

การโยงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลน์กับมวลโมเลกุล
ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีการควมรวมพลังงานกิบส์

THE CORRELATION OF KINEMATIC VISCOSITY
AND MOLECULAR MASS OF FATTY ACID METHYL ESTER
WITH GIBBS ENERGY ADDITIVITY METHOD

ติณณภพ จุ่มอิน^{1*}, สุภาพรรณ สัจจวรรณ², สุริยา พันธโกศล³ และ คณิงนิต ปทุมมาเกษร⁴

^{1,4}สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม กรุงเทพมหานคร 10900

²สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม กรุงเทพมหานคร 10900

³สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและออกแบบแม่พิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร 10600

Thinnaphop Chum-in^{1*}, Suphapan Satchawan², Suriya Phankosol³ and คณิงนิต ปทุมมาเกษร⁴

^{1,4}Division of Production Technology, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University,
Bangkok, 10900.

²Division of Chemistry, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University,
Bangkok, 10900.

³Department of Tool and Die Engineering, Faculty of Science and Technology,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok, 10600.

*E-mail: thinnaphop@gmail.com

Received: 2018-07-24

Revised: 2018-11-25

Accepted: 2019-01-10

บทคัดย่อ

ความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญและมีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการสูบน้ำในระบบเผาไหม้ของเครื่องยนต์ โดยความหนืดจลน์จะเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันและอุณหภูมิ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อโยงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์กับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ด้วยวิธีการควมรวมพลังงานกิบส์ (GEAM) เพื่อใช้เป็นสมการอย่างง่ายในการประมาณค่าความหนืดจลน์จากการศึกษาพบว่าความหนืดจลน์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับมวลโมเลกุล โดยสามารถประมาณความหนืดจลน์ได้ทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และ

ไบโอดีเซลในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 278.15 ถึง 373.15 K โดยใช้สมการชุดเดียวกัน และยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (AAD) ที่ยอมรับได้ ดังนั้นสมการจึงมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้งานเพื่อศึกษาความหนืดจลน์ได้อย่างรวดเร็ว ช่วยให้ประหยัดเวลา และลดต้นทุนในการทดลองลงได้

คำสำคัญ: กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ ความหนืดจลน์ มวลโมเลกุล ไบโอดีเซล วิธีการพลังงานควมรวมกิบส์

ABSTRACT

Kinematic viscosity of biodiesel is important physical properties and directly effect on the injection process of the engine. It changes with the chemical composition of fatty acid and temperature. This research aims to correlate between kinematic viscosity and molecular mass of fatty acid methyl ester by Gibbs Energy Additivity Method (GEAM), to use a simple equation for estimating kinetic viscosity. Accordingly, it was found that kinematic viscosity is highly linear relationship to of fatty acid methyl ester. Hence, kinematic viscosity of both fatty acid methyl ester and biodiesels can be estimated by using the same equation in temperature range of 278.15 to 373.15 K. The Average Absolute Deviation (AAD) are still accepted. Therefore, the equation is very useful for the rapid application of kinematic viscosity, to help saving time and saving cost in experimental.

Keywords: Fatty acid methyl ester, Kinematic viscosity, Molecular mass, Biodiesel, Gibbs energy additivity method

บทนำ

ไบโอดีเซลถือเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในการนำมาทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีสมบัติใกล้เคียงกัน (Aransiola, Ojumu, Oyekola, Madzimbamuto, & Ikhu-Omoregbe, 2014; Ashraful et al., 2014; Atabani et al., 2013; Atadashi, Aroua, & Aziz, 2010) ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าองค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีเซลมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซล (Ashraful et al., 2014; Phankosol, Sudaprasert, Lilitchan, Aryusuk, & Krisnangkura, 2014) จึงทำให้มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาและพัฒนาความสัมพันธ์สมการต่าง ๆ ขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าสมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซล (Krisnangkura,

Yimsuwan, & Pairintra, 2006; Phankosol, Sudaprasert, Lilitchan, Aryasuk, & Krisnangkura, 2015; Pratas et al., 2011; Yuan, Hansen, & Zhang, 2009) ซึ่งความหนืดจลน์ ถือได้ว่าเป็นสมบัติหนึ่งที่ได้รับคามนิยามอย่างยิง เนื่องจากความหนืดจลน์เป็นสมบัติที่มีผลต่อการสูกัดและการพ่นฝอยของไบโอดีเซล และส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ (Ashraful et al., 2014) โดยการพัฒนาสมการความสัมพันธ์ของความหนืดจลน์กับองค์ประกอบทางเคมีพบมีรายงานผลการศึกษามากมายอย่างต่อเนื่อง เช่น Knothe และ Steidley (Knothe & Steidley, 2011) ได้พัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคาร์บอนอะตอมและความหนืดจลน์ในรูปสมการพหุนามกำลังสาม ดังสมการที่ (1)

$$\mu = 0.30487 + 0.0265z + 0.0066z^2 + 0.000491z^3 \quad (1)$$

เมื่อ μ และ z คือ ความหนืดจลน์ และจำนวนคาร์บอนอะตอม โดยสมการที่ (1) ถูกใช้ในการประมาณค่าความหนืดจลน์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัว ที่อุณหภูมิ 40 °C เท่านั้นและมีความแม่นยำสูง ต่อมาได้มีการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์โดยการนำเสนอของ Allen et al. (Allen, Watts, Ackman, & Pegg, 1999) ซึ่งสมการความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุล และจำนวนพันธะคู่ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ เพื่อใช้ในการประมาณค่าความหนืดจลน์ของทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว (C18:X) ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\mu_{sat} = 1.05 \times 10^4 M^2 - 0.0242M + 2.15 \quad (2)$$

