วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ.
UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

วิธีพลังงานอิสระควบรวมสำหรับประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับองค์ประกอบทางเคมี

Free Energy Additivity Method for Prediction Dynamics Viscosity of Vegetable Oils at Various Temperatures to its Chemical Composition

สุริยา พันธ์โกศล[1]* ติณณภพ จุ่มอิ่น[2] คณิต กฤษณังกูร[3]

[1] คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

[2] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

[3] คณะทรัพยากรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (วิทยาเขตบางขุนเทียน)

Suriya Phankosol[1]* Thinnaphop Chum-in[2] Kanit Krisnangkura[3]

[1] Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

[2] Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

[3] School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi (Bangkhuntien)

* Corresponding author.

1061 ถนนอิสรภาพ 15 แขวงหิรัญรูจี เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10600

E-mail: s.phankosol@gmail.com; Telephone: 08 5777 7301

บทคัดย่อ

น้ำมันพืชเป็นแหล่งไขมันที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นแหล่งอาหารประจำวันของเรา ความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการออกแบบกระบวนการทางเทคโนโลยีขั้นสูง ในการศึกษานี้นำเสนอสมการในการประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากองค์ประกอบทางเคมีโดยการโยงความสัมพันธ์ด้วยกฎควบรวมพลังงานอิสระของมาร์ติน ในการศึกษาใช้ข้อมูลจากวรรณกรรมเพื่อสนับสนุน และยืนยันความถูกต้องแม่นยำ จากการศึกษาพบว่าสมการที่นำเสนอง่าย และมีความถูกต้องแม่นยำในการใช้งานประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อเทียบกับข้อมูลจากวรรณกรรม โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยของน้ำมันพืช 144 ข้อมูลในช่วงอุณหภูมิ 283.15–413.15 K เท่ากับร้อยละ 7.57 ค่าความหนืดไดนามิกส์นอกช่วงอุณหภูมิที่นำเสนออาจประมาณได้ด้วยสมการความสัมพันธ์แต่ความแม่นยำอาจต่ำลง

คำสำคัญ

กฎควบรวมพลังงานอิสระ ความหนืดไดนามิกส์ การคาดการณ์ น้ำมันพืช

Abstract

Vegetable oil is an important and widely used lipid source for our everyday food products. Dynamics viscosity of vegetable oil is a very important factor to design an advanced technological process. In this work, proposed equation for predicting dynamics viscosities of vegetable oils at various temperatures to its chemical composition are correlated to the Martin's rule of free energy additivity. Data available in literatures are used to validate and support the proposed equations. The proposed correlation is easy to use and the predicted dynamics viscosity values of vegetable oils at different temperatures agree well with the literature values. The estimated dynamics viscosity values of vegetable oils are in good agreement with those 144 data reported in the literature within a temperature range of 283.15–413.15 K, the

average absolute deviation is 7.57%. The dynamics viscosity value outside of this temperature range may be possibly predicted by the correlation but the accuracy may be lower

Keywords

free energy additivity; dynamics viscosity; prediction; vegetable oil

1. บทนำ

น้ำมันพืชเป็นแหล่งอาหารและพลังงานในปัจจุบัน องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชคือไตรกลีเซอไรด์ซึ่งโครงสร้างโมเลกุล แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือกลีเซอรอล และกรดไขมัน 3 โมเลกุล น้ำมันพืชจากแหล่งที่มาต่างกัน อาทิเช่น ชนิดพืช บริเวณการเพาะปลูก และการเก็บรักษา อาจมีองค์ประกอบของกรดไขมันแตกต่างกันซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีแตกต่างกันไปด้วย ความหนืดไดนามิกส์เป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของของเหลวที่ใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบระบบ กระบวนการ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่นระบบท่อ ระบบปั๊ม และถังปฏิกรณ์ เป็นต้น การทดลองวิเคราะห์ความหนืดไดนามิกส์มีมากมายหลายวิธีซึ่งค่าที่ได้ก็จะมีความคลาดเคลื่อนกันไปตามระดับความแม่นยำของเครื่องมือ แต่เมื่อต้องการทราบความหนืดไดนามิกส์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จำเป็นต้องทำการทดลองทำให้เสียเวลาและทรัพยากร ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืช และของเหลวอื่น ๆ ดังนี้

