

สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันออกจากกากผลปาล์ม เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Optimization of oil extraction from oil palm meal for used as animal feed using response surface methodology

เจริญพร ธารประเสริฐ^{1*}, กฤษ สมนึก¹ และ กำพล ประทีปชัยกุล¹

Jarernporn Thawornprasert^{1*}, Krit Somnuk¹ and Gumpon Prateepchaikul¹

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันจากกากผลปาล์ม (oil palm meal, OPM) เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบชนิดหีบรวม (mixed crude palm oil, MCPO) ของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มขนาดเล็กด้วยเครื่องหีบแบบเกลียวอัดเดี่ยว มีผลพลอยได้คือ OPM ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเป็นอาหารสัตว์ได้ แต่พบว่า OPM มีกะลาปาล์ม (palm nut shell, PNS) ซึ่งมีลักษณะแข็ง ไม่เหมาะกับการนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ จึงได้นำ PNS ออกจาก OPM และนำความชื้นออกจาก OPM พบว่า กากผลปาล์มแห้ง (dried oil palm meal, DOPM) มีปริมาณโปรตีนและน้ำมัน เท่ากับ 8.39 wt.% และ 15.63 wt.% ตามลำดับ ดังนั้น DOPM ยังมีปริมาณน้ำมันตกค้าง ซึ่งได้ศึกษาตัวแปร 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์ม (4.9-30.1 g/g of ratio of hexane to DOPM) เวลาในการสกัด (0.2-18.8 min of extraction time) และความเร็วรอบในการสกัด (48-552 rpm of speed of stirrer) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมันออกจาก DOPM จากการทดลองพบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากผลปาล์ม 19.6:1 g/g เวลาในการสกัด 10.5 min และความเร็วรอบที่ 300 rpm สามารถสกัดน้ำมันจาก DOPM ได้ปริมาณผลได้ของน้ำมันจากผลปาล์ม (extracted oil of dried oil palm meal, EDOPM) เท่ากับ 11.80 wt.%

คำสำคัญ: กากผลปาล์ม, การสกัดน้ำมัน, วิธีพื้นผิวตอบสนอง, น้ำมันจากกากผลปาล์ม

ABSTRACT: The objective of this study was to investigate the optimal condition of oil extraction from oil palm meal (OPM) by using the response surface methodology (RSM). OPM can be used in the feed for ruminant animals. In the oil extraction from palm fruit in the small scale palm oil producer, the mixed crude palm oil (MCPO) was obtained by a single screw press. The by-product after MCPO extraction process, OPM is normally just used for ruminant feeding. However, the larger palm nut shell (PNS) mingled with OPM, hard PNS is not suitable for used as animal feeding. In this study, PNS was firstly removed from OPM, and OPM without lager PNS was then dried with oven at 104°C temperature and 24 hr drying time. As a results, the dried oil palm meal (DOPM) was detected 8.39 wt.% protein, and 15.63 wt.% oil. Three parameters: ratio of hexane to DOPM (4.9-30.1 g/g), extraction time (0.2-18.8 min), and speed of stirrer (48-552 rpm), were optimized to investigate the highest extracted oil of dried oil palm meal (EDOPM). Results showed that 11.80 wt.% of oil yield was achieved with the optimal condition: 19.6:1 g/g ratio of hexane to DOPM, 10.5 min extraction time at 300 rpm.

Keywords: oil palm meal, oil extraction, response surface methodology, extracted oil of dried oil palm meal

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90110

* Corresponding author: krit.s@psu.ac.th

บทนำ

กากผลปาล์ม (oil palm meal, OPM) คือ ผลพลอยได้หลังจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบหีบรวม (mixed crude palm oil, MCPO) ของโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มขนาดเล็กซึ่งหีบน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์มทั้งผล (whole palm fruit) ด้วยวิธีหีบแห้ง โดยใช้เครื่องหีบแบบเกลียวอัดเดี่ยว (single screw press) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ เช่น โค กระบือ แพะ และแกะ เป็นต้น ขณะที่กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม (palm kernel meal, PKM หรือ palm kernel cake, PKC) ที่สกัดน้ำมันจากผลปาล์มด้วยเครื่องสกัดแบบเกลียวอัดชนิดเกลียวคู่ (double screw, DS) ทำให้สามารถแยกน้ำมันปาล์มจากการหีบเส้นใยปาล์ม และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์มจากการหีบเนื้อเมล็ดในปาล์ม น้ำมัน ทำให้คุณภาพน้ำมันปาล์มที่ได้จึงสูงกว่า และผลพลอยได้คือกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันที่ได้ มีคุณค่าทางโภชนาการในส่วนของโปรตีน และพลังงานที่สามารถนำมาใช้เลี้ยงสัตว์ได้ดีกว่า (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, 2559) ซึ่ง OPM ส่วนใหญ่จะขายให้เกษตรกรเพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์โดยเฉพาะเคี้ยวเอื้อง แต่เนื่องจาก OPM มีส่วนประกอบของเยื่อใย และไขมันสูง แต่มีโปรตีนต่ำ และมีเศษกะลาปาล์ม (palm nut shell, PNS) ปะปนอยู่ทำให้คุณภาพในการนำไปเป็นอาหารสัตว์ไม่สม่ำเสมอ โดย PNS ซึ่งปะปนอยู่ใน OPM มีลักษณะแข็งและคม กระเพาะของสัตว์ไม่สามารถย่อยได้ เมื่อสัตว์กินเศษกะลาปาล์มจะส่งผลทำให้สัตว์ย่อยอาหารได้ยากและอาจจะบาดเจ็บ กระเพาะสัตว์ ส่งผลทำให้ปริมาณการกินได้ของสัตว์ลดลง และพบว่าใน OPM มีปริมาณน้ำมันตกค้าง ประมาณ 15% (ปิ่น, 2558) ซึ่งปริมาณน้ำมันตกค้างใน OPM มีข้อเสียคือ ทำให้เกิดกลิ่นหืน ระยะเวลาในการเก็บรักษาลดลง เช่น งานวิจัยของ พันทิพา (2539) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของไขมันไว้ว่าเป็นแหล่งพลังงานที่ดี ให้พลังงานมากกว่าคาร์โบไฮเดรต 2.25 เท่า ช่วยลดอุณหภูมิของร่างกายสัตว์ได้ในหน้าร้อน เป็นแหล่งวิตามินเอ

