

การคำนวณตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอนนิว โทเนียนที่ไหลผ่านท่อและวาล์ว

Calculation of friction coefficient and loss coefficient of Non-Newtonian fluids in pipeline and valves

ปัญญภัทร น่วมเปี่ยม ธีระพงศ์ คำประเสริฐ และ จำลอง ปราบแก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 0-2329-8350 โทรสาร 0-2329-8352

E-mail: kpchamlo@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการทดสอบคุณสมบัติของของไหลนอนนิวโทเนียนและการคำนวณหาตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียที่เกิดจากการไหลในท่อและไหลผ่านวาล์วชนิดต่างๆ ของไหลนอนนิวโทเนียนที่นำมาทดสอบคือ นมข้นหวาน ซอสมะเขือเทศ โคลนหมักผงงาดำและโคลนขาวเคโอลีน ผลการทดสอบพบว่านมข้นหวานมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow behavior, n) เท่ากับ 0.68 และค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Consistency index, k) เท่ากับ 19.90 ซึ่งจัดเป็นของไหลนอนนิวโทเนียนแบบซูดอพลาสติก สำหรับซอสมะเขือเทศ โคลนหมักผงงาดำ โคลนขาวเคโอลีน มีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (n) เท่ากับ 0.15, 0.14 และ 0.20 ตามลำดับ และมีค่าดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 15.15, 26.67 และ 25.00 ตามลำดับ ทั้งสามชนิดจัดเป็นของไหลนอนนิวโทเนียนแบบพลาสติกหรือยิลด์ซูดอพลาสติก จากนั้นจึงเขียนโปรแกรม MATLAB คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบความเสียดทาน สัมประสิทธิ์การสูญเสีย ความเร็วการไหล เทียบกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ส ของของไหลแต่ละชนิด จากผลการคำนวณจะเห็นว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นค่าตัวประกอบความเสียดทานมีค่าลดลง โดยของไหลที่มีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดคือ นมข้นหวาน เนื่องจากมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลมากที่สุด ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของไหลนอนนิวโทเนียนทั้ง 4 ชนิด เมื่อไหลผ่านวาล์วแบบประตูน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว พบว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงจนถึงค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 402 แล้วจึงมีค่าคงที่ และเมื่อเปลี่ยนขนาดประตูน้ำเป็น 2 นิ้ว ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงเช่นกัน และที่ตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 1905 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าคงที่ และยังได้แสดงผลการคำนวณในกรณีไหลผ่านโกลบวาล์ว ข้อลดขนาด ข้อต่อเพิ่มขนาด และข้องอฉากอีกด้วย โปรแกรมการคำนวณที่เขียนขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณการไหลของของชนิดอื่นๆ ได้

คำสำคัญ: ของไหลนอนนิวโทเนียน, ตัวประกอบความเสียดทาน, สัมประสิทธิ์การสูญเสีย

Abstract

The article presents characteristic test, friction factor and loss coefficient calculation of Non-Newtonian fluid in straight pipe and valves. The type of Non-Newtonian fluid used in the paper were sweeten condensed milk, tomato ketchup, black sesame clay and kaolin clay. Results indicate that the flow behaviour index and fluid consistency index of sweeten condensed milk were 0.68 and 19.9, respectively, and it was considered as pseudoplastic fluid. On the other hand, the tomato ketchup, black sesame clay and kaolin clay were considered as yield pseudoplastic and their flow behaviour indexes were 0.152, 0.147, and 0.2, respectively. Additionally, their fluid consistency indexes were 15.15, 26.67 and 25, accordingly. Later, the friction factor and loss coefficient in straight pipe and valves were numerically evaluated as a function of Reynolds number using the in-house program, coded in MATLAB. The results have shown that as the Reynolds number increased the friction factor obviously decreased. Sweeten condensed milk had the maximum friction factor since its flow behavior index was the largest. Furthermore, a calculation of loss coefficients in the gate valve, 1 inch in diameter, decreased as the Reynolds number increased. However, When the Reynolds number was higher than 402, the loss coefficients remained constant. After that the loss coefficients of the gate valve with 2 inch in diameter were investigated and it was found that as the Reynolds number increased, the loss coefficients also decreased. Their values stay constant when the Reynolds number was beyond 1905. Finally, calculations of friction factors and loss coefficients in globe valve, reducer, expander and elbow were also made as parts of the research.