สมการความสัมพันธ์ความหนืดไดนามิกส์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กับพลังงานอิสระ[1] แสดงในสมการที่ (1) ถูกใช้ในการประมาณความหนืดไดนามิกส์ของของเหลวต่าง ๆ รวมถึงน้ำมันพืช ซึ่งตรงกับสมการที่นำเสนอโดย Andrade [2] อย่างไรก็ตามสมการที่ (1) จำเป็นต้องหาค่าคงที่ใหม่เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของน้ำมัน เพราะค่าคงที่เปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบทางเคมี

$$\eta = A_0 \exp\left(\frac{B_0}{T}\right) \tag{1}$$

เมื่อ η คือความหนืดไดนามิกส์ (mPa·s)

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

A_0 คือค่าคงที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมี

B_0 คือค่าคงที่ของอัตราส่วนของพลังงานอิสระ (ΔG) ต่อค่าคงที่ของแก๊ส (R)

สมการที่ (1) ถูกนำมาพัฒนารูปแบบเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการใช้อีกหลายรูปแบบอาทิเช่น สมการที่ (2) และ (3) ที่นำเสนอโดย Azian และคณะ [3] และ Reid และคณะ [4] ตามลำดับ

$$\ln\eta = A_1 + \frac{B_1}{T} + \frac{C_1}{T^2} \tag{2}$$

$$\ln\eta = A_2 + \frac{B_2}{C_2 + T} \tag{3}$$

เมื่อ A_1 B_1 และ C_1 คือค่าคงที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมี

A_2 B_2 และ C_2 คือค่าคงที่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมี

Dutt และ Prasad [5] ได้พัฒนาสมการที่ (3) สำหรับประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืช โดยโยงความสัมพันธ์ค่าคงที่กับค่าสะปอนนิฟิเคชัน และค่าไอโอดีนซึ่งค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุล และระดับความไม่อิ่มตัวทั้งยังมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพโดยตรง

$$\log\eta = \left(-1.4 + 1.25\left(\frac{IV}{SN}\right)\right) + \frac{\left[500 - 375\left(\frac{IV}{SN}\right)\right]}{\left[(t+140) - 85\left(\frac{IV}{SN}\right)\right]} \tag{4}$$

เมื่อ t คืออุณหภูมิ (°C)

SN คือค่าสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification Number)

IV คือค่าไอโอดีน (Iodine Value)

Toro-Vazquez และ Infante-Guerrero [6] เสนอสมการในการประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากค่า SN และ IV อย่างไรก็ตาม Abramovic และ Klofutar [7] ได้เปรียบเทียบสมการที่ (5) กับการทดลองพบว่ามีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์มากกว่าร้อยละ 50

$$\log\eta = -4.7965 + 2525.92962\frac{1}{T} + \frac{1.6144(SN)^2}{T^2} - 101.06\times10^{-7}(IV)^2 \tag{5}$$

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีเพียงสมการที่ (4) ที่นำเสนอโดย Dutt และ Prasad [5] ที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานจริง เพราะมีองค์ประกอบตามเงื่อนไขของสมการที่ดีตามที่ Halvoson และคณะ [8] ได้เสนอคือต้องมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุล ระดับความไม่อิ่มตัว และเปลี่ยนตามอุณหภูมิ แต่อย่างไรก็ตามค่าคงที่ต่าง ๆ ในสมการไม่สามารถอธิบาย หรือเชื่อมโยงกับโครงสร้างโมเลกุลได้อย่างแท้จริง ดังนั้นในการศึกษานี้สนใจศึกษาความสัมพันธ์ของความหนืดไดนามิกส์กับพลังงานอิสระตามความสัมพันธ์สมการที่ (1) โดยโยงความสัมพันธ์กับโครงสร้างโมเลกุลผ่านกฎควบรวมพลังงานอิสระของ Martin [9]

2. ทฤษฎี

น้ำมันพืชมีองค์ประกอบหลักคือไตรกลีเซอไรด์ เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride ; TG) ซึ่งประกอบด้วย กลีเซอรอล (Glycerol) และกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุลกับพลังงานอิสระควบรวม ดังแสดงในรูปที่ 1