$$\mu_{unsat-C18} = 0.153n_d^2 - 115n_d + 4.73 \quad (3)$$

เมื่อ μ_{sat} , μ_{unsat} , M (g/mol) และ n_d คือ ความหนืดจลน์ของกรดไขมันอิ่มตัว ความหนืดจลน์ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว มวลโมเลกุล และจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลของ C18:X ตามลำดับ โดยสมการที่ (2) และ (3) แต่สมการมีข้อจำกัด คือ สามารถประมาณค่าได้เฉพาะอุณหภูมิเดียว คือ 40 °C และสมการของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว แยกจากกัน (Allen et al., 1999) ทำให้มีความยุ่งยากต่อการใช้งานเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้สมการในการประมาณค่าความหนืดสัมบูรณ์ของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวได้ในสมการเดียว จึงได้มีการนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลและจำนวนพันธะคู่ โดยสมการนี้ได้รับการนำเสนอโดย Ramírez-Verduzco et al. (Ramírez-Verduzco, Rodríguez-Rodríguez, & Jaramillo-Jacob, 2012) ดังสมการที่ (4)

$$\ln \eta = -12.503 + 2.496 \ln M - 0.178n_d \quad (4)$$

เมื่อ η คือ ความหนืดสัมบูรณ์โดยสมการที่ (4) เป็นสมการที่นำเสนอถึงความสัมพันธ์ของความหนืดสัมบูรณ์ที่เป็นฟังก์ชันของลอการิทึมธรรมชาติของมวลโมเลกุลและจำนวนพันธะคู่

ทำให้สมการสามารถประมาณค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ทั้งของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในสมการเดียว แต่อย่างไรก็ตามสมการยังคงไม่สามารถประมาณค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กล่าวคือสามารถประมาณค่าของความหนืดสัมบูรณ์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ได้เฉพาะที่ 40 °C เท่านั้น

จะสังเกตได้ว่าสมการที่ (1) – (4) ความหนืดจลน์และความหนืดสัมบูรณ์มีความสัมพันธ์กันสูงกับองค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมัน แต่อย่างไรก็ตามสมการกลับไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงทำให้สมการมีข้อจำกัดคือ สามารถประมาณค่าได้เฉพาะที่อุณหภูมิเดียว แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะพบว่า ความหนืดจลน์และความหนืดสัมบูรณ์จะมีพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิด้วย ต่อมา Felipe และ Rami´rez-Verduzco (Felipe & Rami´rez-Verduzco, 2013) ได้พัฒนาต่อยอดสมการที่ (4) ให้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิทำให้สมการสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังสมการที่ (5)

$$\ln \eta = -18.354 + 2.362 \ln(M) - 0.127n_d + \frac{2009}{T} \quad (5)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) โดยสมการที่ (5) ถือเป็นรูปแบบสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการประมาณค่าความหนืดสัมบูรณ์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ทั้งอิ่มตัวไม่อิ่มตัว และมีความแม่นยำสูง โดยทั่วไปไบโอดีเซลก็คือกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ชนิดต่าง ๆ ผสมกันอยู่ ดังนั้นในการประมาณค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลจะอาศัยกฎการผสมช่วยในการประมาณค่า ซึ่ง Allen et al. (Allen et al., 1999) ได้นำเสนอไว้ดังสมการที่ (6)

$$\ln \mu = \sum_{i=1}^k x_i \ln \mu_i \quad (6)$$

เมื่อ x คือ สัดส่วนโดยมวลหรือมวลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์แต่ละตัว (i)

สำหรับวิธีการควมรวมพลังงานกิบส์ (Gibbs energy additivity method, GEAM) มีแนวคิดในการโยงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ และถูกนำไปประยุกต์ใช้กับสมการของสมบัติทางกายภาพที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานกิบส์ จำนวนมากทั้งความหนืดจลน์ ความหนืดสัมบูรณ์ (Krisnangkura, Aryusuk, Phankosol, & Lilitchan, 2016; Krisnangkura, Sansa-ard, Aryusuk, Lilitchan, & Kittiratanapiboon, 2010; Krisnangkura et al., 2006; Phankosol et al., 2015) ความหนาแน่น (Phankosol et al., 2014a) และแรงตึงผิว (Phankosol, Sudaprasert, Lilitchan, Aryusuk, & Krisnangkura, 2014b) เป็นต้น เนื่องจากมีข้อดี คือ สมการสามารถประมาณค่าได้ทั้ง กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลโดยใช้ค่าคงที่เดียวกันและมีความแม่นยำของสมการสูง ซึ่งวิธีการนี้ได้นำเสนอไว้โดย Krisnangkura et al. (Krisnangkura et al., 2006) สมการอย่างง่ายแสดงได้ดังสมการที่ (7) และวิธีการพัฒนาอย่างละเอียดจะได้นำเสนอไว้ในหัวข้อถัดไป

$$\ln \mu = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} \quad (7)$$

โดยที่ $a = \ln A + \frac{\Delta S_0}{R}$, $b = \frac{\delta S}{R}$, $c = -\frac{\Delta H_0}{R}$, $d = -\frac{\delta H}{R}$ เมื่อ ΔS_0 , δS , ΔH_0 และ δH คือ เอนโทรปีของกลุ่มฟังก์ชัน เอนโทรปีควมรวมของสายโซ่คาร์บอน เอนทาลปีของกลุ่มฟังก์ชัน เอนทาลปีควมรวมของสายโซ่คาร์บอน ตามลำดับ และ A และ $a - d$ คือ ค่าคงที่ของสมการ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการ GEAM ในการโยงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์กับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์เพื่อใช้เป็นสมการอย่างง่ายในการประมาณค่าความหนืดจลน์ของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัว ไม่อิ่มตัว และไบโอดีเซล ได้ในสมการเดียว และคาดว่าจะประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้งานและการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์กับไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี

วิธีการควมรวมพลังงานกิบส์และการพัฒนาสมการประมาณค่าความหนืดจลน์

วิธีการควมรวมพลังงานกิบส์ (Gibbs Energy Additivity Method, GEAM) ได้นำเสนอครั้งแรกโดย Krisnangkura (Krisnangkura et al., 2006) โดยมีหลักการ คือ โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบจะถูกแบ่งออกเป็นอะตอมหรือกลุ่มอะตอมย่อย ๆ ซึ่งในแต่ละกลุ่มจะมีพลังงานกิบส์ที่ต่างกัน แต่จะสามารถควมรวมเข้าด้วยกันได้ โดยสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังสมการที่ (8)

$$\Delta G_{total} = \sum_{i=1}^n x_i \Delta G_i \quad (8)$$

เมื่อ ΔG_{total} และ ΔG_i คือ พลังงานกิบส์ควมรวม และพลังงานกิบส์ของกลุ่มอะตอมหรือพันธะ ซึ่งตามหลักการของ GEAM สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับการแบ่งโครงสร้างของโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซลโดยการควมรวมพลังงานกิบส์ของกลุ่มฟังก์ชัน จำนวนคาร์บอนอะตอม และจำนวนพันธะคู่ได้ดังสมการที่ (9) (Phankosol et al., 2014a)

$$\Delta G_{unsat} = \Delta G_f + z\Delta G_i + n_d\Delta G_{db} \quad (9)$$

เมื่อ ΔG_{unsat} , ΔG_f และ ΔG_{db} คือ พลังงานกิบส์ของความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน พลังงานกิบส์ของกลุ่มฟังก์ชัน และพลังงานกิบส์ของจำนวนพันธะคู่

สำหรับการขยายความสัมพันธ์ของความหนืดจลน์ด้วยวิธี GEAM ได้อธิบายไว้ โดย Krisnangkura et al. (Krisnangkura et al., 2006) โดยมีสมการเริ่มต้นดังสมการที่ (10)

$$\ln \mu = \ln A - \frac{\Delta G_{flow}}{RT} \quad (10)$$

เมื่อ A , ΔG_{flow} และ R คือ ค่าคงที่ของสมการ พลังงานกิบส์เนื่องจากการไหล และ ค่าคงที่ของแก๊ส จากนั้นจึงทำการขยายสมการที่ (10) ด้วยสมการที่ (9) จะได้ดังสมการที่ (11)

$$\ln \mu = \ln A - \frac{\Delta G_f + z\Delta G_i + n_d\Delta G_{db}}{RT} \quad (11)$$

และทำการขยายอีกครั้งให้อยู่ในรูปของเอนทัลปีและเอนโทรปีจะได้ดังสมการที่ (12)

$$\ln \mu = \ln A - \frac{(\Delta H - T\Delta S)_f + z(\Delta H - T\Delta S)_i + n_d(\Delta H - T\Delta S)_{db}}{RT} \quad (12)$$

จากนั้นจึงทำการจัดรูปสมการที่ (12) ใหม่จะทำให้ได้สมการสำหรับการประมาณค่าความหนืดจลน์ดังสมการที่ (13)

$$\ln \mu = s_0 + s_1z + s_2n_d + \frac{h_0 + h_1z + h_2n_d}{T} \quad (13)$$

เมื่อ $s_0 = \ln A + \frac{(\Delta S)_f}{R}$, $s_1 = \frac{(\Delta S)_i}{R}$, $s_2 = \frac{(\Delta S)_{db}}{R}$, $h_0 = -\frac{(\Delta H)_f}{R}$, $h_1 = -\frac{(\Delta H)_i}{R}$, $h_2 = -\frac{(\Delta H)_{db}}{R}$ โดยที่ s_0 , s_1 , s_2 , h_0 , h_1 และ h_2 มีค่าเท่ากับ -3.13, -0.102, 0.2318, 796, 71.46 และ 121 ตามลำดับ ซึ่งสมการที่ (13) ได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย Phankosol et al. (Phankosol et al., 2015) และเมื่อต้องการใช้ประมาณค่าความหนืดจลน์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสมหรือไบโอดีเซลจะสามารถแทนด้วยค่า z_{ave} และ $n_{d,ave}$ ตามสมการที่ (14) – (15) ตามลำดับ

$$z_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^z x_i z_i}{x_i} \quad (14)$$

และ

$$n_{d,ave} = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} x_i n_{d,ave}}{x_i} \quad (15)$$

การโยงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดจลน์กับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์

โดยทั่วไปการหามวลโมเลกุลของ FAME จะหาได้จากสมการที่ (16)

$$M = M_{CH_3} + M_{CH}(z-2) + M_{COOCH_3} - 2M_H(n_d) \quad (16)$$

เมื่อจัดรูปความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของจำนวนคาร์บอนจะได้ดังสมการที่ (17)

$$z = \frac{2n_d - 46 + M}{14} \quad (17)$$

เมื่อแทนสมการที่ (12) ลงใน (8) จะทำให้ได้สมการใหม่ของความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลน์กับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ดังสมการที่ (18)

$$\ln \mu = s_0 + s_1 \left(\frac{2n_d - 46 + M}{14} \right) + s_2 n_d + \frac{h_0 + h_1 \left(\frac{2n_d - 46 + M}{14} \right) + h_2 n_d}{T} \quad (18)$$

เมื่อจัดรูปแบบแล้วจะทำให้ได้ดังสมการที่ (19)

$$\ln \mu = \left(s_0 - \frac{46s_1}{14} \right) + \left(\frac{s_1}{14} \right) M + \left(s_2 + \frac{2s_1}{14} \right) n_d + \frac{\left(h_0 - \frac{46h_1}{14} \right) + \left(\frac{h_1}{14} \right) M + \left(h_2 + \frac{2h_1}{14} \right) n_d}{T} \quad (19)$$