Keywords: Non-Newtonian fluid, friction factor, loss coefficient

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการขนส่งของไหลผ่านท่อกันอย่างแพร่หลาย เช่น การส่งน้ำมันและก๊าซธรรมชาติระหว่างเมืองหรือระหว่างประเทศ การส่งของเหลวผ่านระบบท่อในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น การออกแบบระบบท่อที่ใช้ในการขนส่งของเหลวมีความจำเป็นจะต้องทราบคุณสมบัติของของเหลวที่ต้องการขนส่ง เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกวัสดุที่นำมาทำท่อ ขนาดท่อ การบำรุงรักษาพลังงานที่ใช้ขับเคลื่อนของไหล ค่าใช้จ่าย รวมไปถึงการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในบริเวณที่ต้องส่งผ่านด้วยกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมเคมี มีการส่งของไหลนอนนิวโทเนียน

ผ่านระบบท่อกันอย่างกว้างขวาง ทั้งที่เป็นของไหลนิวโทเนียนแบบเฟสเดียว เช่น ซอลมะเขือเทศ โคลนหมักผงงาดำ นมข้นหวาน น้ำแป้งต่างๆ เป็นต้น และของไหลนอนนิวโทเนียนแบบสองเฟส เช่น อาหารเหลวผสมกับของแข็งเม็ดเล็กๆ เช่น น้ำวุ้นมะพร้าวหรือน้ำส้มผสมกับเกร็ดส้มเล็กๆ เป็นต้น ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการส่งของไหลผ่านระบบท่อหลายราย อย่างเช่น Kamal El-Nahhas et al. [1] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลนอนนิวโทเนียนที่เป็นเคโอลินไนท์หรือโคลนขาวที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนเทียบกับอัตราการเฉือนโดยพบว่าที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความเค้นเฉือนจะลดลง

และที่อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นความเค้นเฉือนจะมากขึ้น ด้วย Adelson Belizario Leal et al. [2] ได้ศึกษาการหาค่าเฮดที่สูญเสียจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและค่าความดันที่สูญเสียไปในวาล์วข้อต่อ ข้อต่อต่างๆ โดยใช้วิธีการจำลอง พร้อมทั้งทดลอง โดยใช้ของไหลนอนนิวโทเนียนชนิด carboxymethylcellulose (CMC) และ xanthan ผลการศึกษาพบว่าเมื่อไหลผ่านโกลบวาล์วค่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 10.40 โดยมีค่าเบี่ยงเบน 0.10 เมื่อไหลผ่านข้อต่อ 90° ค่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 โดยมีค่าเบี่ยงเบน 0.05 เป็นต้น Turian et al. [3] ได้ทำการหาตัวประกอบความเสียดทานของของไหลนอนนิวโทเนียน 2 ชนิดคือ laterite และ gypsum ที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน โดยการทดลองให้ของไหลนอนนิวโทเนียนทั้งสองชนิด ไหลผ่าน วาล์วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 5 ซม.พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมีค่าเท่ากับ 10.039 และ 6.719 ตามลำดับโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นนัยสำคัญ แม้ค่าตัวเลขเรโนลด์จะเปลี่ยนแปลง และเมื่อไหลผ่านข้อลดขนาด 5x2.5 ซม.พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะลดลงถึงค่า 0.23 ที่ค่าตัวเลขเรโนลด์ประมาณ 4000 แล้วจึงมีค่าคงที่แม้ค่าตัวเลขเรโนลด์จะเพิ่มขึ้น และบริษัท Crane (1976) [4] ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอนนิวโทเนียนแบบสองเฟสที่ไหลแบบปั่นป่วนในท่อ Commercial Steel Pipe ตั้งแต่ขนาด 0.5 - 24 นิ้ว โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะลดลงตามขนาดท่อโดยที่เพิ่มขึ้น ที่ขนาดท่อ 0.5 นิ้วได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.027 และที่ท่อขนาด 24 นิ้วได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.012 รวมทั้งได้เสนอผลการศึกษาในข้อต่อ ข้อต่อต่างๆด้วย

สำหรับบทความนี้ได้ศึกษาผลทดลองหาค่าพฤติกรรมการไหล(Flow Behavior Index, n) และค่าดัชนีความสม่ำเสมอ (Fluid Consistency Index, k) ของนมข้นหวาน ซอสมะเขือเทศ และโคลนหมักผมซึ่งเป็นของไหลนอนนิวโทเนียนแบบเฟสเดียวแล้วจึงเขียนโปรแกรม MATLAB คำนวณหาค่าตัวประกอบ

