

ของไหลนอนนิวโตเนียน

สามารถ มูลอามาตย์
ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ
คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

ของไหลนอนนิวโตเนียนเป็นของไหลที่มีความหนืดไม่คงที่และไม่เป็นไปตามกฎของนิวตัน โดยค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาหรืออัตราเร็วในการเฉือน โดยทั่วไปจะเป็นของไหลที่มีค่าความหนืดสูงซึ่งเกี่ยวข้องกับการพิจารณาการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ หรือหน่วยปฏิบัติการในกระบวนการผลิตให้เหมาะสม บทความนี้เป็นการนำเสนอเพื่อให้ทราบถึงความหมาย และชนิดของของไหลนอนนิวโตเนียน รวมทั้งวิธีการหาค่าคุณสมบัติการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนพร้อมกับการแสดงตัวอย่างการคำนวณหาค่าที่จำเป็นต้องใช้ในการทวนของของไหลนอนนิวโตเนียน

Non-Newtonian Fluids

Samart Mool-Amart

Department of Biotechnology

Faculty of Technology Khon Kaen University

Abstract

Non-Newtonian fluids are those which exhibit inconstant viscosity and do not follow Newton's law, whereby their viscosity varies either with the duration or the rate of shear. The viscosity of non-Newtonian fluids is therefore, an essential property to be considered while selecting appropriate equipment or unit operation in industrial processes. This manuscript presents an overview of the definition and types of non-Newtonian fluids as well as the methods for studying flow properties of such fluids. An example of the calculation of agitation power required for non-Newtonian fluids are illustrated

บทนำ

ความหนืด เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่มีผลต่อลักษณะการไหล (flow behaviour) ของของไหล ความรู้เกี่ยวกับลักษณะการไหลของไหลแต่ละชนิดเป็นสิ่งสำคัญโดยตรงต่อกระบวนการการผลิตต่างๆ เช่น การปั๊ม การไหลในท่อ การกวน (agitation) การให้อากาศ (aeration) การถ่ายเทโมเมนตัม มวล และความร้อน เป็นต้น

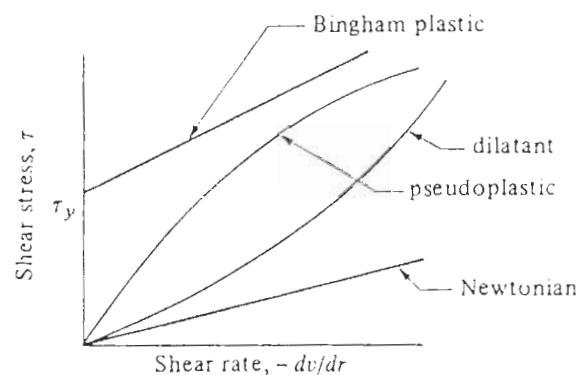
ของไหลนอนนิวโตเนียนเป็นของไหลที่มีความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาหรืออัตราการเฉือน (shear rate) ซึ่งแตกต่างไปจากของไหลนิวโตเนียนที่ความหนืดจะมีค่าคงที่ การศึกษาคุณสมบัติการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนรวมไปถึงกระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องจึงมีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าของไหลนิวโตเนียนในบทความนี้จะกล่าวถึงความหมายและชนิดของของไหลนอนนิวโตเนียน การหาคุณสมบัติของการไหลและการหาค่ากำลังในการกวนของของไหลนอนนิวโตเนียน

ชนิดของของไหลนอนนิวโตเนียน[1]

จากความหมายของของไหลนิวโตเนียนซึ่งหมายถึงของไหลที่เป็นไปตามกฎของนิวตันดังสมการที่ (1)

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดซึ่งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราการเฉือน (dv/dy) โดยที่ v คือ ความเร็ว y คือ ระยะทางที่วัดจากผิวอ้างอิงและมีทิศทางตั้งฉากกับการไหล รูปที่ 1 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือน (τ) กับอัตราการเฉือน (dv/dy) โดยที่ของไหลนิวโตเนียน คือ ของไหลที่แสดงด้วยเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิดและจะมีค่าความชันเป็น μ ตามสมการที่ (1) ของไหลใดที่ไม่เป็นไปตามสมการที่ (1) ของไหลดังกล่าวจัดอยู่ในพวกของไหลนอนนิวโตเนียนนั่นคือ กราฟระหว่าง τ และ dv/dy จะไม่เป็นเส้นตรงหรือเป็นเส้นตรงที่ไม่ผ่านจุดกำเนิด