ในการประมาณค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลตามสมการที่ (13) จะสามารถแทนที่ด้วยจำนวนคาร์บอนอะตอมเฉลี่ยและมวลโมเลกุลเฉลี่ยได้ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (9) และ (14) ตามลำดับ

$$M_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^M x_i M_i}{x_i} \quad (20)$$

การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ความถูกต้องในการประมาณค่าของสมการที่ศึกษาในครั้งนี้จะใช้วิธีการหาค่าความเอนเอียง (Bias, %) และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (AAD, %) ดังสมการที่ (21) และ (22) ตามลำดับ

$$Bias(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_{exp,i} - \mu_{cal,i}}{\mu_{exp,i}} \right) \quad (21)$$

และ

$$AAD(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\mu_{exp,i} - \mu_{cal,i}}{\mu_{exp,i}} \right| \quad (22)$$

เมื่อ $\mu_{exp,i}$, $\mu_{cal,i}$ และ N คือ ความหนืดจลน์ที่ได้จากข้อมูลการทดลอง ความหนืดจลน์ที่ได้จากการคำนวณ และจำนวนข้อมูล ตามลำดับ

ข้อมูลการทดลอง

การพัฒนาศมการครั้งนี้ได้ใช้ของข้อมูลการทดลองจากเอกสารอ้างอิงในการสอบเทียบสมการที่ (23) โดยเป็นข้อมูลการทดลองความหนืดจลน์ที่รวบรวมจาก Pratas et al. (Pratas et al., 2011), Pratas et al. (Pratas et al., 2010), Carlos A. Nogueira et al. (Carlos A. Nogueira, Feitosa, Fabiano A. N. Fernandes, Santiago, & Sant'Ana, 2010), Feitosa et al. (Feitosa et al., 2010) และ Knothe และ Steidley (Knothe & Steidley, 2007)

ผลการทดลอง

องค์ประกอบกรดไขมันของไบโอดีเซลแต่ละชนิด

ไบโอดีเซลแต่ละชนิดจะประกอบด้วยกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุดิบตั้งต้นที่นำมาผลิตไบโอดีเซล ตารางที่ 1 แสดงถึงร้อยละสัดส่วนโดยมวลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันถั่วเหลือง (Carlos A. Nogueira et al., 2010) น้ำมันปลา และน้ำมันดอกทานตะวัน (Feitosa et al., 2010) รวมทั้งค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย จำนวนคาร์บอนเฉลี่ย และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (14), (15) และ (20) ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันตารางที่ 2 แสดงถึงค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย จำนวนคาร์บอนเฉลี่ย และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม และไบโอดีเซลผสม โดยทั้งหมดมีค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ย จำนวนคาร์บอนเฉลี่ย และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย อยู่ในช่วง 248.393 ถึง 296.792, 14.466 ถึง 18.000, 0.267 ถึง 1.900 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของไบโอดีเซล

กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (% สัดส่วน โดยมวล)	ไบโอดีเซล		
	น้ำมันถั่วเหลือง (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	น้ำมันปลา (Feitosa et al., 2010)	น้ำมันดอกทานตะวัน (Feitosa et al., 2010)
C8:0	0.00	0.00	0.00
C10:0	0.00	0.00	0.00
C12:0	0.00	0.00	0.00
C14:0	0.08	3.76	0.00
C16:0	10.49	5.66	7.10
C16:1	0.12	28.09	0.00
C18:0	4.27	7.46	4.80
C18:1	24.20	42.29	22.60
C18:2	51.36	12.74	65.50
C18:3	7.48	0.00	0.00
C20:0	0.36	0.00	0.00
C20:1	0.28	0.00	0.00
C22:0	0.40	0.00	0.00
C22:1	0.07	0.00	0.00
C24:0	0.14	0.00	0.00
M_{ave}	292.981	284.993	293.415
Z_{ave}	17.823	17.175	17.858
$n_{d, ave}$	1.510	0.959	1.536

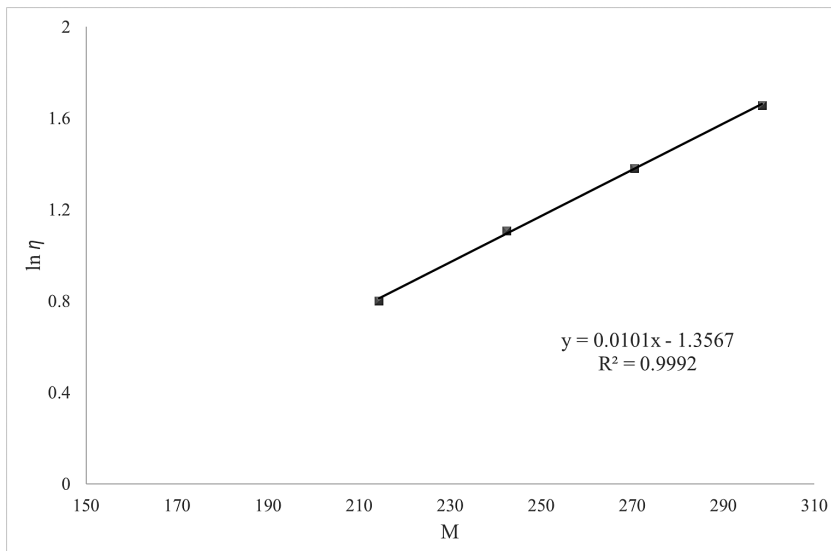
ตารางที่ 2 ค่า M_{ave} , z_{ave} และ $n_{d,ave}$ ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสมและไบโอดีเซลผสม

กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม / ไบโอดีเซลผสม	x_i	M_{ave}	z_{ave}	$n_{d,ave}$
C18:1 (w) /C18:2 (Knothe & Steidley, 2007)	0.5000	295.480	18.000	1.500
	0.9500	295.188	17.900	0.950
	0.9000	293.886	17.800	0.900
	0.8500	292.584	17.700	0.850
C18:1 (w) /C18:0 (Knothe & Steidley, 2007)	0.9500	296.591	18.000	0.950
	0.9000	296.691	18.000	0.900
	0.8500	296.792	18.000	0.850
C18:2 (w) /C16:0 (Knothe & Steidley, 2007)	0.9500	293.269	17.900	1.900
	0.9000	292.068	17.800	1.800
	0.8500	290.867	17.700	1.700
C18:2 (w) /C18:0 (Knothe & Steidley, 2007)	0.9500	294.672	18.000	1.900
	0.9000	294.873	18.000	1.800
	0.8500	295.075	18.000	1.700
C16:1 (w) /C16:0 (Knothe & Steidley, 2007)	0.9500	268.531	16.000	0.950
CB-R1 ¹ (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.1660	256.496	15.061	0.389
CB-R2 (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.1960	257.658	15.148	0.421
CB-R3 (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.2990	261.645	15.449	0.534
CB-R4 (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.4900	269.039	16.006	0.742
CB-R5 (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.6840	276.549	16.572	0.953
CB-R6 (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.8050	281.233	16.925	1.085
CB-R7 (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	0.9000	284.911	17.202	1.188
CC-R1 ² (Feitosa et al., 2010)	0.0962	290.220	17.482	0.503
CC-R2 (Feitosa et al., 2010)	0.1967	285.001	17.106	0.473
CC-R3 (Feitosa et al., 2010)	0.2989	279.694	16.723	0.444
CC-R4 (Feitosa et al., 2010)	0.3970	274.601	16.356	0.415
CC-R5 (Feitosa et al., 2010)	0.4974	269.387	15.980	0.385
CC-R6 (Feitosa et al., 2010)	0.5977	264.179	15.604	0.356
CC-R7 (Feitosa et al., 2010)	0.6952	259.116	15.239	0.327
CC-R8 (Feitosa et al., 2010)	0.8039	253.472	14.832	0.296
CC-R9 (Feitosa et al., 2010)	0.9017	248.393	14.466	0.267

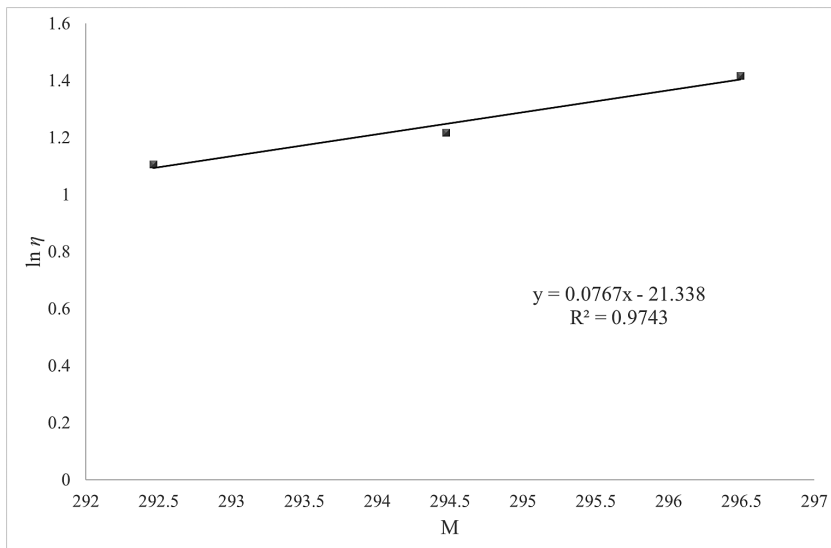
¹CB-RX¹ คือ Cotton Seed + Babassu Ratio CC-RX² คือ Coconut + Colza Ratio

ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโมเลกุลและความหนืดของกรดไขมันเมทิล- เอสเทอร์และไบโอดีเซล

จากการพล็อตกราฟระหว่างลอการิทึมฐานธรรมชาติของความหนืดกับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ เพื่อพิสูจน์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง พบว่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของลอการิทึมฐานธรรมชาติของความหนืดกับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ไม่อิมตัว ดังรูปที่ 1ข มีจุดตัดแกน ความชัน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ -21.338, 0.0767 และ 0.9743 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงเป็นการยืนยันได้ว่าความหนืดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงสูงกับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่ามวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิมตัวมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงมากกว่ากรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ไม่อิมตัว ซึ่งความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของลอการิทึมฐานธรรมชาติของความหนืดกับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิมตัว ดังรูปที่ 1ก มีค่าจุดตัดแกน ความชัน และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ -1.3567, 0.0101 และ 0.9992 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมฐานธรรมชาติของความหนืดจลน์ กับมวลโมเลกุลของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัว (ก) และไม่อิ่มตัว (ข)

ค่าคงที่ของสมการ

จากสมการที่ (19) เมื่อทำการแทนค่าคงที่ s_0 , s_1 , s_2 , h_0 , h_1 และ h_2 ของสมการที่ (13) ลงไปจะทำให้ได้ค่าสมการใหม่ดังสมการที่ (23)

$$\ln \mu = -2.794 - 0.00726M + 0.2172n_d + \frac{561.2028 + 5.1042M - 110.7914n_d}{T} \quad (23)$$

สมการที่ (23) จะใช้ข้อมูลจากการทดลองจากเอกสารอ้างอิงในการสอบเทียบความแม่นยำของสมการ ทั้งหมด 349 ข้อมูล โดยแบ่งเป็นข้อมูลกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวทั้งหมด 162 ข้อมูล กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสมทั้งหมด 92 ข้อมูล และไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมทั้งหมด 95 ข้อมูล

