

การทำนายความเหน็ดจลน์ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ จากค่าสะพานนิฟิเคชันและค่าไอโอดีน

สุรียา พันธโกศล¹

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา 1061 ถนนอิสรภาพ แขวงหิรัญรูจี เขตธนบุรี กรุงเทพฯ 10600

และ คณิต กฤษณ์งูร²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

บทคัดย่อ

ความเหน็ดจลน์ (μ) ของไบโอดีเซลมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันอย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์เพื่อทำนายความเหน็ดจลน์ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ และไบโอดีเซลผสมจากค่าสะพานนิฟิเคชัน (SN) ค่าไอโอดีน (IV) และอุณหภูมิ (T) ทั้งนี้ใช้ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงมาประกอบเพื่อสนับสนุนและยืนยันความถูกต้องแม่นยำของสมการที่จะนำไปใช้ จากการศึกษาพบว่าสมการที่นำเสนอต่อการใช้งานและมีความถูกต้องแม่นยำในการใช้งานโดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของไบโอดีเซล 212 ข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 20-100°C เท่ากับ 6.91% ค่าความเหน็ดจลน์นอกช่วงอุณหภูมิที่นำเสนออาจทำนายได้ด้วยสมการความสัมพันธ์ แต่ความแม่นยำอาจต่ำลง

คำสำคัญ : ความเหน็ดจลน์ / ค่าสะพานนิฟิเคชัน / ค่าไอโอดีน / ไบโอดีเซล

* Corresponding Author : s.phankosol@gmail.com

¹ อาจารย์ สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

² รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

Predicting the Kinematic Viscosity of Biodiesel at Various Temperatures from its Saponification Number and Iodine Value

Suriya Phankosol¹

Bansomdejchaopraya Rajabhat University, 1061 Isaraphab Road, Hiran Ruchi, Dhonburi, Bangkok 10600

and Kanit Krisnangkura²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thakham, Bangkuntien, Bangkok 10150

Abstract

The kinematic viscosity of biodiesel is significantly influenced by the chemical composition of its fatty acid methyl ester. In this work, correlation that can be used to predict the kinematic viscosity of pure biodiesel and blended biodiesel as a function of the saponification number, iodine value and temperature was developed. Data available in literature were used to validate the correlation and to support speculations arisen from the proposed equation. The proposed correlation is easy to use and the predicted kinematic viscosity values of both pure biodiesel and blended biodiesel at different temperatures agree well with the literature values. The estimated kinematic viscosity values of pure biodiesel and mixed biodiesel are in good agreement with those 212 data reported in the literature within a temperature range of 20-100°C; the average absolute deviation is 6.91%. The kinematic viscosity value outside of this temperature range may be possibly predicted by the correlation but the accuracy may be lower.

Keywords : Kinematic Viscosity / Saponification Number / Iodine Value / Biodiesel

* Corresponding Author : s.phankosol@gmail.com

¹ Lecturer, Department of Industrial and Technology Management, Faculty of Science and Technology.

² Associate Professor, Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology.

1. บทนำ

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จากโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่เหมาะสมกับการเผาไหม้ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียนที่สะอาดมีค่าซีเทนและจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี อีกทั้งในการเผาไหม้มีการปล่อยสารไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่าน้ำมันดีเซล [1-5]

สมบัติทางกายภาพและการเผาไหม้ของไบโอดีเซลอาจแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของกรดไขมันที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ในการนำไบโอดีเซลไปใช้งานจำเป็นต้องทราบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีเพื่อใช้ในการออกแบบระบบ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ความหนืดเป็นหนึ่งในสมบัติทางกายภาพที่สำคัญในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์แบบจุดระเบิด เพราะมีผลต่อกระบวนการพ่นฝอยละอองน้ำมันในห้องเผาไหม้ ในช่วงเริ่มต้น โดยในขั้นแรกออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับละอองน้ำมันซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวของละอองน้ำมันเท่านั้น และจะปล่อยพลังงานความร้อนออกมา ในขั้นตอนนี้พบว่าถ้าความหนืดของน้ำมันมีค่าสูงละอองน้ำมันที่พ่นออกมาจะมีขนาดใหญ่ และมีแนวโน้มสูงมากที่จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องยนต์ ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ต่ำลงและมีการปลดปล่อยมลพิษที่สูงขึ้น โดยเฉพาะในน้ำมันที่มีความไม่อึดตัวสูง จะส่งผลต่อความหนืดสูงตามไปด้วย ทำให้การฉีดพ่นได้ขนาดละอองของหยดน้ำมันขนาดใหญ่เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และเกิดเขม่าได้ [6-9] ในปัจจุบันมีการผสมไบโอดีเซลซึ่งมีความหนืดต่ำเข้ากับน้ำมันดีเซลเพื่อลดปัญหาเหล่านี้ สำหรับไบโอดีเซลเพื่อการพาณิชย์ได้มีการกำหนดมาตรฐานคุณภาพผลิตภัณฑ์จากสมบัติทางกายภาพของจากไบโอดีเซล ซึ่งความหนืดก็รวมอยู่ในข้อกำหนดที่ต้องรายงานด้วย ถึงแม้ว่าวิธีการวัดและเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ค่าความหนืดจะไม่นับซ้อนแต่เมื่อต้องการทราบค่าความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ จำเป็น

ต้องใช้เวลาในวิเคราะห์ ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อต้องการทราบความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งยังทำให้ทราบข้อมูลความหนืดได้รวดเร็ว และหากสมการดังกล่าวเชื่อมสัมพันธ์กับโครงสร้างสารด้วย จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาออกแบบโครงสร้างสารให้เหมาะสมกับความหนืดที่ต้องการ โดยทั่วไปของสมการความหนืดจะมีสองตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ประเมิน ตัวแปรแรกคือปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว และตัวแปรที่สองคืออุณหภูมิ [10]

1.1 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิกับความหนืดของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมัน

มีการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมากที่ใช้ทำนายความหนืดของของเหลวรวมถึงไบโอดีเซล ซึ่งสมการที่เป็นที่รู้จักกันดีคือ สมการของแอนดราด (Andrade Equation) [11] เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิดังสมการที่ (1)

$$\ln(\eta) = A + \frac{B}{T} \quad (1)$$

Tate van และ Gerpen [12] ได้ปรับปรุงสมการที่ (1) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\ln(\eta) = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \quad (2)$$

เมื่อ A , B และ C คือค่าคงที่

η คือความหนืด (Dynamic viscosity), (N s/m²)

