



อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อคุณภาพและสาร
ออกฤทธิ์ทางชีวภาพในไพล



โดย
นางสาวทิพรัตน์ ธรรมสละ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อคุณภาพ
และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในไพล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร



EFFECT OF DRYING USING A GREENHOUSE SOLAR DRYER ON THE QUALITY
AND BIOACTIVE COMPOUNDS IN CASSUMUNAR GINGER (*ZINGIBER
MONTANUM* (KOENIG) LINK EX DIETR.).



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)
Department of FOOD TECHNOLOGY
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2018
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

58403204 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก, สมุนไพร, น้ำมันหอมระเหย, สารต้านออกซิเดชั่น, เคอร์คูมิน

นางสาว ทิพารัตน์ ธรรมสละ: อิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในไพล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราภรณ์ มหาโยธี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและวิธีการทำแห้งต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพล คุณภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่นของไพล โดยการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด แปรค่าอุณหภูมิ 5 ระดับ ที่ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส และการศึกษาอิทธิพลของวิธีการทำแห้งใช้การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการตากแดด ในการศึกษาไพลที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 2 ปี มาล้างทำความสะอาด แช่ในสารละลายกรดเปอร์ออกไซด์ิก ความเข้มข้น 100 ppm เป็นเวลา 10 นาที ผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 15 นาที และหั่นตามขวาง ให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร นำขึ้นไพลไปทำการอบแห้งจนกระทั่งมีปริมาณความชื้นคงที่สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพล และมีปริมาณความชื้นร้อยละ 10 สำหรับการศึกษาผลของการทำแห้งต่อคุณภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่นของไพล ในด้านจลนพลศาสตร์พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ต่ออัตราการแห้ง การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีอัตราการแห้งสูงที่สุดโดยใช้เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง 30 นาที และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีอัตราการแห้งต่ำสุด ใช้เวลาในการทำแห้ง 15 ชั่วโมง โดยทำแห้งไพลจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 78.03-80.96 ให้เหลือปริมาณความชื้นร้อยละ 10 ในขณะที่การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดใช้เวลาในการทำแห้ง 8 และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการทำแห้งไพล พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะเห็นช่วงอัตราการแห้งคงที่ในช่วงเริ่มต้นของการทำแห้ง และเมื่อระยะเวลาในการทำแห้งนานขึ้นจะเข้าสู่ช่วงอัตราการแห้งลดลง ในขณะที่อัตราการแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียสพบเฉพาะช่วงอัตราการแห้งลดลง สำหรับพฤติกรรมการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดจะเห็นช่วงอัตราการแห้งคงที่ในช่วงเริ่มต้นและจะเข้าสู่ช่วงอัตราการแห้งลดลงเช่นเดียวกับการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในด้านคุณภาพของสีไพลอบแห้ง พบว่าไพลที่ทำแห้งทุกอุณหภูมิด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด สามารถรักษาสีเหลืองของไพลได้ ในขณะที่ไพลอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีสีเหลืองอ่อนและสีซีดตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณเคอร์คูมินโดยที่ไพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ มีปริมาณเคอร์คูมินเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบ

กับไพลสดก่อนการทำแห้ง โดยไพลแห้งที่อบที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส มีปริมาณเคอร์คูมินสูงเท่ากับ 8.99 ± 0.44 และ 8.24 ± 1.06 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) ขณะที่การทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดทำให้ปริมาณเคอร์คูมินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับไพลสดก่อนการทำแห้ง ซึ่งการทำแห้งด้วยการตากแดดไพลมีปริมาณเคอร์คูมินต่ำที่สุด (0.54 ± 0.04 กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง)) นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและวิธีการทำแห้งมีผลต่อน้ำมันหอมระเหย โดยการทำแห้งที่ระยะเวลาสั้นและอุณหภูมิสูงมีผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันหอมระเหย ทั้งนี้การทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส สามารถรักษาปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 8.77 และ 9.28 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) ในขณะที่การอบแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 7.68 และ 7.82 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไพลสดก่อนการทำแห้ง เมื่อนำน้ำมันหอมระเหยไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพบซาบินิน เทอร์พีนิน-4-อล และ (E)-1-(3',4'-dimethylphenyl) butadiene หรือ DMPBD เป็นองค์ประกอบหลัก โดยอุณหภูมิและวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดส่งผลต่อการลดลงของ DMPBD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้อุณหภูมิและวิธีการทำแห้งไพลส่งผลให้สารต้านออกซิเดชันลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างไพลสด โดยอุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทำให้สารต้านออกซิเดชันลดลงน้อยที่สุด ในขณะที่การตากแดดทำให้สารต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นในการอบแห้งไพลด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ส่งผลให้สามารถรักษาสีเหลืองของไพลได้ และไพลแห้งมีปริมาณเคอร์คูมิน น้ำมันหอมระเหยและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ดี อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดจะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ซึ่งสามารถทำแห้งขึ้นไพลได้ภายใน 8 ชั่วโมง และมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยใกล้เคียงกับการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจึงเหมาะสมกับการทำแห้งไพลสำหรับนำไปสกัดน้ำมันหอมระเหย

58403204 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : solar drying, medicinal plant, essential oil, volatile oil

MISS THIPARAT THAMSALA : EFFECT OF DRYING USING A GREENHOUSE SOLAR DRYER ON THE QUALITY AND BIOACTIVE COMPOUNDS IN CASSUMUNAR GINGER (*ZINGIBER MONTANUM* (KOENIG) LINK EX DIETR.). THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR BUSARAKORN MAHAYOTHEE, Ph.D.

The influences of drying conditions including drying temperatures and drying methods on drying behavior, yellow color, curcumin content, essential oil, and antioxidant capacity of cassumunar ginger were investigated. For the study of drying temperature, five temperatures (40, 50, 60, 70 and 80°C) were applied using a convectional hot air drying. For the investigation of drying methods, a hot air drying, solar drying using a greenhouse solar dryer and sun drying were performed. Cassumunar ginger rhizomes with the age of 2 years were washed, sanitized by soaking in 100 ppm of peroxyacetic acid solution for 10 min and air dried for 15 min before transversely slicing into a thickness of 2 mm. The slices were loaded on trays in a single layer for all drying experiments. The samples were dried until the weight was constant for the study on drying behavior, while the final moisture content of the dried samples was set at about 10% for the study on quality. It was found that drying temperatures and drying methods significantly affected the rate of drying particularly at the initial phase of drying. The drying time for drying the slices at 80°C was the shortest with 1.5 hr for removing an initial moisture content from 78.03-80.96% to a final moisture content of 10%, while solar drying and sun drying took 8 and 30 hr, respectively. Considering drying behavior, it was indicated that the drying temperature at 40°C using a convectional hot air drying, solar drying and sun drying showed the constant rate period at the beginning of drying then followed by the falling rate period, while drying temperatures at 50, 60, 70 and 80 °C presented only the falling drying rate period. The dried products obtained from all drying temperatures using a hot air drying remained yellow color, while those obtained from the sun drying and solar drying were pale and light yellow, respectively. This result was in accordance with curcumin contents in the dried products. Curcumin content of dried cassumunar gingers from a hot air drying

was increased compared to the fresh samples. The drying temperatures at 40 and 50 °C resulted in curcumin contents of 8.99 ± 0.44 and 8.24 ± 1.06 g/100 g dry matter, respectively. The curcumin content of dried products obtained from solar and sun drying was significantly decreased compared to the fresh samples. Sun drying showed the lowest curcumin content of 0.54 ± 0.04 g/100 g dry matter. In addition, drying temperatures and drying methods significantly influenced on the essential oil yield.

Dried products from 50 and 60 °C had high yields of 8.77 and 9.28 %v/w_{d.b.}, respectively, while dried products from the solar and sun drying had low oil yields with the values of 7.68 and 7.82 %v/w_{d.b.}, respectively. The major constituents of essential oil were sabinene, terpinen-4-ol and (E)-1-(3',4'-dimethylphenyl) butadiene (DMPBD). Drying temperatures and drying methods affected the area peak of sabinene and DMPBD. Moreover, the antioxidant activity of the dried sample was significantly affected by drying temperature and methods. The high antioxidant capacity was found in dried products from 50 and 60 °C, while the lowest value was observed in the product from sun drying. In conclusion, the recommended drying condition for drying cassumunar ginger slices with a thickness of 2 mm is drying at 50 °C using a hot air dryer due to remain the yellow color of products and the dried products had high values of curcumin contents, essential oil and antioxidant capacity. However, the use of a convectional hot air dryer has the electric energy cost, when comparing to a greenhouse solar dryer which can be used to dry cassumunar ginger within 8 hours and the amount of essential oil was close to the amount obtained by using a convectional hot air drying at 50°C. Therefore, using a greenhouse solar dryer is suggest for the drying cassumunar ginger for extraction of essential oils purpose.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ต้องกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศราการณ มหาโยธี ผู้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่ดี แนวความคิดในการทำงานวิจัย ตลอดจนตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ยังให้แนวคิดและโอกาสในการทำงานในโครงการวิจัยต่างๆ โดยเฉพาะโครงการสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ปี 2559-2561 ทำให้เพิ่มพูนประสบการณ์ในการทำงานมากขึ้น

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรทุนวิจัย จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2558 ชื่อโครงการ “ศึกษาพัฒนาระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับอบแห้งสมุนไพร” ผ่านมหาวิทยาลัยศิลปากร โดยมีศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย เป็นหัวหน้าโครงการ ดิฉันจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์มากที่ให้โอกาสนี้ด้วย นอกจากนี้กราบขอบพระคุณคุณวิรัช มณีขาว ผู้อำนวยการกลุ่มออกแบบมาตรฐานและทดสอบ และพี่ๆ จากพพ.

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ คุวิจิตรจารุ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม เป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำและความกรุณาในการตรวจสอบ แก่ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร. สืบพงษ์ กอวชิรพันธ์ สถาบันโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่ตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ศราวุธ ภูไพจิตรกุล ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำแนะนำ และความรู้ที่ดี สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะในด้านจลนพลศาสตร์ในการทำแห้ง

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และงานธุรการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณบุญช่วย สิทธิธรรม จังหวัดสระแก้ว ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับไพล ดูแลการเก็บเกี่ยวไพล ตลอดจนการส่งวัตถุดิบมายังห้องปฏิบัติการงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวิฑูรย์ ยวงสะอาด กองพัฒนายาแผนไทยและสมุนไพร กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข ที่ให้คำแนะนำสำหรับวิเคราะห์สารต่างๆ ในไพล

ขอขอบคุณบริษัท พาราไซแอนติฟิค จำกัด ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ชนิดสารกลุ่มฟีนอลในไพล

ขอขอบคุณพี่พลอย พี่ติงตัง พี่กานต์ พี่เข็ม น้องฟ้า น้องออย น้องเตย น้องปุกกี้ และหลายๆท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้หมด ณ ที่นี้ รวมทั้งเพื่อนร่วมรุ่น หยก อ่อม และนิว สำหรับกำลังใจ กำลังใจ และประสบการณ์การทำงานร่วมกันที่ดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว สำหรับกำลังใจที่สำคัญที่สุดในการศึกษาเล่าเรียน การทำงานวิจัย การดำเนินชีวิตที่ดี และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดมา

วิทยานิพนธ์นี้ขออุทิศแด่ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ล่วงลับ สำหรับคำแนะนำและข้อคิดในการปรับปรุงแก้ไข และความกรุณาสละเวลาในการตรวจสอบ แก้ไข วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขออุทิศความดีและ ประโยชน์ทั้งหลายอันพึงบังเกิดจากการทำวิทยานิพนธ์นี้แด่ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ผู้มีพระคุณ

ทิพารัตน์ ธรรมสละ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	4
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	5
2.1 ไฟล.....	5
2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไฟล.....	5
2.1.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในไฟล.....	6
2.1.2.1 น้ำมันหอมระเหย.....	6
2.1.2.2 เคอร์คูมิน.....	12
2.1.2.3 ฟีนีลบีวทานอยด์.....	18
2.1.2.4 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่นที่พบในไฟล.....	21
2.2 การทำแห้ง.....	26
2.2.1 การทำแห้งไฟล.....	27

2.2.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (Greenhouse solar dryer).....	28
2.2.3 อิทธิพลของการทำแห้งต่อน้ำมันหอมระเหยและเคอร์คูมินอยด์.....	31
2.3.4 อิทธิพลของการทำแห้งต่อความสามารถเป็นสารต้านออกซิเดชัน.....	32
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	34
3.1 วัตถุประสงค์	34
3.2 สารเคมี.....	35
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ	35
3.4 วิธีการทดลอง.....	37
3.4.1 การเตรียมชิ้นไพลก่อนการทำแห้ง.....	37
3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของชิ้นไพลที่ผ่านการตัดแต่งก่อนการทำแห้ง	38
3.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบลาดต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล.....	44
3.4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบลาดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพล.....	45
3.4.5 การศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล.....	45
3.4.6 การศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพล.....	47
3.4.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	49
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไพลก่อนการทำแห้ง	49
4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบลาดต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล	51

4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพล	57
4.3.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้.....	57
4.3.2 ลักษณะปรากฏและค่าสี.....	58
4.3.3 ปริมาณเคอร์คูมิน	61
4.3.4 สาร compound D.....	64
4.3.5 ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยในไพล	67
4.3.6 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่น.....	76
4.4 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล	78
4.5 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เรือนกระจกและการตากแดดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพลอบแห้ง.....	86
4.5.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้.....	86
4.5.2 ลักษณะปรากฏและค่าสี.....	87
4.5.3 ปริมาณเคอร์คูมิน	89
4.5.4 สาร compound D.....	91
4.5.5 ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย	92
4.5.6 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่น.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	98
รายการอ้างอิง.....	100
ภาคผนวก	108
ประวัติผู้เขียน	137

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ดีของไพลที่ใช้สำหรับทำยา.....	6
ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำมันไพล.....	7
ตารางที่ 3 ผลความแตกต่างของพื้นที่การเพาะปลูกไพลต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของ น้ำมันหอมระเหยในไพล	10
ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำมันหอมระเหยและปริมาณเทอร์พีน-4-อลที่ได้จากพืชสกุลขิง (<i>Zingiber</i>) 11	11
ตารางที่ 5 พื้นที่การเพาะปลูก ในประเทศไทยต่อปริมาณเคอร์คูมินในพืช.....	16
ตารางที่ 6 ปริมาณ compound D ในไพลจากแหล่งเพาะปลูกในจังหวัดต่างๆ ในประเทศไทย.....	20
ตารางที่ 7 งานวิจัยที่ศึกษาปริมาณฟีนอลในไพล.....	21
ตารางที่ 8 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในสมุนไพร	25
ตารางที่ 9 การศึกษาการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกในผลิตภัณฑ์ต่างๆ...30	30
ตารางที่ 10 รายละเอียดไพลที่ใช้ในการศึกษา	34
ตารางที่ 11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งไพล	45
ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหง้าไพลสดที่ใช้ศึกษา.....	50
ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติที่ได้จากการสร้างสมการทำแห้งไพลแบบชั้นบางด้วยแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์	55
ตารางที่ 14 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของไพลที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน แบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ	58
ตารางที่ 15 ลักษณะปรากฏของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่ อุณหภูมิต่างๆ	59
ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์คุณภาพด้านสีของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อน แบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ	60
ตารางที่ 17 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อปริมาณเคอร์คูมินของไพลอบแห้ง	63

ตารางที่ 18 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อสาร compound D ของไพลก่อนและหลังการทำแห้ง.....	66
ตารางที่ 19 ชนิดองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยไพลสดก่อนการทำแห้ง.....	72
ตารางที่ 20 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของไพลอบแห้ง.....	74
ตารางที่ 21 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของไพลอบแห้ง (ต่อ).....	75
ตารางที่ 22 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไพลอบแห้ง.....	77
ตารางที่ 23 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของไพลอบแห้ง.....	86
ตารางที่ 24 ผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อคุณภาพด้านสีของไพลอบแห้ง.....	88
ตารางที่ 25 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อปริมาณเคอร์คูมินในไพล.....	90
ตารางที่ 26 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อสาร compound D.....	92
ตารางที่ 27 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของไพลอบแห้ง.....	93
ตารางที่ 28 ผลของวิธีการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของไพล.....	95
ตารางที่ 29 เปรียบเทียบการคำนวณ retention index องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยในไพล.....	116

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไพล.....	5
ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในน้ำมันหอมระเหยไพล	7
ภาพที่ 3 กลไกการสังเคราะห์สารเคอร์คูมินในขมิ้นชัน.....	12
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมิน	13
ภาพที่ 5 การเสื่อมสลายของเคอร์คูมินเนื่องจากแสง	14
ภาพที่ 6 ผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อความคงตัวของสารเคอร์คูมิน.....	15
ภาพที่ 7 ปริมาณเคอร์คูมินอยต์ในพืชสกุลขิง 10 ชนิดที่พบในประเทศไทย	17
ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ที่พบในไพล.....	18
ภาพที่ 9 กลไกการต้านออกซิเดชันของเคอร์คูมิน	22
ภาพที่ 10 กราฟการทำแห้งและอัตราการทำแห้ง	26
ภาพที่ 11 กระบวนการทำแห้งไพล	27
ภาพที่ 12 หลักการทำงานของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก.....	28
ภาพที่ 13 พฤติกรรมการทำแห้งของ (a) กล้วย (b) พริก และ (c) กาแฟ ที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับการตากแดด.....	29
ภาพที่ 14 การเตรียมตัวอย่างไพลก่อนการทำแห้ง.....	37
ภาพที่ 15 ลักษณะการวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นไพลสด	38
ภาพที่ 16 เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหย.....	41
ภาพที่ 17 การเรียงชิ้นไพลสดสำหรับการทำแห้งและเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด	44
ภาพที่ 18 ลักษณะการเรียงชิ้นไพลบนถาดสำหรับการทำแห้งให้เป็นชั้นเดียว	46
ภาพที่ 19 การทำแห้งไพลด้วยด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับ การตากแดด	46

ภาพที่ 20 กราฟการทำแห้งของไพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (เส้นกราฟได้จากสมการ Page)	52
ภาพที่ 21 อัตราการทำแห้งของไพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยการทดลองทั้งสองซ้ำ	53
ภาพที่ 22 ตัวอย่างค่าอัตราส่วนความชื้นของไพลอบแห้งกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ Newton สมการ Page และสมการ Modified Page	56
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ k ของการทำแห้งไพลที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการ Page	57
ภาพที่ 24 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาดต่อค่า ΔE ในไพล เปรียบเทียบก่อนและหลังการทำแห้ง	61
ภาพที่ 25 โครมาโตแกรม HPLC ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร ของสารมาตรฐานเคอร์คูมินและ สารเคอร์คูมินของไพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ทำแห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	63
ภาพที่ 26 ตัวอย่างโครมาโตแกรม LC-MS ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรของสาร compound D ในไพลก่อนการทำแห้ง	65
ภาพที่ 27 ตัวอย่างโครมาโตแกรม HPLC ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรของสาร compound D ในไพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	66
ภาพที่ 28 ปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ ภาดที่อุณหภูมิต่างๆ	68
ภาพที่ 29 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อร้อยละการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพล	69
ภาพที่ 30 ตัวอย่างโครมาโตแกรม GC ขององค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของไพลก่อน และหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 80 องศาเซลเซียส	71
ภาพที่ 31 ความเข้มรังสีอาทิตย์ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและ ภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดดของวันที่ทำแห้งไพล สำหรับการทดลองทำแห้งไพลซ้ำที่ 1 (ก) และซ้ำที่ 2 (ข)	81

ภาพที่ 32 อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและภายนอกของระบบ อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดดของวันที่ทำแห้งไพล สำหรับการ ทดลองทำแห้งไพลซ้ำที่ 1 (ก) และซ้ำที่ 2 (ข).....	82
ภาพที่ 33 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและภายนอก ของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดดของวันที่ทำแห้งไพล สำหรับ การทดลองทำแห้งไพลซ้ำที่ 1 (ก) และซ้ำที่ 2 (ข).....	83
ภาพที่ 34 กราฟการทำแห้งของไพลวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือน กระจกและการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2.....	84
ภาพที่ 35 อัตราการทำแห้งของไพลอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2	85
ภาพที่ 36 ตัวอย่างโครมาโตแกรม HPLC ของสารมาตรฐานเคอร์คูมิน และสารเคอร์คูมินของไพลก่อน และหลังการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดที่ความ ยาวคลื่น 425 นาโนเมตร.....	90
ภาพที่ 37 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร compound D ของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วย ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร	91
ภาพที่ 38 ผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตาก แดดต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไพลอบแห้ง.....	97
ภาพที่ 39 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน.....	114
ภาพที่ 40 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน Trolox ด้วยวิธี DPPH.....	119
ภาพที่ 41 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน Trolox ด้วยวิธี ABTS	121
ภาพที่ 42 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (อัตราส่วนความชื้น %ฐานแห้ง) ที่ผ่านการทำแห้ง ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การ ทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2	123
ภาพที่ 43 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (ปริมาณความชื้น %ฐานแห้ง) ที่ผ่านการทำแห้งด้วย เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำ ที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2	124

ภาพที่ 44 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (ปริมาณความชื้น %ฐานเปียก) ที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2	125
ภาพที่ 45 อัตราการทำแห้งของไพลอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2 ..	126
ภาพที่ 48 ตัวอย่างค่าอัตราส่วนความชื้นของไพลอบแห้งกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ Newton สมการ Page และสมการ Modified Page	127
ภาพที่ 46 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (อัตราส่วนความชื้นฐานแห้ง) โดยวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2	128
ภาพที่ 47 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (ปริมาณความชื้น %ฐานเปียก) โดยวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2	129
ภาพที่ 49 ผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อคุณภาพด้านสีของไพลผง และไพลอบแห้ง	130
ภาพที่ 50 ตัวอย่างโครมาโตแกรม LC-MS ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและ Mass spectrum pattern ของสาร compound D ในไพลหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	131
ภาพที่ 51 ตัวอย่างโครมาโตแกรม LC-MS ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและ Mass spectrum pattern ของสาร compound D ในไพลหลังการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก	132
ภาพที่ 52 ตัวอย่าง Mass spectrum pattern ของไพลก่อนการทำแห้ง (ก) และการยืนยันสาร compound D ในไพลก่อนการทำแห้ง (ข)	133
ภาพที่ 53 ตัวอย่างสเปกตรัมของพีค compound D ในตัวอย่างไพลที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-MS	134
ภาพที่ 54 ตัวอย่างสเปกตรัมของ compound D ในตัวอย่างไพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC	134

ภาพที่ 55 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และ ภายนอกระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา 10.00 น.....	135
ภาพที่ 56 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และ ภายนอกระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา 12.30 น.....	135
ภาพที่ 57 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และ ภายนอกระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา 15.30 น.....	136



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไพล (*Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr.) เป็นพืชสมุนไพรที่ได้รับการบรรจุอยู่ในบัญชียาหลักแห่งชาติ (Department of Medical Sciences, 2009) สามารถนำทุกส่วนของพืชมาใช้ประโยชน์ได้ อย่างไรก็ตามส่วนของลำต้นใต้ดินหรือเหง้าไพลเป็นส่วนที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบทางยาและเครื่องสำอางโดยไพลแห้งนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของยาประคบ ไพลผงใช้เป็นส่วนประกอบของยาประสะไพลและผงไพลบำรุงผิว นอกจากนี้สารสกัดหรือน้ำมันหอมระเหยจากไพลถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบของยาขี้ผึ้งและยานวดตัว (ประกาศคณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ, 2554) ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีผลผลิตไพลที่เก็บเกี่ยวได้จำนวน 649,100 กิโลกรัม และปลูกมากในเขตพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี ราชบุรี ตากและสระแก้ว (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2562)

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบมากในไพลได้แก่ เคอร์คูมิน (curcumin) เป็นสารที่ให้สีเหลือง พบในปริมาณร้อยละ 2.63 (w/w) (Kantayos และ Paisooksantivatana, 2012) สารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ (phenylbutanoids) ได้แก่ (E)-4-(3',4'-dimethylphenyl)but-3-en-1-ol หรือ compound D พบในปริมาณร้อยละ 2.39 ± 0.88 (w/w) และ (E)-1-(3',4'-dimethylphenyl)butadiene หรือ DMPBD พบในปริมาณร้อยละ 3.80 ± 1.44 (w/w) (Kaewchoothong และคณะ, 2012) สารดังกล่าวข้างต้นมีคุณสมบัติเป็นสารต้านการอักเสบและสารต้านออกซิเดชัน (Masuda และ Jitoe (1994), Jeenapongsa และคณะ (2003)) นอกจากนี้ไพลยังประกอบด้วยน้ำมันหอมระเหยในปริมาณร้อยละ 1.137-1.373 (w/w) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีหลักที่พบมากในน้ำมันหอมระเหยไพลได้แก่ ซาบินีน (sabinene) เทอร์ปีเนน-4-ออล (terpinene-4-ol) และ DMPBD ซึ่งมีคุณสมบัติบรรเทาอาการปวดเมื่อย ปวดข้อ บรรเทาอาการอักเสบและยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย จึงนิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของยาแก้ปวด (Chongmelaxme และคณะ, 2017)

ไพลสดจะมีอายุการเก็บรักษาที่สั้นเนื่องจากมีปริมาณความชื้นสูงร้อยละ 79.80 (บุญนาค และคณะ, 2554) การทำแห้งไพลจึงเป็นวิธีการแปรรูปที่นิยมนำมาใช้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาไพลสด โดยมาตรฐานความชื้นของไพลอบแห้งต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 (สถาบันวิจัยสมุนไพร, 2557) หากปริมาณความชื้นในไพลอบแห้งมีค่าสูงกว่านี้ จะเป็นสาเหตุให้เกิดการเจริญเติบโตของเชื้อราในระหว่างการเก็บรักษาและการวางจำหน่ายได้ (Fargali และคณะ, 2008) ทั้งนี้การทำแห้งไพลในระดับอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด แต่สำหรับการทำแห้งใน

ระดับวิสาหกิจชุมชนหรือครัวเรือนจะใช้การตากแดด ซึ่งการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ ภาตจะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าหรือแก๊ส สำหรับการตากแดดนั้นโพลแห้งที่ได้มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ ฝุ่นละอองและสิ่งปลอมปนต่างๆ สูง

เคอร์คูมินเป็นสารประกอบที่อาจสลายตัวเนื่องจากแสงและอุณหภูมิ Syed และคณะ (2015) ศึกษาการเสื่อมสลายของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินภายใต้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าแสงยูวีทำให้สารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินลดลงจาก 98.95 ± 1.31 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็น 48.69 ± 0.82 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร Li และคณะ (2016) พบว่าสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินสลายตัวร้อยละ 50 เมื่อให้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 290-360 นาโนเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง Raza และคณะ (2018) พบว่าการตากแดดแห้งขม้นชั้นเป็นเวลา 43 วัน ทำให้เคอร์คูมินสลายตัวมากกว่าการทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (Solar tunnel dryer) ซึ่งใช้เวลาการทำแห้ง 37 วัน และการทำแห้งในที่ร่ม (Shade drying) ซึ่งใช้เวลาการทำแห้ง 76 วัน ซึ่งแห้งขม้นชั้นอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งด้วยการตากแดด การทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม และการทำแห้งในที่ร่มมีปริมาณเคอร์คูมินร้อยละ 1.40 ± 0.13 , 1.68 ± 0.08 และ 2.16 ± 0.11 ตามลำดับ นอกจากนี้ Raza และคณะ (2018) ยังได้ศึกษาการสลายตัวของเคอร์คูมินภายหลังการทำแห้งขม้นชั้นด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณเคอร์คูมินลดลง โดยที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีปริมาณเคอร์คูมินเท่ากับร้อยละ 2.93 ± 0.14 , 2.15 ± 0.11 , 2.06 ± 0.16 และ 1.73 ± 0.12 ตามลำดับ

นอกจากนี้อุณหภูมิมีผลต่อการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหย เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยมีจุดเดือดต่ำ สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (พัตรเพ็ญ และคณะ, 2552) จากการศึกษาของอดุลย์ (2552) ที่ศึกษาการทำแห้งขึ้นโพลด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน (heat pump dryer) ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้นมีผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันหอมระเหยโพลอบแห้ง โดยการทำแห้งโพลที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำแห้ง 24, 20 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 4.00, 3.05 และ 2.83 (v/w) ตามลำดับ สอดคล้องกับบุญนาก และคณะ (2554) ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาตต่อการทำแห้งขึ้นโพล พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากขึ้นและมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันลดลง โดยมีการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหย (loss of essential oil) ร้อยละ 16.84, 21.55, 55.89 และ 82.49 ที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ Khangholil และ Rezaeinodehi (2008) พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยโกลจุฬาลัมพาลลดลง ซึ่งโกลจุฬาลัมพาอบแห้งที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส มีปริมาณ

น้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 0.88, 0.55, 0.50 และ 0.37 (v/w) ตามลำดับ Saeidi (2016) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งด้วยการทำแห้งในที่ร่ม การตากแดดและเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 80 องศาเซลเซียสต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในมินต์พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 0.94 (v/w) วิธีการทำแห้งในที่ร่มมีปริมาณร้อยละ 0.93 (v/w) การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีปริมาณร้อยละ 0.72 (v/w) และวิธีการตากแดดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.63 (v/w)

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและแสงแดดมีผลต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและน้ำมันหอมระเหยในไพล อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อปริมาณเคอร์คูมินและน้ำมันหอมระเหยในไพล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด และวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อปริมาณเคอร์คูมิน น้ำมันหอมระเหย และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในไพลที่ผ่านการอบแห้ง

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพล

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไพล

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพล

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไพล

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 การทำแห้งที่อุณหภูมิต่างกันมีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งไพล โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงทำให้มีอัตราการระเหยน้ำมากขึ้นและระยะเวลาในการอบแห้งลดลง

1.3.2 การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกซึ่งอุณหภูมิในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีค่าสูงกว่าการตากแดดจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการทำแห้งและจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพล

1.3.3 การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกน่าจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านสี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในไพล เมื่อเปรียบเทียบกับตากแดด เนื่องจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีการใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เคลือบสารป้องกันรังสียูวี ทำให้รังสียูวีผ่านเข้าไปในระบบได้น้อย สลายตัวของปริมาณเคอร์คูมินในไพลอบแห้งก็น่าจะลดลงด้วย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 ไพลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ไพลสดที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 2 ปี และเก็บเกี่ยวจากพื้นที่เพาะปลูกในอำเภอดำรงน้ำเย็น จังหวัดสระแก้ว

1.4.2 การศึกษาการอบแห้งไพลใช้วิธีการอบแห้ง 3 วิธี ได้แก่ เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส การอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีขนาดกลางมีความกว้าง 8.0 เมตรและความยาว 12.4 เมตร และการตากแดด

1.4.3 ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลโดยการทำแห้งขึ้นไพลที่มี ความกว้าง 3.2 เซนติเมตร ความยาว 4.7 เซนติเมตร และความหนา 0.5 เซนติเมตร ทำการอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

1.4.4 คุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพลที่ศึกษาครั้งนี้ได้แก่ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี สี ปริมาณเคอร์คูมิน สารกลุ่มฟีนอลิก บิวทานอยด์ น้ำมันหอมระเหยและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

1.4.5 การสกัดน้ำมันหอมระเหยใช้วิธีการกลั่นด้วยน้ำร้อน (hydrodistillation) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) โดยเปรียบเทียบสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวหรือสารมาตรฐานอัลเคนที่ใช้จะมีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 7 ถึง 40 อะตอม (C7-C40)

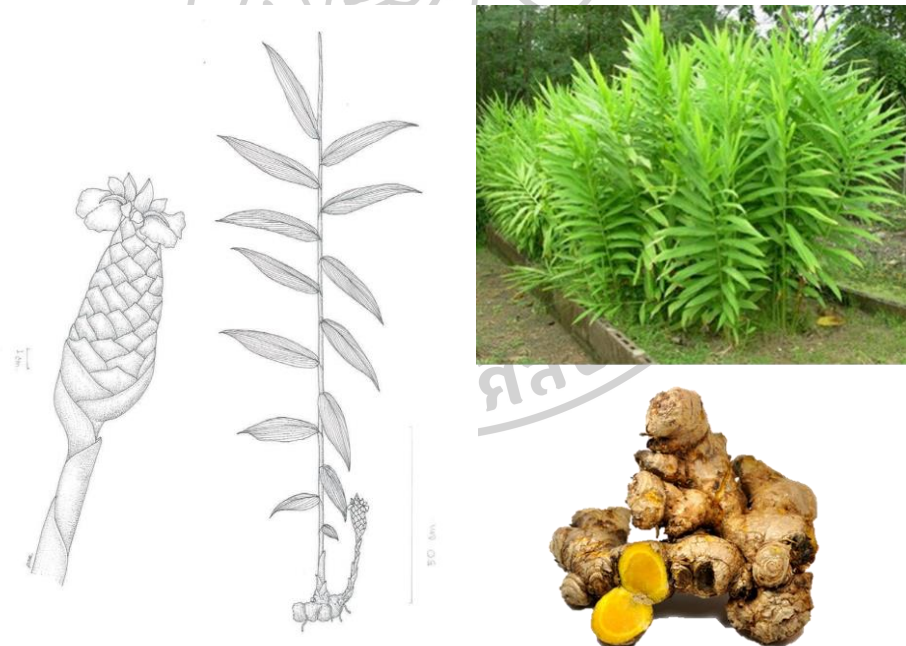
บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 ไพล

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไพล

ไพล (*Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr. ชื่อพ้อง *Zingiber cassumunar* Roxb.) อยู่ในวงศ์ zingiberaceae ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับ จิง ข่า และขมิ้นชัน ไพล เป็นพืชล้มลุกมี ลำต้นหรือเหง้าอยู่ใต้ดิน มีเปลือกนอกสีน้ำตาลแกมเหลือง เนื้อในสีเหลืองและมีกลิ่นหอมเฉพาะตัว กาบใบหุ้มซ้อนกันชูเหนือดินเป็นลำต้นเทียม สูง 0.6-1.8 เมตร เป็นใบเดี่ยวเรียงสลับ ระบายเดียว ดอกเป็นช่อแทงจากเหง้าใต้ดิน กลีบดอกสีนวล ใบประดับสีม่วง ผลมีลักษณะกลม (คณะอนุกรรมการจัดทำตำราอ้างอิงยาสมุนไพรไทย, 2555) แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของไพล

เหง้าส่วนที่นำมาใช้ประโยชน์โดยเหง้าที่มีอายุ 2 ปีขึ้นไปจะนิยมนำมาใช้ในการทำยาต่างๆ และสกัดน้ำมันโพลหรือน้ำมันหอมระเหย ซึ่งจะได้ปริมาณมากและมีคุณภาพ (คณะอนุกรรมการจัดทำตำราอ้างอิงยาสมุนไพรไทย, 2555) โดยตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทยได้มีกำหนดมาตรฐานลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ดีของโพลที่ใช้สำหรับทำยาแสดงดังตารางที่ 1 (Department of Medical Sciences, 2009) สำหรับในบัญชียาหลักแห่งชาติมีการนำโพลไปเป็นส่วนประกอบยาอาจจะใช้อย่างเดียวหรือผสมกับสมุนไพรชนิดอื่นได้ เช่น ตำรับยาประสะกานพลู ใช้รักษาอาการทางเดินอาหาร และตำรับยาประสะโพล ใช้สำหรับรักษากลุ่มอาการทางสูติศาสตร์นรีเวชวิทยาสำหรับยาที่ใช้ภายนอกเช่น ยาสำหรับทาถอนแ้วปวดกล้ามเนื้อ ปวดข้อ อาการฟกช้ำ และสมานแผล (ประกาศคณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ, 2554)

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ดีของโพลที่ใช้สำหรับทำยา

ลักษณะทางกายภาพและเคมี	ปริมาณ
ปริมาณของน้ำ	ไม่เกิน 13.0 (%w/w)
ปริมาณสิ่งแปลกปลอม	ไม่เกิน 2.0 (%w/w)
ปริมาณเถ้ารวม	ไม่เกิน 9.0 (%w/w)
ปริมาณเถ้าที่ไม่ละลายในกรด	ไม่เกิน 3.0 (%w/w)
ปริมาณสารสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม	ไม่น้อยกว่า 5.0 (%w/w)
ปริมาณสารสกัดด้วยเฮกเซน	ไม่น้อยกว่า 3.0 (%w/w)
ปริมาณน้ำมันหอมระเหย	ไม่น้อยกว่า 2.0 (%v/w)

ที่มา: (Department of Medical Sciences, 2009)

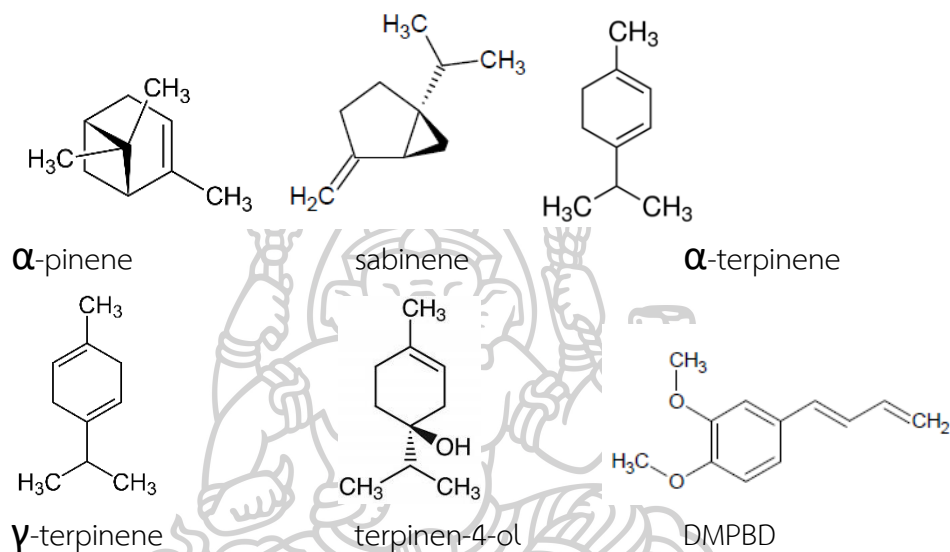
2.1.2 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในโพล

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในโพลได้แก่ น้ำมันหอมระเหย สารกลุ่มฟินิวบิวทานอยด์ (phenylbutanoids) และเคอร์คูมิน (curcumin) (กฤติยา, 2562) ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งการเกิดมะเร็ง ยับยั้งเชื้อรา และยับยั้งการอักเสบ (Cb และคณะ, 2015)

2.1.2.1 น้ำมันหอมระเหย

น้ำมันหอมระเหยในโพลมีสีเหลืองอ่อนและกลิ่นหอมเฉพาะตัว พบว่าน้ำมันหอมระเหยที่กลั่นได้จากเหง้าโพลมีปริมาณร้อยละ 0.5-0.9 และมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนได้แก่ สารโมโนเทอร์ปีนอยด์ (monoterpenoids) เช่น แอลฟา-ไพเนน (α -pinene) ซาบินีน (sabinene) แอลฟา-เทอร์ปีเนน (α -terpinene) แกมมา-เทอร์ปีเนน (γ -terpinene) เทอร์ปีเนน-4-ออล (terpinen-4-ol) และสารกลุ่มฟีนิลบิวทานอยด์ (phenylbutanoids) คือ DMPBD โดยมีสูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงดังภาพที่ 2 ทั้งนี้ในการสกัดน้ำมันไพลได้มีมาตรฐานของน้ำมันไพลที่กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) มีค่าดังตารางที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีขององค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญในน้ำมันหอมระเหยไพล

ที่มา: Pongprayoon และคณะ (1997)

ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำมันไพล

ชนิดองค์ประกอบทางเคมี ของน้ำมันหอมระเหย	ร้อยละของพื้นที่สัมพัทธ์ที่ได้จาก แก๊สโครมาโตกราฟี
แอลฟา-ไพเนน	1.00-3.00
ซาบินีน	31.00-48.00
แอลฟา-เทอร์ปีเนน	3.00-8.00
แกมมา-เทอร์ปีเนน	8.00-10.00
เทอร์ปีเนน-4-ออล	19.00-36.00

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2541)

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหย

ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยสามารถแตกต่างกันได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพแวดล้อมการเพาะปลูก แหล่งพื้นที่ในการเพาะปลูก ชนิดและส่วนประกอบของพืช ตลอดจนเทคนิคและวิธีการสกัดและการกลั่นน้ำมันหอมระเหย

1. สภาพแวดล้อมการเพาะปลูก เช่น แสงสว่าง น้ำและความชื้น เป็นต้น โดยมีผลต่อน้ำมันหอมระเหยอย่างมากโดย Manochai และคณะ (2010) ศึกษาสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกไพลต่อปริมาณและองค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหย โดยสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูกได้แก่จำนวนวันในการให้น้ำต่างกันและระดับการให้แสงแดด (โดยการคลุมแสลนกรองแสงสีดำ) หลังจากนั้นทำการสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยใช้การกลั่นด้วยน้ำ พบว่าจำนวนวันในการให้น้ำมากขึ้นและให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการให้น้ำเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับ 12.32 ± 2.20 , 12.06 ± 3.65 , 14.05 ± 2.25 , 14.47 ± 1.79 และ 23.80 ± 0.74 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ แต่การให้น้ำเป็นเวลา 60 ทำให้มีปริมาณเทอร์ไพเนน-4-ออลมากที่สุด สำหรับการให้แสงแดดลดลงส่งผลให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อการให้แสงแดดแก่ต้นไพลที่ร้อยละ 100, 50 และ 25 พบว่ามีปริมาณน้ำมันหอมระเหย 15.34 ± 4.53 , 10.13 ± 3.33 และ 7.87 ± 2.07 มิลลิลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ

2. แหล่งพื้นที่ในการเพาะปลูก จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแหล่งพื้นที่การเพาะปลูกที่ต่างกันส่งผลต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย จากการศึกษาของ Sukatta และคณะ (2009) ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยในเหง้าไพลที่ได้จากจังหวัดสระแก้ว เชียงใหม่ และประจวบคีรีขันธ์ พบว่าแหล่งพื้นที่การเพาะปลูกไพลมีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย โดยเหง้าไพลจากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดเท่ากับ 1.373 ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีที่พบมากที่สุดคือซาบินีน, เทอร์ไพเนน-4-ออล และ DMPBD ตามลำดับ โดยเหง้าไพลจากจังหวัดประจวบคีรีขันธ์มีปริมาณซาบินีนมากที่สุดโดยมีร้อยละ 53.50 เหง้าไพลจากจังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณเทอร์ไพเนน-4-ออลมากที่สุดร้อยละ 29.96 และเหง้าไพลจากจังหวัดสระแก้วมีปริมาณ DMPBD มากที่สุดร้อยละ 16.16 (Bua-in และ Paisooksantivatana, 2009) ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยในไพลในแต่ละพื้นที่การเพาะปลูกตามภูมิภาค พบว่าน้ำมันหอมระเหยไพลและองค์ประกอบทางเคมีจากเหง้าไพลในแต่ละแห่งไม่เท่ากัน โดยที่เหง้าไพลที่เก็บเกี่ยวจากภาคตะวันตกให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยไพลสูง และพบองค์ประกอบทางเคมีหลักในน้ำมันหอมระเหยในเหง้าไพลได้แก่ ซาบินีนเป็น

องค์ประกอบหลักร้อยละ 33-47 เทอร์พีน-4-อล ร้อยละ 12-22 และ DMPBD ร้อยละ 18-28 โดยปริมาณขององค์ประกอบในน้ำมันหอมระเหยจากโพลินแต่ละภูมิภาคไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ Verma และคณะ (2018) พบว่าเหง้าโพลจากแหล่งเพาะปลูกในประเทศอินเดียที่แตกต่างกัน 3 แห่ง มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยแตกต่างกัน โดยพบองค์ประกอบทางเคมีหลักในน้ำมันหอมระเหยโพลคือ ซาบินิน DMPBD และเทอร์พีน-4-อล

3. วิธีการสกัดน้ำมันหอมระเหยที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย โดย Sukatta และคณะ (2009) ศึกษาวิธีการสกัดน้ำมันหอมระเหยโพลที่แตกต่างกันได้แก่วิธีสกัดด้วยเฮกเซน (maceration) เป็นเวลา 3 วันและการกลั่นด้วยน้ำ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าวิธีการสกัดโดยการกลั่นด้วยน้ำ (ร้อยละ 1.137-1.373 w/w) ให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยสูงกว่าการสกัดด้วยเฮกเซน (ร้อยละ 0.857-0.983 w/w) เนื่องจากวิธีการสกัดด้วยเฮกเซนนั้นมีการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยไปในระหว่างกำจัดตัวทำละลาย โดยทั้งสองวิธีมีองค์ประกอบทางเคมีที่พบมากที่สุดคือซาบินิน เทอร์พีน-4-อล และ DMPBD ตามลำดับ ในทั้งสองวิธี ซึ่งวิธีการกลั่นด้วยน้ำมีปริมาณซาบินินและ DMPBD มากกว่าการสกัดด้วยเฮกเซน Chienthavorn และคณะ (2011) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการสกัดน้ำมันหอมระเหยในโพลด้วยวิธีการสกัดด้วยน้ำกึ่งวิกฤติ (superheated water extraction; SWE) การสกัดด้วยของไหลความดันสูง (pressurized liquid extraction; PLE) ด้วยสารละลายเมทานอลและเอทานอล การกลั่นด้วยน้ำ วิธีโซนิเคท (sonication) ด้วยสารละลายเมทานอล เอทานอลและเฮกเซน และวิธีการสกัดด้วยซ็อกเล็ต (soxhlet extraction) พบว่าการสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยวิธี PLE ด้วยสารละลายเมทานอลมีปริมาณซาบินินร้อยละ 12.384 ± 0.304 เทอร์พีน-4-อลร้อยละ 6.630 ± 0.494 และ DMPBD ร้อยละ 12.928 ± 0.667 มากกว่าวิธี SWE วิธีการกลั่นด้วยน้ำ วิธีโซนิเคทและวิธีการสกัดด้วยซ็อกเล็ต

ตารางที่ 3 ผลความแตกต่างของพื้นที่การเพาะปลูกเพื่อต่อปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยในเปล

ปัจจัยที่ศึกษา	วิธีการสกัด	ปริมาณน้ำมันหอมระเหย	องค์ประกอบทางเคมี (%)			ที่มา
			ซาบินีน	เพอร์เพนิน-4-ออล	DMPBD	
พื้นที่การเพาะปลูกจากจังหวัดในประเทศไทยได้แก่						
- จังหวัดสระแก้ว	การกลั่นด้วยน้ำ	ร้อยละ 1.137 w/w	36.71	27.00	16.16	Sukatta และคณะ (2009)
- จังหวัดเชียงใหม่		ร้อยละ 1.262 w/w	41.39	29.96	6.54	
- จังหวัดประจวบคีรีขันธ์		ร้อยละ 1.373 w/w	53.50	21.85	0.95	
พื้นที่การเพาะปลูกตามภูมิภาคในประเทศไทยได้แก่						
- ภาคเหนือ	การกลั่นด้วยน้ำ	9.74±6.43 ml/kg	33.99±2.77	24.36±4.90	21.49±4.72	Paisooksantivatana (2009)
- ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ		6.38±2.17 ml/kg	38.52±2.20	19.98±1.74	21.24±1.50	
- ภาคกลาง		5.74±1.93 ml/kg	42.17±4.44	17.76±2.30	18.52±2.49	
- ภาคตะวันออก		4.95±4.31 ml/kg	38.20±9.99	11.50±2.45	27.54±5.24	
- ภาคตะวันตก		11.07±8.06 ml/kg	47.54±11.82	15.54±3.28	19.66±8.21	
- ภาคใต้		5.79±2.59 ml/kg	36.25±2.80	22.03±2.83	20.40±1.52	
พื้นที่แหล่งการเพาะปลูกในประเทศอินเดียนได้แก่						
- เมืองคะติมะ รัฐอุตตราขัณฑ์	การกลั่นด้วยน้ำ	ร้อยละ 0.65 v/w	38.0	9.0	35.3	Verma และคณะ (2018)
- เมืองปันทนคร รัฐอุตตราขัณฑ์		ร้อยละ 0.78 v/w	20.8	16.4	33.6	
- เมืองอิมานคร รัฐอานธรประเทศ		ร้อยละ 0.68 v/w	13.5	31.3	20.6	

4. ส่วนของพืชที่นำมาใช้ในการสกัดมีปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยแตกต่างกัน โดย Bhuiyan และคณะ (2008) ศึกษาปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากใบและเหง้าไพลด้วยการกลั่นด้วยน้ำ พบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยในเหง้าไพลมีปริมาณมากกว่าในใบไพลเท่ากับร้อยละ 0.95 และ 0.60 (v/w) ตามลำดับ โดยองค์ประกอบทางเคมีหลักของน้ำมันหอมระเหยในใบไพลได้แก่ ซาบินีนร้อยละ 14.99, เบต้าไพเนนร้อยละ 14.32%, คาริโอฟิลลินออกไซด์ (caryophyllene oxide) ร้อยละ 13.85% และคาริโอฟิลลิน (caryophyllene) ร้อยละ 9.47 ส่วนองค์ประกอบทางเคมีหลักของน้ำมันหอมระเหยในเหง้าไพลได้แก่ triquinacene 1,4-bis (methoxy) ร้อยละ 26.47, โอซิมีน ((Z)-ocimene) ร้อยละ 21.97 และเทอร์ไพเนน-4-ออลร้อยละ 18.45% สำหรับสายพันธุ์ของพืชที่ใช้ในการสกัดมีผลต่อน้ำมันหอมระเหยโดย Kantayos และ Paisooksantivatana (2012) ศึกษาปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากพืชสกุลขิง (*Zingiber*) ที่เก็บรวบรวมจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย 6 ชนิด ได้แก่ ไพลดำ (*Z. ottensii*) ขิง (*Z. officinale*), ไพลชมพู (*Z. 'Phlai-chompoo'*) กระจับปี่ (*Z. zerumbet*) ไพลเหลือง (*Z. montanum*) และขิงป่าดอกแดง (*Z. rubens*) ดังแสดงตารางที่ 4 พบว่าไพลเหลืองมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดร้อยละ 0.89 ± 0.14 v/w ในขณะที่ไพลชมพู มีปริมาณน้ำมันหอมระเขยน้อยที่สุดร้อยละ 0.10 ± 0.04 v/w นอกจากนี้ ไพลเหลืองมีปริมาณของเทอร์ไพเนน-4-ออล มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 14.51 ± 2.59

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำมันหอมระเหยและปริมาณเทอร์ไพเนน-4-ออลที่ได้จากพืชสกุลขิง (*Zingiber*)

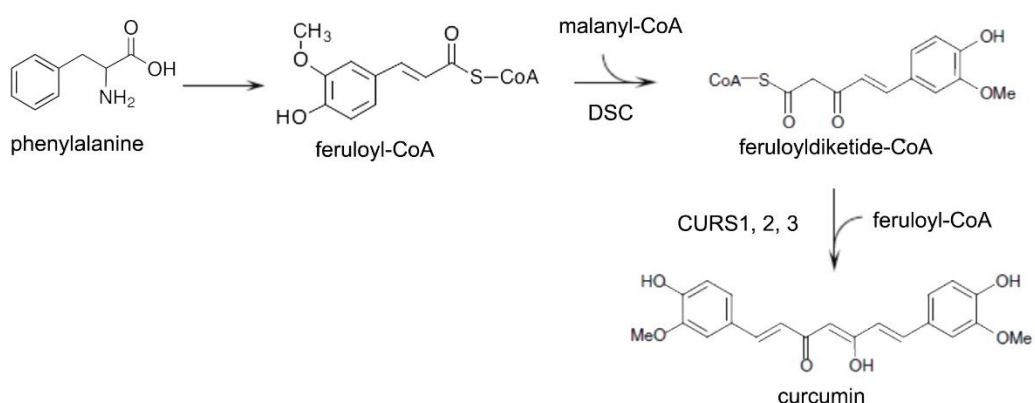
สายพันธุ์	ปริมาณน้ำมันหอมระเหย (% v/w)	ปริมาณเทอร์ไพเนน-4-ออล (%)
ไพลดำ	0.26 ± 0.07	5.5 ± 0.21
ขิง	0.13 ± 0.02	-
ไพลชมพู	0.10 ± 0.04	4.36 ± 0.34
กระจับปี่	0.08 ± 0.004	-
ไพลเหลือง	0.89 ± 0.14	14.51 ± 2.59
ขิงป่าดอกแดง	0.33 ± 0.05	-

ที่มา: Kantayos และ Paisooksantivatana (2012)

2.1.2.2 เคอร์คูมิน

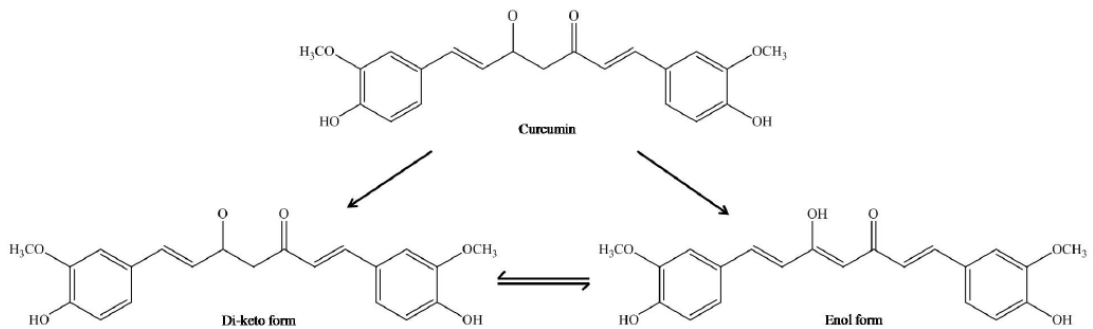
เคอร์คูมิน หรือ (E,E)-1,7-bis(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-1,6-heptadiene-3,5-dione เป็นสารกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (curcuminoid) เป็นสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ที่ให้สีเหลืองโดยจะสกัดได้จากพืชวงศ์ขิง เคอร์คูมินได้มีการศึกษาว่าเป็นสารต้านออกซิเดชันอิสระที่ดี (Ak และ Gulcin, 2008) ด้านการอักเสบ ยับยั้งการแบ่งตัวของเซลล์มะเร็งหลายชนิด จึงนิยมนำไปใช้ประโยชน์เป็นเครื่องเทศ สีสันอาหาร และประโยชน์ทางยา (Li และคณะ, 2016)

กลไกการสังเคราะห์สารเคอร์คูมินในขมิ้น เริ่มจากฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์เฟอร์ูโลอิลโคเอ (Feruloyl-CoA) หลังจากนั้นรวมกับมาโลนิลโคเอ (malonyl-CoA) เปลี่ยนเป็นเฟอร์ูโลอิลไดคีไทด์โคเอ (feruloyl-diketide-CoA) โดยมีเอนไซม์ไดคีไทด์โคเอซินเทส (diketide-CoA synthase; DCS) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและเมื่อเอนไซม์เคอร์คูมินซินเทส 1 (curcumin synthases 1) เข้ามาเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนเฟอร์ูโลอิลไดคีไทด์โคเอร่วมกับเฟอร์ูโลอิลโคเอเป็นเปลี่ยนเป็นเคอร์คูมิน แสดงดังภาพที่ 3 (Katsuyama และคณะ, 2009)



ภาพที่ 3 กลไกการสังเคราะห์สารเคอร์คูมินในขมิ้นชัน

ที่มา: Katsuyama และคณะ (2009)



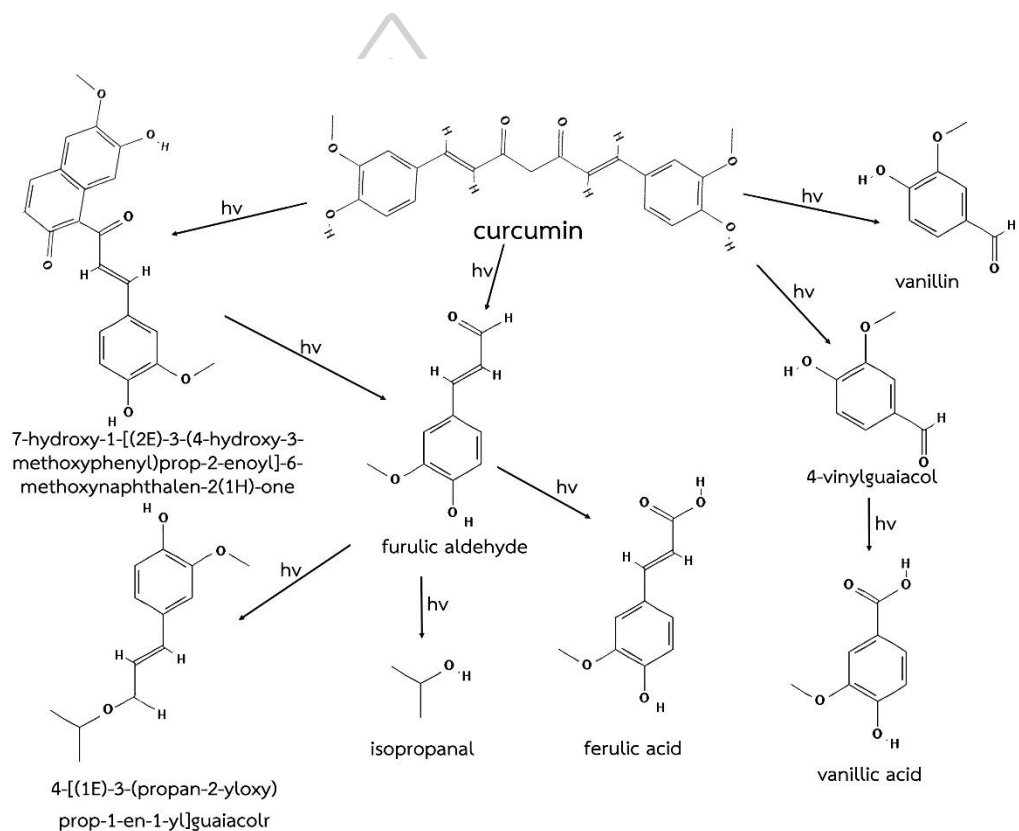
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของเคอร์คูมิน
ที่มา: Lee และคณะ (2013)

ความคงตัวของเคอร์คูมิน

จากโครงสร้างของเคอร์คูมินประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) คือ กลุ่มวงแหวนอะโรมาติกที่มีจำนวนหมู่เมทอกซี (aromatic o-methoxy phenolic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) คือ คาร์บอน 7 ตัวต่อกัน ส่งผลให้เคอร์คูมินไม่ละลายในน้ำแต่จะละลายได้ในน้ำมัน ซึ่งจะแสดงอยู่ในรูป keto-enol tautomerism (ดังภาพที่ 4) โดยจะอยู่ในรูปคีโตในสารละลายสภาวะที่กรดและสภาวะที่เป็นกลาง แต่จะเสถียรอยู่ในรูปอินอลในสารละลายเบส ซึ่งทำให้เคอร์คูมินไม่ละลายในสารละลายที่มีสภาวะเป็นกรดและเป็นกลาง แต่สามารถละลายได้ในสารละลายเบส โดย Syed และคณะ (2015) ศึกษาการเสื่อมสลายของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน ภายใต้สภาวะที่กรดและสภาวะที่เบส โดยการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ แล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแสดงดังตารางที่ 6 พบว่าเคอร์คูมินเสื่อมสลายภายใต้สภาวะกรดและเบส โดยสารละลายเคอร์คูมินในสภาวะที่เป็นกรดมีปริมาณเคอร์คูมินลดลงจาก 99.45 ± 0.65 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็น 86.33 ± 0.6 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และสารละลายเคอร์คูมินในสภาวะที่เป็นเบสมีปริมาณเคอร์คูมินลดลงจาก 99.99 ± 0.85 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรเป็น 82.21 ± 0.74 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

นอกจากนี้เคอร์คูมินสามารถเสื่อมสลายได้เนื่องจากแสง (photodegradations) โดยการเสื่อมสลายของเคอร์คูมินเกิดมาจากการดูดซับโฟตอนที่มาความยาวคลื่นแสงทำให้เกิดการแตกพันธะ (cleavage bonding) (Heger และคณะ, 2014) การสลายตัวของสารที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ไปเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็กกว่า การเปลี่ยนรูปโมเลกุลไปอยู่ในสภาพที่เปลี่ยนแปลงกลับเป็นอย่างเดิมไม่ได้ การเสื่อมสลายจากเคอร์คูมินไปเป็นเฟอร์ูลิกอัลดีไฮด์ (ferulic

aldehyde) กรดเฟอร์ลิก (ferulic acid) วานิลลิน (vanillin) 4-ไวนิลกัวไอคอล (4-vinylguaiacol) และกรดวานิลลิก (vanillic acid) แสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Syed และคณะ (2015) ศึกษาการเสื่อมสลายของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินภายใต้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมงพบว่าแสงยูวีทำให้สารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินลดลงจาก 98.95 ± 1.31 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็น 48.69 ± 0.82 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (Li และคณะ, 2016) พบว่าสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินมีการสลายตัวร้อยละ 50 เมื่อให้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 290-360 นาโนเมตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

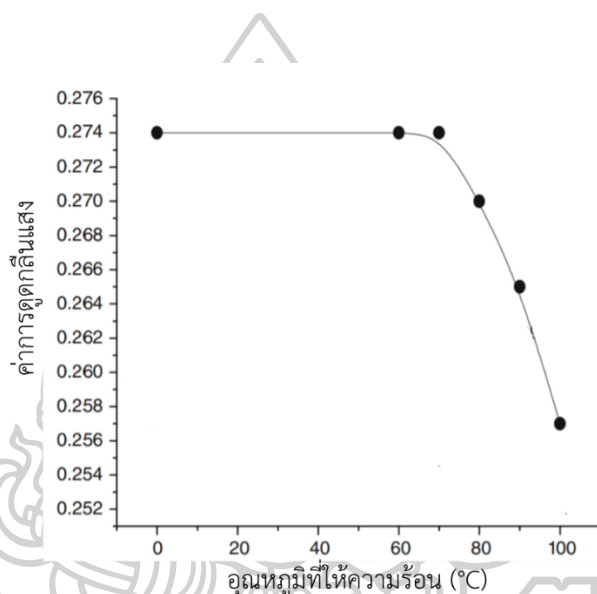


ภาพที่ 5 การเสื่อมสลายของเคอร์คูมินเนื่องจากแสง

ที่มา: Heger และคณะ (2014)

นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อปริมาณเคอร์คูมิน โดยจากการศึกษาของ Wang และคณะ (2009) พบว่าเคอร์คูมินมีความเสถียรเมื่อเริ่มมีการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากขึ้นจนถึง 100 องศาเซลเซียสเคอร์คูมิน

เริ่มมีการสลายตัวมากขึ้น โดยการสลายตัวของเคอร์คูมินที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงดังแสดงในภาพที่ 6 นอกจากนี้การให้ความร้อนขึ้นชั้นด้วยการนำไปต้มเป็นเวลา 10 และ 20 นาที และการต้มด้วยการใช้ความดัน 15 แรงแปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เป็นเวลา 10 นาที จะทำให้สูญเสียปริมาณเคอร์คูมินถึงร้อยละ 27, 32 และ 53 ตามลำดับ และ Raza และคณะ (2018) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการสลายตัวของเคอร์คูมิน ภายหลังจากการทำแห้งขึ้นชั้นด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสพบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณเคอร์คูมินลดลง โดยมีปริมาณเคอร์คูมินเท่ากับร้อยละ 2.93 ± 0.14 , 2.15 ± 0.11 , 2.06 ± 0.16 และ 1.73 ± 0.12 ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ผลของการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อความคงตัวของสารเคอร์คูมิน

ที่มา: Wang และคณะ (2009)

ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเคอร์คูมิน ความแตกต่างของพื้นที่การเพาะปลูก จากการศึกษาของ Paramapojn และคณะ (2009) ศึกษาปริมาณของเคอร์คูมินในไพลจากแหล่งที่แตกต่างกัน 12 จังหวัดในประเทศไทย ดังแสดงในตารางที่ 5 ด้วยการสกัดเย็นด้วยเฮกเซน (maceration) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง พบว่าในแต่ละจังหวัดที่เพาะปลูกมีปริมาณของเคอร์คูมินมีปริมาณแตกต่างกัน ซึ่งไพลที่มาจากจังหวัดอุดรดิตรดิต์มีปริมาณเคอร์คูมินน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.066 ± 0.001 w/w และไพลที่มาจากจังหวัดระนองมีปริมาณเคอร์คูมินมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.265 ± 0.002 w/w และ

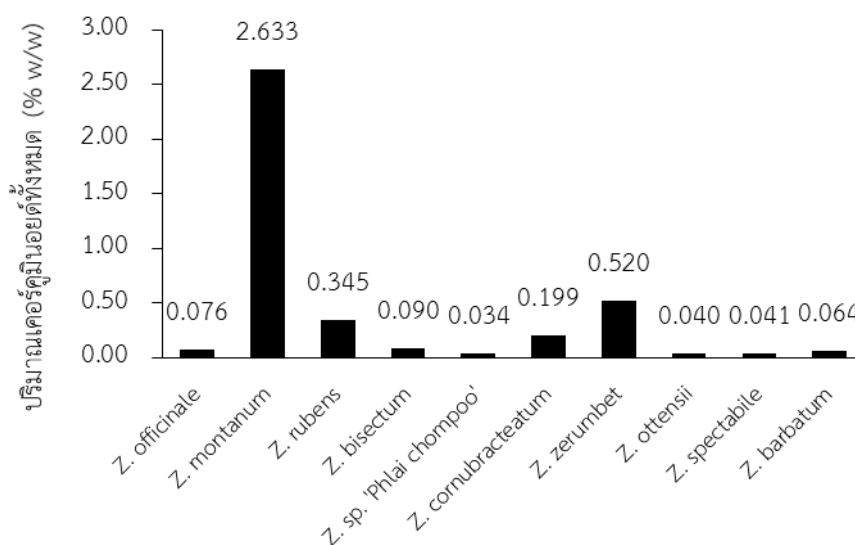
Pothitirat และ Gritsanapan (2006) ได้ศึกษาปริมาณของเคอร์คูมินในเหง้าขมิ้นชันจากภูมิภาคต่างๆ ในประเทศไทย สกัดเย็นด้วยเมทานอลแล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวีสเปกโทรโฟโตมิเตอร์พบว่าขมิ้นชันจากภาคใต้มีปริมาณเคอร์คูมินมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 8.99±0.83 w/w และภาคเหนือมีปริมาณเคอร์คูมินน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 4.80±1.83 w/w (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 พื้นที่การเพาะปลูก ในประเทศไทยต่อปริมาณเคอร์คูมินในพืช

ผลิตภัณฑ์	พื้นที่การเพาะปลูก	ปริมาณเคอร์คูมิน (%w/w)	ที่มา
ไพล	แบ่งตามจังหวัดที่มีการเพาะปลูก ได้แก่		Paramapojn และคณะ (2009)
	- ลำพูน	0.156 ± 0.002	
	- อุดรดิตถ์	0.066 ± 0.001	
	- พิษณุโลก	0.171 ± 0.003	
	- เพชรบูรณ์	0.160 ± 0.002	
	- อุดรธานี	0.161 ± 0.004	
	- เลย	0.129 ± 0.001	
	- มุกดาหาร	0.149 ± 0.001	
	- ชลบุรี	0.067 ± 0.001	
	- กาญจนบุรี	0.133 ± 0.003	
	- นครปฐม	0.070 ± 0.001	
	- ราชบุรี	0.103 ± 0.002	
	- ระนอง	0.265 ± 0.002	
ขมิ้นชัน	แบ่งตามภูมิภาค		Pothitirat และ Gritsanapan (2006)
	- ภาคเหนือ	4.80± 1.83	
	- ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	7.57 ± 0.04	
	- ภาคกลาง	5.60 ± 0.88	
	- ภาคใต้	8.99 ± 0.83	

สำหรับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาศึกษาก็มีผลต่อปริมาณเคอร์คูมิน เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีปริมาณเคอร์คูมินแตกต่างกันโดย Kantayos และ Paisooksantivatana (2012) ศึกษาปริมาณเคอร์คูมินในพืชสกุลขิงจำนวน 10 ชนิดที่พบในประเทศไทย ได้แก่ ไพลเหลือง (Z.

montanum), ขิง (*Z. officinale*), ขิงป่าดอกแดง (*Z. rubens*), ไพลชมพู (*Z. 'Phlai-chompoo'*), (*Z. cornubraceatum*), ไพลดำ (*Z. ottensii*), ขิงป่าสองแสบ (*Z. bisectum*), กระเทียมช้าง (*Z. spectabile*), กระเทียม (*Z. zerumbet*) และขิงขนหนู (*Z. barbatum*) และหาปริมาณเคอร์คูมินอยด์ทั้งหมดด้วยเครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่าไพลเหลืองมีปริมาณเคอร์คูมินอยด์สูงสุด คือ 2.63 %w/w และไพลชมพูมีปริมาณเคอร์คูมินอยด์ต่ำที่สุด ดังภาพที่ 7



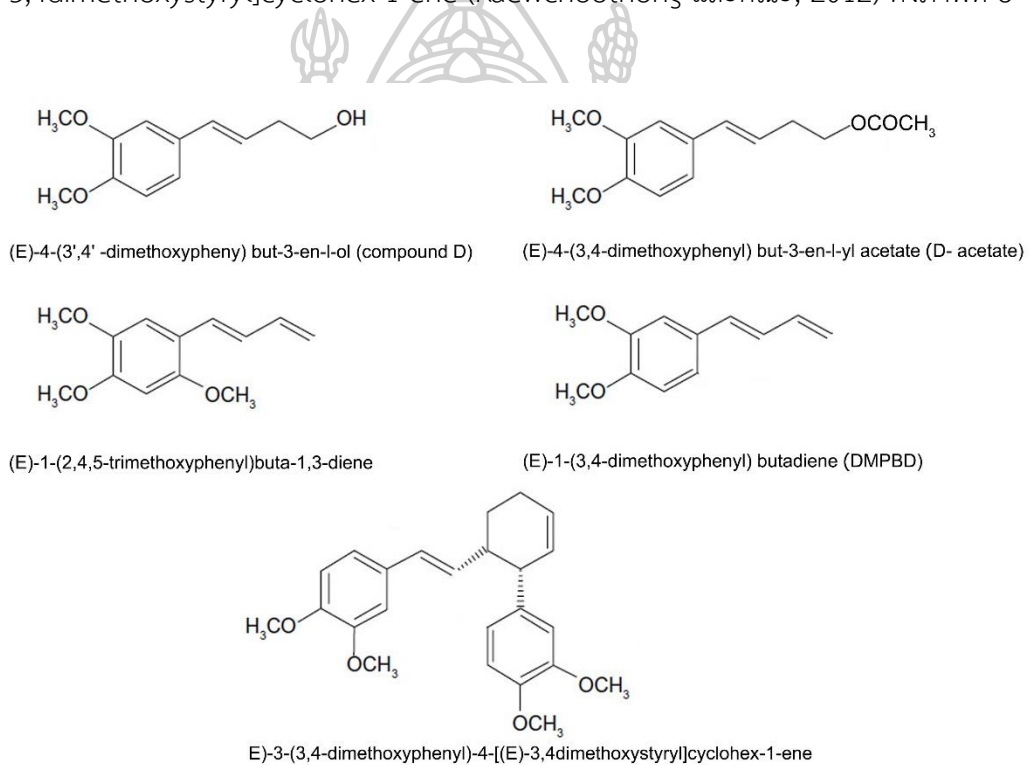
ภาพที่ 7 ปริมาณเคอร์คูมินอยด์ในพืชสกุลขิง 10 ชนิดที่พบในประเทศไทย

ที่มา: Kantayos และ Paisooksantivatana (2012)

นอกจากนี้สภาวะและวิธีการสกัดมีผลต่อเคอร์คูมิน โดยสภาวะการสกัดได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และตัวทำละลายที่ใช้สกัด โดยสมใจ (2549) ได้ศึกษาการสกัดสารเคอร์คูมินอยด์จาก ขมิ้นชัน โดยใช้ตัวทำละลายเมทานอลและเอทานอล ในสภาวะการสกัดต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที ถึง 24 ชั่วโมง ปริมาณสารที่สกัดถูกวิเคราะห์ด้วย เครื่องยูวี-สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยพบว่าการสกัดด้วยอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ด้วยเมทานอลให้ปริมาณเคอร์คูมินอยด์สูงสุดร้อยละ 8.09 w/w และปริมาณสารเคอร์คูมินที่สกัดได้ จะลดลงเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.1.2.3 ฟีนิวบิวทานอยด์

โพลจะประกอบไปด้วยสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ (phenylbutanoid) เป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้ว ดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาคือฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Suksaeree และคณะ, 2015) จึงนิยมนำไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบทางยาเพื่อบรรเทาอาการปวดและลดการอักเสบ โดยสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ที่พบหลักในโพล ได้แก่ (E)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl) but-3-en-l-ol หรือ compound D, (E)-4-(3,4-dimethoxyphenyl) but-3-en-l-yl acetate หรือ D- acetate, (E)-1-(2,4,5-trimethoxyphenyl)buta-1,3-diene, (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl) butadiene หรือ DMPBD. และ(E)-3-(3,4-dimethoxyphenyl)-4-[(E)-3,4dimethoxystyryl]cyclohex-1-ene (Kaewchoothong และคณะ, 2012) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ที่พบในโพล

ที่มา: Kaewchoothong และคณะ (2012)

Janpim และคณะ (2012) ปัจจัยที่มีผลต่อความคงตัวของ compound D ได้แก่ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อุณหภูมิ และแสงสว่าง โดยนำผงโพลมาละลายด้วยสารละลายเมทานอล

บริสุทธิ์ให้มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรและทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นและปรับปริมาตรให้มี pH เท่ากับ 3, 5, 7 และ 9 เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน พบว่าสารสกัดไพลไม่คงตัวที่ค่า pH เท่ากับ 3 โดยมีการปริมาณ compound D ลดลงมากที่สุดโดยมีปริมาณ compound D คงเหลือร้อยละ 70 และสารละลายไพลที่มีค่า pH เท่ากับ 5, 7 และ 9 มีปริมาณคงเหลือไม่แตกต่างจากไพลก่อนเก็บรักษา เมื่อนำสารสกัดไพลเก็บไว้ในที่มีมืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเก็บไว้ที่มีแสงสว่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยให้แสงยูวีที่มีความยาวคลื่น 320-360 นาโนเมตร เก็บเป็นเวลา 7 วันพบว่าสารสกัดไพลที่เก็บไว้ในที่มีมืดแต่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณ compound D ลดลง โดยคงเหลือร้อยละ 10 ในขณะที่สกัดไพลที่เก็บไว้ในที่มีมืดแต่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ปริมาณ compound D ลดลง โดยคงเหลือร้อยละ 70

นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของสารกลุ่มฟีนอลิกในเหง้าไพล ได้แก่ ความแตกต่างของพื้นที่การเพาะปลูก วิธีการสกัด จากการศึกษาของ Paramapojn และคณะ (2009) พบว่าสภาพแวดล้อม ความแตกต่างของพื้นที่เพาะปลูกมีผลต่อปริมาณสาร compound D ที่ได้จากไพล (ตารางที่ 6) โดยไพลที่ได้แหล่งเพาะปลูกจาก 13 จังหวัดในประเทศไทย ได้แก่ ลำพูน อุตรดิตถ์ พิษณุโลก เพชรบูรณ์ อุตรธานี เลย มุกดาหาร ระยอง ชลบุรี กาญจนบุรี นครปฐม ราชบุรี และระนอง วิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC) พบว่าไพลที่นำมาจากจังหวัดชลบุรีมีปริมาณ compound D มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 1.642 ± 0.005 (w/w) ในขณะที่ไพลที่ได้จากจังหวัดเลยมีปริมาณ compound D น้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.400 ± 0.001 และ Tangyuenyongwatana (2017) วิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางโครมาโทกราฟีผิวบางสมรรถนะสูง (high performance thin layer chromatography, HPTLC) พบว่าไพลที่ได้จากจังหวัดอุบลราชธานีมีปริมาณ compound D มากที่สุดร้อยละ 0.913 ± 0.012 (w/w) และไพลที่ได้จากจังหวัดสุราษฎร์ธานีมีปริมาณ compound D น้อยที่สุดร้อยละ 0.152 ± 0.007 (w/w) งานวิจัยที่ศึกษาสารกลุ่มฟีนอลิกในเหง้าไพลแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ปริมาณ compound D ในไพลจากแหล่งเพาะปลูกในจังหวัดต่างๆ ในประเทศไทย

ผลิตภัณฑ์	จังหวัดที่การ เพาะปลูก	วิธีวิเคราะห์	compound D % (w/w)	ที่มา
ไพล	ลำพูน	วิธี HPLC	0.811±0.002	Paramapojn และคณะ (2009)
	อุดรดิตถ์		0.638±0.003	
	พิษณุโลก		0.801±0.003	
	เพชรบูรณ์		0.884±0.004	
	อุดรธานี		0.538±0.002	
	เลย		0.400±0.001	
	มุกดาหาร		0.664±0.001	
	ระยอง		1.461±0.013	
	ชลบุรี		1.642±0.005	
	กาญจนบุรี		1.005±0.003	
	นครปฐม		0.615±0.002	
	ราชบุรี		1.455±0.006	
	ระนอง		0.903±0.002	
ไพล	บุรีรัมย์	วิธี HPTLC	0.845±0.011	Tangyuenyongwatana (2017)
	อุบลราชธานี		0.913±0.012	
	ราชบุรี		0.680±0.004	
	สมุทรปราการ		0.584±0.001	
	เชียงใหม่		0.288±0.024	
	นครราชสีมา		0.299±0.013	
	ชัยนาท		0.255±0.013	
	เขียงราย		0.299±0.000	
	ระนอง		0.437±0.012	
	ตรัง		0.510±0.001	
สุราษฎร์ธานี	0.152±0.007			

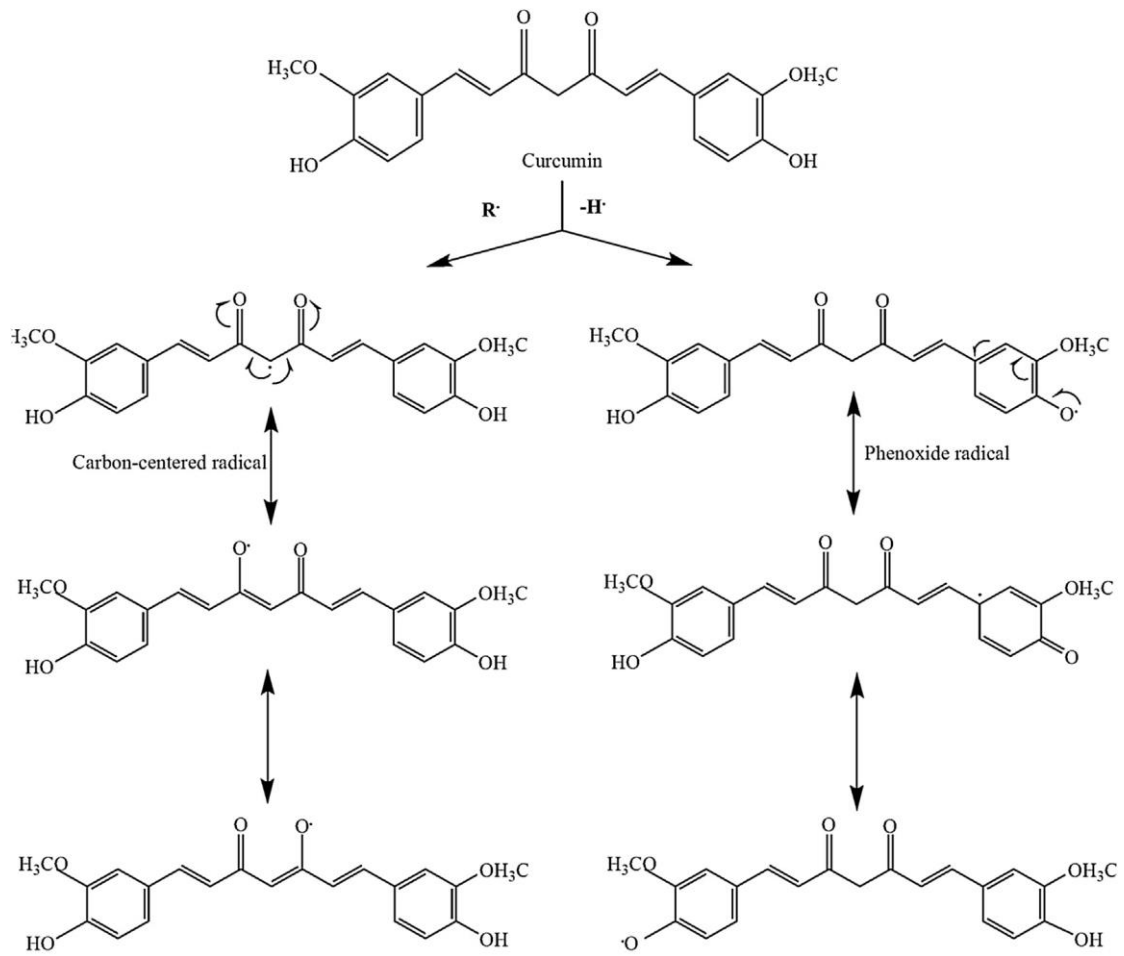
ตารางที่ 7 งานวิจัยที่ศึกษาปริมาณพินิวบิวทานอยด์ในไพล

ผู้วิจัย	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	ปริมาณพินิวบิวทานอยด์
Paramapojn และคณะ (2009)	เฮกเซน	compound D = 0.400-1.642 %w/w
Kaewchoothong และ คณะ (2012)	เฮกเซน	compound D = 8.74±1.05 %w/w DMPBD = 14.58±1.19 %w/w
	เมทานอล	compound D = 2.39±0.88 %w/w DMPBD = 3.80±1.04 %w/w
Priprem และคณะ (2016)	เมทานอล	compound D = 149.5±9.1 มิลลิกรัม/กรัม ตัวอย่างแห้ง
Tangyuenyongwatana (2017)	เมทานอล	compound D = 0.152-0.913 %w/w

2.1.2.4 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่พบในไพล

สารต้านออกซิเดชันที่พบในไพล ได้แก่ เคอร์คูมิน (Ghosh และคณะ, 2015) และองค์ประกอบทางเคมีน้ำมันหอมระเหยไพล เช่น สารกลุ่มโมโนเทอร์ปีนอยด์ได้แก่ซาบินิน (Quiroga และคณะ, 2015) เทอร์ไพเนน-4-ออล (Souza และคณะ, 2018) แอลฟา-เทอร์ไพเนน, แกมมา-เทอร์ไพเนน (Li และ Liu, 2009)

กลไกการต้านออกซิเดชันของเคอร์คูมิน (Ghosh และคณะ, 2015) เกิดขึ้นในส่วนของ heptadienone ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างวงของเมทอกซีฟีนอล (methoxyphenol) จำนวน 2 วง ซึ่ง heptadienone ประกอบไปด้วยหมู่เมทิลลีน (CH_2) ที่อยู่ตรงกลางของคาร์บอนที่ต่อกัน 7 อะตอมปลดปล่อยอะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ นอกจากนี้ในส่วนของกลุ่มวงแหวนอะโรมาติกที่มีจำนวนหมู่เมทอกซี โดย OH เป็นส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการปลดปล่อยอะตอมไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระของเคอร์คูมินจะค่อนข้างมีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยาอื่นต่อไป ยิ่งไปกว่านั้นอนุมูลอิสระของสารยังคงรวมตัวกับอนุมูลอิสระอื่นได้อีกด้วย จึงทำให้เคอร์คูมินกำจัดอนุมูลอิสระได้เพิ่มขึ้นดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กลไกการต้านออกซิเดชันของเคอร์คูมิน

ที่มา: Ghosh และคณะ (2015)

จากการศึกษาของ Ghosh และคณะ (2015) เปรียบเทียบความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระของสารมาตรฐานเคอร์คูมินเทียบกับสารต้านออกซิเดชันสังเคราะห์อื่นๆ ได้แก่ วิตามินอี (tocopherol), butylated hydroxyanisole (Sida และคณะ), butylated hydroxytoluene (BHT) และ 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox) ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) โดยแสดงเป็นร้อยละการยับยั้ง (%DPPH inhibition) พบว่าสารต้านออกซิเดชันที่ทำให้ร้อยละการลดลงอนุมูลอิสระมากที่สุดได้แก่ สารมาตรฐาน BHA ที่มีความเข้มข้น 123 มิลลิโมลาร์ รองลงมาคือสารมาตรฐานวิตามินอีที่มีความเข้มข้น 51 มิลลิโมลาร์ สารมาตรฐาน BHT ที่มีความเข้มข้น 102 มิลลิโมลาร์ สารมาตรฐานเคอร์คูมินที่มี

ความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์และสารมาตรฐาน Trolox ที่มีความเข้มข้น 90 มิลลิโมลาร์ โดยมีร้อยละ การลดลงอนุมูลอิสระเท่ากับ 67.8, 64.9, 62.5, 62.2 และ 29.4 ตามลำดับ เมื่อนำสารมาตรฐานเคอร์คูมินมาหาปริมาณที่ทำให้ความเข้มข้นของ DPPH เหลืออยู่ร้อยละ 50 (50% effective concentration, EC₅₀) พบว่าสารมาตรฐานเคอร์คูมินมีค่า EC₅₀ = 34.86 กรัมต่อมิลลิลิตร โดยค่า EC₅₀ มีปริมาณต่ำแสดงถึงความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันสูง

นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยไพลยังมีฤทธิ์ในการต้านออกซิเดชันสูง Bua-in และ Paisooksantivatana (2009) ศึกษาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของน้ำมันหอมระเหยในไพลที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 8 เดือน ในแต่ละพื้นที่การเพาะปลูกตามภูมิภาคต่างในประเทศไทย และวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH แสดงเป็นค่าร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ (%DPPH inhibition) พบว่าไพลที่ได้จากการเก็บเกี่ยวในแต่ละภูมิภาคมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันไม่เท่ากัน โดยไพลที่เก็บเกี่ยวได้จากภูมิภาคที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดคือ ภาคเหนือ รองลงมา ภาคตะวันออก ภาคใต้ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันตก และภูมิภาคที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระน้อยที่สุดคือภาคกลาง ซึ่งมีปริมาณร้อยละการยับยั้งเท่ากับ 80.88±12.08, 76.47±16.85, 72.51±13.94, 67.38±14.44, 66.66±11.30 และ 57.63±27.60 ตามลำดับ นอกจากนี้ Lertsatitthanakorn และคณะ (2006) ศึกษาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในน้ำมันหอมระเหยของพืช 7 ชนิดได้แก่ ตะไคร้หอม ตะไคร้ มะกรูด กะเพรา โหระพา ไพล และขิง วิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และรายงานเป็นค่าความเข้มข้นของสารที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 (50% inhibitory concentration, IC₅₀) โดยถ้ามีค่า IC₅₀ น้อยแสดงถึงความสามารถในการต้านออกซิเดชันมาก พบว่า น้ำมันหอมระเหยในกะเพรา ตะไคร้หอม และไพลมีความสามารถในการต้านออกซิเดชันมากที่สุด มีค่า IC₅₀ เท่ากับ 0.03±0.0, 2.0±0.1 และ 6.9±0.01 ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตรตามลำดับ รองลงมาคือขิง ตะไคร้ โหระพาและมะกรูด โดยมีค่า IC₅₀ เท่ากับ 23.9±0.8, 27.0±0.7, 31.0±3.9 และ 41.7±0.1 ไมโครลิตรต่อมิลลิลิตรตามลำดับ

Kantayos และ Paisooksantivatana (2012) ศึกษาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในพืชสกุลขิงบางชนิดที่พบในประเทศไทย ได้แก่ ไพลเหลือง ขิง ขิงป่าดอกแดง ไพลชมพู กระเทียม ไพลดำ ขิงป่าสองแถบ กระเทียมช้าง ขิงขนหนู สกัดด้วยสารละลายเอทานอลและวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และวิธี 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonic acid) (ABTS) โดยรายงานเป็นค่า IC₅₀ จากพบว่าไพลเหลืองเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH มีค่า IC₅₀ เท่ากับ 4.71±0.15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และวิธี ABTS เท่ากับ 13.91±0.15 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีความสามารถเป็นสารต้านออกซิเดชัน

สูงกว่าไพลชมพู กระทือ ไพลดำ กระทือช้าง ชิงชนหนู นอกจากนี้ Wipawan และคณะ (2012) ศึกษาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในสมุนไพรได้แก่ ฟ้าทะลายโจร เถาวัลย์เปรียง มะระขี้นก เจตมูลเพลิงแดง ทองพันชั่ง ชุมเห็ดเทศ รางจืด บอระเพ็ด กล้วยดอกขาว และไพล สกัดด้วยสารละลายเอทานอลและวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และวิธี ABTS โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก และกราฟมาตรฐาน Trolox ตามลำดับ พบว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี DPPH ไพลมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันเท่ากับ 11.24 ± 0.354 มิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าฟ้าทะลายโจร เถาวัลย์เปรียง มะระขี้นก เจตมูลเพลิงแดง ชุมเห็ดเทศ รางจืด และบอระเพ็ด แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี ABTS พบว่าไพลมีปริมาณความเป็นสารต้านออกซิเดชันสูงเท่ากับ 90.05 ± 0.81 มิลลิกรัม Trolox ต่อกรัมตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณที่สุดเมื่อเทียบกับสมุนไพรชนิดอื่นๆ (ตารางที่ 8)



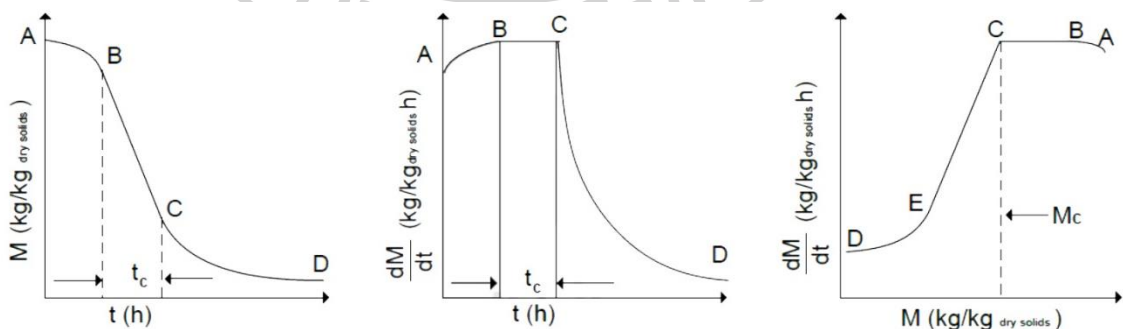
ตารางที่ 8 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในสมุนไพร

ผลิตภัณฑ์	วิธีวิเคราะห์	ความสามารถในการเป็น สารต้านออกซิเดชัน		ที่มา
		วิธี DPPH	วิธี ABTS	
โพลเหลียง	วิธี DPPH	4.71±0.15	13.91±0.15	Kantayos และ Pisooksantivatana (2012)
ชิง	(IC ₅₀ = mg/ml)	4.26±0.07	7.04±0.01	
ชิงป่าดอกแดง	วิธี ABTS	7.93±0.02	12.81±0.17	
โพลชมพู	(IC ₅₀ =mg/ml)	13.08±0.96	46.48±1.35	
กระทือ		16.71±0.44	24.81±0.98	
โพลดำ		32.81±0.59	49.10±1.00	
ชิงป่าสองแถบ		8.89±0.11	9.34±0.34	
กระทือช้าง		39.34±3.84	60.80±13.47	
ชิงขนหนู		13.31±0.19	16.52±0.01	
ฟ้าทะลายโจร	วิธี DPPH	0.85±0.014	8.32±0.067	Wipawan และคณะ (2012)
เถาวัลย์เปรียง	(mg gallic/g extracts)	7.14±0.100	58.53±0.488	
มะระขี้นก	วิธี ABTS	2.04±0.014	4.10±0.048	
เจตมูลเพลิงแดง	(mg trolox/g extracts)	9.30±0.255	63.91±0.480	
ทองพันชั่ง		16.53±0.074	41.83±0.795	
ชุมเห็ดเทศ		9.09±0.011	31.29±0.519	
รางจืด		9.64±0.108	33.87±0.176	
บอระเพ็ด		7.71±0.011	56.81±1.098	
หญ้าดอกขาว		16.48±0.138	34.50±0.308	
โพล		11.24±0.354	90.05±0.814	

2.2 การทำแห้ง

กระบวนการทำแห้งเป็นการกำจัดน้ำออกโดยการระเหยน้ำ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร โดยการลดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ซึ่งมีผลในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และชะลอการทำงานของเอนไซม์ (Fargali และคณะ, 2008)

