

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความดันของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล

A Correlation of Density and Pressure of Fatty Acid Methyl Ester and Biodiesels

ติณณภพ จุ่มอิน^{1*} พิศิษฐ์ แซ่ตัน² สุพรรณา พราวแดง³ สุภาพรณ สัจจวรรณ⁴ สุริยา พันธุ์โกศล⁵
Thinnaphop Chum-in^{1*} Pisit Saetan² Supanna Prawdang³ Suphapan Satchawan⁴ Suriya Phankosol⁵

^{1,2} สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม 10900

³ สำนักงานคณบดี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม 10900

⁴ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม กรุงเทพมหานคร 10900

⁵ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิตและออกแบบแม่พิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ
บ้านสมเด็จเจ้าพระยา 10600

*E-mail: thinnaphop@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาความสัมพันธ์ความหนาแน่นของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ (FAME) กับอุณหภูมิและความดันเพื่อใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นที่สภาวะความดันสูง โดยอาศัยวิธีการรวบรวมพลังงานกิบส์ สมการที่พัฒนาขึ้นถูกใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นสำหรับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลทั้งหมด 8 ชนิด ในช่วงอุณหภูมิและความดันเท่ากับ 283.15 – 338.15 K และ 0.1 – 80 MPa โดยมีความแม่นยำสูง และสามารถใช้ประมาณค่าความหนาแน่นได้ทั้งอุณหภูมิและความดันในสมการเดียว ดังนั้นจึงคาดว่าสมการจะมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นที่สภาวะอุณหภูมิและความดันใดๆ ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์, ความดันสูง, ความสัมพันธ์, ไบโอดีเซล

ABSTRACT

This research aims to develop the relationship of density of fatty acid methyl ester (FMAE) with temperature and pressure for estimating the density at high pressure. The equation was developed by using the Gibbs energy method. These were used to estimate the density of FAME and biodiesels of 8 types in the temperatures and pressures range of 283.15 – 338.15 K and 0.1 – 80 MPa which high accuracy. In addition, the equation can be estimated the density at different temperatures and pressures as the same equation. Therefore, there are expected that the equation is very useful for the study of density changes in different temperatures and pressures.

Keywords: Biodiesel, Correlation, Fatty acid methyl, Pressure

1. บทนำ

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทดแทนชนิดหนึ่งที่สำคัญสำหรับนำมาทดแทนน้ำมันดีเซล เนื่องจากมีสมบัติที่ใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปไบโอดีเซลคือผลิตภัณฑ์ร่วมกับกลีเซอรอลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกรดหรือเบส ไบโอดีเซลสามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ หรืออาจจะใช้เป็นส่วนผสมหนึ่งของน้ำมันดีเซล เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสำหรับการนำไปใช้กับเครื่องยนต์ โดยทั่วไปแล้วไบโอดีเซลจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่นำมาทำเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล และเมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์สมบัติต่างๆ ก็จะขึ้นกับทั้งอุณหภูมิและความดัน ด้วยเช่นกัน เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบันทำงานในสภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งการเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพต่างๆ จะมีผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ [1] ซึ่งความหนาแน่นก็เป็นสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความดันเช่นกัน โดยวิธีการศึกษาความหนาแน่นก็จะใช้วิธีการทดลองด้วยเครื่องมือวัดความหนาแน่นที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ [2] ซึ่งในบางครั้งอาจจะจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองซ้ำกันหลายๆ รอบ ทำให้เสียทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะพัฒนาสมการความสัมพันธ์ต่างๆ ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมืออย่างง่ายในการประมาณค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลขึ้นมา [3-6] ซึ่งสมการต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมาจะมีข้อดี คือ ช่วยให้การศึกษาวฏัตกรรมความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความดันต่างๆ ทำได้ง่ายขึ้น มีความสะดวกรวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลองได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นของระหว่างความหนาแน่น อุณหภูมิ และความดันของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลผ่านความสัมพันธ์ของตัวแปรพลังงานกิบส์ เพื่อใช้สำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นในสภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยผ่านตัวแปรพลังงานกิบส์ที่สามารถควมรวมเข้าด้วยกันได้ และขยายให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของเอนทัลปีและเอนโทรปี ซึ่งทั้งหมดเป็นตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งผู้วิจัยหวังว่าสมการที่ได้จะเป็นสมการที่ใช้งานง่าย มีความแม่นยำสูง สำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นที่สภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมการสำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นที่สภาวะความดันสูง