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

Joshi และ Pegg [13] ใช้สมการที่ (2) ในการทำนายความหนืดไดนามิกของไบโอดีเซลจากน้ำมันปลา ในช่วงอุณหภูมิ 4-300 องศาเซลเซียส พบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Average Absolute Deviation: AAD) เท่ากับร้อยละ 0.066 นอกจากนี้ Yuan et al. [14] ได้ใช้สมการ Vogel equation [15] (สมการที่ (3)) ในการทำนายความหนืดของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมัน (Fatty acid methyl ester, FAME) ที่พบได้บ่อยในไบโอดีเซลให้พบว่าสมการให้ความถูกต้องและแม่นยำสูงโดยค่า AAD

น้อยกว่าร้อยละ 0.77

$$\ln(\eta) = A + \frac{B}{T+C} \quad (3)$$

เมื่อ A , B และ C คือค่าคงที่
 T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

Gouw และคณะ [16] ได้ทำนายความหนาแน่นของ FAME ชนิดอิมิต์ที่อุณหภูมิใดๆ ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\log(\log(\eta)) = A - s \log\left(1 + \frac{t}{135}\right) \quad (4)$$

เมื่อ A และ s คือค่าคงที่
 t คืออุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

1.2 ผลกระทบเนื่องจากขนาดโมเลกุลกับความหนืดของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมัน

สมการพหุนามสำหรับทำนายความหนืดจลน์ในหน่วย cSt ของ FAME ชนิดอิมิต์ จากรูปความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล (M) และจำนวนอะตอมคาร์บอนหรือค่าความยาวคาร์บอนเทียบเท่า (equivalent chain length; ECL) (z) [17] ถูกนำเสนอโดย Allen et al. [18] (สมการที่ 5) และ Knothe และ Steidley [19] (สมการที่ 6) ตามลำดับ

$$\mu = 1.05 \times 10^{-4} M^2 - 0.0242M + 2.15 \quad (5)$$

$$\mu = 0.30487 + 0.0265z + 0.0066z^2 + 0.000491z^3 \quad (6)$$

สมการที่ (5) และ (6) ใช้ในการทำนายความหนืดจลน์ของ FAME ชนิดอิมิต์เท่านั้น แต่ในธรรมชาติองค์ประกอบในวัตถุดิบที่นำมาทำไบโอดีเซลจะประกอบไปด้วยกรดไขมัน 2 ชนิดคือ ชนิดอิมิต์ และชนิดไม่อิมิต์ ทำให้สมการทั้งคู่ไม่สามารถใช้ทำนายความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลได้ ต่อมา Allen et al. [18] ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ในรูปความสัมพันธ์ผลจากจำนวนพันธะคู่ (n_c) ในการทำนายความหนืดจลน์ของ Stearic acid

methyl ester เพื่อใช้ทำนายไบโอดีเซลบางชนิดดังแสดงในสมการที่ (7)

$$\mu_{\text{unsat}(18:0)} = 0.153 \times n_d^2 - 1.15n_d + 4.73 \quad (7)$$

1.3 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิและโครงสร้างโมเลกุลกับความหนืดของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมัน

Rabelo และคณะ [20] ได้ขยายสมการของ Vogel (สมการที่ (3)) เพื่อให้ครอบคลุมถึงผลจากขนาดโมเลกุลและระดับความไม่อิมิต์ของไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันผสม ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ A , B และ C ได้รับการปรับปรุงดังสมการที่ (8)-(10)

$$A = \frac{A_1 - A_2}{\{1 + e^{(nc-A_3)/A_4}\} + A_2 + A_5 \times n_d^2} \quad (8)$$

$$B = B_1 \quad (9)$$

$$C = C_1 + C_2z + C_3n_d \quad (10)$$

Krisnangkura และคณะ [21] พิจารณาพลังงานอิสระของการไหล (Free energy of viscous flow) จากสมการของแอนดาร์ต (สมการที่ (1)) ทำการขยายพลังงานอิสระตามกฎควรวรวมพลังงานอิสระของมาร์ติน [22] (Matin's rule of free energy additivity) ($\Delta G = \Delta G_f + z\delta G$) และขยายความสัมพันธ์อีกครั้งด้วยสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ ($G = H - TS$) ได้ตั้งสมการที่ (11) เป็นสมการทำนายความหนืดจลน์ของ FAME ชนิดอิมิต์ที่อุณหภูมิต่างๆ [21]

$$\ln \mu = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} \quad (11)$$

เมื่อ $a = \ln A + \frac{\Delta S_f}{R}$, $b = \frac{\delta S}{R}$, $c = \frac{\Delta H_f}{R}$ และ $d = -\frac{H}{R}$

สมการที่ (11) มีข้อจำกัดในการทำนายความหนืดจลน์ของ FAME ไม่อิมิต์ ต่อมา Basso et al. [23] ได้พัฒนาสมการที่ (11) สำหรับทำนายความหนืดของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester: FAEE) ด้วยการเพิ่มผลของจำนวนพันธะคู่จากสมการถดถอยไม่เชิงเส้นเพื่อขยายให้สมการที่ (11) ใช้ในการทำนายความหนืดจลน์

ของ FAEE อิ่มและไม่อิ่มตัว ดังแสดงในสมการที่ (12)

$$\ln \mu = a + b(z - 1.5n_d) + \frac{c}{T} + \frac{d(z - 1.5n_d)}{T} \quad (12)$$

Rami' rez-Verduzco et al. [24] ได้เสนอสมการที่ (13) สำหรับทำนายความหนืดไดนามิกส์ (mPa s) ของ FAME จากมวลโมเลกุล (M)

$$\ln \eta = -18.354 + 2.362 \ln M - 0.127 \times n_d + \frac{2009}{T} \quad (13)$$

