน่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกเลขที่ 43 ม.6 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี 20110 โทรศัพท์ 086-386-1885 Email: kittisak\_wi@rmutto.ac.th

---

**Article History:**

Received: January 12, 2023

Revised: April 22, 2023

Accepted: May 10, 2023