การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุ

Free fatty acid reduction in crude palm oil by using an ion-exchange resin

ชนินทร์ จินตนาวงศ์ ประกอบ กิจไชยา

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานการลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) โดยกระบวนการดูดซับของกรดไขมันอิสระด้วยเรซินแลกเปลี่ยนประจุ Lewatit S 6368 ในคอลัมน์แบบเบดบรรจุซึ่งปริมาตรรวมของเรซินเท่ากับ 61 มิลลิลิตรในน้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยจะศึกษากราฟเบรคทรูจ์ (Breakthrough curve) ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบเท่ากับ 0.76 1.30 และ 2.48 มิลลิลิตรต่อนาทีตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบจาก 3.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักเหลือ 0.01 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับการทดลองสามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K) เท่ากับ 6.13 มิลลิลิตรน้ำมันปาล์มดิบต่อมิลลิลิตรเรซิน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในเรซิน (D_e) เท่ากับ 5.8×10^{-7} ตารางเซนติเมตรต่อวินาทีโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.99

คำสำคัญ : กรดไขมันอิสระ, น้ำมันปาล์มดิบ, กราฟเบรคทรูจ์, เรซินแลกเปลี่ยนประจุ, การดูดซับ

Abstract

This paper reports a reduction of free fatty acid (FFA) in crude palm oil by using an ion-exchange resin, namely Lewatit S 6368. 61 ml of the resin was packed in a packed bed column fed with crude palm oil (CPO) at 60ºC. Breakthrough curve for reducing FFA in CPO solution was determined at volumetric flow rates of 0.76, 1.30 and 2.48 ml/min, respectively. FFA was reduced in the column from 3.5 to 0.01 wt %. By applying a mathematical model of breakthrough curve, equilibrium adsorption constant (K) and effective diffusitivity (D_e) were determined to be 6.13 ml/g resin and 5.8×10^{-7} cm^2/s, respectively, with the Coefficient of Determination (R^2) = 0.99.

Keywords : Free fatty acid, Crude palm oil, Breakthrough curve, Ion-exchange resin, Adsorption.

1. บทนำ

การลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบเป็นกระบวนการหนึ่งในการทำน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์ซึ่งในน้ำมันปาล์มดิบสดใหม่จะมีปริมาณกรดไขมันอิสระประมาณ 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และกรดไขมันเหล่านี้จะทำให้น้ำมันปาล์มมีฤทธิ์เป็นกรด และยังทำให้น้ำมันปาล์มมีกลิ่นไม่ดีอีกด้วย จึงจำเป็นต้องทำการลดกรดไขมันอิสระก่อนนำน้ำมันปาล์มมาบริโภค ซึ่งกระบวนการลดกรดไขมันอิสระที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปมีสองวิธีคือ การกลั่นแยกในสภาวะสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการทำให้เป็นกลางโดยใช้ด่างเข้มข้น ซึ่งทั้งสองกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานสูงและอาจสูญเสียผลผลิตน้ำมันปาล์มไปกับกระบวนการเหล่านี้เป็นจำนวนมาก [1] ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียผลผลิตน้ำมันปาล์มและพลังงาน กระบวนการดูดซับจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถใช้ลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบได้ดี จากรายงานของ Cren และคณะ [2] เรซิน Amberlyst 26A OH ซึ่งเป็นเรซินประจุลบสามารถดูดซับกรดโอเลอิกในสารละลายเอทานอลและสามารถดูดซับกรดโอเลอิกได้สูงสุดเท่ากับ 1.34 กรัมต่อกรัมเรซิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบด้วยตัวดูดซับเรซินประจุลบ Lewatit S 6368 ในรูปไฮดรอกไซด์เพื่อศึกษากราฟเบรคทรูจ์ (Breakthrough curve) ของการลดกรดไขมันอิสระโดยไม่มีการผสมเอทานอลเข้ากับ CPO