อย่างไรก็ตามค่าคงที่บางค่าในสมการที่ (12) และค่าคงที่ทุกตัวในสมการที่ (13) ไม่มีความหมายทางกายภาพที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ของพฤติกรรมที่แสดงออกกับโครงสร้างโมเลกุลอย่างชัดเจน สำหรับการทำนายความหนืดของไบโอดีเซล (μ_{BDF}) ซึ่งมี FAME ต่างๆ ผสมกันอยู่ โดยทั่วไปคำนวณด้วยสมการ Dalton-type mass-average ดังสมการที่ (14)

$$\ln \mu_{BDF} = \sum_{i=1}^n x_i \ln \mu_i \quad (14)$$

เมื่อ x_i คือสัดส่วนโดยโมลหรือมวล

μ_i คือความหนืดของ FAME ที่เป็นองค์ประกอบในไบโอดีเซล

เมื่อเร็วๆ นี้ Phankosol et al. [25] ได้เสนอสมการโดยพัฒนาสมการที่ (11) เพื่อทำนายความหนืดจลน์ของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันและไบโอดีเซล จากพื้นฐานความสัมพันธ์ความหนืดจลน์กับพลังงานอิสระของการไหล (Free energy of viscous flow) ร่วมกับกฎควรรวมพลังงานอิสระของมาร์ติน [26] โดยเพิ่มผลของพลังงานอิสระจากพันธะคู่ (ΔG_{unsat}) ในการพิจารณา จากการเปรียบเทียบกับไบโอดีเซลบริสุทธิ์ และไบโอดีเซลผสมที่ช่วงอุณหภูมิ 20-100°C พบว่ามีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 6.95 และ 2.79 ตามลำดับ สมการทั่วไปของ Phankosol et al. [25] แสดงดังสมการที่ (15) เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆ [25] ได้ดังสมการที่ (16) เป็นการทำนายความหนืดจลน์ในหน่วย cSt

$$\ln \mu = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} + en_d + \frac{fn_d}{T} \quad (15)$$

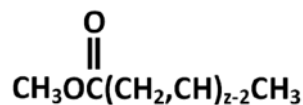
$$\ln \mu = -3.13 - 0.102z + \frac{796}{T} + \frac{71.46z}{T} + 0.2318n_d - \frac{121n_d}{T} \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } e = \frac{\Delta S_{db}}{R} \text{ และ } f = \frac{-\Delta H_{db}}{R}$$

อย่างไรก็ตามสมการที่ (16) ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากจำเป็นต้องทราบข้อมูลองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันซึ่งต้องทำการวิเคราะห์จากเครื่อง GC หรือ HPLC โดยเครื่องมือทั้งคู่มีราคาค่อนข้างสูงและในการใช้งานจำเป็นต้องอาศัยความเชี่ยวชาญ ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการทำนายความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ จากค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Number; SM) และค่าไอโอดีน (Iodine Value; IV) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นค่าที่ต้องทำการวิเคราะห์อยู่แล้ว อีกทั้งค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับขนาดโมเลกุลและระดับความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน มีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเช่น ค่าซีเทน [27] และค่าความร้อนการเผาไหม้ [28] เป็นต้น

2. ทฤษฎี

2.1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ [29]

ขนาดโมเลกุลของกรดไขมันมีความสัมพันธ์กับค่า SN เช่นค่า SN สูงแสดงให้ทราบว่ากรดไขมันมีมวลโมเลกุลต่ำ เพื่อแปลงความสัมพันธ์ของจำนวนอะตอมคาร์บอน (z) ในสมการที่ (16) ให้อยู่ในรูปผลของ SN สามารถทำได้ด้วยการโยงความสัมพันธ์ของมวลโมเลกุล (M) กับจำนวนอะตอมคาร์บอน (z) ที่แสดงในโครงสร้าง

ทางเคมีของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ในรูปที่ 1 และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (17) [29]

$$M = \text{COOCH}_3 + (z-2)[\text{CH}_2, \text{CH}] - (2H)n_d + \text{CH}_3 \quad (17)$$

เมื่อ M คือมวลโมเลกุล

แทนค่ามวลโมเลกุลในสมการที่ (17) และจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (18) [29]

$$z = \frac{M + 2n_d - 46}{14} \quad (18)$$

2.2 ค่าสะaponนิฟิเคชัน (Saponification Number; SM) [15]

ค่าสะaponนิฟิเคชันคือ จำนวนมิลลิกรัมของด่าง เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในไขมัน หรือน้ำมัน (เรียกว่า ปฏิกิริยา Saponification) อย่างสมบูรณ์ จำนวน 1 กรัม ได้เป็นสบู่ ซึ่งเป็นเกลือของกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุลและ กลีเซอรอล โดยค่าสะaponนิฟิเคชันเป็นค่าที่บอกขนาดโมเลกุล หรือน้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมันที่เป็นส่วนประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ หากน้ำมันที่มีค่าสะaponนิฟิเคชันสูงแสดงว่ากรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนมาก ดังนั้น จึงต้องใช้ด่างเป็นจำนวนมากในการไฮโดรไลซ์ ทำนองเดียวกันถ้าค่าสะaponนิฟิเคชันต่ำ แสดงว่ากรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์มีน้ำหนักโมเลกุลมาก จึงมีจำนวนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ ต่อหน่วยน้ำหนักเป็นจำนวนน้อย ทำให้ใช้ด่างน้อยในการทำปฏิกิริยา โดยค่าสะaponนิฟิเคชันมีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล (M) ดังแสดงในสมการที่ (19)

$$SN = \frac{56000}{M} \quad (19)$$

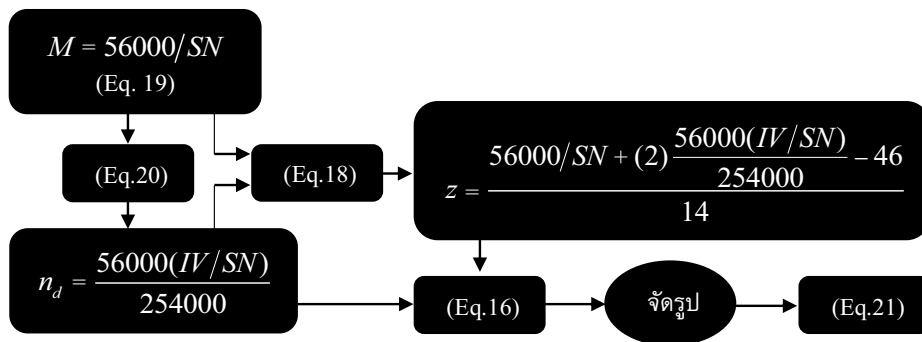
2.3 ค่าไอโอดีน (Iodine Value; IV) [16]

