การวิเคราะห์ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารแปรรูปไทย

Analysis of Viscosity and Flow Behaviour of Thai Processed Foods

นักสิทธิ์ ปัญโญใหญ่*

Naksit Panyoyai*

คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ศูนย์แม่ริม ประเทศไทย

Faculty of Agricultural Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Mae-Rim Campus, Thailand

Received : 13 October 2022

Revised : 5 April 2023

Accepted : 1 May 2023

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมกระบวนการผลิต คุณภาพผลิตภัณฑ์และการบริโภค วัตถุประสงค์ของงานวิจัยพื้นฐานนี้จึงเลือกอาหารแปรรูปไทย 27 ชนิดมาจำแนกพฤติกรรมการไหลด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยปัจจัยที่ศึกษาคือ การแปรผันอัตราเฉือน (0.01 ถึง 100 ต่อวินาที) และอุณหภูมิ (10-60 องศาเซลเซียส) ผลการศึกษาพบว่า อัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของผลิตภัณฑ์ 18 ชนิด เช่น ซอสที่ผสมไฮโดรคอลลอยด์ แยมและสเปรด มีค่าลดลงซึ่งอธิบายด้วยสมการเฮอร์เชล-บัลค์ลี (Herschel-Bulkley) ในขณะที่การเพิ่มอัตราเฉือนไม่มีผลต่อความหนืดในผลิตภัณฑ์ 9 ชนิด เช่น น้ำผึ้ง ไซรัป น้ำมันพืช และน้ำส้มสายชูหมัก ซึ่งจัดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการไหลแบบนิวโตเนียนและอธิบายการไหลแบบนิวโตเนียนด้วยสมการพาวเวอร์ลอว์ (Power law) ค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลของนิวโตเนียนมีค่า 0.9574-1.0607 และซูโดพลาสติก (นอนนิวโตเนียน) 0.0215-0.6244 ตามลำดับ การเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวอย่างที่มีพฤติกรรมการไหลทั้งสองแบบทำให้ความหนืดลดลง และโครงสร้างอาหารเกิดการไหลเมื่อมีพลังงานกระตุ้นสูงพอให้กับโมเลกุลขององค์ประกอบเคมีในอาหาร

คำสำคัญ : ความหนืด ; พฤติกรรมการไหล ; โมเดลคณิตศาสตร์ ; อาหารแปรรูปไทย ; รีโอโลยี

Abstract

Analysis of the viscosity and flow behaviour of foods is essential to control food processing, product quality and consumption. The basic research objective was to analyze the viscosity and flow behaviour of 27 Thai processed foods and then apply mathematical models to describe their viscosity changes. The focus factors were variations in shear rate (0.01-100 1/s) and temperature (10-60 ^{o}C). The results showed that the increases in shear rate led to decrease in the viscosity of 18 products such as sauces mixed with hydrocolloids, jam, and spread, which was described by the Herschel-Bulkley equation. However, the viscosity profiles of honey, syrup, vegetable oil and fermented vinegar were independent of shear rate changes. These products were classified as Newtonian flow and described the flow by the Power Law equation. The index of the flow behaviour of Newtonian was 0.9574-1.0607 and pseudoplastic (non-Newtonian) was 0.0215-0.6244. The increases in temperature of both flow behaviours resulted in the decreases of viscosity and flowability of the food structure when the energy was high enough to activate chemical molecules in the foods.

Keywords : viscosity ; flow behavior ; Mathematical Model ; Thai Processed Food ; rheology

***Corresponding author. E-mail** : naksit_pan@cmru.ac.th

บทนำ

"ความหนืดของอาหาร" (food viscosity) เป็นสมบัติทางกายภาพหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับหลักการทางฟิสิกส์ โดยมีการให้นิยามไว้ว่า คุณสมบัติของเหลวในการต้านวัตถุที่เคลื่อนที่ในของเหลวนั้น (Bourne, 2002) โดยหากพิจารณาวัสดุทรงกลมที่ตกลงในอาหารที่มีความหนืดมาก อาหารจะออกแรงต้านน้อยเพื่อให้วัตถุนั้นเคลื่อนที่ได้ช้า ๆ ในขณะที่อาหารที่มีความหนืดน้อยจะออกแรงต้านการเคลื่อนที่วัสดุทรงกลมมากกว่า หน่วยสากลกำหนดความหนืดไว้ คือ นิวตัน/ตารางเมตร (N/m^2) หรือ พาสคัล.วินาที (Pa.s) (Bourne, 2002) ลักษณะการไหลของอาหารศึกษาได้โดยเครื่องมือทางกลที่ใช้วัดความหนืดในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น เครื่องวัดความหนืดแบบหมุน (rotary viscometer) โดยให้บรรจุตัวอย่างอาหารในภาชนะทรงกระบอก ตรงกลางภาชนะใส่อาหารแล้วจุ่มทรงกระบอกลงไปให้กระบอกหมุนได้ การปรับอัตราเฉือนทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ จากนั้นจึงนำมาคำนวณความหนืดของอาหารได้ (Tabilo-Munizaga, and Barbosa-Canovas, 2005; Abbas, *et al*., 2010) พฤติกรรมการไหลอาหารหรือศาสตร์การไหลของอาหาร (food rheology) สามารถแบ่งอาหารออกเป็น 2 กลุ่มที่สำคัญ ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) คือของไหลเป็นไปตามสมการของนิวตัน อาหารมีความหนืดคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนผสม ณ ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า สัมประสิทธิ์ของความหนืด (coefficient of viscosity, η) หรือเรียกทั่วไปว่า ความหนืด เท่ากับแรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (*F* หน่วย พาสคัล) x อัตราเฉือน (*S* หน่วย 1/วินาที) ตัวอย่างอาหารที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนี้ ได้แก่ น้ำบริโภคในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เจือจาง น้ำกาแฟ น้ำนม น้ำผึ้ง เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น แรงเฉือน อุณหภูมิ เวลา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหาร (Abbas, *et al*., 2010)

กลุ่มที่ 2 ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) คือ ของไหลมีความหนืดไม่คงที่แต่ขึ้นกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวนผสม ณ ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง การไหลของผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ไม่เป็นไปตามสมการของนิวตัน ลักษณะการไหลแบบนี้ที่พบในอาหาร เช่น ซูโดพลาสติก (pseudoplastic) เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนหรือการกวนผสมทำให้อาหารมีความหนืดลดลง นั่นคือ อาหารจึงแสดงสมบัติเป็นเชียร์ ทินนิ่ง (shear thinning) ตัวอย่างอาหารที่มีพฤติกรรมแบบนี้ เช่น ซอส ซุป น้ำจิ้ม แยม โยเกิร์ต ครีม เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม ไดลาแทน (dilatant) กลับมีความหนืดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน อาหารจึงแสดงสมบัติเป็นเชียร์ ทิคเคนนิ่ง (shear thickening) เช่น สารละลายน้ำแป้งที่ต้มจนเกิดเจลเหนียว เมื่อกวนสารละลายจะต้องออกแรงมากขึ้น (Apintanapong, 2013; Thaunkhong *et al.,* 2014)

อุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่เป็นหัวใจที่สำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจไทย คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารไทยกำหนดด้วยมาตรฐานอาหารทั้งมาตรฐานในระดับอุตสาหกรรมและมาตรฐานในระดับชุมชน ผลิตภัณฑ์อาหารบางรายการมีการระบุคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ด้านความหนืด เช่น ซอส น้ำจิ้ม น้ำผลไม้เข้มข้น น้ำผึ้ง น้ำนมข้นหวาน ไซรัป แยม มาร์มาเลด สังขยา แต่ว่าข้อมูลความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารแปรรูปไทยซึ่งเป็นข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์มีการรวบรวมและนำเสนอข้อมูลให้เป็นระบบยังมีรายละเอียดไม่มากพอ ซึ่งข้อมูลพื้นฐานความหนืดมีความจำเป็นทั้งในด้านผู้ผลิตอาหารและผู้บริโภคดังต่อไปนี้