โครงสร้างโมเลกุลของ TG ประกอบด้วย $CH_3-(CH_2)_{z-1}-f$ ซึ่ง Martin [9] ได้แบ่งกลุ่มโครงสร้างในโมเลกุลที่แตกต่างออกเป็น f, CH_2 และ CH_3 เพื่อใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระควบรวมของการเปลี่ยนสภาพจากสารละลายเป็นแก๊สของสารในอนุกรมเดียวกันของสารสมมติดังสมการที่ (6)

$$\Delta G = \Delta G_f + \Delta G_1 + \Delta G_2 ... + \Delta G_z \qquad (6)$$

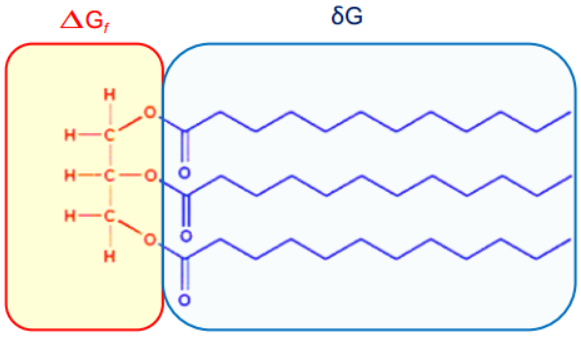
เมื่อ $\Delta G_1 ... \Delta G_z$ คือพลังงานอิสระควบรวมของกลุ่มเมทิลีน (Methylene) และเมทิล (Methyl) ซึ่งเป็นกลุ่มมีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นสามารถทำการเฉลี่ยให้อยู่ในรูป ΔG สมการที่ (6) ลดรูปลงได้ดังสมการที่ (7)

$$\Delta G = \Delta G_f + 3(z\delta G) \qquad (7)$$

เมื่อ ΔG_f คือพลังงานอิสระควบรวมของสารสมมติที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับศูนย์ หรือเรียกสั้น ๆ ว่าพลังงานอิสระควบรวมที่เกิดจากกลุ่มฟังก์ชัน

δG คือพลังงานอิสระควบรวมของการเปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งคาร์บอนอะตอม

z คือจำนวนอะตอมคาร์บอนในสายไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์กับพลังงานอิสระควบรวม [10]

สำหรับโมเลกุลที่มีพันธะคู่ (Double bond(s); n_d) Sansa-ad และคณะ [11] เสนอผลของพันธะคู่กับพลังงานอิสระควบรวมของพันธะคู่ (ΔG_{db}) โดยขยายความสัมพันธ์สมการที่ (7) ได้ดังสมการที่ (8)

$$\Delta G = \Delta G_f + 3(z\delta G + n_d \Delta G_{db}) \qquad (8)$$

ขยายสมการที่ (8) ด้วยเอนทัลปี (H) และเอนโทรปี (S) แทนในสมการที่ (1) และจัดรูปได้ดังสมการที่ (9)

$$\ln \eta = (a + bz + cn_d) + (d + ez + fn_d)\frac{1}{T} \qquad (9)$$

เมื่อ $a = \ln A_0 + \frac{\Delta S_f}{R}, b = \frac{3\delta S}{R}, c = \frac{3\Delta S_{db}}{R}$

$d = -\frac{\Delta H_f}{R}, e = -\frac{3\delta H}{R}$ และ $f = -\frac{3\Delta H_{db}}{R}$

ΔH_f คือเอนทัลปีของกลุ่มฟังก์ชัน

ΔS_f คือเอนโทรปีของกลุ่มฟังก์ชัน

ΔH_{db} คือเอนทัลปีของพันธะคู่

ΔS_{db} คือเอนโทรปีของพันธะคู่

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการศึกษานี้ใช้ผลการทดลองของ Bernat Esteban และคณะ [12], Quinchia และคณะ [13] และ Ceriani และคณะ [14] โดยที่ Bernat Esteban และคณะ [12] วัดความหนืดไคเนมาติกส์ด้วย Cannon-Fenske-type gravity flow viscometers และทำการแปลงให้อยู่ในรูปความหนืดไดนามิกส์ด้วยการคูณความหนาแน่นในงานเดียวกันที่ได้