ค่าไอโอดีน คือจำนวนของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาพอกติดกับน้ำมันหนัก 100 กรัม เป็นค่าที่บอกถึงความไม่อิ่มตัวของกรดไขมัน ค่าไอโอดีนเป็นตัวชี้บ่งว่าไขมันหรือน้ำมันมีการดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุลมากน้อยเพียงใด ถ้าค่าไอโอดีนสูง แสดงว่ามีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบมากและจะเกิดการหืนชนิด Oxidative rancidity ได้ง่ายด้วย การหาค่าของไอโอดีนโดยวิธีของฮานัส (Hanus) ใช้สารละลายไอโอดีนมาตรฐานในกรดอะซิติกที่มีไอโอดีนโบรมิเดช่วยเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยากับไขมันตัวอย่างที่ทราบปริมาณที่แน่นอนซึ่งละลายในคลอโรฟอร์มหรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ทิ้งไว้ในที่มีระยะเวลาหนึ่ง ไตรเทอร์ปริมาณไอโอดีนที่เหลือจากปฏิกิริยาด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) โดยค่าไอโอดีนมีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล (M) และจำนวนพันธะคู่ดังแสดงในสมการที่ (20)

$$IV = \frac{25400(n_d)}{M} \quad (20)$$

แทนสมการที่ (18)-(20) ในสมการที่ (16) และจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (21) โดยขั้นตอนแสดงในรูปที่ 2 เป็นสมการทำนายความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ ในหน่วย cSt จากค่า SN กับ IV

$$\ln \mu = [-2.79 - 408 \frac{1}{SN} + 0.48 \frac{IV}{SN}] + [562 + 285854 \frac{1}{SN} - 245 \frac{IV}{SN}] T \quad (21)$$



รูปที่ 2 ขั้นตอนการแทนค่าสมการที่ (19)-(20) ในสมการที่ (16) เพื่อสร้างสมการที่ (21)

3. ระเบียบวิธี

3.1 การวิเคราะห์ค่าสะพานนิพิเคชันและค่าไอโอดีน

การวิเคราะห์ค่าสะพานนิพิเคชันและค่าไอโอดีนคำนวณด้วยสมการที่ (19) และ (20) จากองค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันไบโอดีเซล

3.2 ข้อมูลการทดลอง

ข้อมูลการทดลองค่าความหนืดไบโอดีเซลจากบทความของ Pratas และคณะ [5, 30], Baroutian และคณะ [31] และ Yuan และคณะ [32] โดย Pratas และคณะ [5, 30] วิเคราะห์ค่าความหนืดไดนามิกส์ของไบโอดีเซลที่ความดันบรรยากาศด้วยเครื่อง Rotational stabinger viscometer-densimeter ของ Anton Paar รุ่น SVM 3000; Baroutian et al. [31] ใช้เครื่อง Rotary viscometer รุ่น VT550 (HAAKE, Germany) กับ NV sensor ในการวิเคราะห์ความหนืดไดนามิกส์ของ FAME FAEE น้ำมันดีเซล และของเหลวผสม ในการศึกษานี้ได้แปลงค่าความหนืดไดนามิกส์ (η) ให้เป็นความหนืดจลน์ด้วยความสัมพันธ์ด้วยสมการที่ (24) และ Yuan et al. [32] ใช้วิธีการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D-445 โดยใช้ Cannon-Fenske ชนิด Glass capillary viscometers

$$\mu = \frac{\eta}{\rho} \quad (22)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่น (g/cm^3)

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์ เอ็กเซล รุ่น 2013 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (Deviation; D) และความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Average Absolute Deviation; AAD) ดังสมการที่ (23) และ (24) [25, 33, 34]

$$D = \frac{\mu_{lit} - \mu_{cal}}{\mu_{lit}} \times 100 \quad (23)$$

$$AAD = \sum_{i=1}^n \left[\frac{|\mu_{lit} - \mu_{cal}|}{\mu_{lit}} \times 100 \right] / N \quad (24)$$

เมื่อ μ_{lit} และ μ_{cal} คือ ความหนืดจลน์จากการทดลองและความหนืดจลน์จากการทำนายตามลำดับ และ N คือจำนวนข้อมูล

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

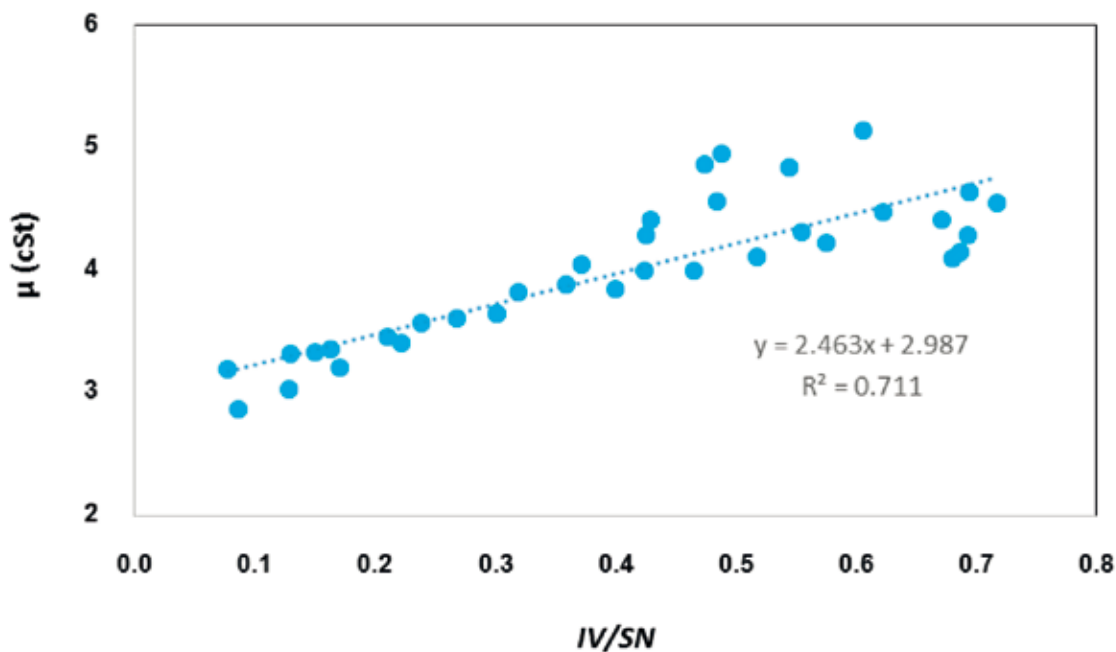
ไบโอดีเซลเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันของแอลกอฮอล์โมเลกุลขนาดเล็กกับน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ถ้าวัดดูดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการแตกต่างกันอาจทำให้องค์ประกอบของเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันไบโอดีเซลแตกต่างกันด้วย ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมองค์ประกอบเมทิลเอสเทอร์กรดไขมันของไบโอดีเซลไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบ FAME ของไบโอดีเซล (ร้อยละโดยมวล)