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกราฟเบรคทรูจ์

สมการดุลมวลสารของกรดไขมันอิสระในเบดเรซินสามารถเขียนได้เป็นสมการ Partial Differential ดังสมการที่ 1 [3]

$$-u\frac{\partial C}{\partial z} = -D_L\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_b}{\varepsilon}\frac{\partial q}{\partial t} \quad (1)$$

สมมติฐานในการแก้ปัญหามีดังนี้คือ (1)เกรเดียนของความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระตามแนวรัศมีของเบดมีค่าน้อย (2)การทดลองมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ (3)อัตราการดูดซับเป็นแบบ linear driving force แสดงดังสมการที่ 2 (4)ระบบมีอุณหภูมิคงที่ (5)สมบัติทางกายภาพของเรซิน และของไหลมีค่าคงที่ (6)void fraction ในเบดเปลี่ยนแปลงน้อยเสมือนคงที่ (7)สมดุลการดูดซับเป็นเส้นตรง [3]

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -k_f(q - q_{eq}) = k_f\frac{K}{\rho_p}(C - C^*) \quad (2)$$

สมดุลการดูดซับในการทดลองนี้จะใช้สมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ 3 [3]

$$q_{eq} = \frac{K}{\rho_p}C^* \quad (3)$$

เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตของการทดลองนี้เป็นไปตามสมการที่ 4 5 6 และ 7 ตามลำดับ [4]

$$q(0,z) = 0 \quad (4)$$

$$C(0,z) = 0 \quad (5)$$

$$C(t,0) = C_{Feed} + \frac{D_L}{u}\frac{\partial C}{\partial z} \quad (6)$$

$$\frac{\partial C(t,z)}{\partial z} = 0 \text{ ที่ } z = L \quad (7)$$

2.2 Mass Transfer Resistance

อัตราการดูดซับในสมการที่ 2 เป็นผลเนื่องมาจากการถ่ายเทมวลสารทั้งภายนอกและภายในของเรซินซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 8 [3]

$$\frac{1}{k_f K} = \frac{R_p}{3k_c} + \frac{R_p^2}{15D_e} \quad (8)$$

เมื่อ ทางซ้ายของสมการที่ 8 คือ Overall Mass Transfer Resistance ซึ่งเป็นผลรวมของ External และ Internal Mass Transfer ในพจน์ที่ 1 และ 2 ในทางขวาของสมการที่ 8 ค่า k_C สามารถคำนวณได้จาก Sherwood number ซึ่งเป็นตัวแปรไร้หน่วยที่นิยามดังสมการที่ 9 [5]

$$Sh = \frac{k_c 2R_p}{D_{AB}} \quad (9)$$

เมื่อ Dwidevi และ Upadhyay ได้นำเสนอความสัมพันธ์ของ J_D สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุไว้ดังสมการที่ 10 [5]

$$\varepsilon J_D = \frac{0.765}{\mathrm{Re}^{0.82}} + \frac{0.365}{\mathrm{Re}^{0.368}} \quad (10)$$

โดยที่ J_D นิยามตามสมการที่ 11 [5]

$$J_D = \frac{Sh}{Sc^{1/3}\,\mathrm{Re}} \quad (11)$$

เมื่อ Re และ Sc คือ Reynold และ Schmidt number ตามลำดับนิยามดังสมการที่ 12 และ 13[5]

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho 2R_p u}{\mu} \quad (12)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (13)$$

2.3 Axial Dispersion

ผลของ Axial Dispersion จะมีความสำคัญเมื่ออัตราการไหลของของไหลต่ำและ Reynold number มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ Axial Dispersion (D_L) สามารถคำนวณผ่าน Peclet number (Pe) ซึ่งนิยามตามสมการที่ 14 [7]

$$Pe = \frac{u2R_p}{D_L} \quad (14)$$

Wakao ได้นำเสนอความสัมพันธ์ของ Pe ไว้ดังสมการที่ 15 [7]

$$\frac{1}{Pe} = \frac{20}{\varepsilon}\left(\frac{1}{\mathrm{Re}\,Sc}\right) + \frac{1}{2} \quad (15)$$