วิตามินดี วิตามินอี วิตามินเค และกรดไขมันที่จำเป็น ช่วยลดความเป็นฝุ่นของอาหาร เพิ่มความน่ากิน กลบกลิ่นยา และสีที่ใส่เพิ่มลงไปอาหาร และยังช่วยป้องกันน้ำซึ่มเข้าในเม็ดอาหารสัตว์ แต่ตัวไขมันจะถูก oxidize ได้ง่าย ถ้ามีไขมันในปริมาณมากเกินไปจะส่งกลิ่นเหม็นหืน ยากต่อการเก็บรักษา มีผู้วิจัยแนะนำว่าปริมาณไขมันในส่วนประกอบของอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องควรมีไขมันไม่เกิน 5% (เทอดชัย, 2548; National Research Council, 1976; National Research Council, 1989) และมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำ OPM และผลพลอยได้จากการหีบปาล์มน้ำมัน เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น ปิ่น (2558) ได้กล่าวว่า OPM มีส่วนประกอบของเยื่อใย (30.51%) โปรตีน (7.08%) และไขมันตกค้าง (22.6%) มีคุณค่าทางอาหารต่ำไม่เหมาะจะนำไปเป็นอาหารสัตว์กระเพาะเคี้ยว แต่ยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูงพอจะสามารถนำไปเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ หาง่าย และมีราคาถูก จินดา (2548) ได้กล่าวว่าผลพลอยได้จากการหีบปาล์มน้ำมันสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน และแหล่งโปรตีนเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องได้ดี

ในการศึกษานี้ น้ำมันที่สกัดออกมาคือ น้ำมันจากกากผลปาล์ม (extracted oil of dried oil palm meal, EDOPM) เป็นน้ำมันจากการสกัดรอบที่สอง หลังจากน้ำมันปาล์มส่วนใหญ่คือ MCPO ได้ถูกสกัดด้วยกระบวนการหีบแห้งในรอบแรกไปแล้ว ซึ่งจากการค้นคว้างานวิจัยก็ยังไม่พบว่าได้มีผู้วิจัยได้ศึกษานี้หาสมภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมันออกจากกากผลปาล์มแห้ง (dried oil palm meal, DOPM) เพื่อนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology, RSM) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์ม (4.9-30.1 g/g of ratio of hexane to DOPM) เวลาในการสกัด (0.2-18.8 min of extraction time) และความเร็วรอบในการสกัด (48-552 rpm of speed of stirrer) เพื่อผลของร้อยละปริมาณผลได้ (yield) ของน้ำมัน EDOPM และเปรียบเทียบองค์ประกอบของ DOPM กับกากผลปาล์ม

ไขมันต่ำ (defatted oil palm meal, DFOPM) และ
หาองค์ประกอบของน้ำมัน EDOPM

วิธีการศึกษา

วัตถุดิบและตัวทำละลาย

กากผลปาล์ม (OPM) หลังผ่านเครื่องหีบจะมีลักษณะเป็นแผ่นมีเศษกะลาปาล์มสีดำปะปน ดังแสดงใน Figure 1(a) นำ OPM มาหีบเพื่อลดขนาดให้มีช่วงขนาดประมาณ 1-2 มม. ด้วยตะแกรงขนาดความละเอียด 2,000 ไมโครเมตร (2 มม.) หรือ ตะแกรงขนาด #10 sieve mesh number เศษกะลาปาล์ม (PNS) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 2 มม. จะถูกแยก หลังจากนั้นนำ OPM ที่แยก PNS แล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 104°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (Abdullah and Bulent Koc, 2013; Rocha et al., 2014) เพื่อกำจัดความชื้นใน OPM ที่มีอยู่ประมาณ 4 wt.% จะได้กากผลปาล์มแห้ง (DOPM) เพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการสกัดน้ำมัน EDOPM ด้วยตัวทำละลาย โดยได้แสดงองค์