Fats and Oils	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	Other
soybean 1[32]	0.00	0.08	10.49	0.12	4.27	24.20	51.36	7.48	1.25
soybean 2[32]	0.00	0.00	10.81	0.11	4.54	24.96	50.66	7.27	1.23
genetically modified [32]	0.00	0.00	3.98	0.13	2.99	82.54	4.98	3.70	1.28
yellow grease[32]	0.00	1.27	17.44	2.03	12.38	54.67	7.96	0.69	0.98
palm[31]	0.00	0.00	41.50	0.00	4.90	40.10	13.50	0.00	0.00
jatropha[31]	0.00	0.10	15.10	0.90	7.10	44.70	31.40	0.20	0.40
fish oil[35]	0.00	3.76	5.66	28.09	7.46	42.29	12.74	0.00	0.00
sunflower[35]	0.00	0.00	7.10	0.00	4.80	22.60	65.50	0.00	0.00
coconut[36]	35.35	19.84	13.83	0.00	3.94	14.30	4.73	0.00	7.73
colza[36]	0.00	0.00	3.99	0.00	3.91	56.67	23.61	9.88	1.94
soybean 3 [36]	0.00	0.00	11.32	0.00	0.00	25.68	54.94	8.07	0.00
<i>Coconut+Colza[36]</i>									
w ₁ =0.0962	3.40	1.91	4.94	0.00	3.91	52.59	21.79	8.93	2.49
w ₁ =0.1967	6.95	3.90	5.93	0.00	3.92	48.34	19.90	7.94	3.08
w ₁ =0.2989	10.57	5.93	6.93	0.00	3.92	44.01	17.97	6.93	3.67
w ₁ =0.3970	14.03	7.88	7.90	0.00	3.92	39.85	16.11	5.96	4.24
w ₁ =0.4974	17.58	9.87	8.88	0.00	3.92	35.60	14.22	4.97	4.83
w ₁ =0.5977	21.13	11.86	9.87	0.00	3.93	31.35	12.33	3.97	5.40
w ₁ =0.6952	24.58	13.79	10.83	0.00	3.93	27.21	10.48	3.01	5.97
w ₁ =0.8039	28.42	15.95	11.90	0.00	3.93	22.61	8.43	1.94	6.59
w ₁ =0.9017	31.88	17.89	12.86	0.00	3.94	18.46	6.59	0.97	7.16
cotton[37]	0.00	0.62	24.09	0.00	2.56	15.74	56.99	0.00	0.00
soybean 4 [37]	0.00	0.00	11.29	0.00	3.96	19.98	58.39	5.86	0.52
babassu[37]	28.11	25.56	15.41	0.00	5.04	20.79	0.00	0.00	5.10
<i>Cotton+Babassu[37]</i>									
w ₁ =0.166	23.44	21.42	16.85	0.00	4.63	19.95	9.46	0.00	4.25
w ₁ =0.196	22.60	20.67	17.11	0.00	4.55	19.80	11.17	0.00	4.10
w ₁ =0.299	19.71	18.10	18.01	0.00	4.30	19.28	17.04	0.00	3.58
w ₁ =0.490	14.34	13.34	19.66	0.00	3.82	18.32	27.93	0.00	2.60
w ₁ =0.684	8.88	8.50	21.35	0.00	3.34	17.34	38.98	0.00	1.61
w ₁ =0.805	5.48	5.48	22.40	0.00	3.04	16.72	45.88	0.00	0.99
w ₁ =0.900	2.81	3.11	23.22	0.00	2.81	16.25	51.29	0.00	0.51
<i>Soybean+Babassu[37]</i>									
w ₁ =0.099	25.33	23.03	15.00	0.00	4.93	20.71	5.78	0.58	4.65
w ₁ =0.297	19.76	17.97	14.19	0.00	4.72	20.55	17.34	1.74	3.74
w ₁ =0.404	16.75	15.23	13.75	0.00	4.60	20.46	23.59	2.37	3.25
w ₁ =0.501	14.03	12.75	13.35	0.00	4.50	20.38	29.25	2.94	2.80
w ₁ =0.605	11.10	10.10	12.92	0.00	4.39	20.30	35.33	3.55	2.32
w ₁ =0.804	5.51	5.01	12.10	0.00	4.17	20.14	46.95	4.71	1.42
w ₁ =0.901	2.78	2.53	11.70	0.00	4.07	20.06	52.61	5.28	0.97
soybean 5 [38]	0.00	0.00	10.79	0.00	4.21	24.40	53.37	7.21	0.00

ข้อมูล FAME ที่เป็นองค์ประกอบในไบโอดีเซลในการศึกษาครั้งนี้แสดงในตารางที่ 1 จากการคำนวณค่า SN และ IV ด้วยสมการที่ (19) และ (20) ตามลำดับ พบว่ามีช่วงของค่า SN และ IV มีค่าเท่ากับ 189.5-236.3 และ 17.8-80.5 ตามลำดับ จากสมการที่ (21) การทำนายความหนืดจลน์มีความสัมพันธ์กับสัดส่วน IV/SN นำค่าจากตารางที่ 1 มาคำนวณพบว่าค่าเท่ากับ 0.08-0.72 เมื่อพล็อตกราฟ IV/SN กับความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลชนิด

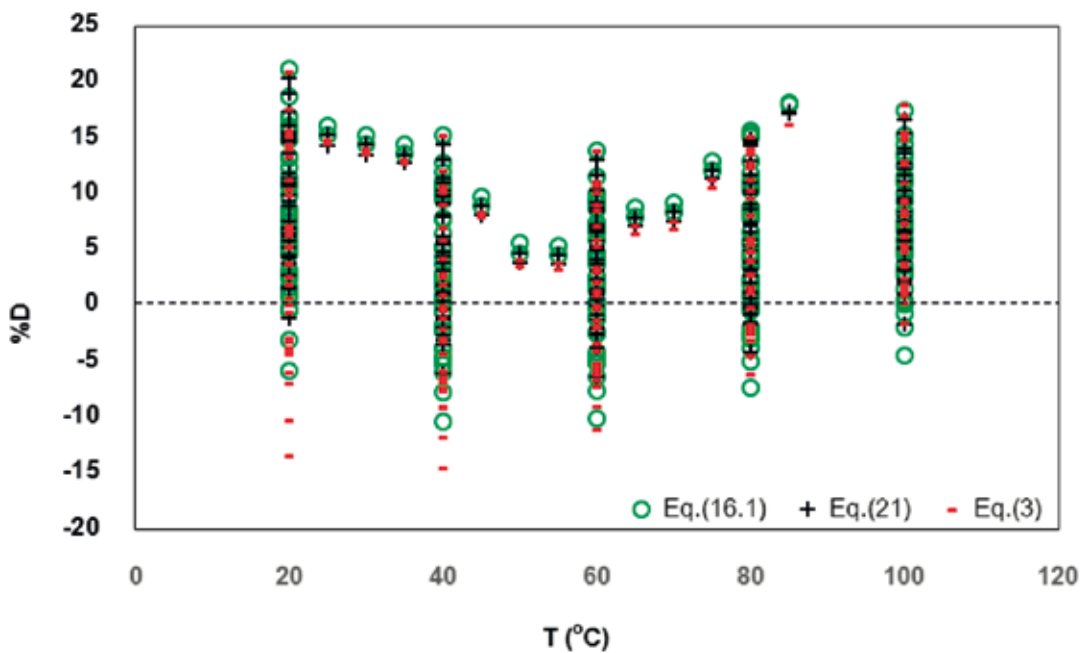
ต่างๆ ที่อุณหภูมิ 40°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิมาตรฐานในการวัดความหนืดจลน์ตามมาตรฐาน ASTM D-445 พบว่าเมื่อสัดส่วนของ IV/SN เพิ่มขึ้นค่าความหนืดจลน์เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 2.463 เทา ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งมีความสัมพันธ์ในรูปเส้นตรงมีค่าความชัน จุดตัดแกน และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 2.463, 2.987 และ 0.711 ตามลำดับ