รูปที่ 1 ไดอะแกรมค่าแรงเฉือนสำหรับของไหลนิวโตเนียนและของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดที่ไม่ขึ้นกับเวลา

ของไหลนอนนิวโตเนียนถูกจำแนกออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติของค่าแรงเฉือนและอัตราการเฉือนกล่าวคือ พวกแรกเป็นของไหลที่มีค่าแรงเฉือนไม่ขึ้นกับระยะเวลาซึ่งเรียกว่า time independent fluids อีกพวกเป็นของไหลที่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาเรียกว่า time dependent fluids นอกเหนือจากคุณสมบัติของค่าแรงเฉือนที่ผิดไปจากของไหลนิวโตเนียนแล้ว ยังมีของไหลนอนนิวโตเนียนอีกบางจำพวกที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ (elastic behaviour) คุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับเวลาด้วย เรียกของไหลพวกนี้ว่า viscoelastic fluids แต่โดยส่วนใหญ่แล้วเมื่อพูดถึง

ของไหลนอนนิวโตเนียนมักจะหมายถึงพวกของไหลที่มีค่าแรงเฉือนไม่ขึ้นกับระยะเวลา ซึ่งพบมากที่สุด ในจำนวนของไหลทั้งหมด

ของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา

Bingham plastic fluids ของไหลจำพวกนี้จะมีรูปแบบที่ง่ายที่สุดดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับของไหลนิวโตเนียนแต่ไม่ผ่านจุดกำเนิดเท่านั้น ค่าแรงเฉือนที่จุดตัดเรียกว่า ความเค้นเฉือนคราก (yield shear stress) สัญลักษณ์ τ_y มีหน่วย N/m^2 ของไหลจะต้องได้รับแรงเท่ากับ τ_y ถึงจะเริ่มไหลได้ ตัวอย่างของไหลจำพวกนี้ได้แก่ โคลนตม ถั่วข้น (peat slurry) นำผลไม้ข้น หรืออาหารที่ทำจากไขมันสัตว์ (margarine) ชอคโกเลต สบู่ ยาสีฟัน เยื่อกระดาษ (paper pulp) และตะกอนน้ำเสีย (sewage sludge) เป็นต้น

Pseudoplastic fluids ของไหลนอนนิวโตเนียนส่วนใหญ่จัดอยู่ในจำพวกนี้ เส้นกราฟลักษณะการไหลแสดงอยู่ในรูปที่ 1 โดยเส้นกราฟแสดงได้ด้วยสมการของ Ostwald-de Waele ซึ่งเป็นสมการกฎยกกำลัง (power law equation) ดังแสดงในสมการที่ (2) คือ

$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (n < 1) \quad (2)$$

เมื่อ K คือ ค่า consistency index หน่วย $\text{N.s}^n/\text{m}^2$ หรือ $\text{lb.s}^n/\text{ft}^2$ และ n คือ flow behaviour index ซึ่งเป็นตัวเลขไร้มิติ หน่วย ของไหลพวกนี้จะมีค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) ลดลงตามค่าอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างได้แก่ สารละลายยาง กาว สารละลายโพลิเมอร์ ไขมันบางชนิด น้ำแป้ง เซลลูโลสอะซีเตท มายองเนส (mayonnaise) สบู่ สเลอรีของผงซักฟอก เยื่อกระดาษ สี และ ของไหลชีวภาพ (biological fluids) เป็นต้น

Dilatant fluids ของไหลพวกนี้มีคุณสมบัติต่างจากพวก pseudoplastic เพียงเล็กน้อย คุณสมบัติการไหลแสดงอยู่ในรูปที่ 1 ค่าความหนืดปรากฏจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการเฉือน สมการกฎยกกำลังสามารถนำมาใช้ได้โดยที่ค่า $n > 1$

$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (n > 1) \quad (3)$$

ถ้ากรณีที่เป็นของไหลนิวโตเนียน n จะเท่ากับ 1 ตัวอย่างของไหลนอนนิวโตเนียนพวกนี้ได้แก่ สารละลายของข้าวโพดในน้ำตาล สารละลายของแป้งในน้ำ สารละลายของโปแตสเซียมซิลิเกตในน้ำ การกระจายตัวของผงเหล็กในของเหลวที่มีความหนืดต่ำ เป็นต้น

