

ผลของการเติมอะลูมินาต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเซียร์ทิกเคนนิ่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF ALUMINA ADDITION ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SHEAR THICKENING
FLUIDS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเติมอะลูมินาต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชิงรีทิคเคนนิง
โดย	น.ส.ณัฐนิชา นวมภักดี
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สุจาริณี สิ้นไชย
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.ชัยวุฒิ กมลพิลาส

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(อาจารย์ ดร.ณัฐพล แรงทน)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.สุจาริณี สิ้นไชย)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.ชัยวุฒิ กมลพิลาส)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรนภา สุจริตวรกุล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ภาวดี อังค์วัฒน์)	

ณัฐณิชา นวมภักดิ์ : ผลของการเติมอะลูมินาต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิง. (EFFECT OF ALUMINA ADDITION ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SHEAR THICKENING FLUIDS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.สุจาริณี สิ้นไชย, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชัยวุฒิกมลพิลาส

ของไหลเชียร์ติกเคนนิงกำลังเป็นที่สนใจในงานหลายด้านรวมถึงงานทางด้านเกราะกันกระสุน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและการเติมสารตัวเติมอะลูมินาที่มีต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิงในระบบซิลิกา-พอลิเอทิลีนไกลคอล โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณความเข้มข้นซิลิกาจาก 30% ถึง 52% โดยปริมาตร พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกามากกว่า 40% โดยปริมาตรของไหลแสดงพฤติกรรมการไหลตัวแบบนิวโตเนียน และเมื่อปริมาณซิลิกาในสารแขวนลอยสูงกว่า 40% โดยปริมาตร การไหลตัวจะมีพฤติกรรมแบบเชียร์ทินนิง ณ ช่วงอัตราการเฉือนต่ำ และเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลตัวเป็นแบบเชียร์ติกเคนนิงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง นอกจากนี้เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น อัตราการเฉือนวิกฤติหรือค่าอัตราการเฉือนที่เริ่มเกิดพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิงมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการเกิดเชียร์ติกเคนนิงเพิ่มสูงขึ้น ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเกราะกันกระสุนได้ทำการเติมอนุภาคของแข็งอะลูมินา ลงในของไหลเชียร์ติกเคนนิงที่มีความเข้มข้นซิลิกาเท่ากับ 50% โดยปริมาตร พร้อมทั้งทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมอะลูมินา ได้แก่ TMDA AMS-9 และ A-32 รวมถึงปริมาณของสารตัวเติมจาก 1% ถึง 5% โดยปริมาตร พบว่า ขนาดอนุภาคสารตัวเติมที่เล็กลงและปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นในขณะอัตราการเฉือนวิกฤติที่มีค่าลดลง นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมอะลูมินา AMS-9 และ A-32 ในสารแขวนลอยซิลิกา-พอลิเอทิลีนไกลคอล ทำให้อัตราการเกิดเชียร์ติกเคนนิงเพิ่มสูงขึ้น ของไหลที่มีสภาวะเหมาะสมได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการจุ่มแช่สิ่งทอเคลือบเพื่อผลิตชิ้นงานเกราะชนิดของเหลว โดยการเติม A-32 ปริมาณ 5% โดยปริมาตร เนื่องจากแสดงอัตราการเกิดเชียร์ติกเคนนิงสูงที่สุด จากนั้นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ได้ถูกนำมาตรวจสอบความต้านทานต่อการแทง โดยในงานวิจัยนี้ยังไม่อาจสรุปได้แน่ชัดว่าชิ้นงานเกราะรูปแบบใดสามารถต้านทานต่อการแทงได้ดีที่สุด

สาขาวิชา เทคโนโลยีเซรามิก

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5971954623 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORD: shear thickening fluid, rheology, alumina additive, body armor

Natnicha Nuampakdee : EFFECT OF ALUMINA ADDITION ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF SHEAR THICKENING FLUIDS. Advisor: SUJARINEE SINCHAI, Ph.D. Co-advisor: Chaiwut Gamonpilas, Ph.D.

Shear thickening fluids (STFs) have attracted much attention in many applications including body armor. In this study, suspensions of silica colloidal particles and polyethylene glycol fluid were prepared at varieties of volume fractions ϕ from 0.3 to 0.52 and their rheological behaviors were investigated. It was found that the suspensions exhibited a Newtonian behavior for $\phi < 0.4$, whilst a shear thinning followed by a thickening behavior was clearly observed for $\phi > 0.4$ suspensions. Furthermore, the critical shear rates for the onset of shear thickening was found to decrease whereas thickening ratio increased with increasing silica volume fraction. To improve the ballistic protective performance, small amount of hard particles, alumina, were added into the silica suspension of $\phi = 0.5$. Three different alumina particles; TMDA, AMS-9 and A-32, were added into the silica suspension at volume fractions of $\phi_a = 0.01$ to 0.05. It was shown that the critical shear rates of the reinforced-STFs decreased and the viscosity increased with increasing volume fraction and decreasing alumina particle size. However, higher thickening ratio was observed in reinforced-STFs and the ratio increased with increasing alumina volume fraction. The reinforced-STF samples with A-32 additive showed the highest thickening ratio and is considered promising composition for use in the study on liquid armor processing. In addition, the impregnation of Kevlar textile and A-32 reinforced STFs at $\phi_a = 0.05$ was prepared and stab resistance performance of the liquid armor samples was tested.

Field of Study: Ceramic Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องจากการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร.สุจาริณี สินไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาแก่ผู้วิจัย ดูแลทั้งสุขภาพทั้งทางร่างกายและจิตใจ นอกจากนี้ยังให้การอบรมสั่งสอนแก่ผู้วิจัยเพื่อเป็นบุคคลที่มีคุณภาพในสังคม และขอขอบคุณที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.ชัชวณัฏ กมลพิลาส ที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ทั้งสอนการใช้เครื่องมืออย่างละเอียดและชี้แนะแนวทางในการวิจัย อธิบายข้อมูลต่างๆแก่ผู้วิจัยอย่างละเอียดและสอนให้มีความรอบคอบ ท่านทั้งสองได้มอบประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาตรวจแก้ข้อบกพร่องต่างๆของเล่มวิทยานิพนธ์ เพื่อให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งมอบแนวคิดและคำแนะนำที่ดีแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งหมดให้แก่ผู้วิจัย พร้อมทั้งอบรมสั่งสอนผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการทุกท่านทุกภาคส่วน สำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินวิจัย ให้เป็นไปอย่างราบรื่น ช่วยอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัย ทั้งในส่วนการดำเนินวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง รวมถึงเพื่อนๆ พี่และน้องร่วมภาควิชาทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาต่างๆและเป็นกำลังใจให้กันเสมอ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดาของผู้วิจัยที่คอยสนับสนุนในทุกเรื่อง เป็นกำลังใจที่สำคัญและเป็นทุกอย่างในชีวิตของผู้วิจัย รวมถึงน้องสาวผู้เป็นสิ่สนั้นและเสียงหัวเราะของผู้วิจัยด้วย บุคคลเหล่านี้คือความอบอุ่นและสบายใจที่แท้จริง รักที่สุด นอกจากนี้ขอขอบคุณนายไทยคม ผิวปานแก้วที่คอยรับฟังปัญหาต่างๆของผู้วิจัยอยู่เป็นประจำและให้กำลังใจอยู่เสมอ

ณัฐนิชา นวมภักดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 เสื่อเกราะกันกระสุน โครงสร้าง วัสดุ และประโยชน์ใช้งาน.....	4
2.2 สิ่งทอเคลือบสำหรับการใช้งานเกราะกันกระสุน	6
2.3 เกราะชนิดของเหลว (liquid armor)	7
2.4 พฤติกรรมการไหล (rheology) ของของไหล.....	8
2.5 ของไหลเชิงรติกเคนนิง	10
2.5.1 ซิลิกา.....	10
2.5.2 พอลิเอทิลีนไกลคอล.....	11
2.6 กลไกการเกิดสถานะเชิงรติกเคนนิงในเกราะชนิดของเหลว	11
2.6.1 ผลของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค (effect of particle volume fraction).....	13

2.6.2 ผลของขนาดอนุภาค (effect of particle size).....	13
2.6.3 ผลของตัวกลางของเหลว (effect of liquid medium).....	14
2.6.4 ผลของอุณหภูมิ (effect of temperature).....	14
2.7 การใช้สารตัวเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเกราะชนิดของเหลว.....	15
2.8 มาตรฐานการทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนและการทดสอบ.....	16
2.8.1 ประสิทธิภาพการต้านทานกระสุนของเสื้อเกราะ (ballistic resistance of personal body armor).....	16
2.8.2 ประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการแทงจากอาวุธที่มีความคม (stab resistance of personal body armor).....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	21
3.1.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	21
3.2 เตรียมสารแขวนลอยและตรวจสอบพฤติกรรมการไหลตัว	22
3.2.1 ผลของปริมาณซิลิกา	22
3.2.2 ผลของการเติมสารตัวเติมอะลูมินา	22
3.3 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุประสงค์	22
3.3.1 โครงสร้างจุลภาค.....	22
3.3.2 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคของวัตถุประสงค์	22
3.4 การจุ่มแข็งสิ่งทอเคล้าในของไหลเซียร์ทิกเคนนิง	23
3.5 โครงสร้างจุลภาคของสิ่งทอเคล้า.....	23
3.6 การทดสอบความต้านทานต่อการแทง.....	23
3.6.1 เตรียมชิ้นงานสิ่งทอเคล้าจุ่มแข็งในของไหลเซียร์ทิกเคนนิง	23
3.6.2 ทดสอบความต้านทานต่อการแทง.....	23
3.7 แผนผังงานวิจัย	25

บทที่ 4.....	26
4.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุสืบ	26
4.1.1 โครงสร้างจุลภาค.....	26
4.1.2 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา.....	27
4.2 พฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเซียร์ทิกเคนนิ่ง.....	28
4.2.1 ผลของปริมาณซิลิกา	28
4.2.2 ผลของการเติมสารตัวเติมอะลูมินา	31
4.3 การจุ่มแช่สิ่งทอเคลฟล่า (Impregnation).....	34
4.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิ่งต่อเอทานอล.....	35
4.3.2 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่	36
4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเกราะชนิดของเหลว.....	36
4.5 ความสามารถในการต้านทานต่อการแทง	38
บทที่ 5.....	42
บรรณานุกรม.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	48

สารบัญรูปรภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะแผ่นวัสดุที่ถักทอจากเส้นใยเคพล่า	5
รูปที่ 2.2 ภาพจำลองการกระจายพลังงานในลูกกระสุนปืนของเสื้อเกราะแบบอ่อน	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเมต้า-อะรามิด (ชาย) และพารา-อะรามิด (ขวา)	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลของสิ่งทอเคพล่า	6
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะรอยกระสุนของเกราะแบบดั้งเดิมและเกราะชนิดของเหลว	8
รูปที่ 2.6 แสดงพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลลักษณะต่างๆ.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนไกลคอล	11
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะการเกิดเชียร์ติกเคนนิงของของไหล	12
รูปที่ 2.9 อิทธิพลของมวลโมเลกุลของเหลวตัวกลาง PEG ที่มีต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหล	14
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะแผ่นรองด้านล่าง.....	18
รูปที่ 3.1 การทดสอบความต้านทานต่อการแทง.....	24
รูปที่ 3.2 ลักษณะใบมีดที่ใช้ในการทดสอบ	24
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของผงซิลิกา (ก) KE-P50 และผงอะลูมินา (ข) TMDA (ค) AMS-9 และ (ง) A-32.....	26
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอะลูมินาแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษานี้.....	27
รูปที่ 4.3 พฤติกรรมการไหลของตัวอย่างสารแขวนลอยที่มีปริมาณซิลิกาแตกต่างกัน	29
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนวิกฤติและปริมาณซิลิกาในตัวอย่างสารแขวนลอย	30
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนวิกฤติและปริมาณซิลิกาในตัวอย่างสารแขวนลอย	30
รูปที่ 4.6 อัตราส่วนการเกิดพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ติกเคนนิงของตัวอย่างสารแขวนลอยที่มีปริมาณซิลิกาแตกต่างกัน	30
รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิงที่เติมสารตัวเติมอะลูมินาต่างชนิดกัน.....	33
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนวิกฤติกับปริมาณสารตัวเติมอะลูมินาที่เติมในสารแขวนลอย 0.50 STF	34