นำเสนอ สำหรับ Quinchia และคณะ [13] และ Ceriani และคณะ [14] วัดความหนืดไดนามิกส์ด้วยเครื่อง Rotational controlled strain rheometer รุ่น ARES (Rheometric Scientific, UK) และ Automatic viscosimeter AMV 200 (Anton Paar) ตามลำดับ

3.1 การหาค่าเฉลี่ยจำนวนอะตอมคาร์บอน (Z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่ ($n_{d,ave}$)

ในการศึกษาองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืช ถ้าพิจารณาในรูปของจำนวนอะตอมคาร์บอนของกรดไขมันเฉลี่ย (Z_{ave}) และจำนวนพันธะคู่เฉลี่ย ($n_{d,ave}$) โดยแทนค่าสมการที่ (10) และ (11) Phankosol และคณะ [15] ในสมการที่ (9) จะได้สมการที่ (12)

$$Z_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i z_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \tag{10}$$

$$n_{d,ave} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i n_{d,i}}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \tag{11}$$

$$\ln \eta = \left(a + bz_{ave} + cn_{d,ave}\right) + \left(d + ez_{ave} + fn_{d,ave}\right)\frac{1}{T} \tag{12}$$

เมื่อ x_i คือสัดส่วนโดยโมลหรือมวลของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช

z_i คือจำนวนอะตอมคาร์บอนของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช

$n_{d,i}$ คือจำนวนพันธะคู่ของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช

z_{ave} คือจำนวนอะตอมคาร์บอนของกรดไขมันเฉลี่ยที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช

$n_{d,ave}$ คือจำนวนพันธะคู่ของกรดไขมันเฉลี่ยที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันพืช

$a, b, c...$ คือค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์

3.2 การหาค่าคงที่ในสมการที่ (12)

ค่าคงที่ในสมการที่ (12) หาด้วยวิธีถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปรตามวิธี Phankosol และคณะ [15] เมื่อแทนค่าคงที่ในสมการที่ (12) ได้สมการประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืช ดังสมการที่ (13)

$$\ln \eta = \left(-5.2405 - 0.08488 z_{ave} + 0.5488 n_{d,ave}\right) + \left(1941.85 + 77.423 z_{ave} - 266.46 n_{d,ave}\right)\frac{1}{T} \tag{13}$$

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ความคลาดเคลื่อน ($\mathrm{D}(\%)$)

$$\mathrm{D}(\%) = 100 \times \frac{\eta_{\exp} - \eta_{\mathrm{cal}}}{\eta_{\exp}} \tag{14}$$

โดยที่ $\eta_{\exp}$ และ η_{cal} คือความหนืดไดนามิกส์จากการทดลองและความหนืดไดนามิกส์จากการประมาณ ตามลำดับ

ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ ($\mathrm{AD}(\%)$)

$$\mathrm{AD}(\%) = 100 \times \left|\frac{\eta_{\exp} - \eta_{\mathrm{cal}}}{\eta_{\exp}}\right| \tag{15}$$

ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย ($\mathrm{AAD}(\%)$)

$$\mathrm{AAD}(\%) = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{\eta_{\exp} - \eta_{\mathrm{cal}}}{\eta_{\exp}}\right| \tag{16}$$

ค่าเอนเอียง ($\mathrm{Bias}(\%)$)

$$\mathrm{Bias}(\%) = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\eta_{\exp} - \eta_{\mathrm{cal}}}{\eta_{\exp}}\right] \tag{17}$$

ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error: $\sigma_{\bar{x}}$)

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{N} \tag{18}$$

เมื่อ σ และ N คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และจำนวนข้อมูล ตามลำดับ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$R^2 = \left[\frac{N\sum_{i=1}^{N}\eta_{\exp}\eta_{cal} - \left(\sum_{i=1}^{N}\eta_{\exp}\right)\left(\sum_{i=1}^{M}\eta_{cal}\right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{M}\eta_{\exp}^2 - \left(\sum_{i=1}^{N}\eta_{\exp}\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{N}\eta_{cal}^2 - \left(\sum_{i=1}^{N}\eta_{cal}\right)^2\right]}}\right]^2 \tag{19}$$