ประกอบทางกายภาพ และทางเคมีของ DOPM ใน Table 1 ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดน้ำมัน EDOPM คือ ตัวทำละลายเฮกเซน มีความบริสุทธิ์ 98% เกรดเชิงการค้า

วิธีการศึกษา

ออกแบบการทดลอง

ออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน โดยศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์ม (4.9-30.1 g/g of ratio of hexane to DOPM) เวลาในการสกัด (0.2-18.8 min of extraction time) และความเร็วรอบในการสกัด (48-552 rpm of speed of stirrer) ด้วยวิธี RSM โดยใช้โปรแกรม essential experimental design 2.216 ออกแบบการทดลองแบบ central composite design (CCD) ประกอบด้วย 5 ระดับ คือ -1.682, -1, 0, +1, และ +1.682 มีจำนวนการทดลองทั้งหมด 18 การทดลอง ดังแสดงเงื่อนไขใน Table 2

Table 1 Physical and chemical compositions of DOPM and DFOPM.

| Property | DOPM | DFOPM | Analysis method |
|------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Higher heating value (kJ/kg) | 19,098.7 | 17,846.3 | Calorific method |
| Carbon (wt.%) | 46.59 | 46.06 | Dynamic flash combustion |
| Hydrogen (wt.%) | 5.920 | 5.424 | Dynamic flash combustion |
| Nitrogen (wt.%) | 1.63 | 1.47 | Dynamic flash combustion |
| Sulfur (wt.%) | 0.140 | 0.196 | Dynamic flash combustion |
| Oxygen (wt.%) | 31.51 | 36.17 | Dynamic flash combustion |
| Ash (wt.%) | 10.53 | 13.27 | AOAC, burned at 550-600°C |
| Total nitrogen (wt.%) | 1.34 | 1.87 | AOAC : Kjeldahl method |
| Protein (wt.%) | 8.38 | 11.69 | AOAC : Kjeldahl method |
| Crude fiber (wt.%) | 34.88 | 21.59 | Fiber analyzer, ANKOM ²⁰⁰ |
| Yield of EDOPM (wt.%) | 15.63 ^(a) | 11.80 ^(b) | Soxhlet Extraction |
| Residual hexane (ppm) | - | < 0.5 | GC-FID |

Note: ^(a) 15.63 wt.% of yield of EDOPM from oil extraction was obtained by Soxhlet Extraction, ^(b) Yield of EDOPM from oil extraction was achieved under the recommended condition.

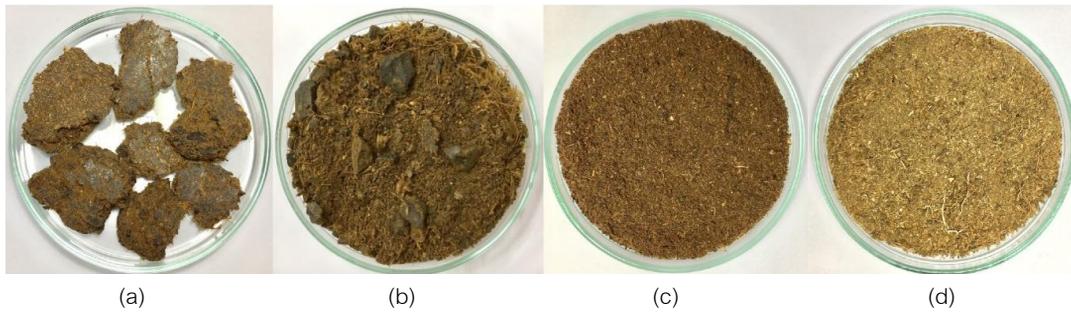


Figure 1 (a) oil palm meal (OPM) after through a single screw press; (b) OPM with lager palm nut shell; (c) DOPM after filtration with 2 mm sieve size, and (d) defatted oil palm meal (DFOPM)

Table 2 Experimental design matrix and results for oil extraction from DOPM using RSM.

| Test | Ratio of hexane to DOPM (g/g) | Time (min) | Speed (rpm) | Yield of EDOPM (wt.%) |
|------|-------------------------------|------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 17.5 | 9.5 | 300 | 11.71 |
| 2 | 17.5 | 9.5 | 300 | 11.80 |
| 3 | 17.5 | 9.5 | 300 | 11.71 |
| 4 | 17.5 | 9.5 | 300 | 11.62 |
| 5 | 17.5 | 18.8 | 300 | 11.99 |
| 6 | 17.5 | 0.2 | 300 | 10.06 |
| 7 | 25.0 | 15.0 | 450 | 12.13 |
| 8 | 25.0 | 4.0 | 450 | 12.05 |
| 9 | 4.9 | 9.5 | 300 | 8.02 |
| 10 | 30.1 | 9.5 | 300 | 12.39 |
| 11 | 25.0 | 15.0 | 150 | 11.21 |
| 12 | 25.0 | 4.0 | 150 | 11.84 |
| 13 | 10.0 | 15.0 | 450 | 10.80 |
| 14 | 10.0 | 4.0 | 450 | 9.51 |
| 15 | 10.0 | 15.0 | 150 | 9.70 |
| 16 | 10.0 | 4.0 | 150 | 8.10 |
| 17 | 17.5 | 9.5 | 552 | 12.34 |
| 18 | 17.5 | 9.5 | 48 | 11.09 |