รูปที่ 3 สัดส่วนค่าไอโอดีต่อค่าสะปอนนิฟิเคชัน (IV/SN) กับค่าความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 40°C

ตารางที่ 2 แสดงค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยจากการทำนายความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลด้วยทำนายด้วยสมการที่ (21) เทียบกับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิต่างๆ กับงานวิจัยของ Pratas et al. [5, 30], Baroutian et al. [31] และ Yuan et al. [32] ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงสุดและต่ำสุดเท่ากับ 15.77 (Colza) และ 2.05 (Soybean+Babassu, $w_1=0.099$) ตามลำดับ จากรูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวร้อยละความคลาดเคลื่อน (D(%)) จากการทำนายความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลที่ทำนายด้วยสมการสมการที่ (13), (16)

และสมการที่ (21) เทียบกับการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 20-100°C พบว่าค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (D (%)) ส่วนใหญ่มีค่าบวกแสดงว่าค่าที่ได้จากการทำนายส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าการทดลอง อีกทั้งยังพบว่าลักษณะการกระจายตัวของ D (%) จากผลการทำนายสมการที่ (16) และ (21) คล้ายคลึงกันและใกล้เคียงกันมาก เมื่อเทียบกับสมการที่ (3) แสดงให้ทราบว่า การแปลงสมการความสัมพันธ์จากสมการที่ (16) ที่ทำนายค่าด้วย z และ n_o เป็นสมการที่ (21) ที่ทำนายค่าด้วย SN และ IV มีความถูกต้องในการแปลงและยังมีความแม่นยำในการนำมาใช้ทำนายเช่นกัน



รูปที่ 4 การกระจายตัวร้อยละความคลาดเคลื่อน (D(%)) จากการทำนายเทียบกับการทดลองความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 2 ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (AD (%)) เทียบกับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

Fats and Oils (methyl esters)	N _{exp}	T (K)	% Δ ¹	% Δ ²	% Δ ³	
soybean 1 [32]	5	293.15-373.15	2.64	2.49	-	
soybean 2 [32]	5		7.29	6.42	-	
genetically modified[32]	5		8.83	7.94	-	
yellow grease[32]	5		10.58	9.87	-	
Total	20		AAD	7.33	6.88	-
palm[31]	14	293.15-358.15	11.20	10.36	10.02	
jatropha[31]	14		11.93	11.07	10.46	
fish oil[35]	5	293.15-373.15	6.99	6.53	5.92	
sunflower[35]	5		5.09	4.09	5.23	
coconut[36]	5		7.63	3.91	9.36	
colza[36]	5		16.56	15.77	16.44	
soybean 3 [36]	5		11.98	11.05	12.45	
<i>Coconut+Colza</i> [36]						
w ₁ =0.0962	5		14.21	14.37	13.65	
w ₁ =0.1967	5		11.90	12.93	10.95	
w ₁ =0.2989	5		9.57	11.36	8.25	
w ₁ =0.3970	5		7.26	9.67	5.65	
w ₁ =0.4974	5		5.05	7.96	3.23	
w ₁ =0.5977	5		2.54	5.74	2.46	
w ₁ =0.6952	5		2.09	3.75	3.44	
w ₁ =0.8039	5		2.76	2.07	5.43	
w ₁ =0.9017	5		5.10	2.30	7.11	
cotton[37]	5		4.63	3.64	4.64	
soybean 4 [37]	5		12.63	11.77	12.97	
babassu[37]	5		3.47	2.45	5.27	
<i>Cotton+Babassu</i> [37]						
w ₁ =0.166	5		2.75	2.24	4.36	
w ₁ =0.196	5	2.27	2.23	4.24		
w ₁ =0.299	5	2.61	2.15	3.70		
w ₁ =0.490	5	2.23	2.29	2.39		
w ₁ =0.684	5	2.42	2.66	2.40		
w ₁ =0.805	5	2.95	3.18	2.67		
w ₁ =0.900	5	3.98	3.65	3.74		
<i>Soybean+Babassu</i> [37]						
w ₁ =0.099	5	2.57	2.05	4.00		
w ₁ =0.297	5	2.21	3.67	2.29		
w ₁ =0.404	5	3.01	4.94	2.56		
w ₁ =0.501	5	5.26	6.88	4.43		
w ₁ =0.605	5	6.35	7.60	5.74		
w ₁ =0.804	5	9.64	9.96	9.50		
w ₁ =0.901	5	11.13	10.89	12.14		
Total	203		6.90	6.91	6.94	
Overall	212		6.98	6.91	-	