4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการศึกษานี้ได้รวบรวมองค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ และค่า และ จากสมการที่ (11) และ (12) ไว้ในตารางที่ 1 พบว่าช่วงของค่า และ มีค่าเท่ากับ 17.04–

ตารางที่ 1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ (ร้อยละโดยมวล)

Oils	Ref.	N_{exp} [a]	Temperature (K)	C16[b]:0[c]	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	Other	MW	Z_{ave}	$n_{d,ave}$
Rapeseed	[12]	14	283.15 - 413.15	4.70	0.30	1.30	65.3	19.2	8.30	1.10	883.9	17.92	1.30
Sunflower		14		6.70	0.30	2.90	38.7	51.3	0.10	0.20	880.5	17.86	1.42
Soybean		14		11.20	0.20	2.90	25.2	55.4	5.00	0.20	876.0	17.77	1.51
Palm		14		45.60	0.40	3.80	38.5	10.5	0.10	1.00	849.4	17.04	0.60
Corn		14		11.40	0.30	1.70	32.8	53.3	0.50	0.20	876.3	17.76	1.41
Grape seed		14		7.20	0.10	3.90	20.2	68.4	0.20	0.20	879.3	17.85	1.57
High-oleic sunflower oil	[13]	7	298.15 - 393.15	3.84	0.00	4.42	83.66	8.08	0.00	0.00	886.0	17.92	1.00
Sunflower oil		7		6.18	0.00	3.41	25.6	64.8	0.00	0.00	880.5	17.88	1.55
Soybean oil		7		11.28	0.00	2.70	24.39	56.28	5.34	0.00	876.1	17.77	1.53
Brazil nut	[14]	6	293.15 - 343.15	15.92	0.35	10.37	37.75	34.93	0.05	0.64	874.6	17.68	1.08
Buriti		6		16.63	0.41	1.21	78.69	1.40	1.25	0.41	875.0	17.66	0.86
Grape seed		6		6.80	0.14	3.23	20.31	68.89	0.21	0.42	879.9	17.87	1.59
Macadamia nut oil	[16]	6		9.38	19.28	3.40	59.76	2.03	0.14	6.02	866.3	17.49	0.86
1to1[d]	[14]	6		14.07	0.25	2.10	50.65	28.85	3.55	0.54	875.6	17.72	1.19
1to2		6		13.23	0.19	2.40	41.38	37.94	4.31	0.55	875.8	17.74	1.31
1to3		6		12.81	0.16	2.54	36.74	42.46	4.69	0.60	875.9	17.75	1.36

a จำนวนข้อมูลการทดลอง
b จำนวนอะตอมคาร์บอน
c จำนวนพันธะคู่
d สัดส่วนโดยปริมาตรของ Buriti oil ต่อ Soybean oil

17.92 และ 0.60–1.59 ตามลำดับ จากการประมาณความหนืดไดนามิกส์จากค่า และ ที่ช่วงอุณหภูมิ 283.15–413.15 K ด้วยสมการที่ (14) เทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีความถูกต้องแม่นยำโดย ค่า Bias(%) และค่า AAD(%) เท่ากับร้อยละ 2.03 และ 7.57 ตามลำดับ ซึ่งค่าจากการประมาณด้วยสมการที่ (13) มีความแม่นยำกว่าสมการที่ (4) และ (5) มีค่า Bias(%) เท่ากับร้อยละ 4.98 และ -34.51 ตามลำดับ และค่า AAD(%) เท่ากับร้อยละ 8.90 และ 34.51 ตามลำดับ สำหรับการกระจายตัวของค่า D(%) ของค่าที่ประมาณจากสมการที่ (13) เทียบกับผลการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2 มีการกระจายตัวของค่า D(%) ทั้งด้านบวก และลบ