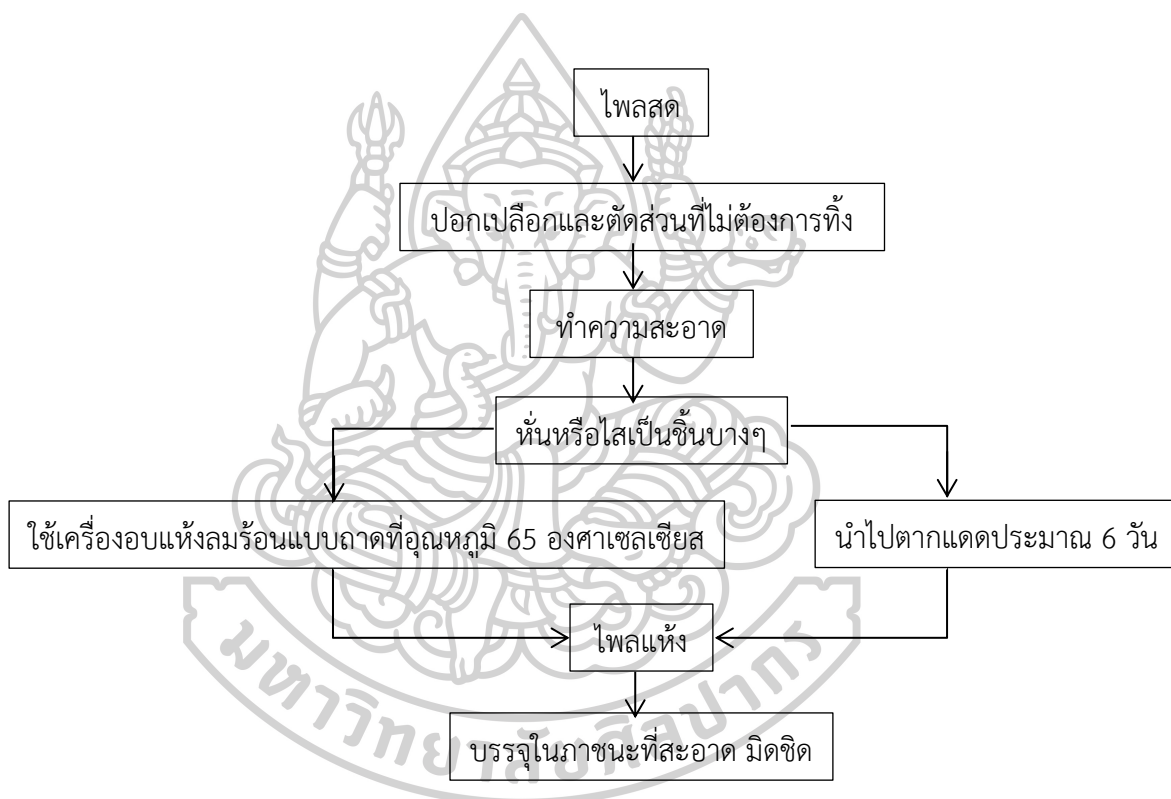
กลไกการทำแห้งของผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นเมื่ออากาศร้อนหรือลมร้อนผ่านผิวหน้าผลิตภัณฑ์ที่เปียก ความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังผิวของอาหารและน้ำในอาหารจะระเหยออกมาด้วยความร้อนแฝงของการเกิดไอ ไอน้ำจะแพร่ผ่านฟิล์มอากาศและถูกพัดพาไปโดยลมร้อนเคลื่อนที่ในสภาวะดังกล่าวทำให้ความดันไอที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าความดันไอด้านในของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ด้านในจะมีความดันไอสุงและค่อยๆ ลดต่ำลง เมื่อผลิตภัณฑ์ใกล้ความแตกต่างน้ำทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากผลิตภัณฑ์ ระหว่างการอบแห้งจะเกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) และการถ่ายเทมวล (mass transfer) ทำให้ได้กราฟการทำแห้ง (drying curve) โดยทั่วไปเป็น 3 ช่วงดังแสดงในภาพที่ 10 แบ่งเป็นช่วงปรับสถานะเบื้องต้น (initial adjustment period) ช่วง A-B เป็นช่วงเวลาสั้นๆ ในตอนเริ่มการอบแห้ง โดยจะเป็นช่วงที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับลมร้อน ช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period) ช่วง B-C ช่วงนี้น้ำจะเคลื่อนที่จากด้านในของผลิตภัณฑ์ออกมาด้วยอัตราเร็วเท่ากับน้ำที่ระเหยออกจากผิวหน้าผลิตภัณฑ์ ช่วงอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) ช่วง C-D เป็นช่วงที่อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในอาหารมายังผิวหน้าจะต่ำกว่าอัตราการระเหยของน้ำไปยังอากาศโดยรอบ ช่วงนี้ระนาบของการระเหยจะเคลื่อนเข้าสู่ภายในเนื้อผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาตลอดจนการทำแห้งจะพบว่าช่วงของการอบแห้งลดลงเป็นช่วงหลักที่เกิดขึ้น (Brennan และคณะ, 1990)



ภาพที่ 10 กราฟการทำแห้งและอัตราการทำแห้ง
ที่มา Brennan และคณะ (1990)

2.2.1 การทำแห้งโพล

การทำแห้งโพลมีหลายวิธี ได้แก่ โพลแห้งในรูปชิ้น โดยสามารถทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดหรือการตากแดด ซึ่งวิธีการทำแห้งแสดงดังภาพที่ 11 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโพลแห้งในรูปชิ้น สามารถนำไปส่วนประกอบลูกประคบ โพลผง นำโพลแห้งมาบดให้ละเอียด ด้วยเครื่องบดผง แล้วร่อนเอาเฉพาะผงโพล หรือนำน้ำมันโพลเข้าเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโพลผง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ ยาลูกกลอน ผงโพลบำรุงผิว (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2549)

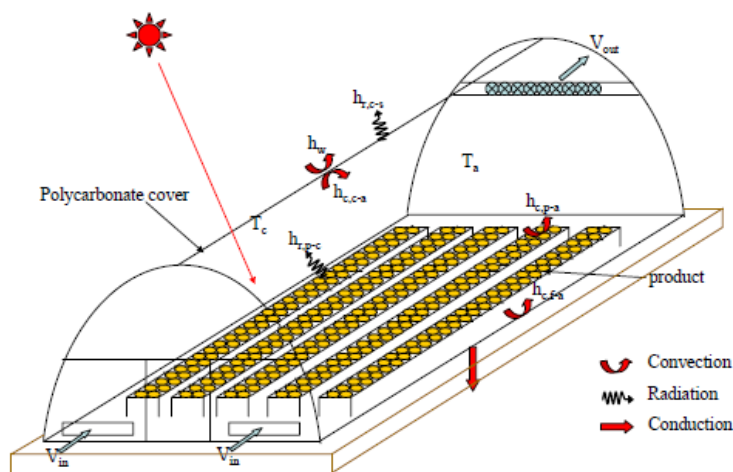


ภาพที่ 11 กระบวนการทำแห้งโพล

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2549)

2.2.2 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (Greenhouse solar dryer)

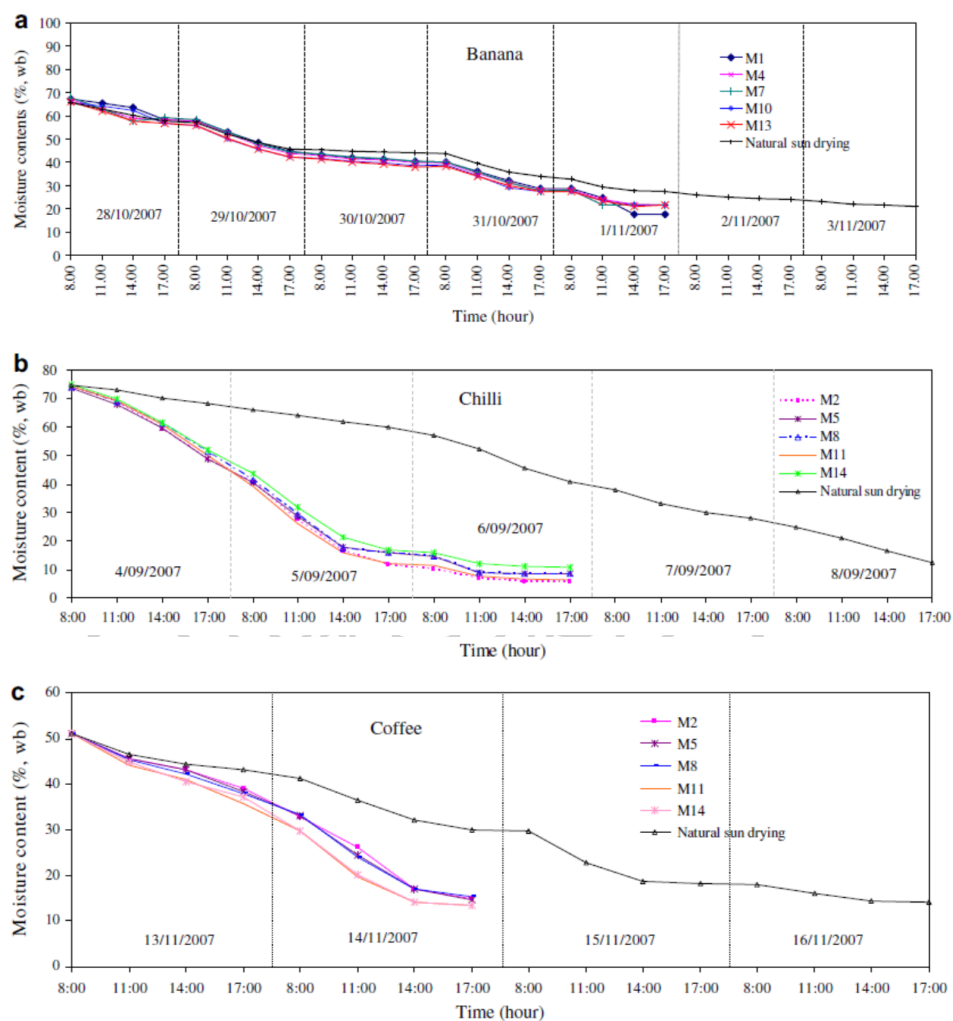
ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (ภาพที่ 12) มีลักษณะโครงสร้างแบบเรือนกระจก (greenhouse) โดยมีหลังคาปิดคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตเพื่อให้เกิดผลของเรือนกระจก (Greenhouse effect) โดยแผ่นโพลีคาร์บอเนตมีสารเคลือบป้องกันรังสียูวีซึ่งจะช่วยกรองรังสียูวีที่มีความยาวคลื่น 200-400 นาโนเมตรออกไป เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบมายังระบบอบแห้งฯ ส่งผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตไปยังผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในชั้นวางวัสดุสำหรับอบแห้ง บางส่วนจะตกกระทบไปยังพื้นของระบบอบแห้งซึ่งจะทำให้ภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเกิดการแผ่รังสีออกมา แต่เนื่องจากรังสีอินฟราเรดเป็นรังสีคลื่นยาว ซึ่งส่วนมากไม่สามารถผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนตออกไปภายนอกได้ จึงถูกเก็บกักอยู่ภายในระบบอบแห้งฯ และส่งผลให้อุณหภูมิภายในส่วนอบแห้งสูงขึ้น ทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์ระเหยออกมา และความชื้นจะถูกพัดลมดูดอากาศด้านหลังของระบบดูดออกไปภายนอก อากาศแวดล้อมจะไหลผ่านช่องอากาศเข้าที่ด้านหน้าของระบบอบแห้งฯ ความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงค่อยๆ ลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงและจากอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้ง ดังนั้นจึงทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งเร็วกว่าการตากแดดตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันฝน แดด และสิ่งสกปรกต่างๆ



ภาพที่ 12 หลักการทำงานของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

ที่มา: Janjai (2012)

Janjai และคณะ (2011) ศึกษาการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ขนาด 7.5x20.0 เมตร ในประเทศลาวโดยมีอุณหภูมิในการทำแห้งอยู่ระหว่าง 31-58 องศาเซลเซียส และ 30-60 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถใช้กล้วย 1,000 กิโลกรัม พริก 300 กิโลกรัม และกาแฟ 200 กิโลกรัม โดยมีความชื้นเริ่มต้นร้อยละฐานเปียกเท่ากับ 68, 75 และ 52 พบว่าเมื่อใช้ระบบอบแห้งฯ ใช้เวลาในการทำแห้ง 5, 3 และ 2 วัน ตามลำดับ ช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งเมื่อเทียบกับการตากแดด แสดงดังภาพที่ 13 นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังแสดงตารางที่ 9



ภาพที่ 13 พฤติกรรมการทำแห้งของ (a) กล้วย (b) พริก และ (c) กาแฟ ที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดด
ที่มา: Janjai และคณะ (2011)

ตารางที่ 9 การศึกษาการใช้ระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบไร้อนุกรมจกในผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ผลิตภัณฑ์	ขนาดระบบบอบแห้งๆ	อุณหภูมิของระบบบอบแห้งๆ	ผลการทดลอง	ที่มา
กล้วย	7.5x20.00x3.5 เมตร	30-62 องศาเซลเซียส	สามารถทำแห้งกล้วยจำนวน 1,000 กิโลกรัม ปริมาณ	Janjai และคณะ
พริก			300 กิโลกรัม และกาแฟจำนวน 200 กิโลกรัม โดยใช้เวลาใน	(2011)
กาแฟ			การทำแห้ง 5, 3 และ 2 วัน ตามลำดับ ช่วยลดระยะเวลาใน	
			การทำแห้งเมื่อเทียบกับการตากแดด	
มะเขือเทศเชื่อมอบแห้ง	8.0x20.0x3.5 เมตร	35-65 องศาเซลเซียส	สามารถทำแห้งมะเขือเทศเชื่อมอบแห้งจำนวน 1,000	Janjai (2012)
			กิโลกรัม ใช้ระยะเวลาในการทำแห้ง 2-3 วัน ซึ่งน้อยกว่าการ	
			ตากแดด และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีกว่า	
พริก	8.0x20.0x3.5 เมตร	33-65 องศาเซลเซียส	สามารถอบแห้งพริกจำนวน 500 กิโลกรัม โดยใช้ระยะเวลา	Kaewkiew และ
			ในการทำแห้ง 3 วัน ในการลดความชื้นให้เหลือร้อยละ 9 เมื่อ	คณะ (2012)
			เทียบกับการตากแดดใช้เวลา 5 วัน นอกจากนี้พริกที่ดียังมีสี	
			ดีกว่าการตากแดดอีกด้วย	
แผ่นยางพารา	9.0x27.0x3.5 เมตร	35-55 องศาเซลเซียส	ศึกษาการใช้ระบบอบแห้งๆ ในการอบแห้งแผ่นยางพารา 750	Janjai และคณะ
			กิโลกรัม ซึ่งช่วยลดระยะเวลาการทำแห้งเมื่อเปรียบเทียบกับ	(2015)
			การตากแดด โดยใช้เวลาในการทำแห้ง 5 วัน	

2.2.3 อิทธิพลของการทำแห้งต่อน้ำมันหอมระเหยและเคอร์คูมินอยด์

การทำแห้งเป็นหนึ่งในขั้นตอนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งขั้นตอนการทำแห้งนี้จะส่งผลต่อน้ำมันหอมระเหย เคอร์คูมิน และความสามารถเป็นสารต้านออกซิเดชัน เนื่องจากอุณหภูมิและแสง โดย จากการศึกษาของอดุลย์ (2552) ที่ศึกษาการทำแห้งขึ้นไพลด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้นมีผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันหอมระเหยไพลอบแห้ง โดยการทำแห้งขึ้นไพลที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการทำแห้ง 24, 20 และ 16 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 4.00, 3.05 และ 2.83 (v/w) ตามลำดับ สอดคล้องกับบุญนาก และคณะ (2554) ซึ่งศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อการทำแห้งขึ้นไพล พบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากขึ้น โดยมีการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 16.84, 21.55, 55.89 และ 82.49 ที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส

Khangholil และ Rezaeinodehi (2008) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิของการทำแห้งต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในโกศจุฬาลัมพา พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยโกศจุฬาลัมพาลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งโกศจุฬาลัมพาอบแห้งที่อุณหภูมิ 35, 45, 55 และ 65 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 0.88, 0.55, 0.50 และ 0.37 (v/w) ตามลำดับ

Saeidi (2016) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งด้วยการทำแห้งในที่ร่ม การตากแดดและเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 80 องศาเซลเซียสต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในมินต์ พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.94 (v/w) รองลงมาคือวิธีการทำแห้งในที่ร่มมีปริมาณร้อยละ 0.93 (v/w) การอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีปริมาณร้อยละ 0.72 (v/w) และวิธีการตากแดดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.63 (v/w)

Ozdemir และคณะ (2018) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การทำแห้งในที่ร่มเป็นเวลา 7 วัน และการตากแดดเป็นเวลา 3 วัน ต่อบริมาณน้ำมันหอมระเหยในออริกานโอ 2 สายพันธุ์ได้แก่ *Origanum vulgare* L. และ *Origanum onites* L. พบว่าการทำแห้งออริกานโอ *O. vulgare* และ *O. onites* ด้วยการทำแห้งในที่ร่มมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 2.53 ± 0.13 และ 1.96 ± 0.09 รองลงมาคือวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 1.83 ± 0.12 และ 1.40 ± 0.12 และวิธีการตากแดดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยที่สุดเท่ากับ 1.61 ± 0.06 และ 1.04 ± 0.00

Raza และคณะ (2018) ศึกษาอุณหภูมิและวิธีการทำแห้งต่อปริมาณเคอร์คูมินอยด์ในเหง้าขมิ้นชัน สำหรับการทำให้ขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณเคอร์คูมินลดลงโดยมีปริมาณเคอร์คูมินเท่ากับร้อยละ 2.93±0.14, 2.15±0.11, 2.06±0.16 และ 1.73±0.12 ตามลำดับ และพบว่าการตากแดดเหง้าขมิ้นชันเป็นเวลา 43 วัน ทำให้เคอร์คูมินสลายตัวมากกว่าการทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลม (Solar tunnel dryer) ซึ่งใช้เวลาการทำแห้ง 37 วัน และการทำแห้งในที่ร่ม (Shade drying) ซึ่งใช้เวลาการทำแห้ง 76 วัน ซึ่งเหง้าขมิ้นชันอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งแต่ละวิธีมีปริมาณเคอร์คูมินร้อยละ 1.40±0.13, 1.68±0.08 และ 2.16±0.11 ตามลำดับ

2.3.4 อิทธิพลของการทำแห้งต่อความสามารถเป็นสารต้านออกซิเดชัน

บุญนาคและคณะ (2554) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบลาดต่อความสามารถในการต้านออกซิเดชันในชั้นโพลี วิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH พบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส โดยมีค่าร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระร้อยละ 75.09±6.71, 68.20±3.39, 65.54±1.25 และ 59.49±0.39 ตามลำดับ

Gumusay และคณะ (2015) ศึกษาผลของวิธีการอบแห้งต่อคุณสมบัติในการต้านออกซิเดชันในขิงด้วยวิธีการทำแห้งการตากแดดเป็นเวลา 36 ชั่วโมง การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบสุญญากาศ (vacuum oven drying) ที่ความดัน 0.025 มิลลิบาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 36 ชั่วโมง และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยขิงอบแห้งมีปริมาณความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันเท่ากับ 1220.62±66.68, 1470.04±56.13, 1486.88±42.40 และ 2555.57±48.01 มิลลิกรัม Trolox ต่อ 100 กรัมตัวอย่างแห้งตามลำดับ โดยการทำแห้งโดยใช้ความร้อน (การตากแดด การอบแห้งด้วยลมร้อน การอบแห้งลมร้อนแบบสุญญากาศ) จะทำให้สูญเสียความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และการทำแห้งด้วยการตากแดดมีการสูญเสียความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากที่สุด

Lakshmi และคณะ (2018) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดต่อปริมาณสารต้านออกซิเดชันในขมิ้นม่วง (*Curcuma caesia*) วิเคราะห์ปริมาณสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH พบว่าการทำให้ขมิ้นม่วงด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลา 18.5 ชั่วโมงมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันมากกว่าขมิ้นม่วงที่ทำแห้งด้วย

การตากแดดเป็นเวลา 46.5 ชั่วโมง โดยมีปริมาณสารต้านออกซิเดชันเท่ากับ 28.33 และ 22.04 ไมโครโมล Trolox ต่อกรัมตัวอย่าง ตามลำดับ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์

ในการศึกษานี้เลือกใช้ส่วนลำต้นใต้ดินหรือเหง้าของไพลสดที่มีอายุการเก็บเกี่ยว 2 ปี โดยเก็บเกี่ยวมาจากพื้นที่เพาะปลูกในอำเภอลำดวน จังหวัดสุราษฎร์ธานี และคัดเลือกเฉพาะที่ปราศจากโรค ไม่มีเชื้อราและตำหนิต่างๆ โดยใช้ไพลสดสำหรับการทดลองจำนวน 2 รุ่น แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 10 หลังการเก็บเกี่ยวไพลถูกบรรจุในถุงกระดาษ จากนั้นขนส่งมาทางรถยนต์ยังห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ใช้ระยะเวลาในการขนส่งประมาณ 6 ชั่วโมง เมื่อเหง้าไพลถึงห้องปฏิบัติการจะถูกนำมาทำความสะอาด โดยกำจัดดินออกด้วยการใช้ฟองน้ำปิดเศษดิน คัดเลือกไพลที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.91 ± 0.53 เซนติเมตร ความกว้าง 7.30 ± 0.94 เซนติเมตร และความยาว 12.51 ± 1.77 เซนติเมตร ด้วยการวัดขนาดด้วยเครื่องเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ จากนั้นนำไปเก็บรักษาในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68.1 ± 1.5 เพื่อรอทำการทดลองในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 10 รายละเอียดไพลที่ใช้ในการศึกษา

รุ่นที่	เดือนและปีที่เก็บเกี่ยว	ปริมาณ (กิโลกรัม)	สำหรับชุดการทดลอง
1	ตุลาคม 2560	30	- การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล ทำการทดลองจำนวน 2 ชุด - การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในไพลอบแห้ง ทำการทดลองจำนวน 2 ชุด
2	มิถุนายน 2561	10	- การศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล คุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในไพล ทำการทดลองจำนวน 2 ชุด

3.2 สารเคมี

- สารมาตรฐานเคอร์คูมิน เกรด HPLC (curcumin standard, Sigma-Aldrich, USA)
- สารมาตรฐาน 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH, Sigma-Aldrich, USA)
- สารมาตรฐาน 2,2'-Azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS, Sigma-Aldrich, USA)
- สารมาตรฐาน 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid (Trolox standard, Sigma-Aldrich, USA)
- สารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว C7- C40 (C7-C40 Saturated Alkanes Standard, Sigma-Aldrich, USA)
- โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulphate, Ajax Finechem, Australia)
- เมทานอลบริสุทธิ์ เกรด AR (absolute methanol AR 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- เมทานอลบริสุทธิ์ เกรด HPLC (absolute methanol HPLC 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- อะซิโตนไทรล์บริสุทธิ์ เกรด HPLC (absolute acetonitrile HPLC 99.9%, RCI Labscan, Thailand)
- กรดอะซิติกเกรด HPLC (acetic acid HPLC 99.7% , Fisher Scientific, UK)
- เฮกเซนเกรด AR (hexanes AR 99.0%, RCI Labscan, Thailand)
- น้ำกลั่น (distilled water, Vunique, Thailand)
- สารละลายกรดเปอร์ออกซีอะซิติก (TSUNAMI) (peroxyacetic acid, Ecolab, Inc., Thailand)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เครื่องวัดสี (Hunter lab รุ่น Colorflex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc., USA)
- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (analytical balance รุ่น BP 221S, Sartorius AG, Inc., Germany)
- เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง (analytical balance, รุ่น TE 3102S, Sartorius AG, Inc., Germany)
- เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี (benchtop water activity meter รุ่น AQUALAB 4TE , METER Group, Inc., USA)
- เครื่องปั่น (blender รุ่น 600 วัตต์ HR2120, Royal Philips Electronics, Inc., Thailand)
- เครื่องเขย่าสารละลาย (vortex mixer, รุ่น Vortex-Genie 2 G560E, Scientific Industries, USA)

- ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (hot air oven, รุ่น FD53, Binder, Germany)
- เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด (Tray dryer, บริษัทกล้วยน้ำไท เทรดดิ้ง กรุ๊ป จำกัด, ประเทศไทย)
- ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (greenhouse solar dryer) แบบ พพ. 2 ที่มีขนาดความกว้าง 8.0 เมตรและความยาว 12.4 เมตร พัฒนาโดยศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ร่วมกับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (temperature and humidity data loggers, รุ่น DC 100, Yokogawa, USA)
- เครื่องบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (temperature and humidity data loggers, รุ่น DL-121TH, VOLTCRAFT, Germany)
- อุปกรณ์วัดความเข้มแสงอาทิตย์ (pyranometer, รุ่น CMP11, Kipp&Zonen, Tempcon Instrumentation, UK)
- เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV/Vis spectrophotometer, รุ่น UV-1800, Shimadzu, Japan)
- เครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner, รุ่น 360D, Advance Ceramics Technology, Malaysia)
- เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (high performance liquid chromatography, รุ่น Shimadzu model RF-20 prominence PDA, degassing unit (DGU-20A3R); LC-20AD, Shimadzu, Japan)
- เครื่องลิวิดโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (liquid chromatography-mass spectrometry รุ่น LCMS-8050, Shimadzu LC-20ADXR, Shimadzu, Japan)
- เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography รุ่น GC-2010Plus, Shimadzu, Japan)
- คอลัมน์ Luna 5 ไมโครเมตร C18 (2) 100 อังสตรอม ขนาด 250x4.6 มิลลิเมตร (column, Phenomenex, Torrance, USA)
- คอลัมน์ DB-5MS capillary ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร หน้า 0.25 ไมโครเมตร (DB-5MS capillary column, J&W Scientific, Inc., USA)

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมชิ้นไพลก่อนการทำแห้ง

นำเหง้าไพลสดมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดเศษดินที่ติดมาในระหว่างการเก็บเกี่ยว นำไปแช่สารละลายกรดเปอร์ออกซีอะซิติก (peroxyacetic acid) ความเข้มข้น 100 ppm อัตราส่วนเหง้าไพลสดต่อสารละลาย เท่ากับ 1:2 (w/v) เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำขึ้นมาล้างให้แห้ง โดยใช้พัดลมเป่าเป็นเวลา 15 นาที และด้วยเครื่องสไลด์ที่มีความหนา 0.2 เซนติเมตร แสดงดังภาพที่

14



ภาพที่ 14 การเตรียมตัวอย่างไพลก่อนการทำแห้ง

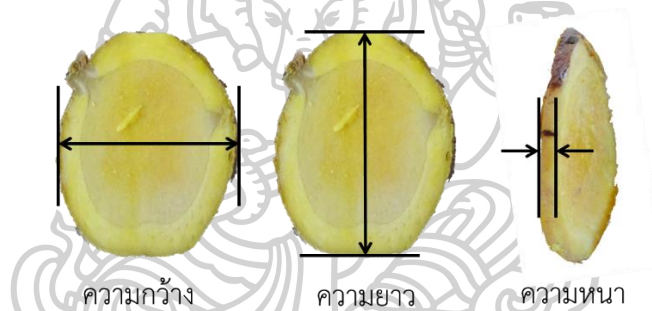
3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของชิ้นไหลที่ผ่านการตัดแต่งก่อนการ ทำแห้ง

คุณสมบัติทางกายภาพของชิ้นไหลที่ผ่านการตัดแต่งที่ศึกษาได้แก่ขนาด และสี สำหรับ
คุณสมบัติทางเคมีที่ทำการศึกษาได้แก่ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ ปริมาณเคอร์คูมิน ชนิด
ของสารประกอบฟีนอลิกบิวทานอยด์ ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย และ
ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

3.4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

3.4.2.1.1 ขนาดของชิ้นไหล

นำชิ้นไหลที่ผ่านการตัดแต่งมาวัดความกว้าง ความยาว และความหนาด้วยเครื่อง
เวอร์เนียคาลิเปอร์ (ภาพที่ 10) โดยสุ่มวัดขนาดไหลจำนวน 25 ชิ้น ต่อชุดการทดลอง



ภาพที่ 15 ลักษณะการวัดความกว้าง ความยาว และความหนาของชิ้นไหลสด

3.4.2.1.2 ค่าสี

วัดค่าสีได้แก่ค่า L^* , a^* และ b^* ของชิ้นไหลสดผ่านการตัดแต่งจำนวน 25 ชิ้นต่อ
ชุดทดลองด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab โดยใช้ระบบ CIE L^* , a^* b^* ทำการวัดค่าสีทั้งสองด้านของชิ้น
ไหลที่บริเวณตรงกลางชิ้น จากนั้นนำค่า L^* , a^* และ b^* มาคำนวณค่า Chroma (C^*), hue angle
(h°) และ ΔE ดังสมการ

$$\text{Chroma} = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$\text{hue angle} = \tan^{-1} \cdot \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

3.4.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

3.4.2.1.3 ปริมาณความชื้น (moisture content)

ในแต่ละชุดการทดลอง สุ่มชิ้นโพลสดที่ผ่านการตัดแต่งจำนวน 15 ชิ้นหรือประมาณ 15 กรัม ทำการบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง และชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 3-5 กรัม บรรจุลงในกระป๋องอลูมิเนียมสำหรับหาปริมาณความชื้น (moisture can) แล้วชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างและกระป๋องอลูมิเนียม หลังจากนั้นนำกระป๋องอลูมิเนียมบรรจุตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่างและกระป๋องอลูมิเนียมหลังการอบ คำนวณหาค่าปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

3.4.2.1.4 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (water activity; a_w)

ในแต่ละชุดการทดลอง ทำการสุ่มชิ้นโพลสดที่ผ่านการตัดแต่งจำนวน 10 ชิ้นประมาณ 10 กรัม บดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง แบ่งบรรจุลงในภาชนะใส่ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีประมาณ 3 กรัม และทำการวิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตีด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตีที่อุณหภูมิ 25 ± 0.2 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

3.4.2.1.5 วิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมิน (curcumin contents) และชนิดของฟีนีลิวิวทานอยด์ (phenylbutanoids)

ในแต่ละชุดการทดลอง ทำการสุ่มชิ้นโพลสดที่ผ่านการตัดแต่งจำนวน 20 ชิ้นประมาณ 20 กรัม แล้วไปวิเคราะห์ปริมาณของเคอร์คูมินและชนิดของฟีนีลิวิวทานอยด์ โดยการเตรียมสารสกัดโพลตามวิธีของ กองพัฒนายาแผนไทยและสมุนไพร (2559) นำตัวอย่างชิ้นโพลสดที่ผ่านการตัดแต่งบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง แบ่งชั่งตัวอย่างโพลสดที่ผ่านการบดจำนวน 3 กรัม ใส่ในขวดสีชา ขนาด 10 มิลลิลิตร เติมสารละลายเมทานอลบริสุทธิ์ (absolute methanol) ปริมาตร 7 มิลลิลิตร สกัดโดยวิธี sonication ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่มีความถี่ 45 kHz เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิในอ่างอัลตราโซนิก 30 ± 1 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนถ่ายน้ำด้วยน้ำเย็นกรองสารสกัดด้วยกระดาษกรอง Whatman no. 4 นำส่วนของโพลที่สกัดแล้วมาทำการสกัดซ้ำอีก 2 ครั้งเช่นเดียวกับการสกัดครั้งแรก และปรับปริมาตรสุดท้ายของสารสกัดให้ได้ 25 มิลลิลิตรด้วยสารละลายเมทานอลบริสุทธิ์ จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ผ่านการกรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร บรรจุสารสกัดที่ผ่านการกรองใส่ขวดสีชา ทำการสกัด 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมินและสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงที่มีประเภทของเครื่องตรวจจับ (detector) แบบ photodiode array ใช้คอลัมน์ C18 ในการแยกสารและควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ที่ 25 องศาเซลเซียส โดยปริมาตรของสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าเครื่อง HPLC 10 ไมโครลิตร ใช้ระบบการชะแบบคงที่ตลอดการวิเคราะห์ (isocratic) ซึ่งสัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่สารละลายอะซิโตไนโตรล์บริสุทธิ์ (absolute acetonitrile) ต่อสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 (57:43) ใช้อัตราการไหลที่ 1.0 มิลลิลิตรต่อวินาที ติดตามปริมาณสารเคอร์คูมินที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร และติดตามกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

การวิเคราะห์เพื่อคำนวณปริมาณสารเคอร์คูมินของตัวอย่างโพลโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเคอร์คูมิน ที่ได้จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินในเมทานอลบริสุทธิ์ ให้มีความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินให้มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน 6 ระดับได้แก่ 5, 10, 20, 50, 100, 150 และ 300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร หลังจากนั้นนำสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ไปฉีดเข้าระบบ HPLC แล้วจะได้พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานที่แต่ละความเข้มข้น นำข้อมูลที่ได้สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างพื้นที่ใต้พีคกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) จากนั้นหาปริมาณสารเคอร์คูมินของตัวอย่างโพล โดยนำพื้นที่ใต้พีคที่ได้ของตัวอย่างโพลที่ได้ไปแทนค่าในสมการของกราฟมาตรฐานเคอร์คูมิน และรายงานเป็นมิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

ยืนยันชนิดของสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ โดยนำสารสกัดที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่องลิวคโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรีโดยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ที่มีส่วนแยกมวล (mass analyzer) เป็นแบบ Triple Quadrupole ทำการแยกสารในกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์โดยใช้คอลัมน์ C18 เป็นระบบการชะแบบคงที่ตลอดการวิเคราะห์ ซึ่งสัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่สารละลายอะซิโตไนโตรล์บริสุทธิ์ (absolute acetonitrile) ต่อสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 (57:43) มีอัตราการไหล 0.4 มิลลิลิตรต่อวินาที โดยการตรวจจับค่ามวลต่อประจุ (m/z) ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดประจุบวกแบบเล็กไอออนสเปร์รี่ (ESI+) ตรวจจับสารในกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

3.4.2.1.6 ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหย

ทำการสกัดน้ำมันหอมระเหยโดยการกลั่นด้วยไอน้ำ ซึ่งตัวอย่างชิ้นโพลสดที่ผ่านการตัดแต่งที่บดละเอียดและชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการบด 50 กรัม เติมน้ำกลั่น 1 ลิตร ในขวดก้นกลมต่อเครื่องกลั่นไอน้ำแสดงดังภาพที่ 16 ใช้อุณหภูมิในการกลั่น 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3

ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำมันหอมระเหยและบันทึกปริมาณน้ำมันหอมระเหย คำนวณปริมาณน้ำมันหอมระเหยโดยรายงานค่าเป็นร้อยละปริมาณน้ำมันหอมระเหยต่อน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) จากนั้นบรรจุน้ำมันหอมระเหยในขวดสีชาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหย



ภาพที่ 16 เครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหย

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย (volatile compounds) ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีเครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิด flame ionization (FID) โดยใช้คอลัมน์ DB-5MS capillary ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร หนา 0.25 ไมโครเมตร (ดัดแปลงจาก (Bua-in และ Paisooksantivatana, 2009) นำน้ำมันหอมระเหยโพลที่สกัดได้ละลายในเฮกเซนในอัตราส่วน 1:10 (v/v) และฉีดสารละลายน้ำมันหอมระเหยโพลในเฮกเซนบริสุทธิ์เข้าเครื่อง GC โดยมีปริมาตรฉีดเข้าเครื่องที่ 1 ไมโครลิตร และอัตราการฉีดแบบปล่อยทิ้งบางส่วน (split ratio) เท่ากับ 1:100 สภาวะของการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิที่ใช้ประกอบไปด้วยอุณหภูมิของส่วนการฉีดสาร 240 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของคอลัมน์เริ่มต้นจาก 50 องศาเซลเซียส (คงที่เป็นเวลา 2 นาที) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของคอลัมน์ด้วยอัตรา 4 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส (คงที่เป็นเวลา 5 นาที) ก๊าซพาเป็นก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 1.2 มิลลิตรต่อนาที การพิสูจน์เอกลักษณ์องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวหรือสารมาตรฐานอัลเคนที่ใช้ที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 7 ถึง 40 อะตอม

(C7-C40) การฉีดสารมาตรฐานใช้สภาวะการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิที่ใช้เดียวกับการฉีดน้ำมันหอมระเหยไหลในสารละลายเฮกเซนบริสุทธิ์ หลังจากนั้นคำนวณค่า retention index จากค่า retention time ขององค์ประกอบทางเคมีที่พบในน้ำมันหอมระเหยไหลและค่า retention time ของสารมาตรฐานอัลเคน C7-C40 จากสมการต่อไปนี้

$$\text{retention index} = \frac{100n+100(t_x-t_n)}{(t_{n+1} - t_n)}$$

- X = สารที่สนใจ
n = จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาก่อนสารที่สนใจ
n+1 = จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาหลังสารที่สนใจ
t = เวลาที่สารแยกออกมา (ในหน่วยนาทีหรือวินาที)

และทำการเปรียบเทียบค่า retention index ที่คำนวณได้จากสารมาตรฐานกับค่า retention index ในเอกสารอ้างอิง Adams (2017) และงานวิจัยของ Verma และคณะ (2018) ดังภาคผนวก ก แสดงเป็นปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยในรูปร้อยละของพื้นที่ใต้พีคสัมพัทธ์ (% Relative Peak Area)

$$\text{ร้อยละของพื้นที่ใต้พีคสัมพัทธ์} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคของสารที่วิเคราะห์}}{\text{พื้นที่ใต้พีคทั้งหมดของสารที่วิเคราะห์}} \times 100$$

3.4.2.1.7 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

วิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไหลสดที่ผ่านการตัดแต่งด้วยวิธี DPPH Assay (ดัดแปลงจาก Brand –Williams และคณะ, 1994) และ ABTS assay (ดัดแปลงจาก Re และคณะ, 1999) การเตรียมสารสกัดไหล โดยนำไหลสดที่ผ่านการตัดแต่งบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง แบ่งชั่งตัวอย่างไหลสดที่ผ่านการบดจำนวน 3 กรัม ใส่ในขวดสีชาขนาด 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 7 มิลลิลิตร แล้วนำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิก ที่มีความถี่ 45 kHz เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิในอ่างที่ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman no. 4 นำส่วนของไหลที่สกัดแล้วมาทำการสกัดซ้ำ 2 ครั้งเช่นเดียวกับการสกัดครั้งแรก และปรับปริมาตรสุดท้ายของสารสกัดให้ได้ 25 มิลลิลิตร (ดัดแปลงจาก Wojdyla และคณะ, 2007) ทำการสกัด 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์

ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay และวิธี ABTS Radical cation decolouration Assay ดังนี้

วิธี DPPH Radical Scavenging Assay

ทำการปิเปตสารสกัดโพลีมา 0.1 มิลลิลิตร ทำการเกิดปฏิกิริยากับ 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ที่มีความเข้มข้น 6×10^{-5} โมลาร์ ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันได้ดี ตั้งทิ้งไว้ในที่มีมืดเป็นเวลา 100 นาที นำสารสกัดโพลีมาที่ทำปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/Vis สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยสารละลายแบบลบล้าง (blank) คือสารละลายเมทานอลบริสุทธิ์ และสารละลายควบคุม (control) คือสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรผสมกับ DPPH ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง วิเคราะห์หาความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยใช้ สารมาตรฐาน Trolox ความเข้มข้น 25, 50, 100, 150, 200 และ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดโพลีมาไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชัน และรายงานเป็นไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อกรัมตัวอย่างแห้งแสดงดังภาคผนวก ข

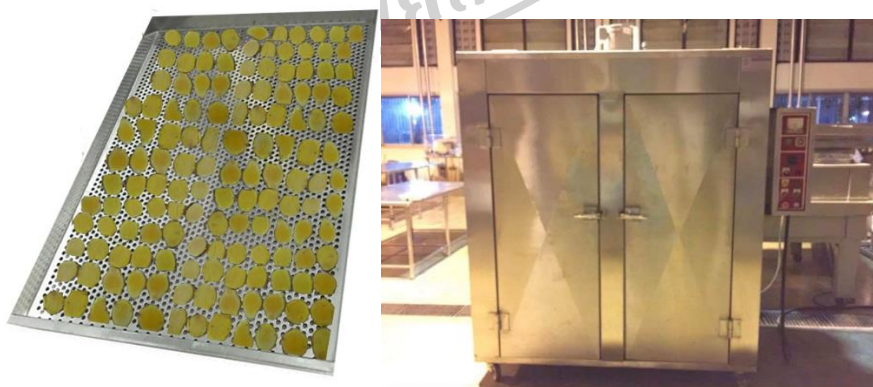
วิธี ABTS Radical Cation Decolouration Assay

ทำการเตรียมสารละลาย 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) ที่มีความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโปแตสเซียมเปอร์ซัลไฟต์ความเข้มข้น 2.6 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มีมืดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเจือจางสารละลาย ABTS reagent ด้วยสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 นำไปวัดด้วยเครื่อง UV/Vis สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ให้สารละลาย ABTS reagent มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 1.100 ± 0.020 หลังจากนั้นปิเปตสารสกัดโพลีมาปริมาตร 0.15 มิลลิลิตร ทำการเกิดปฏิกิริยาโดยผสม ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันได้ดี ตั้งทิ้งไว้ในที่มีมืดเป็นเวลา 120 นาที แล้วนำสารสกัดโพลีมาที่ทำปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยสารละลายแบบลบล้าง (blank) คือ สารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 และสารละลายควบคุม (control) คือ สารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตรผสมกับ ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตรทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง วิเคราะห์หาความสามารถในการต้านออกซิเดชันโดยใช้ สารมาตรฐาน Trolox ความเข้มข้น 20, 40, 60, 80, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบสารสกัดโพลีมา

เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการต้านออกซิเดชัน และรายงานเป็น ไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อกรัมตัวอย่างแห้งแสดงดังภาคผนวก ข

3.4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อ จลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง (drying temperature) ด้วยวิธีการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งไพลที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างดังข้อที่ 3.4.1 ที่มีขนาดความหนา 0.5 เซนติเมตร ทำการศึกษาที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน 5 ระดับได้แก่ อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทำการชั่งน้ำหนักตะแกรงเปล่า แล้วนำขึ้นไพลที่ผ่านการตัดแต่งวางเรียงให้เป็นชั้นเดียว (single layer) บนตะแกรงขนาด 53.3x73.3 เซนติเมตร (ภาพที่ 17) เรียงขึ้นไพลน้ำหนัก 200 กรัมต่อตะแกรง จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักตะแกรงรวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทำแห้ง แล้วนำไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบภาคต่อที่อุณหภูมิต่างๆ ทำการชั่งน้ำหนักในระหว่างการทำแห้งทุกๆ 15 นาที นับจากเวลาเริ่มต้นจำนวน 4 ครั้ง จากนั้นชั่งน้ำหนักทุกๆ 30 นาที จำนวน 4 ครั้ง และหลังจากนั้นชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักตัวอย่างจะคงที่ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างไพลก่อนและภายหลังการทำแห้ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมการทำแห้ง โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (ฐานแห้ง) กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง (กิโลกรัม น้ำหนักน้ำ/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง·ชั่วโมง) กับปริมาณความชื้น (กิโลกรัม น้ำหนักน้ำ/กิโลกรัม น้ำหนักแห้ง) และศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งไพลที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการนิวตัน (Newton) เพจ (Page) และโมดิฟายด์เพจ (Modified Page) แสดงดังตารางที่ 11



ภาพที่ 17 การเรียงขึ้นไพลสดสำหรับการทำแห้งและเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อ

ตารางที่ 11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งไพล

ชื่อแบบจำลอง	แบบจำลอง	อ้างอิง
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Ayensu (1997)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Diamante และ Munro (1993)
Modified page	$MR = \exp(-(kt)^n)$	White และคณะ (1981)

3.4.4 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อ คุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพล

ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคต่อคุณภาพของไพลนั้น นำชิ้นไพลที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างดังข้อที่ 3.4.1 ที่มีขนาดความหนา 0.5 เซนติเมตร วางเรียงให้เป็นชั้นเดียว (single layer) บนตะแกรงขนาด 53.3x73.3 เซนติเมตร จากนั้นนำไปทำแห้งในตู้อบลมร้อนแบบภาคต่ออุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทำแห้งจนกระทั่งไพลมีปริมาณความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 (สถาบันวิจัยสมุนไพร, 2557) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ จากนั้นนำไพลที่ผ่านการทำแห้งไปวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าสี ปริมาณเคอร์คูมิน ชนิดสารกลุ่มฟีนอลิกบิวทานอยด์ ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีน้ำมันหอมระเหย และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ตามรายละเอียดในข้อ 3.4.2 โดยน้ำหนักสำหรับการสกัดตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเคอร์คูมิน ชนิดสารกลุ่มฟีนอลิกบิวทานอยด์และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ในแต่ละชุดการทดลองทำการสุ่มชิ้นไพลสดที่ผ่านการทำแห้งประมาณ 15 กรัม บดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง แบ่งซั่งตัวอย่างไพลอบแห้งที่ผ่านการบดจำนวน 1 กรัม แล้วใส่ในขวดสีชา ขนาด 10 มิลลิลิตร อัตราส่วนของตัวทำละลายและการสกัดเป็นเช่นเดียวกับไพลสดที่ผ่านการตัดแต่ง และในการสกัดน้ำมันหอมระเหยซั่งตัวอย่างชิ้นไพลที่ผ่านการทำแห้งที่บดละเอียด 30 กรัม เติมน้ำกลั่น 1 ลิตรในขวดก้นกลมต่อเครื่องกลั่นไอน้ำ ใช้อุณหภูมิและเวลาในการกลั่นเป็นเช่นเดียวกับไพลสดที่ผ่านการตัดแต่ง

3.4.5 การศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือน กระจกต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล

สำหรับการศึกษาการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับตากแดดต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล ทำการซั่งน้ำหนักตะแกรงเปล่า แล้วนำชิ้นไพลที่ผ่านการตัดแต่งตามข้อ 3.4.1 ที่มีขนาดความหนา 0.5 เซนติเมตร วางเรียงให้เป็นชั้นเดียวบนตะแกรงขนาด 25x25 เซนติเมตร เรียงชิ้นไพลน้ำหนัก 70 กรัมต่อตะแกรงแสดงดังภาพที่ 18

จากนั้นทำการซังน้ำหนักระดมกับน้ำหนัสด้อย่างก่อนการทำแห้ง แล้วทำการอบแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับการตากแดดแสดงดังภาพที่ 19 โดยเริ่มการทำแห้งตั้งแต่เวลา 08.00 น. ทำการซังน้ำหนักในระหว่างการทำแห้งทุกๆ 15 นาที นับจากเวลาเริ่มต้นจำนวน 4 ครั้ง จากนั้นซังน้ำหนักทุกๆ 30 นาที จำนวน 4 ครั้ง และหลังจากนั้นซังน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ในระหว่างการทดลองบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มรังสีอาทิตย์ภายในและภายนอกเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเข้มรังสีอาทิตย์ จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างไพลก่อนและภายหลังการทำแห้ง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์พฤติกรรมการทำแห้ง โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (ฐานแห้ง) กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้ง (กิโลกรัม/น้ำหนักรับ/กิโลกรัม/น้ำหนักแห้ง-ชั่วโมง) กับเวลาที่ใช้ในการทำแห้ง



ภาพที่ 18 ลักษณะการเรียงชั้นไพลบนถาดสำหรับการทำแห้งให้เป็นชั้นเดียว



ภาพที่ 19 การทำแห้งไพลด้วยด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับการตากแดด

3.4.6 การศึกษาอิทธิพลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพล

ในการศึกษาการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับตากแดดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพล นำชิ้นไพลที่ผ่านการตัดแต่งตามข้อ 3.4.1 ทำแห้งโดยเรียงให้เป็นชั้นเดียวกันบนตะแกรงขนาด 90x100 เซนติเมตร แล้วนำไพลทำการอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดแสดงดังภาพที่ 14 โดยเริ่มการทำแห้งตั้งแต่เวลา 08.00 น. จนกระทั่งไพลมีปริมาณความชื้นสุดท้ายร้อยละ 10 (สถาบันวิจัยสมุนไพร, 2557) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ จากนั้นนำไพลที่ผ่านการทำแห้งไปวิเคราะห์ค่าทางกายภาพและเคมีได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าวอเตอร์แอกติวิตี ค่าสี ปริมาณเคอร์คูมิน ชนิดสารกลุ่มฟีนอลิกชนิดฟีนอลิก ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีน้ำมันหอมระเหย และความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ตามรายละเอียดในข้อ 3.4.2 โดยน้ำหนักสำหรับการสกัดตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเคอร์คูมิน ชนิดสารกลุ่มฟีนอลิกชนิดฟีนอลิกและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ในแต่ละชุดการทดลอง ทำการสุ่มชิ้นไพลสดที่ผ่านการทำแห้งประมาณ 15 กรัม บดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดของแห้ง แบ่งซึ่งตัวอย่างไพลอบแห้งที่ผ่านการบดจำนวน 1 กรัม แล้วใส่ในขวดสีชา ขนาด 10 มิลลิลิตร อัตราส่วนของตัวทำละลายและการสกัดเป็นเช่นเดียวกับไพลสดที่ผ่านการตัดแต่ง และในการสกัดน้ำมันหอมระเหยซึ่งตัวอย่างชิ้นไพลที่ผ่านการทำแห้งที่บดละเอียด 30 กรัม เติมน้ำกลั่น 1 ลิตรในขวดกั้นกลมต่อเครื่องกลั่นไอน้ำ ใช้อุณหภูมิและเวลาในการกลั่นเป็นเช่นเดียวกับไพลสดที่ผ่านการตัดแต่ง

3.4.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การศึกษาอิทธิพลของสภาวะการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาด และระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) วางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design; RCBD ซึ่งใช้ไพล 2 ซ้ำ เป็น block เนื่องจากความแตกต่างของช่วงเวลาระหว่างชื่อจนกระทั่งนำมาทดลองทำแห้งและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$)

ทำการเปรียบเทียบอัตราการทำแห้งของไพล แต่ละชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งใช้ไพล 2 ซ้ำ เป็น block และค่าเฉลี่ย Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$)

สำหรับการเปรียบเทียบคุณภาพทางกายภาพและเคมีของไพลภายหลังการทำแห้ง ได้แก่ ค่าสี ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคอร์คูมิน ปริมาณสารกลุ่มฟีนอลิกในวุ้น ร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีน้ำมันหอมระเหย และร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชั่น โดยการวิเคราะห์ ANOVA ซึ่งใช้ไพลจำนวน 2 ซ้ำ เป็น block และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p=0.05$) เนื่องจากความแตกต่างของช่วงเวลาในการเก็บรักษา

ในการวิเคราะห์ ANOVA และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 18.0



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไพลก่อนการทำแห้ง

ลักษณะทางกายภาพและเคมีของไพล จำนวน 2 รุ่นที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 12 ซึ่งแห้งไพลที่ซื้อมาทั้ง 2 รุ่น มีขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับค่าสีไพลมีค่า L^* ในช่วง 60.08-63.70 และค่า b^* อยู่ในช่วง 62.07-64.27 และค่า Hue angle ประมาณ 80° ซึ่งมีมุมใกล้เคียง 90° แสดงถึงสีเหลือง ซึ่งผลค่าสีเป็นไปในทิศทางเดียวกับบุญนากและคณะ 2011 ที่รายงานว่าไพลมีสีเหลืองโดยมีค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 62.02 ± 0.60 , 7.78 ± 0.07 และ 55.71 ± 1.52 ตามลำดับ

ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีในไพลจำนวน 2 รุ่นมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยไพลที่เก็บเกี่ยวในเดือนตุลาคม 2560 (รุ่นที่ 1) มีปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคทิวิตีมากกว่าไพลที่เก็บเกี่ยวในเดือนมิถุนายน 2561

สำหรับปริมาณเคอร์คูมินที่พบในไพลทำการวัดเฉพาะรุ่นที่ 2 พบว่าไพลมีปริมาณเคอร์คูมิน 3.67 ± 0.12 กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) ซึ่งปริมาณที่ได้มีค่ามากกว่าการศึกษาของ Paramapojn และคณะ (2009) ที่รายงานปริมาณของเคอร์คูมินในไพลที่มาจากจังหวัดต่างๆ ในประเทศไทยมีค่าร้อยละ 0.066-0.265 กรัมต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) ซึ่งแหล่งเพาะปลูกมีผลต่อปริมาณเคอร์คูมินในไพล นอกจากนี้ Kantayos และ Paisooksantivatana (2012) รายงานว่าไพลมีปริมาณเคอร์คูมินสูงสุดที่ร้อยละ 2.63 กรัมต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) ซึ่งมีอายุการเก็บเกี่ยว 10 เดือนค่าที่ได้จึงมีปริมาณน้อยกว่า

ปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพลที่ศึกษานี้มีค่าร้อยละ 10.33 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) หรือ 2.57 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัวอย่างสด โดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ (Department of Medical Sciences, 2009) ได้กำหนดไพลที่ใช้สำหรับทำยาต้องมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยไม่น้อยกว่าร้อยละ 2.0 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัวอย่างสด ซึ่งไพลที่นำมาใช้ในการศึกษาคั้งนี้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

เมื่อพิจารณาความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในไพลด้วยวิธี DPPH พบว่ามีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในไพลเท่ากับ 77.64 ไมโครโมล Trolox ต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับพืชในสกุลเดียวกันพบว่าแห้งไพลสดมีความสามารถในการ

การเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าเหง้าขมิ้นชัน (0.96 กรัม Trolox ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง)) และขิง (0.74 กรัม Trolox ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง)) (Fernandes และคณะ, 2016) และเมื่อตรวจวัดความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในโพลด้วยวิธี ABTS มีปริมาณ 176.59 ไมโครโมล trolox ต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) หรือคิดเป็น 1.85 กรัม trolox ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) โดยมีปริมาณความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าขิง พริกไทยขาว โป๊ยกั๊ก ผักชี มีค่าเท่ากับ 39.4, 43.1, 61.6 และ 73.7 ไมโครโมล Trolox ต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง) ตามลำดับ (Przygodzka และคณะ, 2014)

ตารางที่ 12 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเหง้าโพลสดที่ใช้ศึกษา

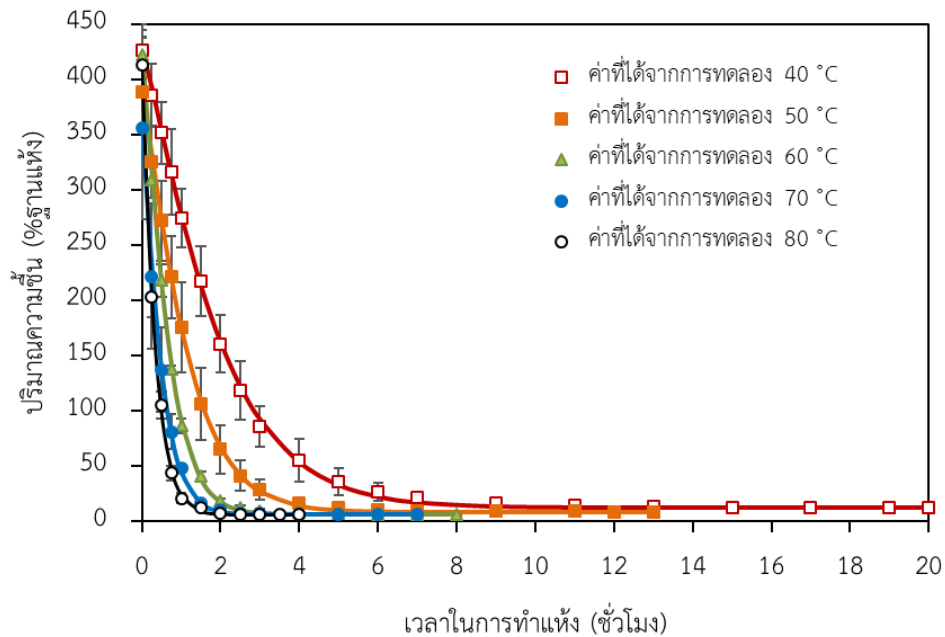
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี	ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	โพลที่ซื้อรุ่นที่ 1	โพลที่ซื้อรุ่นที่ 2
ขนาดของเหง้าโพล		
ความกว้าง ^{ns} (เซนติเมตร)	7.09±0.66	7.52±1.11
ความยาว ^{ns} (เซนติเมตร)	12.77±1.90	12.25±1.66
เส้นผ่านศูนย์กลาง ^{ns} (เซนติเมตร)	4.05±0.43	3.77±0.61
สี		
L* (ความสว่าง)	-	63.36±2.14
a* (+ สีแดง)	-	10.20±1.04
b* (+ สีเหลือง)	-	64.26±3.07
Chroma	-	65.07±3.14
Hue	-	80.98±0.69
ปริมาณความชื้น (% ฐานเปียก)	82.19±1.20 ^a	77.64±0.79 ^b
ค่าวอเตอร์แอกติวิตี	0.997±0.001 ^a	0.994±0.001 ^b
ปริมาณเคอร์คูมิน (กรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง))	-	3.67±0.12
ปริมาณน้ำมันหอมระเหย (%v/w)	-	10.33±0.40
ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน		
- วิธี DPPH assay (ไมโครโมล Trolox ต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง)) -	-	77.64±0.79
- วิธี ABTS assay (ไมโครโมล Trolox ต่อกรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง)) -	-	176.59±3.47

^a และ ^b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบกดต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล

อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้นของขึ้นไพลในระหว่างการทำแห้ง โดยการทำให้ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากไพลได้เร็วกว่าการทำให้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีความแตกต่างกันมากระหว่างอุณหภูมิที่ผิวหน้าของขึ้นไพลและอุณหภูมิของลมร้อน จึงเกิดการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แสดงดังภาพที่ 20 การลดลงของปริมาณความชื้นของไพลลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำแห้ง และจะค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงท้ายของการทำแห้ง ในสภาวะการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็ว เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 2 ชั่วโมงแรกของการทำแห้ง ทั้งนี้การทำแห้งไพลจากปริมาณความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วงร้อยละ 78.74-80.91 จนกระทั่งปริมาณความชื้นเข้าสู่สมดุล พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสใช้ระยะเวลาการทำแห้งจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่หรือปริมาณความชื้นเข้าสู่สมดุลน้อยกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลาในการทำแห้งลดลงเกือบ 4 เท่า โดยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีการลดลงของความชื้นจนเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง ในการทำแห้งอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสใช้เวลาประมาณ 7-8 ชั่วโมง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Murthy และ Manohar (2014) ซึ่งทำการอบแห้งขมิ้นขาวป่า (*Curcuma amada*) ด้วยอุณหภูมิต่างกัน 4 ระดับ คือ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าเวลาการทำแห้งลดลงเมื่อที่อุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้นโดยเวลาการทำแห้งลดลงประมาณ 2.6 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40-70 องศาเซลเซียส

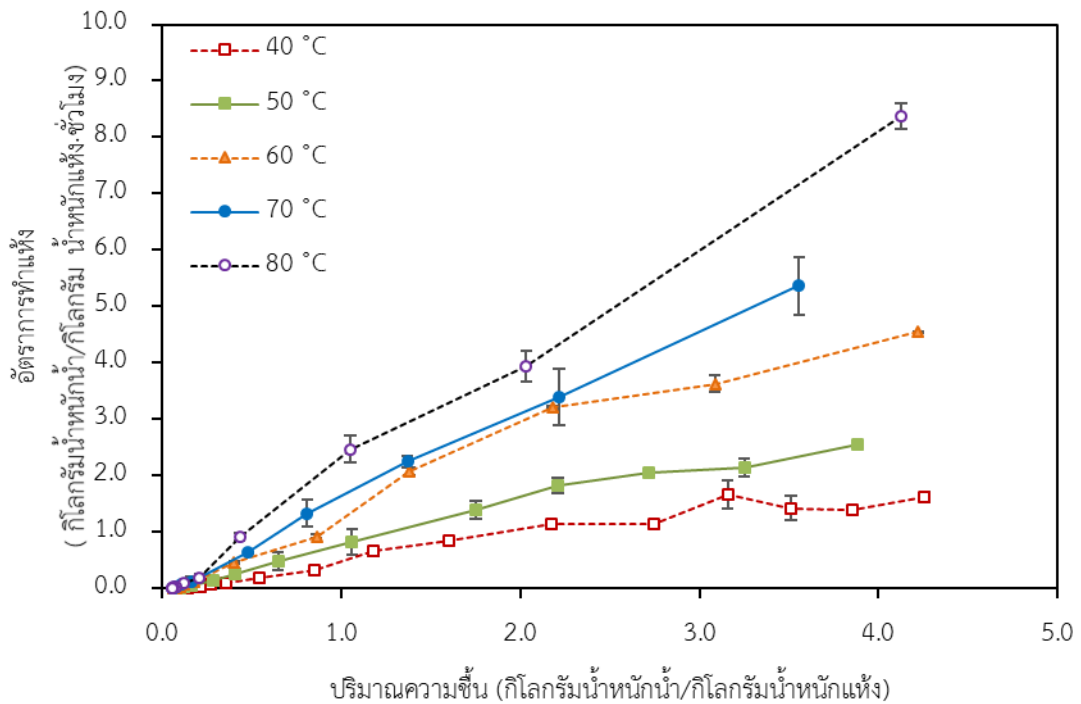


ภาพที่ 20 กราฟการทำแห้งของไพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (เส้นกราฟได้จากสมการ Page)

ภาพที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำแห้งของไพลที่อบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ โดย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งที่สูงทำให้อัตราการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอากาศมีค่า ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำทำให้ผลต่างระหว่าง ของความดันไอที่บริเวณชั้นไพลกับความดันไอในอากาศมีค่าสูงจึงเกิดการถ่ายเทมวลของน้ำจากชั้น ไพลไปยังอากาศได้ดีขึ้น (Brennan และคณะ, 1990) และอุณหภูมิของการทำแห้งสูง น้ำภายในชั้น ไพลได้รับพลังงานความร้อนจากลมร้อนมากทำให้โมเลกุลของน้ำมีพลังงานจลน์สูงพอเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำได้ ส่งผลให้น้ำระเหยเป็นไอน้ำออกจากชั้นไพลได้เร็วขึ้น (วิไล, 2554)

อัตราการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะเห็นช่วงอัตราการทำแห้งคงที่ (constant rate period) ในช่วงเริ่มต้นของการทำแห้ง เนื่องจากอัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้า (evaporation) และอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในมาที่ผิวหน้า (diffusion) เกิดได้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อระยะเวลา ในการทำแห้งนานขึ้น อัตราการทำแห้งจะลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากมีปริมาณความชื้นในไพลเหลือน้อยลง น้ำภายในชั้นตัวอย่างเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวหน้าช้ากว่าการระเหยน้ำที่ผิวหน้าทำให้เกิดอัตรา การทำแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง (falling rate period) ในขณะที่อัตราการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียสพบเฉพาะอัตราการทำแห้งลดลง (falling rate period) โดยอัตราการทำ แห้งลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและจะค่อยลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงท้ายของการทำแห้ง เนื่องจาก

เป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวหน้าของชั้นโพลได้อย่างรวดเร็ว และให้อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในชั้นโพลมายังผิวหน้าเกิดได้ต่ำกว่าอัตราการระเหยน้ำที่ผิวหน้าไปยังอากาศโดยรอบ



ภาพที่ 21 อัตราการทำแห้งของโพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยการทดลองทั้งสองซ้ำ

นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์หาสมการทำแห้งชั้นบาง (thin layer) ที่เหมาะสมในการทำนายจลนพลศาสตร์การทำแห้งโพล โดยการนำค่าอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์หรือค่าคงที่ของสมการทำแห้งชั้นบางโดยใช้ สมการนิวตัน (Newton) เพจ (Page) และ โมดิฟายด์เพจ (Modified Page) (Ayensu (1997), Diamante และ Munro (1993), White และคณะ, (1981)) โดยค่าทางสถิติที่ได้จากการสร้างสมการทำแห้งโพลแบบชั้นบางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังตารางที่ 13 เมื่อพิจารณาแล้วค่าคงที่การทำแห้ง หรือค่า k มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำแห้งสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงว่าอุณหภูมิการทำแห้งสูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการระเหยน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ค่า k สามารถอธิบายระยะเวลาในการทำแห้ง โดยที่ค่า k มากแสดงถึงการใช้เวลาในการทำแห้งน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการทำแห้งโพลจนกระทั่งน้ำหนักของชั้นโพลคงที่ พบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด โดยใช้เวลา 4 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ใช้เวลาในการทำแห้งนานที่สุด จะใช้เวลาในการทำแห้ง 20 ชั่วโมง (ตารางที่ 13)

สมการการทำแห้งโพลีที่เลือกมาทำนายลักษณะการทำแห้งของโพลีได้เหมาะสม จะพิจารณาจากสมการที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) สูงที่สุด และค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (root mean square error, RMSE) ต่ำที่สุด ซึ่งค่า RMSE ได้จากการคำนวณค่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลองกับอัตราส่วนความชื้นที่ประมาณได้จากสมการทำแห้งชั้นบาง (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ก) จากตารางที่ 13 พบว่าสมการ Page มีความเหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งของโพลีได้ดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในช่วง 0.9994-0.9999 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากสมการของ Newton และสมการ Modified Page และมีค่า RMSE ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการ Newton สมการ Page และสมการ Modified Page เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังภาพที่ 22



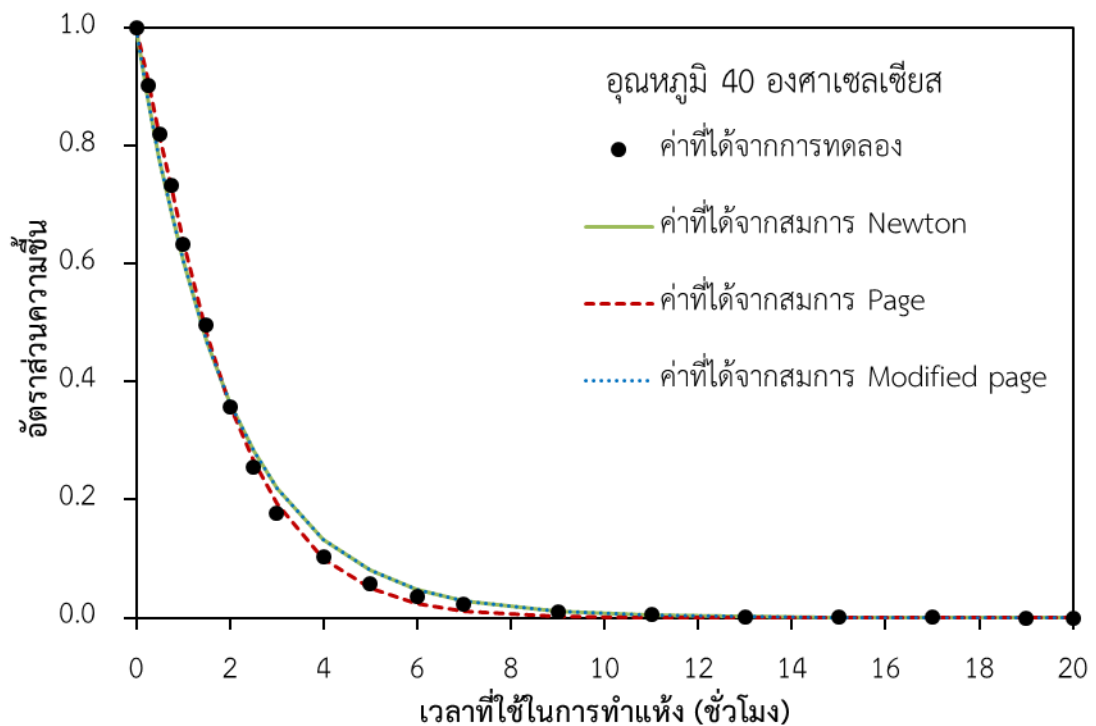
ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติที่ได้จากการสร้างสมการทำแห้งไปพลแบบชั้นบางด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำแห้ง* (ชั่วโมง)	สมการนิวตัน				สมการเพจ				สมการโมดิฟายด์เพจ			
		k (h ⁻¹)	R ²	RMSE	k (h ⁻¹)	n ^{ns}	R ²	RMSE	k (h ⁻¹)	n	R ²	RMSE	
40	20	0.5084 ^e	0.9952	0.0113	0.4551 ^e	1.1807	0.9994	0.0015	0.0966 ^e	5.2636 ^c	0.9952	0.0113	
50	13	0.8669 ^d	0.9956	0.0078	0.8468 ^d	1.1774	0.9997	0.0006	0.1567 ^d	5.5213 ^{bc}	0.9956	0.0078	
60	8	1.5020 ^c	0.9956	0.0060	1.5978 ^c	1.1880	0.9994	0.0008	0.2462 ^c	6.0943 ^{ab}	0.9956	0.0060	
70	7	2.0558 ^b	0.9976	0.0029	2.2242 ^b	1.1375	0.9999	0.0001	0.3252 ^b	6.3228 ^a	0.9976	0.0029	
80	4	2.9412 ^a	0.9992	0.0008	3.0887 ^a	1.0596	0.9995	0.0005	0.4365 ^a	6.7464 ^a	0.9992	0.0008	

a, b และ c หมายความว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

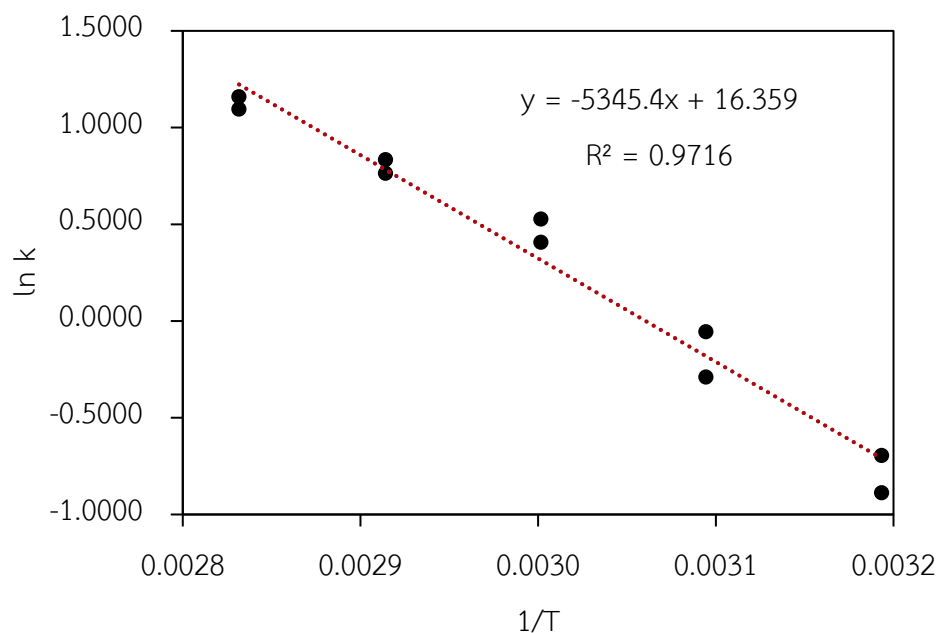
ns หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

*เวลาที่ใช้ในการทำแห้งจนกระทั่งน้ำหนักไปพลมีค่าคงที่



ภาพที่ 22 ตัวอย่างค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของโพลีเมอร์แห้งกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ Newton สมการ Page และสมการ Modified Page

จากภาพที่ 22 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ Page สามารถใช้ในการทำนายพฤติกรรมในการทำแห้งโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสได้เหมาะสมที่สุด สอดคล้องกับผลการศึกษาที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก ค) เมื่อคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ตามสมการอาร์เรเนียส โดยสมการจะอยู่ในรูปแบบเส้นตรง $\ln k = \ln k_0 - (E_a/RT)$ เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln k$ ที่ทุกอุณหภูมิที่ทำการทดลองเทียบกับ $1/T$ (หน่วยเคลวิน) ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงภาพที่ 23 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของมีค่าเท่ากับ 45.19 kJ/mol



ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ k ของการทำแห้งไฟลที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการ Page

4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบกดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไฟล

4.3.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

อุณหภูมิในการทำแห้งไฟลมีผลต่อเวลาในการทำแห้ง ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การทำแห้งในแต่ละสภาวะจะสามารถลดปริมาณความชื้นให้มีค่าร้อยละ 10 (สถาบันวิจัยสมุนไพร, 2557) และมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงปลอดภัยต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในระหว่างการเก็บรักษา (ตารางที่ 14) โดยเวลาที่ใช้ทำแห้งไฟลจนกระทั่งมีปริมาณความชื้นร้อยละ 10 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการทำแห้งเพิ่มขึ้นจะช่วยลดระยะเวลาในการทำแห้งไฟลลดลง โดยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสใช้ระยะเวลาการทำแห้งน้อยที่สุด โดยใช้เวลาในการทำแห้ง 1 ชั่วโมง 30 นาที และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสใช้ระยะเวลาการทำแห้งมากที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการทำแห้ง 15 ชั่วโมง

ตารางที่ 14 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของไพลที่ทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (%)		ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้	
		ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง
40	15	80.13±2.07 ^A	10.67±0.21 ^{Ba}	0.998±0.000 ^A	0.499±0.011 ^{Ba}
50	5	80.75±3.39 ^A	9.53±0.30 ^{Bb}	0.996±0.003 ^A	0.393±0.005 ^{Bb}
60	3	79.79±1.94 ^A	10.55±0.26 ^{Ba}	0.997±0.000 ^A	0.412±0.004 ^{Bb}
70	2	83.41±1.38 ^A	10.33±0.16 ^{Ba}	0.998±0.002 ^A	0.416±0.019 ^{Bb}
80	1.5	79.75±0.81 ^A	9.44±0.11 ^{Bb}	0.995±0.005 ^A	0.391±0.001 ^{Bb}

a, b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

A และ B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.3.2 ลักษณะปรากฏและค่าสี

ลักษณะปรากฏของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 15 พบว่าไพลที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสมีลักษณะสีคล้ำปรากฏขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการทำแห้งไพลที่อุณหภูมิต่ำใช้ระยะเวลาานาน ดังนั้นผลิตภัณฑ์มีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง (enzymatic browning reaction) ได้แก่ เอนไซม์พอลิฟีนอลออกซิเดส (polyphenol oxidase, PPO) โดยเอนไซม์ดังกล่าวทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส (Queiroz และคณะ, 2008) ในขณะที่การทำแห้งไพลที่อุณหภูมิ 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงสีเหลืองน้อยกว่าที่อุณหภูมิกการทำแห้งอื่นๆ เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ด้านสีของไพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าค่าพารามิเตอร์ด้านสีทุกค่าของไพลที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 16) และเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของสีทั้งหมดระหว่างไพลก่อนและหลังการทำแห้ง (ΔE) พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า ΔE ($p > 0.05$) (ภาพที่ 24)

ตารางที่ 15 ลักษณะปรากฏของไฟลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิต่างๆ

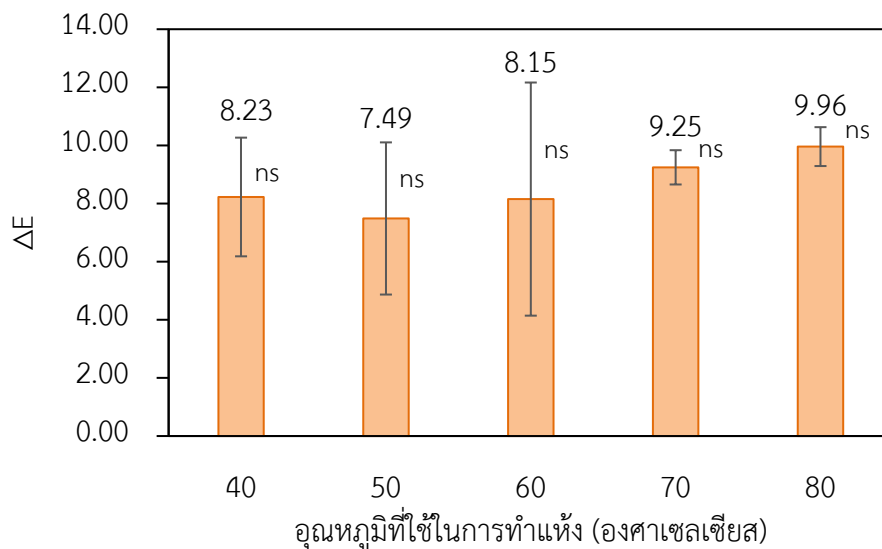
ตัวอย่างไฟล	40 องศาเซลเซียส	50 องศาเซลเซียส	60 องศาเซลเซียส	70 องศาเซลเซียส	80 องศาเซลเซียส
ก่อนทำแห้ง					
หลังทำแห้ง					

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์คุณภาพด้านสีของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาตที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	L*			a*			b*			Chroma			hue	
	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}
40	62.75±2.73	64.89±3.69	8.44±1.76	8.00±0.06	62.74±3.01	57.75±2.97	63.34±3.19	58.36±2.97	82.40±1.21	82.06±0.34	63.34±3.19	58.36±2.97	82.40±1.21	82.06±0.34
50	63.85±1.29	64.75±0.44	8.32±0.12	7.60±0.48	63.67±2.64 ^A	57.88±2.88 ^B	64.24±2.61 ^A	58.40±2.93 ^B	82.56±0.43	82.49±0.12	64.24±2.61 ^A	58.40±2.93 ^B	82.56±0.43	82.49±0.12
60	62.29±1.20	61.58±0.88	7.38±1.21	7.94±0.45	61.01±0.94	55.07±0.48	61.49±1.09	55.65±0.54	83.13±1.00	81.84±0.30	61.49±1.09	55.65±0.54	83.13±1.00	81.84±0.30
70	62.29±0.08	61.68±0.93	8.37±1.35	7.70±0.48	62.78±1.36	55.39±0.54	63.36±1.15	55.94±0.47	82.35±1.42	82.10±0.54	63.36±1.15	55.94±0.47	82.35±1.42	82.10±0.54
80	64.81±1.18	61.56±2.78	8.15±2.28	7.43±0.30	61.81±2.23	53.30±3.50	62.38±2.52 ^A	53.85±3.43 ^B	82.56±1.91	81.94±0.75	62.38±2.52 ^A	53.85±3.43 ^B	82.56±1.91	81.94±0.75

^A และ ^B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์สีหนึ่งในแถวเดียว

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

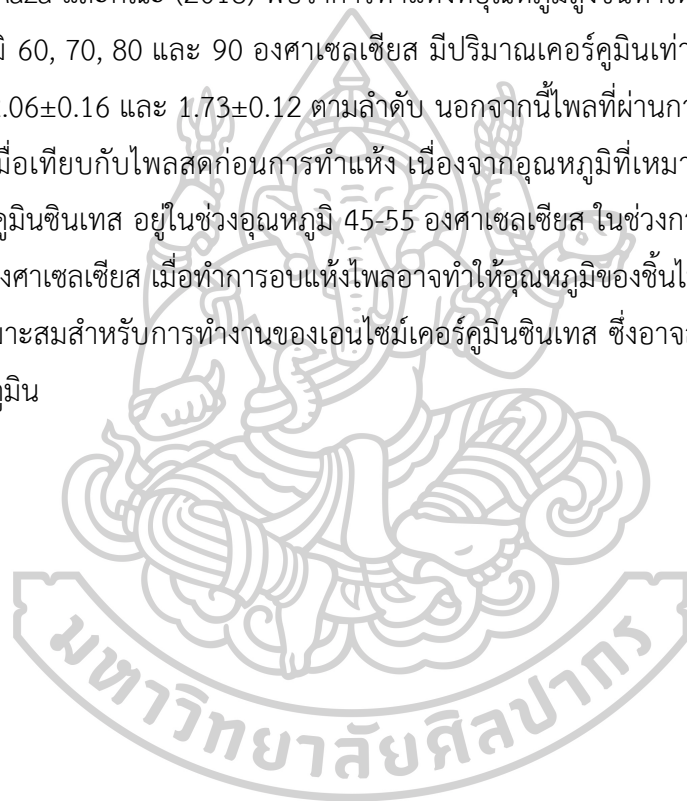


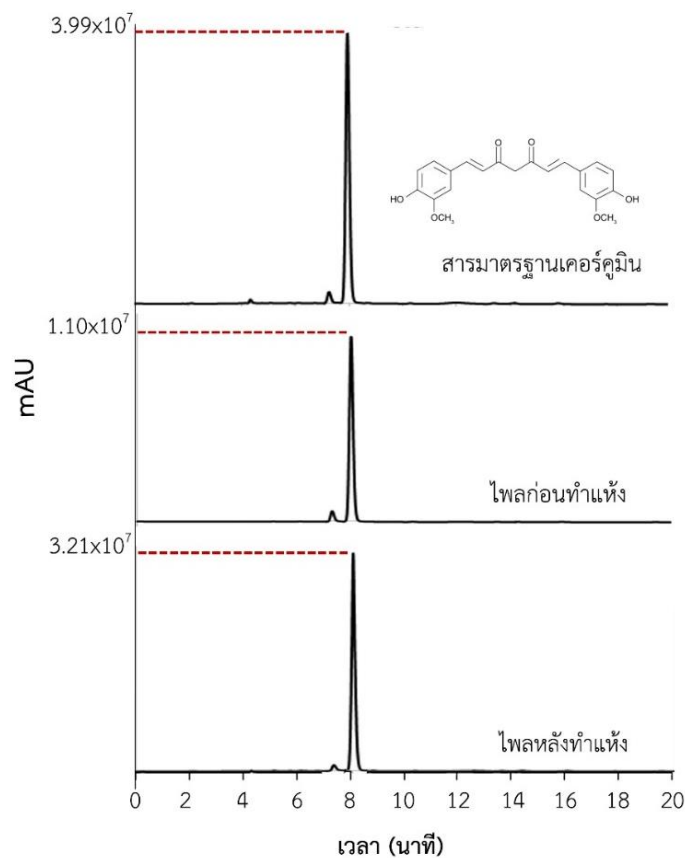
ภาพที่ 24 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดต่อค่า ΔE ในโพล เปรียบเทียบก่อนและหลังการทำแห้ง
^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละอุณหภูมิ

4.3.3 ปริมาณเคอร์คูมิน

ตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารมาตรฐานเคอร์คูมิน และสารเคอร์คูมินในโพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสที่วิเคราะห์ด้วยวิธี HPLC ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 25 ซึ่งพบพีคของสารเคอร์คูมินที่เวลา (retention time) 8.0 นาที และจากตารางที่ 17 แสดงปริมาณเคอร์คูมินของโพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคอร์คูมินของโพลที่ผ่านการทำแห้ง โดยโพลอบแห้งจะมีค่าปริมาณเคอร์คูมินมากกว่าโพลสดทุกอุณหภูมิที่ศึกษา พบว่า โดยโพลที่ผ่านการทำแห้งมีปริมาณเคอร์คูมินเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโพลก่อนการทำแห้ง เนื่องจากการทำแห้งทำให้เกิดความเสียหายของผนังเซลล์เนื้อเยื่อในพืช (An และคณะ, 2016) เมื่อนำโพลที่ผ่านการทำแห้งมาทำการสกัดเพื่อหาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอาจส่งผลให้สามารถสกัดสารได้มากขึ้น และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเคอร์คูมินโดยมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์เคอร์คูมินซินเทส 2 (curcumin synthases 2; CURS2) และเอนไซม์เคอร์คูมินซินเทส 3 (curcumin synthases 3; CURS3) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เคอร์คูมิน โดย CURS2 และ CURS3 จะเข้าไปเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยน feruloyldiketide-CoA ร่วมกับ feruloyl-CoA เปลี่ยนเป็นเคอร์คูมิน โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่

ในช่วง 45-55 องศาเซลเซียส (Katsuyama และคณะ, 2009) นอกจากนี้ความร้อนอาจเข้าไปทำให้คาสซูนินเอ (Cassumunins A) และคาสซูนินบี (Cassumunins B) ซึ่งเป็นสารประกอบในกลุ่มเคอร์คูมินอยด์ (Masuda และคณะ, 1993) ที่พบเฉพาะในไพล อาจเกิดการสลายตัวได้เป็นเคอร์คูมิน อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งไพลสูงขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเคอร์คูมินลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเคอร์คูมินหลังอบแห้งเทียบกับก่อนการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด ซึ่งอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการเสื่อมสลายของเคอร์คูมินได้บางส่วนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Raza และคณะ (2018) พบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณเคอร์คูมินลดลง โดยที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีปริมาณเคอร์คูมินเท่ากับร้อยละ 2.93 ± 0.14 , 2.15 ± 0.11 , 2.06 ± 0.16 และ 1.73 ± 0.12 ตามลำดับ นอกจากนี้ไพลที่ผ่านการทำแห้งมีปริมาณเคอร์คูมินเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไพลสดก่อนการทำแห้ง เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์เคอร์คูมินซินเทส อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 45-55 องศาเซลเซียส ในช่วงการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส เมื่อทำการอบแห้งไพลอาจทำให้อุณหภูมิของชิ้นไพลมีการเพิ่มขึ้นผ่านช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์เคอร์คูมินซินเทส ซึ่งอาจส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเคอร์คูมิน





ภาพที่ 25 โครมาโตแกรม HPLC ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร ของสารมาตรฐานเคอร์คูมินและสารเคอร์คูมินของไพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ทำแห้งเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ตารางที่ 17 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อปริมาณเคอร์คูมินของไพลอบแห้ง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณเคอร์คูมิน (กรัม/100 กรัมตัวอย่าง (น้ำหนักฐานแห้ง))		ร้อยละ การเปลี่ยนแปลง
	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง	
40	4.93±0.14	8.99±0.44 ^a	82.10±3.9 ^a
50	4.25±0.46	8.24±1.06 ^{ab}	93.72±4.0 ^a
60	4.65±0.02	7.66±0.60 ^{bc}	64.95±13.6 ^b
70	4.46±0.30	7.32±1.03 ^c	63.78±12.0 ^b
80	4.33±0.36	6.34±1.00 ^d	45.78±11.0 ^c

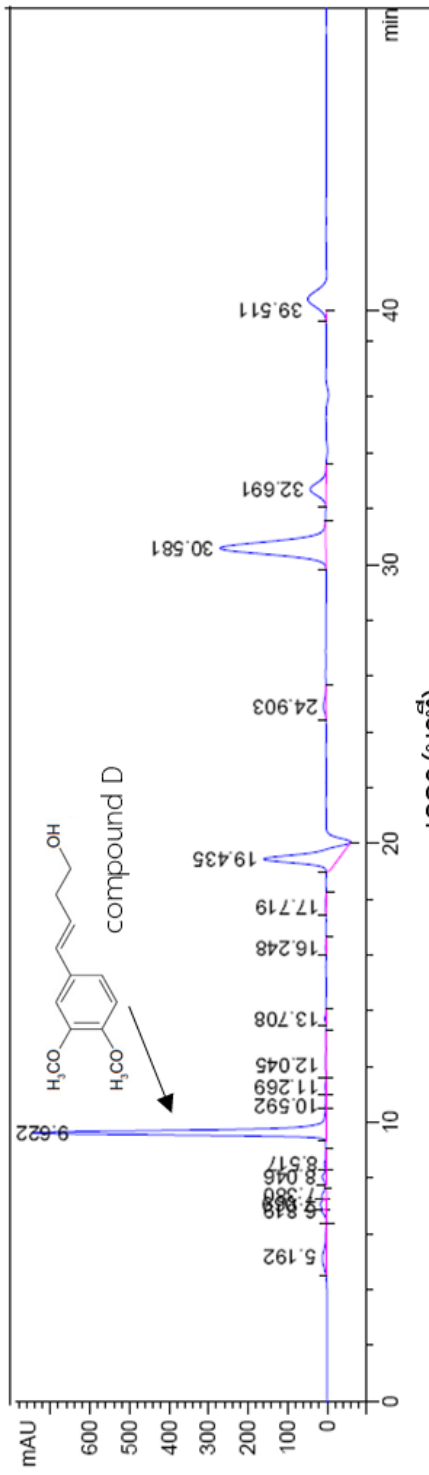
a, b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

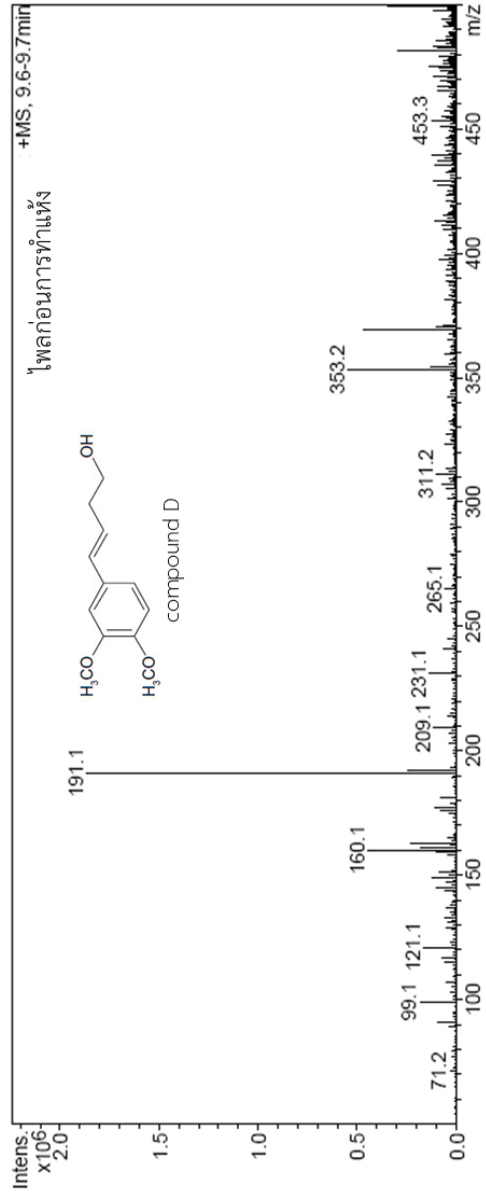
4.3.4 สาร compound D

ในการวิเคราะห์สาร compound D ใช้วิธียืนยันจากวิธี LC-MS ทำให้ทราบเลข m/z จากภาพที่ 26 จะเห็นว่าพีคที่ 1 คือ compound D ซึ่งตรวจพบที่เวลา 9.6 นาที โดยมีเลข m/z เท่ากับ $208.1+[H]^+$ หรือ 209.1, 191.1 และ 160.1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Masuda และ Jitoe (1995) รายงานว่า compound D มี m/z เท่ากับ $208.1+[H]^+$, 177 และ 146 และเกิดการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร เมื่อทำการพิสูจน์ m/z ของ compound D โดยทำการแตกมวลโมเลกุลเพิ่มพบว่ามีแตกตัวของ m/z จาก 209.1 ได้เป็น 191.10, 160.10, 145.05 และ 176.10 ตัวอย่างโครมาโตแกรม HPLC ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรของสาร compound D ในไฟลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 27 จะเห็นว่าพีคที่ 1 คือ compound D ซึ่งตรวจพบที่เวลา 3.9 นาที จะเห็นพื้นที่ใต้กราฟสาร compound D ในไฟลมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากทำแห้ง และอุณหภูมิของการทำแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อพื้นที่ใต้กราฟของ compound D (ตารางที่ 18)

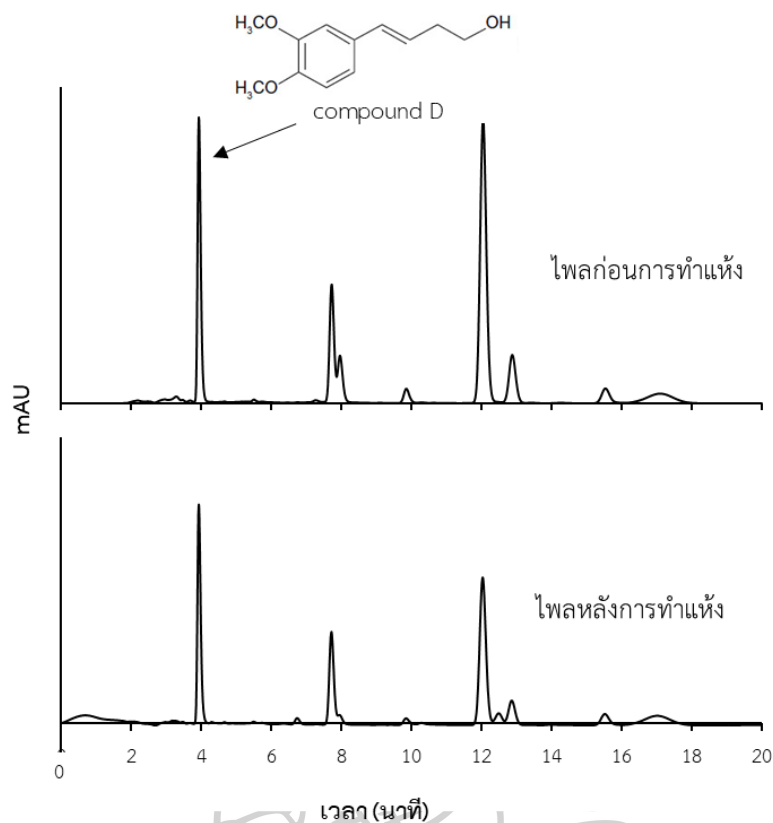




เวลา (นาที)



ภาพที่ 26 ตัวอย่างโครมาโตแกรม LC-MS ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรของสาร compound D ในไฟก่อนการทำแห้ง



ภาพที่ 27 ตัวอย่างโครมาโตแกรม HPLC ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรของสาร compound D ในโพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