ความเสียดทานในกรณีที่ไหลผ่านท่อตรง และค่าสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเมื่อไหลผ่านวาล์ว ข้อต่อและข้อต่อแบบต่างๆ

2. คุณสมบัติของของไหลนอนนิวโทเนียน

คุณสมบัติของของไหลนอนนิวโทเนียน หรือเรียกว่าคุณสมบัติทางรีโอโลยี เป็นค่าเฉพาะของของไหลซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรด้วยกัน 2 ตัวแปรคือ ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow Behavior Index, n) และดัชนีความสม่ำเสมอ (Fluid Consistency Index, k) ซึ่งตัวแปรทั้งสองจะเป็นตัวตัดสินว่าของไหลนอนนิวโทเนียนนั้นๆเป็นแบบใดและมีค่าความข้นหนืดเท่าใด โดยค่าตัวแปรทั้งสองจะขึ้นอยู่กับค่าความหนืดปรากฏ(Apparent viscosity : μ_{app}) และอัตราการเฉือน (γ) ซึ่งมีหน่วยเป็น Pa.s และ second^{-1} ตามลำดับ เครื่องมือสำหรับวัดค่าตัวแปรดังกล่าวเรียกว่า Rheometer หรือ Viscometer ที่แสดงค่าความหนืดปรากฏและอัตราการเฉือนได้ การเพิ่มความเร็วของการหมุนของเพลาทรงกระบอกของเครื่องวัด จะเป็นการเพิ่มอัตราการเฉือน ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดปรากฏ ถ้าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของการหมุนไม่ทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ถือว่าของไหลชนิดนั้นมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวโทเนียนและสามารถสรุปได้ว่าของไหลชนิดนั้นมีความข้นหนืดเท่ากับความหนืดปรากฏ แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ ความเร็วของการหมุนทำให้ความหนืดปรากฏเปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปเอ็กซ์โปเนนเชียล ถือว่าของไหลนั้นมีคุณสมบัติเป็นของไหลนอนนิวโทเนียน ค่าดัชนีความสม่ำเสมอของของไหลนอนนิวโทเนียนในรูปความหนืดปรากฏต้องกำกับอัตราการเฉือนไว้ด้วยเสมอ อย่างไรก็ตามเพื่อความเป็นสากล การรายงานความหนืดของของของไหลนอนนิวโทเนียนนิยมรายงานในค่าทั่วไปของความหนืดซึ่งได้แก่ ดัชนีความสม่ำเสมอ, k (Pa.s^n) และ ดัชนีพฤติกรรมการไหล, n (ไม่มีหน่วย) ค่า k และ n สามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ ของ

Herschel-Bulkley model ในรูปของค่าความหนืดปรากฏ (μ_{app}) และอัตราการเฉือน (γ) ดังนี้

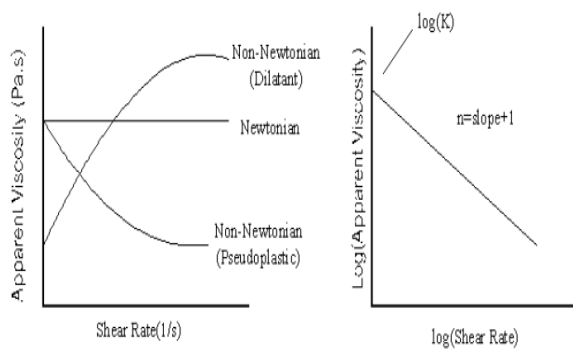
$$\mu_{app} = k\gamma^{n-1} \dots\dots\dots (1)$$

$$\log \mu_{app} = \log k + (n-1)\log \gamma \dots\dots\dots (2)$$

โดยการพลอตกราฟ log-log ระหว่าง $\log \mu_{app}$ บนแกน Y และ $\log \gamma$ บนแกน X ค่า slope คือ n-1 และ interception คือ $\log k$