ขั้นตอนการสกัด

นำ DOPM 10 g ผสมกับตัวทำละลายเฮกเซนได้ในบีกเกอร์ขนาด 400 ml ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ จากนั้นใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar) ปิดบีกเกอร์ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ ใช้เครื่องกวนสารละลาย (IKA RCT basic) ในการกวนผสม DOPM กับ ตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 °C และปรับตั้งความเร็วรอบตามที่ได้ออกแบบการ

ทดลองไว้ เปิดเครื่องกวนสารละลายและจับเวลาทันทีเมื่อครบเวลากำหนดนำสารละลายสีเหลืองที่มีน้ำมันของกากผลปาล์มผสมกับตัวทำละลายเฮกเซนเรียกว่า มิสเซลลา (miscella) ไปกรองด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดความละเอียดเบอร์ 1 หรือ 11 ไมครอน (รุ่น W. & R. Balston Ltd. Genuine Whatman) จะได้ของเหลวใสสีเหลืองไม่มี DOPM แล้วนำ miscella ไปให้ความร้อนผ่านน้ำที่อุณหภูมิมากกว่า 68°C ซึ่งเป็น

จุดเดือดของตัวทำละลายเฮกเซน เพื่อระเหยตัวทำละลายออกจาก miscella จะได้ EDOPM หลังจากนั้น นำ EDOPM ไปอบด้วยตู้อบ (รุ่น Memmert UM 500) ที่อุณหภูมิ 104°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Rocha et al., 2014) เพื่อระเหยน้ำและตัวทำละลายที่อาจจะตกค้างหลงเหลืออยู่ใน EDOPM หลังผ่านกระบวนการระเหย และหาน้ำหนักของน้ำมัน EDOPM เพื่อคำนวณหาปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำมัน EDOPM และเพื่อวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบทางกายภาพ ทางโภชนาการ และทางเคมีของ DFOPM

วิธีการคำนวณปริมาณผลได้ของ EDOPM

การวิเคราะห์ปริมาณผลได้ (yield) ของน้ำมัน EDOPM จากการสกัดตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการสกัด สามารถคำนวณปริมาณผลได้จากสมการที่ 1 (Al-Hamamre et al., 2012; Abdullah and Bulent Koc, 2013)

$$Y = \frac{W_o}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ Y คือ ปริมาณผลได้ของน้ำมันจากผลปาล์ม (wt.%), W_o คือ น้ำหนักของน้ำมันจากผลปาล์มที่สามารถสกัดได้ (g) และ W_d คือ น้ำหนักของกากผลปาล์มแห้งที่ใช้ในการสกัด (g)

วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน โดยใช้วิธี dynamic flash combustion (CHNS-O analyzer, CE instruments flash EA 1112 series, thermo quest, Italy) วัดค่าความร้อน (higher heating value, HHV) โดยใช้วิธี calorific method (IKA calorimeter system C5000 control, Germany) หาปริมาณซีเถ้า (AOAC, burned at 550-600°C) หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (AOAC : Kjeldahl method) หาปริมาณโปรตีน (Kjeldahl nitrogen \times 6.25, AOAC : Kjeldahl method) และปริมาณเยื่อใย (crude fiber) (fiber analyzer, ANKOM²⁰⁰) ของ DOPM และ DFOPM

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope, SEM) เพื่อทราบถึงลักษณะทางกายภาพของผิว DOPM และ DFOPM ใช้เทคนิค thin layer chromatography/flame ionization detection (TLC/FID, รุ่น IATROSCAN MK-65, Mishubishi Kagaku Iatron Inc.; Japan) ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบคือ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride, TG) ไดกลีเซอไรด์ (diglyceride, DG) โมโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride, MG) และกรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) ในน้ำมัน EDOPM และหาปริมาณน้ำมันสูงสุดใน DOPM ด้วยวิธี Soxhlet Extraction มาตรฐาน AOAC (Moldoveanu and David, 2014; Reshad et al., 2015)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การวิเคราะห์ปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

Table 2 แสดงปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM จากการทดลองของการสกัดน้ำมันจาก DOPM ที่แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์ม เวลาในการสกัด และความเร็วยอบในการสกัดที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM โดยการใช้เทคนิค RSM และใช้วิธี multiple regression วิเคราะห์ด้วยรูปแบบสมการ full quadratic ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สามารถสร้างเป็นสมการทำนายความสัมพันธ์ได้ดังได้แสดงในสมการที่ 2 สมการทำนายความสัมพันธ์ที่ได้นี้จะต้องพิจารณาถึงค่านัยสำคัญของแต่ละพจน์ก่อน ซึ่งจะใช้ค่า p-value ในการพิจารณา คือ ถ้าค่า p-value มากกว่า 0.05 แสดงว่าพจน์นั้นไม่มีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ สามารถตัดออกจากสมการได้ แต่ถ้าค่า p-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า พจน์นั้นมีนัยสำคัญต่อสมการทำนายความสัมพันธ์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจเชิงซ้อน (coefficient of multiple determination, R^2) เท่ากับ 0.967 และค่า R-Square