ของไหลที่ขึ้นกับเวลา

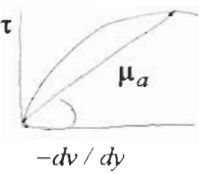
Thixotropic fluids ที่ค่าอัตราการเฉือนที่คงค่าหนึ่งของไหลจำพวกนี้จะมีค่าแรงเฉือนลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จนกระทั่งแรงเฉือนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง (limiting value) ซึ่งจะเท่ากับค่าได้นั้นขึ้นอยู่กับค่าอัตราการเฉือน ตัวอย่างได้แก่ สารละลายโพลิเมอร์บางชนิด สารทำให้กรอบ (shortening) วัสดุอาหารบางชนิด พฤติกรรมไหลของสารพวกนี้ยังไม่ได้มีการพัฒนาและเผยแพร่มากนัก

Rheopectic fluids คุณสมบัติการไหลจะตรงข้ามกับพวก thixotropic fluids โดยที่อัตราการเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง แรงเฉือนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ตัวอย่างเช่น bentonite clay suspensions, gypsum suspensions การออกแบบการไหลในท่อ (steady flow in pipe) ของสารพวกของไหลที่ขึ้นกับเวลาทั้ง 2 ชนิดนี้บางครั้งจะใช้ค่าคุณสมบัติการไหลที่ถูกกำหนด ณ สภาวะค่าอัตราการเฉือนคงที่ค่าหนึ่ง [2, 3]

Viscoelastic fluids

ของไหลจำพวกนี้สามารถคืนรูปได้หลังจากถูกทำให้เปลี่ยนรูปไปในระหว่างที่มีการไหล นั่นคือของไหลพวกนี้จะแสดงคุณสมบัติ 2 อย่างพร้อมกัน คือ คุณสมบัติของความหนืด และคุณสมบัติการยืดหยุ่น การคืนรูปของของไหลจะเกิดขึ้นได้หลังจากที่เราหยุดให้แรงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป ตัวอย่างได้แก่ flour dough, naplam, polymer melt, bitumens.

ตารางที่ 1
ชนิดของของไหล จำแนกตามคุณสมบัติการไหล (ของไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา) [4]

Description	Rheograms	Constitutive equation	Apparent Viscosity $\mu_a = (-dv / dy)^{-1}$
Newtonian	τ μ $-dv / dy$	$\tau = -\mu \frac{dv}{dy}$	$\mu_a = \mu = constant$
Pseudoplastic (power law)	 $-dv / dy$	$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n$ $n < 1$	Decreases with increasing shear rate $\mu_a = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^{n-1}$
Dilatant (power law)	τ μ_a $-dv / dy$	$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^n$ $n > 1$	Increases with increasing shear rate $\mu_a = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)^{n-1}$
Binghamplastic	τ μ_a τ_0 $-dv / dy$	$\tau = \tau_0 + K \left(-\frac{dv}{dy} \right)$	Decrease with increasing shear rate when yield stress τ_0 is exceeded $\mu_a = \frac{\tau_0}{(-dv/dr)} + K$

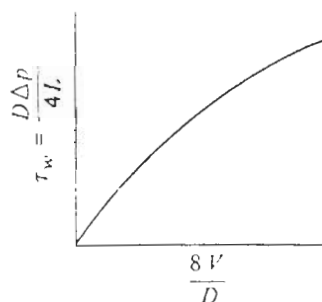
คุณสมบัติการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียน ชนิดที่ไม่ขึ้นกับเวลา[1]

เครื่องวัดความหนืดชนิด capillary tube viscometer ถูกนำมาใช้สำหรับหาคุณสมบัติการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนชนิดที่ไม่ขึ้นกับเวลา โดยทำการทดลองวัดค่าความดันลด ΔP (N/m²) ที่เกิดขึ้นภายใต้อัตราการไหลหลายๆ ค่าหรือใช้ค่าความเร็วเฉลี่ย v (m/s)