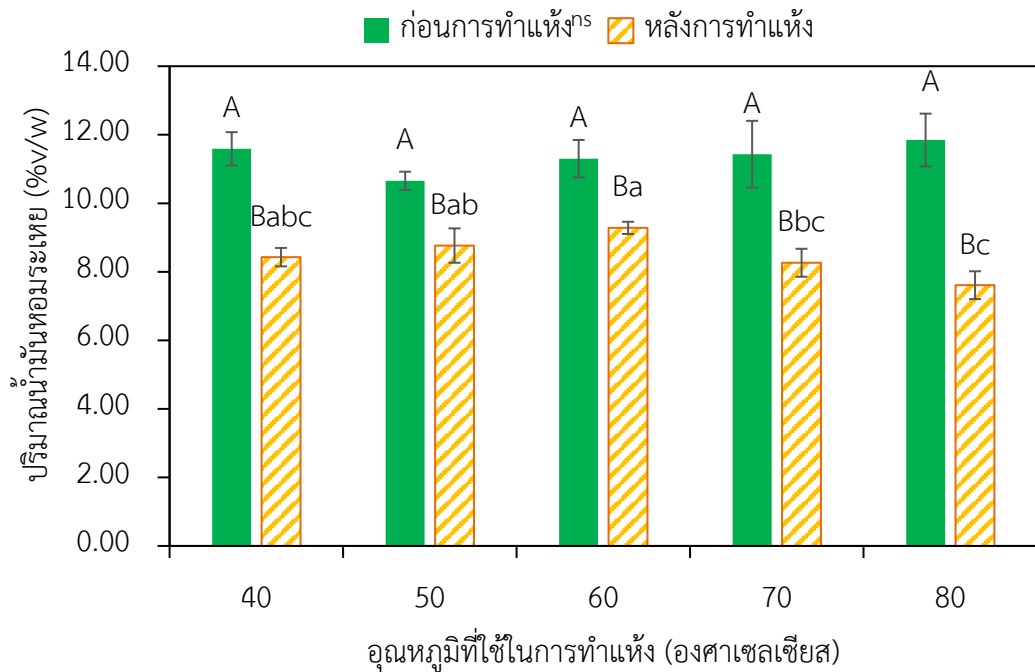
ตารางที่ 18 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งต่อสาร compound D ของโพลก่อนและหลังการทำแห้ง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Compound D (Area peak x10 ⁶)	
	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}
40	8.27±0.65	15.72±0.07
50	8.75±0.55	16.95±0.55
60	8.88±1.49	17.68±0.79
70	7.49±0.92	14.08±1.74
80	8.70 ±0.93	13.48±1.70

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.3.5 ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยในไพล

การทำแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพล โดยไพลที่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งที่ทำการศึกษ ตัวอย่างไพลก่อนการทำแห้งมีค่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยช่วงร้อยละ 10.66-11.85 มิลลิกรัมต่อ น้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) และไพลอบแห้งที่ได้มีค่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยช่วงร้อยละ 7.61-9.28 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) (ภาพที่ 28) ทั้งนี้การทำแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมี ปริมาณการลดลงมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยลดลงจากร้อยละ 11.85 ± 0.77 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) เป็นร้อยละ 7.61 ± 0.41 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัวอย่าง (ฐาน แห้ง) เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยในไพลเป็นสารที่ถูกสร้างและเก็บไว้ในเซลล์น้ำมัน ซึ่งน้ำมันหอม ระเหยมีจุดเดือดต่ำ สามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิการทำ แห้งสูงกว่านี้ น้ำมันหอมระเหยจะมีการระเหยเป็นไอดีง่ายขึ้น (พัชรเพ็ญ และคณะ, 2552) โดย สอดคล้องกับงานวิจัยของ บุญนาก และคณะ (2554) รายงานว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งไพลมีผล ต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพล โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยไพลลดลง อาจเนื่องจากว่าการทำแห้งทำให้น้ำมันหอมระเหยสูญเสียไปพร้อมกับการระเหยน้ำตลอดช่วงการทำ แห้งได้ โดยอาจเกิดสารประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยไพลเป็นสารจำพวกสารอินทรีย์ที่มีความคง ตัวค่อนข้างต่ำทำให้สามารถระเหยได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสขึ้นไป



ภาพที่ 28 ปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบ

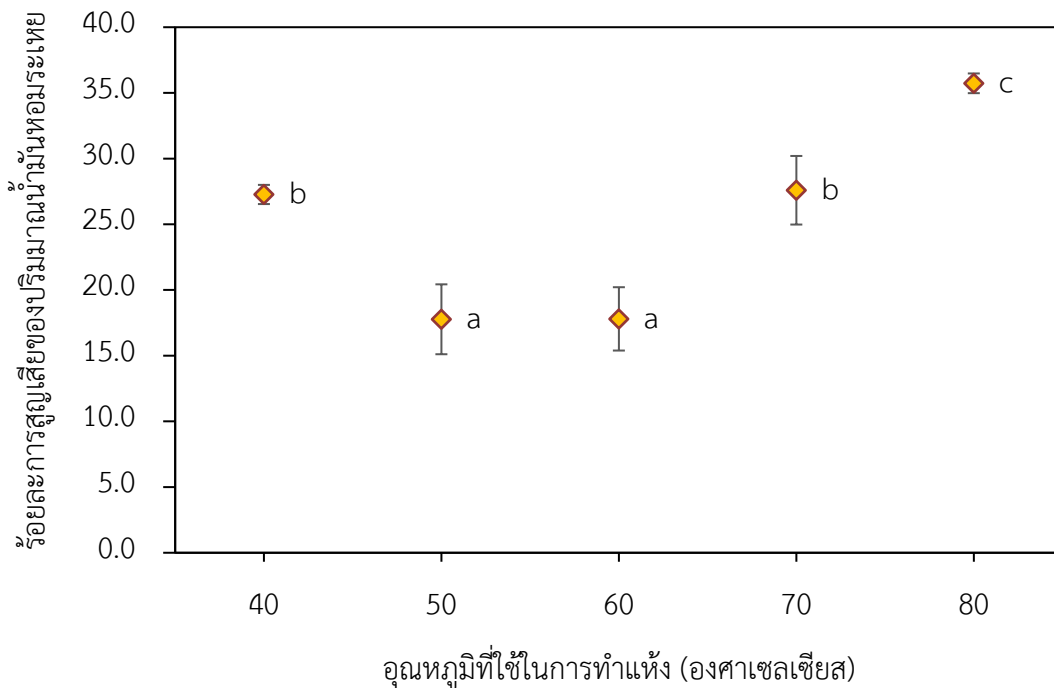
ถาดที่อุณหภูมิต่างๆ

a, b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบการทำแห้งไพลที่อุณหภูมิ

A และ B หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในระหว่างตัวอย่างก่อนและ

หลังการทำแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน

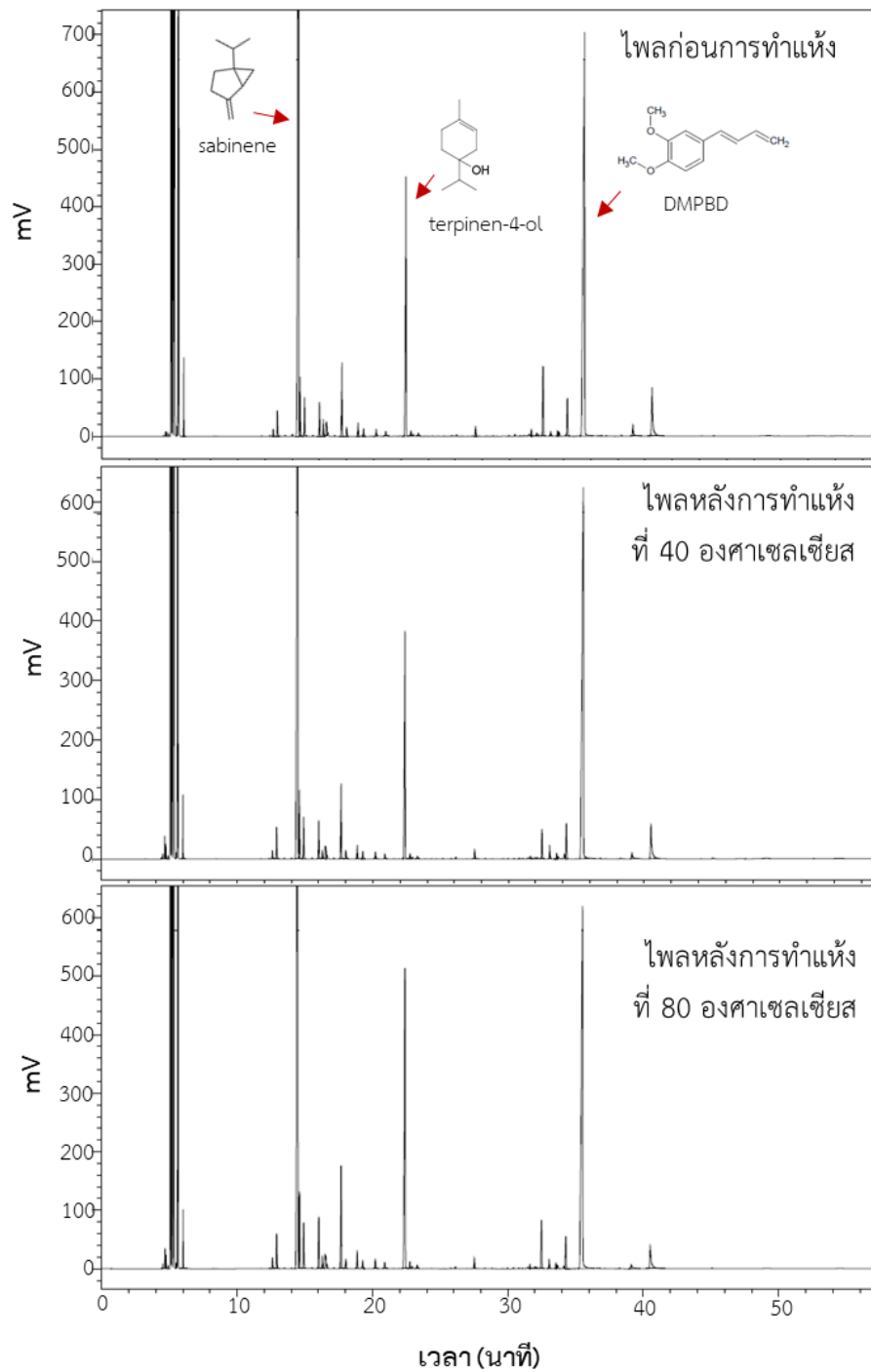
^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบไพลก่อนการทำแห้งที่อุณหภูมิ



ภาพที่ 29 ผลของอุณหภูมิตั้งในการทำแหวงต่อร้อยละการสุญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไฟล a, b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในการทำแหวงที่แต่ละ อุณหภูมิ

จากภาพที่ 29 อุณหภูมิตั้งในการทำแหวงมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อร้อยละการสุญเสียของน้ำมันหอมระเหยในไฟลหลังอบแหวง เมื่ออุณหภูมิตั้งในการทำแหวงเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิตั้งในการทำแหวงเพิ่มขึ้น โดยการทำแหวงที่อุณหภูมิตั้ง 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีร้อยละการสุญเสียเท่ากับ 17.77 ± 2.66 , 17.80 ± 2.41 , 27.59 ± 2.61 และ 35.73 ± 0.75 ตามลำดับ จากการทดลองให้ผลไปในทิศทางเดียวกับบุญนาก และคณะ (2554) ซึ่งรายงานว่ อุณหภูมิการอบแหวงที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสุญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยไฟลมากขึ้น โดยมีการสุญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 16.84, 21.55, 55.89 และ 82.49 ที่อุณหภูมิตั้ง 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามไฟลที่ผ่านการทำแหวงอุณหภูมิตั้ง 40 องศาเซลเซียส มีร้อยละการสุญเสียน้ำมันหอมระเหยมากกว่าการทำแหวงที่อุณหภูมิตั้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อุณหภูมิตั้ง 40 องศาเซลเซียสมีการใช้ระยะเวลาในการทำแหวงนานกว่ามาก มีผลทำให้น้ำมันหอมระเหยสุญเสียไปในระหว่างการทำแหวงได้ โดยเวลาในการทำแหวงไฟลที่ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง ในขณะที่อุณหภูมิตั้ง 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีการใช้ระยะเวลาในการอบแหวง 5 และ 3 ชั่วโมงตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบน้ำมันหอมระเหยไพลด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีเครื่องตรวจวัดสัญญาณชนิด Flame ionization (FID) แสดงเป็นโครมาโตแกรมตั้งภาพที่ 30 โดยทำการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานอัลเคน C7-C40 โดยคำนวณค่า retention index จาก retention time ขององค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยกับสารมาตรฐานอัลเคน C7-C40 เปรียบเทียบค่า retention index ที่คำนวณได้กับค่า retention index ในเอกสารอ้างอิง Adams (2017) และงานวิจัยของ Verma และคณะ (2018) ซึ่งชนิดองค์ประกอบทางเคมีที่พบในของน้ำมันหอมระเหยไพลแสดงดังตารางที่ 19 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยทั้งหมด 26 ชนิดโดยสามารถแบ่งเป็นสารกลุ่มโมโนเทอร์พีน ไฮโดรคาร์บอน (monoterpenes hydrocarbons) 10 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-ทูจิน (α -thujene) แอลฟา-ไพนีน (α -pinene) ซาบินีน (sabinene) บีตา-ไพนีน (β -pinene) เมอร์ซีน (myrcene) แอลฟา-เทอร์พีนีน (α -terpinene) พาราไซมิน (p -cymene) บีตา-เฟลแลนดรีน (β -phellandrene) แกมมา-เทอร์พีนีน (γ -terpinene) และเทอร์พินโนลีน (terpinolene) สารกลุ่มออกซิเจนเตตโมโนเทอร์พีน (oxygenated monoterpenes) 8 ชนิด ได้แก่ ซิส-ซาบินีนไฮเดรต (cis-sabinene hydrate) ทรานส์-ซาบินีนไฮเดรต (trans-sabinene hydrate) cis-p-menth-2-ene-1-ol, trans-p-menth-2-ene-1-ol เทอร์พีนีน-4-อล (terpinen-4-ol), แอลฟา-เทอร์พีนีออล (α -terpineol) ทรานส์-ปิเปอริทอล (trans-piperitol) และแอลฟา-เทอร์พินิลแอซิเตต (α -terpinyl acetate) สารกลุ่มเซสควิเทอร์พีนไฮโดรคาร์บอน (sesquiterpene hydrocarbons) 3 ชนิด ได้แก่ แอลฟา-ซิงจีเบอร์ีน (α -zingiberene) เจอร์มาครีนบี (germacrene B) และ บีตา-เซสควิฟิลแลนดรีน (β -sesquiphellandrene) สารกลุ่มฟีนิลบิวทานอยด์ 5 ชนิด ได้แก่ (Z)-1-(3',4'-Dimethoxyphenyl)buta-1,3-diene, (E)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)but-1-ene, DMPBD, 1-(2',4',5'-Trimethoxyphenyl)but-1-ene, (E)-1-(2',4',5'-Trimethoxyphenyl)buta-1,3-diene (TMPBD)



ภาพที่ 30 ตัวอย่างโครมาโตแกรม GC ขององค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของไพลก่อน และหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 และ 80 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 19 ชนิดองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยโพลสตก่อนการทำแห้ง

ลำดับที่	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย	RI ^a	RI ^b
1	α -thujene	926	924
2	α -pinene	934	932
3	sabinene	976	974
4	β -pinene	980	978
5	myrcene	988	990
6	α -terpinene	1017	1016
7	p -cymene	1024	1022
8	β -phellandrene	1029	1026
9	γ -terpinene	1059	1056
10	cis-sabinene hydrate	1068	1068
11	terpinolene	1090	1090
12	trans-sabinene hydrate	1099	1098
13	cis-p-menth-2-ene-1-ol	1124	1122
14	trans-p-menth-2-ene-1-ol	1143	1140
15	terpinen-4-ol	1184	1178
16	α -terpineol	1193	1188
17	trans-piperitol	1201	1205
18	α -terpinyl acetate	1352	1345
19	α -zingiberene	1499	1495
20	β -sesquiphellandrene	1529	1523
21	germacrene B	1549	1543
22	(Z)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl) buta-1,3-diene	1567	1564
23	(E)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)but-1-ene	1592	1589
24	(E)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)buta-1,3-diene (DMPBD)	1636	1629
25	1-(2',4',5'-Trimethoxy phenyl)but-1-ene	1765	1765
26	(E)-1-(2',4',5'-Trimethoxyphenyl)buta-1,3-diene (TMPBD)	1817	1811

หมายเหตุ ^a คือ ค่า retention index (RI) ที่คำนวณได้จากสารมาตรฐานอัลเคน C7-C40

^b คือ ค่า retention index (RI) ที่ได้จากเอกสารอ้างอิง Adams (2005) และงานวิจัยของ Verma และคณะ (2018)

เนื่องจากไม่มีสารมาตรฐาน ดังนั้นจึงรายงานปริมาณสารแต่ละชนิดที่พบในรูปร้อยละของพื้นที่ใต้พีคของสารที่ตรวจพบเทียบกับพื้นที่ใต้พีคของสารทั้งหมดที่วิเคราะห์ได้ของแต่ละตัวอย่างจึงบอกเพียงภาพรวมขององค์ประกอบของสารที่พบในน้ำมันระเหยจากไพล จากตารางที่ 20 จะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักที่พบในน้ำมันหอมระเหยไพล ได้แก่ ซาบินีน ร้อยละ 40.55-43.89 DMPBD ร้อยละ 26.24-29.93 และเทอร์พินีน-4-ออล ร้อยละ 10.58-12.78 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bua-in และ Paisooksantivatana (2009) ที่ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยในไพลในแต่ละพื้นที่การเพาะปลูกตามภูมิภาคต่างๆ ในประเทศไทย พบว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักในเหง้าไพลได้แก่ ซาบินีน เป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 33-47 เทอร์พินีน-4-ออล ประมาณร้อยละ 12-22, DMPBD ประมาณร้อยละ 18-28 นอกจากนี้ Verma และคณะ (2018) ยังได้ศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันหอมระเหยในไพลในประเทศอินเดียที่ปลูกแตกต่างกัน 3 แห่ง ซึ่งน้ำมันหอมระเหยไพลมีองค์ประกอบหลักไพลได้แก่ ซาบินีน ร้อยละ 13.5-38.0, DMPBD ร้อยละ 20.6-35.3 และเทอร์พินีน-4-ออล ร้อยละ 9.0-31.3 ทั้งนี้ในองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยไพลเป็นกลุ่มโมโนเทอร์พินไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50.11-54.84 และรองลงมาคือสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์คิดเป็นร้อยละ 30.43-35.00 และสารกลุ่มออกซิเจนเตตตี้ดโมโนเทอร์พินคิดเป็นร้อยละ 12.28-14.44

นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งไม่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีหลักของน้ำมันหอมระเหยของไพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ได้แก่ ซาบินีน เทอร์พินีน-4-ออล แต่อุณหภูมิมีผลต่อ DMPBD โดยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสมีร้อยละของพื้นที่ใต้พีคของสาร DMPBD น้อยที่สุด อุณหภูมิไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสารกลุ่มโมโนเทอร์พินไฮโดรคาร์บอน สารกลุ่มออกซิเจนเตตตี้ดโมโนเทอร์พิน และสารกลุ่มเฮกสควิเทอร์พินไฮโดรคาร์บอน แต่อุณหภูมิมีผลต่อสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์อย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับปริมาณ DMPBD

ตารางที่ 20 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบเปิดต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของเปลือยแห้ง

องค์ประกอบทางเคมี	40 องศาเซลเซียส		50 องศาเซลเซียส		60 องศาเซลเซียส		70 องศาเซลเซียส		80 องศาเซลเซียส		
	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	
α -thujene ^{ns}	0.25±0.04	0.23±0.05	0.26±0.00	0.30±0.02	0.31±0.03	0.31±0.03	0.31±0.03	0.27±0.00	0.23±0.04	0.27±0.00	0.31±0.01
α -pinene ^{ns}	0.89±0.11	0.89±0.15	0.94±0.07	1.00±0.01	1.11±0.10	1.07±0.02	1.09±0.03	1.09±0.03	0.91±0.09	0.89±0.17	1.06±0.08
Sabinene ^{ns}	40.55±3.56	41.12±3.43	41.45±0.46	42.86±0.35	42.35±1.07	43.89±0.26	43.39±1.40	42.07±1.33	42.07±1.33	42.12±1.58	41.26±0.137
β -pinene ^{ns}	1.94±0.18	1.66±0.54	1.99±0.09	2.05±0.07	2.26±0.17	2.20±0.06	2.17±0.04	1.89±0.16	1.89±0.16	1.89±0.36	2.25±0.17
Myrcene ^{ns}	1.29±0.03	1.15±0.23	1.33±0.05	1.32±0.02	1.46±0.08	1.38±0.03	1.40±0.02	1.22±0.09	1.22±0.09	1.24±0.23	1.40±0.12
α -terpinene ^{ns}	1.27±0.05	1.11±0.20	1.29±0.07	1.35±0.05	1.49±0.15	1.41±0.06	1.24±0.10	1.16±0.21	1.16±0.21	1.34±0.11	1.57±0.15
ρ -cymene ^{ns}	0.63±0.02	0.31±0.00	0.63±0.01	0.39±0.09	0.66±0.05	0.41±0.04	0.45±0.00	0.21±0.11	0.21±0.11	0.49±0.03	0.44±0.08
β -phellandrene ^{ns}	0.77±0.06	0.74±0.01	0.75±0.01	0.75±0.16	0.82±0.00	0.72±0.01	0.81±0.04	0.70±0.05	0.70±0.05	0.74±0.04	0.73±0.05
γ -terpinene ^{ns}	2.69±0.12	2.44±0.16	2.70±0.11	2.83±0.17	3.07±0.32	2.92±0.10	2.54±0.19	2.42±0.46	2.42±0.46	2.41±0.37	3.30±0.35
cis-sabinene hydrate ^{ns}	0.29±0.01	0.28±0.04	0.24±0.04	0.30±0.01	0.28±0.01	0.29±0.01	0.25±0.00	0.26±0.01	0.26±0.01	0.25±0.06	0.29±0.02
terpinolene ^{ns}	0.51±0.02	0.46±0.02	0.50±0.02	0.52±0.03	0.56±0.06	0.52±0.02	0.47±0.04	0.45±0.07	0.45±0.07	0.44±0.06	0.59±0.06
trans-sabinene hydrate ^{ns}	0.25±0.01	0.25±0.04	0.21±0.03	0.28±0.00	0.25±0.03	0.257±0.03	0.21±0.01	0.26±0.02	0.26±0.02	0.21±0.06	0.28±0.02
cis-p-menth-2-ene-1-ol ^{ns}	0.26±0.00	0.26±0.01	0.24±0.02	0.28±0.01	0.27±0.05	0.27±0.01	0.22±0.02	0.24±0.04	0.24±0.04	0.22±0.03	0.30±0.01
trans-p-menth-2-ene-1-ol ^{ns}	0.17±0.01	0.16±0.02	0.16±0.02	0.18±0.01	0.18±0.03	0.17±0.00	0.14±0.02	0.15±0.03	0.15±0.03	0.14±0.01	0.19±0.01
terpinen-4-ol ^{ns}	11.73±1.07	10.70±1.75	10.58±0.26	11.25±1.21	12.09±1.99	11.22±0.26	11.15±0.22	10.56±0.44	10.56±0.44	11.15±0.78	12.78±1.09
α -terpineol ^{ns}	0.19±0.00	0.19±0.03	0.16±0.01	0.20±0.01	0.19±0.03	0.19±0.01	0.15±0.02	0.17±0.02	0.17±0.02	0.16±0.00	0.20±0.02
trans-piperitol ^{ns}	0.12±0.02	0.10±0.02	0.10±0.01	0.10±0.01	0.11±0.02	0.10±0.01	0.09±0.01	0.09±0.02	0.09±0.02	0.09±0.01	0.12±0.01
α -terpinyl acetate ^{ns}	0.32±0.03	0.34±0.08	0.27±0.00	0.30±0.00	0.27±0.01	0.24±0.06	0.26±0.01	0.27±0.03	0.27±0.03	0.26±0.05	0.29±0.00

ตารางที่ 21 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำให้แห้งเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาตต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของโพลอบแห้ง (ต่อ)

องค์ประกอบทางเคมี	40 องศาเซลเซียส			50 องศาเซลเซียส			60 องศาเซลเซียส			70 องศาเซลเซียส			80 องศาเซลเซียส		
	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	
α -zingiberene ^{ns}	0.18±0.11	0.17±0.11	0.15±0.01	0.11±0.01	0.15±0.01	0.17±0.04	0.19±0.01	0.17±0.04	0.15±0.01	0.19±0.01	0.13±0.05	0.19±0.01	0.13±0.05	0.14±0.01	
β -sesquiphellandrene ^{ns}	1.92±1.13	1.93±1.24	1.53±0.23	1.17±0.04	1.58±0.12	1.45±0.05	1.91±0.18	1.45±0.05	1.58±0.12	1.99±0.06	1.46±0.06	1.99±0.06	1.46±0.06	1.53±0.01	
germacrene B ^{ns}	0.13±0.07	0.50±0.06	0.11±0.03	0.36±0.00	0.10±0.01	0.34±0.08	0.13±0.00	0.34±0.08	0.10±0.01	0.50±0.17	0.14±0.04	0.50±0.17	0.14±0.04	0.33±0.00	
(Z)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl) buta-1,3-diene ^{ns}	0.22±0.02	0.20±0.02	0.20±0.03	0.20±0.01	0.16±0.01	0.18±0.01	0.18±0.01	0.18±0.01	0.16±0.01	0.22±0.02	0.20±0.06	0.22±0.02	0.20±0.06	0.17±0.01	
(E)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)but-1-ene ^{ns}	1.41±0.16	1.44±0.24	1.17±0.00	1.26±0.03	1.02±0.03	1.11±0.03	1.09±0.02	1.11±0.03	1.02±0.03	1.34±0.11	1.19±0.22	1.34±0.11	1.19±0.22	1.20±0.15	
DMPBD	28.29±0.46	29.93±0.54 ^a	29.84±1.04	28.11±1.09 ^{ab}	26.24±0.59	26.82±1.02 ^b	27.72±0.05	26.82±1.02 ^b	26.24±0.59	29.16±0.19 ^a	29.11±2.33	29.16±0.19 ^a	29.11±2.33	26.62±0.93 ^b	
1-(2',4',5'-Trimethoxy phenyl)but-1-ene ^{ns}	0.57±0.09	0.44±0.10	0.51±0.02	0.36±0.06	0.49±0.06	0.39±0.03	0.50±0.02	0.39±0.03	0.49±0.06	0.45±0.01	0.61±0.03	0.45±0.01	0.61±0.03	0.42±0.03	
TMPBD ^{ns}	3.19±0.66	2.99±0.64	2.72±0.37	2.17±0.49	2.51±0.47	1.97±0.61	2.72±0.15	1.97±0.61	2.51±0.47	2.89±0.44	2.84±0.31	2.89±0.44	2.84±0.31	2.24±0.08	
monoterpene hydrocarbons ^{ns}	50.79±3.79	50.11±4.75	51.83±0.86	52.86±0.47	54.11±0.87	54.84±0.10	51.84±0.60	54.84±0.10	54.11±0.87	51.25±0.04	51.84±2.74	51.25±0.04	51.84±2.74	52.90±0.29	
Oxygenated monoterpenes ^{ns}	13.32±1.15	12.28±1.82	12.42±1.04	12.88±1.26	13.64±2.07	12.75±0.39	12.49±0.56	12.75±0.39	13.64±2.07	12.02±0.56	12.49±0.55	12.02±0.56	12.49±0.55	14.44±1.12	
sesquiterpene hydrocarbon ^{ns}	2.22±1.30	2.61±1.42	1.78±0.21	1.63±0.06	1.83±0.12	1.96±0.07	1.72±0.13	1.96±0.07	1.83±0.12	2.68±0.13	1.72±0.07	2.68±0.13	1.72±0.07	2.01±0.00	
phenylbutanoids	33.67±1.34	35.00±1.51 ^a	33.97±0.03	32.63±0.85 ^{ab}	30.43±1.08	30.45±0.42 ^b	33.95±0.39	30.45±0.42 ^b	30.43±1.08	34.06±0.39 ^a	33.95±2.26	34.06±0.39 ^a	33.95±2.26	30.65±0.82 ^b	

^{a, b และ c} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

4.3.6 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ศึกษาการตรวจวัดฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธีการทำลาออนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ที่รายงานค่าเป็นไมโครโมล Trolox ต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) ($\mu\text{mol Trolox/g dry matter}$) โดยทั้งสองวิธีเป็นวิธีที่วิเคราะห์ง่าย สะดวก และสามารถใช้กับตัวอย่างหลายชนิด

จากตารางที่ 22 จะเห็นว่าโพลที่ผ่านการทำแห้งมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันลดลงเมื่อเทียบกับโพลสดก่อนการทำแห้ง ซึ่งสารต้านออกซิเดชันที่พบในโพล ได้แก่ ซาบินิน (Quiroga และคณะ, 2015) เทอร์ไพเนน-4-อล (Souza และคณะ, 2018) แอลฟา-เทอร์ไพเนน, แกมมา-เทอร์ไพเนน (Li และ Liu, 2009) โดยสารประกอบเหล่านี้เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำมันหอมระเหยโพล เมื่อการทำแห้งทำให้เกิดการสูญเสียของปริมาณน้ำมันหอมระเหย ดังนั้นจึงทำให้มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันลดลง

จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่วัดด้วยวิธี DPPH (ΔDPPH) แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งมีผลต่ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่วัดด้วยวิธี ABTS (ΔABTS) (ตารางที่ 22) ซึ่งทั้งสองวิธีมีแนวโน้มการลดลงของความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในโพลไปในทิศทางเดียวกันในแต่ละอุณหภูมิ

จะเห็นว่าการทำแห้งโพลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า ΔABTS ลดลงน้อยที่สุด แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่โดยการทำแห้งโพลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่า ΔABTS ลดลงมากที่สุด ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับการสูญเสียของปริมาณน้ำมันหอมระเหยและปริมาณเคอร์คูมินในโพล ซึ่งสารต้านออกซิเดชันที่พบในโพลได้แก่ เคอร์คูมิน (Ghosh และคณะ, 2015) และองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยโพล เช่น ซาบินิน (Quiroga และคณะ, 2015) เทอร์ไพเนน-4-อล (Souza และคณะ, 2018) แอลฟา-เทอร์ไพเนน, แกมมา-เทอร์ไพเนน (Li และ Liu, 2009) เป็นต้น โดย Manochai และคณะ (2010) รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำมันหอมระเหยในโพลส่งผลให้มีความสามารถเป็นสารต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับบุญนากและคณะ (2011) ทำการอบแห้งโพลพบว่าอุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากขึ้นและมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 22 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของพอลิเมอร์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	DPPH		ABTS		ΔABTS
	μmol Trolox/g dry matter		μmol Trolox/g dry matter		
	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	ก่อนทำแห้ง ^{ns}	หลังทำแห้ง ^{ns}	
40	58.86±3.14	53.42±1.73	160.85±2.11	144.79±0.95	-9.97±1.77 ^{bc}
50	56.65±1.27	52.00±0.24	154.10±0.14	142.71±0.34	-7.39±0.14 ^{ab}
60	57.32±1.01	54.92±0.37	156.33±5.48	145.41±3.90	-6.98±0.77 ^a
70	63.10±0.53	58.64±0.11	165.43±4.69	152.02±3.96	-8.10±0.21 ^{ab}
80	61.57±4.70	54.65±5.26	161.99±9.58	142.94±6.84	-11.73±1.00 ^c

a, b และ c หมายความว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายความว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.4 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่อจลนพลศาสตร์การทำแห้งไพล

การทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดลอง 2 ซ้ำ แต่เนื่องจากสภาพอากาศในด้านความเข้มรังสีอาทิตย์ในวันที่ทำแห้งไพลทั้ง 2 ซ้ำมีความแตกต่างกัน จึงแสดงข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของการทดลองทั้ง 2 ซ้ำดังภาพที่ 31-33 ซึ่งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองซ้ำที่ 1 ความเข้มรังสีอาทิตย์ภายในระบบอบแห้งฯ ในช่วงเวลา 08.00 น. จนถึง 17.00 น. มีค่าอยู่ในช่วง 54.7-607.5 w/m^2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 403.8 w/m^2 ในการทดลองซ้ำที่ 2 ความเข้มรังสีอาทิตย์ภายในระบบอบแห้งฯ มีค่าอยู่ในช่วง 80.3-371.4 w/m^2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 236.6 w/m^2 ซึ่งต่ำกว่าความเข้มรังสีอาทิตย์ของภายนอกเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์หรือการตากแดด (การทดลองซ้ำที่ 1 มีความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง 126.3-1141.1 w/m^2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 649.5 w/m^2 ในการทดลองซ้ำที่ 2 มีความเข้มรังสีอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง 75.8-1120.0 w/m^2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 515.7 w/m^2) จะเห็นได้ว่าในระหว่างการทดลองมีความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้นจากเวลา 08.00 น. จนถึง 12.00 น. จากนั้นจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งความแปรปรวนที่เกิดขึ้นของความเข้มรังสีอาทิตย์ในการทดลองอาจเกิดมาจากสภาพภูมิอากาศที่มีเมฆมากในบางช่วงเวลา (ภาพที่ 31) เมื่อรังสีอาทิตย์ส่องผ่านเข้าไปภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยผ่านแผ่นโพลีคาร์บอเนต ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นความร้อนและถูกสะสมความร้อนด้วยพื้นปูนสีเทาภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงมากกว่าภายนอกเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แม้ว่าภายนอกเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีความเข้มรังสีอาทิตย์ของแสงแดดที่สูงมากกว่า แต่ทั้งนี้ภายนอกเรือนอบแห้งฯ ไม่เกิดการสะสมพลังงานความร้อนจึงทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการทดลองซ้ำที่ 1 มีค่าอุณหภูมิการทำแห้งในช่วง 38.6-57.0 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 52.0 องศาเซลเซียส การทดลองซ้ำที่ 2 มีค่าอุณหภูมิการทำแห้งในช่วง 37.8-55.6 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 48.1 องศาเซลเซียส ในขณะที่ภายนอกเรือนหรือการตากแดด มีค่าอุณหภูมิการทำแห้งซ้ำที่ 1 ในช่วง 27.6-39.6 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 35.6 องศาเซลเซียส และการทำแห้งซ้ำที่ 2 ในช่วง 27.6-37.8 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 33.5 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 32) และความชื้นสัมพัทธ์ของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกต่ำกว่าการตากแดดตลอดการทำแห้ง ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์ของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกในการทำแห้งซ้ำที่ 1 และ 2 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงร้อยละ 11.4-39.5 และ 12.3-46.7 ตามลำดับ ในขณะที่ภายนอกเรือนหรือการตากแดดมีค่าความชื้นสัมพัทธ์การทำแห้งซ้ำที่ 1 และ 2 ในช่วงร้อยละ 37.0-72.2 และ 41.7-86.4 (ภาพที่ 33)

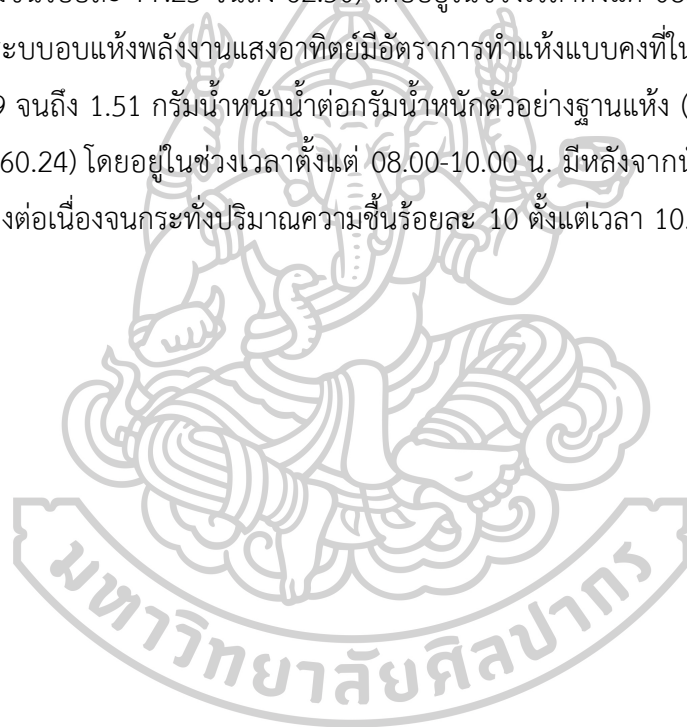
กราฟการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกเปรียบเทียบกับ การตากแดดทั้ง 2 ซ้ำ ดังภาพที่ 34 พบว่าวิธีการทำแห้งไพลมีผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้น ของชิ้นไพล โดยการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีการระเหย น้ำออกจากชิ้นไพลได้เร็วกว่าการทำแห้งด้วยการตากแดด เนื่องจากภายในระบบอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าการตากแดด เมื่อชิ้นไพลได้รับความร้อนจากการ แผ่รังสีอาทิตย์จากดวงอาทิตย์ (Radiation) และพลังงานความร้อนจากลมร้อนด้วยวิธีการพาความร้อน (Convection) ทำให้โมเลกุลของน้ำมีพลังงานจลน์มาก จนกระทั่งสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยว ระหว่างโมเลกุลของน้ำได้ส่งผลให้น้ำระเหยได้ นอกจากนี้ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในระบบ อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าภายนอกเรือนกระจกอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์หรือการตากแดด ทำให้เกิดผลต่างระหว่างของความดันไอน้ำที่บริเวณชิ้นไพลกับความดันไอน้ำในอากาศสูงจึงเกิดการถ่ายเท มวลของน้ำจากชิ้นไพลไปยังอากาศได้ดีขึ้น

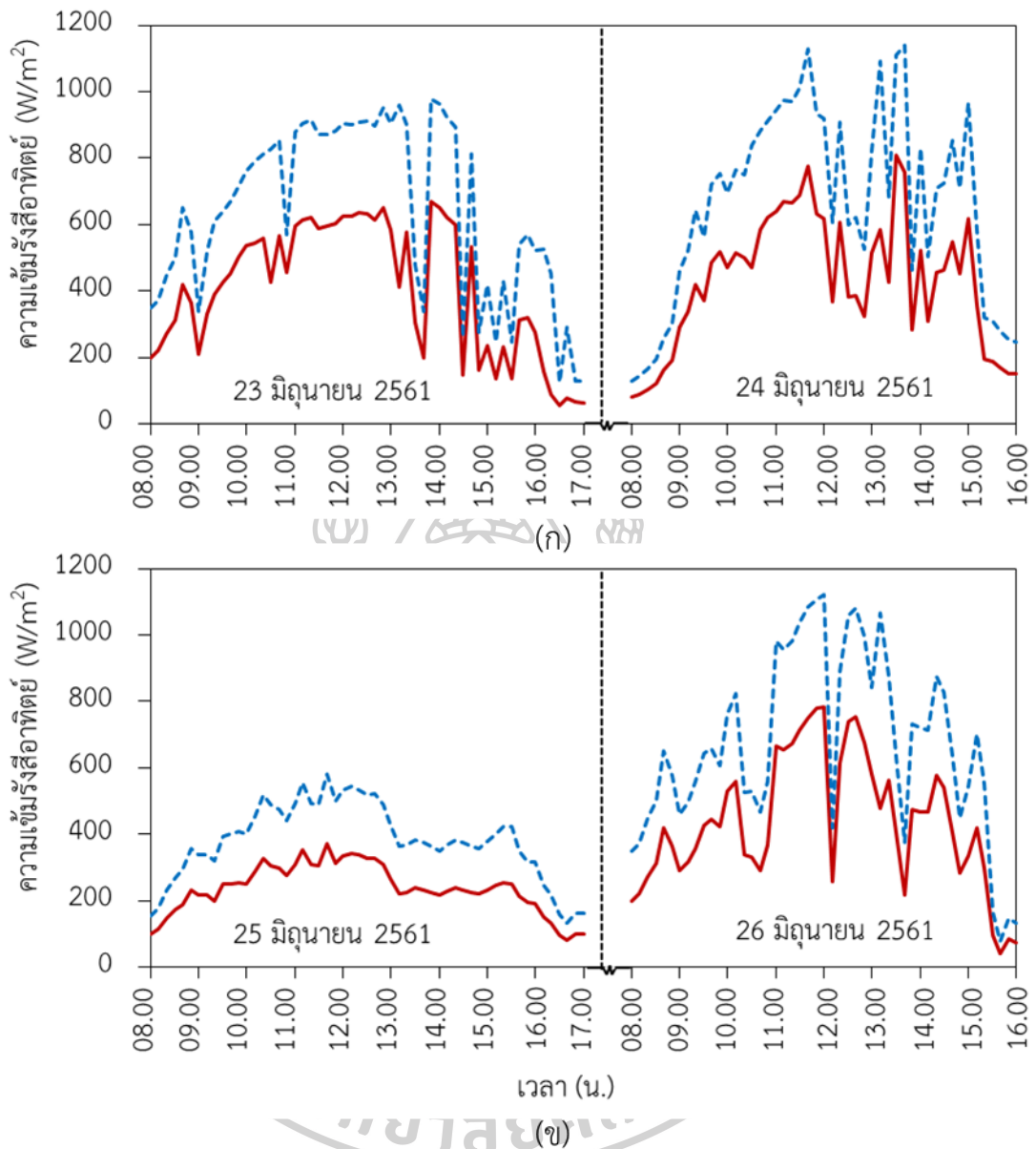
จากการทำแห้งไพลซ้ำที่ 1 (ภาพที่ 34ก) พบว่าการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์จากปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 77.64 มีการลดลงของความชื้นจนเหลือร้อยละ 12.49 ที่เวลา 14.00 น. เมื่อเปรียบเทียบกับการตากแดดที่เวลาเดียวกันยังคงมีความชื้นที่ร้อยละ 24.70 ให้ผลการทดลองคล้ายการทำแห้งไพลซ้ำที่ 2 (ภาพที่ 34ข) ทั้งนี้การทำแห้งไพลทั้ง 2 ซ้ำจาก ปริมาณความชื้นเริ่มต้นอยู่ร้อยละ 76.36 และ 77.64 จนกระทั่งปริมาณความชื้นเข้าสู่สมดุล พบว่า การทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลาการทำแห้งจนกระทั่งน้ำหนัก ตัวอย่างคงที่เร็วกว่าการทำแห้งด้วยการตากแดด โดยการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ใช้ระยะเวลา 9 ชั่วโมง เริ่มที่เวลา 08.00 น จนถึงเวลา 17.00 น. ในขณะที่การทำแห้งไพล ด้วยการตากแดดใช้ระยะเวลา 32 ชั่วโมง (รวมตอนกลางคืน) ตามลำดับ เริ่มที่เวลา 08.00 น ของ วันที่หนึ่งจนถึงเวลา 17.00 น. ของวันถัดไป

จากภาพที่ 35 จะเห็นว่ากราฟอัตราการทำแห้งของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ เรือนกระจกมีอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าการตากแดด สำหรับการทำแห้งซ้ำที่ 1 (ภาพที่ 35ก) จะเห็น ว่าอัตราการทำแห้งในช่วงเริ่มต้นของไพลที่ทำแห้งด้วยการตากแดดและ ระบบอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีอัตราการทำแห้งแบบคงที่ในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นจะเกิดอัตราการทำ แห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับการทำแห้งไพลด้วยการตากแดดมีอัตราการทำแห้งแบบคงที่ในช่วง เริ่มต้นจากปริมาณความชื้น 3.40 จนถึง 1.80 กรัม/น้ำหนักน้ำต่อกรัม/น้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง (ปริมาณความชื้นร้อยละ 77.25 จนถึง 64.33) โดยอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00-10.00 น. ขณะที่การ ทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีอัตราการทำแห้งแบบคงที่ในช่วง เริ่มต้นจากปริมาณความชื้น 3.40 จนถึง 1.79 กรัม/น้ำหนักน้ำต่อกรัม/น้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง

(ปริมาณความชื้นร้อยละ 77.25 จนถึง 64.21) โดยอยู่ในช่วงเวลา 08.00-09.30 น. มีหลังจากนั้นจะมีช่วงอัตราการทำแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปริมาณความชื้นร้อยละ 10

สำหรับอัตราการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดของการทำแห้งซ้ำที่ 2 (ภาพที่ 35 ข) มีความแตกต่างจากการทำแห้งซ้ำที่ 1 ทั้งนี้เนื่องมาจากมีความเข้มข้นของอากาศในครั้งแรกของการทำแห้งซ้ำที่ 2 ($133.7-581.1 \text{ W/m}^2$) ต่ำกว่าการทำแห้งซ้ำที่ 1 ($126.3-977.9 \text{ W/m}^2$) จึงทำให้อัตราการทำแห้งแบบคงที่ในช่วงเริ่มต้นของการทำแห้งซ้ำที่ 2 มีระยะเวลานานกว่าการทำแห้งซ้ำที่ 1 โดยการทำให้แห้งไพลด้วยการตากแดดมีอัตราการทำแห้งแบบคงที่ในช่วงเริ่มต้นจากปริมาณความชื้น 3.19 จนถึง 1.29 กรัม/น้ำหนักน้ำต่อกรัม/น้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง (ปริมาณความชื้นร้อยละ 77.25 จนถึง 62.50) โดยอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00-10.30 น. ซึ่งการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการทำแห้งแบบคงที่ในช่วงเริ่มต้นจากปริมาณความชื้น 3.19 จนถึง 1.51 กรัม/น้ำหนักน้ำต่อกรัม/น้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง (ปริมาณความชื้นร้อยละ 76.18 จนถึง 60.24) โดยอยู่ในช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00-10.00 น. มีหลังจากนั้นจะมีช่วงอัตราการทำแห้งลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปริมาณความชื้นร้อยละ 10 ตั้งแต่เวลา 10.00 น. ของวันแรก จนถึง 16.00 น