2.4 การหาค่าปริมาณการดูดซับทั้งหมด

ปริมาณการดูดซับกรดไขมันอิสระทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16 [2]

$$q_{total} = \frac{C_{Feed}\dot{V}}{m_{resin}}\int_0^{t_{end}}\left(1-\frac{C_{Out}}{C_{Feed}}\right)dt \quad (16)$$

2.5 ขั้นตอนวิธีการแก้ปัญหา

ในการหาคำตอบของสมการจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยประยุกต์ใช้วิธี Method of lines ซึ่งจะเปลี่ยน Partial Differential Equation ให้เป็น Ordinary Differential Equation แล้วแก้สมการโดยใช้วิธี Runge-Kutta [8]

3. การทดลอง

3.1 การเตรียมเรซิน Lewatit S 6368 ให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์

เรซินประจุลบ Lewatit S 6368 เกรดการค้าจะอยู่ในรูปคลอไรด์ไอออน จึงต้องทำการเปลี่ยนรูปของเรซินให้อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ก่อน ซึ่งการเปลี่ยนรูปเรซินจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาณ 300 มิลลิลิตรไหลผ่านเรซินด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาทีโดยบรรจุเรซินปริมาตร 65 มิลลิลิตรในน้ำกลั่นในหลอดแก้วทรงกระบอกขนาด 80 มิลลิลิตร ล้างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค้างในเบดด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ออกมามีฤทธิ์เป็นกลาง จากนั้นแทนที่น้ำในเบดและในรูพรุนของเรซินด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เกรดการค้าปริมาณ 300 มิลลิลิตร หลังจากผ่านด้วยไอโซโพรพานอลปริมาตรของเบดเรซินจะเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในสารละลายต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาตรของเบดเรซินที่มีน้ำหนักแห้งเท่ากับ 45 กรัมเมื่ออยู่ในสารละลายต่างๆ

สารละลาย	ปริมาตรเบดเรซิน (มิลลิลิตร)	void fraction
น้ำกลั่น	65	0.37
ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	59	0.31
น้ำมันปาล์มดิบ	61	0.32

3.2 การทดลองหากราฟเบคทรูจ์ของการลดกรดไขมันอิสระ

น้ำมันปาล์มดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระเท่ากับ 3.5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักจะถูกปั๊มผ่านคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเรซิน Lewatit S 6368 โดยมีปริมาตรในน้ำมันปาล์มดิบเท่ากับ 61 มิลลิลิตรความยาวของเบดเท่ากับ 40 เซนติเมตร เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบมีการแยกชั้นของปาล์มโอเลอินและปาล์มสเตียรินที่อุณหภูมิห้องจึงทำการทดลองที่อุณหภูมิคงที่ 60 องศาเซลเซียสเพื่อให้ปาล์มโอเลอินและปาล์มสเตียรินในน้ำมันปาล์มดิบละลายเข้ากันได้ดีโดยมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.76 1.30 และ 2.48 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันปาล์มดิบที่ทางออกของคอลัมน์ทุก 30 นาทีจากนั้นทำการวัดปริมาณกรดไขมันอิสระต่อไป

3.3 การวัดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ [9]

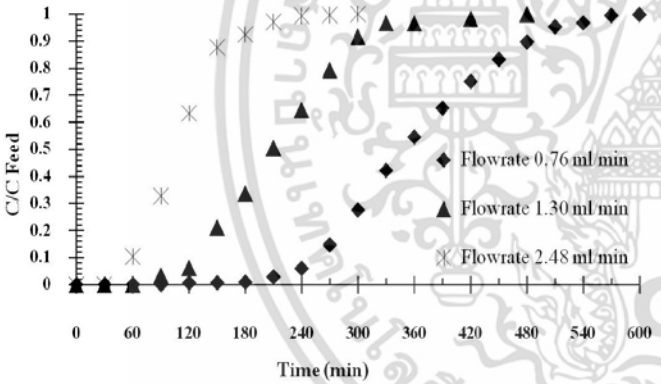
การวัดปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบทำโดยการไทเทรตตัวอย่างน้ำมันกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาตรฐานโดยใช้ฟีนอฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ซึ่งจะมีจุดยุติอยู่ที่ pH 8.3 – 10.0 และสารละลายจะเป็นสีชมพูอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลกราฟเบรคทรูจ์ของการลดกรดไขมันอิสระ

