การประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซลจากกฎพลังงานควบรวมอิสระ

นฏกร สิริมงคลกาล* สุริยา พันธ์โกศล** เก้ากันยา สุดประเสริฐ*
กรณ์กนก อายุสุข*** คณิต กฤษณังกูร***

*สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ
**สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพฯ
***สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ
Corresponding author e-mail : s.phankosol@gmail.com

บทคัดย่อ

ความดันไอเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเชื้อเพลิงเหลวและไบโอดีเซลเพราะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระบวนการระเหยน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซลจากจำนวนอะตอมคาร์บอนเฉลี่ย (z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ($n_{d(ave)}$) ในรูปพลังงานอิสระของการกลายเป็นไอ (Free energy additivity of vaporization) พร้อมขยายความสัมพันธ์ด้วยพลังงานอิสระควบรวมตามกฎของมาร์ติน (Martin's rule of free energy additivity และจัดรูปได้ดังนี้ $\ln P = 58.027 - 1.8066 z_{ave} - 21690/T + 726.88 z_{ave}/T - 0.51 n_{d(ave)} + 225 n_{d(ave)}/T$ เมื่อ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ในการศึกษาใช้ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิงมาใช้ในการศึกษาและสนับสนุนเพื่อยืนยันความถูกต้องแม่นยำของสมการที่จะนำไปใช้

จากการศึกษาพบว่าสมการที่นำเสนอมีความถูกต้องแม่นยำในการใช้งานโดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของไบโอดีเซล 10 ชนิด ที่ช่วงอุณหภูมิ 213-322 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 2.41 การใช้สมการประมาณค่าความดันไอนอกช่วงอุณหภูมิที่นำเสนออาจทำให้ความแม่นยำต่ำลง

คำสำคัญ : การประมาณค่า/ ความดันไอ/ ตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์/ ไบโอดีเซล

Estimation of Vapor Pressure of Biodiesel by Law of Free Energy Additivity

Natakron Sirimongkolgal[*] Suriya Phankosol[**] Kaokanya Sudaprasert[*]
Kornkanok Aryusuk[***] Kanit Krisnangkura[***]

[*]Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok
[**]Industrial and Technology Management Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok
[***]Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi (Bangkhuntien), Bangkok
Corresponding author e-mail : s.phankosol@gmail.com

Abstract

Vapor pressure of biodiesel is an important physical property of liquid fuel and biodiesel because of its direct relation to the fuel vaporization process in engines. In this work, vapor pressure of a biodiesel can be estimated from its average carbon number (of fatty acid, z_{ave}) and average number of double bonds ($n_{d(ave)}$) based on free energy of vaporization with the Martin's rule of free energy additivity is proposed. The free energy of vaporization expansion is transformed to: $\ln P = 58.027 - 1.8066 z_{ave} - 21690/T + 726.88 z_{ave}/T - 0.51 n_{d(ave)} + 225 n_{d(ave)}/T$ where T is absolute temperature (K), all constants are correlate thermodynamic parameters. Data available in literatures are used to validate, and support the speculations derived from the proposed equation.

The proposed equation is easy to use and the estimate vapor pressure values of biodiesel at different temperatures agree well with the literature values. The estimated vapor pressure of ten biodiesel types are in good agreement with those reported in literatures at temperatures, within a narrow range of 213-322°C. The average absolute deviation (AAD) is 2.41%. The vapor pressure outside this temperature range may be possibly predicted by this but accuracy may be lower.