มุมมองที่ 1 ด้านการแปรรูปอาหาร ความหนืดเป็นปัจจัยหนึ่งในการออกแบบกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพ เช่น อาหารกลุ่มซอส น้ำจิ้ม ไซรัป น้ำผึ้ง มีความหนืด ดังนั้นการผสมส่วนผสม การตั้งอุณหภูมิการผสม การออกแบบใบกวน การดูดส่วนผสมหนืดเข้าสู่การบรรจุโดยการถ่ายเทมวลสารผ่านท่อเรียบขนาดต่าง ๆ การดูดสารละลายเพื่อทำความสะอาดท่อให้สะอาด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้เกี่ยวข้องกับหลักวิศวกรรมอาหารในการใช้ค่าความหนืดและพฤติกรรมการไหลมาประกอบการออกแบบจึงจะลดปัญหาการอุดตันในท่อ ลดต้นทุนการผลิตลงได้หากควบคุมความหนืดผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสม (Kassim and Sarow, 2020)

มุมมองที่ 2 ด้านบริโภคอาหาร ความหนืดเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์โดยตรง เช่น การบีบซอสออกจากขวดพลาสติก การปาดเนื้อแยม ครีม สังขยาบนแผ่นขนมปัง การเคลือบช็อกโกแลค (Tattiyakul, 2014) การยอมรับผลิตภัณฑ์น้ำจิ้มไก่ที่หนืดและมีชิ้นพริกแขวนลอยในขวดแก้วใส หรือแม้แต่การกลืนอาหารของผู้สูงอายุ การให้อาหารทางสายยาง (tube feeding) ของผู้ป่วยติดเตียง เด็ก และผู้สูงอายุ ซึ่งการใช้ประโยชน์นี้เกี่ยวกับการผสมสูตรอาหาร การควบคุมมาตรฐานความหนืดที่แน่นอน และการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม (Hron and Rosen, 2022

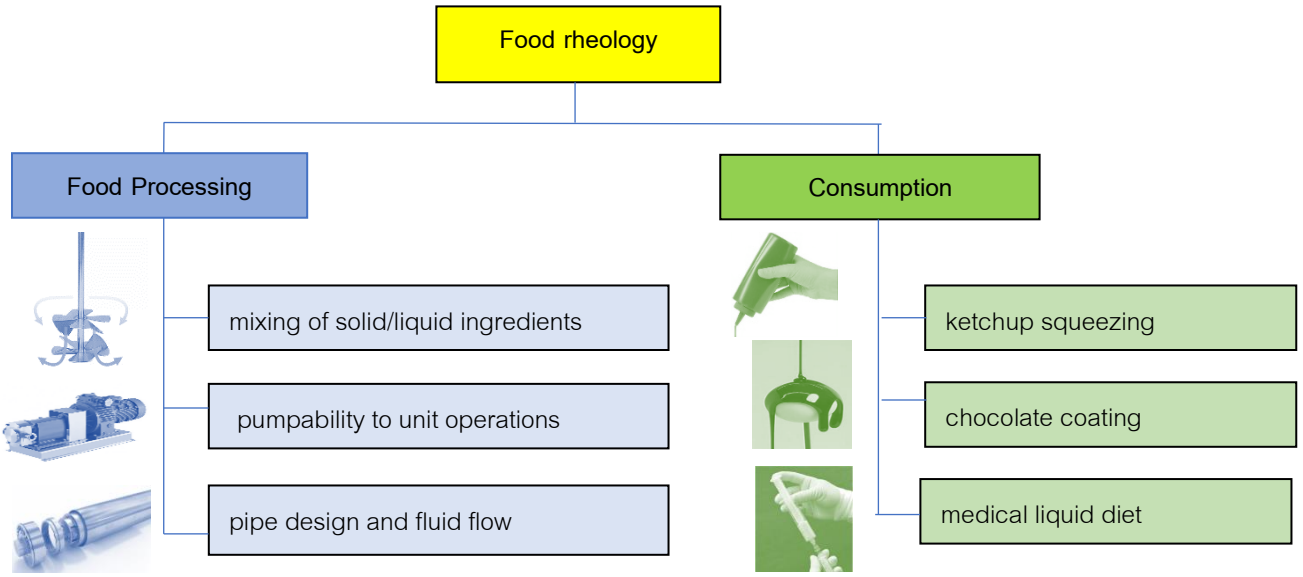

Figure 1 Food viscosity for food processing and consumption (Tattiyakul, 2014)

งานวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารแปรรูปไทยที่จำหน่ายในตลาดทั่วไป แล้วจัดกลุ่มอาหารตามองค์ประกอบพารามิเตอร์ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ ผลจากการทำชุดข้อมูลนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปกำหนดมาตรฐานและควบคุมความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหาร รวมทั้งใช้ประกอบการอ้างอิงผลิตภัณฑ์อาหารหนืดที่พัฒนาขึ้นใหม่ได้ เช่น อาหารทางการแพทย์ (medical food) อาหารนักบินอากาศ (astronaut food) และอาหารกองทัพทหาร (military food)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ตัวอย่างผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยมีทั้งหมด 27 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม พิจารณาจากการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในส่วนผสมได้แก่

กลุ่มที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่มีไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบ จำนวน 16 รายการ ได้แก่ ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ ซอสหอยนางรม ซอสมะม่วง น้ำจิ้มสุกี้ยากี้ น้ำจิ้มไก่ สังขยาใบเตย น้ำสลัด มายองเนส สเปรดอะโวคาโด แยมสับปะรด มาร์มาเลดส้ม สเปรดสตรอว์เบอร์รี่ ไอศกรีมมะพร้าว โยเกิร์ต และนมข้นหวาน

กลุ่มที่ 2 ผลิตภัณฑ์ไม่มีไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบ จำนวน 11 รายการ ได้แก่ ซีอิ๊วหวาน น้ำปลา ไซรัปกล้วย น้ำเชื่อมฟรุกโตส น้ำผลไม้เข้มข้น น้ำผึ้ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำกะทิ น้ำนมถั่วเหลือง และน้ำส้มสายชูหมัก

ตัวอย่างเหล่านี้ซื้อจากตลาดท้องถิ่นโดยสุ่มผลิตภัณฑ์ชนิดละ 2 หน่วยบรรจุ ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ต้องไม่หมดอายุและรายงานส่วนประกอบโดยประมาณเป็นร้อยละบนฉลากอาหารรวมทั้งไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์ สรุปใน ***Supplementary Table 1*** นำตัวอย่างมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและเปิดก่อนนำไปทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดช่วง 0-85 ^{o}Brix ด้วย Digital refractometer (ATAGO™3840, Japan) ก่อนการทดสอบความหนืดต่อไป

2. การทดสอบความหนืดผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทย

การทดสอบใช้ รีโอมิเตอร์ (rheometer, Anton-Paar's MCR302, Austria) กรณีตัวอย่างที่ไม่มีไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบและตักบรรจุในภาชนะได้จึงชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 20 กรัมใส่ลงในถ้วยสแตนเลสทรงกระบอกสูง 5.5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ใช้หัววัดทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร จุ่มลงไปลึก 3 เซนติเมตร เพื่อให้มีแรงต้านการหมุนตัวอย่างมากพอให้อ่านความหนืดได้ สำหรับตัวอย่างที่มีไฮโดรคอลลอยด์เป็นส่วนประกอบมีความหนืดสูงไม่สามารถบรรจุลงในถ้วยทรงกระบอกสูงได้ ทั้งเครื่องรีโอมิเตอร์ ไม่มีแรงหมุนเพียงพอเพื่อให้ตัวอย่างไหลได้จึงต้องเปลี่ยนไปใช้หัววัดชนิดแผ่นเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (PP50/TG) การทดสอบใช้ตัวอย่างประมาณ 5 กรัม มีชุดฐานรองรับที่ปรับอุณหภูมิและส่วนครอบตัวอย่างที่ป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างทดสอบ ระยะห่างระหว่างหัววัดและชุดฐานรองรับเมื่อมีตัวอย่าง 1 มิลลิเมตรจึงจะหมุนแล้วให้เกิดการไหลได้ ด้วยการเลือกใช้หัววัดทั้ง 2 แบบจึงจะวัดความหนืดของตัวอย่างทั้ง 27 ตัวอย่างได้ทั้งหมด

การทดสอบพฤติกรรมการไหลของตัวอย่างที่ใช้หัววัดทั้งสองแบบ กำหนดปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย ดังนี้