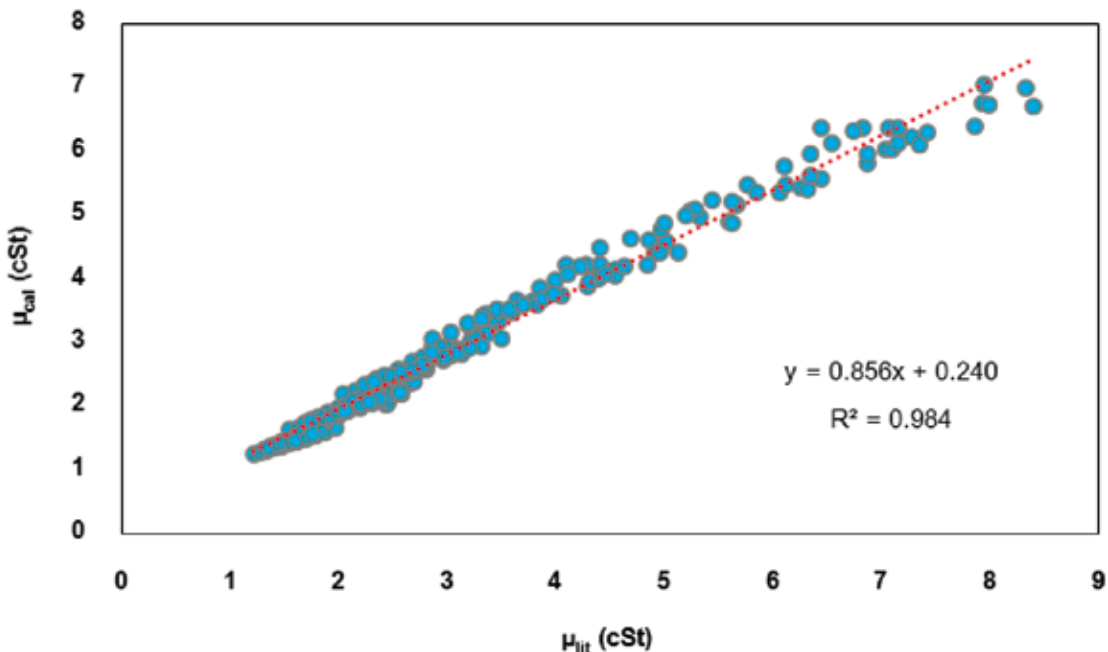
หมายเหตุ %Δ¹ คือค่า AD (%) จากการคำนวณด้วยสมการที่ (16) เทียบกับผลการทดลอง

%Δ² คือค่า AD (%) จากการคำนวณด้วยสมการที่ (21) เทียบกับผลการทดลอง

%Δ³ คือค่า AD (%) จากการคำนวณด้วยสมการที่ (13) (Ramires-Verduzco[24]) เทียบกับผลการทดลอง

ความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลบริสุทธิ์และไบโอดีเซลผสมที่ทำนายได้จากสมการที่ (21) พบมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับการทำนายด้วยค่า z และ n_d (สมการที่ (16)) ซึ่งค่า AAD เฉลี่ยร้อยละ 4.91 ค่าความหนืดจลน์ที่ทำนายด้วยสมการที่ (21) มีความแตกต่างจากการทำนายด้วยสมการที่ (16) เพียงเล็กน้อยเนื่องจากการปัดเศษตัวเลขใน

ขั้นตอนการแปลงความสัมพันธ์ จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลการทำนายกับผลการทดลองความหนืดจลน์ของไบโอดีเซล พบว่ามีความสัมพันธ์กันในรูปเส้นตรง โดยมีค่า จุดตัดแกน ความชัน สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.240, 0.856, 0.984 และ 0.110 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลจากการทดลอง (μ_{fit}) และการทำนายด้วยสมการที่ (21) (μ_{cal}) ที่อุณหภูมิ 20-100°C

5. สรุปผล

ในการศึกษานี้เสนอการทำนายความหนืดจลน์ของเหลวด้วยวิธีเชิงประจักษ์จากโครงสร้างทางเคมีหรือองค์ประกอบทางเคมีที่อุณหภูมิต่างๆ (20-100 องศาเซลเซียส) วิธีการทำนายที่นำเสนอสามารถทำนายโดยใช้ SN กับ IV (สมการที่ 21) ซึ่งให้ความแม่นยำเช่นเดียวกับการทำนายด้วยค่า z และ n_d (สมการที่ 16) นอกจากความแม่นยำของค่าที่ทำนายจากสมการที่นำเสนอแล้ว ยังมีข้อได้เปรียบจากวิธีการทำนายความหนืดจลน์ของไบโอดีเซลด้วยวิธีอื่นคือ ไม่จำเป็นต้องทราบความหนืดจลน์ของ FAME แต่ละตัวที่เป็นองค์ประกอบ และยังง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อยอดกับสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ที่คล้ายคลึงกัน

6. เอกสารอ้างอิง

1. Benjumea, P., Agudelo, J. and Agudelo, A., 2008, "Basic Properties of Palm Oil Biodiesel–Diesel Blends." *Fuel*, 87 (10–11), pp. 2069–2075.
2. Yoon, S.H., Park, S.H. and Lee, C.S., 2007, "Experimental Investigation on the Fuel Properties of Biodiesel and Its Blends at Various Temperatures." *Energy and Fuels*, 22 (1), pp. 652–656.
3. Alptekin, E. and Canakci, M., 2008, "Determination of the Density and the Viscosities of Biodiesel–Diesel Fuel Blends." *Renewable Energy*, 33 (12), pp. 2623–2630.
4. Tesfa, B., Mishra, R., Gu, F. and Powles, N.,

2010, "Prediction Models for Density and Viscosity of Biodiesel and Their Effects on Fuel Supply System in Ci Engines," *Renewable Energy*, 35 (12), pp. 2752-2760.

5. Pratas, M.J., Freitas, S., Oliveira, M.B., Monteiro, S.I.C., Lima, A.S. and Coutinho, J.o.A.P., 2010, "Densities and Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters," *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55 (9), pp. 3983-3990.

6. Boudy, F. and Seers, P., 2009, "Impact of Physical Properties of Biodiesel on the Injection Process in a Common-Rail Direct Injection System," *Energy Conversion and Management*, 50 (12), pp. 2905-2912.

7. Ejim, C.E., Fleck, B.A. and Amirfazli, A., 2007, "Analytical Study for Atomization of Biodiesels and Their Blends in a Typical Injector : Surface Tension and Viscosity Effects," *Fuel*, 86 (10-11), pp. 1534-1544.

8. Ryan III TW, C.T. and Lee, C.D., 1982, "Characterization of Vegetable Oils for Use as Fuels in Diesel Engines," *Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*, Frago, North Dakota, pp. 70-81.

9. Quick GR, W.B. and Woodmore, P.J., 1982, "Vegetable Oils Fuels," *Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*, Frago, North Dakota, pp. 239-246.

10. Halvorsen, J.D., Mammel, W.C., Jr. and Clements, L.D., 1993, "Density Estimation for Fatty Acids and Vegetable Oils Based on Their Fatty Acid Composition," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 70 (9), pp. 875-880.