Tait (1888) ได้นำเสนอสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความดันไว้ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho} = C \log \left(\frac{B + P}{B + P_0} \right) \quad (1)$$

เมื่อ ρ , ρ_0 , P , P_0 คือ ความหนืดที่สภาวะความดันใดๆ ความหนืดที่สภาวะความดันอ้างอิง ความดัน และความดันที่สภาวะอ้างอิง ตามลำดับ ส่วน B และ C คือ ค่าคงที่ของสมการ ซึ่งสมการของ Tait มีความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสมการมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความดัน แต่อย่างไรก็ตามสมการยังไม่สามารถใช้ประมาณความหนาแน่นในสภาวะอุณหภูมิต่างๆ ได้ ทำให้เป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งของสมการ ต่อมา Pratas et al. (2011) [7] ได้พัฒนาสมการสำหรับการประมาณค่าความหนาแน่นของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลขึ้น ดังสมการที่ (2) ทำให้สมการสามารถประมาณค่าความหนาแน่นได้ทั้งในสภาวะความดันและอุณหภูมิต่างๆ ได้เป็นอย่างดี แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าสมการยังคงมีความยุ่งยากในการใช้งานและมีพจน์ที่ต้องคำนวณจำนวนมาก

$$\rho = \frac{\rho(T, P = 0.1 \text{ MPa})}{\left[1 - C \ln \frac{(B + P)}{(B + 0.1)} \right]} \quad (2)$$

เมื่อ

$$\rho(T, P = 0.1 \text{ MPa}) = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 \quad (2-1)$$

ซึ่ง $a_1 - a_3$ คือ ค่าคงที่จากการพล็อตกราฟของข้อมูลการทดลองความหนาแน่นที่สภาวะความดัน 0.1 MPa สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ B จะหาได้ความสัมพันธ์กับสมการพหุนามกำลังสองกับอุณหภูมิ ดังนี้

$$B = b_1 + b_2 T + b_3 T^2 \quad (2-2)$$

2.2 การประยุกต์ใช้แนวคิดการควมรวมพลังงานกิบส์

พลังงานกิบส์ถือเป็นตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่สำคัญตัวหนึ่ง สำหรับอธิบายถึงทิศทางของกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบ และจัดเป็นฟังก์ชันสภาวะ เมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิคงที่ โดยมีสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายดังสมการที่ (3) [8]

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและพลังงานกิบส์เนื่องจากการขยายตัวของสสารจะมีความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันเอ็กซโปเนนเชียลดังสมการที่ (4) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวได้รับการพัฒนามาจาก Phankosol et al. [9]

$$\rho = e^{-\Delta \tilde{G}/RT} \quad (4)$$

เมื่อ $\Delta \tilde{G} = \Delta G_{\text{exp}} / n$ โดยที่ ρ , R , T , ΔG_{exp} และ n คือ ความหนาแน่น ค่าคงที่ของแก๊ส อุณหภูมิสัมบูรณ์ พลังงานกิบส์เนื่องจากการขยายตัว และจำนวนโมล ตามลำดับ

สำหรับสภาวะความดันสูงพลังงานกิบส์จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตรงกับความดัน ดังสมการที่ (5) [10]

$$\sum \Delta G_{P, \text{total}} = \Delta G_{\text{atm}} + P' \Delta G_{P_i} \quad (5)$$

เมื่อ $\Delta G_{P, \text{total}}$, ΔG_{atm} และ ΔG_{P_i} คือ พลังงานกิบส์รวมที่สภาวะความดันใดๆ พลังงานกิบส์ที่ความดันบรรยากาศ และ พลังงานกิบส์ที่ความดันใดๆ ตามลำดับ โดยที่

$$P' = \frac{P - P_{\text{atm}}}{P_{\text{atm}}} \quad (5-1)$$

เมื่อ p และ p_{atm} คือ ความดันใดๆ และความดันที่สภาวะบรรยากาศตามลำดับ

3. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความหนืดของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล

จากสมการที่ (4) เมื่อแทนด้วยสมการที่ (5) จะทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6)

$$\ln \rho = - \frac{(\Delta G_{\text{atm}} + P' \Delta G_{P_i})_{\text{exp}}}{RT} \quad (6)$$

เมื่อทำการขยายสมการที่ (6) ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับเอนทัลปีและเอนโทรปี จะได้ดังสมการที่ (7)

$$\ln \rho = - \frac{((\Delta H - T \Delta S)_{\text{atm}} + P' (\Delta H - T \Delta S)_{P_i})_{\text{exp}}}{RT} \quad (7)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (7) จะได้ดังสมการที่ (8)

$$\ln \rho = s_1 + \frac{h_1}{T} + P' \left(s_2 + \frac{h_2}{T} \right) \quad (8)$$

$$\text{เมื่อ } s_1 = \frac{(\Delta S)_{atm,exp}}{R}, h_1 = -\frac{(\Delta H)_{atm,exp}}{R}, s_2 = \frac{(\Delta S)_{P_i,exp}}{R}, h_2 = -\frac{(\Delta H)_{P_i,exp}}{R}$$

4. วิธีดำเนินงานวิจัย

4.1 ข้อมูล

ข้อมูลต่างๆ ที่ใช้สำหรับการหาค่าคงที่ของสมการและสอบเทียบสมการสำหรับการศึกษาค้างนี้แสดงดังตารางที่ 1

4.2 การหาค่าคงที่ของสมการ

ค่าคงที่ของสมการจะใช้วิธีการหาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุ (Multiple Regression Analysis) ในโปรแกรมเอ็กซ์เซลรุ่น 2016

4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

สำหรับการเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการระหว่างการประมาณค่าของสมการและค่าที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้จะใช้วิธีการหาค่าความเอนเอียง (Bias, %) และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (AAD, %) ดังสมการที่ (9) และ (10) ตามลำดับ

$$Bias(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\rho_{exp,i} - \rho_{cal,i}}{\rho_{exp,i}} \right) \quad (9)$$

และ

$$AAD(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\rho_{exp,i} - \rho_{cal,i}}{\rho_{exp,i}} \right| \quad (10)$$

เมื่อ $\rho_{lit,i}$, $\rho_{cal,i}$ และ N คือ ความหนาแน่นที่ได้จากข้อมูลการทดลอง จากการคำนวณ และจำนวนข้อมูลตามลำดับ

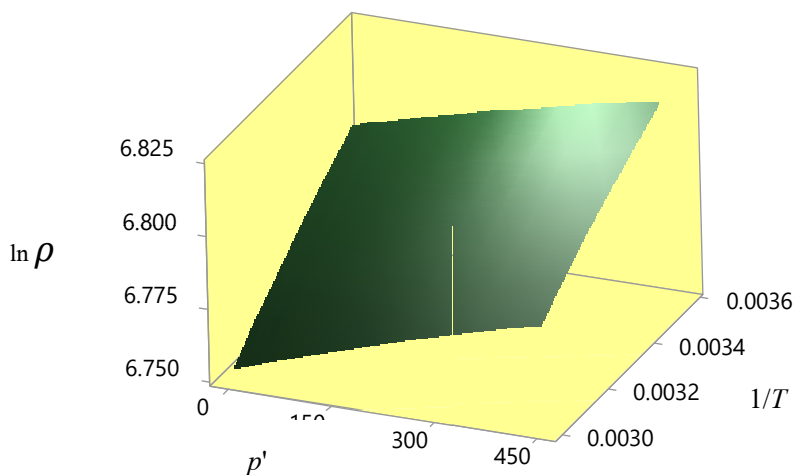
ตารางที่ 1 ข้อมูลสำหรับการหาค่าคงที่ของสมการและสอบเทียบสมการ