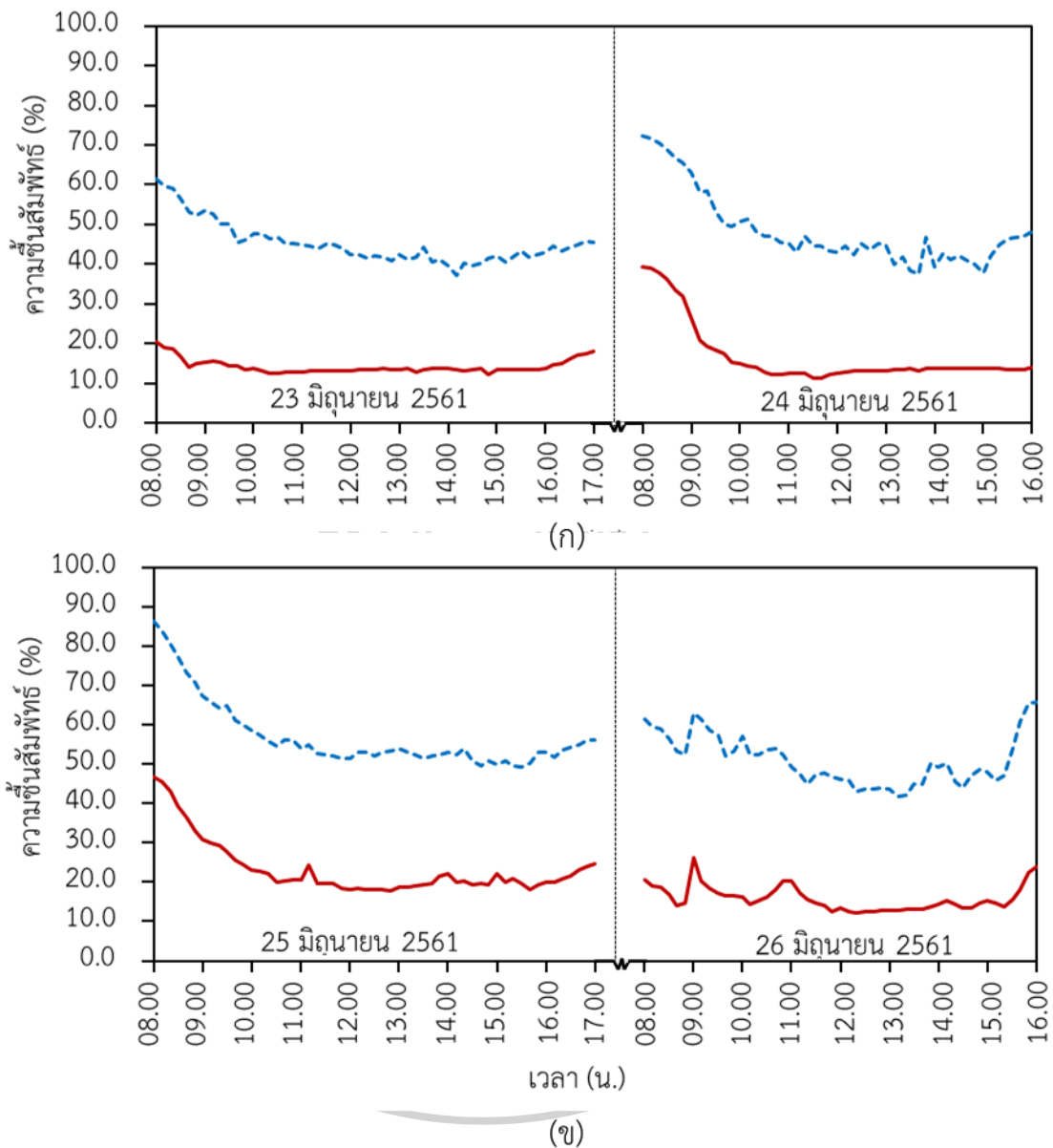
ภาพที่ 31 ความเข้มรังสีอาทิตย์ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดดของวันที่ทำแห้งโพลสำหรับการทดลองทำแห้งโพลซ้ำที่ 1 (ก) และซ้ำที่ 2 (ข)

- ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก
- - - ภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดด



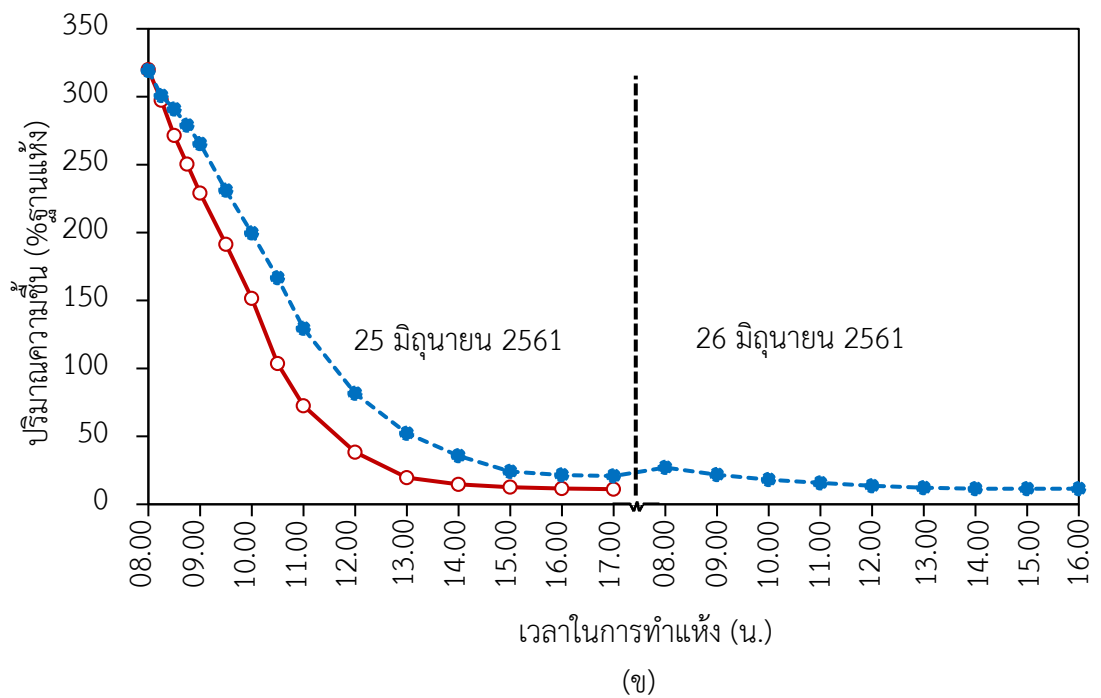
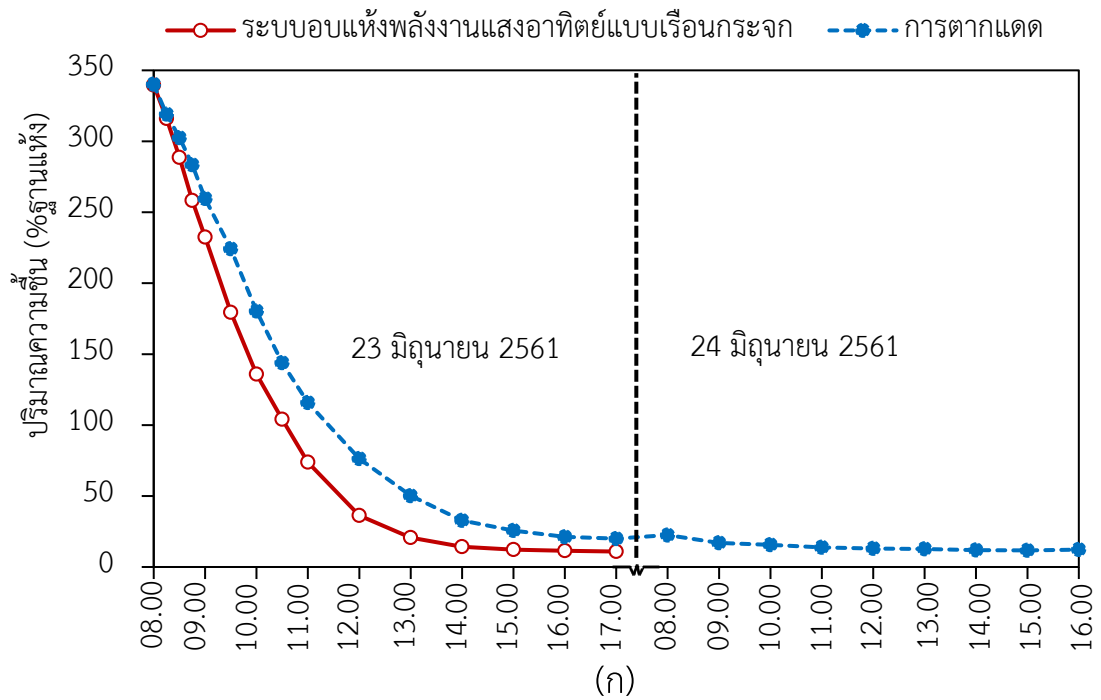
ภาพที่ 32 อุณหภูมิภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดดของวันที่ทำแห้งไพล สำหรับการทดลองทำแห้งไพลซ้ำที่ 1 (ก) และซ้ำที่ 2 (ข)

- ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก
- - - ภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดด

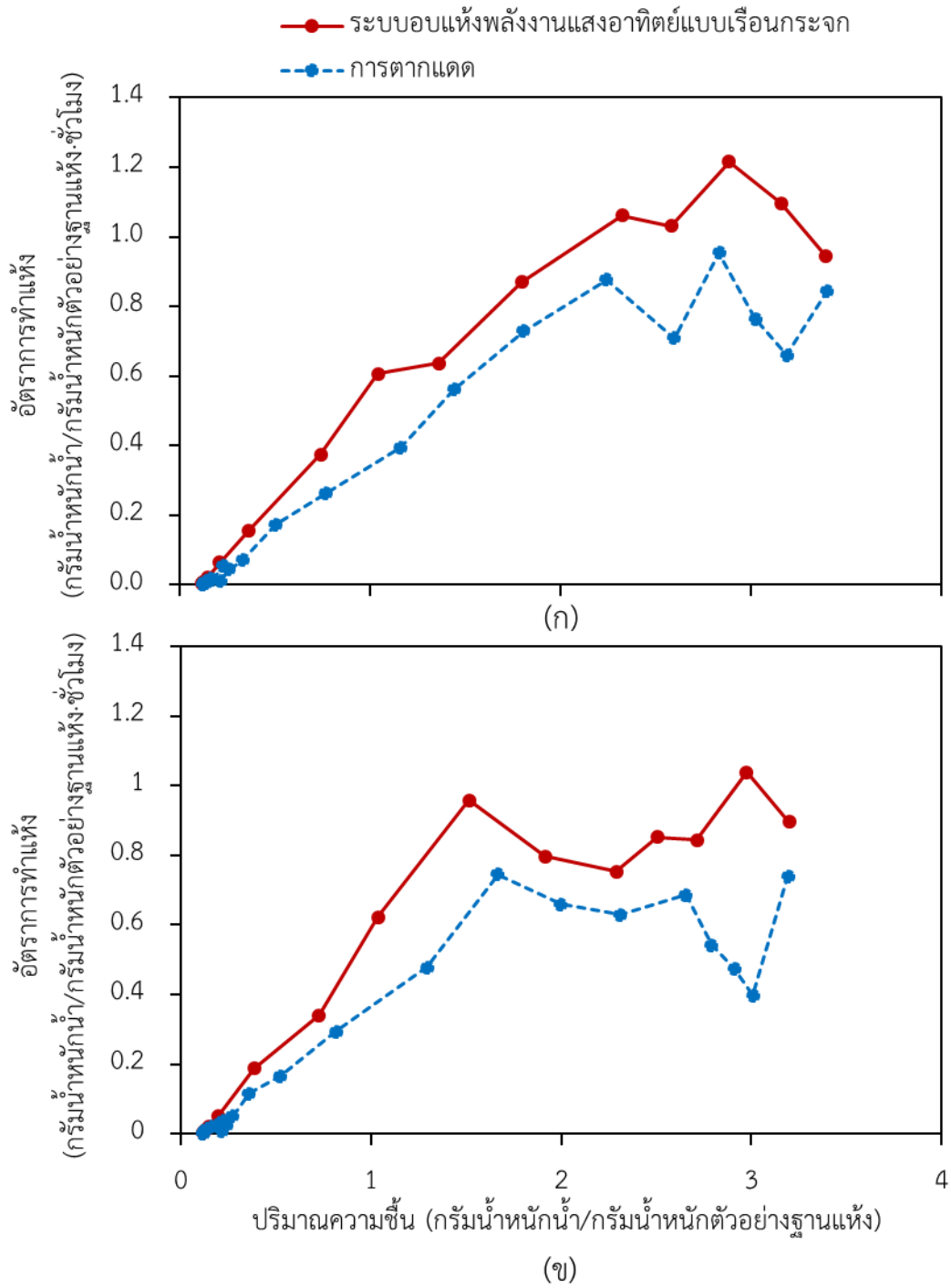


ภาพที่ 33 ความขึ้นสัมพัทธ์ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดดของวันที่ทำแห้งไพล สำหรับการทดลองทำแห้งไพลซ้ำที่ 1 (ก) และซ้ำที่ 2 (ข)

- ภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก
- - - ภายนอกของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกหรือการตากแดด



ภาพที่ 34 กราฟการทำแห้งของไฟลวิธีกรทำแห้งด้วยระบบบอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรื่อนกระจกและการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



ภาพที่ 35 อัตราการทำแห้งของไพลอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2

4.5 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เรือนกระจกและการตากแดดต่อคุณภาพและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไพลอบแห้ง

4.5.1 ปริมาณความชื้น และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้

จากตารางที่ 23 แสดงให้เห็นว่าการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกใช้ระยะเวลาในการทำแห้งเร็วกว่าการตากแดด เนื่องจากการตากแดดมีอุณหภูมิสมร้อนอยู่ในช่วง 28.9-39.6 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 37.0-72.2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกอยู่ในช่วง 08.00-17.00 น. ที่มีอุณหภูมิสมร้อน 38.6-57.0 องศาเซลเซียส และค่าความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงร้อยละ 11.4-39.5 ในภาพที่ 31-32 ทำให้ใช้เวลาในการทำแห้งน้อยกว่า และในการทำแห้งนี้ทำให้มีค่าปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน (สถาบันวิจัยสมุนไพร, 2557) ร้อยละ 10 และค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของไพลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.369 และ 0.421

ตารางที่ 23 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ของไพลอบแห้ง

ตัวอย่างไพล	เวลาในการทำแห้ง (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น ^{ns} (%)	ค่าวอเตอร์แอกติวิตี้
ก่อนการทำแห้ง		77.01±0.91	0.995±0.001
หลังการทำแห้ง			
- ระบบอบแห้ง ^a	8	10.92±4.91	0.369±0.068 ^a
- การตากแดด	30	10.69±0.17	0.421±0.011 ^b

^{a, b} และ ^c หมายถึงตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.5.2 ลักษณะปรากฏและค่าสี






วิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีผลต่อคุณภาพด้านสีของไหลอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 24) โดยไหลก่อนการทำแห้งมีค่า L^* , b^* และ Chroma เท่ากับ 63.70 ± 0.47 , 64.27 ± 0.02 และ 65.10 ± 0.05 ตามลำดับ หลังจากทำแห้งไหลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด พบว่าค่า b^* และค่า chroma ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยขึ้นไหลด้านบนที่รับแสงอาทิตย์โดยตรงของไหลมีค่า b^* และค่า chroma ซึ่งแสดงสีเหลืองลดลงมากกว่าด้านหลังที่ติดตะแกรง (ตารางที่ 24)

ไหลด้านบนที่รับแสงอาทิตย์โดยตรงที่ทำแห้งด้วยการตากแดดจะมีลักษณะสีคล้ำกว่าการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ซึ่งสอดคล้องกับค่า a^* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่ง a^* บวก แสดงถึงสีแดง โดยค่า a^* ของไหลแห้งที่ได้จากการตากแดดมีค่ามากกว่าไหลที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก ทั้งนี้อาจเนื่องจากการทำแห้งไหลด้วยการตากแดดมีอุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลานาน ดังนั้นผลิตภัณฑ์มีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจน ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง (enzymatic browning reaction) สำหรับค่า b^* และค่า chroma ทั้งสองวิธีมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 24)

สำหรับคุณภาพด้านสีของไหลด้านหลังที่ติดกับตะแกรงที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกลักษณะปรากฏยังคงมีสีเหลืองเมื่อเปรียบเทียบกับไหลที่ทำแห้งด้วยการตากแดด ซึ่งสอดคล้องกับค่า b^* ของไหลที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีค่ามากกว่าวิธีการตากแดดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าสีทั้งหมด (total color different, ΔE) จากทั้งสองด้าน โดยเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของไหลอบแห้งในแต่ละด้านที่ได้จากทั้งการทำแห้งทั้งสองวิธีกับไหลก่อนการทำแห้ง พบว่าค่า ΔE ของไหลด้านหลังที่ติดกับตะแกรงที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีค่าน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีการใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เคลือบสารป้องกันรังสียูวี ซึ่งอาจทำให้ช่วยลดการลดลงของสีเหลืองในไหล สำหรับการลดลงของสีเหลืองในไหลอาจเนื่องมาจากสารเคอร์คูมินซึ่งเป็นสารที่ให้สีเหลืองในไหลสามารถเสื่อมสลายได้จากแสง (Borah และคณะ, 2017)

ตารางที่ 24 ผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อคุณภาพด้านสีของไหลอบแห้ง

พารามิเตอร์	หลังการทำแห้ง				
	ก่อนการทำแห้ง	ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์			การตากแดด
					
		ด้านที่รับแสงโดยตรง	ด้านที่หลังที่ติดตะแกรง	ด้านที่รับแสงโดยตรง	ด้านที่หลังที่ติดตะแกรง
L* ^{ns}	63.70±0.47	65.08±3.84	63.98±3.89	64.71±0.65	65.12±0.71
a*	10.30±0.15 ^a	4.24±0.18 ^c	6.47±0.09 ^b	6.47±0.13 ^b	4.30±0.17 ^c
b*	64.27±0.02 ^a	26.15±0.02 ^c	39.25±3.92 ^b	26.62±0.47 ^c	25.74±0.44 ^c
Chroma	65.10±0.05 ^a	25.56±0.05 ^c	39.79±3.88 ^b	27.41±0.44 ^c	26.12±0.47 ^c
hue°	80.89±0.13 ^a	79.81±0.13 ^a	80.60±0.78 ^a	76.38±0.49 ^b	80.55±0.09 ^a
ΔE	-	39.69±2.23 ^a	25.50±3.44 ^b	37.87±0.45 ^a	39.03±0.46 ^a

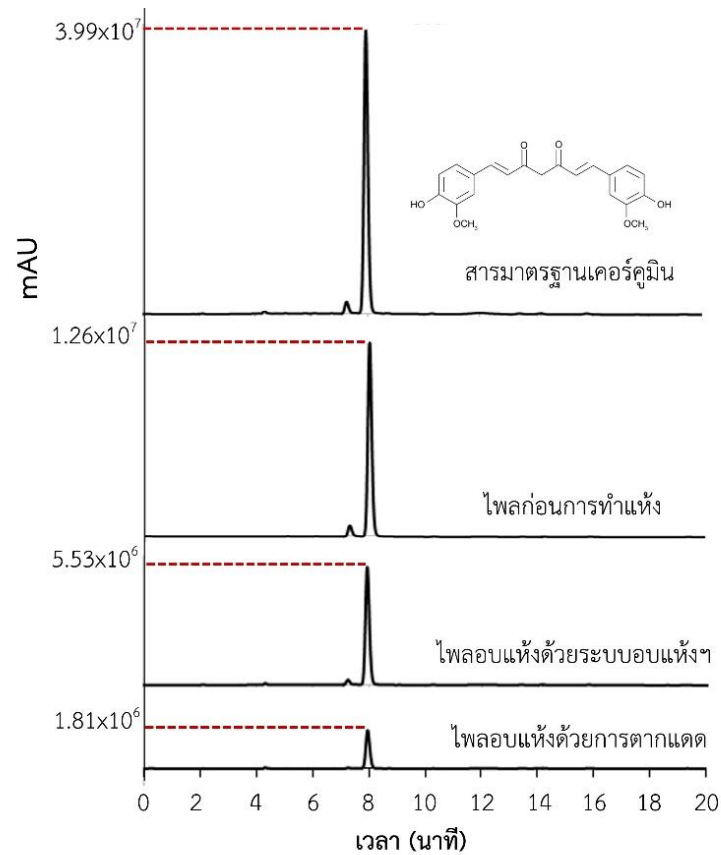
a, b และ c หมายถึงตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

4.5.3 ปริมาณเคอร์คูมิน

ตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารมาตรฐานเคอร์คูมิน และสารเคอร์คูมินของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี HPLC ที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 36 ซึ่งพบพีคที่เวลา (retention time) 8.0 นาที จะเห็นได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟของพีคเคอร์คูมินในไพลหลังการทำแห้งทั้งสองวิธีมีปริมาณลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับไพลก่อนการทำแห้ง และตารางที่ 25 แสดงปริมาณเคอร์คูมินของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด วิธีการทำแห้งมีผลต่อการลดลงของปริมาณเคอร์คูมินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยไพลอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดจะมีค่าปริมาณเคอร์คูมินน้อยกว่าไพลก่อนการทำแห้ง ทั้งนี้การเสื่อมสลายของเคอร์คูมินเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ โดยเคอร์คูมินจะทำการดูดซับโฟตอนที่มาความยาวคลื่นแสงทำให้เกิดการแตกพันธะ (cleavage bonding) เกิดการสลายตัวของเคอร์คูมินไปเป็นเฟอร์ูลิกอัลดีไฮด์ (ferulic aldehyde) กรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) วานิลลิน (vanillin) 4-ไวนิลกัวไอคอล (4-vinylguaiacol) และกรดวานิลลิก (vanillic acid) (Lestari และ Indrayanto, 2014)

วิธีการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีผลต่อร้อยละการสูญเสียของปริมาณเคอร์คูมินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 25) โดยร้อยละการสูญเสียของปริมาณเคอร์คูมินที่ทำแห้งด้วยวิธีการตากแดดการสูญเสียของปริมาณเคอร์คูมินร้อยละ 85.39 มากกว่าไพลที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกที่มีการสูญเสียปริมาณเคอร์คูมินร้อยละ 64.11 ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีการใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เคลือบสารป้องกันรังสียูวี ทำให้รังสียูวีผ่านเข้าไปในระบบได้น้อย สามารถช่วยลดการสลายตัวของเคอร์คูมินเนื่องมาจากแสง ผลของวิธีการทำแห้งต่อปริมาณเคอร์คูมินสอดคล้องกับการศึกษาของ Raza และคณะ (2018) พบว่าการตากแดดแห้งน้ำมันชั้นทำให้เคอร์คูมินสลายตัวมากกว่าการทำแห้งในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมและการทำแห้งในที่ร่ม (Shade drying) ซึ่งแห้งน้ำมันชั้นอบแห้งที่ได้จากการทำแห้งแต่ละวิธีมีปริมาณเคอร์คูมินร้อยละ 1.40 ± 0.13 , 1.68 ± 0.08 และ 2.16 ± 0.11 ตามลำดับ



ภาพที่ 36 ตัวอย่างโครมาโตแกรม HPLC ของสารมาตรฐานเคอร์คูมิน และสารเคอร์คูมินของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดที่ความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร

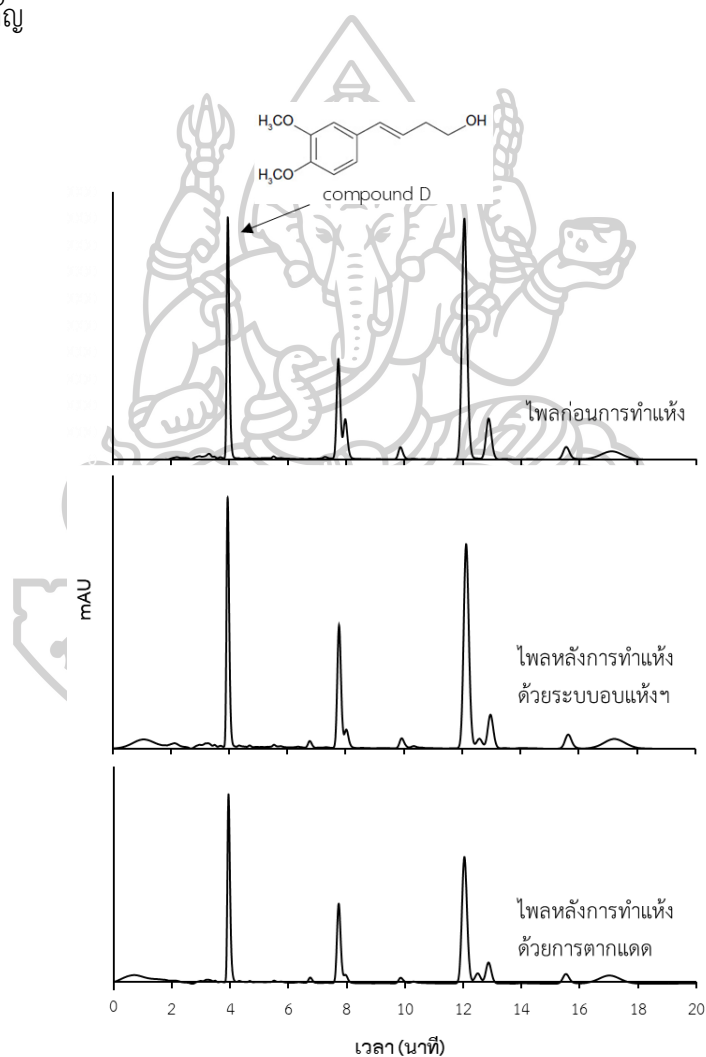
ตารางที่ 25 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อปริมาณเคอร์คูมินในไพล

ตัวอย่างไพล	ปริมาณเคอร์คูมิน กรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง)	% การเปลี่ยนแปลง
ก่อนการทำแห้ง	3.70±0.04 ^a	-
หลังการทำแห้ง - ระบบอบแห้งฯ	1.33±0.10 ^b	-64.11±3.38 ^a
- การตากแดด	0.54±0.04 ^c	-85.39±1.24 ^b

a, b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.5.4 สาร compound D

โครมาโตแกรม HPLC ของสารมาตรฐานเคอร์คูมิน และสารเคอร์คูมินของไพลสดและไพลที่ทำผ่านการทำแห้งวิธีการทำแห้งด้วย ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร วิเคราะห์ด้วยวิธี HPLC แสดงดังภาพที่ 37 โดยพีคที่ 1 คือ compound D ซึ่งตรวจพบที่เวลา 3.9 นาที โดยมีเลข m/z เท่ากับ $208.1+[H]^+$ และเกิดความการดูดกลืนสูงสุดที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร จากตารางที่ 26 พบว่าไพลที่ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีปริมาณสาร compound D ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 37 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร compound D ของไพลก่อนและหลังการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร

ตารางที่ 26 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อสาร compound D

ตัวอย่างไพล	Compound D ^{ns} (Area peak x10 ⁶)
ก่อนการทำแห้ง	11.76±0.89
หลังการทำแห้ง	
- ระบบอบแห้งฯ	12.69±0.67
- การตากแดด	11.65±1.51

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

4.5.5 ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย

การทำแห้งมีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพล โดยไพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยลดลงในทั้งสองวิธีการทำแห้ง ตัวอย่างไพลสดก่อนการทำแห้งมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 10.89 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง และไพลอบแห้งที่ได้มีค่าปริมาณ 7.68 และ 7.82 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง (ตารางที่ 27)

โดยการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยน้อยกว่าการทำแห้งไพลด้วยการตากแดด เนื่องจากอุณหภูมิภายในระบบฯ (38.6-57.0 องศาเซลเซียส) สูงกว่าอุณหภูมิในการตากแดด (28.9-38.6 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้น้ำมันหอมระเหยสามารถระเหยได้ง่าย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saeidi (2016) รายงานว่าวิธีการทำแห้งมีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในมินต์ โดยทำแห้งด้วยการทำแห้งในที่ร่ม การตากแดดและเครื่องอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณน้ำมันหอมระเหยมีน้อยอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และวิธีการทำแห้งในที่ร่ม มีปริมาณน้ำมันหอมระเหยมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.94 และ 0.93 (v/w) ตามลำดับ ส่วนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและวิธีการตากแดดมีปริมาณร้อยละ 0.72 และ 0.63 (v/w) ตามลำดับ ดังนั้นจะเห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและแสงแดดมีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยในไพล เมื่อพิจารณาร้อยละการสูญเสียของปริมาณน้ำมันหอมระเหยของไพลอบแห้งทั้งสองวิธีพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) เนื่องจากการทำแห้งไพลด้วยการตากแดดมีการใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานกว่าระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีผลให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยสูญเสียไปในระหว่างการทำแห้งได้

ตารางที่ 27 ผลของการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยของไพลอบแห้ง

ตัวอย่างไพล	ปริมาณน้ำมันหอมระเหย (%v/w)	% การเปลี่ยนแปลง ^{ns}
ก่อนการทำแห้ง	10.89±0.19 ^a	-
หลังการทำแห้ง		
- ระบบอบแห้งฯ	7.68±0.15 ^c	-30.08±2.61
- การตากแดด	7.82±0.04 ^b	-28.76±0.87

a, b และ c หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

จากตารางที่ 28 พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยทั้งหมด 26 ชนิด จะเห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีหลักที่พบในน้ำมันหอมระเหยไพลก่อนและหลังการทำแห้งทั้งสองวิธี คือซาบินีนร้อยละ 44.9-48.3 DMPBD ร้อยละ 25.3-29.8 และเทอร์ไพเนน-4-อล ร้อยละ 9.8-8.6 ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักที่พบมากในไพล (Bua-in และ Paisooksantivatana (2009), Manochai และคณะ (2010), Verma และคณะ (2018)) โดยน้ำมันหอมระเหยไพลจะพบสารกลุ่มโมโนเทอร์พีนไฮโดรคาร์บอนมากที่สุดร้อยละ 55-57 ซึ่งสอดคล้องกับซาบินีนที่มีปริมาณมาก และรองลงมาคือสารกลุ่มฟีนิวบิวทานอยด์ร้อยละ 25-27 สารกลุ่มออกซิเจนเตตโรโมโนเทอร์พีนร้อยละ 9-10 และพบสารกลุ่มเซสควิเทอร์พีนไฮโดรคาร์บอนน้อยที่สุดประมาณร้อยละ 1.5

วิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีผลต่อปริมาณซาบินีนเพิ่มขึ้นและปริมาณ DMPBD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับไพลก่อนการทำแห้ง โดยการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีปริมาณซาบินีนน้อยกว่าการทำแห้งไพลด้วยวิธีตากแดด ทั้งนี้สารซาบินีนจัดอยู่ในกลุ่มโมโนเทอร์พีนไฮโดรคาร์บอน มีขนาดโมเลกุลน้อยจึงสามารถระเหยได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูง และการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีปริมาณ DMPBD มากกว่าการทำแห้งไพลด้วยวิธีตากแดด ทั้งนี้สาร DMPBD อาจเสื่อมสลายได้จากแสงยูวี ซึ่งระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีการใช้แผ่นโพลีคาร์บอเนตที่เคลือบสารป้องกันรังสียูวี ทำให้รังสียูวีผ่านเข้าไปในระบบได้น้อยกว่า

จากตารางจะเห็นว่าไพลภายหลังการทำแห้งสารกลุ่มออกซิเจนเตตโรโมโนเทอร์พีนมีปริมาณลดลงจากไพลก่อนการทำแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากแสงอาจมีผลต่อสารในกลุ่มออกซิเจนเตตโรโมโน

เทอร์พีน (Saeidi, 2016) นอกจากนี้สารกลุ่มฟีนอลิกในโพลีเมอร์ทำแห้งด้วยการตากแดด มีปริมาณน้อยกว่าโพลีเมอร์ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



ตารางที่ 28 ผลของวิธีการทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหยของไพล

องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย	ก่อนทำแห้ง	หลังทำแห้ง	
		ระบบอบแห้งฯ	การตากแดด
α -thujene ^{ns}	0.23±0.01	0.27±0.03	0.29±0.02
α -pinene ^{ns}	1.01±0.01	1.14±0.17	1.19±0.09
sabinene	44.89±0.01	47.64±0.01 ^a	48.83±0.00 ^b
β -Pinene ^{ns}	2.04±0.00	2.29±0.22	2.41±0.07
myrcene ^{ns}	1.27±0.04	1.38±0.11	1.41±0.03
α -terpinene ^{ns}	1.09±0.10	1.03±0.06	1.04±0.02
ρ -cymene ^{ns}	0.19±0.00	0.25±0.06	0.32±0.01
β -phellandrene ^{ns}	0.77±0.00	0.73±0.18	0.78±0.03
γ -terpinene ^{ns}	2.35±0.19	2.41±0.13	2.62±0.03
cis-sabinene hydrate ^{ns}	0.30±0.01	0.37±0.03	0.38±0.01
terpinolene ^{ns}	0.42±0.04	0.41±0.02	0.45±0.01
trans-sabinene hydrate ^{ns}	0.25±0.02	0.33±0.04	0.36±0.02
cis-p-menth-2-ene-1-ol ^{ns}	0.21±0.01	0.22±0.00	0.24±0.02
trans-p-menth-2-ene-1-ol ^{ns}	0.12±0.01	0.13±0.00	0.17±0.02
terpinen-4-ol ^{ns}	9.80±0.15	8.45±0.39	8.62±0.51
α -terpineol ^{ns}	0.14±0.01	0.14±0.01	0.16±0.01
trans-piperitol ^{ns}	0.07±0.00	0.07±0.00	0.08±0.01
α -terpinyl acetate ^{ns}	0.21±0.01	0.24±0.00	0.24±0.01
α -zingiberene ^{ns}	0.15±0.01	0.11±0.02	0.11±0.01
β -sesquiphellandrene	1.22±0.11	1.00±0.01 ^b	1.07±0.00 ^a
germacrene B ^{ns}	0.33±0.03	0.41±0.11	0.34±0.01
(Z)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)buta-1,3-diene	0.39±0.16	0.89±0.14 ^b	1.35±0.01 ^a
(E)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)but-1-ene ^{ns}	1.07±0.12	1.13±0.05	1.17±0.12
DMPBD	29.75±0.08	27.68±0.03 ^a	25.31±0.74 ^b
1-(2',4',5'-Trimethoxy phenyl)but-1-ene ^{ns}	0.16±0.01	0.13±0.06	0.14±0.03
TMPBD ^{ns}	1.55±0.05	1.14±0.28	0.91±0.02
monoterpene hydrocarbons ^{ns}	54.27±0.38	57.55±0.97	59.35±0.17
Oxygenated monoterpenes ^{ns}	11.10±0.13	9.95±0.48	10.24±0.43
sesquiterpene hydrocarbon ^{ns}	1.69±0.09	1.53±0.08	1.52±0.01
phenylbutaniods	32.92±0.31	30.97±0.40 ^a	28.88±0.62 ^b

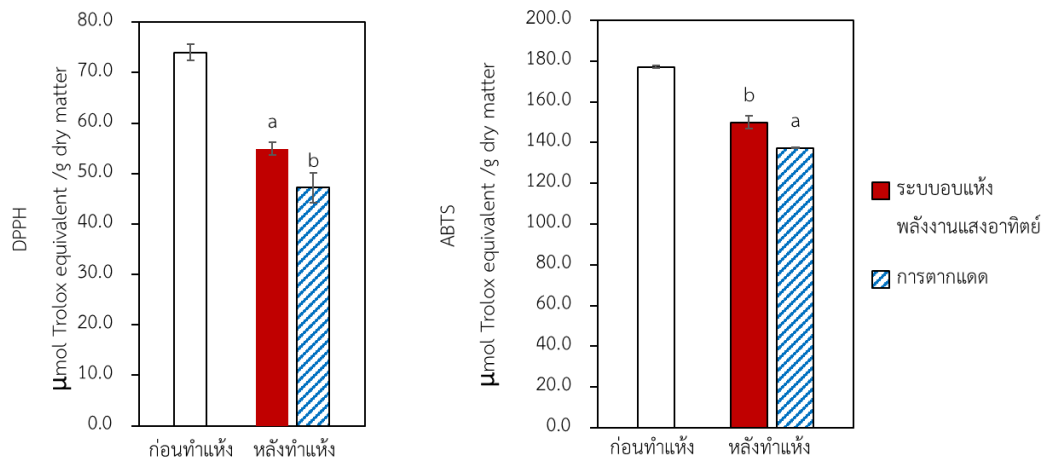
^a และ ^b หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแถวเดียวกัน

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในคอลัมน์เดียวกัน

4.5.6 ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน

วิธีการทำแห้งมีผลต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 38 จะเห็นว่าโพลที่ผ่านการทำแห้งมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันลดลงเมื่อเทียบโพลสดก่อนการทำแห้ง การลดลงของความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันอาจเกิดจากการสูญเสียปริมาณเคอร์คูมินและปริมาณน้ำมันหอมระเหย ซึ่งสารต้านออกซิเดชันที่พบในโพลส่วนใหญ่เป็นสารประกอบในน้ำมันหอมระเหยโพล ได้แก่ ซาบินิน เทอร์ไพเนน-4-ออล แอลฟา-เทอร์ไพเนนและ แกมมา-เทอร์ไพเนน เป็นต้น โดยสารประกอบเหล่านี้เมื่อการทำแห้งทำให้เกิดการสูญเสียของปริมาณน้ำมันหอมระเหย ดังนั้นจึงทำให้มีความสามารถในการต้านออกซิเดชันลดลง

จากการศึกษาพบว่าโพลที่ผ่านการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าโพลที่ผ่านการตากแดดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งทั้งวิธี DPPH และวิธี ABTS มีแนวโน้มผลเช่นเดียวกัน การลดลงของความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันอาจเนื่องจากอุณหภูมิและแสงทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำมันหอมระเหยและปริมาณเคอร์คูมิน เนื่องจากเคอร์คูมินมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน (Ak และ Gulcin, 2008) ผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Lakshmi และคณะ (2018) ศึกษาผลของวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันในชันขมิ้นม่วง (*Curcuma caesia*) พบว่าการตากแดดชันขมิ้นม่วงเป็นเวลา 46.5 ชั่วโมง ทำให้สูญเสียความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเวลา 18.5 ชั่วโมง ซึ่งชันขมิ้นม่วงอบแห้งที่ได้มีร้อยละการลดลงของปริมาณสารต้านออกซิเดชันเท่ากับ 54.06 และ 40.95 ตามลำดับ โดยการลดลงของสารต้านออกซิเดชันซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับเคอร์คูมินในชันขมิ้นม่วง



ภาพที่ 38 ผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของไพลอบแห้ง^{a b c} หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละวิธีการทำแห้ง



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและวิธีการทำแห้งทั้งสามวิธีได้แก่ การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาด การทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดด มีผลต่ออัตราการทำแห้งของชิ้นไพล โดยการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิสูงมีอัตราการทำแห้งที่สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และอัตราการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีค่าสูงกว่าการตากแดด โดยเวลาที่ใช้ในการทำแห้งชิ้นไพลที่มีความหนา 0.2 เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 15, 5, 3, 2 และ 1.5 ชั่วโมงตามลำดับ เวลาที่ใช้ทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดเท่ากับ 8 และ 30 ชั่วโมง ตามลำดับ
2. สมการที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมการทำแห้งไพลที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ สมการ Page มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9994-0.9999 และ RMSE เท่ากับ 0.0001-0.001
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดทั้ง 5 ระดับไม่มีผลต่อค่าสีในไพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสามารถรักษาสีเหลืองของไพลได้ดี ในขณะที่การอบแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดทำให้สีเหลืองของไพลซีดลง แต่อย่างไรก็ตามการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกช่วยรักษาสีเหลืองของไพลได้ดีกว่าการตากแดด
4. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและวิธีการทำแห้งทั้งสามวิธีไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสาร compound D ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านการอักเสบ แต่มีผลต่อปริมาณเคอร์คูมินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) โดยไพลอบแห้งมีปริมาณเคอร์คูมินมากกว่าไพลสดก่อนการทำแห้ง ซึ่งสภาวะการทำแห้งไพลที่อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียสทำให้มีปริมาณเคอร์คูมินเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไพลก่อนการทำแห้ง ในขณะที่การทำแห้งไพลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดทำให้ปริมาณเคอร์คูมินลดลงเนื่องจากแสงแดดมีผลต่อการเสื่อมสลายของเคอร์คูมิน โดยการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีปริมาณเคอร์คูมินมากกว่าการตากแดด ซึ่งสอดคล้องกับค่าสีเหลืองของไพลอบแห้ง

5. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและวิธีการทำแห้งทั้งสามวิธีมีผลต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยการทำแห้งที่ระยะเวลาปานและอุณหภูมิสูงมีผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำมันหอมระเหย ทั้งนี้การทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส สามารถรักษาปริมาณน้ำมันหอมระเหยได้มากที่สุด ทำให้ไหลแห้งมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยร้อยละ 8.77 และ 9.28 มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่าง (ฐานแห้ง) ตามลำดับ ในขณะที่การอบแห้งไหลด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 7.68 และ 7.82 มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักตัวอย่างฐานแห้ง ตามลำดับ โดยองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยไหลที่พบมากในทุกอุณหภูมิได้แก่ ซาบินีน, DMPBD และ เทอร์ไพเนน-4-อล โดยอุณหภูมิและวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดส่งผลต่อการลดลงของ DMPBD อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

6. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งและวิธีการทำแห้งทั้งสามวิธีมีผลต่อการลดลงของความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันของขึ้นไหลอบแห้งเมื่อเทียบกับไหลสดก่อนการทำแห้ง โดยการทำแห้งที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทำให้สารต้านออกซิเดชันลดลงน้อยที่สุด ในขณะที่การทำแห้งไหลอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมีความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันมากกว่าไหลที่ทำแห้งด้วยวิธีการตากแดด

7. สภาวะการอบแห้งที่แนะนำสำหรับการอบแห้งขึ้นไหลหนา 0.2 เซนติเมตร ได้แก่ การทำแห้งไหลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสโดยใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคที่ใช้เวลาในการทำแห้ง 5 ชั่วโมง ส่งผลให้สามารถรักษาสีเหลืองของไหลได้ และไหลแห้งมีปริมาณเคอร์คูมิน น้ำมันหอมระเหยและความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่ดี อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องอบแห้งลมร้อนแบบภาคจะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก โดยมีอุณหภูมิในการทำแห้งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 50-55 องศาเซลเซียส ขึ้นกับความเข้มรังสีอาทิตย์สามารถทำแห้งไหลได้ภายใน 8 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าไหลมีสีเหลืองอ่อนลง แต่ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของไหลอบแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกนี้มีปริมาณใกล้เคียงกับไหลอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนแบบภาคที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณน้ำมันหอมระเหยเท่ากับร้อยละ 7.68 และ 8.77 ตามลำดับ ดังนั้นการใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกจึงเหมาะสมกับการทำแห้งไหลสำหรับนำไปสกัดน้ำมันหอมระเหย

รายการอ้างอิง

- Adams, R. 2017. Identification of essential oil components by gas chromatography/quadrupole mass spectroscopy. 4th edition. Allured Pub Corp. Illinois.
- Ak, T. and Gulcin, İ. 2008. Antioxidant and radical scavenging properties of curcumin. *Chemico-Biological Interactions*. 174(1): 27-37.
- Ayensu, A. 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*. 59(4): 121-126.
- Bhuiyan, M. N. I., Chowdhury, J. U. and Begum, J. 2008. Volatile constituents of essential oils isolated from leaf and rhizome of *Zingiber cassumunar* Roxb. *Bangladesh Journal of Pharmacology*. 3(2): 5.
- Borah, A., Sethi, L. N., Sarkar, S. and Hazarika, K. 2017. Effect of drying on texture and color characteristics of ginger and turmeric in a solar biomass integrated dryer. *Journal of Food Process Engineering*. 40(1): e12310.
- Brennan, J. G., Butters, J. R., Cowell, N. D. and Lilley, A. E. V. 1990. Food engineering operations. 3rd ed. Elsevier Applied Science. London.
- Bua-in, S. and Paisooksantivatana, Y. 2009. Essential oil and antioxidant activity of Cassumunar ginger (Zingiberaceae: *Zingiber montanum* (Koenig) Link ex Dietr.) collected from various parts of Thailand. *Kasetsart Journal - Natural Science*. 43: 467-475.
- Cb, S., Manglembi, N., Swapana, N. and Sb, C. 2015. Ethnobotany, phytochemistry and pharmacology of *Zingiber cassumunar* Roxb. (Zingiberaceae). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 4(1): 01-06.
- Chienthavorn, O., Poonsukcharoen, T. and Pathrakorn, T. 2011. Pressurized liquid and superheated water extraction of active constituents from *Zingiber cassumunar* Roxb. rhizome. *Separation Science and Technology*. 46(4): 616-624.
- Chongmelaxme, B., Sruamsiri, R., Dilokthornsakul, P., Dhippayom, T., Kongkaew, C., Saokaew, S., Chuthaputti, A. and Chaiyakunapruk, N. 2017. Clinical effects of

- Zingiber cassumunar* (Plai): a systematic review. *Complementary Therapies in Medicine*. 35: 70-77.
- Chua, L. Y. W., Chong, C. H., Chua, B. L. and Figiel, A. 2019. Influence of drying methods on the antibacterial, antioxidant and essential oil volatile composition of herbs: a review. *Food and Bioprocess Technology*. 12(3): 450-476.
- Department of Medical Sciences. 2009. Thai herbal pharmacopoeia 2009. 3rd ed. Department of Medical Sciences. Nonthaburi.
- Diamante, L. M. and Munro, P. A. 1993. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*. 51(4): 271-276.
- Fargali, H. M., Nafeh, A. , Fahmy, F. H. and Hassan, M. A. 2008. Medicinal herb drying using a photovoltaic array and a solar thermal system. *Solar Energy*. 82(12): 1154-1160.
- Fernandes, R. P. P., Trindade, M. A., Tonin, F. G., Lima, C. G., Pugine, S. M. P., Munekata, P. E. S., Lorenzo, J. M. and de Melo, M. P. 2016. Evaluation of antioxidant capacity of 13 plant extracts by three different methods: cluster analyses applied for selection of the natural extracts with higher antioxidant capacity to replace synthetic antioxidant in lamb burgers. *Journal of Food Science and Technology*. 53(1): 451-460.
- Ghosh, S., Banerjee, S. and Parames, C. 2015. The beneficial role of curcumin on inflammation, diabetes and neurodegenerative disease: A recent update. *Food and Chemical Toxicology*. 83: 111-124.
- Heger, M., van Golen, R. F., Broekgaarden, M. and Michel, M. C. 2014. The molecular basis for the pharmacokinetics and pharmacodynamics of curcumin and its metabolites in relation to cancer. *Pharmacological Reviews*. 66(1): 222-307.
- Janjai, S. 2012. greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: development and dissemination. *International Journal of Energy & Environment*. 3(3): 383-398.
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., Sritus, C. and Khamvongsa, V. 2011. A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: modeling and testing in a

- tropical environment of Lao people's democratic republic. *Renewable Energy*. 36(3): 1053-1062.
- Janjai, S., Piwsaoad, J., Nilnont, W. and Pankaew, P. 2015. Experimental performance and neural network modeling of a large-scale greenhouse solar dryer for drying natural rubber sheets. *Journal of Control Science Engineering*. 1(1): 48-53.
- Janpim, K., Nualkaew, S. and Priprem, A. 2012. Stability testing of a Plai extract. The 15th Graduate Research Conferences. 17 February 2012. Khon Kaen University.
- Jeenapongsa, R., Yoovathaworn, K., Sriwatanakul, K. M., Pongprayoon, U. and Sriwatanakul, K. 2003. Anti-inflammatory activity of (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl)butadiene from *Zingiber cassumunar* Roxb. *Journal of Ethnopharmacology*. 87: 143-148.
- Kaewchoothong, A., Tewtrakul, S. and Panichayupakaranant, P. 2012. Inhibitory effect of phenylbutanoid-rich *Zingiber cassumunar* extracts on nitric oxide production by murine macrophage-like RAW264.7 cells. *Phytotherapy Research*. 26(12): 1789-1792.
- Kaewkiew, J., Nabnean, S. and Janjai, S. 2012. Experimental investigation of the performance of a large-scale greenhouse type solar dryer for drying chilli in Thailand. *Procedia Engineering*. 32: 433-439.
- Kantayos, V. and Paisooksantivatana, Y. 2012. Antioxidant activity and selected chemical components of 10 *Zingiber spp.* in Thailand. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*. 7: 89-96.
- Katsuyama, Y., Kita, T. and Horinouchi, S. 2009. Identification and characterization of multiple curcumin synthases from the herb *Curcuma longa*. *Federation of European Biochemical Societies Letters*. 583(17): 2799-2803.
- Khangholil, S. and Rezaeinodehi, A. 2008. Effect of drying temperature on essential oil content and composition of sweet wormwood (*Artemisia annua*) growing wild in Iran. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 11(6): 934-937.
- Lakshmi, D. V. N., Muthukumar, P., Layek, A. and Nayak, P. 2018. Drying kinetics and quality analysis of black turmeric (*Curcuma caesia*) drying in a mixed mode

- forced convection solar dryer integrated with thermal energy storage. *Renewable Energy*. 120: 23-34.
- Lee, W. H., Loo, C. Y., Bebawy, M., Luk, F., Mason, R. S. and Rohanizadeh, R. 2013. Curcumin and its derivatives: their application in neuropharmacology and neuroscience in the 21st century. *Curr Neuropharmacol*. 11(4): 338-378.
- Lertsatitthanakorn, P., Taweechaisupapong, S., Aromdee, C. and Khunkitti, W. 2006. In vitro bioactivities of essential oils used for acne control. *International Journal of Aromatherapy*. 16(1): 43-49.
- Lestari, M. L. A. D. and Indrayanto, G. 2014. Chapter three-curcumin, Vol. 39, pp. 113-204 In Brittain, H. G. (Ed.). *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology*. Academic Press, Massachusetts.
- Li, G. and Liu, Z. 2009. Unusual antioxidant behavior of α - and γ -terpinene in protecting methyl linoleate, DNA, and erythrocyte. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 57(9): 3943-3948.
- Li, J., Shin, G. H., Lee, I. W., Chen, X. and Park, H. J. 2016. Soluble starch formulated nanocomposite increases water solubility and stability of curcumin. *Food Hydrocolloids*. 56: 41-49.
- Manochai, B., Paisooksantivatana, Y., Choi, H. and Hong, J. H. 2010. Variation in DPPH scavenging activity and major volatile oil components of cassumunar ginger, *Zingiber montanum* (Koenig), in response to water deficit and light intensity. *Scientia Horticulturae*. 126(4): 462-466.
- Masuda, T. and Jitoe, A. 1994. Antioxidative and antiinflammatory compounds from tropical gingers: isolation, structure determination, and activities of cassumunins A, B, and C, New complex curcuminoids from *Zingiber cassumunar*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 42(9): 1850-1856.
- Masuda, T. and Jitoe, A. 1995. Phenylbutenoid monomers from the rhizomes of *Zingiber cassumunar*. *Phytochemistry*. 39(2): 459-461.
- Masuda, T., Jitoe, A. and Nakatani, N. 1993. Structures of cassumunin A, B, and C, new potent antioxidants from *Zingiber cassumunar*. *Chemistry Letters*. 22(1): 189-192.