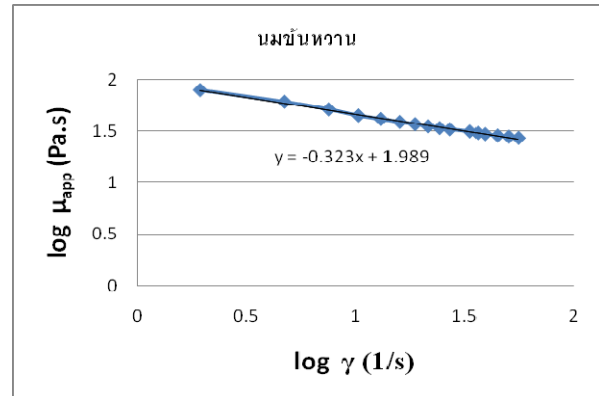
$$n = \text{slope} + 1 \dots\dots\dots (3)$$

$$k = 10^{\text{intercept}} \dots\dots\dots (4)$$

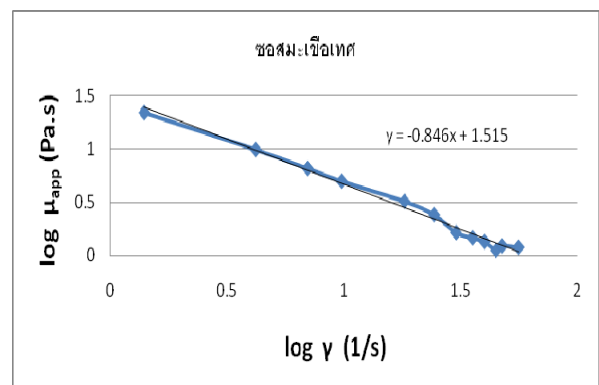


รูปที่ 1 กราฟที่ได้จากการลงจุดบนกระดาษ log-log

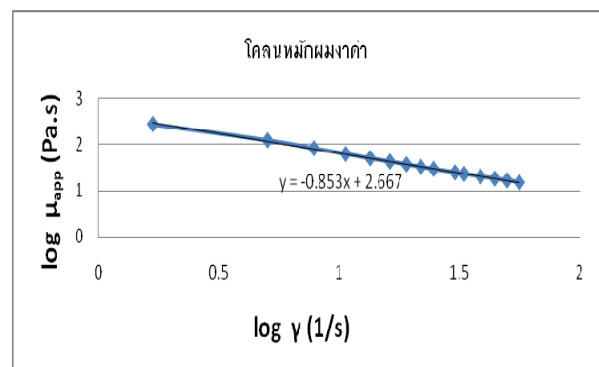
การทดสอบเพื่อหาค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล และดัชนีความสม่ำเสมอ ของนมข้นหวาน ซอสมะเขือเทศ และโคลนหมักผงงาดำ ด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield ® viscometer รุ่น DV-3P ซึ่งสามารถวัดความหนืดได้ในช่วง 100 – 13,000,000 mPa.s อุณหภูมิระหว่าง 0°- 100°C และสามารถปรับความเร็วรอบได้ตั้งแต่ 0.3- 200 รอบต่อนาที แล้วนำผลจากการทดสอบมาคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดปรากฏกับอัตราการเฉือน โดยการเขียนกราฟบนแกน log – log จะได้ดังรูปที่ 2 – 4



รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏกับอัตราการเฉือนของนมข้นหวาน



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏกับอัตราการเฉือนของซอสมะเขือเทศ



รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏกับอัตราการเฉือนของโคลนหมักผงงาดำ

จากรูปที่ 2 ผลการทดสอบนมข้นหวานได้ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลเท่ากับ 0.68 ค่าดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 19.9 และจากรูปที่ 3 การทดสอบซอสมะเขือเทศ ได้ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลเท่ากับ 0.15 ค่าดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 15.15 และจาก

ผลการทดสอบโคลนหมักผงงาดำในรูปที่ 4 จะได้ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลเท่ากับ 0.14 และดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 26.67 ส่วนโคลนขาวเคโอลินซึ่งมีผู้ทดสอบได้ดัชนีพฤติกรรมการไหลเท่ากับ 0.20 ค่าดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 25.00

3. ทฤษฎีและวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานในการไหลของของไหลนอนนอนนิวโตเนียนผ่านท่อและวาล์ว