รูปที่ 4.9 อัตราส่วนการเกิดเชียร์ทิกเคนนิงของของไหลที่มีการเติมอะลูมินาทั้งสามชนิดในปริมาณ 1% ถึง 5% โดยปริมาตร	34
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของอัตราส่วนของไหลเชียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลที่มีต่อปริมาณซิลิกาในชิ้นงานเคลฟล่า	35
รูปที่ 4.11 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่ที่มีต่อปริมาณซิลิกาในชิ้นงานเคลฟล่า	36
รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของ (ก-ข) สิ่งทอเคลฟล่า (ค-ง) สิ่งทอเคลฟล่าที่ผ่านการจุ่มแช่ด้วยของไหล 0.50 STF.....	37
รูปที่ 4.13 ความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่า 3 รูปแบบ	39
รูปที่ 4.14 ลักษณะรอยขาดของชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าหลังการทดสอบความต้านทานต่อการแทง.....	41
รูปที่ 4.15 การยึดตัวของเส้นใยในชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าที่มีดปลายแหลมไม่สามารถเจาะทะลุได้.....	41



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติของเส้นใยพารา-อะรามิดทางการค้า	7
ตารางที่ 2.2 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของ SEAHOSTAR KE-P50	11
ตารางที่ 2.3 ระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะตาม NIJ Standard-0101.04	17
ตารางที่ 2.4 ระดับการต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานตาม NIJ Standard-0115.00	18
ตารางที่ 3.1 แสดงวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	21
ตารางที่ 4.1 สรุปการกระจายของขนาดอนุภาคของอะลูมินาแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา.....	27
ตารางที่ 4.2 รายละเอียดผลทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานสิ่งทอเคลือบ 3 ประเภท	40



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เสื้อเกราะเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทในการป้องกันภัยคุกคามแก่ผู้สวมใส่ ทั้งจากการกระแทกของมีคมและกระสุนปืน ในปัจจุบันประเทศไทยยังคงต้องทำการสั่งซื้อเสื้อเกราะที่มีราคาสูงจากต่างประเทศเข้ามาใช้เพื่องานด้านการรักษาความสงบและป้องกันประเทศเป็นปริมาณมาก ในอดีตมนุษย์ได้นำวัสดุหลากหลายมาทำเสื้อเกราะ โดยแรกเริ่มนั้นชุดเกราะและโล่ประดิษฐ์ขึ้นจากหนังสัตว์ จากนั้นได้พัฒนาเป็นเกราะไม้และเกราะโลหะ ซึ่งเกราะเหล่านี้มีความแข็งและหนักมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาความคล่องตัวแก่ผู้สวมใส่ ในช่วงเวลาที่ผ่านมานักวิจัยได้พยายามพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถป้องกันอาวุธสมัยใหม่ที่ได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเช่นกัน หนึ่งในวัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ผลิตเสื้อเกราะได้แก่ โพลีพาราฟีนีลีน เทเรพทาเลอไมด์ (poly-paraphenylene terephthalamide) มีชื่อทางการค้าคือเคพล่า (kevlar) จัดเป็นเสื้อเกราะแบบอ่อน (soft ballistic vest) เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ความแข็งแรงสูงและมีสมบัติทนแรงดึงสูงมาก เคพล่าจะถูกนำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยและทอเป็นผืน จัดเรียงซ้อนกันหลายชั้นเป็นจำนวน 20 - 50 ชั้น [1] มักถูกใช้งานในลักษณะแผ่นประกอบด้านหลังของเสื้อเกราะ ความแข็งแรงของเสื้อเกราะจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของเคพล่า แต่ก็ส่งผลให้เสื้อเกราะมีน้ำหนักมากขึ้นตามไปด้วยอีกเช่นกัน ในขณะที่การศึกษาและพัฒนาทางด้านยุทธภัณฑ์ได้ดำเนินไปอย่างไม่หยุดยั้ง ในปัจจุบัน ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเสื้อเกราะชนิดใหม่ที่กำลังเป็นที่จับตามอง ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่า เกราะชนิดของเหลว (liquid armor)

หลักการผลิตเสื้อเกราะชนิดของเหลว ทำได้โดยการนำสิ่งทอเคพล่ามาจุ่มแช่ (impregnate) ในของไหลชนิดเชียร์ทิกเคนิง (shear thickening fluid) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคซิลิกากระจายในพอลิเอทิลีนไกลคอล จัดเป็นของเหลวที่มีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน นั่นคือมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มแรงเค้นแก่ของไหล ด้วยพฤติกรรมที่ความหนืดเพิ่มสูงขึ้นโดยรวดเร็วเมื่อได้รับแรง ทำให้การนำของไหลที่มีพฤติกรรมแบบเชียร์ทิกเคนิงมาใช้เป็นวัสดุประกอบในเสื้อเกราะช่วยยับยั้งกระสุนหรือวัสดุที่ตีมาเข้ามายังของไหล นอกจากนี้ เกราะชนิดของเหลวมีน้ำหนักเบาและบางกว่าเสื้อเกราะดั้งเดิมเนื่องจากจำนวนชั้นของ สิ่งทอเคพล่าลดลงถึงสองเท่าหรือมากกว่า จึงเพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้สวมใส่ในขณะที่ยังคงมีประสิทธิภาพป้องกันภัยคุกคามได้ในระดับเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการผลิตเสื้อเกราะชนิดนี้ยังคงอยู่ในขั้นตอนของการวิจัยและพัฒนา อีกทั้งการศึกษาทำความเข้าใจต่อกลไกการเพิ่มขึ้นของความหนืดในของไหลเชียร์ทิกเคนิงก็ยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง นักวิจัยมีความพยายามที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเสื้อเกราะชนิดของเหลวให้ดียิ่งขึ้นไป มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปริมาณอนุภาค ขนาดอนุภาค ชนิดของอนุภาคหรือของเหลวตัวกลาง โดยหนึ่งในความพยายามที่จะ

พัฒนาประสิทธิภาพของสื่อเกราะชนิดของเหลว ได้แก่ การเติมสารตัวเติมลงในระบบ ซึ่งมีรายงานผลวิจัยยืนยันว่าสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการแทงให้ดียิ่งขึ้นได้ การทดลองทำโดยเติมอนุภาคของสารที่มีความแข็งสูง เพื่อจุดประสงค์ที่จะพัฒนาสมบัติเชิงกลให้กับชิ้นงานในขณะที่พฤติกรรมการไหลตัวของระบบยังคงเป็นแบบเชียร์ติกเคนนิง ซึ่งจะส่งผลเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้แก่เกราะของเหลว [2-5] โดยมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำสิ่งทอเคลือบผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในสารแขวนลอยซิลิกาและพอลิเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความต้านทานต่อการแทง (stab resistance) จากผลการทดสอบ พบว่า ชิ้นงานเคลือบที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลเชียร์ติกเคนนิงที่เติมสารตัวเติมจะมีความต้านทานดีกว่าชิ้นงานเคลือบที่ไม่มีสารตัวเติม โดยสารตัวเติมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อะลูมินา เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูก อีกทั้งยังมีสมบัติที่ดี มีความแข็งสูง ทนต่อสารเคมี การขัดสีและสึกกร่อน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูง จึงสามารถนำมาใช้ในงานหลากหลายด้าน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและการเติมสารตัวเติมอะลูมินาที่มีต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิง รวมทั้งทดสอบความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานสิ่งทอเคลือบที่ทำการเคลือบด้วยของไหลเชียร์ติกเคนนิง เป็นที่คาดหวังว่า ผลของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะมีส่วนในการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานของเกราะชนิดของเหลวให้ดียิ่งขึ้นไป สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพดีกว่าหรือเทียบเท่าเกราะกันกระสุนแบบดั้งเดิม เพื่อที่จะก้าวเข้าไปสู่ขั้นตอนการผลิตสื่อเกราะชนิดของเหลวขึ้นใช้เองได้ภายในประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและปริมาณและขนาดของสารตัวเติมอะลูมินา ที่มีต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิงและความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานทดสอบเกราะชนิดของเหลว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิงในระบบของซิลิกาและพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยใช้อะลูมินาเป็นสารตัวเติม ในงานนี้ได้ศึกษาปริมาณซิลิกา ได้แก่ 30 35 42 48 50 และ 52 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นนำของไหลที่ได้มาศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวที่อัตราการเฉือน (shear rate) จาก 0.01 ถึง 1000 ต่อวินาที ในขั้นตอนต่อไปได้เลือกปริมาณซิลิกาที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มาทำการเติมสารตัวเติมอะลูมินาทั้งสามชนิด ได้แก่ TMDA AMS-9 และ A-32 โดยทำการศึกษาปริมาณอะลูมินาที่ 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นจึงนำไปศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวที่อัตราการเฉือน (shear rate) จาก 0 ถึง 1000 ต่อวินาที และในขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและการเติมสารตัวเติมอะลูมินาต่อพฤติกรรมการไหลตัวของไหลเซียร์ทิกเคนนิงที่ประกอบด้วยซิลิกาและพอลิเอทิลีนไกลคอลและความต้านทานต่อการแห้งของชิ้นงาน



บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เสื้อเกราะกันกระสุน โครงสร้าง วัสดุ และประโยชน์ใช้งาน

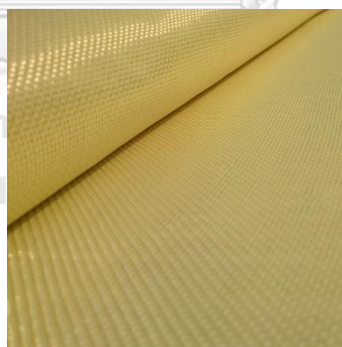
เสื้อเกราะกันกระสุน (ballistic vest, bulletproof vest, body armor) หมายถึงเสื้อหรือวัสดุใดๆที่ผลิตหรือนำมาประกอบรวมกันจนเป็นแผ่นเกราะ เพื่อป้องกันหรือลดอันตรายจากกระสุนปืนที่ยิงเข้ามาบริเวณลำตัวของผู้สวมใส่ [6] ในอดีตมนุษย์ได้นำวัสดุหลากหลายมาทำเสื้อเกราะเพื่อใช้ในการป้องกันตัวเองจากอันตรายเมื่ออยู่ในภาวะสงครามหรือสถานการณ์ที่เสี่ยงต่ออันตราย โดยแรกเริ่มนั้น ชุดเกราะและโล่ประดิษฐ์ขึ้นจากหนังสัตว์ จากนั้นพัฒนาเป็นเกราะไม้และเกราะโลหะ เรามักพบเห็นอัศวินในยุคกลางสวมใส่เกราะโลหะขณะออกรบ เกราะโลหะนี้มีความแข็งแรงและหนักมาก ส่งผลให้เกิดปัญหาความคล่องตัวแก่ผู้สวมใส่ อีกทั้งยังต้องเว้นบริเวณข้อต่อต่างๆเพื่อให้ผู้สวมใส่สามารถขยับตัวได้ เมื่อเวลาผ่านไป เสื้อเกราะดังกล่าวก็ใช้ไม่ได้ผลกับอาวุธสมัยใหม่จำพวกกระสุนปืนต่างๆ ณ เวลานั้นสิ่งที่ป้องกันกระสุนปืนได้ดีที่สุดคือที่กำบังที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น กำแพงหินหรืออิฐ หรือที่กำบังธรรมชาติ

มีหลักฐานบันทึกไว้ว่าเกราะอ่อนได้ถูกใช้เป็นครั้งแรกโดยชาวญี่ปุ่นในยุคกลาง เป็นเสื้อเกราะที่ทำจากผ้าไหม แต่ผลจากการศึกษาพบว่าเสื้อเกราะผ้าไหมนั้นสามารถป้องกันได้เฉพาะกระสุนที่มีความเร็วต่ำ (400 ฟุต/วินาทีหรือน้อยกว่า) ไม่สามารถกันกระสุนปืนสมัยใหม่ที่มีความเร็วเกินกว่า 600 ฟุต/วินาทีได้ เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการผลิตแล้วเสื้อเกราะผ้าไหมมีราคาสูงถึงตัวละ 800 ดอลลาร์สหรัฐ (เทียบกับค่าของเงินใน ค.ศ. 1998 เท่ากับ 1,400 ดอลลาร์สหรัฐ) ทำให้เกราะผ้าไหมนี้ไม่เป็นที่นิยม เสื้อเกราะกันกระสุนรุ่นต่อมาผลิตขึ้นสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ถูกเรียกว่า แจ็กเก็ตแฟลค (flak jacket) ผลิตขึ้นจากไนลอน สามารถกันสะเก็ดระเบิดและใช้ได้ผลดีกับการคุกคามของปืนพกและปืนไรเฟิล แต่เสื้อเกราะชนิดนี้มีข้อจำกัด คือ มีขนาดใหญ่เทอะทะและใช้ได้เฉพาะเจ้าหน้าที่ในกองทัพเท่านั้น จนกระทั่งปลายยุค 1960 บริษัทดูปองท์ได้ค้นพบเส้นใยสังเคราะห์ชนิดใหม่เรียกว่า เคพลา (kevlar) ที่สามารถใช้งานด้านกันกระสุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และนับจากนั้นมา เสื้อเกราะได้ถูกผลิตขึ้นจากวัสดุต่างๆจากหลายบริษัท จนมาถึงยุคปัจจุบันเสื้อเกราะกันกระสุนโดยทั่วไปนิยมผลิตขึ้นจากเส้นใยที่มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ [6-8]