ในการณีการไหลเป็นไปตามสมการ power law [สมการที่ (2) หรือ (3)] จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $D\Delta P/4L$ กับค่า $8v/D$ ดังสมการที่ (4) คือ

$$\frac{D\Delta P}{4L} = K' \left(\frac{8v}{D} \right)^{n'} \quad (4)$$

เมื่อ $D\Delta P/4L$ คือ ค่าแรงเฉือนที่ผนัง (τ_w) หน่วย N/m², $8v/D$ คือ ค่าที่เป็นสัดส่วนกับค่าอัตราการเฉือนที่ผนัง, n' คือ ความชันของกราฟที่พล็อตบนแกน (log-log), K' คือ จุดตัดมีหน่วยเป็น N/s ^{n'} /m², D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ capillary tube, L คือ ความยาวของ capillary tube, n' คือ flow behaviour index และ K' คือ viscosity index เมื่อ $n' = 1$ ของไหลจะเป็นของไหลนิวโตเนียนเมื่อ $n' < 1$ ของไหลจะเป็น pseudoplastic หรือ bingham plastic (ถ้าเส้นกราฟไม่ผ่านจุดกำเนิด) และเมื่อ $n' > 1$ ของไหลจะเป็น dilatant ในการณีที่เป็นของไหลนิวโตเนียนค่า consistency index K' ในสมการที่ (4) จะเท่ากับค่า μ นั้นเอง ความสัมพันธ์ระหว่าง $D\Delta P/4L$ และ $8v/D$ ตามสมการที่ (4) แสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เส้นกราฟการไหลโดยทั่วไปสำหรับของไหลที่เป็นไปตามกฎ power-law
ในการไหลแบบราบเรียบภายในท่อ

ในหลายกรณีที่คุณสมบัติการไหลของของไหลหาค่าได้โดยการใช้เครื่องวัดความหนืดชนิด rotational viscometer ซึ่งในกรณีนี้เราสามารถหาค่าคุณสมบัติการไหล K และ n ได้โดยตรงจากสมการที่ (2) และ (3) โดย n คือ ความลาดชัน และ K คือ จุดตัดจากการพล็อตกราฟระหว่าง τ และ $-dv/dy$

เมื่อคุณสมบัติการไหลของของไหลมีค่าคงที่ตลอดทุกช่วงของค่าแรงเฉือน เราจะได้ความสัมพันธ์ของค่า consistency index และ flow behaviour index ทั้ง 2 วิธีดังนี้ [5]

$$n' = n \quad (5)$$

$$K' = K \left(\frac{3n' + 1}{4n'} \right)^{n'} \quad (6)$$

บางครั้งค่า K' จะเขียนอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (viscosity coefficient, γ) ตามสมการที่ (7) คือ

$$\gamma = K' 8^{n'-1} \quad (7)$$

เมื่อ γ มีหน่วยเป็น $\text{N.s}^n/\text{m}^2$

ค่าคงที่ของคุณสมบัติการไหล (flow property constant หรือ rheological constant) สำหรับของไหลบางชนิดแสดงอยู่ในตารางที่ 2 ข้อมูลบางครั้งจะให้ค่า γ แทนที่จะเป็น K' แต่สามารถใช้สมการที่ (7) เปลี่ยน γ เป็น K' ได้

กำลังที่ใช้ในการกวนของของไหลนอนนิวโตเนียน [1]

กำลังที่ต้องการสำหรับการกวนหรือการผสมของของไหลนอนนิวโตเนียนจะแสดงอยู่ในเทอม power number, N_p เช่นเดียวกับของไหลนิวโตเนียนดังสมการ

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_a^5} \quad (8)$$

เมื่อ

N_p = power number (ไม่มีหน่วย)

P = กำลังงาน, J/s

N = รอบการกวน, rev/s

D_a = เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน m

ρ = ความหนาแน่นของของไหล kg/m^3

ตารางที่ 2

ค่าคงที่ของคุณสมบัติการไหลสำหรับของไหลนอนนิวโตเนียน

Fluid	Flow-Property Constant			Ref
	n'	$\gamma \left(\frac{Ns^{n'}}{m^2} \right)$	$K' \left(\frac{N/s^{n'}}{m^2} \right)$	
1.5% carboxymethylcellulose in water	0.554	1.369		[8]
3.0% CMC in water	0.566	4.17		[8]
4% paper pulp in water	0.575	9.12		[9]
14.3% clay in water	0.350	0.0512		[10]
10% naplam in kerosene	0.520	1.756		[8]
25% clay in water	0.185	0.3036		[10]
Applesauce, brand A (297 K), density = 1.10 g/cm^3	0.645		0.500	[11]
Banana puree, brand A (297 K), density = 0.977 g/cm^3	0.458		6.51	[11]
Honey (297 K)	1.00		5.61	[11]
Cream 30 % fat (276 K)	1.00		0.01379	[12]
Tomato concentrate, 5.8 % total solids (305 K)	0.59		0.2226	[13]