FAME/Biodiesels	จำนวนข้อมูล	แหล่งอ้างอิง
Saturated FAME		
Methyl Myristate (C14:0)	24	Ndiaye et al. [2]
Methyl Palmitate (C16:0)	18	Ndiaye et al. [2]
Unsaturated FAME		
Methyl Oleate (C18:1)	70	Ndiaye et al. [2]
Methyl Linoleate (C18:2)	25	Ndiaye et al. [2]
Biodiesels		
Soybean	84	Prieto et al. [11], Pratas et al. [12]
Rapeseed A	84	Prieto et al. [11], Pratas et al. [12]
Rapeseed B	35	Dzida and Prusakiewicz [13]
Cottonseed	90	Prieto et al. [11]
Palm	84	Prieto et al. [11], Pratas et al. [12]

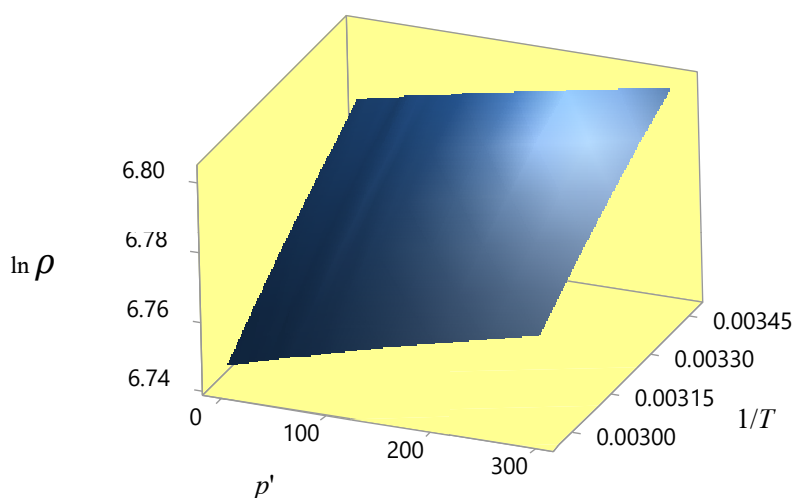
5. ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่น

โดยทั่วไปแล้วจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นลดลง ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความดันจะพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตาม [9, 12, 14, 15] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น อุณหภูมิ และความดัน เมื่อทำการพล็อตกราฟสามมิติสำหรับน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้จากน้ำมันถั่วเหลือง (Soybean) และน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cottonseed) แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการลดลงหรือเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงตามที่ได้อธิบายมาแล้วดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) Soybean



(ข) Cottonseed

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น p' และ $1/T$ สำหรับไบโอดีเซล (ก) Soybean และ (ข) Cottonseed

5.2 ค่าคงที่ของสมการที่ (8) สำหรับของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล

ค่าคงที่ของสมการสำหรับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล แต่ละชนิดจะเป็นค่าเฉพาะตัวของแต่ละชนิด เนื่องจากกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม และพันธะคู่ที่ต่างกัน ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพด้วยเช่นกัน [9] สำหรับไบโอดีเซลนั้น จะเป็นการผสมกันระหว่างกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ชนิดต่างๆ ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ตามน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่นำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นไบโอดีเซล ก็จะมีค่าคงที่ของสมการเฉพาะตัวของแต่ละชนิดน้ำมันที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการนำมาผลิตไบโอดีเซลเช่นกัน โดยตารางที่ 2 แสดงให้เห็นถึงค่าคงที่ของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว ได้แก่ Methyl Myristate (C14:0) และ Methyl Palmitate (C16:0) กรดไขมันเมทิลเอสเทอร์ชนิดไม่อิ่มตัว ได้แก่ Methyl Oleate (C18:1) และ Methyl Linoleate (C18:2) และไบโอดีเซล ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean) น้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cottonseed) น้ำมันเรพซีด (Rapeseed) และน้ำมันปาล์ม

(Palm) โดยสมการส่วนใหญ่ให้ค่า %Bias ตีลบ ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าสมการที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อนำไปประมาณค่าสมบัติความหนาแน่นของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล จะให้ค่าที่น้อยกว่าค่าจากการทดลอง