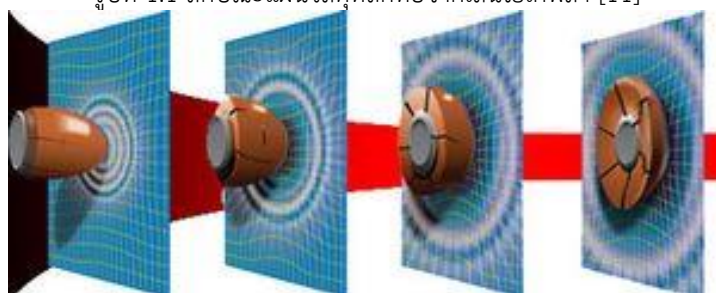
หนึ่งในเส้นใยที่ได้รับความนิยมนำมาผลิตเสื้อเกราะกันกระสุน ได้แก่ โพลีพาราฟีนีลีน เทเรพทาเลต (poly-paraphenylene terephthalamide) ซึ่งมีชื่อทางการค้า ได้แก่ Twaron ผลิตโดยบริษัท AKZO และ Technora ผลิตโดยบริษัท TEIJIN แต่ชื่อที่คุ้นหูและรู้จักกันอย่างแพร่หลายคือ เคพลา ซึ่งผลิตโดยบริษัท ดูปองท์ (DUPONT) นอกจากนี้ โพลีพาราฟีนีลีน เทเรพทาเลต แล้ว ยังมี การนำวัสดุอื่นมาผลิตเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนเช่นกัน ได้แก่ สเปกตร้า (spectra) ซึ่งเป็นชื่อทางการค้าของโพลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (ultra high molecular weight polyethylene,

UHMWPE) ซึ่งกระบวนการผลิตต้องใช้เทคนิคพิเศษเพื่อทำให้วัสดุมีความแกร่ง แข็งแรง น้ำหนักเบา และราคาถูกกว่าเส้นใยอะรามิต แต่มีข้อด้อยคืออุณหภูมิใช้งานต่ำกว่าเส้นใยอะรามิต [9]

เสื้อเกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุสังเคราะห์เหล่านี้จัดเป็นเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน (soft ballistic vest) เพราะใช้วัสดุที่มีสมบัติทนแรงดึงสูงมากมาขึ้นรูปเป็นเส้นใยเพื่อทอเป็นผืนอย่างแน่นหนาและนำมาเรียงซ้อนกันหลายชั้นตั้งแต่ 20 – 50 ชั้น โดยแผ่นวัสดุสังเคราะห์แต่ละผืนจะวางสลับแนวกันโดยมักจัดเรียงให้เส้นใยทำมุม 90 องศาเพื่อให้เสื้อเกราะมีทั้งความแข็งแรง และความยืดหยุ่น (flexible) ความแข็งแรงของเสื้อเกราะจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนชั้นของเคพลา แต่ก็ส่งผลให้เสื้อเกราะมีน้ำหนักมากขึ้นตามไปด้วยอีกเช่นกัน เมื่อกระสุนปืนหรืออาวุธมีคมพุ่งกระแทกชนเสื้อเกราะด้วยความเร็วสูง แต่ละชั้นของวัสดุในเสื้อเกราะจะกระจายแรงกระแทกไปบนพื้นผิวของเสื้อเกราะเป็นบริเวณกว้าง แรงจากกระสุนนี้จะทำให้เส้นใยเกิดการยืดตัว กระสุนปืนหรืออาวุธมีคมจะสูญเสียพลังงานและมีความเร็วลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ณ ขณะที่กระสุนปืนพุ่งชนเสื้อเกราะ พลังงานจากกระสุนปืนจะถ่ายเทเข้าสู่เกราะแผ่นแรกทันที เนื่องจากแรงที่มากกระทำนั้นมีปริมาณมากจึงอาจส่งผลให้เส้นใยขาดหรือเสียหายได้ หลังจากทีพลังงานบางส่วนถูกปลดปล่อยออกจากกระสุนปืน กระสุนปืนมักเสียรูปทรงและมีความเร็วลดลง พลังงานจากกระสุนปืนจะกระจายออกไปตามเส้นใยที่ถักทอสานกันเป็นแผ่นและจัดเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ ในชั้นงานเกราะ เส้นใยดังกล่าวจะดูดซับพลังงานไว้และเกิดการยืดตัวหรือขาดเสียหาย โดยพลังงานที่ได้รับนี้จะถ่ายเทต่อไปยังเส้นใยในแผ่นวัสดุชั้นถัดไป กลไกดังกล่าวเรียกว่า การกระจายพลังงาน (energy dissipation) กลไกนี้จะดำเนินไปจนพลังงานจากกระสุนปืนถูกดูดซับจนหมดและกระสุนหยุดการเคลื่อนที่ในที่สุด [10]



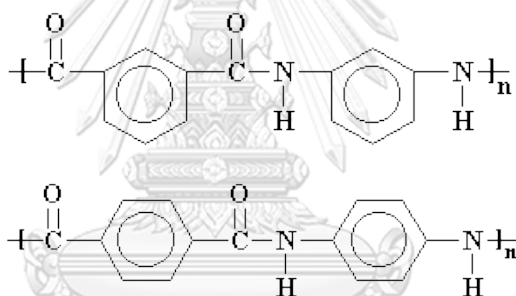
รูปที่ 1.1 ลักษณะแผ่นวัสดุที่ถักทอจากเส้นใยเคพลา [11]



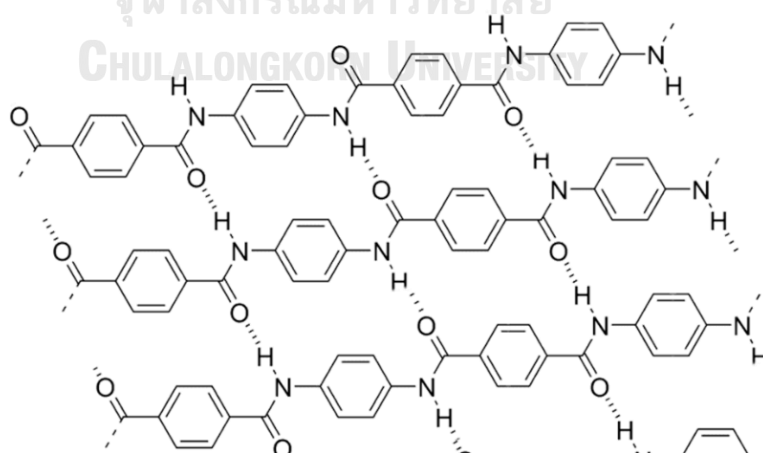
รูปที่ 1.2 ภาพจำลองการกระจายพลังงานในลูกกระสุนปืนของเสื้อเกราะแบบอ่อน [10]

2.2 สิ่งทอเคฟล่าสำหรับการใช้งานเกราะกันกระสุน

เส้นใยเคฟล่าที่ได้รับความนิยมนำมาผลิตเสื้อเกราะกันกระสุน เป็นที่รู้จักกันในชื่อทางการค้าของโพลีพาราฟีนีลีน เทเรฟทาลาไมด์ (poly-paraphenylene terephthalamide) หรือเส้นใยอะรามิด (aramid fiber) เป็นผ้าผืนที่ทอมาจากเส้นใยสังเคราะห์ในกลุ่มที่มีความแข็งแรง มีคุณสมบัติทนต่อความร้อนสูง ทนต่อการขีดข่วนและแรงอัดกระแทกได้เป็นอย่างดี [12] ในปัจจุบันพบว่ามีเส้นใยอะรามิดทางการค้าที่จำหน่ายอยู่ 2 ชนิด ทั้ง 2 ชนิดถือว่าเป็นเส้นใยสมรรถนะสูง โดยชนิดแรกมีสมบัติทนทานต่อความร้อนได้ดี เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันเมตา-อะรามิด (meta-aramid) ประกอบอยู่ในโครงสร้าง แต่มีสมบัติความเหนียวปานกลางและมีค่าโมดูลัสต่ำ นิยมนำมาผลิตเสื้อผ้าทนความร้อนและเป็นฉนวนไฟฟ้า ได้แก่ เส้นใยนอเม็กซ์ (ผลิตโดยบริษัท ดูปองท์) และเส้นใยโคเน็กซ์ (ผลิตโดยบริษัท เทยีน) ต่อมาในช่วงปีพ.ศ. 2513-2523 บริษัท ดูปองท์ ได้ออกเส้นใยชนิดที่สองในตระกูลอะรามิดนี้ มีชื่อว่า “เคฟล่า” เส้นใยชนิดใหม่นี้มีหมู่พารา-อะรามิด (para-aramid) ประกอบอยู่ในโครงสร้าง มีสมบัติที่ดีกว่าเส้นใยที่ผลิตได้ก่อนหน้านี้หลายประการ เช่น ความแข็งแรงสูง ค่าโมดูลัสสูง และทนต่อความร้อนสูง [13]



รูปที่ 1.3 โครงสร้างทางเคมีของเมตา-อะรามิด (ซ้าย) และพารา-อะรามิด (ขวา) [14]



รูปที่ 1.4 โครงสร้างโมเลกุลของสิ่งทอเคฟล่า [15]

เส้นใยอะรามิดสามารถนำไปใช้งานหลากหลายด้าน เช่น

- การใช้งานด้านความปลอดภัยและการป้องกันประเทศ เช่น เสื้อกันกระสุน
- การใช้งานเกี่ยวกับยานอวกาศที่ต้องการความล้าหน้าทางเทคโนโลยีสูง
- การใช้งานในอุตสาหกรรมการกีฬา เช่น รองเท้า ส่วนประกอบของรถจักรยานยนต์ เรือแข่ง
- อุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น เป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงให้กับยางรถยนต์ ใช้แทน Asbestos ในการผลิตเบรกและครัชรถยนต์
- ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องดนตรี
- วัสดุประกอบทำการผลิตผลิตภัณฑ์คอมโพสิต (composite) เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน บังคับ เรือ ชิ้นส่วนรถยนต์ประสิทธิภาพสูง อุปกรณ์กีฬาและอื่นๆ [12]

ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นของเส้นใยเคฟล่า ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่นต่ำทำให้สิ่งทอจากเส้นใยนี้มีน้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ความคงทนต่อการกระแทกดี ความคงทนต่อการขีดถู ความคงทนต่อสารเคมี ความคงทนต่อการสลายตัวด้วยความร้อน กันไฟได้ดีและการนำไฟฟ้าต่ำ โดยหากทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยเคฟล่าและเส้นใยเหล็กที่น้ำหนักเท่ากัน จะพบว่าเส้นใยเคฟล่ามีความแข็งแรงสูงกว่าเส้นใยเหล็กถึง 5 เท่า ด้วยเหตุนี้ เส้นใยเคฟล่าหรืออะรามิดจึงเป็นวัสดุยุคใหม่ที่ได้รับความนิยมสูงในการนำมาผลิตเสื้อเกราะกันกระสุน

ตารางที่ 1.1 สมบัติของเส้นใยพารา-อะรามิดทางการค้า [13]