จากการทดลองลดกรดไขมันอิสระโดยการปั๊มน้ำมันปาล์มดิบผ่านเรซิน Lewatit S 6368 ในรูปไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสโดยมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างๆ แสดงดังรูปที่ 1 เนื่องจากปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มที่ใช้บริโภคไม่ควรเกิน 0.1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก [1] ปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 0.031 กรัมกรดไขมันอิสระต่อมิลลิลิตรน้ำมันปาล์มดิบ (3.5 wt%) ดังนั้นจุด Break point จึงกำหนดให้เท่ากับ 0.028 C_{Feed} และพบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบมีผลต่อ t_{break} (เวลาที่จุด Break point) และ t_{end} (เวลาที่จุดอิ่มตัว) ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 กราฟเบคทรูจ์ของกรดไขมันอิสระที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างๆ

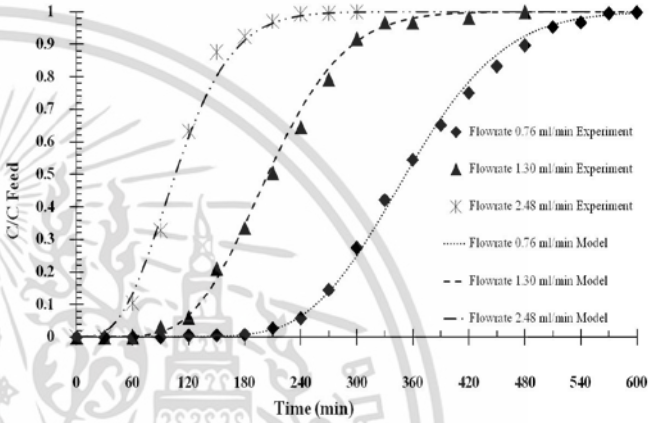
ตารางที่ 2 ปริมาณการดูดซับ t_{break} t_{end} และ t_{Cont} ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างๆ

$\dot{V}$ (ml/min)	2.48	1.30	0.76
q_{total} (g_{FFA}/g_{resin})	0.1870	0.1880	0.1880
t_{break} (min)	30	90	360
t_{end} (min)	210	240	570
t_{Cont} (min)	8.15	15.54	26.58

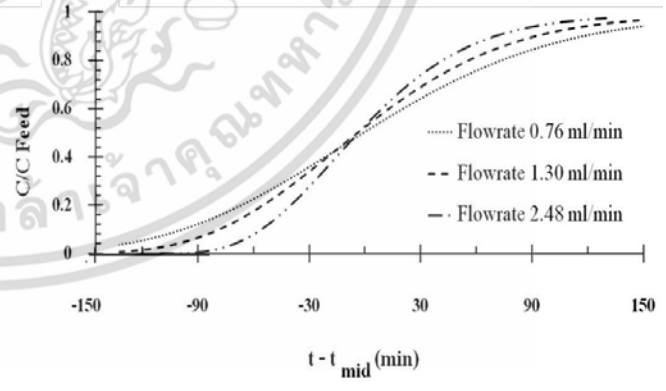
จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรเท่ากับ 0.76 มิลลิลิตรต่อนาทีมี t_{break} และ t_{end} นานที่สุด เพราะเวลาในการสัมผัสกันของกรดไขมันอิสระกับเรซินนานที่สุด

4.2 ผลการคำนวณกราฟเบรคทรูจ์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการคำนวณกราฟเบคทรูจ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบกราฟเบคทรูจ์ที่คำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลที่ได้จากการทดลองที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างๆ



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบกราฟเบรคทรูจ์ที่อัตราการไหลต่างๆเมื่อ t mid คือเวลาที่ C/C_{Feed} เท่ากับ 0.5