1) ผลของอัตราเฉือน วัดความหนืดที่เปลี่ยนเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนในช่วง 0.01 ถึง 100 1/วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราเฉือนนี้สัมพันธ์กับการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การผสม (10-1000 1/วินาที) การลำเลียงของเหลวในท่อ (10-1000 1/วินาที) การบรรจุอาหารเหลวหนืดลงไปในบรรจุภัณฑ์ (0.1-10 1/วินาที) และการเทอาหารเหลวบนผลิตภัณฑ์ (0.01-0.1 1/นาที) (Tattiyakul, 2014) (กรณีตัวอย่างไอศกรีมปล่อยตัวอย่างให้ละลายจาก -20 องศาเซลเซียส ก่อนทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ส่วนโยเกิร์ตทดสอบที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) บันทึกค่าความหนืด (viscosity) ที่เปลี่ยนไป ทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

หาค่าเฉลี่ยความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) และความเค้นเฉือน (shear stress) และแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) ประกอบ

2) ผลของอุณหภูมิ วัดความหนืดที่เปลี่ยนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในช่วง 10 ถึง 60 องศาเซลเซียส บันทึกค่าความหนืดปรากฏที่เปลี่ยนไป ทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยความหนืด

3. การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คำนวณความหนืด และจำแนกพฤติกรรมการไหลผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทย

การอธิบายพฤติกรรมการไหลของตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยที่กล่าวมาทั้งหมดอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพฤติกรรมการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลามีดังนี้

กรณีการไหลมีพฤติกรรมแบบนิวโตเนียนใช้แบบจำลองพาวเวอร์ ลอว์ (Power law model) (Bourne, 2002)

$$\sigma = k\,\dot{\gamma}^{n} \qquad (1)$$

กรณีการไหลมีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน ชนิดซูโดพลาสติก ใช้แบบจำลอง เฮอร์เชล-บัลค์ลี (Herschel-Bulkley model) ซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายความหนืดของอาหารส่วนใหญ่ (Bourne, 2002; Tattiyakul, 2014)

$$\sigma = \sigma_o + k\,\dot{\gamma}^{n} \qquad (2)$$

เมื่อ σ คือ ความเค้นเฉือน (shear stress) และ σ_o คือ ความเค้นเฉือนเริ่มต้น (yield stress) มีหน่วยพาสคัล (Pa)

k คือ ดัชนีความคงตัว (consistency index) มีหน่วยพาสคัล.วินาที (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน (shear rate) มีหน่วย 1 ต่อวินาที (1/s)

n คือ ค่าคงที่ดัชนีพฤติกรรมการไหล ไม่มีหน่วย โดยพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนมีค่า n เท่ากับ 1 แต่แบบนอนนิวโตเนียน ชนิดซูโดพลาสติกมีค่าน้อยกว่า 1 ส่วนแบบไดลาแทนมีค่า n มากกว่า 1 (Tattiyakul, 2014)

การสร้างสมการของผลิตภัณฑ์อาหารไทยแต่ละรายการใช้โปรแกรม Excel (Microsoft version 10, USA) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และ อัตราเฉือน เพื่อคำนวณค่า k และ n รวมทั้ง ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination, r^2) โดยกำหนด การยอมรับความน่าเชื่อถือของการใช้สมการแบบจำลองพาวเวอร์ ลอว์และ สมการ เฮอร์เชล-บัลค์ลี ไว้มากกว่า 0.97 (Kong *et al.*, 2010) แล้วจึงนำมาวิเคราะห์จัดกลุ่มผลิตภัณฑ์ตามพฤติกรรมการไหลว่าเป็นแบบนิวโตเนียน หรือนอนนิวโตเนียน ชนิด ซูโดพลาสติก

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยจำนวน 3 ชนิด ได้แก่ ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ และน้ำผึ้ง ในที่นี้เลือกซอสพริกและซอสมะเขือเทศเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก เครื่องจิ้มสองชนิด

ที่คนไทยนิยมบริโภคกับเนื้อทอด ไก่ทอด ลูกชิ้น มันฝรั่งทอด พิซซา อาหารเหล่านี้มีอุณหภูมิอย่างต่ำ 60 องศาเซลเซียสก่อนบริโภคขณะร้อน (Food Standard Australia New Zealand, 2020) ส่วน น้ำผึ้งเป็นตัวแทนของตัวอย่างที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนที่มักพบปัญหาการตกผลึกของน้ำตาล ดังนั้นการใช้อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียสเพื่อช่วยการหลอมของผลึกน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคส และการพาสเจอร์ไรซ์ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียสเพื่อทำลายยีสต์ธรรมชาติ (Subramanian *et. al*., 2007) จลนศาสตร์ของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดอธิบายด้วยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation) (Bourne,2002; Mezger, 2018; Tattiyakul, 2014) ดังต่อไปนี้

$$\eta_T = \eta_o \exp \frac{-E_\eta}{RT} \quad (3)$$

เมื่อ η_T และ η_o คือสัมประสิทธิ์ของความหนืด (Pa.s)

E_η คือพลังงานกระตุ้น (kJ) R คือค่าคงที่แก๊ส (Universal gas constant, 8.314 J/K.mol) และ

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

หากดำเนินการใส่ ลอกาลิทึมฐาน 10 ทั้งสองข้างสมการ จะได้

$$\log \eta_T = \log \eta_o + \frac{-E_\eta}{2.303RT} \quad (4)$$

เมื่อ สมการที่ 4 แสดงด้วยสมการเส้นตรงโดยมี E_η/R *เป็นความชัน และ* $\log \eta_o$ เป็นจุดตัดแกน Y

การสร้างสมการเส้นตรงของผลิตภัณฑ์อาหารไทยแต่ละรายการใช้โปรแกรม Excel (Microsoft version 10, USA) สร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \eta_T$ และ $1/T$ เพื่อคำนวณค่า E_η และ η_o (Ali *et al*., 2014; Koocheki *et al*., 2009; Trávníček *et al*., 2012) รายงานผลการคำนวณ E_η ออกมาได้

ผลการวิจัย

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยจำนวน 27 รายการที่นำมาวิเคราะห์ความหนืด 2 กลุ่มตามการเติมไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์ เช่น การเติมเจลาติน เพคติน และการไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ การทดสอบความหนืดด้วยรีโอมิเตอร์ที่อัตราเฉือนในช่วง 0.01 ถึง 100 1/วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส รายงานผลได้ดัง ***Table 1*** การเปรียบเทียบความเค้นเฉือนหรือมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อตัวอย่างแล้วทำให้ตัวอย่างเคลื่อนที่แยกขาดออกจากกันตามแนวระนาบแรงที่มากระทำ พบว่า สังขยาใบเตยเป็นตัวอย่างที่มีความเค้นเฉือนมากที่สุด คือ 979 พาสคัลซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำผึ้งที่มีค่าความเค้นเฉือนลำดับที่ 2 คือ 932 พาสคัล ซึ่งตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดแม้จะมีค่าความเค้นเฉือนใกล้เคียงกันแต่กลับมีพฤติกรรมการไหลแตกต่างกัน โดยสังขยาใบเตยจัดเป็นอาหารที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ส่วนน้ำผึ้งจัดเป็นนิวโตเนียน องค์ประกอบคาร์โบไฮเดรตในส่วนผสมผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน สังขยามีแป้งข้าวโพดและน้ำตาลซูโครสทำให้เกิดเจลหนืดแม้มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดเพียง 33.5 °Brix ส่วนน้ำผึ้งมี

เฉพาะน้ำตาลฟรุกโตส กลูโคสความเข้มข้นสูงปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดมีถึง 80.6 °Brix (*Supplementary Table 1*) อาหารจะออกแรงต้านการเพิ่มอัตราเฉือนทีละน้อยจนกระทั่งอัตราเฉือนที่มากเกินกว่าที่อาหารจะรองรับแรงเฉือนได้ อาหารนั้นก็จะเกิดการไหลซึ่งรายงานออกมาเป็นค่าความหนืด

ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนนี้เรียกว่า ความหนืด ซึ่งความหนืดที่อ่านค่าได้ ณ อัตราเฉือนหนึ่ง ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่าเป็นความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) เช่น ความหนืดปรากฏของน้ำส้มสายชูหมัก เท่ากับ 0.015 พาสคัล.วินาที ที่อัตราเฉือน 100 1/วินาที อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความหนืดของตัวอย่างอาหารเพิ่มมากขึ้นตามความเค้นเฉือนโดยตัวอย่างที่มีความหนืดสูงจาก *Table 1* เช่น สังขยาใบเตย น้ำผึ้ง แยมสับปะรด เป็นต้น

การจำแนกค่าความหนืดปรากฏของตัวอย่าง 27 ตัวอย่าง ที่ 100 1/วินาที แบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดน้อยกว่า 0.1 Pa.s จำนวน 9 รายการ ได้แก่ น้ำผลไม้เข้มข้น น้ำเชื่อมฟรุกโตส ซีอิ๊วหวาน น้ำมันทานตะวัน กะทิ น้ำมันมะพร้าว น้ำนมถั่วเหลือง น้ำปลา และน้ำส้มสายชูหมัก

กลุ่มที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดระหว่าง 0.1-1 Pa.s จำนวน 9 รายการ ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ โยเกิร์ต น้ำสลัดสเปรดอะโวคาโด น้ำจิ้มไก่ ซอสพริก ไซรัปกล้วย ซอสหอยนางรม และน้ำจิ้มสุกี้ยากี้

กลุ่มที่ 3 ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดมากกว่า 1 Pa.s จำนวน 9 รายการ ได้แก่ สังขยาใบเตย น้ำผึ้ง แยมสับปะรด มายองเนส มาร์มาเลด น้ำนมข้นหวาน สเปรดสตรอว์เบอร์รี่ ซอสมะม่วง และไอศกรีมมะพร้าว

พฤติกรรมการไหลของของตัวอย่างอาหารที่นำมาศึกษาแสดงใน *Figure 1* กล่าวคือ กลุ่มที่ 1 พฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียน การเลือกตัวอย่างจากใน *Table1* สังขยาใบเตยมีความหนืดปรากฏสูงที่สุด รองลงมาคือ มายองเนส ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ และน้ำผลไม้เข้มข้น มาเปรียบเทียบการลดลงของความหนืดเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน (ล็อก-ล็อก สเกล) กล่าวคือ การเพิ่มอัตราเฉือนจาก 0.1 1/วินาที เป็น 100 1/วินาที ส่งผลต่อความหนืดที่ลดลงตามอัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นไป 1,000 เท่า ใน *Figure 1(a)* เลือกตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง ได้แก่ สังขยา มายองเนส ซอสมะเขือเทศ ซอสพริก และน้ำผลไม้เข้มข้น เพื่อให้เห็นภาพรวมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของตัวอย่างอาหารที่มีความหนืดสูงและต่ำ พบว่า สังขยาใบเตยมีความหนืด 829 (หรือ 2.92 ล็อกสเกล) พาสคัล.วินาที ที่อัตราเฉือน 0.1 1/วินาที เหลือ 9.79 (หรือ 0.99 ล็อกสเกล) พาสคัล.วินาที ที่อัตราเฉือน 100 1/วินาที พฤติกรรมนี้จัดเป็นลักษณะของเชียร์ ทินนิ่ง หรือ ซูโดพลาสติก ซึ่งพบในผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่นำมาศึกษารวม 18 ชนิด เช่น มายองเนส ซอสมะเขือเทศ ซอสพริก น้ำผลไม้เข้มข้น เป็นต้น (*Table 1*) ในทางตรงกันข้ามกลุ่มที่ 2 พฤติกรรมการไหลเป็นแบบนิวโตเนียนของผลิตภัณฑ์อาหารไทยใน *Table 1* จำนวน 9 ชนิด เลือกตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง ได้แก่ น้ำผึ้งที่มีความหนืดสูงสุด รองลงมาคือ ฟรุกโตสไซรัป น้ำมันมะพร้าว และ น้ำส้มสายชูหมักที่มีความหนืดต่ำที่สุดมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏและอัตราเฉือน (ล็อก-ล็อกสเกล) ดัง *Figure 1(b)* พบว่า ความหนืดเป็นอิสระไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่เปลี่ยนแปลงไป และพบพฤติกรรมลักษณะนี้ในตัวอย่างจากการวิจัยนี้ เช่น ไซรัปกล้วย ซอสเปรี้ยว น้ำมันมะพร้าว น้ำนมถั่วเหลือง และน้ำปลา ซึ่งคล้ายกับข้อมูลที่รายงานของ Bozdogan (2015) พบว่า น้ำส้มเข้มข้น (50 °Brix) น้ำมันมะพร้าวมีพฤติกรรมการไหลนิวโตเนียน

Table 1 Summary of viscosity, shear stress and flow behaviour of some Thai processed foods

Thai processed food	Shear stress (Pa)	Apparent viscosity (Pa.s)* at 100 s^{-1}	Flow behaviour index
Non-Newtonian (n<1)			
pandan custard	979 ±2.2	9.74 ±0.01	0.2494
pineapple jam	656 ±3.6	6.55 ±0.03	0.1449
mayonnaise	425 ±2.8	4.25 ±0.02	0.2256
marmalade	316 ±3.1	3.15 ±0.03	0.0724
sweet condensed milk	305±3.7	3.05±0.01	0.6244
strawberry spread	269 ±1.9	2.69 ±0.02	0.1633
mango sauce	209 ±2.7	2.08 ±0.05	0.0215
coconut ice cream	109 ±3.6	1.07 ±0.01	0.1416
ketchup	103 ±4.0	1.01 ±0.01	0.1399
plain yoghurt	75.8 ±2.9	0.76 ±0.02	0.1913
salad dressing	66.2 ±3.0	0.66 ±0.03	0.2081
avocado spread	58.8±1.2	0.59±0.02	0.2516
chicken dipping sauce	44.4 ±2.1	0.43 ±0.01	0.3245
chilli sauce	32 ±1.3	0.31 ±0.01	0.2875
oyster sauce	25.6 ±1.2	0.25 ±0.02	0.3733
sukiyaki sauce	29.9 ±1.4	0.23 ±0.02	0.2510
concentrated fruit juice	10.3 ±2.7	0.10 ±0.01	0.4268
coconut milk	0.58±0.01	0.05±0.03	0.5533
Newtonian (n~1)			
honey	932 ±3.2	9.32 ±0.2	0.9829
banana syrup	31.4 ±1.4	0.31 ±0.01	0.9729
sunflower oil	6.76±0.22	0.07±0.03	0.9941
fructose syrup	5.56±0.12	0.06±0.01	1.0208
coconut oil	5.29 ±0.13	0.05 ±0.02	0.9982
sweet soy sauce	4.25 ±0.84	0.04 ±0.01	0.9574
soy milk	0.28±0.03	0.03±0.01	0.9980
fish sauce	0.26±0.01	0.03±0.02	0.9958
vinegar	0.15±0.02	0.015±0.03	1.0607

Note : * average from five replications±standard deviation, measurement at 25°C (except plain yoghurt measured at 4°C)