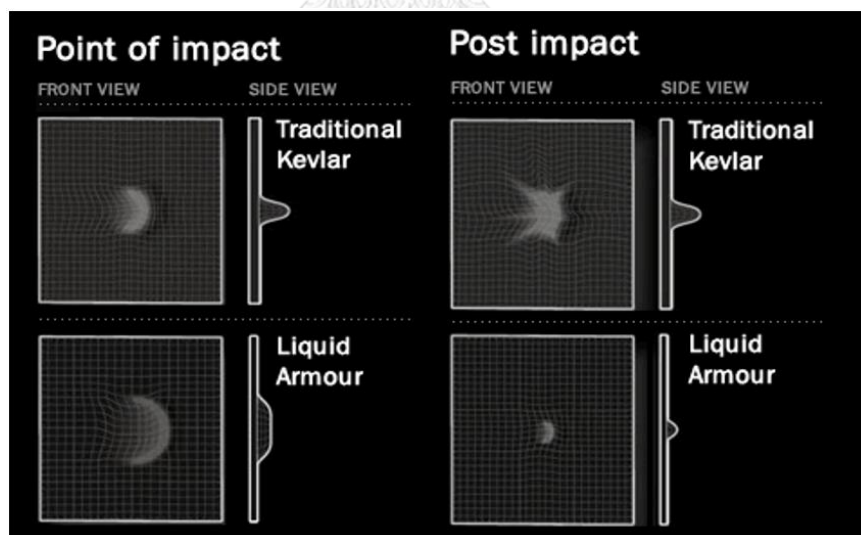
สมบัติ	Kevlar (Dupont)	Twaron (AKZO)	Technora (Teijin)
ความแข็งแรง (gpd/GPa)	21-25/5.65-3.2	21-23/2.6-2.85	24-28/3.0-3.4
โมดูลัส (gpd/GPa)	450-1000/57-127	440-800/54-99	450-850/55-104
ความยาวเมื่อตึงยืด (%)	2-4	3.2-3.8	4.4-4.6
T _g (°C)	360	-	-
T _m (°C) เริ่มสลายตัว	560	-	>500
ความถ่วงจำเพาะ	1.44	1.4	1.39

2.3 เกราะชนิดของเหลว (liquid armor)

จากจุดประสงค์หลักของการสวมเสื้อเกราะกันกระสุนในการป้องกันอาวุธหรือกระสุนไม่ให้สัมผัสถูกร่างกาย ทำให้ร่างกายได้รับแรงกระแทกจากอาวุธน้อยลง ทำให้ในช่วงเวลาที่ผ่านมานักวิจัยได้พยายามพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถป้องกันอาวุธสมัยใหม่ที่ได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเช่นกัน แต่ไม่ว่าจะทำขึ้นจากวัสดุที่เป็นแผ่นโลหะหรือเส้นใยก็ตาม เสื้อเกราะกันกระสุนเหล่านั้นมักจะมีความแข็ง ไม่ยืดหยุ่นและมีน้ำหนักมาก ทำให้ใช้ไม่ได้ผลกับร่างกาย

บริเวณ แขน ขาและลำคอ ปัจจุบัน นักวิจัยได้หันมาสนใจเสื้อเกราะระบบใหม่ ที่มีคุณสมบัติของความยืดหยุ่นและมีน้ำหนักเบาขึ้น เรียกว่า เกราะชนิดของเหลว เสื้อเกราะชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยการตรึงของเหลวที่มีสมบัติพิเศษไว้นิวส์ดูลูกที่ใช้ทำเสื้อเกราะ แม้เกราะชนิดนี้จะอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา ยังไม่พร้อมใช้ในสถานการณ์จริง แต่ผลการวิจัยในห้องปฏิบัติการบ่งชี้ว่าเสื้อเกราะกันกระสุนชนิดของเหลวนี้นี้มีศักยภาพในการใช้งานแทนที่หรือใช้เสริมเสื้อเกราะแบบดั้งเดิมได้เป็นอย่างดี [8]

เกราะชนิดของเหลวผลิตขึ้นจากการนำแผ่นเส้นใยเคฟล่ามาผ่านกระบวนการจุ่มแช่ (impregnate) ในของไหลชนิดเชียร์ทิกเคนนิง (shear thickening fluid) ซึ่งมีสมบัติความหนืดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อได้รับแรงเฉือน ส่งผลให้มีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นมีลักษณะคล้ายของแข็งเมื่อได้รับแรงเฉือนสูงถึงค่าหนึ่ง เมื่อเกิดการปะทะหรือมีวัตถุมากระทบอย่างแรง ของไหลชนิดเชียร์ทิกเคนนิงจะแข็งตัวภายในเสี้ยววินาที ส่งผลให้เส้นใยเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่มีความแข็งแรงขึ้น สามารถต้านทานแรงที่มากกระทำได้ดีขึ้น จึงสามารถลดจำนวนชั้นของเส้นใยเคฟล่าที่ใช้ในเสื้อเกราะกันกระสุนลงได้ นักวิจัยที่ศึกษาเรื่องนี้ได้รายงานว่เส้นใยเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่เพียง 4 ชั้น สามารถรับปริมาณพลังงานของแรงกระแทกเทียบเท่ากับเคฟล่าแบบดั้งเดิมที่มีความหนาถึง 14 ชั้น [16] นอกจากนี้ เมื่อเส้นใยเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ได้รับแรงกระแทก จะดูดซับแรงกระแทกและเกิดการยึดตัวน้อยกว่าเส้นใยทั่วไปเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงกว่ามาก อีกทั้งยังกระจายแรงที่ได้รับออกไปเป็นวงกว้าง กระสุนปืนจึงทะลวงผ่านเข้าไปในเสื้อเกราะในระยะทางที่น้อยกว่าและเพิ่มความปลอดภัยแก่ผู้สวมใส่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 1.5 แสดงลักษณะรอยกระสุนของเกราะแบบดั้งเดิมและเกราะชนิดของเหลว [17]

2.4 พฤติกรรมการไหล (rheology) ของของไหล

ของไหล (fluid) เป็นสถานะหนึ่งของสสาร ใช้นิยามสสารที่เปลี่ยนรูปร่างหรือไหลด้วยความเค้นเฉือน ของเหลวและแก๊สต่างก็เป็นรูปแบบหนึ่งของของไหล ของไหลบางอย่างอาจมีความหนืดสูงมาก ทำให้จำแนกแยกแยะจากของแข็งได้ยาก หรือในโลหะบางชนิดก็อาจมีความแข็งต่ำมากเช่นกัน

[18] ของไหลมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของเรา ไม่ว่าจะเป็นน้ำที่เรดื่มน้ำ อากาศที่เราหายใจ ของไหลชนิดต่างๆมากมายเคลื่อนที่อยู่ภายในร่างกายของเรา ของไหลทำหน้าที่ควบคุมสภาพอากาศโลก รวมถึงไปถึงของไหลที่พบเห็นในกระบวนการอุตสาหกรรม เครื่องอำนวยความสะดวก เครื่องจักรต่างๆ และกระบวนการผลิตประกอบไปด้วยของไหลแทบทั้งสิ้น เช่น เครื่องปรับอากาศ ระบบน้ำ เป็นต้น

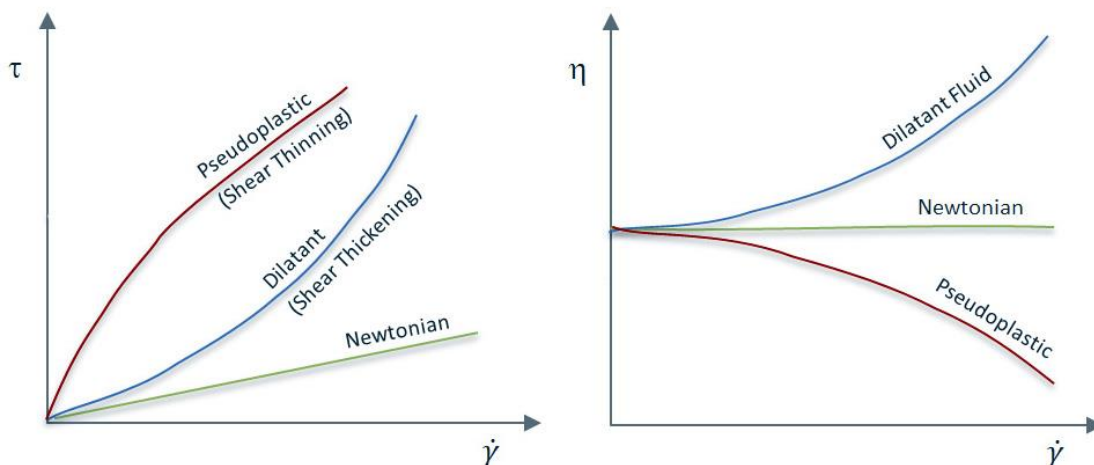
ความหนืด (viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำต่อของไหลที่มีความหนืดสูง ของไหลดังกล่าวจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวของของไหลแต่ละชนิด การวัดค่าความหนืดจึงเป็นการวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของของไหล ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ

1. Newtonian Fluid : เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามกฎของนิวตันที่ว่า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีค่าความหนืดคงที่ โดยค่าดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน แอลกอฮอล์ เป็นต้น

2. Non Newtonian Fluid : เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามกฎของนิวตัน นั่นคือ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลมีค่าความหนืดไม่คงที่ ความหนืดของของไหลชนิดนี้แปรผันกับอัตราเฉือนหรือความเร็วในการกวน ของไหลชนิดนี้สามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดย่อย ได้แก่

- Pseudoplastic : ของไหลที่ความหนืดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนหรือยิ่งกวนเร็วยิ่งไหลดีขึ้น พฤติกรรมลักษณะนี้แสดงสมบัติ “shear thinning” เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

- Dilatant : ของไหลที่ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนหรืออาจกล่าวได้ว่ายิ่งกวนเร็วยิ่งหนืด พฤติกรรมลักษณะนี้แสดงสมบัติ “shear thickening” ตัวอย่างเช่น น้ำดินชั้น น้ำแป้ง เป็นต้น [19]



รูปที่ 1.6 แสดงพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลลักษณะต่างๆ [20]

2.5 ของไหลเชิยร์ทิกเคนนิง

ของไหลเชิยร์ทิกเคนนิงเป็นของเหลวที่มีพฤติกรรมแบบนอนนิวโตเนียน นั่นคือ มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงเค้นแก่ของไหล ในบางกรณี สามารถเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นลักษณะคล้ายของแข็งอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับแรงเฉือนสูงถึงค่าหนึ่ง ของไหลเชิยร์ทิกเคนนิงที่นักวิจัยนำมาศึกษาเพื่อใช้งานด้านเกราะกันกระสุนประกอบด้วยอนุภาคซิลิกากระจายในพอลิเอทิลีนไกลคอล

2.5.1 ซิลิกา

ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide) มาจากภาษาละติน silix ซึ่งแปลว่า สารประกอบระหว่างออกซิเจนและซิลิกอน สูตรทางเคมีคือ SiO_2 ไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่นและรส ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่เสถียร หนัก อุดมภูมิปกติ และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี มักพบได้ตามธรรมชาติในรูปของทรายหรือควอตซ์ พบมากในดินและหิน เป็นสารประกอบที่มีจำนวนมากและพบโดยทั่วไปบนเปลือกโลก ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลายด้าน อาทิ สารดูดซับความชื้น สารเพิ่มความเงา ส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง และใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

ซิลิกาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิตกระจก แก้วน้ำและขวดแก้ว ไยแก้วที่ใช้ในการโทรคมนาคมก็เป็นผลิตผลจากซิลิกาเช่นเดียวกัน และยังใช้เป็นสารตั้งต้นในผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น เครื่องปั้นดินเผา เครื่องหิน เครื่องลายคราม และการผลิตพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ [21, 22]

SEAHOSTAR KE-P50 ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้เป็นซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ทางการค้า ประกอบด้วยซิลิกาปริมาณ 85 - 95% ความหนาแน่น 1.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลักษณะเป็นผง มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วงแคบ สามารถนำไปใช้งานหลายด้าน ได้แก่ slipping agent, coating agent, light diffusion agent และ filler มีลักษณะเฉพาะและสมบัติดังแสดงในตารางที่ 2.1

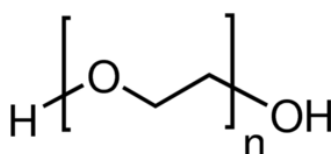
ตารางที่ 1.2 ลักษณะเฉพาะและสมบัติของ SEAHOSTAR KE-P50 [23]

Name	Average Particle Size (µm)	Distribution	Form	Physical Property			
				Refractive Index	Specific Gravity	Bulk Density	Heat Resistance (C)
KE-P50	0.50~0.60	มีการกระจายตัวในช่วงแคบ	powder	1.43	2.0	0.3	เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส น้ำหนักของสารจะลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