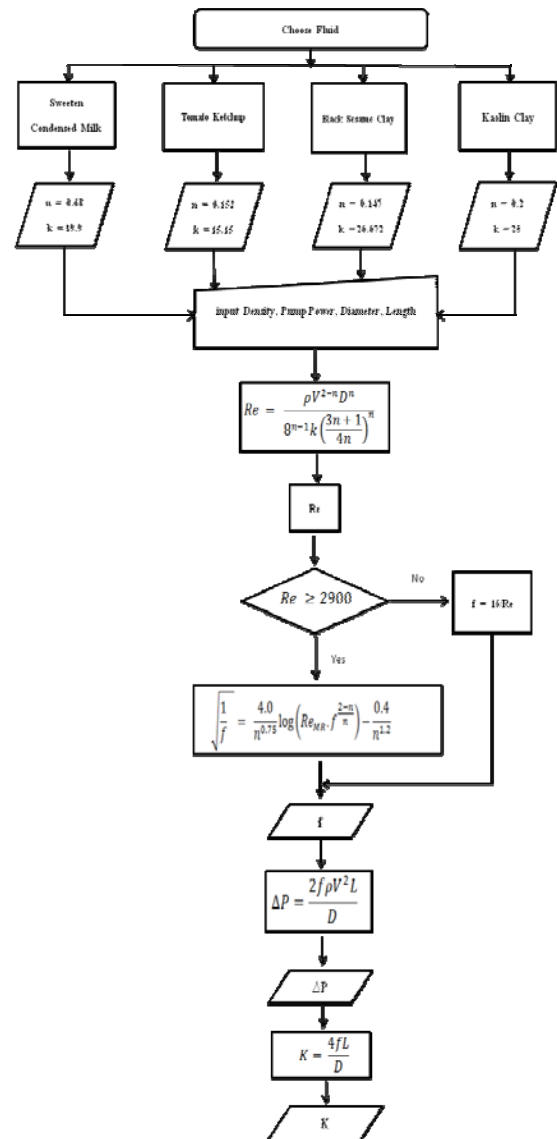
การสูญเสียพลังงานหรือที่เรียกว่าการสูญเสียเฮด (Head Loss) มี 2 แบบคือ การสูญเสียในท่อตรง ถือเป็นการสูญเสียหลัก (Major Loss) และการสูญเสียอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว ฯลฯ ถือว่าเป็นการสูญเสียรอง (Minor Loss) Turian et al. [3] ได้ทดสอบหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียเมื่อของไหลนอนนิวโตเนียนไหลผ่านท่อตรง ข้อต่อ ข้องอ และวาล์วโดยใช้ของไหลนอนนิวโตเนียนหลากหลายชนิดแล้วเป็นเขียนเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (K) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในระบบท่อ
Turian et al. [3]

พจน์ค่าและ วาล์ว	สูตร K (ไหลราบเรียบ)		สูตร K (ไหลปั่นป่วน)	
	1 นิ้ว	2 นิ้ว	1 นิ้ว	2 นิ้ว
ท่อตรง	$\frac{4fL}{D}$	$\frac{4fL}{D}$	$\frac{4fL}{D}$	$\frac{4fL}{D}$
Gate Valve	$\frac{320}{Re}$	0.797	$\frac{320}{Re}$	0.168
Globe Valve	10.039	6.719	10.039	6.719
ข้อต่อ 90° std.	$\frac{900}{Re}$	1.114	$\frac{900}{Re}$	0.665
ข้อต่อ 90° $r/D = 4.5$	$\frac{660}{Re}$	0.766	$\frac{660}{Re}$	0.495
ข้อต่อ 90° $r/D = 8.5$	$\frac{1400}{Re}$	0.951	$\frac{1400}{Re}$	0.534
ข้อต่อ 90° $r/D = 12.5$	$\frac{1800}{Re}$	1.211	$\frac{1800}{Re}$	0.699
ท่อกร 2x1 in ²	$\frac{900}{Re}$	—	0.23	—
ท่อเพิ่ม 1x2 in ²	—	0.5512	—	0.5512

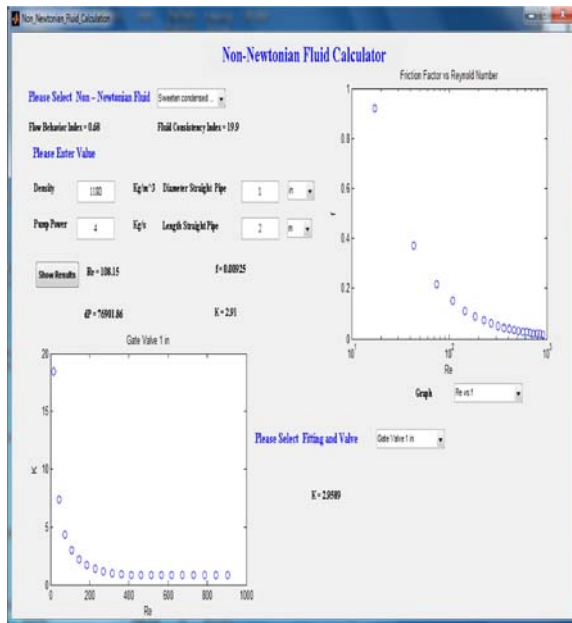
การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของของไหลนอนนิวโตเนียนที่ทดสอบหาค่าดัชนี