Keywords : estimation/ vapor pressure/ thermodynamic parameters/ biodiesel

บทนำ

ไบโอดีเซล (Biodiesel) คือพลังงานทดแทนสะอาดที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ (เมทานอลหรือเอทานอล) โดยใช้เบสหรือกรดเป็นสารเร่งปฏิกิริยาภายใต้อุณหภูมิสูง เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ให้อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ หรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากปิโตรเลียม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ดี โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์กระบวนการทางเคมีเพื่อแปรสภาพน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ในไบโอดีเซลจะประกอบไปด้วยกรดไขมันหลายตัวรวมกันมีทั้งกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) คือกรดไขมันที่โมเลกุลส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอน มีพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนจับกันด้วยพันธะเดี่ยวทั้งหมด และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) คือกรดไขมันที่โมเลกุลส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนมีพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนจับกันด้วยพันธะคู่อย่างน้อยหนึ่งพันธะโดยองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชหรือสัตว์แต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบแตกต่างกันออกไป

Krisnangkura *et al.* (2007) ให้ความหมายของความดันไอ คือ ความดันที่เกิดเนื่องมาจากไอของของเหลวที่ระเหยขึ้นมาจากผิวของของเหลว โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของของเหลว เกิดการชนกันพร้อมกับถ่ายเทพลังงานจนโมเลกุลที่ผิวของของเหลวมีพลังงานมากพอจะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลได้และลอยขึ้นเป็นความดันไอ ค่าความดันไอยังบอกถึงความสามารถในการกลายเป็นไอของของเหลว ซึ่งความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) จะเป็นแรงที่มีการกระทำโดยบรรยากาศในทิศกดลง (จะกดอยู่ที่ผิวหน้าของของเหลว) ส่วนความดันไอจะเป็นแรงที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับความดันบรรยากาศ ความดันไอจะเกิดจากแรงผลักของไอในทิศลอยขึ้นจากผิวของของเหลว และได้เสนอสมประมาณค่าความดันไอของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวโดยประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์ของแอนดาร์ด (สมการที่ 1) ในรูปความสัมพันธ์เอ็กโพเนนเชียล ของความดันไอ (P) ความดันไอมาตรฐานอ้างอิง (P_{ref}) และพลังงานอิสระของการกลายเป็นไอ (Free energy of vaporization; ΔG)

$$P = P_{ref} e^{\frac{-\Delta G}{RT}} \qquad (1)$$

เมื่อ R และ T คือค่าคงที่ของแก๊สและอุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) ตามลำดับ

Yuan *et al.* (2005) และ Rose *et al.* (1961) เสนอสมการที่ใช้ทำนายจุดเดือดและความดันไอของเมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์และไบโอดีเซล ดังสมการที่ (2) โดยที่ A, B และ C คือค่าคงที่

$$\log(P) = A + \frac{B}{T+C} \qquad (2)$$

สมการที่นำเสนอโดย Krisnangkura *et al.* (2007) เป็นสมการประมาณค่าความดันไอของกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์อิ่มตัวที่พัฒนาบนพื้นฐานอุณหพลศาสตร์ อย่างไรก็ตามในธรรมชาติของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ประกอบไปด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวทำให้สมการของ Krisnangkura *et al.* (2007) ไม่ครอบคลุมถึงการประมาณความดันไอของไบโอดีเซล ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจพัฒนาสมการประมาณความดันไอให้ครอบคลุมถึงผลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวในองค์ประกอบของไบโอดีเซลที่ส่งผลกับความดันไอของไบโอดีเซล

ทฤษฎี

1. ความดันไอของกรดไขมันอิ่มตัว (Fatty Acid Methyl Ester; FAMEs) (Krisnangkura *et al.*, 2007)

จากสารผสมที่มีโครงสร้างโมเลกุล CH3 (-CH2)z-1-X, (Martin *et al.*, 1950; Phankosol *et al.*, 2014) ได้แบ่งกลุ่มโมเลกุลที่แตกต่างกันออกเป็น X, CH2, CH3 พลังงานอิสระเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายเป็นแก๊ส (Free energy of transfer from solution to gas; ΔG) ของผลรวมพลังงานของแต่ละกลุ่มและพลังงานจากโครงสร้างของแต่ละกลุ่มที่เข้ามากระทำ ดังสมการ (3)

$$\Delta G = \Delta G_f + \Delta G_1 + \Delta G_2 \ldots + \Delta G_z \qquad (3)$$