- Murthy, T. and Manohar, B. 2014. Hot air drying characteristics of mango ginger: Prediction of drying kinetics by mathematical modeling and artificial neural network. *Journal of Food Science and Technology*. 51(12): 3712-3721.
- Ozdemir, N., Ozgen, Y., Kiralan, M., Bayrak, A., Arslan, N. and Ramadan, M. F. 2018. Effect of different drying methods on the essential oil yield, composition and antioxidant activity of *Origanum vulgare* L. and *Origanum onites* L. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 12(2): 820-825.
- Paramapojn, S., Tippyang, S. and Gritsanapan, W. 2009. High-performance liquid chromatographic analysis of selected bioactive components in *Zingiber cassumunar* Roxb. *International Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*. 3: 34-38.
- Pongprayoon, U., Soontornsaratune, P., Jarikasem, S., Sematong, T., Wasuwat, S. and Claeson, P. 1997. Topical antiinflammatory activity of the major lipophilic constituents of the rhizome of *Zingiber cassumunar*. Part I: the essential oil. *Phytomedicine*. 3(4): 319-322.
- Pothitirat, W. and Gritsanapan, W. 2006. Variation of bioactive components in *Curcuma longa* in Thailand. *Current Science*. 91(10): 1397-1400.
- Priprem, A., Janpim, K., Nualkaew, S. and Mahakunakorn, P. 2016. Topical niosome gel of *Zingiber cassumunar* Roxb. extract for anti-inflammatory activity enhanced skin permeation and stability of compound D. *Journal of the American Association of Pharmaceutical Scientists*. 17(3): 631-639.
- Przygodzka, M., Zielinska, D., Ciesarová, Z., Kukurová, K. and Zielinski, H. 2014. Comparison of methods for evaluation of the antioxidant capacity and phenolic compounds in common spices. *LWT-Food Science and Technology*. 58(2): 321-326.
- Queiroz, C., Lopes, M., Fialho, E. and Valente-Mesquita, V. 2008. Polyphenol oxidase: characteristics and mechanisms of browning control. *Food Reviews International*. 24(4): 361-375.
- Quiroga, P. R., Asensio, C. M. and Nepote, V. 2015. Antioxidant effects of the monoterpenes carvacrol, thymol and sabinene hydrate on chemical and

- sensory stability of roasted sunflower seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 95(3): 471-479.
- Raza, A., Ali, A., Yusof, Y. A., Nasir, A. and Muneer, S. 2018. Effect of different drying treatments on concentration of curcumin in raw *Curcuma longa* L. *Food Research*. 2(6): 500-504.
- Saeidi, K. 2016. Effect of drying methods on essential oil content and composition of *Mentha longifolia* (L.) Hudson. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*. 19(2): 391-396.
- Sida, S., Samakradhamrongthai, R. and Utama-ang, N. 2019. Influence of maturity and drying temperature on antioxidant activity and chemical compositions in ginger. *Current Applied Science and Technology*. 19(1): 28-42.
- Souza, C. F., Baldissera, M. D., Silva, L. de L., Geihs, M. A. and Baldisserotto, B. 2018. Is monoterpene terpinen-4-ol the compound responsible for the anesthetic and antioxidant activity of *Melaleuca alternifolia* essential oil (tea tree oil) in silver catfish? *Aquaculture*. 486: 217-223.
- Sukatta, U., Rugthaworn, P., Punjee, P., Chidchenchey, S. and Keeratinijakal, V. 2009. Chemical composition and physical properties of oil from Plai (*Zingiber cassumunar* Roxb.) obtained by hydro distillation and hexane extraction. *Kasetsart Journal of Social Sciences*. 43(5): 212-217.
- Syed, H. K., Liew, K. B., Loh, G. O. K. and Peh, K. K. 2015. Stability indicating HPLC–UV method for detection of curcumin in *Curcuma longa* extract and emulsion formulation. *Food Chemistry*. 170: 321-326.
- Tanguenyongwatana, P. 2017. HPTLC analysis of (E)-4-(3',4'-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol in *Zingiber cassumunar* Roxb rhizome extract: method validation and its application on studying compound-genetic relationship. *Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*. 41: 1-6.
- Verma, R. S., Joshi, N., Padalia, R. C., Singh, V. R., Goswami, P., Verma, S. K., Iqbal, H., Chanda, D., Verma, R. K., Darokar, M. P., Chauhan, A. and Kandwal, M. K. 2018. Chemical composition and antibacterial, antifungal, allelopathic and

- acetylcholinesterase inhibitory activities of cassumunar-ginger. Journal of the Science of Food and Agriculture. 98(1): 321-327.
- Wang, Y., Lu, Z., Lv, F. and Bie, X. 2009. Study on microencapsulation of curcumin pigments by spray drying. European Food Research and Technology. 229: 391-396.
- White, G. M., Ross, I. J. and Poneleit, C. G. 1981. Fully exposed drying of popcorn. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 24(2): 466-0468.
- Wipawan, P., Narumol, T. and Yingmanee, T. 2012. Total phenolic contents, antibacterial and antioxidant activities of some Thai medicinal plant extracts. Journal of Medicinal Plants Research. 6(35): 4953-4960.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. 2562. ระบบจัดเก็บและรายงานข้อมูลภาวะการผลิตพืชระดับตำบล เรื่อง ข้อมูลการปลูกไพล (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 เมษายน 2562. เข้าถึงได้จาก <http://www.agriinfo.doe.go.th/>.
- กฤติยา, ไชยนอก. 2562. ไพลกับอาการแพ้และโรคหอบหืด (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อวันที่ 17 มีนาคม 2562. แหล่งที่มา http://medherbguru.gpo.or.th/articles/d64_ginger.pdf.
- คณะอนุกรรมการจัดทำตำราอ้างอิงยาสมุนไพรไทย. 2555. ตำราอ้างอิงสมุนไพรไทย :ไพล (PHLAI). วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 10(1): 52-56.
- บุญนาก หมิ่นอาจาสา ยิงยง ไพลสุขศานติวัฒนา และเบญญา มะโนชัย. 2554. ผลของอุณหภูมิมอบแห้งต่อคุณภาพของเหง้าไพล (*Zingiber montanum* (Koenig) Link ex. Dietr.). Thai Agricultural Research Journal. 29(1): 59-72.
- ประกาศคณะกรรมการพัฒนาระบบยาแห่งชาติ. เรื่อง บัญชียาหลักแห่งชาติ (ฉบับที่ 4) พ.ศ. 2554, ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 128 ตอนพิเศษ 72ง (วันที่ 28 มิถุนายน 2554): 57.
- พัชรเพ็ญ เพ็ญจำรัส ธรรมศักดิ์ พันธุ์แสนศรี และอนุกุล จันทร์แก้ว. (2552). การศึกษาแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมันหอมระเหยจากพืชท้องถิ่นในจังหวัดแพร่. มหาวิทยาลัยแม่โจ้-แพร่ เฉลิมพระเกียรติ: 51 หน้า
- วีไล รังสาดทอง. 2545. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น. กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยสมุนไพร. 2557. คุณภาพและมาตรฐานสมุนไพรไทย (ออนไลน์). เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 เมษายน 2562. เข้าถึงได้จาก

<http://www.agriman.doae.go.th/home/Research/Herb57/4.pdf>.

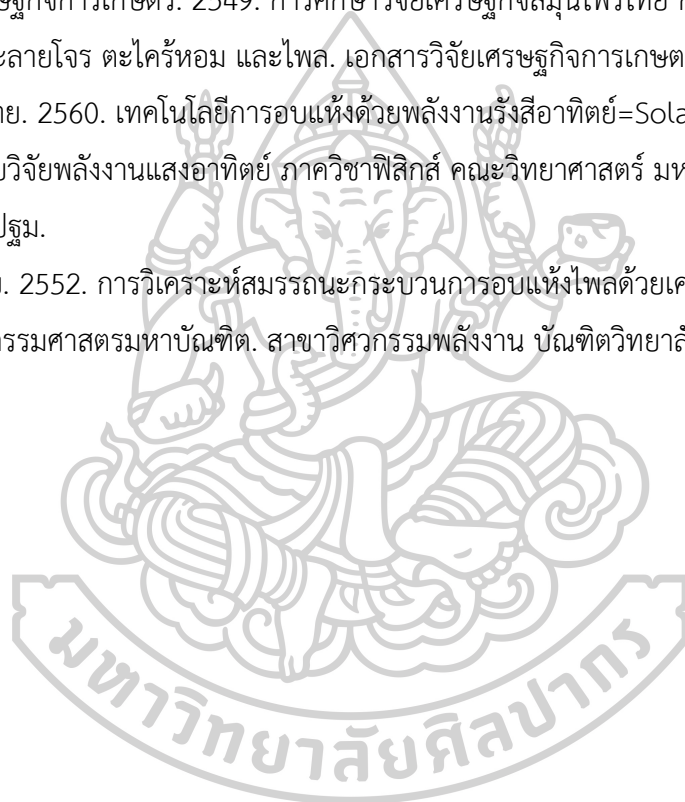
สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม. 2549. อิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และตัวทำละลายที่มีต่อการสกัดสารเคอร์คูมิน จากขมิ้น. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 33(3): 225-236.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2541. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 1679-2541.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2549. การศึกษาวิจัยเศรษฐกิจสมุนไพรไทย กรณีศึกษา ว่านหางจระเข้ ฟ้าทะลายโจร ตะไคร้หอม และโพล. เอกสารวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร เลขที่ 106.

เสริม จันทร์ฉาย. 2560. เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์=Solar drying technology. หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม.

อดุลย์ หลักชัย. 2552. การวิเคราะห์สมรรถนะกระบวนการอบแห้งโพลด้วยเครื่องอบแห้งป้อนความร้อน. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,







สมการที่ใช้ในการทำแห้ง

1. การหาปริมาณความชื้น (ฐานเปียก)

$$MC_{w.b.} = 100 \times \left(1 + \frac{W_f}{W_t} \left(\frac{MC_f}{100-1} \right) \right)$$

- เมื่อ $MC_{w.b.}$ หมายถึง ปริมาณความชื้นฐานเปียก
 W_f หมายถึง น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)
 W_t หมายถึง น้ำหนักที่เวลาใดๆ (กรัม)
 MC_f หมายถึง ความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์)

2. การหาปริมาณความชื้น (ฐานแห้ง)

$$MC_{d.b.} = 100 \times \left(\frac{MC_t}{100 - MC_t} \right)$$

- เมื่อ $MC_{d.b.}$ หมายถึง ปริมาณความชื้นฐานแห้ง (เปอร์เซ็นต์)
 MC_t หมายถึง ความชื้นที่เวลาใดๆ (เปอร์เซ็นต์)

3. การหาอัตราส่วนความชื้น

$$MR = \frac{MC_t - MC_{eq}}{MC_0 - MC_{eq}}$$

- เมื่อ MR หมายถึง อัตราส่วนความชื้น
 MC_0 หมายถึง ความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)
 MC_{eq} หมายถึง ความชื้นที่สมดุล (เปอร์เซ็นต์)

4. การหาอัตราการทำให้แห้ง

สมการ Newton $MR = \exp(-kt)$

สมการ Page $MR = \exp(-kt^n)$

สมการ Modified Page $MR = \exp((-kt)^n)$

- เมื่อ k และ n หมายถึง ค่าคงที่ในการทำแห้ง
 t หมายถึง เวลา

5. การคำนวณค่า RMSE (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \{MR_{pre} - MR_{exp}\}^2}{n} \right]^{0.5}$$

เมื่อ MR_{pre} หมายถึง อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการ
 MR_{exp} หมายถึง อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการทดลอง
 N หมายถึง จำนวนค่าสังเกต





ภาคผนวก ข

1. การวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมิน ด้วยวิธี HPLC (กองพัฒนายาแผนไทยและสมุนไพร, 2559)

1.1. การเตรียมการสกัดตัวอย่าง

- 1.1.1. นำโพลสตที่ผ่านการตัดแต่งบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง
- 1.1.2. แบ่งชั่งตัวอย่างโพลสตที่ผ่านการบดจำนวน 3 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ในขวดสีชา ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 1.1.3. เติมสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 ปริมาตร 7 มิลลิลิตร
- 1.1.4. นำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิก ที่มีความถี่ 45 kHz เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิ น้ำในอ่าง 30 องศาเซลเซียส
- 1.1.5. จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 4
- 1.1.6. นำส่วนของโพลที่สกัดแล้วมาทำการสกัดซ้ำ 2 ครั้งเช่นเดียวกับการสกัดข้างต้น และปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 25 มิลลิลิตร
- 1.1.7. จากนั้นนำสารสกัดที่ได้มาผ่านการกรองด้วยเมมเบรน ขนาด 0.45 ไมโครเมตร เก็บสารสกัดที่ผ่านการกรองใส่ขวดสีชา
- 1.1.8. นำไปวิเคราะห์ปริมาณเคอร์คูมินด้วยเข้าเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง

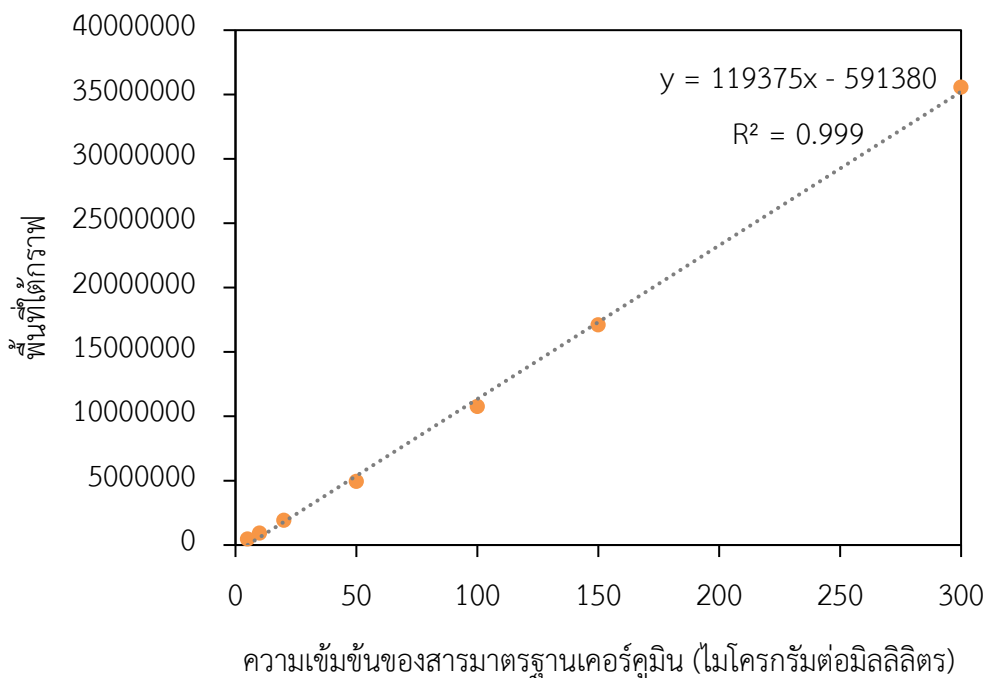
1.2. การเตรียมสารละลายมาตรฐานและสภาวะที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมิน โดยชั่งมาตรฐานเคอร์คูมินด้วยเครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่งปริมาณ 0.0050 ± 0.0001 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน ละลายสารมาตรฐานเคอร์คูมินด้วยสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 ปริมาตรในบีกเกอร์ขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 เป็น 10 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร จะได้ stock solution ของสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินที่มีความเข้มข้น 500 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรหรือ 500 ppm จากนั้นต้องทำการเจือจางสารละลายมาตรฐานเคอร์คูมินให้มีความเข้มข้นเป็น 5, 10, 20, 50, 100, 150 และ 300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ หลังจากเตรียมสารละลายมาตรฐานแล้วนำไปฉีดวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC แล้วจะได้พื้นที่ใต้กราฟของสารละลายมาตรฐานที่แต่ละความเข้มข้นนำมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานเคอร์คูมิน (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับพื้นที่ใต้กราฟจะได้เป็นกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน ดังแสดงจากภาพที่ 39

1.3 รายละเอียดของสภาวะ HPLC ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณคอร์คูมิน (กองพัฒนายาแผนไทย และสมุนไพร, 2559)

จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณคอร์คูมินด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวความดันสูง ที่มีประเภทของเครื่องตรวจวัดแบบ photodiode array detector โดยมีรายละเอียดของสภาวะ HPLC ที่ใช้ดังนี้

- ใช้คอลัมน์ C18 ในการแยกสารและควบคุมอุณหภูมิคอลัมน์ 25 องศาเซลเซียส
- โดยปริมาตรของสารตัวอย่างที่ฉีดเข้าเครื่อง 10 ไมโครลิตร
- เป็นระบบการชะแบบคงที่ตลอดการวิเคราะห์ (Isocratic)
- สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่สารละลายอะซิโตนไนโตรที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 ต่อสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 (57:43) กรองเฟสเคลื่อนที่ด้วยกระดาษกรองชนิด nylon ที่มีความละเอียด 0.45 ไมโครเมตร
- อัตราการไหลที่ 1.0 มิลลิลิตรต่อวินาที
- โดยติดตามปริมาณคอร์คูมินที่มีความยาวคลื่น 425 นาโนเมตร



ภาพที่ 39 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานคอร์คูมิน

แล้วนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้ของตัวอย่างโพลที่ได้ไปแทนค่าในสมการของกราฟมาตรฐาน เคอร์คูมินซึ่งอยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y=mx+c$ โดยแทนค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ได้ของตัวอย่างเป็นค่า y จะได้ออกมาเป็นค่า x จากนั้นคิดคำนวณเทียบกลับไปว่าตัวอย่างโพลมีปริมาณเคอร์คูมินกี่มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

2. การวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยในโพล

2.1. การเตรียมการสกัดตัวอย่าง

การพิสูจน์เอกลักษณ์องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหยในโพล โดยเปรียบเทียบสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวหรือสารมาตรฐานอัลเคน ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 7 ถึง 40 คาร์บอนอะตอม และเปรียบเทียบค่า retention index ที่คำนวณได้กับค่า retention index ในเอกสารอ้างอิง Adams (2005) และงานวิจัยของ Verma และคณะ (2018).

$$RI = \frac{100n+100(t_x-t_n)}{(t_{n+1} - t_n)}$$

- X = สารที่สนใจ
 n = จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาก่อนสารที่สนใจ
 n+1 = จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาหลังสารที่สนใจ
 t = เวลาที่สารแยกออกมา (ในหน่วยนาที่หรือวินาที)

ตัวอย่างการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหย

เวลาที่สาร x แยกออกมา คือ $t_x=12.611$ นาที่

จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาก่อนสารที่สนใจเท่ากับ $n=9$

เวลาที่จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาก่อนสารที่สนใจ เท่ากับ $t_n = 11.645$ นาที่

เวลาที่จำนวนคาร์บอนอะตอมของสารมาตรฐานอัลเคน ที่แยกออกมาหลังสารที่สนใจ เท่ากับ $t_{n+1} = 15.353$ นาที่

$$RI = \frac{(100 \times 9 \text{ คาร์บอน}) + 100 \times (12.611 \text{ นาที่} - 11.645 \text{ นาที่})}{(15.353 \text{ นาที่} - 11.645 \text{ นาที่})}$$

$$RI = 926$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า retention index ที่คำนวณได้กับค่า retention index ในเอกสารอ้างอิงงานพบว่า สาร X คือ α -thujene ซึ่งตัวอื่นๆ สามารถดูได้ใน ตารางที่

ตารางที่ 29 เปรียบเทียบการคำนวณ retention index องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันหอมระเหย
ในไพล

ลำดับ ที่	องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหย	n	t _(N)	t _(N+1)	t _(x)	RI		
						จากการ คำนวณ	Verma และคณะ (2018)	Adams (2005)
1	α -thujene	9	11.645	15.353	12.611	926	926	924
2	α -Pinene	9	11.645	15.353	12.914	934	932	932
3	sabinene	9	11.645	15.353	14.471	976	974	969
4	β -Pinene	9	11.645	15.353	14.601	980	978	974
5	Myrcene	9	11.645	15.353	14.909	988	990	988
6	α -Terpinene	10	15.353	19.294	16.017	1017	1016	1014
7	ρ -cymene	10	15.353	19.294	16.295	1024	1022	1020
8	β -Phellandrene	10	15.353	19.294	16.506	1029	1026	1025
9	γ -Terpinene	10	15.353	19.294	17.671	1059	1056	1054
10	cis-Sabinene hydrate	10	15.353	19.294	18.021	1068	1068	1065
11	Terpinolene	10	15.353	19.294	18.859	1089	1090	1086
12	trans-Sabinene hydrate	10	15.353	19.294	19.268	1099	1100	1098
13	cis-p-Menth-2-ene-1-ol	11	19.294	22.988	20.196	1124	1122	1118
14	trans-p-Menth-2-ene-1-ol	11	19.294	22.988	20.897	1143	1140	1136
15	terpinen-4-ol	11	19.294	22.988	22.384	1184	1178	1174
16	α -Terpineol	11	19.294	22.988	22.742	1193	1188	1186
17	trans-Piperitol	13	26.071	28.855	23.301	1201	1205	1207
18	α -terpinyl acetate	13	26.071	28.855	27.511	1352	1345	1346
19	α -Zingiberene	13	26.071	28.855	31.616	1499	1495	1493
20	β -Sesquiphellandrene	15	31.664	34.505	32.477	1529	1523	1521
21	Germacrene B	15	31.664	34.505	33.033	1549	1543	1559
22	(Z)-1-(3',4'-Dimethoxyphenyl) buta- 1,3-diene	15	31.664	34.505	33.559	1567	1564	-

ลำดับ ที่	องค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันหอมระเหย	n	t _(N)	t _(N+1)	t _(x)	RI		
						จากการ คำนวณ	Verma และคณะ (2018)	Adams (2005)
23	(E)-1-(3',4'-Dimethoxyphenyl)but-1-ene	15	31.664	34.505	34.269	1592	1589	-
24	(E)-1-(3',4'-Dimethoxy phenyl)buta-1,3-diene (DMPBD)	16	34.505	37.312	35.519	1636	1629	-
25	1-(2',4',5'-Trimethoxyphenyl) but-1-ene	17	37.312	40.054	39.106	1765	1762	-
26	(E)-1-(2',4',5'-Trimethoxyphenyl) buta-1,3-diene (TMPBD)	18	40.054	42.705	40.507	1817	1811	-

3. การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ตามวิธีของ Brand-Williams และคณะ (1994)

3.1. การเตรียมการสกัดตัวอย่าง

- 3.1.1 นำโพลสดที่ผ่านการตัดแต่งบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง
- 3.1.2 แบ่งซังตัวอย่างโพลสดที่ผ่านการบดจำนวน 3 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ในขวดสีชา ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 3.1.3 เติมน้ำกลั่นละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 7 มิลลิลิตร
- 3.1.4 นำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิก ที่มีความถี่ 45 kHz เป็นเวลา 30 นาที ควบคุมอุณหภูมิ น้ำในอ่าง 30 องศาเซลเซียส
- 3.1.5 จากนั้นกรองสารสกัดที่ได้ด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 4
- 3.1.6 นำส่วนของโพลที่สกัดแล้วมาทำการสกัดซ้ำ 2 ครั้งเช่นเดียวกับการสกัดข้างต้น และปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 25 มิลลิลิตร ทำการสกัด 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH Radical Scavenging Assay และวิธี ABTS Radical cation decolouration Assay ดังต่อไปนี้

3.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH ตัดแปลงจาก Brand-Williams และคณะ (1994)

3.2.1 การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสาร 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) ความเข้มข้น 6×10^{-5} M โดยการชั่ง DPPH จำนวน 0.0118 กรัม ในปิกรเกอร์ขนาดเล็ก ค่อยๆเติมเมทานอลลงไปละลาย เมื่อ DPPH ละลายหมดแล้วปรับปริมาตรด้วยเมทานอลจนได้ 500 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร

3.2.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid)

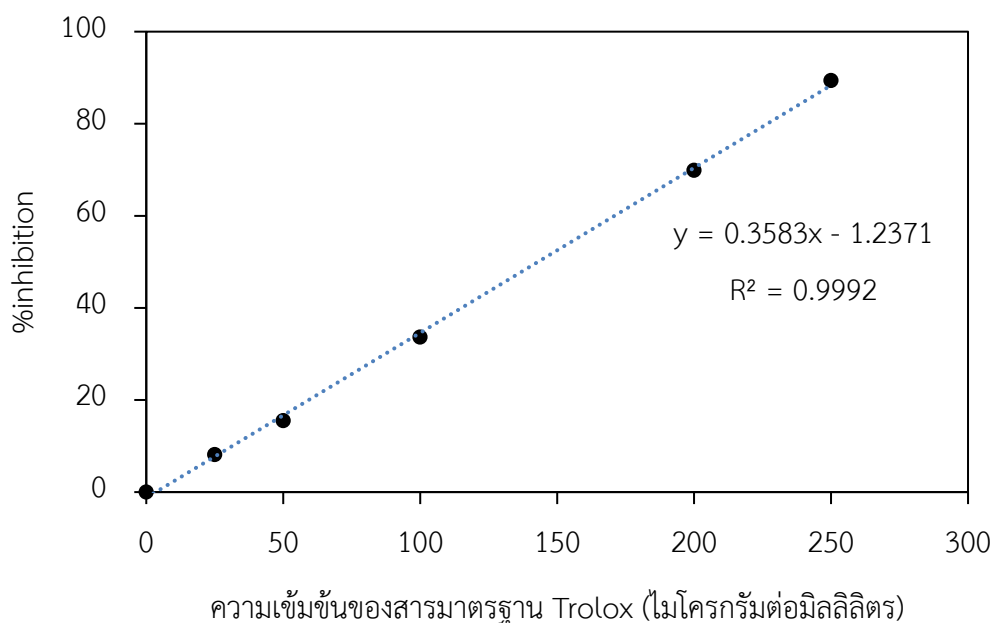
โดยการชั่งสารละลาย Trolox จำนวน 0.0250 ± 0.0005 กรัม ละลายด้วยเมทานอลในปิกรเกอร์ขนาดเล็ก และปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ได้ 100 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร จากนั้นต้องทำการเจือจางสารมาตรฐานให้มีความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Trolox เป็น 50, 100, 150, 200 และ 250 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ โดยหลังจากเตรียมสารละลาย Trolox แล้วปิเปิดสารละลาย Trolox ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรทำปฏิกิริยากับ DPPH ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองที่มีพลาสติกสีดำคลุม tube rack อยู่ ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 100 นาที นำสารสกัดโพลที่ทำปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยสารละลายแบลนด์ (blank) คือสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 และสารละลายควบคุม (control) คือสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรผสมกับ DPPH ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร นำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรมาคำนวณหาร้อยละการยับยั้ง (%inhibition) จากสูตร

$$\%inhibition = \frac{A_{control_{517}} - A_{sample_{517}}}{A_{control_{517}}} \times 100$$

A_{sample} = ค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง

$A_{control}$ = ค่าการดูดกลืนแสงของ (เมทานอลความเข้มข้น 70 (เปอร์เซ็นต์, ปริมาตรต่อปริมาตร) 0.1 มิลลิลิตร + สารละลาย DPPH 3.9 มิลลิลิตร)

จากนั้นนำ %inhibition ที่ได้มากับความเข้มข้นของสาร Trolox มาสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน Trolox ด้วยวิธี DPPH

3.2.3 วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ทำได้โดยเจือจางสารสกัดที่ได้จากข้อ 2.1 ให้มีความเข้มข้น 1/5 จากนั้นปิเปตสารสกัดที่ได้มา ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรทำปฏิกิริยากับ DPPH ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองที่มีพลาสติกสีดำคลุม tube rack อยู่ เขย่าสารละลายให้เข้ากันด้วยเครื่อง vortex mixer ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 100 นาที นำสารสกัดไหลที่ทำปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยสารละลายแบลนด์ (blank) คือสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 100 และสารละลายควบคุม (control) คือสารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับ DPPH ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร โดยนำค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดตัวอย่างมาคำนวณหาร้อยละการยับยั้ง (%inhibition) และเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 2.2.2 แล้วรายงานผลเป็นไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อกรัมของตัวอย่าง

3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการต้านออกซิเดชันด้วยวิธี ABTS ดัดแปลงจาก Re และ คณะ (1999)

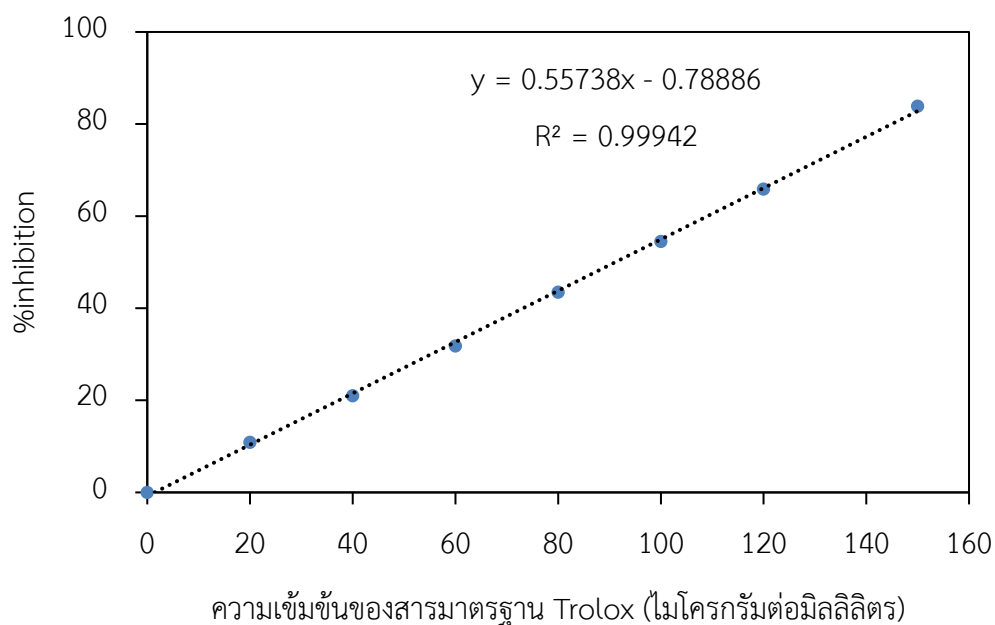
3.3.1 การเตรียมสารละลาย

1. สารละลาย 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS)
ทำการเตรียมสารละลาย 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS) ที่มีความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ โดยชั่งสารละลาย ABTS จำนวน 0.01920 กรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตร 5 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร
2. สารละลายโปแตสเซียมเปอร์ซัลไฟต์
ทำการเตรียมสารละลายโปแตสเซียมเปอร์ซัลไฟต์ความเข้มข้น 2.6 มิลลิโมลาร์ โดยชั่งสารโปแตสเซียมเปอร์ซัลไฟต์ จำนวน 0.7028 กรัม ละลายในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร
3. การเตรียมสาร ABTS reagent
เตรียมสาร ABTS reagent โดยผสมสารละลาย ABTS ที่มีความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโปแตสเซียมเปอร์ซัลไฟต์ความเข้มข้น 2.6 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเจือจางสารละลาย ABTS reagent ด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 นำไปวัดด้วยยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ให้สารละลาย ABTS reagent มีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 1.100 ± 0.020

3.3.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid)

โดยการชั่งสารละลาย Trolox จำนวน 0.0250 ± 0.0005 กรัม ละลายด้วยเมทานอลในปิ๊กเกอร์ขนาดเล็ก และปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้ได้ 100 มิลลิลิตรในขวดปรับปริมาตร จากนั้นต้องทำการเจือจางสารมาตรฐานให้มีความเข้มข้นของสารมาตรฐาน Trolox เป็น 20, 40, 60, 80, 100 และ 150 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรตามลำดับ โดยหลังจากเตรียมสารละลาย Trolox แล้วเปิดสารละลาย Trolox 0.15 มิลลิลิตร ทำการเกิดปฏิกิริยาโดยผสม ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตร ในหลอดทดลองที่มีพลาสติกสีดำคลุม tube rack อยู่ เขย่าสารละลายให้เข้ากันได้ดี ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 120 นาที นำสารสกัดไหลที่ทำปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ 734 นาโนเมตร โดยสารละลายแบลนด์ (blank) คือ สารละลายเมทานอล

ความเข้มข้นร้อยละ 70 และสารละลายควบคุม (control) คือ สารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตรผสมกับ ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตร นำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตรมาคำนวณหาร้อยละการยับยั้ง (%inhibition) ที่ได้มากับความเข้มข้นของสาร Trolox มาสร้างเป็นกราฟมาตรฐาน ดังภาพที่ 41



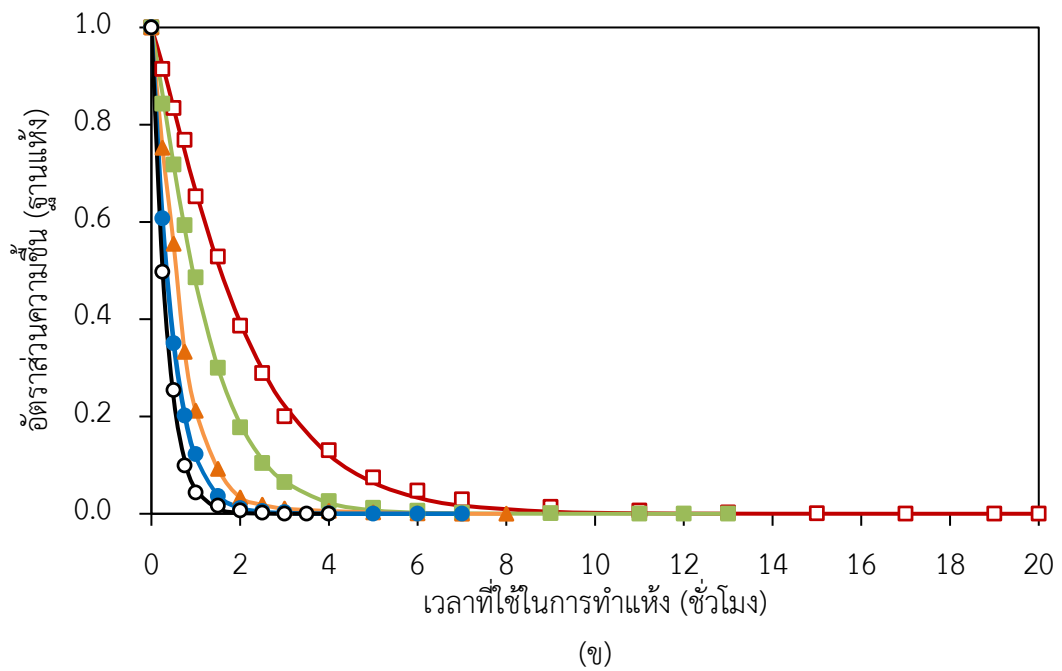
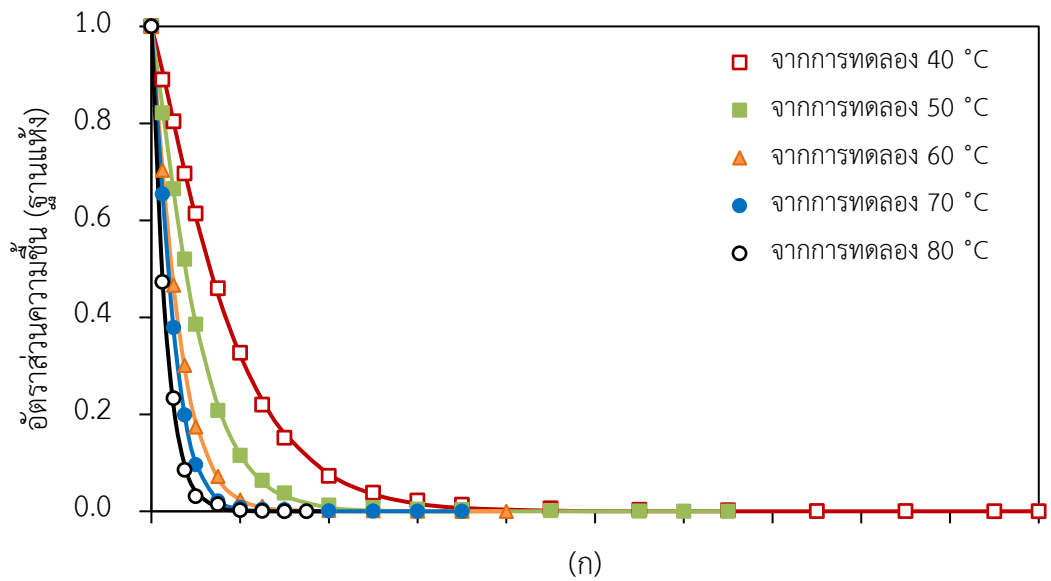
ภาพที่ 41 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน Trolox ด้วยวิธี ABTS

3.3.3 วิธีการวิเคราะห์

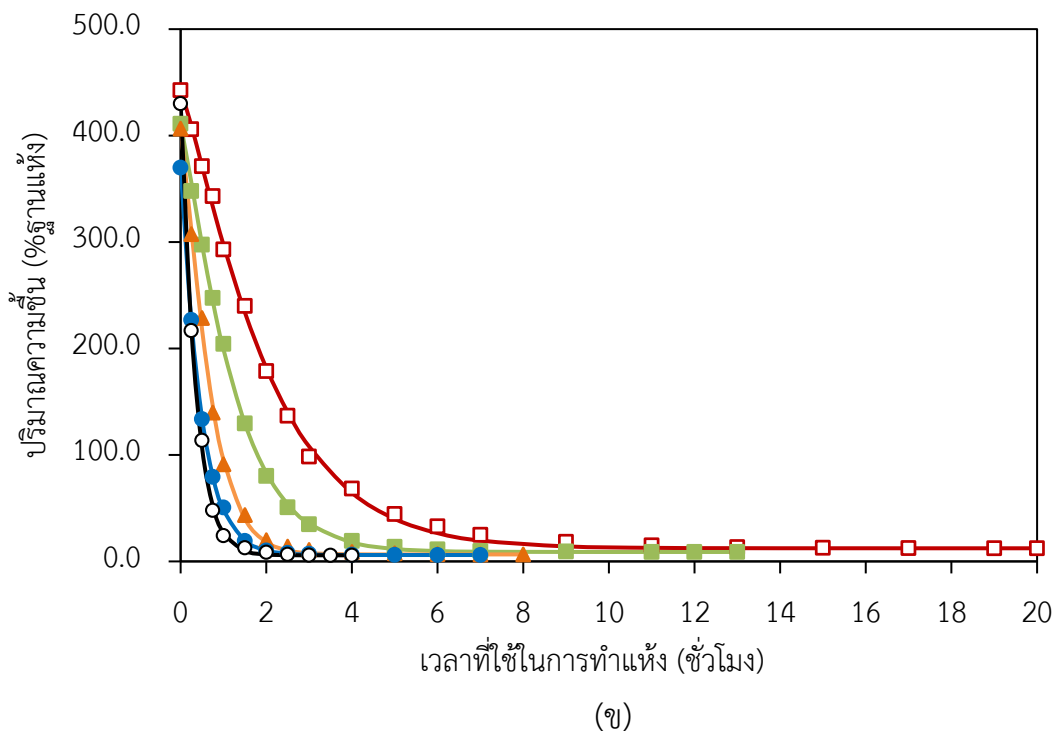
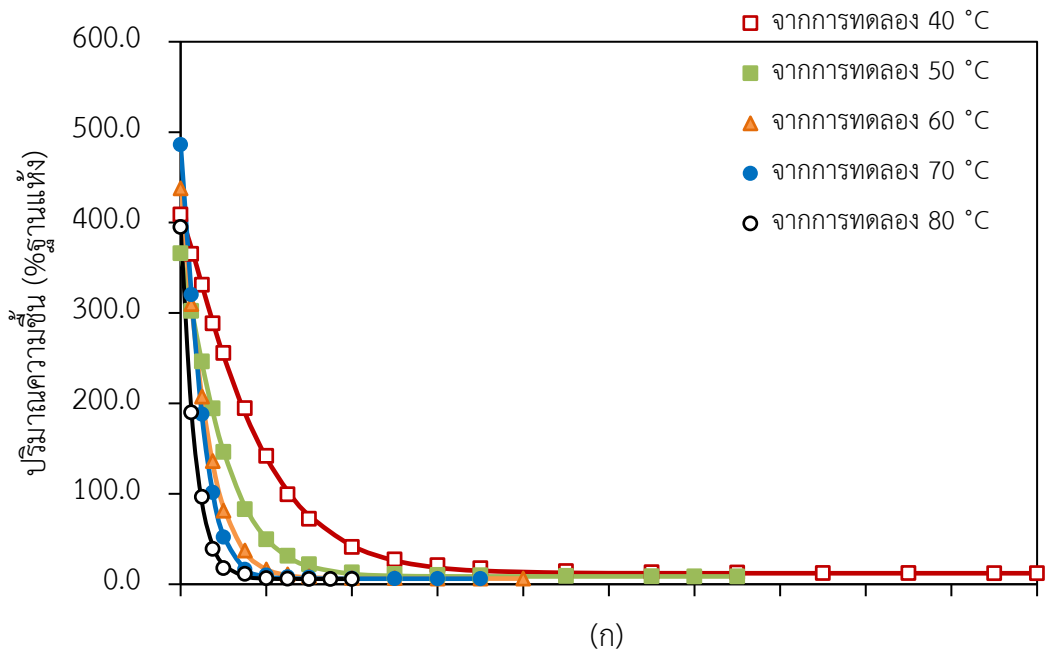
การวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน ทำได้โดยเจือจางสารสกัดที่ได้จากข้อ 2.1 ให้มีความเข้มข้น 1/10 จากนั้นเปิดสารสกัดไหลปริมาณ 0.15 มิลลิลิตร ทำการเกิดปฏิกิริยาโดยผสม ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันได้ดี ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 120 นาที แล้วนำสารสกัดไหลที่ทำปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร โดยสารละลายแบลนด์ (blank) คือ สารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 และสารละลายควบคุม (control) คือ สารละลายเมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 ปริมาตร 0.15 มิลลิลิตรผสมกับ ABTS reagent ปริมาตร 2.85 มิลลิลิตรทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง โดยนำค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดตัวอย่างมาคำนวณหาร้อยละการยับยั้ง (%inhibition) และเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 2.3.2 แล้วรายงานผลเป็นไมโครโมลสมมูลของ Trolox ต่อกิโลกรัมของตัวอย่าง