การประมาณค่าความหนืดจลน์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัว ไม่อิ่มตัว และกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม

สมการที่ (23) ถูกนำมาใช้ประมาณค่าทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว สมการสามารถประมาณค่าได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 278.15 ถึง 373.15 K โดยมีค่า Bias และ AAD อยู่ในช่วง -6.156 ถึง 6.138% และ 1.278 ถึง 6.435 ตามลำดับ ค่า AAD สูงสุดพบใน Erucate (C22:1) โดยมีค่า Bias และ AAD โดยรวมเฉลี่ยเท่ากับ 1.695% และ 3.829% ตามลำดับ ซึ่ง ค่า AAD ของสมการที่ (23) มีค่าน้อยกว่าสมการที่ (13) (4.309%) สำหรับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสมพบว่าค่า Bias และ AAD โดยเฉลี่ยเท่ากับ -0.767% และ 3.816% ตามลำดับ ค่า Bias ติดลบแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดจลน์ที่ประมาณค่ามากกว่าค่าที่มาจากการทดลอง นอกจากนี้ค่า AAD ของสมการที่ (23) ยังมีค่าน้อยกว่าสมการที่ (13) (3.761) โดยข้อมูลค่า Bias และ AAD ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ทั้งอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว แสดงไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า Bias และค่า AAD ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว

กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์	T (K)	Eq. (23)		Eq. (13)	
		Bias (%)	AAD (%)	Bias (%)	AAD (%)
Laurate (C12:0) (Pratas et al., 2010)	283.15- 353.15	-3.470	4.168	-2.512	3.541
Myristate (C14:0) (Pratas et al., 2010)	298.15- 353.15	1.390	1.390	2.410	2.410
Palmitate (C16:0) (Pratas et al., 2010)	308.15- 363.15	3.769	3.769	4.853	4.853
Stearate (C18:0) (Pratas et al., 2010)	313.15 – 363.15	6.138	6.138	7.293	7.293
Oleate (C18:1) (Pratas et al., 2010)	283.15- 353.15	-0.266	2.544	0.998	2.166
Linoleate (C18:2) (Pratas et al., 2010)	278.15- 353.15	-5.771	5.771	-4.456	4.521
Linolenate (C18:3) (Pratas et al., 2011)	278.15- 363.15	-0.701	1.278	0.517	1.357
Arachidate (C20:0) (Pratas et al., 2011)	323.15- 373.15	3.607	3.607	4.883	4.883
Gadoleate (C20:1) (Pratas et al., 2011)	278.15- 373.15	1.032	2.721	2.392	2.924
Behenate (C22:0) (Pratas et al., 2011)	333.15- 373.15	2.169	2.543	3.564	3.564
Erucate (C22:1) (Pratas et al., 2011)	278.15- 363.15	-6.156	6.435	-4.561	5.125
Lignocerate (C24:0) (Pratas et al., 2011)	338.15- 373.15	-0.307	2.482	1.217	2.502
เฉลี่ย (%)		0.119	3.570	1.383	3.761

ตารางที่ 4 การประมาณค่าความหนืดจลน์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม

กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม (Mixing FAME)	T (K)	Eq. (23)		Eq. (13)	
		Bias (%)	AAD (%)	Bias (%)	AAD (%)
C18:1/C18:2 (50:50) (Knothe & Steidley, 2007)	278.15- 313.15	3.904	4.199	5.149	5.149
C18:1/C16:0 (95:5) (Knothe & Steidley, 2007)	278.15- 313.15	1.888	3.125	3.168	3.429
C18:1/C16:0 (90:10) (Knothe & Steidley, 2007)	278.15- 313.15	0.899	3.228	2.186	3.380
C18:1/C16:0 (85:15) (Knothe & Steidley, 2007)	283.15- 313.15	1.918	3.457	3.188	4.001
C18:1/C18:0(95:5) (Knothe & Steidley, 2007)	283.15- 313.15	1.541	3.306	2.831	3.842
C18:1/C18:0(90:10) (Knothe & Steidley, 2007)	288.15- 313.15	1.117	2.470	2.407	3.245
C18:1/C18:0(85:15) (Knothe & Steidley, 2007)	293.15- 313.15	1.150	2.286	2.435	3.047
C18:2/C16:0 (95:5) (Knothe & Steidley, 2007)	278.15- 313.15	-3.035	3.908	-1.717	3.329
C18:2/C16:0 (90:10) (Knothe & Steidley, 2007)	278.15- 313.15	-4.733	5.282	-3.397	4.545
C18:2/C16:0 (85:15) (Knothe & Steidley, 2007)	283.15- 313.15	-3.659	4.444	-2.341	3.812
C18:2/C18:0 (95:5) (Knothe & Steidley, 2007)	283.15- 313.15	-5.267	5.554	-3.914	4.576
C18:2/C18:0 (90:10) (Knothe & Steidley, 2007)	288.15- 313.15	-4.448	4.448	-3.110	3.110
C18:2/C18:0 (85:15) (Knothe & Steidley, 2007)	293.15- 313.15	-4.629	4.629	-3.293	3.293
เฉลี่ย (%)		-0.767	3.816	0.526	3.753