$\Delta G_1 \ldots \Delta G_z$ เป็นพลังงานอิสระของกลุ่มเมทิลีนและเมทิลซึ่งไม่มีความแตกต่างกันมากนักจึงสามารถรวมกันเป็น δG จากสมการ (3) ยุบสมการให้อยู่ในรูปสมการ (4)

$$\Delta G = \Delta G_f + z\delta G \qquad (4)$$

โดยที่ ΔG_f คือ พลังงานอิสระของการกลายเป็นไอของสารสมมติที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นศูนย์ δG คือ พลังงานอิสระของการกลายเป็นไอที่เปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งหน่วยคาร์บอนอะตอม Z คือจำนวนคาร์บอนอะตอมของสาร

สมการของมาร์ตินสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดีกับปรากฏการณ์ของสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น ความหนืดความดันไอแรงตึงผิวของ FAME และไบโอดีเซล เป็นต้น (Krisnangkura *et al.*, 2001; Phankosol *et al.*, 2014) ขยายพลังงานควบรวมจากสมการของมาร์ตินมาใช้ในการหาความดันไอของ FAME และไบโอดีเซลในรูปของพลังงานของการกลายเป็นไอ (ΔG; Free energy of vaporization) ดังนั้นสมการที่ (4) ขยายความสัมพันธ์ ΔG ด้วยเอนทัลปี (H) และเอนโทรปี (S) และนำไปแทนในสมการที่ (1) จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ (5) ซึ่ง

$$\ln P = \ln A + \frac{\Delta S_f}{R} + \frac{-\Delta H_f}{RT} + \frac{-z\delta H}{RT} + \frac{z\delta S}{R} \qquad (5)$$

สมการที่ (5) เมื่อจัดกลุ่มใหม่จะได้ดังสมการที่ (6)

$$\ln P = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} \qquad (6)$$

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

ดังนั้นสมการ (6) สามารถใช้ในประมาณค่าหาค่าความดันไดของกรดไขมันอิ่มตัวเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

2. ความดันไอของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Fatty Acid Methyl Ester; FAMEs)

Phankosol *et al.* (2014) อธิบายถึงพลังงานควบรวมอิสระของ FAME ไม่อิ่มตัวจากพลังงานควบรวมอิสระของพันธะคู่ (ΔG_{nd}) คือพลังงานอิสระของความดันไอที่แตกต่างระหว่างพลังงานอิสระของการกลายเป็นไอของ FAME ชนิดไม่อิ่มตัว (ΔG_{unsat}) กับพลังงานควบรวมอิสระของการกลายเป็นไอของ FAME ชนิดอิ่มตัว (ΔG_{sat}) ซึ่งผลของพลังงานควบรวมอิสระของพันธะคู่ที่อยู่ในสายโซ่อะตอมคาร์บอนสามารถแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (7-9)

$$\Delta G_{unsat} - \Delta G_{sat} = n_d \Delta G_{db} \qquad (7)$$

ดังนั้น

$$\Delta G_{unsat} = \Delta G_{sat} + n_d \Delta G_{db} \qquad (8)$$

และ

$$\Delta G = \Delta G_f + z\delta G + n_d \Delta G_{db} \qquad (9)$$

เมื่อ n_d คือจำนวนพันธะคู่

ขยายสมการที่ (9) ด้วยด้วยเอนทัลปี (H) และเอนโทรปี (S) แทนในสมการที่ (1) และจัดรูปได้ดังสมการที่ (10)

$$\ln P = a + bz + \frac{c}{T} + \frac{dz}{T} + en_d + \frac{fn_d}{T} \qquad (10)$$

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

สมการที่ (10) เป็นสมการที่ใช้คำนวณความดันไอของ FAME ชนิดไม่อิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ในกรณีที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุลสมการจะลดรูปเป็นสมการที่ (6)