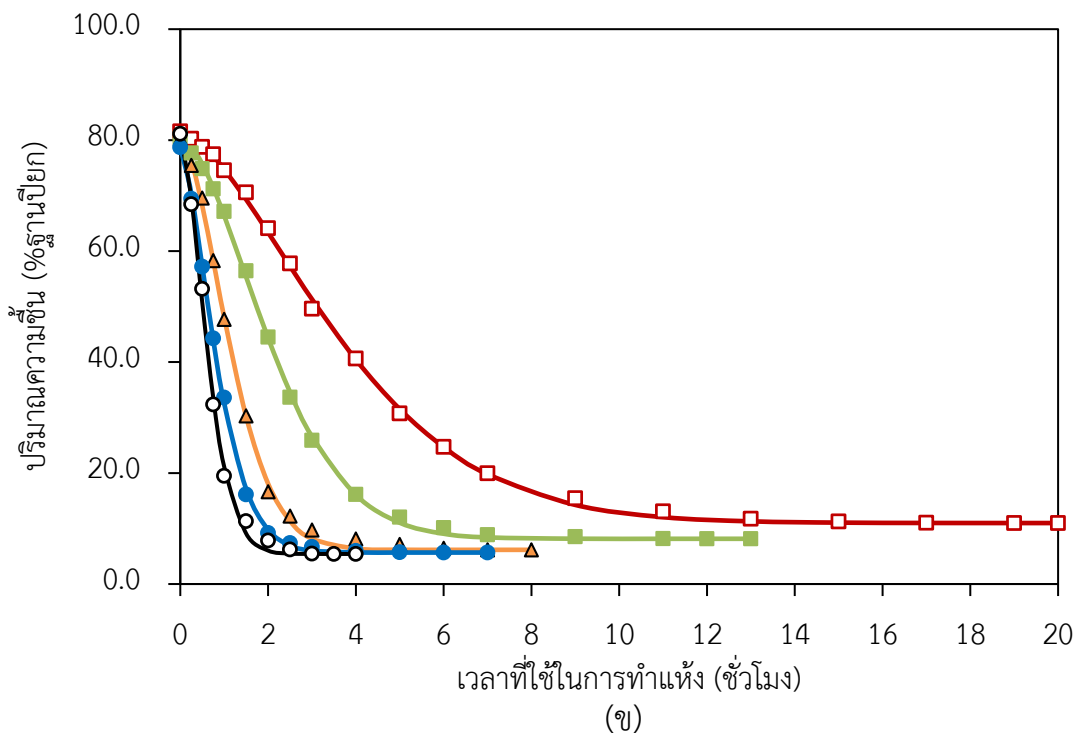
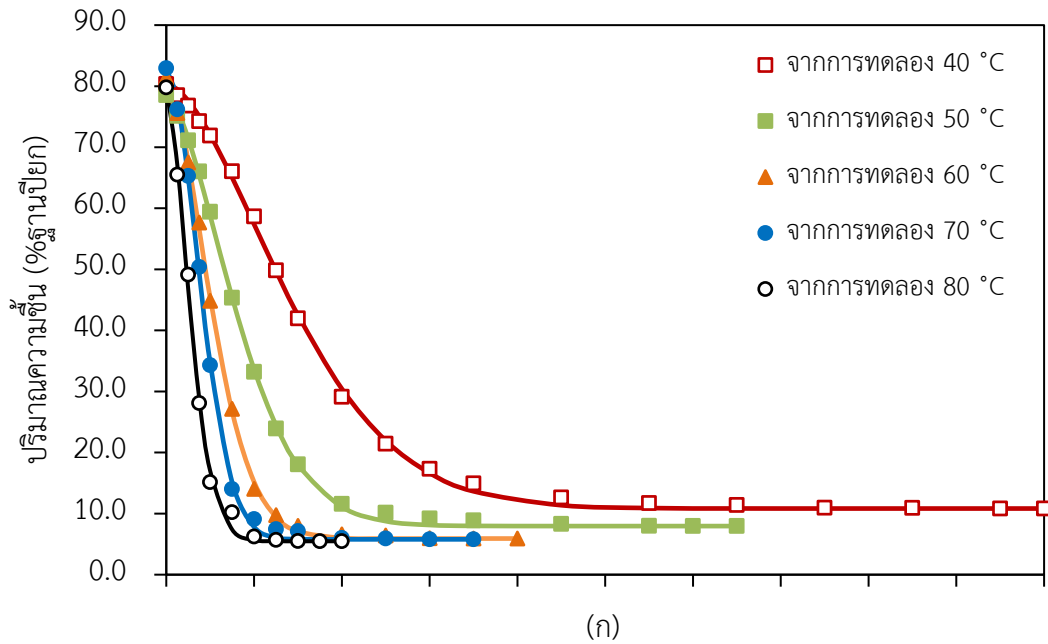
ภาคผนวก ค



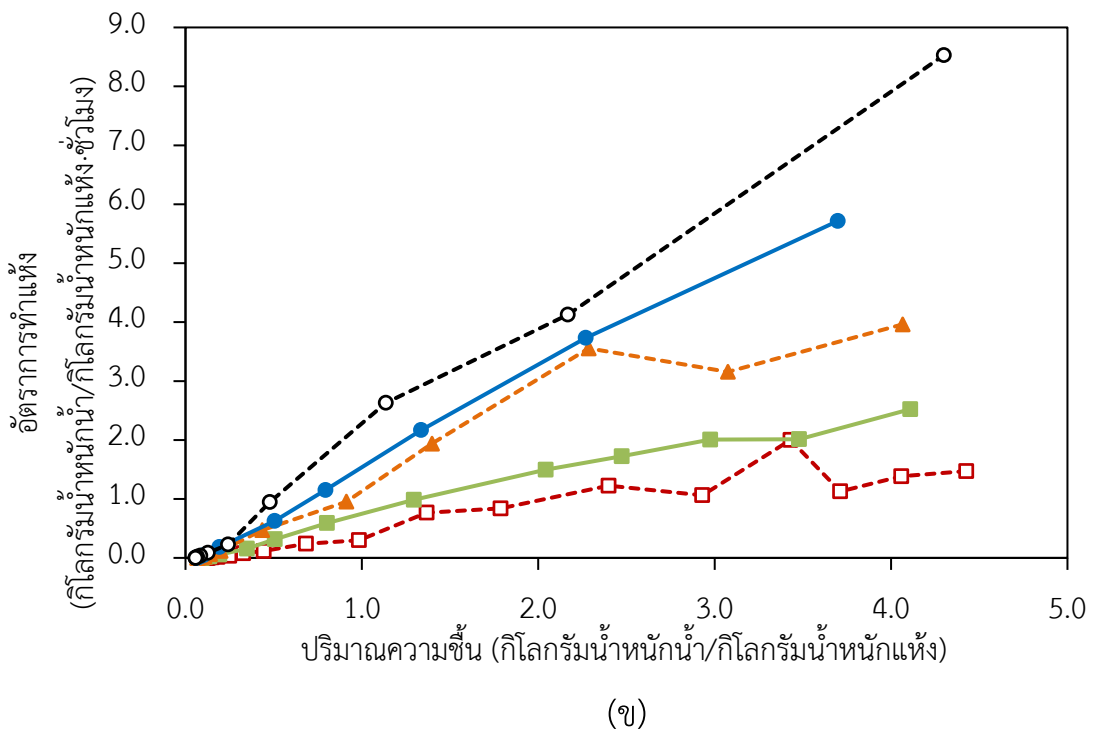
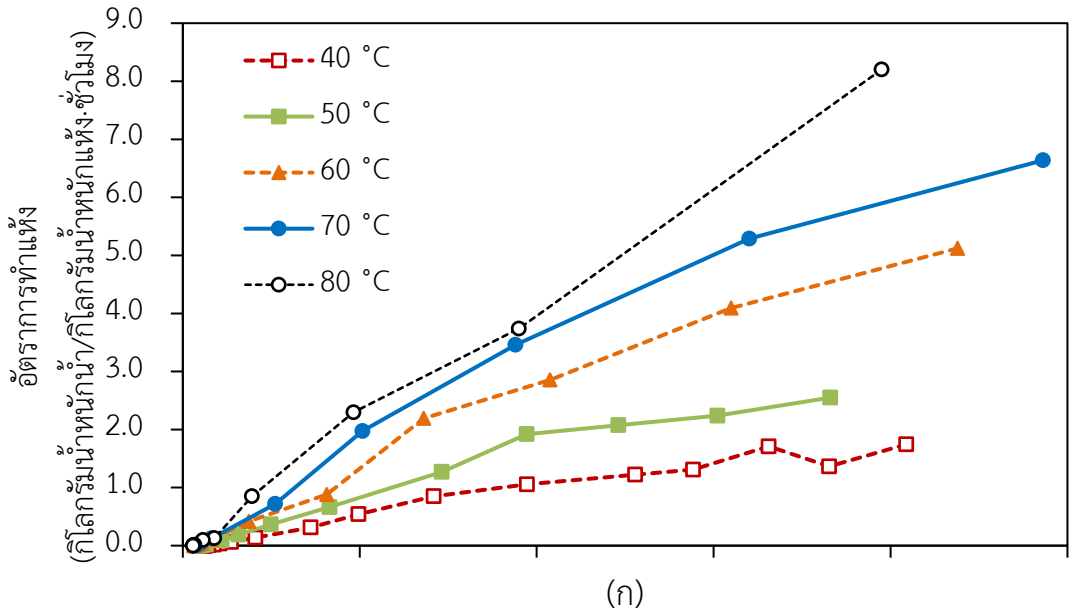
ภาพที่ 42 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (อัตราส่วนความชื้น %ฐานแห้ง) ที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



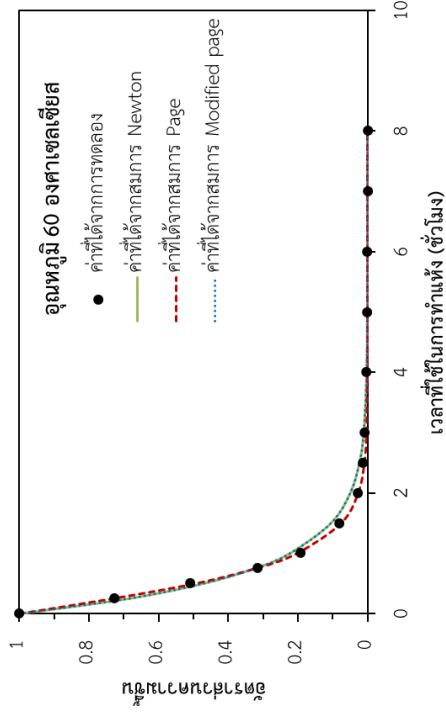
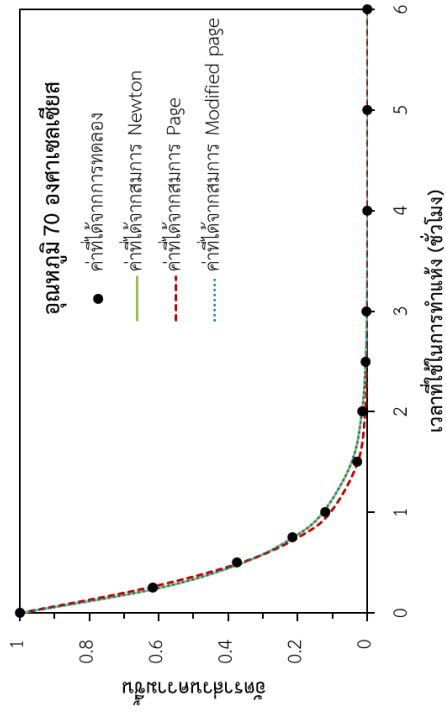
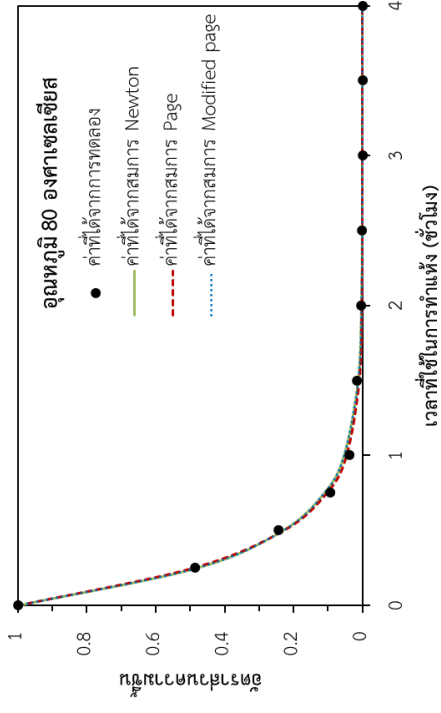
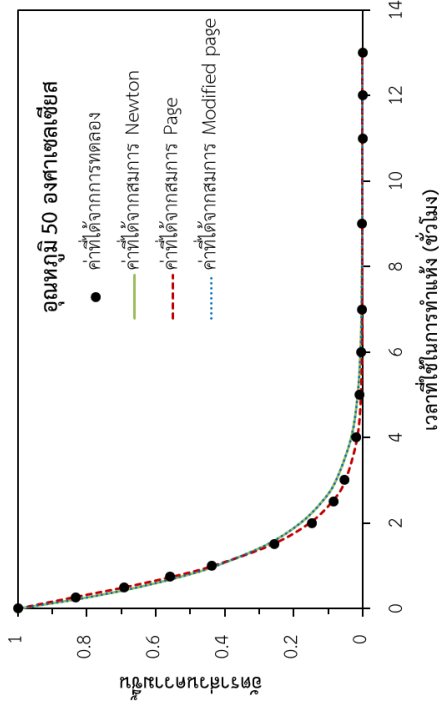
ภาพที่ 43 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (ปริมาณความชื้น %ฐานแห้ง) ที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



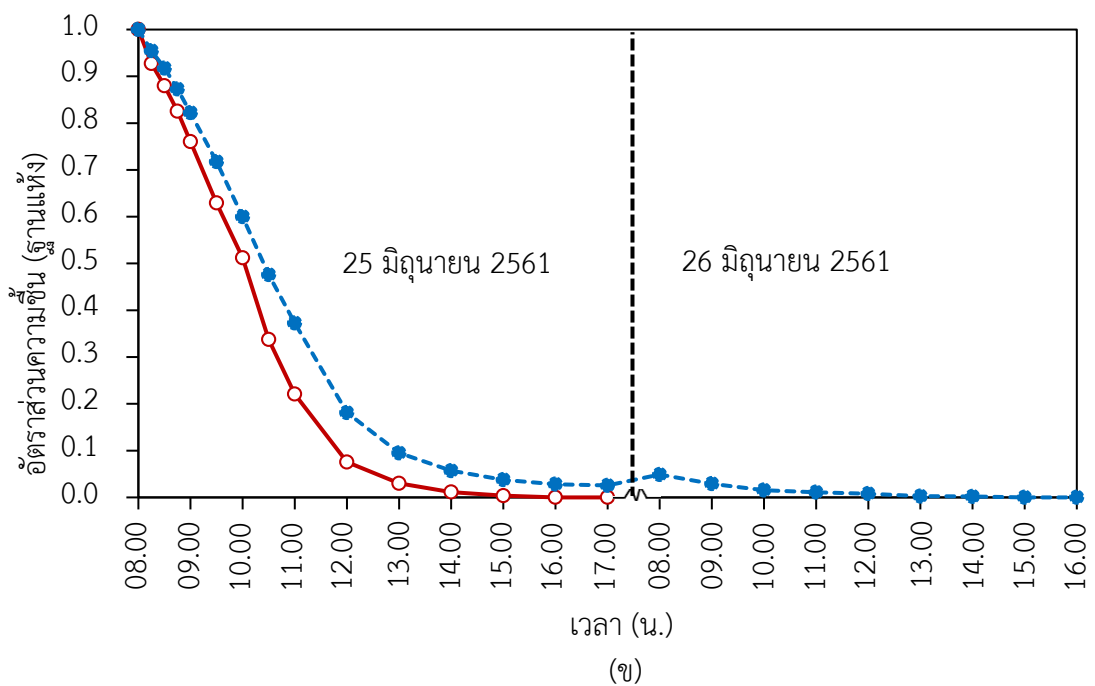
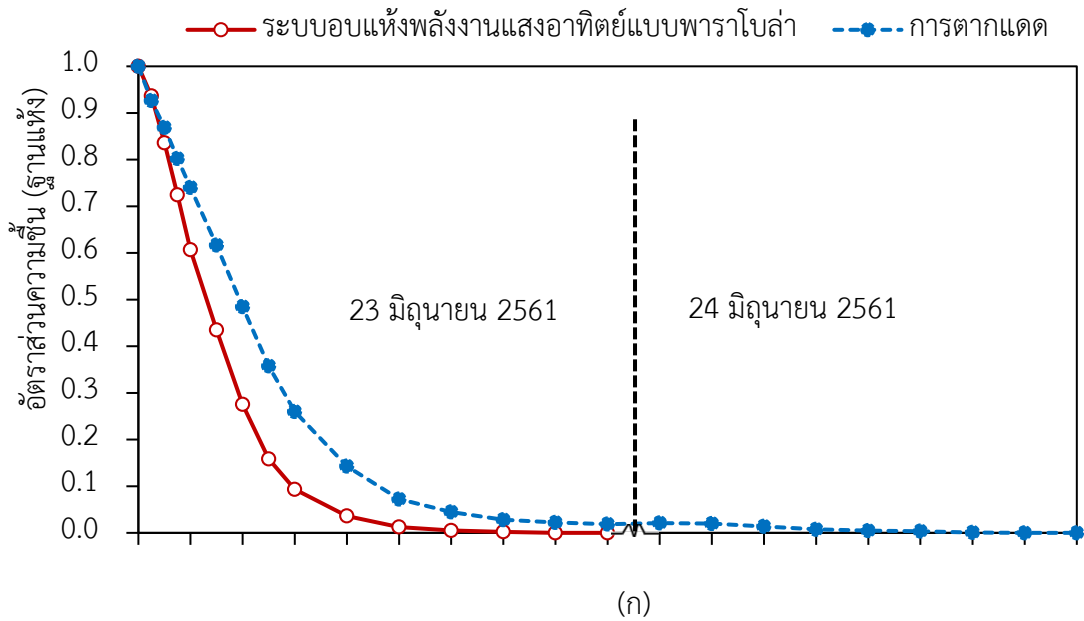
ภาพที่ 44 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (ปริมาณความชื้น %ฐานเปียก) ที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



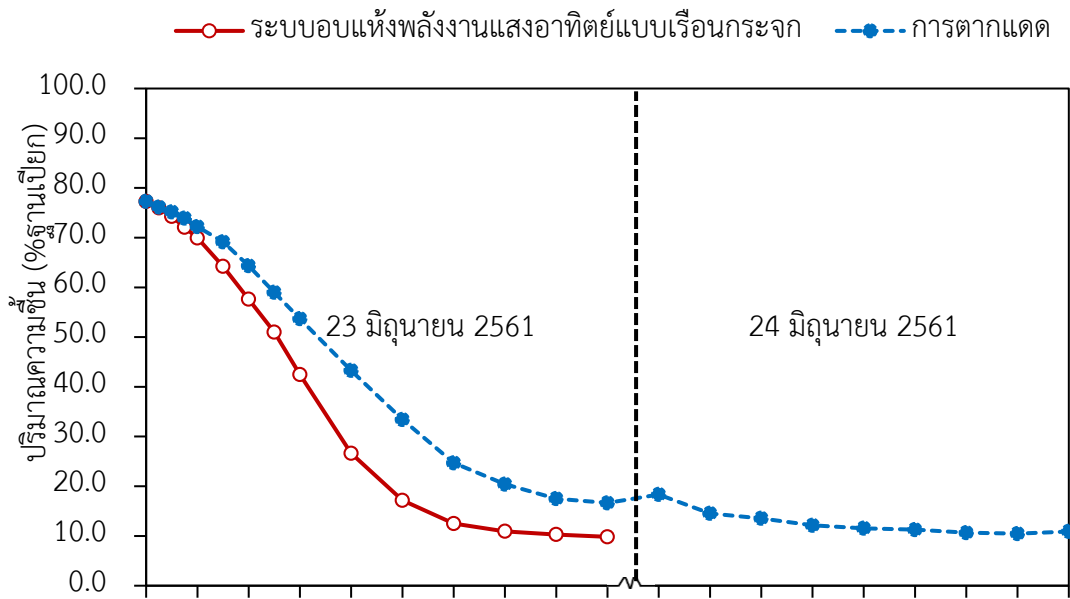
ภาพที่ 45 อัตราการทำแห้งของไหลอบแห้งที่ผ่านการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 40, 50, 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



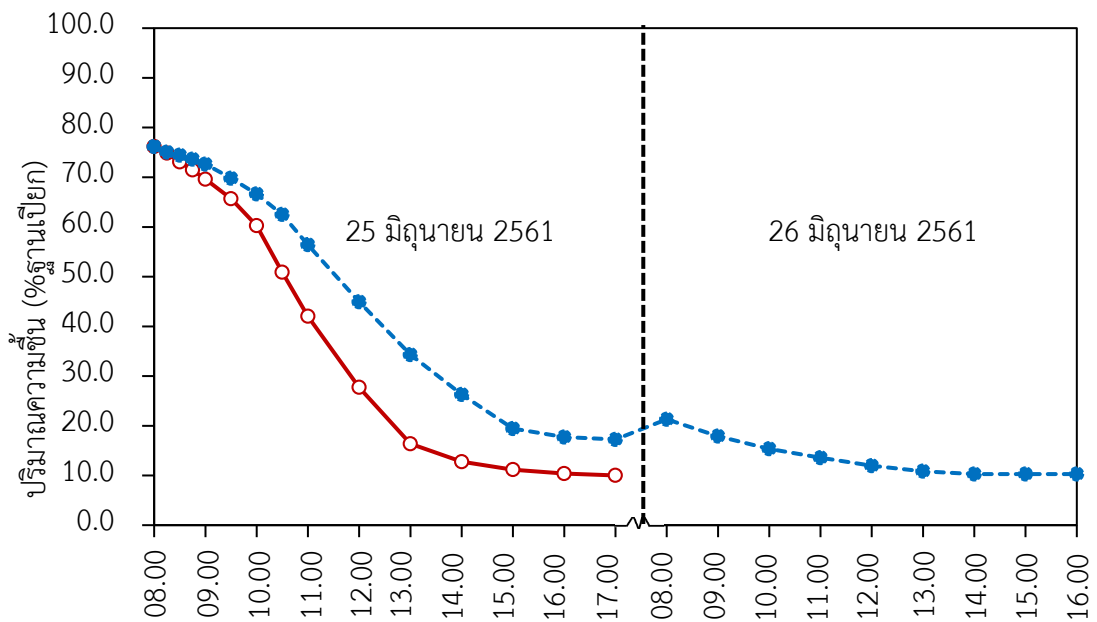
ภาพที่ 46 ตัวอย่างค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของเพอเลอแบ็งกับระยะเวลาที่ใช้ในการทำห้ำหึ่งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ Newton สมการ Page และสมการ Modified Page



ภาพที่ 47 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (อัตราส่วนความชื้นฐานแห้ง) โดยวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือกระจก และการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



(ก)



เวลา (น.)

(ข)

ภาพที่ 48 พฤติกรรมการทำแห้งของไพลอบแห้ง (ปริมาณความชื้น %ฐานเปียก) โดยวิธีการทำแห้งด้วยระบบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก และการตากแดด (ก) การทดลองซ้ำที่ 1 (ข) การทดลองซ้ำที่ 2



ไพลอบแห้งด้วยการตากแดด



ไพลอบแห้งด้วยระบบอบแห้ง
พลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

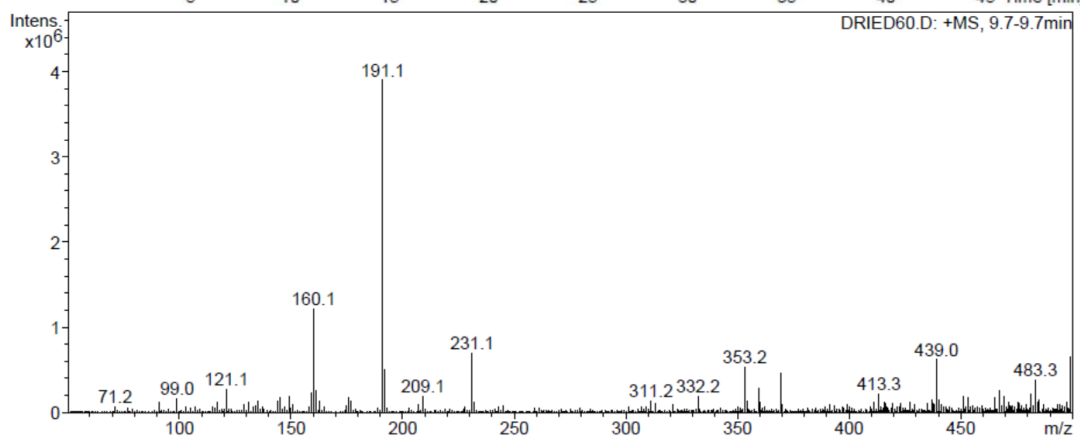
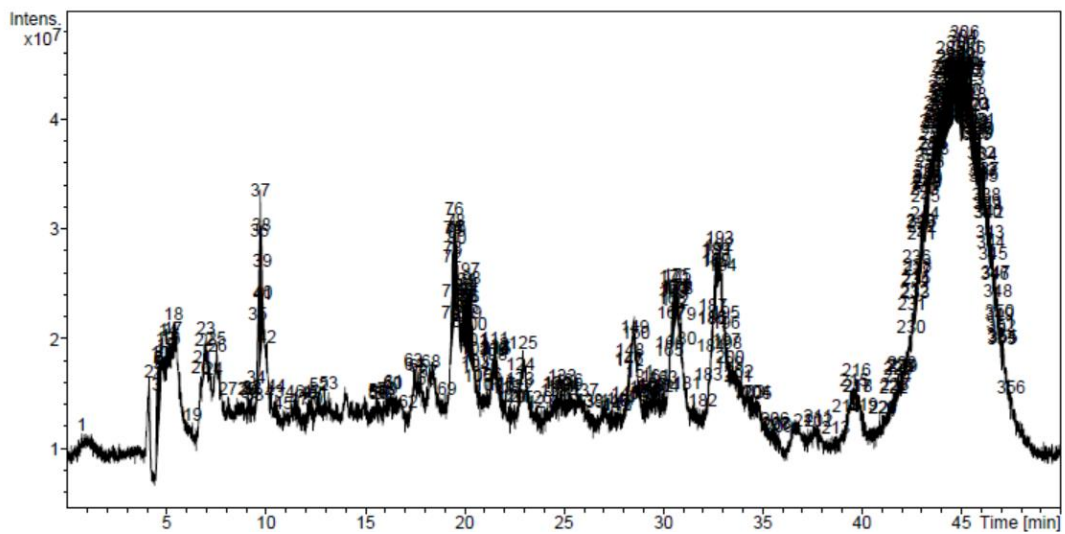
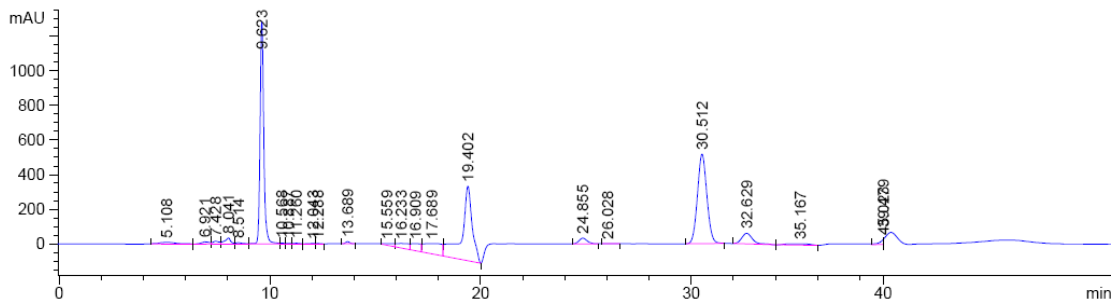


ไพลผงด้วยการตากแดด

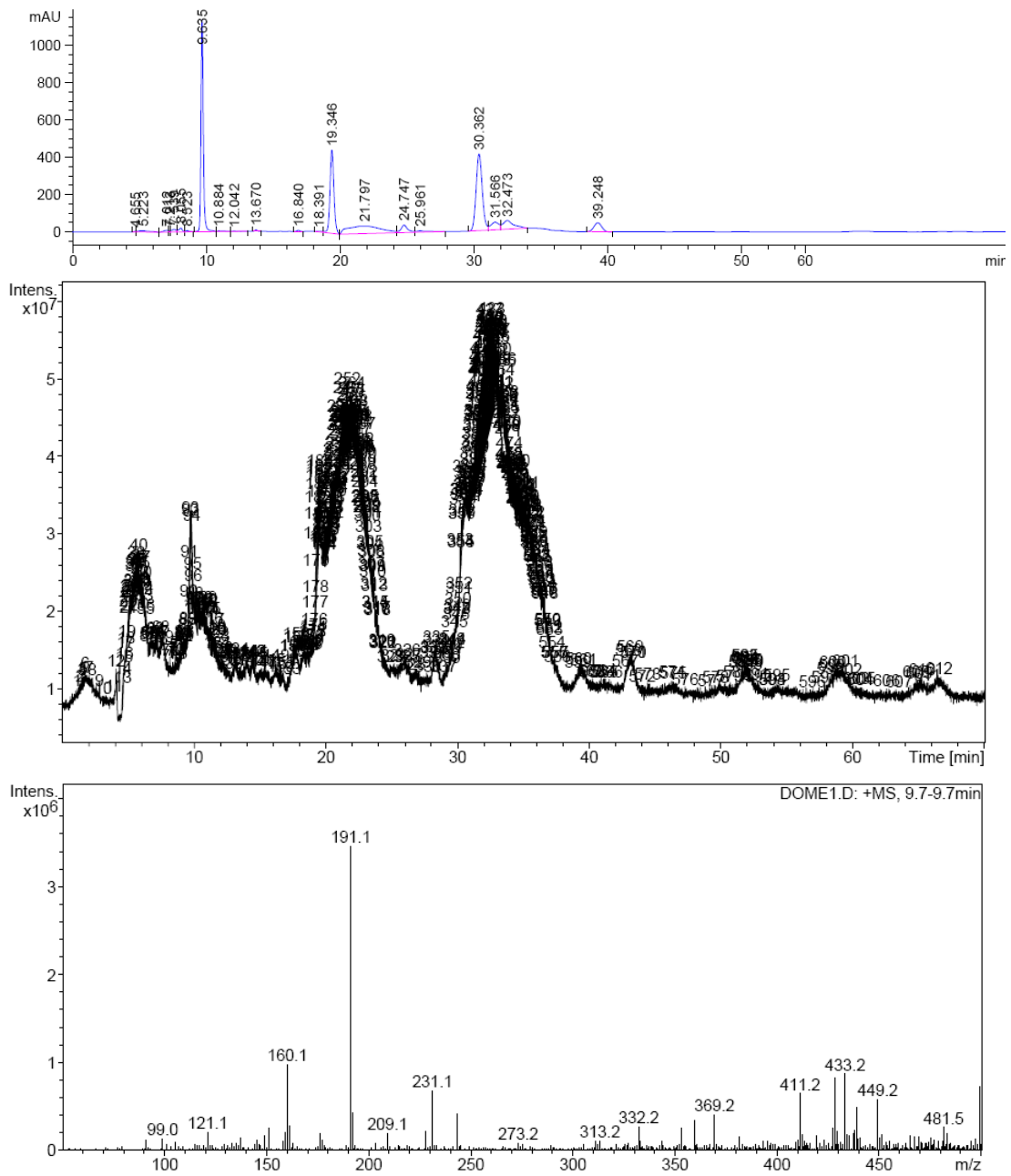


ไพลผงด้วยระบบอบแห้ง
พลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก

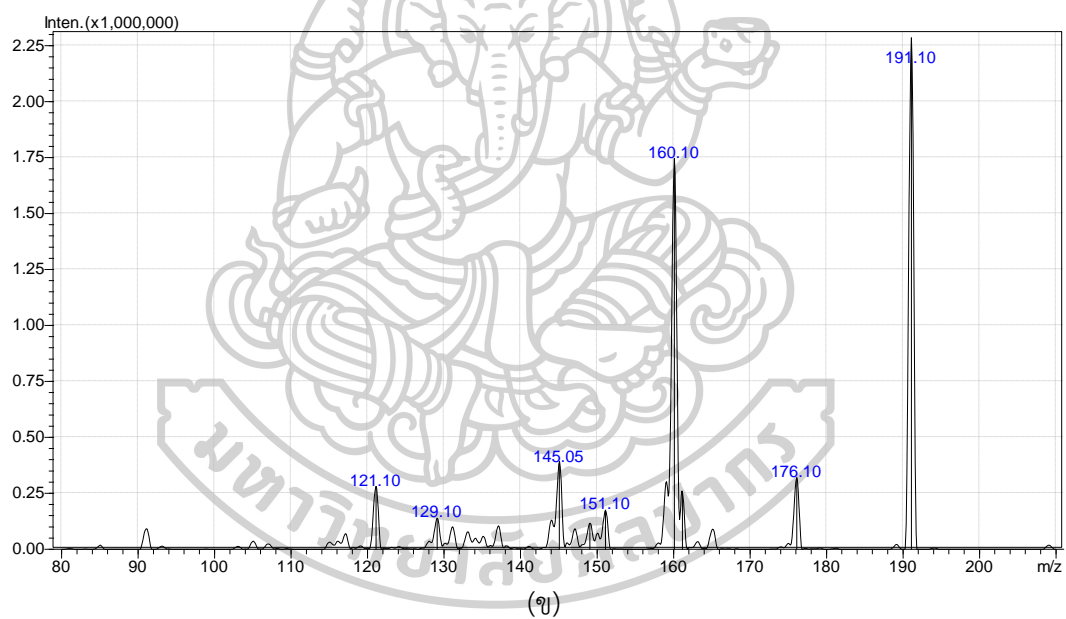
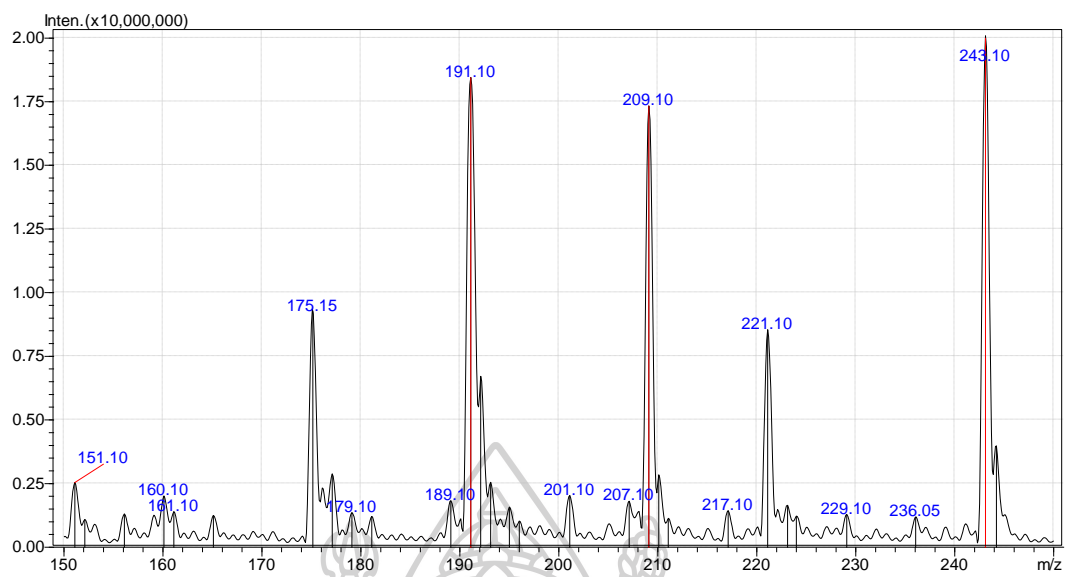
ภาพที่ 49 ผลของวิธีการทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกและการตากแดดต่อคุณภาพด้านสีของไพลผง และไพลอบแห้ง



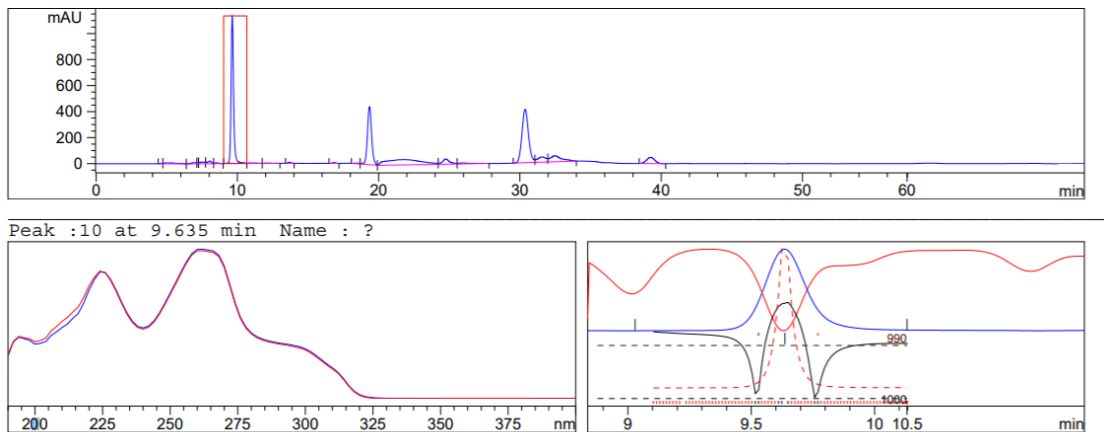
ภาพที่ 50 ตัวอย่างโครมาโตแกรม LC-MS ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและ Mass spectrum pattern ของสาร compound D ในไฟลหลังจากทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



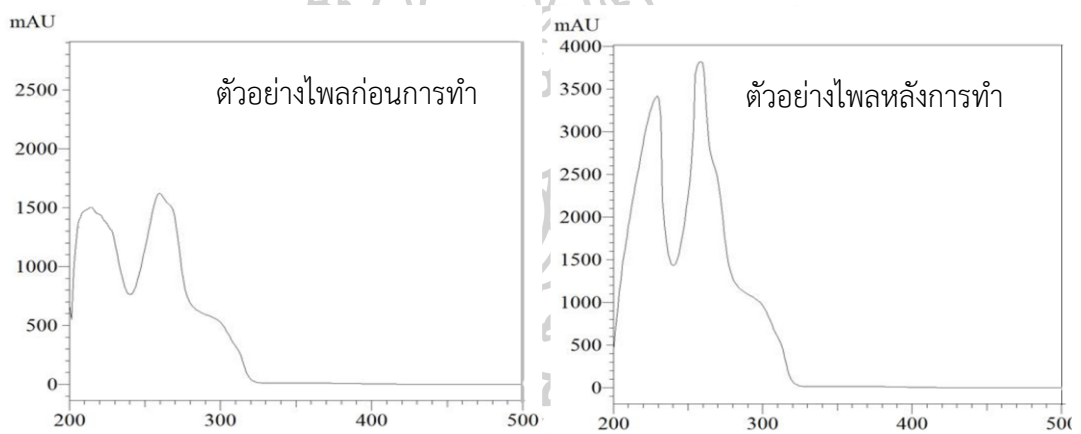
ภาพที่ 51 ตัวอย่างโครมาโตแกรม LC-MS ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรและ Mass spectrum pattern ของสาร compound D ในโพลหลังจากทำแห้งด้วยระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบ เรือนกระจก



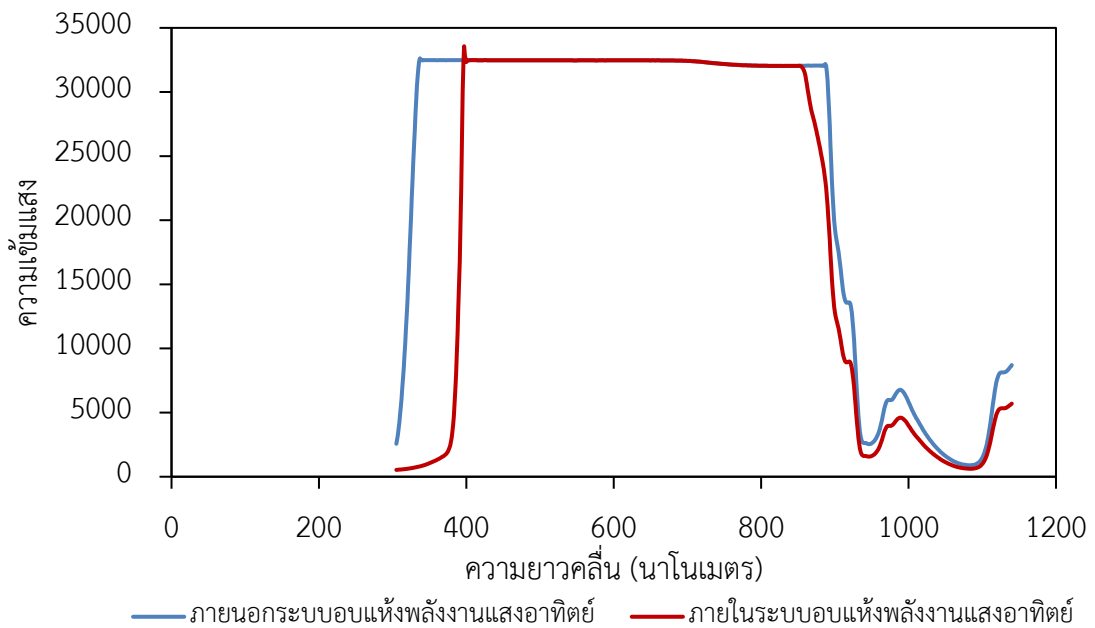
ภาพที่ 52 ตัวอย่าง Mass spectrum pattern ของไฟลก่อนการทำแห้ง (ก) และการยืนยันสาร compound D ในไฟลก่อนการทำแห้ง (ข)



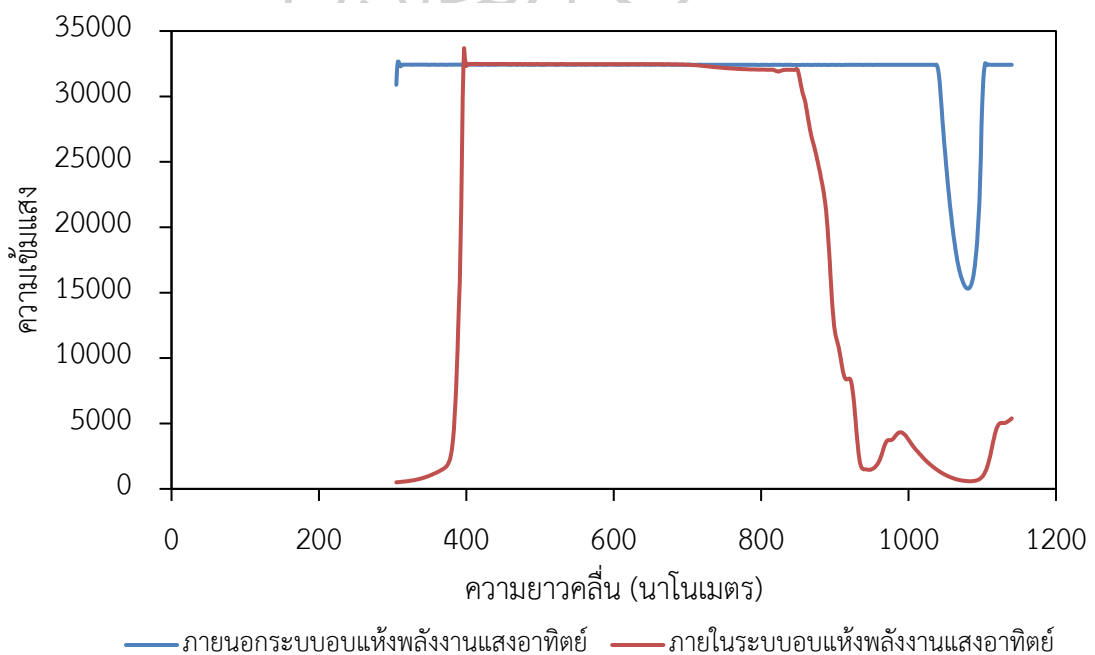
ภาพที่ 53 ตัวอย่างสเปกตรัมของพีก compound D ในตัวอย่างโพลที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC-MS



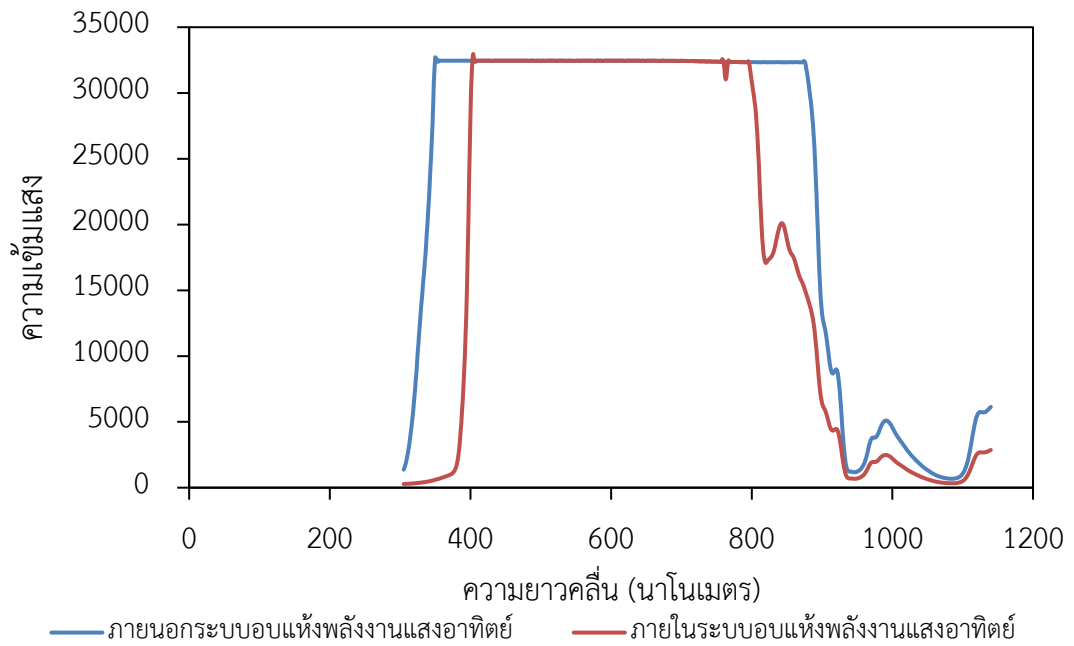
ภาพที่ 54 ตัวอย่างสเปกตรัมของ compound D ในตัวอย่างโพลก่อนและหลังการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC



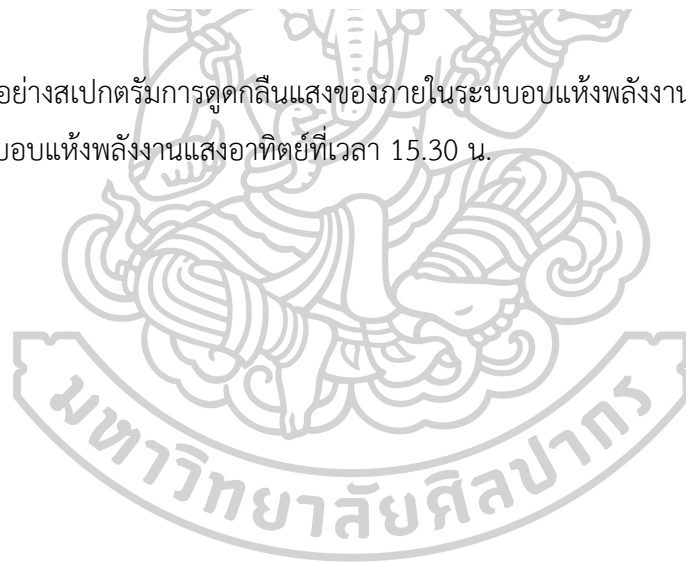
ภาพที่ 55 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และภายนอกอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา 10.00 น.



ภาพที่ 56 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และภายนอกอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา 12.30 น.



ภาพที่ 57 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของภายในระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และภายนอกระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่เวลา 15.30 น.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ทิพารัตน์ ธรรมสละ
วัน เดือน ปี เกิด	25 เมษายน 2536
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีอาหาร)
ที่อยู่ปัจจุบัน	56-56/1 ซอยเพชรบุรี 5 ถนนเพชรบุรีตัดใหม่ แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ผลงานตีพิมพ์	Thamsala, T., Boonrod, Y., Youngsaad, W., Mahayothee, B., Khuwijitjaru, P. and Janjai, S. 2016. Curcuminoids content in solor greenhouse dried Plai (Zingiber cassumunar). The 20th International Drying Symposium (IDS 2016), 7-10 August 2016, Gifu University, Gifu, Japan. B. Mahayothee, K. Noypan, T. Thamsala, Y. Boonrod, P. Khuwijitjaru, S. Janjai. 2017. Effect of drying methods on antioxidant capacity and phenolic compounds in nut grass tuber Cyperus rotundus Linn. Second Nordic Baltic Drying Conference, 7-9 June, 2017, Hamburg, Germany. (Poster)