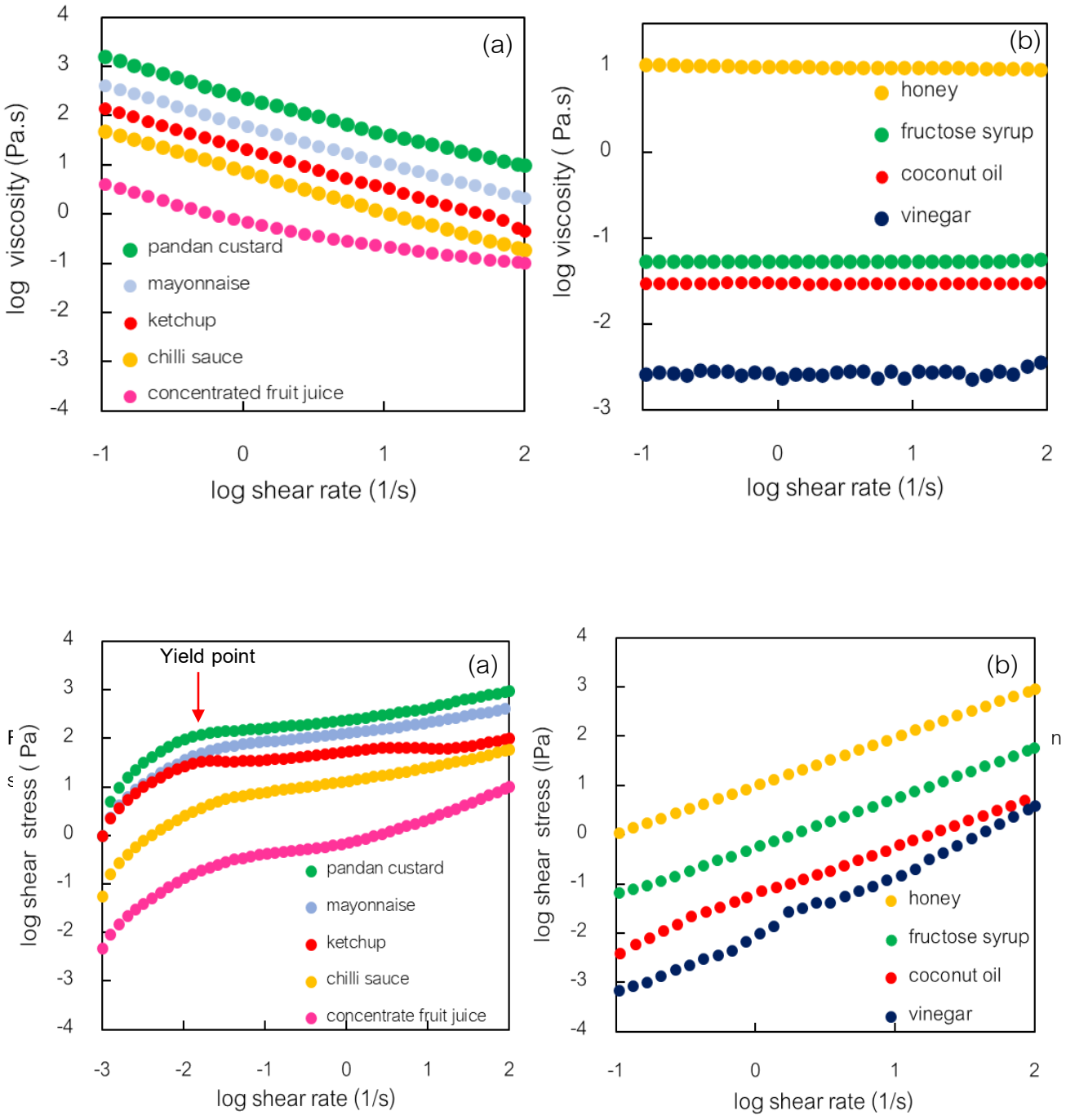

Figure 2 Viscosity and shear stress of Thai processed foods as a function of shear rate at 25°C showing the two beahviours (a) non-Newtonian samples and (b) Newtonian samples.

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์ความหนืดผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยจำนวน 27 ชนิด นำตัวอย่างที่มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบนอนนิวโตเนียนและนิวโตเนียนใน ***Figure(1)*** มาแสดงข้อมูลด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน (พาสคัล) และ อัตราเฉือน (พาสคัล.วินาที) ในล็อกสเกล ดัง ***Figure 2*** พบว่า กลุ่มตัวอย่างอาหารที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียนมีลักษณะการเพิ่มความเค้นของตัวอย่างตามอัตราเฉือนจนถึงจุดสูงสุดที่ตัวอย่างอาหารมีความเค้นสูงสุด เรียกว่า จุดความเค้นเฉือนเริ่มต้น (yield point) จุดนี้ตัวอย่างอาหารจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ หากอัตราเฉือนมากกว่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น (yield stress) นี้ ตัวอย่างอาหารจะเกิดการเปลี่ยนสภาพอย่างถาวร เช่น การไหล และมีความเค้นเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลาแบบซูโดพลาสติก

การทดสอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเฮอร์เชล-บัลค์ลี แสดงผลใน ***Table 2*** พบว่า ตัวอย่างมีค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (***n***) แสดงแบบนอนนิวโตเนียน ชนิดซูโดพลาสติกที่ค่าน้อยกว่า 1 (Tattiyakul, 2014) จากตารางซอสมะม่วงมีค่าเอ็นเพียง 0.0215 ส่วนน้ำนมข้นหวานมีค่าเอ็นมากถึง 0.624 ส่วนค่าคงที่เค (***k***) หรือ ดัชนีความคงตัว พบว่า ผลิตภัณฑ์กลุ่มซอสและน้ำจิ้มเครื่องปรุงรสอาหาร เช่น ซอสมะม่วง สังชยาใบเตย มายองเนส ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น มาร์มาเลด แยมสับปะรด สเปรดสตรอว์เบอร์รี่ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวสูง รวมทั้งมีค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น ที่มากกว่าตัวอย่างอาหารที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียนอื่น ๆ ใน ***Table 2*** นอกจากนี้หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (r^2) ตัวอย่างจำนวน 20 ตัวอย่าง ทำนายด้วยสมการแบบจำลองพาวเวอร์ ลอว์และ สมการ เฮอร์เชล-บัลค์ลี ได้ (Kong *et al.,* 2010) มีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจในช่วง 0.9816-1 ยกเว้น ผลิตภัณฑ์ซอสมะม่วง แยมสับปะรด มาร์มาเลดส้ม สเปรดสตรอว์เบอร์รี่ ไอศกรีมมะพร้าว และโยเกิร์ต ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำกว่าที่ตัดสินใจยอมรับ สาเหตุอาจเป็นเพราะผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) คือ ลักษณะหยุ่นและหนืด และน้ำกะทิอาจมีอนุภาคของไขมันแขวนลอยจึงต้องใช้สมการวิสโคอิลาสติกอื่น ๆ มาอธิบายพฤติกรรมการไหลมากกว่า

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวอย่างนิวโตเนียนพบค่าดัชนีพฤติกรรมการไหลใกล้เคียงกับ 1 ไม่มีความเค้นเฉือนเริ่มต้นเป็นไปตามที่คาดไว้ เพราะผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดและเกิดเจล ซึ่งจะเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลเป็นนอนนิวโตเนียนได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราเฉือนเป็นเส้นตรง ส่วนค่าดัชนีความคงตัว พบว่า ผลิตภัณฑ์ไซรัป น้ำมันพืช เครื่องจิ้มที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ เช่น ซอสเปรี้ยว น้ำปลามีความคงตัวต่อการต้านการไหลต่ำ กล่าวคือ ผลิตภัณฑ์คงตัวต่อแรงกระทำได้น้อยจึงทำให้เกินการไหลได้ง่ายกว่า การเติมสารเพิ่มความคงตัวเช่นในงานวิจัยการแปรรูปน้ำปลาของ Tien *et al.* (2018) และ Witoro (2014) จึงมีการเพิ่มความคงตัวด้วยการเติมน้ำมะขามข้นและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ ยกเว้น น้ำผึ้งที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลธรรมชาติเช่น ฟรุกโทส กลูโคส มอลโตส ซูโครส (Nguyen *et al*., 2019) และมีรายงานว่าน้ำผึ้งแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนเมื่อมีการทดสอบด้านวิทยากระแส (rheology) (Faustino and Pinheiro, 2021, Nguyen *et al*., 2018)

Table 2 Summary of viscosity models (Herschel-Bulkley and Power Law models) of some Thai processed foods

Thai processed food	Herschel-Bulkley model			
	$n*$	k	σ_o (Pa)	r^2
mango sauce	0.0215	166.72	119.95	0.7202
marmalade	0.0724	156.10	78.70	0.7185
ketchup	0.1399	53.52	24.93	0.9887
coconut ice cream	0.1416	45.00	23.28	0.9100
pineapple jam	0.1449	292.48	129.12	0.8214
strawberry spread	0.1633	124.54	50.82	0.9776
plain yoghurt	0.1913	25.01	9.29	0.9253
salad dressing	0.2081	22.30	6.53	0.9876
mayonnaise	0.2256	136.05	36.31	0.9890
avocado spread	0.2315	185.32	45.88	0.9763
pandan custard	0.2494	285.23	102.10	0.9873
sukiyaki sauce	0.2501	8.86	2.19	0.9931
chilli sauce	0.2875	13.96	2.57	0.9900
chicken dipping sauce	0.3245	7.25	1.78	0.9816
oyster sauce	0.3733	4.15	0.42	0.9992
concentrated fruit juice	0.4268	1.02	0.12	0.9836
coconut milk	0.5533	1.07	0.03	0.9342
sweet condensed milk	0.6244	14.05	0.53	0.9893
honey	0.9829	10.07	0	1.0000
banana syrup	0.9729	5.87	0	0.9999
fructose syrup	0.9982	0.55	0	0.9998
sweet soy sauce	0.9574	0.0499	0	0.9961
sunflower oil	0.9941	0.0707	0	0.9998
coconut oil	1.0208	0.0551	0	0.9975
soy milk	0.9980	0.0032	0	0.9943
fish sauce	0.9958	0.0028	0	0.9944
vinegar	1.0607	0.0095	0	0.9964