การประมาณค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสม

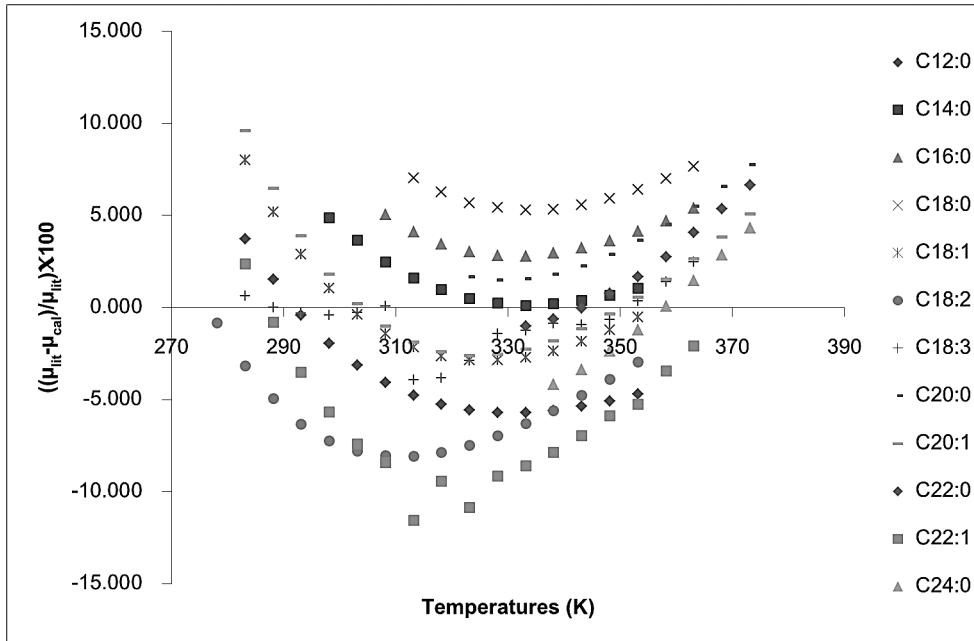
สำหรับไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสม สมการที่ (23) สามารถประมาณค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมได้ในช่วงอุณหภูมิ 293.15 ถึง 373.15 K โดยมีค่า Bias และ AAD ระหว่าง -0.863% ถึง 5.875% และ 2.437% ถึง 5.875% ตามลำดับ และค่า Bias และ AAD เฉลี่ยทั้งหมดเท่ากับ 1.695% และ 3.829% ตามลำดับ โดยค่า AAD ของสมการที่ (23) มีค่าน้อยกว่าสมการที่ (13) (4.309%) ข้อมูล Bias และ AAD ทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การประมาณค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสม

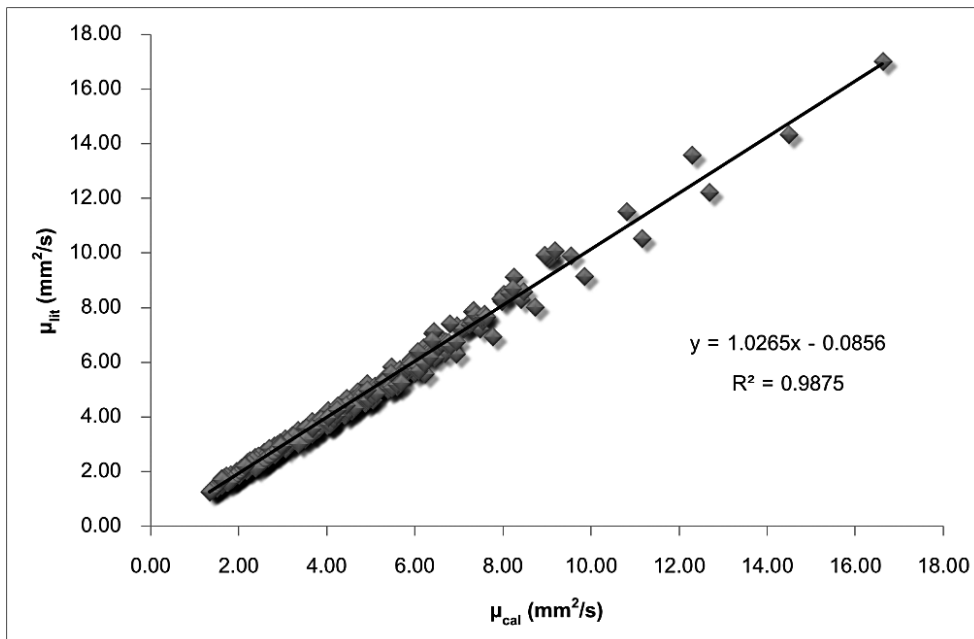
ไบโอดีเซล / ไบโอดีเซลผสม	T (K)	Eq. (23)		Eq. (13)	
		Bias (%)	AAAD (%)	Bias (%)	AAAD (%)
Soybean (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	293.15- 373.15	0.282	2.437	1.486	2.635
Fish oil (Feitosa et al., 2010)	293.15- 373.15	5.875	5.875	6.986	6.986
Sunflower (Feitosa et al., 2010)	293.15- 373.15	3.926	3.926	5.086	5.086
CC (R1-R9) (Carlos A. Nogueira et al., 2010)	293.15- 373.15	-0.863	4.084	0.269	4.029
CB (R1-R7) (Feitosa et al., 2010)	293.15- 373.15	-0.746	2.822	0.385	2.809
เฉลี่ย (%)		1.695	3.829	2.842	4.309

การสอบเทียบสมการ

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดของการประมาณค่าความหนืดจลน์ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ที่ประมาณค่าด้วยสมการที่ (23) ซึ่งค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวที่ดีทั้งบวกและลบ และรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าความหนืดจลน์ที่ได้จากการประมาณค่าและจากการทดลอง โดยมีจุดตัดแกน ความชัน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เท่ากับ -0.0856, 1.0265, 0.9875 และ 0.110 โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดจลน์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยสมการที่ (23) มีความสัมพันธ์กันสูงหรือมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง



รูปที่ 2 การกระจายตัวของร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าความหนืดจลน์
ที่ได้จากการทดลองและการประมาณค่าด้วยสมการที่ (23)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดจลน์จากการทดลอง
และจากการประมาณค่าด้วยสมการที่ (23)