3. ความดันไอของไบโอดีเซล

Phankosol *et al.* (2014) กล่าวถึงพลังงานอิสระของการไหลของไบโอดีเซล ($\Delta G_{Biodiesel}$) คือผลรวมของพลังงานอิสระย่อยของ ΔG_{FAME} ในองค์ประกอบที่ผสมกันอยู่ในไบโอดีเซลโดยใช้สมการที่ (11)

$$\Delta G_{biodiesel} = \sum_{i-1}^{N} y_i \Delta G_i \qquad (11)$$

เมื่อแทนสมการที่ (11) ในสมการที่ (1) จะสามารถประมาณความดันไอของไบโอดีเซลได้ นอกจากนี้ความดันไอของไบโอดีเซลสามารถประมาณค่าได้จากสมการ (10) โดยใช้ค่า z_{ave} และ $n_{d(ave)}$ เป็นค่าเฉลี่ยของ FAMEs ในไบโอดีเซลแสดงได้ดังสมการ (12)

$$\ln P = a + bz_{ave} + \frac{c}{T} + \frac{dz_{ave}}{T} + en_{d(ave)} + \frac{fn_{d(ave)}}{T} \qquad (12)$$

เมื่อ

$$z_{ave} = \frac{\sum_{I=1}^{N} y_i z_i}{\sum_{I=1}^{N} y_i} \qquad (13)$$

$$n_{d(ave)} = \frac{\sum_{I=1}^{N} y_i n_{d(i)}}{\sum_{I=1}^{N} y_i} \qquad (14)$$

เมื่อ y_i, z_i และ $n_{d(i)}$ คือปริมาณส่วนประกอบของจำนวนคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่ของกรดไขมัน

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ข้อมูลความดันไอของไบโอดีเซล

ค่าความดันไอของไบโอดีเซลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ผลการทดลองของ Freitas *et al.* (2012) โดยใช้ Ebulliometer

2. ค่าคงที่ของสมการเชิงตัวเลข จากสมการ (12)

การหาค่าของสมการที่ (12) ทั้ง 6 ค่า (a, b, c, d, e และ f) ใช้วิธีเดียวกับ Phankosol *et al.* (2014) โดยการแก้สมการเชิงเส้นหลายตัวแปรตาม

3. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (AAD (%)) ได้จากการคำนวณตามสมการ (15)

$$AAD(\%) = \sum_{I=1}^{N} \left| \frac{|P_{exp} - P_{cal}|}{P_{exp}} x100 \right| / N \qquad (15)$$

โดยที่ exp คือค่าจากผลการทดลองที่มีนำเสนอ *cal* คือค่าที่ได้จากการคำนวณ และ N คือค่าจำนวนของจุดข้อมูล

ค่าพิสัย (Range)

$$\text{Range} = P_{\exp} - P_{cal} \quad (16)$$

ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error: σx)

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / N \quad (17)$$

เมื่อ σ และ N คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และจำนวนข้อมูลตามลำดับ