อย่างไรก็ตามค่า Reynold number สำหรับของไหลนอนนิวโตเนียนจะมีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าของไหลนิวโตเนียน เนื่องจากความหนืดที่ปรากฏ (apparent viscosity) จะมีค่าไม่คงที่และจะเปลี่ยนไปตามค่าอัตราการเฉือนและความเร็วของของไหลในท่อ มีผู้ศึกษาเอาไว้ [6, 7] โดยได้ใช้ค่าความหนืดปรากฏเฉลี่ย (average apparent viscosity, μ_a) สำหรับหาค่า Reynold number ดังสมการ

$$N_{Re,n} = \frac{D_a^2 N_p}{\mu_a} \quad (9)$$

ในกรณีที่ของไหลนอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามกฎยกกำลัง เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า μ_a และค่าอัตราการเฉือน (dv/dy) ได้ดังนี้

จากสมการกฎ power law

$$\tau = K \left(-\frac{dv}{dy} \right)_{av}^n \quad (10)$$

เมื่อ $(dv/dy)_{av}$ คือ อัตราการเฉือนเฉลี่ย y คือ ระยะทาง (m)

สำหรับของไหลนิวโตเนียนค่า n จะเท่ากับ 1 ดังนั้นจากสมการที่ (10) จะได้

$$\tau = \mu_a \left(-\frac{dv}{dy} \right)_{av} \quad (11)$$

นั่นคือในกรณีที่ของไหลนิวโตเนียนค่า K ในสมการกฎยกกำลัง ก็คือค่า μ_a นั่นเอง เมื่อรวมสมการที่ (10) และ (11) จะได้

$$\mu_a = K \left(\frac{dv}{dy} \right)_{av}^{n-1} \quad (12)$$

Metzner และคณะ [6,7] ได้ทำการทดลองและพบว่าอัตราการเฉือนเฉลี่ย $(dv/dy)_{av}$ สำหรับของไหลแบบ pseudoplastic ($n < 1$) จะมีค่าเปลี่ยนไปตามค่าความเร็วของการกวน (N) ดังสมการ

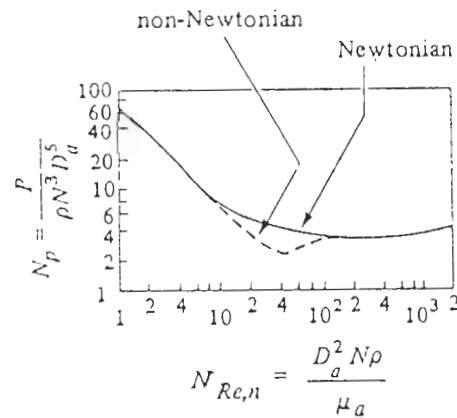
$$\frac{dv}{dy} = 11N \quad (13)$$

เมื่อรวมสมการที่ (12) และ (13) จะได้

$$\mu_a = (11N)^{n-1} K \quad (14)$$

แทนค่าลงในสมการที่ (9) จะได้

$$N_{Re,n} = \frac{D_a^2 N^{2-n}}{11^{n-1} K} \quad (15)$$



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานในการกวาดสำหรับใบกังวแบบ flat-six-blade turbine with disk ในของไหลนิวโตเนียนและนอนนิวโตเนียน [6,7]: $D_a/W = 5$, $L/W = 5/4$, $D/J = 10$

สมการที่ (15) เป็นค่า Reynold number ที่ใช้สำหรับใบกังวแบบ flat-six-blade turbine with disk ในของเหลว pseudoplastic ซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่าง N_p และ $N_{Re,n}$ ดังแสดงโดยเส้นประในรูปที่ 3[7] ส่วนเส้นทึบจะใช้สำหรับของไหลนิวโตเนียน[8] ข้อมูลทั้งสองชุดจากรูปที่ 3 นี้ได้จากการใช้ baffle 4 ตัว และมีค่า $D_t/J = 10$, $D_a/W = 5$ และ $L/W = 5/4$ เมื่อ D_t , D_a คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนและใบกังวตามลำดับ J คือ ความกว้างของแผ่น baffle L คือ ความยาวของใบกังว และ W คือความกว้างของใบกังว เส้นกราฟทั้งสองระหว่างของไหลนิวโตเนียนและนอนนิวโตเนียนในรูปที่ 3 จะมีค่าเหมือนกันในช่วง