ที่มีการปรับแก้ให้เหมาะสม (adjusted coefficient of multiple determination, R^2_{adjusted}) เท่ากับ 0.949 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ (β) และค่า p -value ของสมการใน Table 3 จะเห็นได้ว่าพจน์ $\beta_1 R$ มีค่า p -value น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพจน์อื่นๆ ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากผลปาล์ม มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM จากการสกัดน้ำมันจาก DOPM มากกว่าตัวแปร เวลาในการสกัด และความเร็วยรอบในการสกัดตามลำดับ และได้ทดสอบค่า F -test ซึ่งผลที่ได้ คือ ค่า $F_0 = 54.17$ (จากสมการ) มีค่ามากกว่า $F_{\text{critical}} = 3.09$

(จากตาราง $f_{0.05,6,11}$) ดังนั้นตัวแปรอิสระ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์ม เวลาในการสกัด และความเร็วยรอบในการสกัด มีผลต่อปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM

$$Y = \beta_0 + \beta_1 R + \beta_2 S + \beta_3 T + \beta_4 RT + \beta_5 R^2 + \beta_6 T^2 \quad (2)$$

โดยที่ Y คือ ปริมาณผลได้ของน้ำมันกากผลปาล์ม (wt.%), R คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากผลปาล์ม (g/g), T คือ เวลาในการสกัด (min), S คือ ความเร็วยรอบในการสกัด (rpm), β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์

Table 3 Coefficient value and p -value of response surface model.

| Coefficient | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | β_4 | β_5 | β_6 |
|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| | 1.556 | 0.621 | 0.00280 | 0.436 | -0.01042 | -0.01032 | -0.00943 |
| p -value | 0.05097 | 0.0000004914 | 0.000381 | 0.000081162 | 0.00231 | 0.0000285797 | 0.00602 |

Note: $R^2 = 0.967$; $R^2_{\text{adjusted}} = 0.949$

สภาวะที่เหมาะสมของการสกัดน้ำมัน EDOPM

จากสมการทำนายความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์มกับเวลาในการสกัด อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์มกับความเร็วยรอบในการสกัด และความเร็วยรอบในการสกัดกับเวลาในการสกัด ที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้การสกัดน้ำมัน EDOPM แสดงกราฟ contour ใน Figure 2 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค RSM และใช้ excel solver tool พบว่าเงื่อนไขที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (optimal condition) ในการสกัดน้ำมันจาก DOPM คือ ที่อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากผลปาล์ม 25.6:1 g/g เวลาในการสกัด 9 min และความเร็วยรอบในการสกัด 552 rpm มีปริมาณผลได้สูงสุดจากสมการทำนาย เท่ากับ 13.00 wt.% และเมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวไปทดลองจริง พบว่าสามารถสกัดน้ำมันมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 12.58 wt.% ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากปริมาณผลได้ของน้ำมันที่ได้การทำนายประมาณ 3.34% ซึ่งได้แสดงเงื่อนไขและ

ปริมาณผลได้ของน้ำมันใน Table 4 และได้แสดงรูปตัวอย่างน้ำมัน EDOPM ใน Figure 3(a) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพกับ MCPO ซึ่งได้จากการเครื่องหีบแบบเกลียวอัดเดี่ยว จะพบว่า น้ำมัน EDOPM จากการสกัดด้วยตัวทำละลาย จะมีสีส้มอ่อนกว่าน้ำมัน MCPO ตาม Figure 3(b) ซึ่งคาดว่าสารแคโรทีนอยด์ในน้ำมันปาล์มถูกสกัดออกมาตั้งแต่การสกัดน้ำมัน MCPO จากผลปาล์มอย่าง องค์ประกอบของน้ำมัน EDOPM มีองค์ประกอบ คือ 2.48 wt.% (FFA), 20.00 wt.% (TG), 1.58 wt.% (DG) และ 75.94 wt.% (MG) ตามลำดับ และในน้ำมัน MCPO มีองค์ประกอบ คือ 11.13 wt.% (FFA), 75.38 wt.% (TG), 11.16 wt.% (DG) และ 2.33 wt.% (MG) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันอิสระน้ำมัน EDOPM มีค่า FFA น้อยกว่าน้ำมัน MCPO และน้ำมัน EDOPM มีปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ที่สูงมากกว่าน้ำมัน MCPO อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาปริมาณของน้ำมันที่ยังตกค้างภายหลังกระบวนการสกัดด้วยเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