Note : * Average from five replications, measurement at 25°C (except plain yoghurt measured at 4°C)

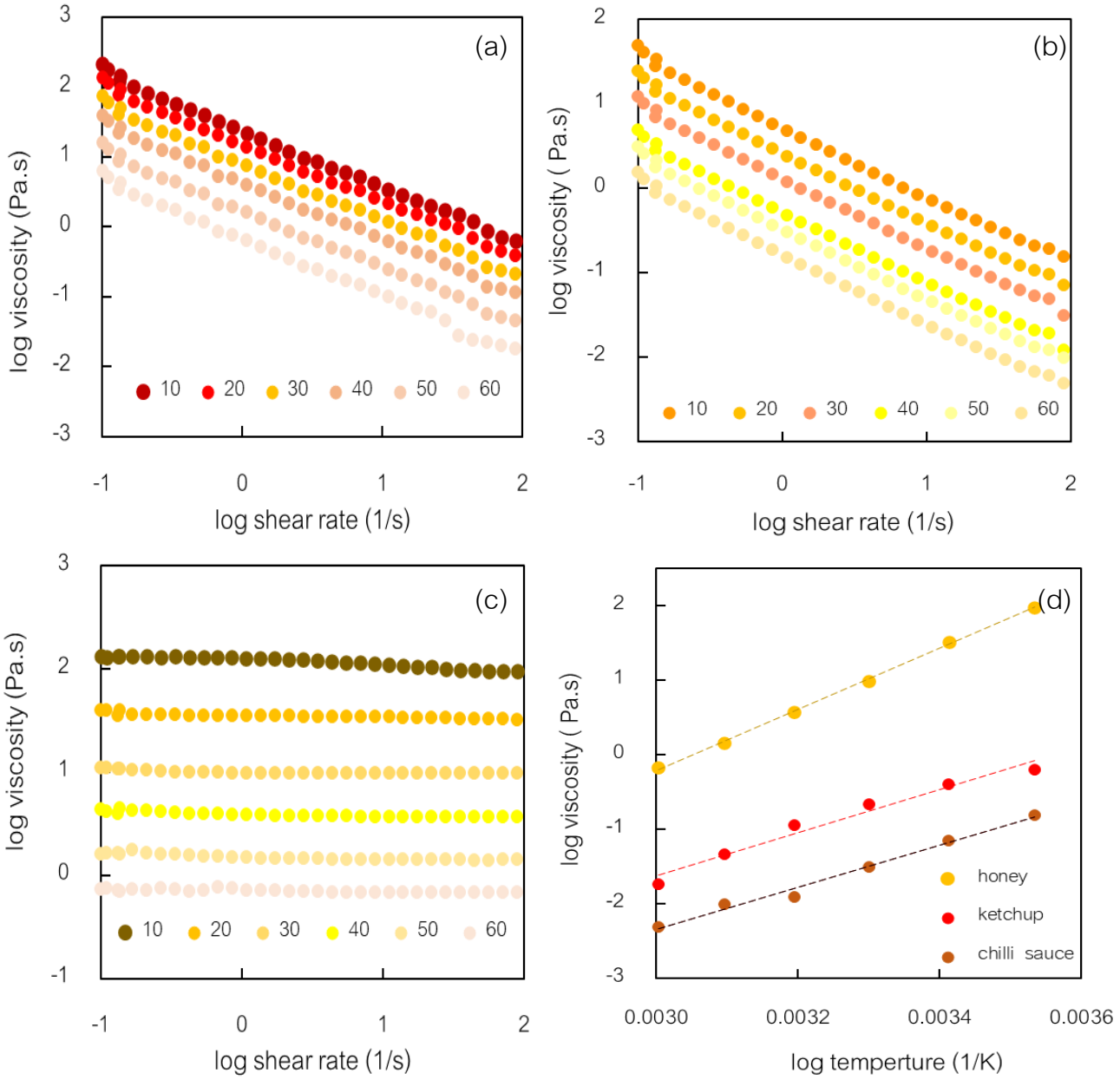

Figure 3 Temperature dependence on viscosity of (a) ketchup (b) chilli sauce (c) honey and (d) evaluation of the Arrhenius model for the three Thai processed foods

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหาร ในที่นี้ได้คัดเลือกผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ ซอสพริก และน้ำผึ้ง มาศึกษาความหนืดที่อุณหภูมิ 10, 20, 30, 40, 50, และ 60 องศาเซลเซียส ได้ผลดัง ***Figure 3 (a-c)*** โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนืดและอัตราเฉือนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า ทั้ง 3 ผลิตภัณฑ์ ซอสมะเขือเทศ ซอสพริก และน้ำผึ้ง มีความหนืดที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส คือ 83.17, 48.98 และ 132 พาสคัล มีความหนืดลดลงเหลือ 10.23, 1.55 และ 0.93 พาสคัลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราเฉือน 0.1 1/วินาที อุณหภูมิจึงมีผลต่อการไหลของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้พฤติกรรมการไหลของซอสมะเขือเทศและซอสพริกมีพฤติกรรมเป็นซูโดพลาสติกและพฤติกรรมนิวโตเนียนของน้ำผึ้ง

การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวอย่างทั้ง 3 ด้วยสมการของอาร์รีเนียสโดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด ที่อัตราเฉือน 100 1/วินาที กับ 1/อุณหภูมิ (เคลวิน) ได้สมการเส้นตรงดัง ***Figure 3 (d)*** จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าคงที่ความหนืด (η_o) และพลังงานกระตุ้น (E_η, kJ) โดยสรุปผลการคำนวณใน ***Table 3*** ซึ่งพบว่าพลังงานกระตุ้นของน้ำผึ้งมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือซอสมะเขือเทศ และซอสพริก ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบกับการศึกษาในเอกสารอ้างอิงของแต่ละผลิตภัณฑ์มีผลการศึกษาพบว่าผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าในกรณีของน้ำผึ้งที่นำมาอ้างอิงเนื่องจากมีความต่างของปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ในน้ำผึ้งที่ร้อยละ 82 มากกว่าน้ำผึ้งของไทยร้อยละ 80 การที่มีปริมาณของแข็งเช่น น้ำตาลปริมาณมากขึ้นทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงจึงทำให้มีความหนืดมากกว่าและการทำลายแรงระหว่างโมเลกุลจึงใช้พลังงานกระตุ้นมากกว่า (Trávníček *et al.* (2012) ส่วนซอสมะเขือเทศและซอสพริกของไทยมีปริมาณของแข็งคือเนื้อมะเขือเทศร้อละ 75 และเนื้อพริกร้อยละ 45 มากกว่ารวมทั้งการเติม แซนแทนกัม กัวกัม ให้ความข้นหนืดทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดมากกว่าผลิตภัณฑ์ของต่างประเทศที่มีเนื้อมะเขือเทศร้อยละ 55 และเนื้อพริกร้อยละ 28 (Ali *et al*., 2014; Koocheki *et al*.,2009) ดังนั้น พลังงานกระตุ้นให้อนุภาคของแข็งในระบบเกิดการเคลื่อนที่และไหลได้จึงต้องการพลังงานมากกว่า

Table 3 Comparison of temperature dependence on viscosity described by the Arrhenius model of some Thai processed foods

Thai processed food	η_o (Pa.s)	*Ea (kJ)*	r^2	Ea_{ref} *(kJ)*	Reference
ketchup	5.30×10^{-11}	55.23	0.969	21.48	Koocheki *et al.* (2009)
chilli sauce	1.43×10^{-11}	53.16	0.988	7.05	Ali *et al*. (2014)
honey	2.91×10^{-13}	78.64	0.999	105.90	Trávníček *et al.* (2012)