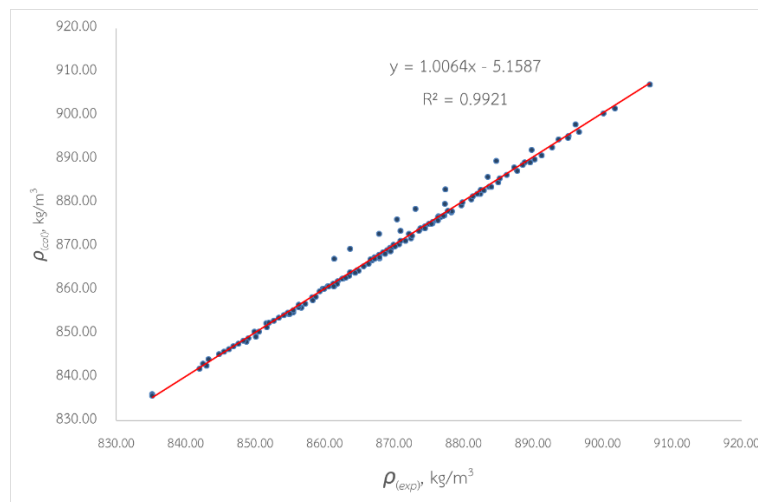
5.3 ผลการทดสอบสมการสำหรับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล

จากตารางที่ 2 และ 3 จะพบว่าสมการสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในสถานะอุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยสามารถประมาณค่าได้ในอุณหภูมิช่วง 293.15 – 333.15 K และความดันช่วง 0.1 – 50 MPa โดยมีค่า AD สูงสุดเท่ากับ 0.673% มีค่า AAD ทั้งหมดเท่ากับ 0.075 % และมีค่า AD ที่มากกว่าค่า AAD เท่ากับ 15.328% หรือเพียงแค่ 21 ข้อมูลจากข้อมูลทั้งหมด 137 ข้อมูล เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นที่ได้จากการประมาณค่าและค่าจากการทดลอง พบว่ามีความเป็นเส้นตรงสูง โดยมีค่าจุดตัดแกน ค่าความชัน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า S.D. เท่ากับ 1.0064, -5.1587, 0.9921, และ 14.923 ตามลำดับ ดังรูปที่ 2

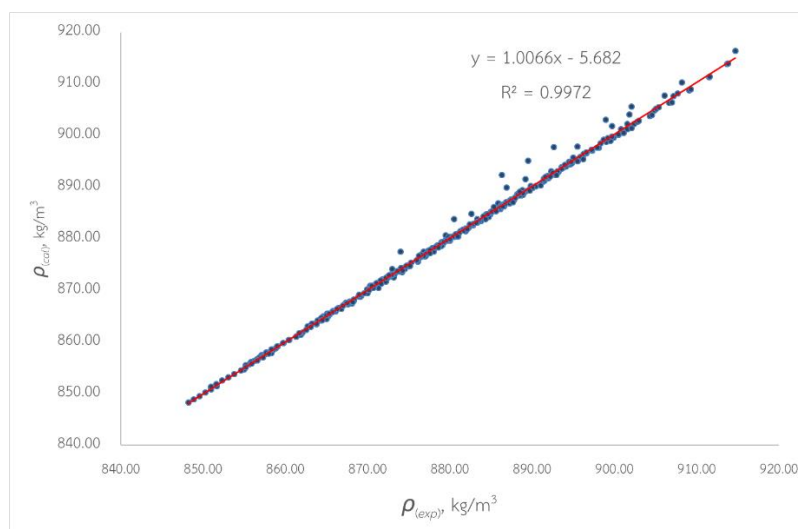
จากตารางที่ 2 และ 3 จะพบว่าสมการสามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าความหนาแน่นของทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในสถานะอุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยสามารถประมาณค่าได้ในอุณหภูมิช่วง 283.1 - 333.15 K และความดันช่วง 0.1 – 50 MPa โดยมีค่า AD สูงสุดเท่ากับ ที่เกิน 0.682% มีค่า AAD ทั้งหมดเท่ากับ 0.0414% และมีค่า AD ที่เกินค่า AAD เท่ากับ 25% หรือจำนวน 94 ข้อมูลจากข้อมูลทั้งหมด 377 ข้อมูล เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นที่ได้จากการประมาณค่าและค่าจากการทดลอง พบว่ามีความเป็นเส้นตรงสูง โดยมีค่าจุดตัดแกน ค่าความชัน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่า S.D. เท่ากับ 1.0066, -5.682, 0.9972, และ 14.474 ตามลำดับ โดยกราฟสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าคงที่สำหรับสมการที่ (8) สำหรับกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซล

กรดไขมันเมทิลเอเทอร์/ ไบโอดีเซล	ช่วงอุณหภูมิ (K)	ช่วงความดัน (MPa)	ค่าคงที่				Bias (%)
			s_0	s_1	h_0	h_1	
กรดไขมันเมทิลเอเทอร์อิ่มตัว							
Methyl Myristate (C14:0)	303.1 - 333.15	0.1 - 50	0.005770	-1.537390	0.000190	-0.037236	-0.106
Methyl Palmitate (C16:0)	313.1 - 333.15	0.1 - 50	0.000910	-0.069320	0.000210	-0.045330	-0.103
กรดไขมันเมทิลเอเทอร์ไม่อิ่มตัว							
Methyl Oleate (C18:1)	293.1 - 333.15	0.1 - 45	0.001810	-0.411160	0.000170	-0.032260	-0.020
Methyl Linoleate (C18:2)	313.1 - 333.15	0.1 - 50	0.000210	0.076920	0.000154	-0.027530	-0.007
ไบโอดีเซล							
Soybean	283.1 - 333.15	0.1 - 45	0.001071	-0.218822	0.000154	-0.027943	-0.015
Rapeseed A	293.1 - 318.15	0.1 - 80	-0.007220	2.305690	0.000228	-0.050249	-0.064
Rapeseed B	283.1 - 333.15	0.1 - 45	0.000860	-0.150955	0.000153	-0.027793	0.007
Cottonseed	288.1 - 338.15	0.1 - 30	0.001128	-0.256927	0.000178	-0.034506	-0.001
Palm	283.1 - 333.15	0.1 - 45	-0.000476	0.209188	0.000185	-0.036581	-0.021



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าความหนาแน่นของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวจากการทดลองและการประมาณค่าด้วยสมการที่ (8)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากการทดลองและการประมาณค่าด้วยสมการที่ (8)

5.4 การเปรียบเทียบค่า AAD กับสมการอื่นๆ

จากตารางที่ 3 พบว่าสมการที่ (8) โดยค่าคงที่ตามตารางที่ 2 สามารถประมาณค่าความหนาแน่นทั้งกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัว ไม่อิ่มตัว และไบโอดีเซล โดยให้ค่า AAD สูงสุด เท่ากับ 0.148%, 0.046% และ 0.116% ซึ่งเป็นค่าของ Methyl Myristate (C14:0), Methyl Oleate (C18:1) และ Rapeseed A ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการของ Pratas et al. [12] และ Prieto et al. [11] แล้วพบว่าค่า AAD ที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 3 สรุปค่า AAD ของสมการที่ (8) และสมการอื่นๆ

FAME/Biodiesels	สมการที่ (8)	Pratas et al. [12]	Ndiaye et al. [2]	Ndiaye et al. [16]	Prieto et al. [11] ^a	Prieto et al. [11] ^b	Prieto et al. [11] ^c
Saturated FAME							
Methyl Myristate (C14:0)	0.146	0.990	0.036				
Methyl Palmitate (C16:0)	0.148		0.052				
Unsaturated FAME							
Methyl Oleate (C18:1)	0.046	0.840		0.002			
Methyl Linoleate (C18:2)	0.036			0.002			
Biodiesels							
	0.042	0.790			0.550	0.060	0.04(2)
Soybean							0.03(4)
Rapeseed A	0.116	2.510			0.610	0.130	0.19(1)
Rapeseed B	0.032						
Cottonseed	0.019				0.500	0.160	0.17(4)
Palm	0.043	1.130			0.490	0.130	0.21(4)

^a Prieto et al. คำนวณโดยวิธี Extended GCVOL [11], ^b Prieto et al. คำนวณโดยวิธี Degree of unsaturation [11] และ

^c Prieto et al. คำนวณโดยวิธี 4PGMA EoS [11]