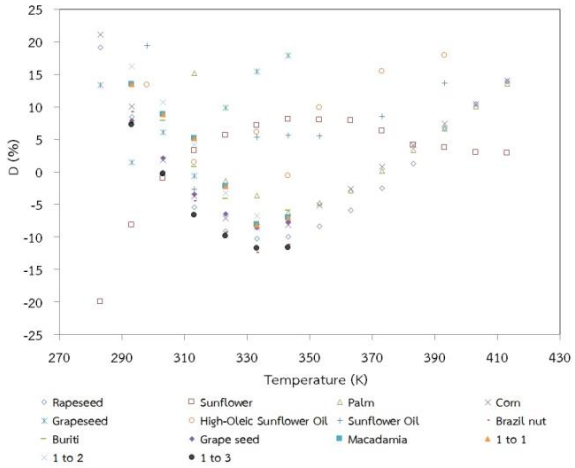
เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ จากการประมาณด้วยสมการที่ (13) กับการทดลอง ได้ดังรูปที่ 3 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงโดยมีค่า จุดตัดความชัน สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เท่ากับ 2.7089 0.837 0.9848 และ 0.094 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความชัน และค่า R^2 ที่ได้พบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากและมีความสัมพันธ์ในระดับที่สูงมาก

เพื่อพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดไดนามิกส์เทียบกับค่า และ โดยทำการอนุพันธ์สมการที่ (13) เทียบกับค่า และ ได้ดังสมการที่ (20) และ (21) ตามลำดับ

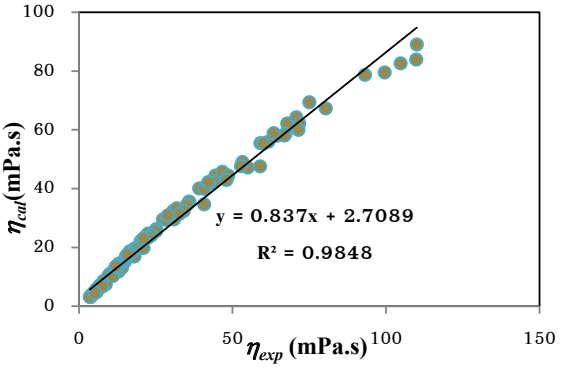
$$\left(\frac{d\ln\eta}{dz_{ave}}\right)_{n_{d,ave},T} = -0.08488 + 77.423\frac{1}{T} \qquad (20)$$

$$\left(\frac{d\ln\eta}{dn_{d,ave}}\right)_{z_{ave},T} = 0.5488 - 266.46\frac{1}{T} \qquad (21)$$

จากสมการที่ (20) พิจารณาเทียบกับ z_{ave} ที่อุณหภูมิใด ๆ พบว่าผลรวมสมการมีค่าเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าความหนืดไดนามิกส์มีการเพิ่มตามการเพิ่มขึ้นของ z_{ave} หรือขนาด



รูปที่ 2 ร้อยละความคลาดเคลื่อน $(D(\%))$ จากการประมาณความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ด้วยสมการที่ (14) เทียบกับผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 283.15-413.15 K



รูปที่ 3 ค่าความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ที่ประมาณด้วยสมการที่ (13) เทียบกับผลการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 283.15-413.15 K

โมเลกุล และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดไดนามิกส์ ($\ln\eta$) จากผลของอุณหภูมิมีค่าลดลง 77.423 K·(Carbon numbers)$^{-1}$ เมื่อพิจารณาผลของ $n_{d,ave}$ ที่อุณหภูมิใด ๆ ที่ส่งผลต่อความหนืดไดนามิกส์ตาม สมการที่ (21) พบว่าผลรวมสมการมีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ $n_{d,ave}$ จะทำให้ความหนืดไดนามิกส์มีค่าลดลง ซึ่งพฤติกรรมจากผลของ z_{ave} และ $n_{d,ave}$ สอดคล้องกับทฤษฎี และวรรณกรรมที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ [12,17,18] นอกช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาความคลาดเคลื่อนอาจเพิ่มขึ้นได้