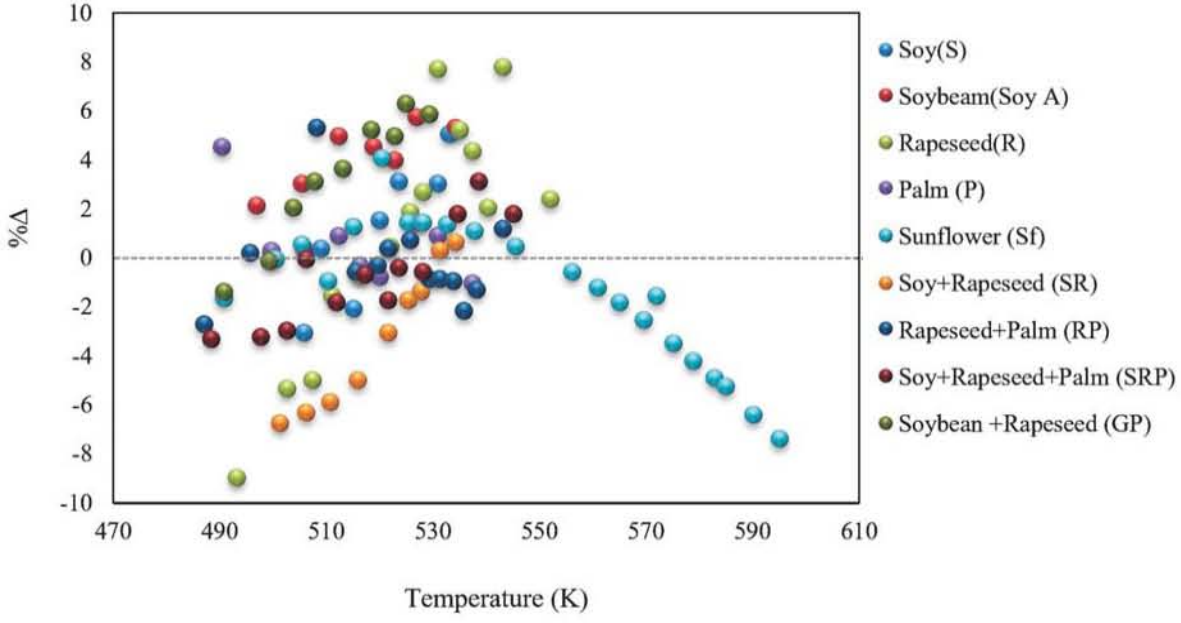
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการหาค่าคงที่ของสมการที่ (12) ได้ค่าคงที่ a, b c, d, e และ f เท่ากับ 58.027, -1.8066, -21690, 726.88, -0.51 และ 225 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (12) ได้ดังสมการที่ (18)

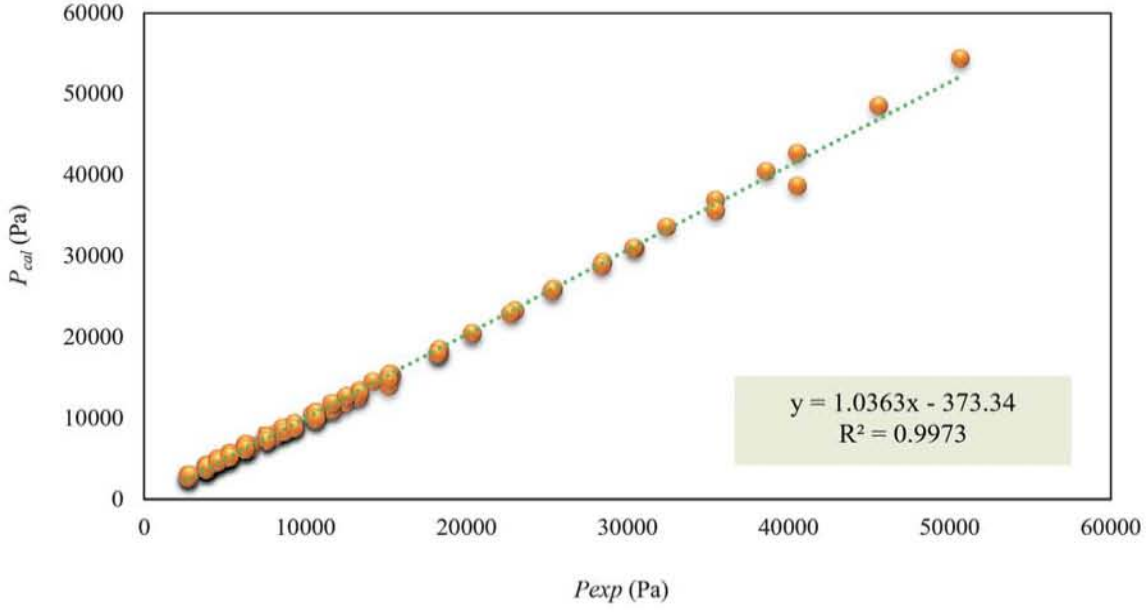
$$\ln P = 58.027 - 1.8066 z_{ave} - \frac{21690}{T} + \frac{726.88 z_{ave}}{T} - 0.51 n_{d(ave)} + \frac{225 n_{d(ave)}}{\mathrm{T}} \quad (18)$$