2.5.2 พอลิเอทิลีนไกลคอล

Polyethylene glycol หรือ PEG เป็นสารเคมีสังเคราะห์ ที่มีสมบัติที่น่าสนใจ ได้แก่ มีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูง ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่นเกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น เครื่องสำอาง ครีม โลชั่น PEG มีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามน้ำหนักโมเลกุล เช่น PEG200, PEG300, PEG400 และ PEG600 ซึ่งจัดว่ามีน้ำหนักโมเลกุลน้อยทำให้มีลักษณะใส เปรียบเทียบกับ PEG3350, PEG4500 และ PEG8000 ซึ่งมีลักษณะขุ่นคล้ายแว็กซ์ น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลทำให้สมบัติบางอย่าง เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การดูดความชื้น จุดเยือกแข็ง เปลี่ยนแปลงไปด้วย ด้วยความสามารถในการละลาย (solubility) และการเข้ากันได้ (compatibility) ที่หลากหลาย ทำให้มีการใช้ PEG ในการเตรียมยาและเครื่องสำอาง และเนื่องจาก PEG มีความเป็นพิษต่ำ จึงนิยมถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ เช่น มีการนำ PEG3350 มาทำเป็นยาระบาย หรือมีการเติม electrolyte ใน PEG เพื่อเตรียมคนไข้ในช่วงการล้างลำไส้ก่อนเข้าผ่าตัด นอกจากนี้ ยังนำมาใช้เพื่อยืดเวลาให้ยาอยู่ในร่างกายนานขึ้น เช่น PEG-interferon alpha ที่นำมาใช้รักษา hepatitis C เป็นต้น [24]

Sigma-Aldrich PEG200 เป็น PEG ทางการค้าที่มีมวลโมเลกุลเฉลี่ย 200 มีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสีหรือมีสีเหลืองอ่อน มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 4.5 – 7.5 ความหนืด 0.05 ปาสคาลวินาที ความหนาแน่น 1.12 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [25]



รูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้างของพอลิเอทิลีนไกลคอล [25]

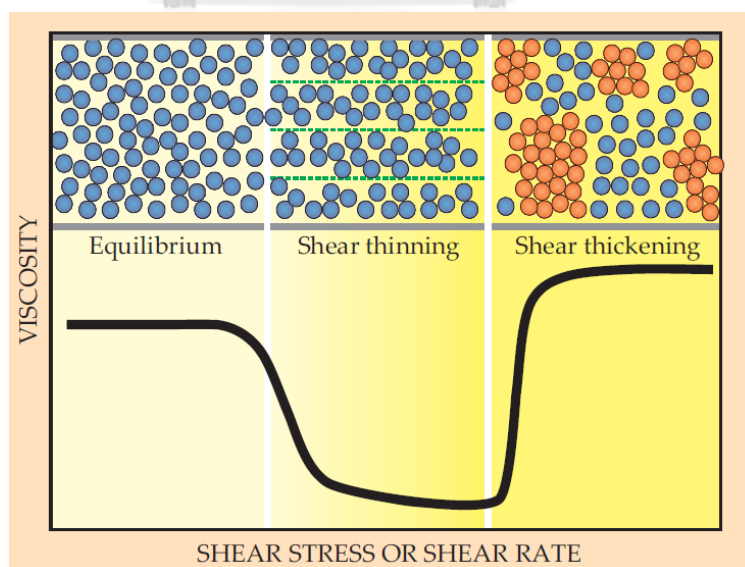
2.6 กลไกการเกิดสถานะเซียร์ทิกเคนนิงในกระษนิตของเหลว

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนอหลากหลายทฤษฎีเกี่ยวกับกลไกการเกิดสถานะเซียร์ทิกเคนนิง ปัจจุบันยังคงเป็นที่ถกเถียงกันถึงกลไกที่ถูกต้องแท้จริงในการนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์นี้ และได้มีการนำหลักการเปลี่ยนแปลงแบบมีระเบียบ-ไร้ระเบียบ (order-disorder

transition) และกลไกการเกิด hydrocluster อีกทั้งทฤษฎีอื่นๆ มาใช้อ้างอิง โดยผู้วิจัยส่วนใหญ่มีความเชื่อว่าหลักการทั้งสองนี้เป็นสาเหตุในการเกิดสถานะเชียร์ทิกเคนนิ่ง [26]

หลักการเปลี่ยนแปลงแบบมีระเบียบ-ไร้ระเบียบ (ODT) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Hoffman [27] ได้อธิบายสรุปไว้ว่า ในช่วงก่อนถึงจุดอัตราเฉือนวิกฤติ (critical shear rate) อนุภาคมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้น แต่ในช่วงหลังจากจุดอัตราเฉือนวิกฤติ แรงไฮโดรไดนามิกมีอิทธิพลเหนือกว่า ส่งผลให้อนุภาคสูญเสียการเรียงตัว เกิดการเปลี่ยนแปลงจากมีระเบียบกลายเป็นไร้ระเบียบ เป็นสาเหตุให้ความหนืดของของไหลมีค่าสูงขึ้น โดยหลักการเปลี่ยนแปลงแบบมีระเบียบ-ไร้ระเบียบนี้จะเกิดสถานะเชียร์ทิกเคนนิ่งเมื่ออนุภาคมีการเรียงตัวเท่านั้น เนื่องจากความหนืดของของไหลจะมีค่าสูงขึ้นได้เพราะการจัดเรียงตัวของอนุภาคถูกทำลาย

ลักษณะทั่วไปของของไหลชนิดเชียร์ทิกเคนนิ่ง ในช่วงต้นนั้น ของไหลอยู่ในสถานะสมดุล (equilibrium) และอนุภาคจะกระจายตัวกันในระบบอย่างอิสระ เมื่อได้รับความเค้นอนุภาคจะเริ่มมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามอิทธิพลของแรงเค้นนั้นๆ ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้นส่งผลให้ความหนืดของของไหลลดลง นั่นคือเกิดพฤติกรรมแบบเชียร์ทินนิง (shear thinning) จากนั้น เมื่อของไหลได้รับความเค้นสูงขึ้นจนถึงจุดอัตราเฉือนวิกฤติ ณ สถานะนี้ แรงกระทำระหว่างอนุภาคแบบไฮโดรไดนามิก (hydrodynamic interaction) ซึ่งส่งผลให้อนุภาคเข้ามาชิดกัน ขึ้นมามีบทบาทมากกว่าแรงจากการชนกันแบบสุ่ม (stochastic interaction) ทำให้อนุภาคเกาะตัวกันเป็นกลุ่มอนุภาค เรียกว่า hydroclusters การเกาะกลุ่มดังกล่าวส่งผลให้ความหนาแน่นของอนุภาคในแต่ละจุดของระบบไม่เท่ากันและทำให้อนุภาคเคลื่อนตัวได้ลำบากขึ้น ความหนืดของของไหลจึงมีค่าสูงขึ้นและเกิดพฤติกรรมแบบเชียร์ทิกเคนนิ่ง [1, 5, 28-30] ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 1.8 แสดงลักษณะการเกิดเชียร์ทิกเคนนิ่งของของไหล [26]

ในเวลาต่อมา นักวิจัยได้เสนอทฤษฎีใหม่ในการเกิดสภาวะเชียร์ติกเคนนิง นั่นก็คือโมเดล contact rheology โดยได้อธิบายว่าการเกิดไฮโดรคลัสเตอร์จะมีอิทธิพลที่อัตราการเลื่อนต่ำเนื่องจากแรงดันของอนุภาคยังมีค่าน้อยเกินกว่าที่จะเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาค [31, 32] แรงผิวสัมผัส (contact forces) ของอนุภาคจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออนุภาคในของไหลมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันและกันมากขึ้น อัตราการเลื่อนสูง แรงผิวสัมผัสจะก่อตัวและแสดงลักษณะเป็นโครงข่าย (force networks) มีบทบาทหลักในการเกิดสภาวะเชียร์ติกเคนนิงขณะที่พฤติกรรมแบบไฮโดรไดนามิกมีบทบาทลดลง โดยอิทธิพลจากแรงผิวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการเลื่อนที่เพิ่มขึ้น [33]

ทฤษฎีนี้ได้รับการสนับสนุนโดยงานวิจัยของ S. Pednekar และคณะ [34] ที่รายงานว่าอนุภาคมีการกระจายตัวได้ดีเฉพาะในเวลาที่มีเพียงแรงแบบบราวเนียนเท่านั้น เมื่อเริ่มมีแรงดึงดูดเข้ามาเกี่ยวข้องและเกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคในของไหล โครงข่ายการสัมผัสที่เกิดขึ้นนี้สามารถต้านแรงเฉือนจากภายนอกที่ให้แก่ของไหลได้ ซึ่งหมายความว่าของไหลจะมีความหนืดสูงขึ้น นอกจากนี้ ความเข้มข้นของอนุภาคในของไหลยังมีบทบาทสำคัญต่อโมเดล contact rheology เนื่องจากเมื่ออนุภาคมีปริมาณมากขึ้นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นของไหลที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูงจึงมีโอกาสเกิดแรงผิวสัมผัสได้มากกว่า ณ อัตราการเลื่อนต่ำกว่าในของไหลที่มีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำ

โดยทั่วไป พฤติกรรมการไหลตัวของของไหลชนิดเชียร์ติกเคนนิงมีความแตกต่างกันโดยขึ้นกับหลายปัจจัย เราสามารถจำแนกปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาวะการเกิดเชียร์ติกเคนนิง ได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ อนุภาค ของเหลวตัวกลางและสภาพแวดล้อม

2.6.1 ผลของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค (effect of particle volume fraction)

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลชนิดเชียร์ติกเคนนิง ก็คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค ซึ่งแสดงค่าเปรียบเทียบปริมาตรของอนุภาคกับปริมาตรรวมทั้งหมด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าอัตราเฉือนวิกฤตจะลดต่ำลงเมื่อสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคเพิ่มขึ้น อีกทั้งแรงไฮโดรไดนามิกแสดงอิทธิพลมากขึ้นเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคสูงขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างอนุภาคลดลง และใช้อัตราการเลื่อนน้อยลงในการเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาค [35] ยิ่งไปกว่านั้นของไหลที่มีปริมาณอนุภาคสูง จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกจำกัดด้วยโครงข่ายของอนุภาคที่แผ่กระจายแตกกิ่งก้านสาขาอยู่ทั่วสารแขวนลอย

2.6.2 ผลของขนาดอนุภาค (effect of particle size)

ขนาดของอนุภาคเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลชนิดเชียร์ติกเคนนิง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่าอัตราเฉือนวิกฤตจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคเล็กลง [36] เนื่องจากแรงบราวเนียนมีบทบาทมากขึ้น แรงผลักระหว่างอนุภาคจึงมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้ของไหลเกิดสภาวะเชียร์ติกเคนนิงได้ช้าลง แต่เมื่อเกิดสภาวะเชียร์ติกเคนนิงแล้วของไหลจะมี

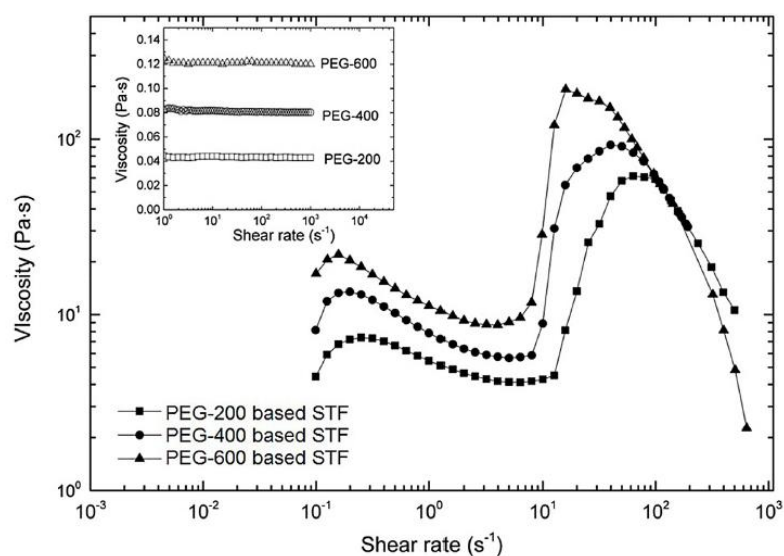
ค่าความหนืดสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของพันธะระหว่างอนุภาคที่มากขึ้นเนื่องจากอนุภาคในของไหลมีปริมาณมากขึ้น

2.6.3 ผลของตัวกลางของเหลว (effect of liquid medium)

ตัวกลางของเหลวมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของของไหลชนิดเชิรท์กเคนนิงจากการทดลองในรายงานวิจัยที่ผ่านมา [37] ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของไหลตัวโดยใช้ตัวกลางชนิด PEG ที่มีมวลโมเลกุลแตกต่างกัน ได้แก่ PEG200 PEG400 และ PEG600 พบว่าตัวกลางที่มีมวลโมเลกุลมากกว่าค่าความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.9 PEG600 ที่มีมวลโมเลกุลมากที่สุด มีค่าความหนืดสูงสุด อีกทั้งยังเกิดสภาวะเชิรท์กเคนนิงที่ค่าอัตราเฉือนวิกฤติน้อยที่สุดจากการเปรียบเทียบตัวกลางทั้ง 3 ชนิด

2.6.4 ผลของอุณหภูมิ (effect of temperature)

นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว พฤติกรรมของของไหลชนิดเชิรท์กเคนนิงยังขึ้นกับอุณหภูมิอีกด้วย โดยทั่วไป ความหนืดของของไหลจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากพันธะที่เชื่อมระหว่างอนุภาคกับตัวกลางถูกทำลายที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนของอนุภาคยังมีบทบาทมากขึ้น ส่งผลให้สภาวะเชิรท์กเคนนิงถูกรบกวนที่อุณหภูมิสูง ยิ่งไปกว่านั้น ค่าอัตราเฉือนวิกฤติอาจมีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 1.9 อิทธิพลของมวลโมเลกุลของเหลวตัวกลาง PEG ที่มีต่อพฤติกรรมของของไหล [37]

2.7 การใช้สารตัวเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเกราะชนิดของเหลว

สารตัวเติม (additive) หมายถึง วัสดุที่อยู่ในรูปของแข็ง โดยทั่วไปมีขนาดอนุภาคเล็ก เติมเข้าสู่ระบบเพื่อปรับปรุงลักษณะเฉพาะหรือสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ หรือเพื่อปรับปรุงคุณภาพการผลิต เช่น เพิ่มประสิทธิภาพสมบัติเชิงกล เพื่อเสริมแรงหรือเพื่อลดต้นทุนการผลิต [38]

ในกรณีของเกราะกันกระสุนชนิดของเหลว มีงานวิจัยที่บ่งชี้ว่าการเติมสารตัวเติมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกลให้แก่ชิ้นงานได้ ดังเช่น งานวิจัยของ S. Gurgun และคณะ [39] ได้นำสิ่งทอเคลือบผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในสารแขวนลอยซิลิกาและพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยมีการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 25% โดยน้ำหนักลงในสารแขวนลอย จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความต้านทานต่อการแทง (stab resistance) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานเคลือบที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลเซียร์ทิกเคนิงที่เติมสารตัวเติมจะมีความต้านทานต่อการแทงดีกว่าชิ้นงานเคลือบที่ไม่มีสารตัวเติม

สารตัวเติมที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ อะลูมินา เนื่องจากเป็นวัสดุความแข็งสูงที่หาได้ง่าย ราคาถูก ทนต่อสารเคมี การขัดสีและสึกกร่อน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี สามารถนำมาใช้งานได้หลายประเภท การนำอะลูมินามาใช้งานมีแนวโน้มพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งยังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้งานทางด้านเซรามิก

อะลูมินา มีชื่อทางเคมีว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ สูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 พบตามธรรมชาติในรูปของแร่คอร์ันดัม (corundum) โดยปกติจะมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีสิ่งเจือปนในโครงสร้างของอะลูมินา จะทำให้เกิดสีต่างๆขึ้นกับชนิดสิ่งเจือปนนั้น ทำให้มีความสวยงามมากขึ้นและอาจกลายเป็นแร่ที่มีค่า เช่น สีแดงของอัญมณีทับทิมที่เกิดจากมีธาตุโครเมียมเจือปนอยู่ในอะลูมินา เป็นต้น โครงสร้างของอะลูมินาประกอบด้วยพันธะระหว่างอะลูมิเนียมกับออกซิเจนที่มีความแข็งแรง การทำลายพันธะดังกล่าวต้องใช้พลังงานสูงจึงทำให้วัสดุอะลูมินามีความแข็งสูงมาก นอกจากนั้นแล้ว อะลูมินายังทนความร้อนและทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีชนิดต่างๆได้ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

อะลูมินาเป็นวัสดุที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์มากมาย นอกจากจะใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เซรามิกเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ยังสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์หลายชนิด เช่น ใช้ทำวัสดุทนไฟในเตาเผาและเตาหลอม วัสดุขัดถู ลูกบิดและผนังกรูหม้ออบสำหรับอุตสาหกรรมเซรามิก ถ้วยเผาสาร (crucible) หัวพ่นทรายสำหรับงานตกแต่งผิวโลหะ แผ่นรองวงจรไฟฟ้ารวม (IC) สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ หัวเทียนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ ใช้ทำฝาครอบหลอดไฟโซเดียมที่ให้ความสว่างสูง และยังใช้เป็นชิ้นส่วนอวัยวะเทียม เช่น ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น [40]

2.8 มาตรฐานการทดสอบเสื้อเกราะกันกระสุนและการทดสอบ

จากอดีตถึงปัจจุบันมาตรฐานในการทดสอบประสิทธิภาพของเสื้อเกราะมีใช้กันอยู่หลายมาตรฐาน โดยมาตรฐานที่เก่าแก่ที่สุดได้แก่ มาตรฐาน NIJ (U.S. National Institute of Justice) นับเป็นมาตรฐานที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดทั้งในสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย เอเชีย ตะวันออกกลาง และประเทศในยุโรปบางประเทศ เช่น ฟินแลนด์ อังกฤษ รวมถึงประเทศไทยด้วย สามารถจำแนกมาตรฐานการทดสอบเสื้อเกราะได้เป็น 2 วิธี

2.8.1 ประสิทธิภาพการต้านทานกระสุนของเสื้อเกราะ (ballistic resistance of personal body armor)

ในปัจจุบันได้มีการผลิตปืนชนิดต่างๆออกมามากมาย และอาวุธปืนแต่ละชนิดต่างก็ใช้กระสุนที่มีขนาดและน้ำหนักไม่เท่ากัน มาตรฐาน NIJ ได้จัดระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะไว้ 6 ระดับ โดยในแต่ละระดับจะมีการระบุชนิดปืน กระสุน และช่วงความเร็วกระสุนไว้อย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 แม้เสื้อเกราะจะสามารถป้องกันอันตรายจากการทะลุทะลวงของกระสุนปืน (บางชนิด) ได้ แต่การพุ่งชนอย่างรุนแรงของกระสุนปืนก็ยังสามารถทำอันตรายแก่ผู้สวมเสื้อเกราะได้ เนื่องจากเมื่อได้รับแรงกระแทกเสื้อเกราะจะเกิดการยุบตัวชั่วขณะ การยุบตัวตามแนวแรงกระแทกนี้ทำให้ผู้สวมใส่เกิดอาการบอบช้ำที่เรียกว่า บลันด์ทรอมา (blunt trauma) ขึ้น ซึ่งหากตำแหน่งที่เกิดการกระแทกเป็นบริเวณศีรษะก็อาจทำให้กระดูกศีรษะหักทิ่มแทงอวัยวะภายในจนเกิดอันตรายถึงชีวิตได้ ประเด็นนี้ถือเป็นจุดด้อยอย่างหนึ่งของเสื้อเกราะกันกระสุนแบบอ่อน และทำให้การยุบตัวของเสื้อเกราะอันเกิดจากการกระแทกของกระสุนถูกกำหนดเกณฑ์เป็นมาตรฐานที่ต้องมีการทดสอบ ตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบของ NIJ กำหนดว่า เสื้อเกราะกันกระสุนที่จะผ่านเกณฑ์การทดสอบต้องไม่ทำให้แผ่นพยานเกิดรอยยุบตัว (back face signature) ลึกเกิน 44 มิลลิเมตร ภายหลังจากที่ถูกยิงด้วยกระสุนทดสอบตามระดับการป้องกัน [10] มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบเสื้อเกราะเวอร์ชันล่าสุด ได้แก่ NIJ Standard-0101.04

ตารางที่ 1.3 ระดับความสามารถในการป้องกันกระสุนของเสื้อเกราะตาม NIJ Standard-0101.04 [10]

การปกป้อง	ประสิทธิภาพ
ระดับ I (.22 LR; .380 ACP)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน .22 Long Rifle น้ำหนัก 2.6 กรัม มีความเร็ว 329 ± 9.1 เมตร/วินาที (1080 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .380 ACP น้ำหนัก 6.2 กรัม มีความเร็ว 322 ± 9.1 เมตร/วินาที (1055 ± 30 ฟุต/วินาที) แต่ปัจจุบัน NIJ ได้ยกเลิกการใช้มาตรฐานการป้องกันระดับ I เนื่องจากไม่เพียงพอที่จะป้องกันกระสุนปืน
ระดับ IIA (9 mm; .40 S&W)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 ม.ม. น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 373 ± 9.1 เมตร/วินาที (1225 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .40 S&W น้ำหนัก 11.7 กรัม มีความเร็ว 352 ± 9.1 เมตร/วินาที (1155 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะที่มีมาตรฐานระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I ได้
ระดับ II (9 mm; .357 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุน 9 ม.ม. น้ำหนัก 8 กรัม มีความเร็ว 398 ± 9.1 เมตร/วินาที (1305 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุน .357 Magnum น้ำหนัก 10.2 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะที่มีมาตรฐานระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I และ IIA ได้ด้วย
ระดับ IIIA (.357 Sig; .44 Magnum)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด .357 SIG น้ำหนัก 8.1 กรัม มีความเร็ว 448 ± 9.1 เมตร/วินาที (1470 ± 30 ฟุต/วินาที) และกระสุนขนาด .44 Magnum น้ำหนัก 15.6 กรัม มีความเร็ว 436 ± 9.1 เมตร/วินาที (1430 ± 30 ฟุต/วินาที) เสื้อเกราะตามมาตรฐานนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA และ II ได้ด้วย
ระดับ III (Rifles)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนขนาด 7.62x51 ม.ม. NATO M80 ball น้ำหนัก 9.6 กรัม มีความเร็ว 847 ± 9.1 เมตร/วินาที (2780 ± 30 ฟุต/วินาที) ซึ่งเสื้อเกราะตามมาตรฐานนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II และ IIIA ได้ด้วย
ระดับ IV (Armor Piercing Rifle)	เกราะสามารถป้องกันกระสุนเจาะเกราะ .30-06 Springfield M2 น้ำหนัก 10.8 กรัม มีความเร็ว 878 ± 9.1 เมตร/วินาที (2880 ± 30 ฟุต/วินาที) ซึ่งเสื้อเกราะระดับนี้สามารถป้องกันกระสุนปืนระดับ I, IIA, II, IIIA และ III ได้ด้วย

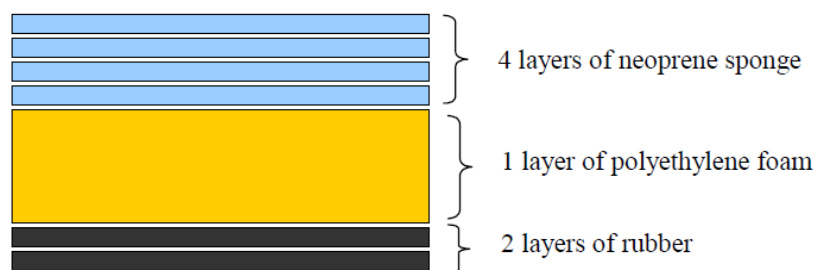
2.8.2 ประสิทธิภาพในการต้านทานต่อการแทงจากอาวุธที่มีความคม (stab resistance of personal body armor)

เนื่องจากภัยคุกคามเจ้าหน้าที่ที่ทำงานเสี่ยงภัยหรือผู้สวมใส่เสื้อเกราะมิได้มีเพียงแค่อาวุธปืนเท่านั้น ยังมีอาวุธมีคมที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่บุคคลได้ในระยะประชิด เช่น มีด โลหะแหลม เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ การทดสอบประสิทธิภาพของเสื้อเกราะแบบอ่อนเบื้องต้นโดยทั่วไป จะเป็นการทดสอบความต้านทานต่อการแทงจากอาวุธที่มีความคม การทดสอบนี้ได้ถูกนำมาใช้ทดสอบเกราะชนิดของเหลวในหลายงานวิจัย โดยมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่ NIJ Standard-0115.00 มาตรฐานนี้