5. สรุป

การโยงความสัมพันธ์ความหนืดไดนามิกส์ของน้ำมันพืชที่อุณหภูมิ 283.15–413.15 K จากกฎพลังงานอิสระควบรวมร่วมกับโครงสร้างโมเลกุล คือจำนวนอะตอมคาร์บอน และจำนวนพันธะคู่ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสมการความสัมพันธ์ที่นำเสนอมีความถูกต้องแม่นยำ มีความสมบูรณ์ตามเงื่อนไขสมการที่ดี และง่ายต่อการใช้ง่าย ทั้งนี้ถ้าน้ำมันพืชมีสิ่งปนเปื้อนสูงอาทิ เช่น กรดไขมันอิสระ และความชื้น เป็นต้น จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากสมการที่นำเสนอพัฒนาจากน้ำมันพืชบริสุทธิ์ การใช้งานสมการที่นำเสนอ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยาที่สนับสนุนงบประมาณวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Krisnangkura K, Yimsuwan T, Pairintra R. An Empirical Approach. in Predicting Biodiesel Viscosity at Various Temperatures. *Fuel*. 2006; 85(1): 107–113.

[2] Andrade ENDC. The viscosity of liquids. *Nature*. 1930; 125(3148): 309–310.

[3] Azian MN, Mustafa Kamal AA, Panau F, Ten WK. Viscosity Estimation of Triacylglycerols and Some Vegetable Oils, Based on Their Triacylglycerol Composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2001; 78(10): 1001–1005.

[4] Reid RC, Prausnitz JM, Poling BE. *The Properties of Gases and Liquids*. USA: McGraw-Hill; 1987.

[5] Dutt NVK, Prasad DHL. InterRelationships Among the Properties of Fatty Oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1989; 66(5): 701–703.

[6] Toro-Vazquez JF, Infante-Guerrero R. Regressional Models That Describe Oil Absolute Viscosity. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1993; 70(11): 1115–1119.

[7] Abramovic H, Klofutar C. The Temperature Dependence of Dynamic Viscosity for Some Vegetable Oil. *Acta Chimica Slovenica*. 1998; 45(1): 69–77.

[8] Halvorsen JD, Mammel WC, Clements LD. Density Estimation for Fatty Acids and Vegetable Oils Based on Their Fatty Acid Composition. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1993; 70(9): 875–880.

[9] Martin AJP. Partition Chromatography. *Annual Review of Biochemistry*. 1950; 19(1): 517–542.

[10] Phankosol S, Chum-in T, Krisnangkura K. Estimating the Surface Tension of Vegetable Oils by Law of Free Energy Additivity. *Naresuan University Journal: Science and Technology*. 2016; 24(1): 82–90.

[11] Sansa-ard C, Aryusuk K, Lilitchan S, Krisnangkura K. Free Energy Contribution to Gas Chromatographic Separation of Petroselinate and Oleate Esters. *Chromatography Research International*. 2011: 9 pages.

[12] Esteban B, Riba J-R, Baquero G, Rius A, Puig R. Temperature Dependence of Density and Viscosity of Vegetable Oils. *Biomass and Bioenergy*. 2012; 42: 164–171.

[13] Quinchia LA, Delgado MA, Valencia C, Franco JM, Gallegos C. Viscosity Modification of Different Vegetable Oils with EVA Copolymer for Lubricant Applications. *Industrial Crops and Products*. 2010; 32(3): 607–612.

[14] Ceriani R, Paiva FR, Gonçalves CB, Batista E, Meirelles AJA. Densities and Viscosities of Vegetable Oils of Nutritional Value. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2008; 53(8): 1846–1853.

[15] Phankosol S, Sudaprasert K, Lilitchan S, Aryusuk K, Krisnangkura K. Estimation of Surface Tension of Fatty Acid Methyl Ester and Biodiesel at Different Temperatures. *Fuel*. 2014; 126: 162–168.

[16] Rodrigues CEC, Silva FA, Marsaioli A. Meirelles AJ A. Deacidification of Brazil Nut and Macadamia Nut Oils by Solvent Extraction: Liquid-Liquid Equilibrium Data at 298.2 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2005; 50(2): 517–523.

[17] Kim J, Kim DN, Lee SH, Yoo S-H, Lee S. Correlation of Fatty Acid Composition of Vegetable Oils with Rheological Behaviour and Oil Uptake. *Food Chemistry*. 2010; 118(2): 398–402.

[18] Igwe IO. The Effects of Temperature on the Viscosity of Vegetable Oils in Solution. *Industrial Crops and Products*. 2004; 19(2): 185–190.