พฤติกรรมการไหลและค่าดัชนีความสม่ำเสมอไว้แล้ว โดยการเขียนโปรแกรม MATLAB ในการคำนวณตามผังในรูปที่ 5

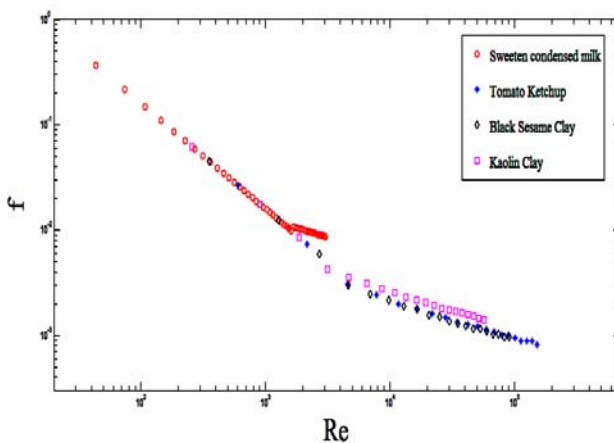


รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

การคำนวณจะใส่ข้อมูลชนิดและคุณสมบัติของไหลนอนนิวโตเนียนโดยใส่ค่าตัวแปรลงในโปรแกรมแล้วจึงจะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้ตามต้องการ ผลการคำนวณจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังแสดงในรูปที่ 6



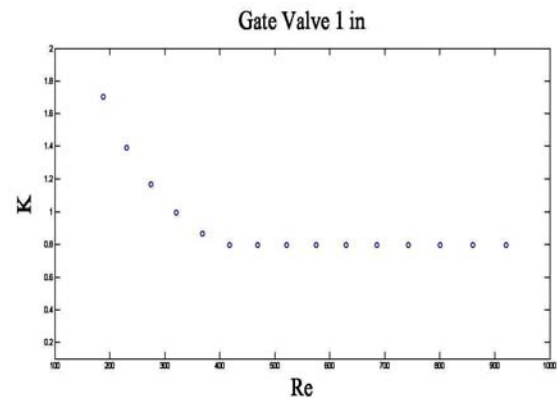
รูปที่ 6 หน้าต่างโปรแกรมแสดงผลการคำนวณ



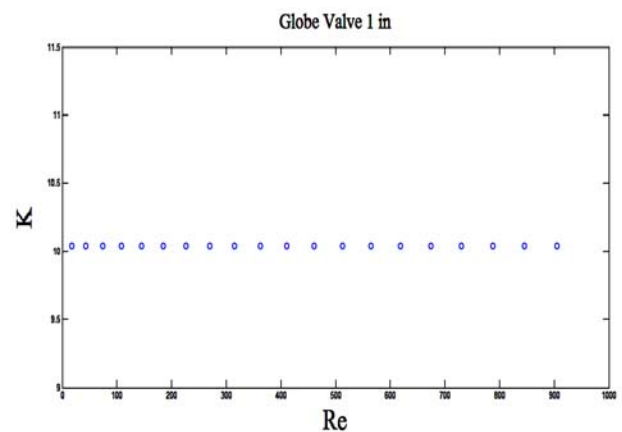
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความ
เสียดทานกับค่าตัวเลขเรโนลด์

รูปที่ 7 แสดงผลคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับค่าตัวเลขเรโนลด์ของนมข้นหวาน ซอสมะเขือเทศ โคลนหมักผงงาดำ และโคลนขาวเคโอลิน จะพบว่าเมื่อตัวเลขเรโนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าลดลง ของไหลที่มีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุดคือ นมข้นหวานเนื่องจากมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลมากที่สุด รองลงคือโคลนขาวเคโอลิน สำหรับซอสมะเขือเทศ และโคลนหมักผงงาดำมีค่าใกล้เคียง

กัน และจากรูปที่ 8 แสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเมื่อนมข้นหวานไหลผ่านประตูน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้วแล้ว โดยเมื่อตัวเลขเรโนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงและเมื่อของไหลนอนนิวโทเนียนมีตัวเลขเรโนลด์เป็นมากกว่า 402 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าคงที่เป็น 0.79