11. Andrade, E.N.D.C., 1930, "The Viscosity of Liquids," *Nature*, 125 (3148), pp. 309-310.

12. Tat, M. and Van Gerpen, J., 1999, "The Kinematic Viscosity of Biodiesel and Its Blends with Diesel Fuel," *Journal of the American Oil*

Chemists' Society, 76 (12), pp. 1511-1513.

13. Joshi, R.M. and Pegg, M.J., 2007, "Flow Properties of Biodiesel Fuel Blends at Low Temperatures," *Fuel*, 86 (1-2), pp. 143-151.

14. Yuan, W., Hansen, A.C. and Zhang, Q., 2009, "Predicting the Temperature Dependent Viscosity of Biodiesel Fuels," *Fuel*, 88 (6), pp. 1120-1126.

15. Vogel, H., 1921, "The Temperature Dependence Law of the Viscosity of Fluids," *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 22, pp. 645-646.

16. Gouw, T., Vlugter, J. and Roelands, C., 1966, "Physical Properties of Fatty Acid Methyl Esters. Vi. Viscosity," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 43 (7), pp. 433-434.

17. Aryasuk, K., Yensruang, D. and Krisnangkura, K., 2003, "An Accurate Method for the Estimation of Equivalent Temperature in Programmed Temperature Gas Chromatography," *KMUTT Research & Development Journal*, 26 (4), pp. 429-446. (In Thai)

18. Allen, C.A.W., Watts, K.C., Ackman, R.G. and Pegg, M.J., 1999, "Predicting the Viscosity of Biodiesel Fuels from Their Fatty Acid Ester Composition," *Fuel*, 78 (11), pp. 1319-1326.

19. Knothe, G. and 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 (11), pp. 3217-3224.

20. Rabelo, J., Batista, E., Cavaleri, F. and Meirelles, A., 2000, "Viscosity Prediction for Fatty Systems," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77 (12), pp. 1255-1262.

21. Krisnangkura, K., Yimsuwan, T. and Pairintra, R., 2006, "An Empirical Approach in Predicting Biodiesel Viscosity at Various Temperatures," *Fuel*, 85 (1), pp. 107-113.

22. Martin, A.J.P., 1950, "Some Theoretical Aspect of Partition Chromatography," *Biochemical*

Society Symposia. (Partition Chromatography), 3, pp. 4-20.

23. Basso, R.C., Meirelles, A.J.d.A. and Batista, E.A.C., 2013, "Densities and Viscosities of Fatty Acid Ethyl Esters and Biodiesels Produced by Ethanolysis from Palm, Canola, and Soybean Oils: Experimental Data and Calculation Methodologies," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52 (8), pp. 2985-2994.

24. Ramírez Verduzco, L.F., 2013, "Density and Viscosity of Biodiesel as a Function of Temperature: Empirical Models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, pp. 652-665.

25. Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryasuk, K. and 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, pp. 1051-1061.

26. Martin, A.J.P., 1950, "Partition Chromatography," *Annual Review of Biochemistry*, 19, (1), pp. 517-542.

27. Krisnangkura, K., 1986, "A Simple Method for Estimation of Cetane Index of Vegetable Oil Methyl Esters," *Journal of the American Oil Chemists Society*, 63 (4), pp. 552-553.

28. Krisnangkura, K., 1991, "Estimation of Heat of Combustion of Triglycerides and Fatty Acid Methyl Esters," *Journal of the American Oil Chemists Society*, 68 (1), pp. 56-58.

29. Phankosol, S. and Krisnangkura, K., 2015, "Estimation Surface Tension of Biodiesel from Saponification Number and Iodine Value," *Journal of Energy Research*, 12 (1), pp. 58-68. (In Thai)

30. Pratas, M.J., Freitas, S., Oliveira, M.B., Monteiro, S.I.C., Lima, A.I.S. and Coutinho, J.o.A.P., 2011, "Densities and Viscosities of Minority Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters Present in Biodiesel,"

Journal of Chemical and Engineering Data, 56 (5), pp. 2175-2180.

31. Baroutian, S., Shahbaz, K., Mjalli, F.S., Hashim, M.A. and AlNashef, I.M., 2012, "Densities and Viscosities of Binary Blends of Methyl Esters + Ethyl Esters and Ternary Blends of Methyl Esters + Ethyl Esters + Diesel Fuel from T = (293.15 to 358.15) K," *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57 (5), pp. 1387-1395.

32. Yuan, W., Hansen, A., Zhang, Q. and Tan, Z., 2005, "Temperature-Dependent Kinematic Viscosity of Selected Biodiesel Fuels and Blends with Diesel Fuel," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 82 (3), pp. 195-199.

33. Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryasuk, K. and Krisnangkura, K., 2014, "Estimation of Surface Tension of Fatty Acid Methyl Ester and Biodiesel at Different Temperatures," *Fuel*, 126, pp. 162-168.

34. Phankosol, S., Sudaprasert, K., Lilitchan, S., Aryasuk, K. and Krisnangkura, K., 2014, "Estimation of Density of Biodiesel," *Energy and Fuels*, 28 (7), pp. 4633-4641.

35. Parente, R.C., Nogueira, C.A., Carmo, F.R., Lima, L.P., Fernandes, F.A.N., Santiago-Aguiar, R.I.S. and Sant'Ana, H.B., 2011, "Excess Volumes and Deviations of Viscosities of Binary Blends of Sunflower Biodiesel + Diesel and Fish Oil Biodiesel + Diesel at Various Temperatures," *Journal of Chemical and Engineering Data*, 56 (7), pp. 3061-3067.

36. Feitosa, F.X., Rodrigues, M.d.L., Veloso, C.B., Cavalcante, C.I.L., Albuquerque, M.n.C.G. and de Sant'Ana, H.B., 2010, "Viscosities and Densities of Binary Mixtures of Coconut + Colza and Coconut + Soybean Biodiesel at Various Temperatures," *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55 (9), pp. 3909-3914.

37. Nogueira, C.A., Feitosa, F.X., Fernandes, F.A.N., Santiago, R.I.S. and de Sant'Ana, H.B., 2010, "Densities and Viscosities of Binary Mixtures of Babassu Biodiesel + Cotton Seed or Soybean Biodiesel at Different Temperatures," *Journal of Chemical and Engineering Data*, 55 (11), pp. 5305-5310.

38. Knothe, G. and Steidley, K.R., 2007, "Kinematic Viscosity of Biodiesel Components (Fatty Acid Alkyl Esters) and Related Compounds at Low Temperatures," *Fuel*, 86 (16), pp. 2560-2567.