วิจารณ์ผลการวิจัย

ความหนืดของตัวอย่างอาหารเกิดจากการที่โมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีในอาหารต้านทานความเค้นที่พยายามออกแรงบิดของทรงกระบอก หากว่าความเค้นเฉือนที่เพิ่มมากกว่าแรงทางเคมีที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของอาหาร เช่น พันธะไฮโดรเจน แรงไอออนิก อาหารก็จะเกิดการเคลื่อนที่และไหลได้ในที่สุด (Mazger, 2018) โดยทรงกระบอกที่จุ่มในตัวอย่างอาหารจะ

เกิดการหมุนเคลื่อนที่ ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีอาหารขึ้นกับขนาดโมเลกุลอาหารและโครงสร้างเป็นตัวกำหนด ความหนืดและพฤติกรรมการไหล เช่น โมเลกุลของน้ำตาล เกลือ กรดอินทรีย์ ที่พบในอาหารมักละลายในน้ำและมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นพันธะที่ถูกทำลายได้ง่าย ดังนั้น ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาล เช่น น้ำผึ้ง ไซรัปข้นจึงถูกแรงรบกวนโครงสร้างอาหารและเกิดการไหลได้ง่าย โมเลกุลขนาดเล็กเหล่านี้จึงสามารถจัดเรียงโครงสร้างให้เรียงตัวไปตามทิศทางการไหลทำให้ลดแรงเสียดทานลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนให้มากขึ้นความหนืดจึงเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งเป็นลักษณะของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนิวโตเนียน นั่นคือ ความหนืดมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มการเฉือน (Kassim and Sarow 2020) การเพิ่มความหนืดของอาหารกลุ่มนี้ขึ้นกับปัจจัยสำคัญคือความเข้มข้นขององค์ประกอบโมเลกุลเล็ก ๆ เหล่านี้ในระบบอาหาร เช่น น้ำผึ้งที่มีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 20 ย่อมส่งผลต่อความหนืดที่ลดลงเพราะน้ำทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซส์ (plasticizer) ทำให้ลดแรงพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลน้ำตาลต่าง ๆ ในน้ำผึ้ง (Trávníček *at al*., 2012)

การวิเคราะห์ความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหารที่เกิดจากการเพิ่มอัตราเฉือนแล้วทำให้ความหนืดลดลง ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลส่วนใหญ่ที่พบในตัวอย่างที่ศึกษาครั้งนี้ มีเหตุผลมาจากระบบอาหารที่มีการเติมสารไฮโดรคอลลอย์ ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์โครงสร้างที่เป็นโมเลกุลใหญ่ ละลายผสมกับน้ำในระบบอาหารได้ ไฮโดรคอลลอยด์หลายชนิดในระบบอาหารเกิดเจลได้ เช่น เพคติน เจลาติน สตาร์ช ทำให้เกิดการอุ้มน้ำและเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนในระบบอาหารได้เพิ่มขึ้น (Rennard *et al.,* 2006) ตัวอย่างสังขยาใบเตยมีการเติมแป้งข้าวโพดเพิ่มความหนืด การเติมไซรัปและไข่แดงในมายองเนส การเติมแซนแทนกัมในซอสมะม่วง (ดู ***Supplementary Table 1***) นอกจากนี้ของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ เช่น น้ำตาล เป็นส่วนประกอบสำคัญในแยมมากกว่าร้อยละ 65 (Food and Drug Administration, 2000) สปเรดผลไม้ (ปริมาณของแข็งร้อยละ 50) มีไฮโดรคอลลอยด์ เช่น เพคตินและเจลาตินผสมจึงเพิ่มความคงตัวให้กับผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้ ไฮโดรคอลลอย์ที่แขวนลอยในผลิตภัณฑ์จึงรบกวนการไหลขององค์ประกอบย่อยอื่น ๆ เช่น น้ำตาล เกลือ รวมทั้งโครงสร้างกิ่งก้านของพอลิเมอร์ของไฮโดรคอลลอย์ เช่น แซนแทนกัน เซลลูโลส สตาร์ช ก่อให้เกิดการหน่วงแรงเฉือนในขณะทำการวิเคราะห์ความหนืด (Gallegos *et al.,* 2004)

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหารในครั้งนี้ ซอสพริก ซอสมะเขือเทศและน้ำผึ้ง มีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มความร้อนให้กับระบบอาหาร เนื่องจากความร้อนทำให้พันธะทางเคมีเกิดการสั่นและเริ่มคลายแรงระหว่างโมเลกุลขนาดเล็กเช่น น้ำ น้ำตาล เกลือ ในระบบอาหาร หรือแม้แต่โมเลกุลขนาดใหญ่ในสายพอลิเมอร์ที่มีสายตรงเช่น สตาร์ช เจลาติน หรือพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านในพอลิแซคคาร์ไรด์ต่าง ๆ ก็ได้รับพลังงานจนเกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลส่งผลให้เกิดการไหลและความหนืดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระบบอาหารนั้น ๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการของอาร์รีเนียส ดังนั้น การนำข้อมูลการวิเคราะห์ความหนืดและพฤติกรรมการไหลของอาหารแปรรูปไทยจึงสามารถอธิบายได้ด้วยค่าพารามิเตอร์หลายค่าที่เกี่ยวข้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ ความเค้นเฉือน อัตราเฉือน ความเค้นเฉือนเริ่มต้น ดัชนีพฤติกรรมการไหล ดัชนีความคงตัว และพลังงานกระตุ้น ปัจจุบันนี้มาตรฐานของผลิตภัณฑ์อาหารไทยยังไม่ได้นำความหนืดและพารามิเตอร์ประกอบอื่น ๆ ไปเป็นดัชนีกายภาพในการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหาร เช่นเดียวกับค่าทางเคมี ค่าทางจุลินทรีย์ และค่าทางประสาทสัมผัส ดังนั้น งานวิจัยเรื่องนี้จึงแสดงภาพรวมของความหนืดและพฤติกรรมการไหลของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยที่นำไปพิจารณาประกอบการกำหนดมาตรฐานอาหารที่เกี่ยวข้องกับความหนืดเพื่อให้มาตรฐานอาหารไทยมีความสมบูรณ์ด้านค่ากายภาพมากขึ้น

สรุปผลการวิจัย

ความหนืดของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไทยจำนวน 27 ชนิดนำมาศึกษาทางรีโอโลยี จำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ นอนนิวโตเนียน จำนวน 18 ชนิด ส่วนใหญ่เป็น เครื่องจิ้ม เช่น ซอส น้ำสลัด มายองเนส นมข้นหวาน ที่มีส่วนผสมของไฮโดรคอลลอยด์ และ นิวโตเนียน 9 ชนิด เช่น น้ำผึ้ง ไซรัป ซึ่งมีน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้พบพฤติกรรมแบบนี้ในน้ำมันพืช และน้ำส้มสายชูหมัก พฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียนอธิบายด้วยสมการเฮอร์เชล-บัลค์ลี และพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียนอธิบายด้วยสมการพาวเวอร์ ลอว์ ความแตกต่างของพฤติกรรมทั้งสองเมื่อรายงานด้วยสมการ คือ การไหลแบบนอนนิวโตเนียนมีค่าดัชนีการไหลต่ำกว่า คือมีค่าในช่วง 0.002-0.6 และพบค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น ส่วนการไหลนิวโตเนียนมีค่าดัชนีการไหลใกล้เคียงกับ 1 และไม่พบค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนืด แต่ไม่เปลี่ยนพฤติกรรมการไหลของตัวอย่างแบบนอนนิวโตเนียนและแบบนิวโตเนียนที่มีอยู่เดิม โดยค่าพลังงานกระตุ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็นพลังงานต่ำสุดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารไทยแปรรูปเกิดการไหลได้ งานวิจัยเรื่องนี้อธิบาย ความหนืดเป็นพารามิเตอร์ที่มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมอาหารในด้านการควบคุมกระบวนการผลิตอาหารเหลวให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดที่เหมาะสมกับหน่วยปฏิบัติการอาหาร เช่น การไหลในท่อ การผสม การนวด การบรรจุลงขวด ด้านการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความหนืดเหมาะสมไหลออกจากขวดบรรจุภัณฑ์ การนำผลิตภัณฑ์อาหารหนืดไปทาหรือเคลือบผิวหน้า และการพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยนำความหนืดและพฤติกรรมการไหลอาหารต่าง ๆ จากงานวิจัยมาเทียบเคียงกับผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ปรับส่วนผสมเพื่อผลคุณค่าโภชนาการ หรือเปลี่ยนวัตถุดิบเพื่อปรับต้นทุนการผลิต เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

Abbas, K. A., Abdulkarim, S. M., Saleh, A. M. and Ebrahimian, M. (2010). Suitability of viscosity measurement methods for liquid food viscosity and applicability in food industry-A review. *Journal of Food, Agriculture Environment*, *8*(3&4), 100-107.