แบ่งระดับการต้านทานต่อการแทงออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน แสดงดังตารางที่ 2.4 วิธีการทดสอบทำได้โดยการปล่อยก้อนน้ำหนักซึ่งมีใบมีดแหลมเชื่อมหรือผูกติดอยู่ที่ปลายก้อนน้ำหนักที่ระยะความสูงต่างๆ ลงมากระทบกับแผ่นชิ้นงานทดสอบ จากนั้นวัดค่าความต้านทานที่ได้จากเซ็นเซอร์และตรวจสอบแผ่นพยานที่รองด้านล่าง (backing material) ดังรูปที่ 2.10 ว่าทิ้งร่องรอยลึกเป็นระยะเท่าใด

ตารางที่ 1.4 ระดับการต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานตาม NIJ Standard-0115.00 [41]

Protection Level	“E1” Strike Energy		“E2” Overtest Strike Energy	
	J	ft· lbf	J	ft· lbf
1	24 ± 0.50	17.7 ± 0.36	36 ± 0.60	26.6 ± 0.44
2	33 ± 0.60	24.3 ± 0.44	50 ± 0.70	36.9 ± 0.51
3	43 ± 0.60	31.7 ± 0.44	65 ± 0.80	47.9 ± 0.59



รูปที่ 1.10 แสดงลักษณะแผ่นรองด้านล่าง [41]

เมื่อพิจารณาหลักการการทำงานของเสื่อเกราะที่ประกอบจากสิ่งทอ แต่ละแผ่นของสิ่งทอจะสานด้วยเส้นใยที่มีสมบัติความแข็งแรงพิเศษ เช่น เส้นใยเคพลา เมื่อกระสุนหรืออาวุธมีคมกระทบกับเสื่อเกราะ แต่ละชั้นของแผ่นสิ่งทอจะดูดซับพลังงานและกระจายแรงไปตามพื้นผิวของแผ่นสิ่งทอซึ่งประกอบด้วยเส้นใยสานกัน เส้นใยเหล่านี้จะเกิดการยืดตัวหรือเกิดการฉีกขาดเสียหาย การดูดซับและกระจายพลังงานจะดำเนินไปอย่างรวดเร็วจนกระทั่งกระสุนหรืออาวุธมีคมนั้นหยุดลงในที่สุด ดังนั้นการทอเส้นใยให้มีความหนาแน่นสูงก็จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อภัยคุกคามทั้งกระสุนและสิ่งมีคม แต่ก็จะเป็นการเพิ่มน้ำหนักและความไม่คล่องตัวแก่ผู้สวมใส่

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

H. Lin และคณะ [42] ศึกษาพฤติกรรมของไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิงซึ่งเตรียมจากซิลิกาและอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก กระจายตัวอยู่ในพอลิเอทิลีนไกลคอล พบว่าสารแขวนลอยที่เตรียมจากอะลูมินาแสดงพฤติกรรมแบบ shear thinning คือความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มแรงเค้น ในขณะที่สารแขวนลอยซิลิกาแสดงสมบัติเชียร์ติกเคนนิง นั่นคือ มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มแรงเค้น ผู้ทำวิจัยได้อธิบายว่าพฤติกรรมนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากพันธะ

ไฮโดรเจนระหว่างซิลิกาและพอลิเอทิลีนไกลคอล นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกา จะส่งผลให้ความหนืดของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้น ณ แรงเค้นค่าเท่ากัน

T. Tian และคณะ [43] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมการไหลของของไหลเชียร์ติกเคนนิง โดยเตรียมสารแขวนลอยจากฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 14 นาโนเมตร (พื้นที่ผิว 400 ตารางเมตรต่อกรัม) ปริมาณ 10 กรัม กระจายตัวในเอทิลีนไกลคอลปริมาณ 40 กรัม ใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ตรวจวัดพฤติกรรมการไหลตัวของอุณหภูมิในช่วง 20-80 องศาเซลเซียส พบว่า สารแขวนลอยแสดงพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิงที่ทุกอุณหภูมิ โดยความหนืดมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น และ ยังพบว่าอัตราเฉือนวิกฤติมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

การเติมสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิงนั้นได้รับความสนใจจาก S. Gurgen และคณะ [3, 4] ซึ่งทดลองเติมอนุภาคของสารที่มีความแข็งสูง เพื่อจุดประสงค์ที่จะพัฒนาสมบัติเชิงกลให้กับชิ้นงานในขณะที่พฤติกรรมการไหลตัวของระบบยังคงเป็นแบบเชียร์ติกเคนนิง ซึ่งจะส่งผลเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้แก่เกราะของเหลว โดยเตรียมสารแขวนลอยจากฟุ้งซิลิกาขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร (พื้นที่ผิว 90 ตารางเมตรต่อกรัม) กระจายตัวในพอลิเอทิลีนไกลคอล และเติมสารตัวเติม ได้แก่ โบรอนคาร์ไบด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์ และ อะลูมินา ในปริมาณต่างๆ จากนั้นทำการตรวจสอบพฤติกรรมการไหลที่อุณหภูมิ 20-60 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่าความหนืดของสารแขวนลอยลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยสารแขวนลอยที่เติมซิลิคอนคาร์ไบด์แสดงพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิงที่เสถียรที่สุด รองลงมาคือสารแขวนลอยที่เติมอะลูมินา ในขณะที่สารแขวนลอยที่เติมโบรอนคาร์ไบด์จะไม่แสดงพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิงเมื่อปริมาณโบรอนคาร์ไบด์มีความเข้มข้นสูงกว่า 5% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและขนาดอนุภาคสารตัวเติม พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารตัวเติมจะทำให้ความหนืดของสารแขวนลอยสูงขึ้น และ ณ ความเข้มข้นเท่ากัน การใช้สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (0.34 ไมครอน) จะส่งผลให้สารแขวนลอยมีความหนืดสูงกว่าเมื่อใช้สารตัวเติมที่มีขนาดโตกว่า (1.11 ไมครอน)

นอกเหนือไปจากการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของไหลเชียร์ติกเคนนิง S. Gurgen และคณะ [39] ยังได้นำสิ่งทอเคลือบผ่านกระบวนการจุ่มแช่ (impregnate) ในสารแขวนลอยซิลิกาและพอลิเอทิลีนซึ่งเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 25% โดยน้ำหนัก โดยขั้นตอนการจุ่มแช่นั้นใช้เวลา 1 นาที และนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 79 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความต้านทานต่อการแทง จากผลการทดสอบ พบว่า ชิ้นงานเคลือบที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลเชียร์ติกเคนนิงมีความต้านทานต่อการแทงสูงกว่าชิ้นงานที่ประกอบจากแผ่นเคลือบอย่างเดียว และเคลือบที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลเชียร์ติกเคนนิงที่เติมสารตัวเติมมีความต้านทานต่อการแทงดีที่สุด โดยชิ้นงานที่ใช้สารตัวเติมขนาดอนุภาคใหญ่จะมีความต้านทานที่ต่ำกว่าชิ้นงานที่ใช้สารตัวเติมขนาดอนุภาคเล็ก

X. Li และคณะ [44] ทำการจุ่มแช่สิ่งทอเคล้าในของไหลเซียร์ทิกเคนนิงซึ่งประกอบด้วยซิลิกาขนาดอนุภาค 400 นาโนเมตร เข้มข้น 60% โดยน้ำหนัก ในพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยขั้นตอนการจุ่มแช่ใช้เวลา 4 นาที และนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เปรียบเทียบสมบัติด้านความต้านทานต่อการแทงกับสิ่งทอเคล้าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการใดๆ (แบบดั้งเดิม) ผลจากการทดสอบพบว่า ชิ้นงานเคล้าที่จัดเรียงจุ่มมีจำนวนชั้น 12 ชั้นแบบดั้งเดิมมีรอยทะลุทั้งหมดทุกชั้น ในขณะที่ชิ้นงานเคล้าที่ถูกเคลือบผิวเส้นใยด้วยของไหลเซียร์ทิกเคนนิงนั้นมีรอยทะลุเล็กเพียง 4 ชั้น

Y.S. Lee และคณะ [1] ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันกระสุนระหว่างเกราะแบบดั้งเดิมและเกราะที่ผ่านการจุ่มแช่ด้วยของไหลเซียร์ทิกเคนนิง โดยของไหลเซียร์ทิกเคนนิงในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยซิลิกาขนาดอนุภาคเฉลี่ย 446 นาโนเมตร เข้มข้น 40% โดยน้ำหนัก กระจายตัวในเอทิลีนไกลคอล นำมาผ่านกระบวนการจุ่มแช่และนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดเอทานอล จากกระบวนการนี้จะได้สารแขวนลอยซิลิกาเข้มข้น 57% โดยปริมาตร จากนั้นนำเข้าอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดเอทิลีนไกลคอล กำหนดให้ชิ้นงานมีการจัดเรียงสิ่งทอเคล้าจำนวน 4 ชั้นเท่ากัน ทำการทดสอบยิงด้วยปืนแก๊สฮีเลียม ความเร็ว 244 เมตรต่อวินาที ตามมาตรฐาน NATO standard fragment simulation projectile (FSP) ผลจากการทดสอบยิงพบว่า ชิ้นงานเคล้าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ด้วยของไหลเซียร์ทิกเคนนิงซึ่งรอยกระสุนไว้ที่ความลึกน้อยกว่าชิ้นงาน เคล้าแบบดั้งเดิมถึง 3 เท่า แสดงให้เห็นถึงสมรรถภาพของเกราะที่พัฒนาขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อนำของไหลเซียร์ทิกเคนนิงมาประยุกต์ใช้

จากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้ข้อมูลยืนยันว่า การนำของไหลเซียร์ทิกเคนนิงที่มีการเติมสารตัวเติมที่เหมาะสมมาใช้ร่วมกับสิ่งทอเคล้าสามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลของเสื้อเกราะได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ ในการเตรียมของไหลเซียร์ทิกเคนนิง ตัวแปรต่างๆทั้งจากสารเคมีและกระบวนการผลิตล้วนมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลตัว ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของเสื้อเกราะที่ผลิตจากของไหลดังกล่าว สำหรับงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและการเติมสารตัวเติมอะลูมินาที่มีต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเซียร์ทิกเคนนิง รวมทั้งทดสอบความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานสิ่งทอเคล้าที่ทำการจุ่มแช่ด้วยของไหลเซียร์ทิกเคนนิง เป็นที่คาดหวังว่า ผลของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้จะมีส่วนในการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานของเกราะชนิดของเหลวให้ดียิ่งขึ้นไป เพื่อที่จะก้าวเข้าไปสู่ขั้นตอนการผลิตเสื้อเกราะชนิดของเหลวขึ้นใช้เองได้ภายในประเทศ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและการเติมสารตัวเติมอะลูมินาต่อพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชิงรีทิคเคนนิ่งที่ประกอบด้วยซิลิกาและพอลิเอทิลีนไกลคอลและความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงาน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึง วัสดุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมสาร วิธีการเตรียมชิ้นงาน รวมไปถึงการตรวจสอบสมบัติของสาร ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การกระจายขนาดของอนุภาค อีกทั้งสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน ซึ่งจะแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

3.1 วัสดุดิบ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุดิบที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ผงซิลิกา ผงอะลูมินา รวมถึงสารเคมีที่ใช้ โดยได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับบริษัทผู้จำหน่ายไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 1.5 แสดงวัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุดิบ	บริษัทผู้จำหน่าย
ผงซิลิกา ชนิด KE-P50	Nippon Shokubai Co., Ltd. Tokyo, Japan
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG200)	Aldrich Chemical Company, Allentown, US
ผงอะลูมินา ชนิด TMDA	Taimei Chemicals Co., Ltd. Japan
ผงอะลูมินา ชนิด AMS-9	Sumitomo Co., Ltd. Japan
ผงอะลูมินา ชนิด A-32	Nippon Light Metal Co., Ltd. Japan

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- สิ่งทอเคฟล่า
- เครื่องรีโอมิเตอร์ รุ่น ARES-G2 strain controlled จากบริษัท TA instrument
- เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการแทง INSTRON 5943
- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
- ตู้อบอุณหภูมิ 80 และ 200 องศาเซลเซียส
- เอทานอล
- ถาดและตะแกรงสำหรับวางชิ้นงาน