จากรูปที่ 3 พบว่าที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่างๆกราฟเบรคทรูจ์จะมีความชันแตกต่างกันเนื่องมาจากอัตราการไหลมีผลต่อ External Mass Transfer Resistance (EMTR) ซึ่งเมื่ออัตราการไหลของของไหลมีค่าสูงทำให้อัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายเทมวลสารภายนอกเรซินเกิดขึ้นเร็ว ทำให้ EMTR มีค่าน้อยกว่ากรณีที่อัตราการไหลเชิงปริมาตรต่ำ นอกจากนี้ผลของอัตราการไหลยังส่งผลทำให้เกิด Axial Dispersion ซึ่งจะมีผลมากในกรณีที่อัตราการไหลมีค่าต่ำมากๆจนผลอัตราการแพร่ของความเข้มข้นตามความยาวของเบดมีความสำคัญมากขึ้น ซึ่งผลของ EMTR และ Axial Dispersion จะแสดงในรูปของค่า k_C และ D_L ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าต่างๆของกราฟเบรคทรูจ์ในการดูดซับของกรดไขมันอิสระ

$\dot{V}$ (ml/min)	0.76	1.30	2.48
Re	0.007	0.012	0.023
Sh	69.062	77.077	88.364
Pe	1.902	1.941	1.967
Sc	33.33×10^{4}	33.33×10^{4}	33.33×10^{4}
k_f (1/min)	0.102	0.103	0.105
k_C (cm/s)	1.05×10^{-3}	1.17×10^{-3}	1.34×10^{-3}
D_L (cm^2/s)	7.45×10^{-4}	1.23×10^{-3}	2.29×10^{-3}
R^2	0.999	0.998	0.994

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 3 มาคำนวณ Mass Transfer Resistance ในสมการที่ 8 จะพบว่าอัตราการดูดซับเป็นผลจาก External และ Internal Mass Transfer ประมาณ 6 และ 94 เปอร์เซนต์ตามลำดับซึ่งสามารถคำนวณค่า D_e ได้เท่ากับ 5.83×10^{-7} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองลดกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้กระบวนการดูดซับด้วยเรซิน Lewatit S 6368 ในคอลัมน์เบดบรรจุที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสพบว่าสามารถลดกรดไขมันอิสระได้จริงโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องสามารถอธิบายกราฟเบรคทรูจ์ได้ (R^2=0.99) และสามารถคำนวณค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (K) และสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในเรซินเท่ากับ (D_e) ได้เท่ากับ 6.13 มิลลิลิตรน้ำมันปาล์มดิบต่อมิลลิลิตรเรซิน และ 5.8×10^{-7} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

6. เอกสารอ้างอิง

[1] F. Shahidi, Bailey's Industrial Oil & Fat Products, John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

[2] E. C. Cren, C. L. Filho, E. A. Silva, and J. A. Meirelles, "Breakthrough curves for oleic removal from ethanolic solutions using a strong anion exchange resin," Separation and Purification Technology, Vol. 69, pp. 1-6, 2009.

[3] J. D. Seader, and E. J. Henley, Separation Process Principles, John Wiley & Sons, New York, 1998.

[4] V. P. Danckwerts, "Continuous flow systems distribution of residence times," Chem. Eng. Sci., Vol. 2, pp. 1-13, 1953.

[5] N. P. Dwidevi, and N. S. Upadhyay, "Particle-fluid mass transfer in fixed and fluidized beds," Ind. Eng. Chem. Process Des., Vol. 16, pp.157-165, 1977.

[6] A. K. Reddy, and K. L. Doraiswamy, "Estimating Liquid Diffusivity," Ind. Eng. Chem. Fund., Vol. 6, pp.77-79, 1967.

[7] D. M. Ruthven, Principles of Adsorption and Adsorption processes, John Wiley & Sons, New York, 1984.