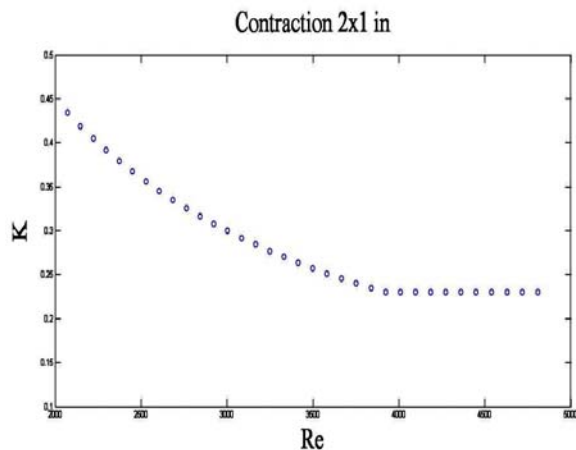


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และ Re ของนม
ข้นหวานเมื่อไหลผ่านประตูน้ำขนาด 1 นิ้ว



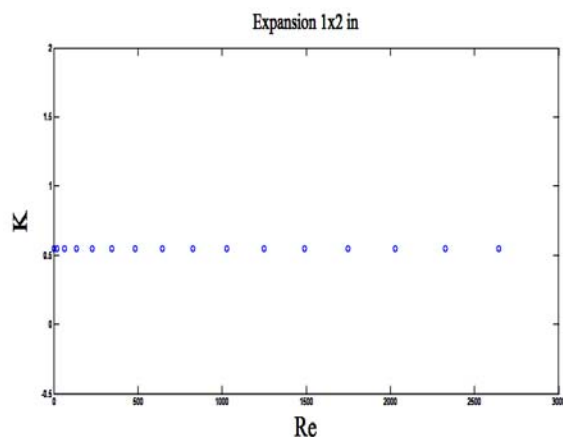
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และ Re ของนม
ข้นหวานเมื่อไหลผ่านโกลบวาล์วขนาด 1 นิ้ว

จากผลการคำนวณในรูปที่ 9 เมื่อนมข้นหวานไหลผ่านโกลบวาล์วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะได้ค่าคงที่ 10.03 แม้ค่าตัวเลขเรโนลด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น



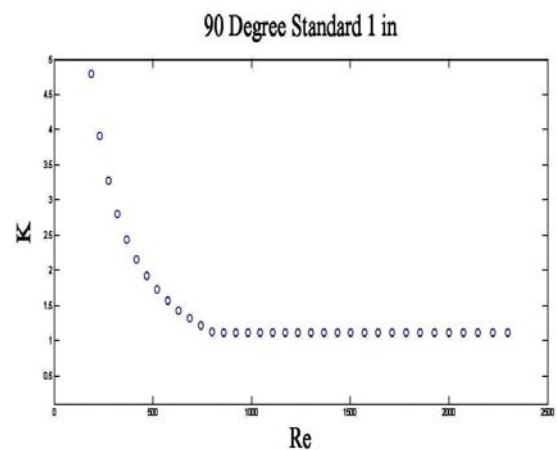
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และ Re ของนม
ชั้นหวานเมื่อไหลผ่านข้อต่อแบบลดขนาด 2x1 นิ้ว

จากผลการคำนวณในรูปที่ 10 เมื่อนมชั้นหวาน
ไหลผ่านข้อต่อแบบลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2x1
นิ้ว พบว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นค่า
สัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงและที่ตัวเลขเรย์
โนลด์เป็นมากกว่า 3900 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การ
สูญเสียจะมีค่าคงที่เป็น 0.23



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และ Re ของนม
ชั้นหวานเมื่อไหลผ่านข้อต่อแบบเพิ่มขนาด 1x2 นิ้ว

จากผลการคำนวณในรูปที่ 11 เมื่อนมชั้นหวาน
ไหลผ่านข้อต่อแบบเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1x 2
นิ้ว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าคงที่ 0.55
แม้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า K และ Re ของนม
ชั้นหวานเมื่อไหลผ่านข้องอ 90 องศาแบบ
มาตรฐานขนาด 1 นิ้ว

จากผลการคำนวณในรูปที่ 12 เมื่อนมชั้นหวานไหล
ผ่านข้อต่อแบบงอ 90° แบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 1 นิ้ว พบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้น
แล้วค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงและที่ค่า
ตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 807 ค่าสัมประสิทธิ์การ
สูญเสียจะมีค่าคงที่ 1.11