Reynold number ตั้งแต่ 1 ถึง 2000 ยกเว้นช่วง Reynold number 10 ถึง 100 เท่านั้นที่มีความแตกต่างกัน โดยของไหล pseudoplastic จะมีค่า power number น้อยกว่าของไหลนิวโตเนียน รูปแบบการไหลของของไหล pseudoplastic ในถังกวนจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากกว่าของไหลนิวโตเนียน ของไหลที่อยู่ห่างจากใบกวนอาจมีการเคลื่อนที่แบบราบเรียบเนื่องจากมีความหนืดสูง ข้อมูลสำหรับใบกวนแบบ fan turbines และ propellers หาข้อมูลเพิ่มเติมได้ในเอกสารอ้างอิง[7]

อัตราการเฉือนเฉลี่ย $(dv/dy)_{av}$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับค่า N ในสมการที่ (13) นั้น ถ้าเป็นกรณีที่ใบกวนชนิดอื่น ตัวเลข 11 ซึ่งเป็นค่าคงที่ในสมการที่ (13) จะมีค่าเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับชนิดของใบกวนดังสมการ [16]

$$\frac{dv}{dy} = k_i N \quad (16)$$

เมื่อ k_i คือ ค่าคงที่ของใบกวนดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

เมื่อรวมสมการที่ (9), (12) และ (16) จะได้สมการสำหรับ Reynold number ของของไหลนอนนิวโตเนียนที่เป็นไปตามกฎ power law สำหรับใบกวนชนิดต่างๆ ดังสมการ

$$N_{Re,n} = \frac{D_a^2 N^{2-n}}{k_i^{n-1} K} \quad (17)$$

ตารางที่ 3

ค่าคงที่ k_i สำหรับใบกวนชนิดต่างๆ[14]

Impeller	k_i
6-Bladed turbine	11 - 13
Paddles	10 - 13
Propellers	~10
Herical ribbon	~30

บทสรุป

จะเห็นได้ว่าของไหลนอนนิวโตเนียนมีอยู่มากมายหลายชนิด การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการไหลของสารพวกนี้ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อน ข้อมูลการศึกษาก็ยังมีไม่มาก อย่างไรก็ตามการศึกษาคูณสมบัติการไหลของของไหลนอนนิวโตเนียนเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิต เพราะอุตสาหกรรมหลายชนิดมักจะเกี่ยวข้องกับสารพวกนี้โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเกษตร เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ชีวภาพ ซึ่งจัดอยู่ในอุตสาหกรรมของแผนพัฒนาประเทศ

เอกสารอ้างอิง

1. Geankoplis, C.J. **Transport Process and Unit Operation**, 2nd ed. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1983
2. Skelland, A.H.P. **Non-Newtonian Flow and Heat Transfer**. New York : John Wiley & Sons. Inc., 1967
3. Walters. K. **Rheometry**. London : Chapman & Hall Ltd., 1975
4. Ghose, T.K., Fiechter, A., Blakebrough, N. **Advances in Biochemical Engineering**. Volume 8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1978
5. Metzner, A.B., and Reed, **J.C.A.I.Ch.E.J.**, 1, 434 (1955)

6. Godleski, E.S., and Smith, **J.C.A.I.Ch.E.J.**,8, 617 (1962)
7. Metzner, A.B., Feehs, R.H., Ramos, H.L., Otto, R.E., and Tuthill, **J.D.A.I.Ch.E.J.**,7.3 (1961)
8. Stevens, W.E. Ph. D. **Thesis**. University of Utah, 1953.
9. Allis Chatmers Mfg. Co. Bull. 1659
10. Winning. M.D.M.Sc. **Thesis**. University of Alberta, 1948
11. Charm, S.E. **The Fundamentals of Food Engineering**. 2nd ed. Westport, Conn. : Avi Publishing co., Inc., 1971.
12. Mohsenin, N.N. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**. Vol 1, Part II. New York : Gordon & Breach. Inc., 1970.
13. Harper, J.C., and EL Shahrighi. J. Food Sci., 30, 470 (1965)
14. Moses, V., Cape, R.E. **Biotechnology : The Science and the Business**, Harwood Academic Publishers, New York, 1991