นำสมการที่ (18) ประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซล 10 ชนิดเทียบกับผลการทดลองของ Freitas *et al.* (2012) ที่ช่วงอุณหภูมิ 213-232 องศาเซลเซียส พบว่าสมการที่นำเสนอมีความแม่นยำสูงโดยค่า AAD ของไบโอดีเซลแต่ละชนิดอยู่ในช่วง 1.17– 4.20% ค่า AAD ของไบโอดีเซลทั้ง 10 ชนิดเท่ากับ 2.41% ซึ่งมีความแม่นยำกว่าสมการที่นำเสนอโดย Yuan *et al.* (2005) คือร้อยละ 3.4 Ceriani *et al.* (2004) คือร้อยละ 9.9 และ Wang *et al.* (2015) คือร้อยละ 5.5 และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของไบโอดีเซลทั้ง 10 ชนิดแสดงในรูปที่ (1)

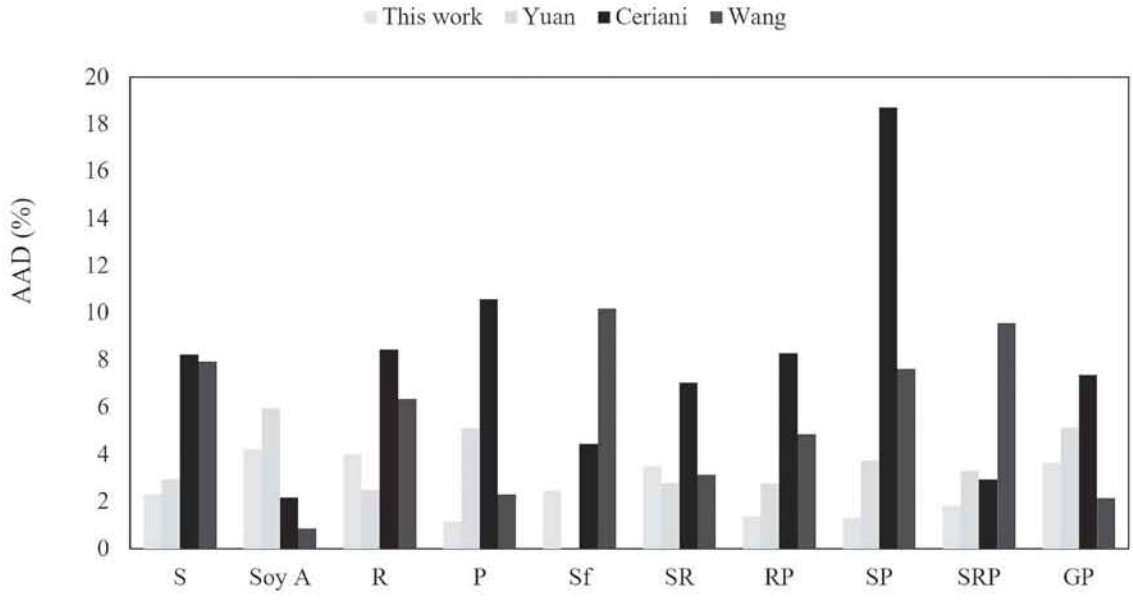
จากการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของไบโอดีเซลจากการทดลองกับค่าจากสมการที่ (18) ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าค่าจุดตัดแกนความชัน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เท่ากับ -373.34, 10363, 0.997 และ 0.038 ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Δ) ความดันไอของไบโอดีเซลของสมการที่ (18) กับการทดลองของ Freitas *et al.* (2012) อุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ความดันของไบโอดีเซลจากการทดลองของ Freitas *et al.* (2012) กับค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ (18)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ความดันของไบโอดีเซลจากการทดลองของ Freitas *et al.* (2012) กับค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ (20) Yuan *et al.* (2005) Ceriani *et al.* (2004) และ Wang *et al.* (2015)