พบว่า ยังมีปริมาณน้ำมันตกค้างอยู่ประมาณ 3.05 wt.% เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันใน DOPM ด้วยวิธี Soxhlet Extraction ซึ่งพบว่าใน DOPM มีปริมาณน้ำมัน เท่ากับ 15.63 wt.% แต่เนื่องจากการจะสกัดน้ำมัน EDOPM ออกมาให้ได้มากที่สุดจะต้องใช้ตัวทำละลายปริมาณมากเพื่อให้เหลือน้ำมันตกค้างใน OPM น้อยที่สุด ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องสกัดน้ำมันออกจาก DOPM จนหมดหรือมากที่สุด ดังเช่น งานวิจัยของ เทอดชัย (2548) ได้กล่าวไว้ในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถมีไขมันเป็นส่วนประกอบได้ไม่เกิน 5% และ National Research Council (1976) ได้รายงานว่ ปริมาณน้ำมันไขมันในอาหารแห้งของสัตว์มีได้ประมาณ 2-5% และในอาหารเม็ดมีไขมันได้ประมาณ 5% (National Research Council, 1989) และงานวิจัยของ Eastridge (2014) ได้ระบุว่า ปริมาณไขมันในอาหารสัตว์อยู่ในช่วงไม่เกิน 6-7% ของการบริโภคอาหาร จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงได้ทำการเลือกเงื่อนไขใหม่โดยการแทนค่าปริมาณผลได้ของน้ำมันจากผลปาล์ม (Y) ในสมการทำนายความสัมพันธ์ในสมการที่ 2 จะได้ค่าของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายเฮกเซนต่อกากผลปาล์ม (R) เวลาในการสกัด (T) และความเร็วยรอบในการสกัด (S) เงื่อนไขที่แนะนำ (recommended condition) ใช้ในการสกัดน้ำมันจากผลปาล์ม คือ ที่อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากผลปาล์ม 19.6:1 g/g เวลาในการสกัด 10.5 min และความเร็วยรอบในการสกัด 300 rpm มีปริมาณผลได้สูงสุดจากการทำนาย เท่ากับ 12.00 wt.% และเมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวไปทดลองจริง พบว่า สามารถสกัดน้ำมันมีปริมาณผลได้ เท่ากับ 11.80 wt.% ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนจากปริมาณผลได้ของน้ำมันที่ได้การทำนายประมาณ 1.69% ซึ่งได้แสดงเงื่อนไขและปริมาณผลได้ของน้ำมันใน Table 4 เพื่อหาประสิทธิภาพของการสกัดด้วยเงื่อนไขที่แนะนำและด้วยการสกัดด้วยวิธีการที่ใช้ในการวิจัยนี้ จึงได้เปรียบเทียบปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM จากวิธีการของวิจัยนี้ภายใต้เงื่อนไขที่แนะนำ พบว่ามีประสิทธิภาพลดลง 24.50% เมื่อเปรียบเทียบ

กับวิธี Soxhlet Extraction (ปริมาณผลได้ของน้ำมัน EDOPM เท่ากับ 15.63 wt.%) แต่การใช้วิธี Soxhlet Extraction เป็นวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณน้ำมันสูงสุด ไม่เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้งานจริง เนื่องจากใช้ความร้อนสูงและใช้เวลากัดน้ำมันช้ากว่า โดย Rocha et al. (2014) ได้รายงานว่ วิธีการสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วย Soxhlet Extraction จะใช้เวลาในการสกัดน้ำมันนาน ใช้ตัวทำละลายและพลังงานในการสกัดมาก ได้แสดงองค์ประกอบทางกายภาพ และทางเคมี อื่นๆ ของ DFOPM ใน Table 1 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทำให้ทราบว่า DFOPM สกัดน้ำมันจะทำให้โปรตีนมีปริมาณเพิ่มขึ้นประมาณ 39.50% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Berk (1992) ที่พบว่า ความเข้มข้นของโปรตีนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการนำส่วนประกอบที่ไม่ใช่โปรตีนถูกสกัดออกจากวัตถุดิบ และค่าความร้อนของ DFOPM ลดลงประมาณ 6.56% เมื่อเปรียบเทียบกับ DOPM ก่อนผ่านกระบวนการสกัดน้ำมัน เนื่องมาจาก DFOPM ถูกสกัดน้ำมันออก และจาก Table 1 พบว่า ค่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ของ DFOPM มีปริมาณมากกว่า DOPM แต่พบว่าค่าปริมาณไนโตรเจน (N) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี CHNS-O analyzer ใน DFOPM มีปริมาณที่น้อยกว่า DOPM ซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ AOAC : Kjeldahl method อาจจะเป็นเนื่องจากเนื่องจากว่า DFOPM คือ ผลิตภัณฑ์หลังการสกัดน้ำมันมีตัวทำละลายเฮกเซนตกค้างอยู่ใน DFOPM ซึ่งเฮกเซนที่ตกค้างมีสูตรโมเลกุล คือ C_6H_{14} ทำให้คาดว่าอาจจะเกิดแก๊สผสมของตัวทำละลายที่ตกค้างอยู่ในกาก DFOPM เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS-O analyzer จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ซึ่งได้จากการเฉลี่ยปริมาณแก๊สอื่นๆ ของ DFOPM ด้วย ทำให้ไนโตรเจน (N) มีปริมาณน้อยกว่า DOPM หรือก่อนสกัดน้ำมัน แต่ค่า CHNS-O ของทั้ง DFOPM และ DOPM เมื่อคำนวณเป็นค่าความร้อนจะสอดคล้องกับค่าความร้อน (Higher heating value, HHV) ซึ่งภายหลังจากสกัดน้ำมัน DFOPM จะมีค่า HHV น้อยกว่า DOPM เนื่องจากน้ำมันถูกสกัดออกไป