4 สรุป

ผลการทดสอบคุณสมบัติของของไหลนอนนิวโท
เนียนทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ นมชั้นหวาน ซอสมะเขือเทศ
โคลนหมักผงงาดำ และโคลนขาวเคโอไลน์ พบว่า นมชั้น
หวานจะมีดัชนีพฤติกรรมการไหล เท่ากับ 0.68 และค่า
ดัชนีความสม่ำเสมอ เท่ากับ 19.90 ซึ่งจัดเป็นของไหล
นอนนิวโทเนียนแบบซูโดพลาสติก สำหรับซอสมะเขือ
เทศ โคลนหมักผงงาดำ โคลนขาวเคโอไลน์ มีค่าดัชนี
พฤติกรรมการไหล เท่ากับ 0.15, 0.14 และ 0.20
ตามลำดับและมีค่าดัชนีความสม่ำเสมอเท่ากับ 15.15,
26.67 และ 25.00 ตามลำดับ ทั้งสามชนิดจัดเป็นของ
ไหลนอนนิวโทเนียนแบบพลาสติกหรือยิลด์ซูโด
พลาสติก

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไหล
พบว่าที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ความเร็ว
และค่าความดันลดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าตัวประกอบความ

เสียดทานและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลง แต่ในขณะที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากันนั้นจะพบว่าที่ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลมีค่ามากขึ้นจะทำให้ความเร็ว, ผลต่างความดัน, ค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ในบางกรณีของไหลมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลใกล้เคียงกันจะต้องพิจารณาที่ค่าดัชนีความสม่ำเสมอเป็นหลัก

ผลการคำนวณเมื่อของไหลเป็นนมข้นหวาน ไหลผ่านอุปกรณ์ในระบบท่อได้แก่ เกตวาล์ว โกลบวาล์ว ข้อต่อแบบลด ข้อต่อแบบเพิ่ม ข้องอ 90° พบว่าเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียค่าลดลงจนถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงแม้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเป็นค่าคงที่เสมอ เมื่อไหลผ่าน โกลบวาล์ว และข้อต่อเพิ่มขนาด

5. เอกสารอ้างอิง

5.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Turian, Hsu , Sung and PLACKMANN (1998). Flow of Concentrated non-Newtonian Slurries, *International Journal Multiphase Flow*, Vol.24(2) pp 243-269
- [2] Kemblowski, Z., Kolodziejski, J. (1973). Flow Resistances of non-Newtonian Fluids in Transitional and Turbulent Flow, *International Journal Chemical Engineering*, Vol.13, PP.265-272.
- [3] Shaver, R. G., Merrill, E. W. (1959). Turbulent Flow of Pseudoplastic Polymer Solutions in Straight Cylindrical Tubes, *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 5, PP.181-190.
- [4] Dodge, D. W., Metzner, A. B. (1959). Turbulent Flow of non-Newtonian Systems, *A.I.Ch.E. Journal* Vol 5, pp.191-198.

- [5] Tomita, Y. (1959). A study on non-Newtonian Flow in Pipe Lines, *Bulletin of J.S.M.E*, Vol.2, pp. 10-21.

5.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

- [1] Kamal El-Nahas , Nageh Gad El-Hak, Magdy Abou Rayan and Imam El-Sawaf. (2005). Flow behaviour of non-Newtonian clay slurries, Paper presented in the *Ninth International Water Technology Conference*, IWTC9, Sharm El-Sheikh, Egypt
- [2] Adelson Belizário Leal, Luis Américo Calçada, Cláudia Mirim Scheid (2001). Non-Newtonian Fluid Flow in Ducts: Friction Factor and Loss Coefficient. Paper presented in the 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering

5.3 รายงาน

- [1] Coelho, G.L.V., (1982). *Reologia Escoamento Turbulento de Suspensões de Minério de Ferro*, Thesis de M. Sc., Campinas, Brasil.
- [2] Crane Co. (1976). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe*, Tech. Paper No. 410, 16th printing. Crane Co., 300 Park Avenue, NY.

5.4 หนังสือ

- [1] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., and Huebsch, B. B. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, New York
- [2] R.P.Chhabra and J.F. Richardson. (1999). *Non-Newtonian Flow in the Process Industries*, Wildwood Avenue, Woburn, Great Britain