สรุป

การโยงความสัมพันธ์ความดันไอจากโครงสร้างทางเคมีหรือส่วนประกอบทางเคมีกับพลังงานควบรวมอิสระของการกลายเป็นไอ เพื่อสร้างสมการประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ค่า z_{ave} และ $n_{d(ave)}$ และตามสมการที่ (18) จากการเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่ามีความแม่นยำสูงโดยมีค่า AAD เท่ากับร้อยละ 2.41 การใช้ประมาณค่าความดันไอของไบโอดีเซลอาจเกิดความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อใช้นอกช่วงอุณหภูมิที่นำเสนอ (486.15 ถึง 595.24 เคลวิน) สมการที่นำเสนอเป็นประโยชน์สำหรับการประยุตก์ใช้ศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆ ที่คล้ายคลึงกัน

เอกสารอ้างอิง

Aad, C. G. van Genderen., J. Cees, van Miltenburg., Jacobus, G. Blok., Mark, J. van Bommel., Paul, J. van Ekeren., Gerrit, J. K. van den Berg., & Harry, A. J. Oonk. (2002). Liquid–vapourequilibria of The methyl esters of alkanoic acids: vapour pressures as a function of temperature and standard thermodynamic function changes. **Fluid Phase Equilibria**, 202(1), 109-120.

Authur Rose & Walter R. Supina. (1961). Vapor Pressure and Vapor-Liquid Equilibrium Data for Methyl Esters of the Common Saturated Normal Fatty Acids. **Department of Chemical Engineering**, 6(2), 173-179.

Lomsugarit, S. D., Katsuwon, J., Jeyashoke, N., & Krisnangkura, K. (2001). An Empirical Approach for Estimating the Equivalent Chain Length of Fatty Acid Methyl Esters in Multistep Temperature-Programmed Gas Chromatography. **Journal of Chroma tographic Science**, 39(11), 468-472.

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

Roberta, C., & Antonio, J. A. M. (2004). Predicting vapor-liquid equilibria of fatty systems. **Fluid Phase Equilibria**, 215(2), 227–236.

Samuel, V. D. F., Mariana, B. O., Alvaro, S. L., & Joao, A. P. C. (2012). Measurement and Prediction of Biodiesel Volatility. **Energy & Fuels**, 26(5), 3048-3053.

Srisaipet, A., Aryusuk, K., Lilitchan, S., & Krisnangkura, K. (2007). The Relationship between Vapour Pressure, Vaporization Enthalpy, and Enthalpy of Transfer from Solution to Gas: An Extension of the Martin Equation. **The Journal of Chemical Thermodynamics**, 39(7), 1077-1084.

S. Phankosol, K. Sudaprasret, S. Lilitchan, Aryusuk, K., & Krisnangkura, K. (2014). Estimation of Density of Biodiesel. **Energy & Fuel**, 28(7), 4633-4641.

Tian-YouWang, Xiang-ZanMeng, Ming, Jia., & Xiao-Chao, Song. (2015). Predicting the vapor pressure of fatty acid esters in biodiesel by group contribution method. **Fuel Processing**, 131, 223-229.

Troy, A., Scott, J. R., Duncan, M., & Eugene, H. M. Vapor Pressure and Distillation of Methyl Esters of Some Fatty Acid. **Industrial and engineering chemistry**, 44(1), 172-175.

W. Yuan., A. C. Hansen., & Q. Zhang. (2005). Vapor pressure and normal boiling point predictions for Pure methyl esters and Biodiesel fuels. **Fuel**, 84(7-8), 943–950.