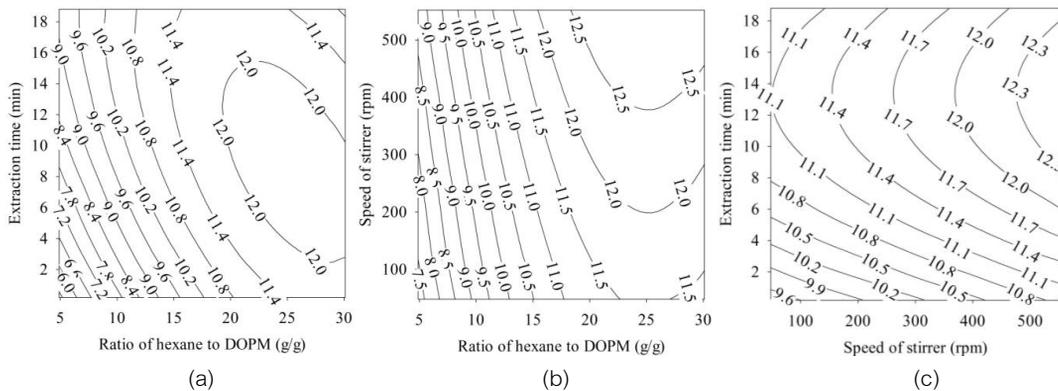


Figure 2 Contour plots of a model for the oil extraction from DOPM. (a) Effects of ratio of hexane to DOPM and extraction time, (b) effects of ratio of hexane to DOPM and speed of stirrer, and (c) effects of speed of stirrer and extraction time, on the yield of EDOPM

Table 4 Conditions and yields of oil extraction from DOPM

| Condition and yield | Optimal condition | Recommended condition |
|---|-------------------|-----------------------|
| Ratio of hexane to DOPM (g/g) | 25.6:1 | 19.6:1 |
| Extraction time (min) | 9.0 | 10.5 |
| Speed of stirrer (rpm) | 552 | 300 |
| Predicted oil yield | 13.00 | 12.00 |
| Verified oil yield* (wt.%) | 12.58 | 11.80 |
| Efficiency of oil extraction ^(a) (%) | 80.49 | 75.50 |

Note : ^(a) Compared with 15.63 wt.% of yield of EDOPM from oil extraction by Soxhlet Extraction.

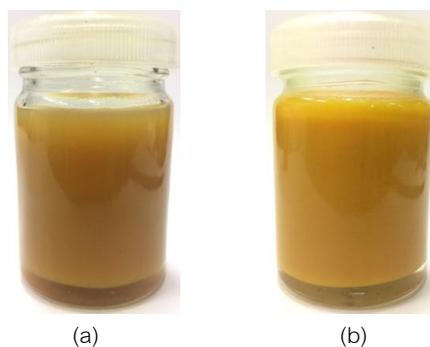


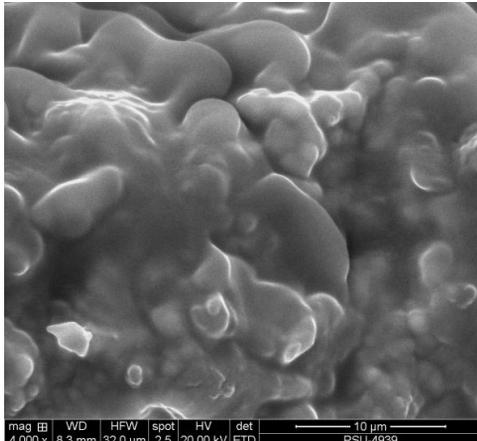
Figure 3 (a) EDOPM from solvent extraction process, and (b) MCPO from mechanical extraction process.

ลักษณะพื้นผิวเส้นใยของ DOPM และ DFOPM
 เพื่อให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวเส้นใยของ DOPM และ DFOPM โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิด

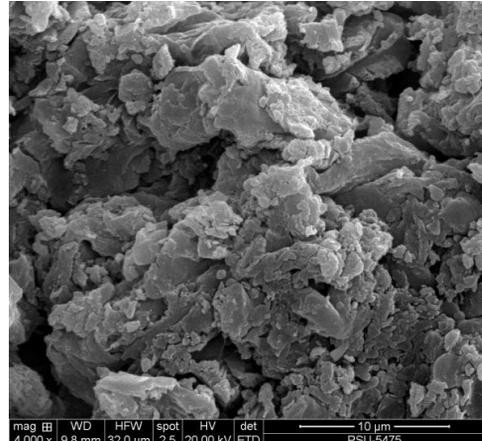
ส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) ดูลักษณะพื้นผิวของ DOPM ก่อนผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลาย ดังแสดงใน **Figure 4(a)**