Ali, N. A., Khalid, N. I., Aziz, N. A.B., Shamsudin, R., Taip, F. S. (2014). Investigation of fouling deposit formation during pasteurization of chili sauce by using lab-scale concentric tube-pasteurizer. *Journal of Engineering Science and Technology, 9*(3), 334-346.

Apintanapong, M. (2013). Correlation between puff ability and pasting properties of RD6 glutinous rice. *Agricultural Science Journal*, *44*(2) (supplemented), 33-36. (in Thai).

Bozdogan, A. (2015) Viscosity behavior of bitter orange (*Citrus aurantium*) juice as affected by temperature and concentration. *Journal of Food*, 13(4), 535-540. DOI: 10.1080/19476337.2015.1012120

Bourne, M. (2002). *Food texture and viscosity: concept and measurement*. 2nd edition. *London*: Academic Press.

Faustino, C. and Pinheiro, L. (2021). Analytical rheology of honey: a state-of-the-art review. *Foods*, *10*, 1709. https://doi.org/10.3390/foods10081709

Food and Drug Administration. (2000). *Notification of The Ministry of Public Health (No. 213) B.E. 2543 (2000) Re: Jam, Jelly, and Marmalade in sealed containers.* Nonthaburi, Ministry of Public Health. (in Thai).

Food Standard Australia New Zealand. (2020). Food temperature control. Government of Western Australia, Department of Health.

Gallegos, C., Franco, J. H. and Partal, P. (2004). Rheology of food dispersions in Rheology review (pp. 19-65). UK: British Society of Rheology.

Hron, B. and Rosen, R. (2022). Viscosity of commercial food-based formulas and home prepared blenderized feed. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition, 70*(6), DOI:10.1097/MPG.0000000000002657

Kassim, M. S. and Sarow, S. A. (2020). Flow of viscous fluids in food processing industry: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, *870012033*(2020), DOI: 10.1088/1757-899x1870/1/012032

Komg, X., Kasapis, S., Bertoft, E., and Corke, H. (2010). Rheological properties of starches from grain amaranth and their relationship to starch structure. *Starch*, 62, 303-308.

Koocheki, A., Ghaniddi, A., Razavi, S. M. A. and Martazavi, S. A. (2009). The rheological properties of ketchup as a function of different hydrocolloids and temperature. *International Journal of Food Science and Technology*. *44*(3), 596-602.

Mezger, T. G. (2018). Applied rheology. Austria: Anton Paar GmbH.

Nguyen, H. T. L., Panyoyai, N., Paramita, V. D., Mantri, N. and Kasapis, S. (2018). Physicochemical and viscoelastic properties of honey from medicinal plants. *Food Chemistry*, *24*, 143-149.

Nguyen, H. T. L., Panyoyai, N., Kasapis, S., Pang, E. and Mantri, (2019). Honey and its role in relieving multiple facets of atherosclerosis. *Nutrients*, 14;11(1):167. DOI: 10.3390/nu11010167.

Renard, D., van de Velde, F., Visschers, R. W. (2006). The gap between food gel structure, texture, and perception. *Food Hydrocolloids*, *20*, 423-431.

Subramarian, R., Hebbar, H. U., and Rastogi, N. K. (2007). Processing of honey: a review. *International Journal of Food Properties, 106*, 127-143.

Tabilo-Munizaga, G. and Barbosa-Canovas, G. V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, *67*, 147-156.

Tattiyakul, J. (2014). *Food rheology*. Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai).

Thaunkhong, K., Uttapap, D., Puncha-arnon, S., Rungsardthong, V. and Puttanlek, C. (2014). Study on Paste behaviour of native and modified canna starches for use as a thickening agent. *KMUTT Research & Development Journal*. *37*(1), 61-76. (in Thai).

Tien, N. P., Siripongvutikorn, S. and Usawakesmanee, W. (2018). Prototype of Vietnamese tamarind fish sauce fortified with iron, zinc, and vitamin A. *Food and Raw materials*, *6*(1), 110-119.

Trávníček, P., Vítěz, T. and Přidal, A. (2012). Rheological properties of honey. *Scientia Agriculturae Bohemica*, *43,* 2012 (4), 160–165.

Witoro, Y. Windrati, W. S., Taruna, I., Afriliana, A., Assadam, A. (2014). Characteristics and sensory analysis of ketchup and sauce products from “Blbisan” fish hydrolysate. *American Journal of Food Science and Technology*, *2*(6), 203-208.

Supplementary Table 1 Food components of Thai processed foods with viscous characteristics

Products	Ingredients (%)				Sugar (%)	Salt (%)	Food hydrocolloids	Total (%)	Total soluble solids (°Brix)
chilli sauce	chilli	45	vinegar	14	17	5	xanthan gum/hydroxypropyl distarch phosphate	91	32.5
			garlic	10					
ketchup	tomato	75	vinegar	6	15	2.8	guar gum/hydroxypropyl distarch phosphate	98.8	35.5
oyster sauce	oyster	30	soy sauce	28.8	10.1	8.1	corn starch/modified starch	77	28.2
mango sauce	mango	81.25	-	-	18.75	-	-	100	53.6
sukiyaki sauce	chilli	18	vinegar	14	27	5	xanthan gum	71	21.8
			soy sauce	7					
chicken dipping sauce	chilli	18	vinegar	10	40	4	guar gum/hydroxypropyl distarch phosphate	78	61.2
			garlic	6					
pandan custard	coconut milk	48.5	egg York	8	14.5	0.1	-	75.95	33.5
			corn flour	4.85					
salad dressing	egg york	46	lemon juice	6	1	1	xanthan gum/modified starch	100	38
	olive oil	46							
mayonnaise	syrup	34	soy bean oil	10	-	2	xanthan gum/modified starch	53	35.2
			vinegar	3					
			egg york	4					
pineapple jam	pineapple	31	-	-	61.5	-	pectin	92.5	67.1

Supplementary Table 1 Food components of Thai processed foods with viscous characteristics (cont.)

Products	Ingredients (%)				Sugar (%)	Salt (%)	Food hydrocolloids	Total (%)	Total soluble solids (°Brix)
avocado spread	avocado	55	mayonnaise	35	3	2	-	95	55
marmalade	orange juice	23	-	-	58	-	pectin	81	66.2
strawberry spread	strawberry	70	-	-	26.28	-	pectin	96.28	64.9
coconut ice cream	coconut milk	80	corn flour	3	16	0.1	-	99.1	41
plain yoghurt	skim milk	17	cow milk	4	1.5	-	gelatin/hydroxypropyl	24.5	23.9
	powder		inulin	2			distarch phosphate		
sweet condensed milk	-	-	whey	18.5	47	-	sodium alginate/cellulose gel	65.5	70.4
sweet soy sauce	soybean	30	caramel	20	25	3	-	78	59.2
fish sauce	fish	70	-	-	3	27	-	100	7.9
banana syrup	banana	55	-	-	15	-	-	70	65.2
fructose syrup	-	-	-	-	70.5	-	-	70.5	70.5
concentrated fruit juice	mixed fruit juice	50	-	-	50	-	-	100	62.7
coconut oil	coconut oil	100	-	-	-	-	-	100	-
sunflower oil	soybean oil	100	-	-	-	-	-	100	-
honey	-	-	-	-	79.6	-	-	79.6	80.6
coconut milk	coconut milk	100	-	-	-	-	-	100	21.9
soy milk	soy milk	89.2	milk powder	2	7	-	-	98.2	21.3
vinegar	water	96	acetic acid	4	-	-	-	100	-