สรุปผล

จากการพัฒนาสมการในการประมาณค่าความหนืดของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล โดยอาศัยการพัฒนาต่อสมการของ Phankosol et al. (Phankosol et al., 2015) เพื่อโยงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของไขมันโมเลกุล สรุปได้ว่าสมการที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการประมาณค่าความหนืดของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัว ไม่อิ่มตัว กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม ไบโอดีเซล และไบโอดีเซลผสม ในสภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ในสมการเดียวและมีความแม่นยำสูง แต่อย่างไรก็ตามสมการจะมีค่า AAD เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อนำไปใช้ประมาณค่าของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ผสม สมการสามารถประมาณค่าได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 278.15 ถึง 373.15 K ซึ่งหากนำไปใช้ประมาณค่าในช่วงนี้อาจจะทำให้ค่า AAD ของสมการเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นสมการที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่น่าสนใจในการนำไปใช้ประมาณค่าความหนืดของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล โดยสามารถใช้งานได้ง่าย ช่วยให้การศึกษาคความหนืดของไบโอดีเซลทำได้รวดเร็วขึ้น ทำให้ประหยัดเวลา และค่าใช้จ่ายในด้านการทดสอบได้อีกทางหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

- Allen, C. A. W., Watts, K. C., Ackman, R. G., & Pegg, M. J. (1999). Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition. **Fuel**. 78, 1319–1326.
- Aransiola, E. F., Ojumu, T. V., Oyekola, O. O., Madzimbamuto, T. F., & Ikhu-Omoregbe, D. I. O. (2014). A review of current technology for biodiesel production: State of the art. **Biomass and Bioenergy**. 61, 276-297.
- Ashraful, A. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Fattah, I. M. R., Imtenan, S., Shahir, S. A., & Mobarak, H. M. (2014). Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review. **Energy Conversion and Management**. 80, 202–228.
- Atabani, A. E., A.S.Silitonga, H.C.Ong, T.M.I.Mahlia, H.H.Masjuki, Badruddin, I. A., & H.Fayaz. (2013). Non-edible vegetable oils: A critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 18, 211–245.

- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., & Aziz, A. A. (2010). High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14(7), 1999-2008. doi:10.1016/j.rser.2010.03.020
- Carlos A. Nogueira, J., Feitosa, F. X., Fabiano A. N. Fernandes, Santiago, R. I. S., & Sant'Ana, H. B. d. (2010). Densities and Viscosities of Binary Mixtures of Babassu Biodiesel + Cotton Seed or Soybean Biodiesel at Different Temperatures. **Journal of Chemical & Engineering Data**. 55, 5305–5310.
- Feitosa, F. X., Rodrigues, M. d. L., Veloso, C. B., Ce'lio L. Cavalcante, J., Albuquerque, M. n. C. G., & Sant'Ana, H. B. d. (2010). Viscosities and Densities of Binary Mixtures of Coconut + Colza and Coconut + Soybean Biodiesel at Various Temperatures. **Journal of Chemical & Engineering Data**. 55(3909–3914).
- Felipe, L., & Ramı'ez-Verduzco. (2013). Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 19, 652– 665.
- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2007). Kinematic viscosity of biodiesel components (fatty acid alkyl esters) and related compounds at low temperatures. **Fuel**. 86, 2560–2567. doi:10.1016/j.fuel.2007.02.006
- Knothe, G., & Steidley, K. R. (2011). Kinematic viscosity of fatty acid methyl esters: Prediction, calculated viscosity contribution of esters with unavailable data, and carbon–oxygen equivalents. **Fuel**. 90, 3217–3224.
- Krisnangkura, K., Aryusuk, K., Phankosol, S., & Lilitchan, S. (2016). Energy Additivity Approaches to QSPR Modeling in Estimation of Dynamic Viscosity of Fatty Acid Methyl Ester and Biodiesel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. 1407–1414. doi:10.1007/s11746-016-2874-x
- Krisnangkura, K., Sansa-ard, C., Aryusuk, K., Lilitchan, S., & Kittiratanapiboon, K. (2010). An empirical approach for predicting kinematic viscosities of biodiesel blends. **Fuel**. 89, 2775–2780.
- Krisnangkura, K., Yimsuwan, T., & Pairintra, R. (2006). An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at various temperatures. **Fuel**. 85, 107–113.
- Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K., & Krisnangkura, K. (2014a). Estimation of Density of Biodiesel. **Energy and Fuels**. 28, 4633–4641.

- Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K., & Krisnangkura, K. (2014b). Estimation of surface tension of fatty acid methyl ester and biodiesel at different temperatures. **Fuel**. 126, 162–168.
- Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryusuk, K., & Krisnangkura, K. (2015). An Empirical Equation for Estimation of Kinematic Viscosity of Fatty Acid Methyl Esters and Biodiesel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. 92(7), 1051-1061.
- Pratas, M. J., Freitas, S., Oliveira, M. B., Monteiro, S. I. C., Lima, A. I. S., & Coutinho, J. o. A. P. (2011). Densities and Viscosities of Minority Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters Present in Biodiesel. **Journal of Chemical & Engineering Data**. 56(5), 2175-2180. doi:10.1021/je1012235
- Pratas, M. J., Freitas, S., Oliveira, M. B., Monteiro, S. I. C., Lima, A. S., & Coutinho, J. o. A. P. (2010). Densities and Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters. **Journal of Chemical & Engineering Data**. 55, 3983–3990.
- Ramírez-Verduzco, L. F., Rodríguez-Rodríguez, J. E., & Jaramillo-Jacob, A. d. R. (2012). Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. **Fuel**. 91,102–111.
- Yuan, W., Hansen, A. C., & Zhang, Q. (2009). Predicting the temperature dependent viscosity of biodiesel fuels. **Fuel**. 88, 1120–1126.