[8] S. C. Chapra and R. P. Canale, Numerical Methods for Engineers, Mcgraw-Hill, New York, 1998.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[9] H. R. Lin, and C. I. Lin, "Kinetics of adsorption of free fatty acids from water-degummed and alkali-refined soy oil using regenerated clay," Separation and Purification Technology, Vol. 44, pp.258-265, 2005.

7. ภาคผนวกสัญลักษณ์

C คือความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระ (กรัมกรดไขมันอิสระต่อมิลลิลิตรน้ำมันปาล์มดิบ)

$C*$ คือความเข้มข้นที่จุดสมดุล (กรัมกรดไขมันอิสระต่อมิลลิลิตรน้ำมันปาล์มดิบ

C_{Feed} คือความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่เข้าคอลัมน์ (กรัมต่อมิลลิลิตร)

C_{Out} คือความเข้มข้นของกรดไขมันอิสระที่ออกจากคอลัมน์ (กรัมต่อมิลลิลิตร)

D_{AB} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบ มีค่าเท่ากับ 1.03×10^{-6} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที คำนวณได้จากสมการของ Reddy และ Doraiswamy [6]

D_e คือสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในเรซิน (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

D_L คือสัมประสิทธิ์ Axial Dispersion (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)

K คือค่าคงที่สมดุล (มิลลิลิตรน้ำมันปาล์มดิบต่อมิลลิลิตรเรซิน)

k_c คือสัมประสิทธิ์การเทมวลสารภายนอก (เซนติเมตรต่อวินาที)

k_f คือค่าคงที่อัตราการดูดซับ (นาที$^{-1}$)

L คือความยาวของเบดเรซินทั้งหมดเท่ากับ 40 เซนติเมตร

m_{resin} คือน้ำหนักทั้งหมดของเรซินแห้ง (กรัม)

q คือปริมาณกรดไขมันอิสระที่ถูกดูดซับบนเรซิน (กรัมกรดไขมันอิสระต่อกรัมเรซิน)

q_{eq} คือค่าการดูดซับที่จุดสมดุล (กรัมกรดไขมันอิสระต่อกรัมเรซิน)

q_{total} คือปริมาณการดูดซับของกรดไขมันอิสระทั้งหมด (กรัมกรดไขมันอิสระต่อกรัมเรซิน)

R_p คือรัศมีของเรซินมีค่าเท่ากับ 0.055 เซนติเมตร

R^2 คือสัมประสิทธิ์การกำหนด

t คือเวลา (นาที)

t_{break} เวลาที่จุด Break point (นาที)

t_{Cont} เวลาในการสัมผัสกันของกรดไขมันอิสระกับเรซิน (นาที) $= \varepsilon V_{bed} / \dot{V}$

t_{end} คือเวลาที่จุดอิ่มตัวของเรซิน (นาที)

t_{mid} คือเวลาที่ C/C_{Feed} เท่ากับ 0.5

u คือความเร็วของน้ำมันปาล์มดิบในเบดเรซิน (เซนติเมตรต่อนาที)

$\dot{V}$ คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร (มิลลิลิตรต่อนาที)

V_{bed} คือปริมาตรเบดเรซิน (มิลลิลิตร)

z คือความยาวของเบดเรซิน (เซนติเมตร)

ตัวแปรไร้หน่วย

Pe Peclet number $= u2R_p / D_L$

Re Reynold number $= u2R_p / D_L$

Sc Schmidt number $= \mu / \rho D_{AB}$

Sh Sherwood number $= k_c 2R_p / D_{AB}$

อักษรกรีก

ε คือ void fraction ในเบดเรซิน

μ คือความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเท่ากับ 0.1639 กรัมต่อ(เซนติเมตร วินาที) [1]

ρ คือความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเท่ากับ 0.87 กรัมต่อมิลลิลิตร [1]

ρ_b คือ bulk density ของเรซินมีค่าเท่ากับ 0.74 กรัมเรซินต่อมิลลิลิตรเบดเรซิน

ρ_p คือ resin density คำนวณโดย $\rho_p = \rho_b / (1-\varepsilon)$ (กรัมเรซิน ต่อมิลลิลิตรเรซิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้