จะเห็นได้ว่า DOPM ที่ผ่านกระบวนการหีบน้ำมันด้วยเครื่องหีบแบบเกลียวอัดเดี่ยวแล้วหนึ่งรอบยังคงมีน้ำมันเหลืออยู่ สังเกตได้จากผิวของกากผลปาล์มยังมีลักษณะเป็นผิวที่มีลักษณะคล้ายกลุ่มของน้ำมันเคลือบอยู่บนผิว DOPM และ Figure 4(b) แสดงผิว DFOPM ภายหลังจากผ่านกระบวนการสกัดน้ำมัน โดยตัว

ทำละลายจะเข้าไปถึงกลุ่มน้ำมันที่เคลือบผิว DOPM เมื่อน้ำมันถูกชะออกไปละลายในตัวทำละลาย จะทำให้ผิวของ DOPM มีลักษณะผิวเรียบไม่มีนวลวาว ซึ่งผิวของ DOPM และ DFOPM มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน



(a)



(b)

Figure 4 Scanning Electron Microscopy images: (a) DOPM; (b) DFOPM

สรุป

การศึกษาการสกัดน้ำมันจากกากผลปาล์มเพื่อนำกากผลปาล์มหลังสกัดน้ำมันไปใช้เป็นอาหารสัตว์ เคี้ยวเอื้องพบว่าเงื่อนไขสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดน้ำมัน คือ ที่อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อกากผลปาล์ม 19.6:1 g/g เวลาในการสกัด 10.5 min และความเร็วยรอบในการสกัด 300 rpm จากการทดลองจริง มีปริมาณผลได้ของน้ำมัน เท่ากับ 11.80 wt.% จะได้กากผลปาล์มไขมันต่ำ (DFOPM) หลังสกัดน้ำมันที่มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นจาก 8.38 wt.% เป็น 11.69 wt.% หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 39.50% เมื่อเปรียบเทียบกับกากผลปาล์มแห้ง (DOPM) ซึ่งคาดว่าปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นและปริมาณไขมันที่ลดลงจะทำให้ OPM มีคุณค่าทางโภชนาการที่เพิ่มมากขึ้น เป็นทางเลือกหนึ่งเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบที่มีคุณภาพในการผลิตเป็นอาหารสัตว์

และจะได้นำไปศึกษาการใช้ DFOPM ไปทดลองผสมในสูตรเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป

คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัยและสนับสนุนทุนวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ NAT581217a

เอกสารอ้างอิง

จินดา สนทวงศ์ ณ อยุธยา. 2548. การใช้กากปาล์มน้ำมันเป็นอาหารโค-กระบือ. น.383-395. ใน: รายงานผลงานวิจัยประจำปี 2548 กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

- เทอดชัย เวียร์ศิลป์. 2548. บทที่ 12 การย่อยและเมตาโบลิซึมของไขมัน. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. บริษัทที่รีแอดเวอร์ไทซิงแอนด์มีเดีย จำกัด, เชียงใหม่.
- ปิ่น จันจุฬา. 2558. การพัฒนาและการใช้ประโยชน์ผลพลอยได้จากการปลูกปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเพื่อเป็นอาหารสัตว์: 2. การใช้ประโยชน์ของกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์. 2: 1-16.
- พันทิพา พงษ์เพียรจันทร์. 2539. การผลิตอาหารสัตว์. โอ.เอส. พรินติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). การแปรรูปปาล์มน้ำมัน. แหล่งข้อมูล: <https://goo.gl/bT1fpN>. ค้นเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2559.
- Abdullah, M., and A. Bulent Koc. 2013. Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication. *Renewable Energy*. 50: 965-970.
- Al-Hamamre, Z., S. Foerster, F. Hartmann, M. Kröger, and M. Kaltschmitt. 2012. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel*. 96: 70-76.
- Berk, Z. 1992. Chapter 5 Soybean protein concentrates (SPC). Technology of production of edible flours and protein products from soybeans. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available: <https://goo.gl/0aQFpi>. Accessed Dec. 10, 2015.
- Eastridge. 2014. Feeding fat in moderation to dairy cows. Available: <https://goo.gl/2WMCTC>. Accessed Dec. 2, 2015.
- Moldoveanu, S., and V. David. 2014. Chapter 6 Solvent Extraction, Modern Sample Preparation for Chromatography. 1st Edition. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- National Research Council. 1976. Nutrient Requirements of Beef Cattle. 5th Edition. The National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council. 1989. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 6th Edition. The National Academy Press, Washington, D.C.
- Reshad, A. S., P. Tiwari, and V. V. Goud. 2015. Extraction of oil from rubber seeds for biodiesel application: Optimization of parameters. *Fuel*. 150: 636-44.
- Rocha, M. V. P., L. J. B. L. de Matos, L. P. de Lima, P. M. da S. Figueiredo, I. L. Lucena, F. A. N. Fernandes, and L. R. B. Goncalves. 2014. Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. *Bioresource Technology*. 167: 343-48.