6. สรุปผล

จากการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์และไบโอดีเซลกับอุณหภูมิและความดันผ่านความสัมพันธ์กับตัวแปรพลังงานกิบส์ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นลดลง และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นตาม หรืออาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิจะแปรผกผันกับความหนาแน่น ในขณะที่ความดันจะแปรผันตรงกับความหนาแน่น และเมื่อใช้สมการความสัมพันธ์อย่างง่ายไปประมาณความหนาแน่นในสภาวะอุณหภูมิและความดันต่างๆ พบว่าสมการสามารถประมาณค่าได้ครอบคลุมอุณหภูมิ 283.1 – 338.15 K และความดัน 0.1 – 80 MPa โดยมีความแม่นยำสูง ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่นำสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของไบโอดีเซลได้เป็นอย่างดี โดยสามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษมที่ได้อุดหนุนทุนวิจัยงบประมาณรายได้ (สำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่) ปี 2560 (มรท.จช. เลขที่ 28) มา ณ โอกาสนี้ด้วย

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ghazali, W.N.M.W., et al., *Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions : Areview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **51**: p. 585–602.
- [2] Ndiaye, E.H.I., et al., *Speed of Sound, Density, and Derivative Properties of Ethyl Myristate, Methyl Myristate, and Methyl Palmitate under High Pressure*. Journal of Chemical & Engineering Data, 2013. **58**(5): p. 1371-1377.
- [3] Barabás, I., *Predicting the temperature dependent density of biodiesel–diesel–bioethanol blends*. Fuel, 2013. **109**: p. 563-574.
- [4] Pratas, M.J., et al., *Biodiesel Density: Experimental Measurements and Prediction Models*. Energy & Fuels, 2011. **25**(5): p. 2333-2340.
- [5] Ramírez Verduzco, L.F., *Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **19**: p. 652-665.
- [6] Ndiaye, E.H.I., D. Nasri, and J.L. Daridon, *Speed of Sound, Density, and Derivative Properties of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters under High Pressure: Methyl Caprate and Ethyl Caprate*. Journal of Chemical & Engineering Data, 2012. **57**(10): p. 2667-2676.
- [7] Pratas, M.J., et al., *High-Pressure Biodiesel Density: Experimental Measurements, Correlation, and Cubic-Plus-Association Equation of State (CPA EoS) Modeling*. Energy & Fuels, 2011. **25**: p. 3806–3814.
- [8] Hammes, G.G., *Physical Chemistry for The Biological Sciences*. 2nd ed, ed. G.G. Hammes and S. Hammes-Schiffer. 2015: John Wiley & Sons, Inc. 485.
- [9] Phankosol, S., et al., *Estimation of Density of Biodiesel*. Energy and Fuels, 2014. **28**: p. 4633–4641.
- [10] Chum-in, T., et al., *Gibbs energy additivity approaches to QSPR in modeling of high pressure density and kinematic viscosity of FAME and biodiesel*. Fuel Processing Technology, 2017. **156**: p. 385–393.
- [11] Prieto, N.M.C.T., et al., *Correlation and prediction of biodiesel density for extended ranges of temperature and pressure*. Fuel, 2015. **141**: p. 23-38.
- [12] Pratas, M.J., et al., *High-Pressure Biodiesel Density: Experimental Measurements, Correlation, and Cubic-Plus-Association Equation of State (CPA EoS) Modeling*. Energy & Fuels, 2011. **25**(8): p. 3806-3814.
- [13] Dzida, M. and P. Prusakiewicz, *The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel*. Fuel, 2008. **87**: p. 1941–1948.
- [14] Chum-in, T., et al., *Gibbs energy additivity approaches to QSPR in modeling of high pressure density and kinematic viscosity of FAME and biodiesel*. Fuel Processing Technology, 2017. **156**: p. 385-393.
- [15] Schedemann, A., et al., *Measurement and correlation of biodiesel densities at pressures up to 130 MPa*. Fuel, 2013. **107**: p. 483-492.
- [16] Ndiaye, E.H.I., et al., *Speed of Sound, Density, and Derivative Properties of Methyl Oleate and Methyl Linoleate under High Pressure*. Journal of Chemical & Engineering Data, 2013. **58**(8): p. 2345-2354.