3.2 เตรียมสารแขวนลอยและตรวจสอบพฤติกรรมการไหลตัว

3.2.1 ผลของปริมาณซิลิกา

- ผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลกับซิลิกาโดยปรับเปลี่ยนปริมาณของซิลิกาตามสัดส่วน 30% ถึง 52% โดยปริมาตร กวนผสมด้วยแท่งแม่เหล็ก (magnetic bar) เป็นเวลา 40 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
- วิเคราะห์สมบัติรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบ strain controlled รุ่น ARES-G2 (TA instruments) ใช้หัววัดแบบโคนและแผ่นเรียบ (cone-plate geometry) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดมุม 0.04 เรเดียน ขนาดของ gap เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร โดยกำหนดอัตราเฉือน (shear rate) ระหว่าง 0.01-1000 ต่อวินาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3.2.2 ผลของการเติมสารตัวเติมอะลูมินา

- เตรียมสารแขวนลอยของผสมระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอลกับซิลิกา โดยใช้ปริมาณของซิลิกาตามสัดส่วนเท่ากับ 50% โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง
- ผสมสารตัวเติมอะลูมินาลงในสารที่เตรียมได้จากข้อแรก ทำการปั่นผสมต่อไปอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยในการผสมจะปรับเปลี่ยนขนาดอนุภาคและปริมาณของอะลูมินา ดังนี้
 - ขนาดอนุภาค : 0.1 1.3 และ 1.4 ไมโครเมตร
 - ปริมาณ : 1% 3% และ 5% โดยปริมาตร
- วิเคราะห์สมบัติรีโอโลยีของตัวอย่าง ดังรายละเอียดการทดสอบข้างต้น

3.3 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัสดุ

3.3.1 โครงสร้างจุลภาค

การเตรียมตัวอย่างแบบผงของสารตั้งต้นเพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM; JSM-5410, JEOL, Japan) เตรียมโดยการนำผงตัวอย่างที่เตรียมไว้กระจายตัวในปีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ ก่อนจะนำไปเข้าเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นหยดสารแขวนลอยแต่ละชนิดลงบนกระจกสไลด์ขนาดเล็ก นำเข้าเตาอบเพื่อกำจัดความชื้นและติดกระจกสไลด์ลงบนแผ่นคาร์บอน จากนั้นนำไปเคลือบทองโดยใช้กระแสไฟ 15 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 200 วินาที เพื่อให้ตัวอย่างมีสภาพนำไฟฟ้า พร้อมทั้งจะนำไปตรวจสอบ

3.3.2 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาคของวัสดุ

ขนาดอนุภาคและการกระจายของผงอะลูมินาทั้งสามชนิดถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิค light scattering ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer 2000, USA) การเตรียมตัวอย่างทดสอบทำโดยนำผงอะลูมินาแต่ละชนิดไปกระจายอนุภาคในปีกเกอร์ที่บรรจุ

น้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 700 ml ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 5 นาที ก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการวัดขนาดและการกระจายขนาดอนุภาค

3.4 การจุ่มแช่สิ่งทอเคลฟล่าในของไหลเซียร์ทิกเคนนิง

- ตัดชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าเป็นขนาด 3×3 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักชิ้นงานก่อนการทดลองและจดบันทึก
- เจือจางของไหลเซียร์ทิกเคนนิงด้วยเอทานอล โดยในการผสมจะปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงและเอทานอล ได้แก่ 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 โดยใช้เวลาในการจุ่มแช่เท่ากันคือ 5 นาที รวมถึงทำการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่ ได้แก่ 1 3 และ 5 นาที เพื่อทำการหาเงื่อนไขในการจุ่มแช่ที่แน่นอน
- นำสิ่งทอเคลฟล่าจุ่มแช่ในสารที่เตรียมได้จากข้อ 2 ณ อุณหภูมิห้อง
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดเอทานอล จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานหลังการทดลองและจดบันทึก

3.5 โครงสร้างจุลภาคของสิ่งทอเคลฟล่า

การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าเพื่อศึกษาลักษณะเส้นใยและโครงสร้างจุลภาคของวัสดุด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM; JSM-5410, JEOL, Japan) ในการเตรียมตัวอย่างก่อนการทดสอบนั้นแยกออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าเพียงอย่างเดียว(ไม่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่) และชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ เตรียมโดยการตัดชิ้นงานเป็นขนาดตามที่ต้องการ นำเข้าเตาอบเพื่อกำจัดความชื้น ส่วนชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่นำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 200 องศา-เซลเซียสเพื่อกำจัดพอลิเอทิลีนไกลคอล จากนั้นตัดชิ้นงานลงบนแผ่นคาร์บอนและนำไปเคลือบทองโดยใช้กระแสไฟ 15 มิลลิแอมแปร์ เป็นเวลา 200 วินาที เพื่อให้ตัวอย่างมีสภาพนำไฟฟ้า พร้อมทั้งจะนำไปตรวจสอบ

3.6 การทดสอบความต้านทานต่อการแทง

3.6.1 เตรียมชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าจุ่มแช่ในของไหลเซียร์ทิกเคนนิง

- ตัดชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าขนาด 13×13 เซนติเมตร
- เจือจางของไหลเซียร์ทิกเคนนิงด้วยเอทานอลในอัตราส่วน 1:3 ลงในภาตสำหรับทำการจุ่มแช่
- นำสิ่งทอเคลฟล่าจุ่มแช่ในสารที่เตรียมได้จากข้อ 2 เป็นเวลา 5 นาที ณ อุณหภูมิห้อง
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดเอทานอล

3.6.2 ทดสอบความต้านทานต่อการแทง

- นำชิ้นงานสิ่งทอเคลฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่แล้วไปทดสอบความต้านทานการแทงด้วยเครื่อง INSTRON 5943 ดังรูปที่ 3.1 โดยในการทดสอบนี้ ใช้ load cell

ขนาด 1,000 นิวตัน อัตราเร็ว 2,000 มิลลิเมตรต่อนาที มีดมีความยาว 100 ± 0.5 มิลลิเมตร กว้าง 15 ± 0.05 มิลลิเมตร และหนา 2 ± 0.05 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน NIJ Standard-0115.00 ดังรูปที่ 3.2

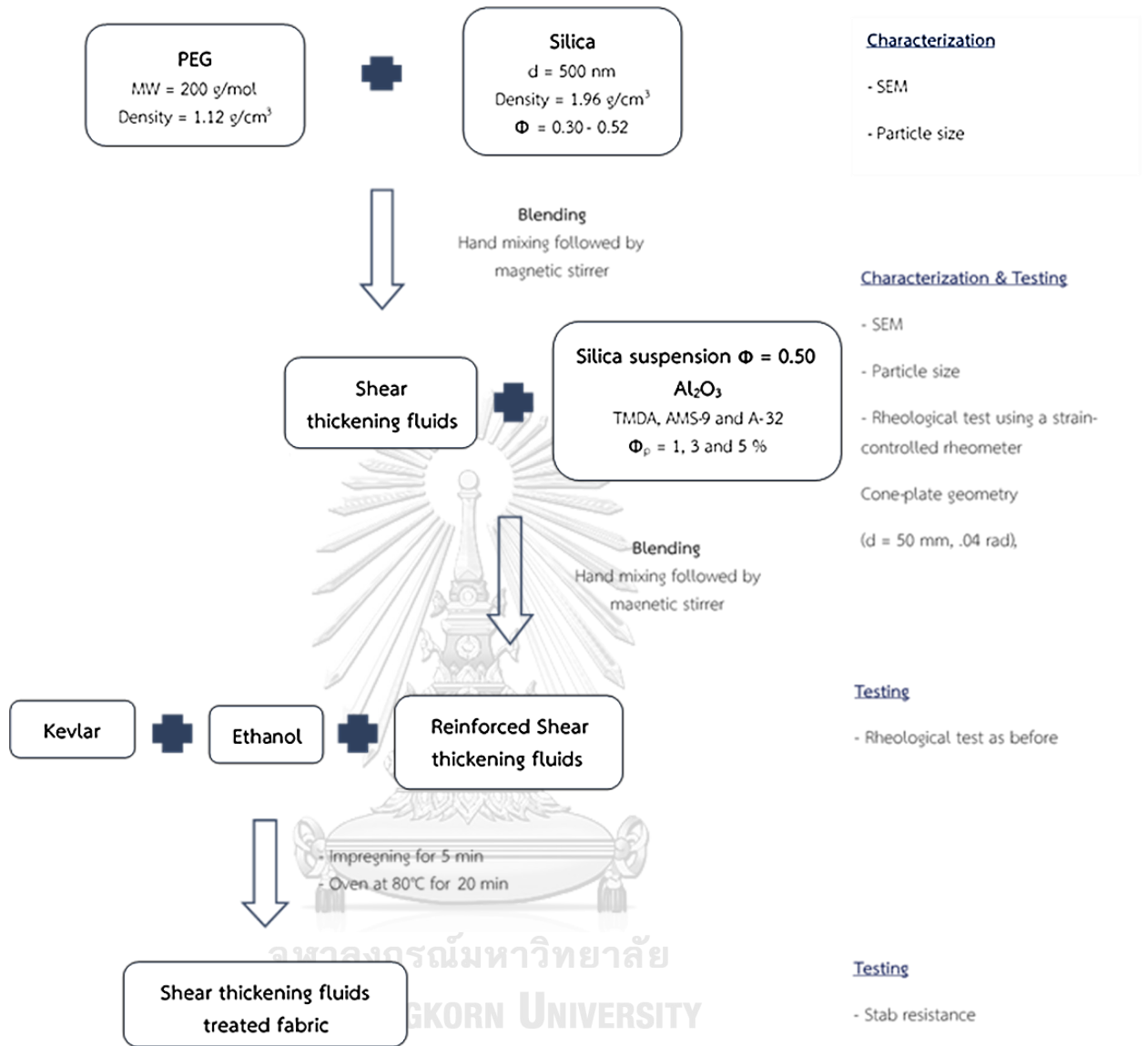


รูปที่ 1.11 การทดสอบความต้านทานต่อการแทง



รูปที่ 1.12 ลักษณะใบมีดที่ใช้ในการทดสอบ

3.7 แผนผังงานวิจัย



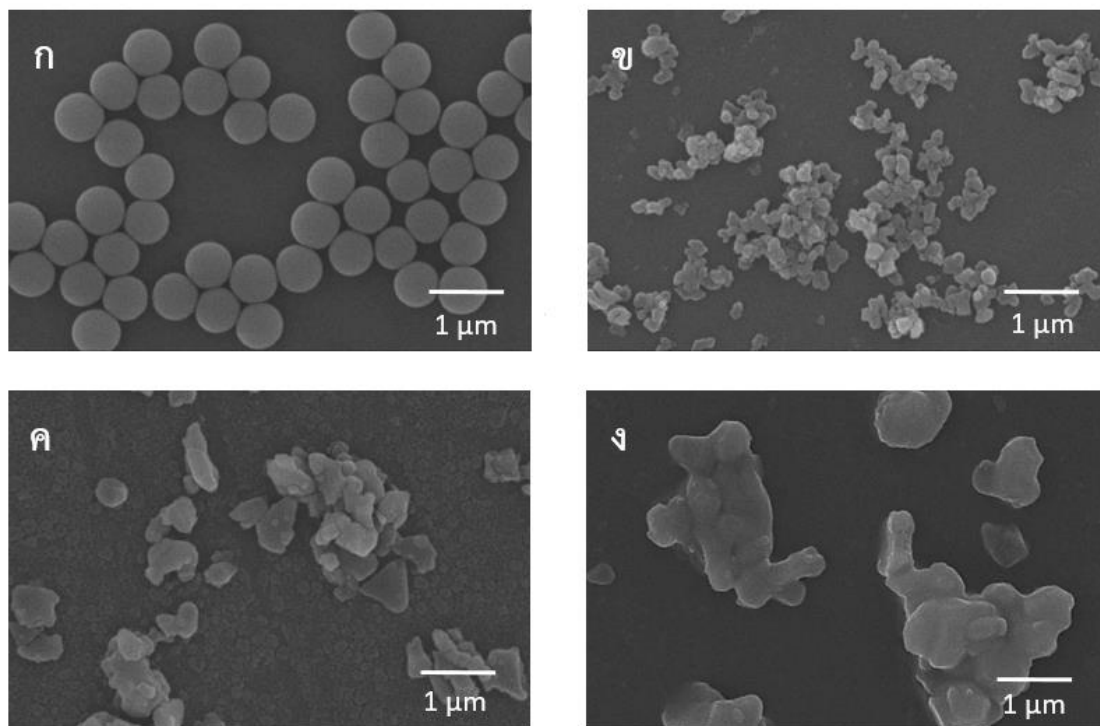
บทที่ 4

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของผงวัตถุดิบ

4.1.1 โครงสร้างจุลภาค

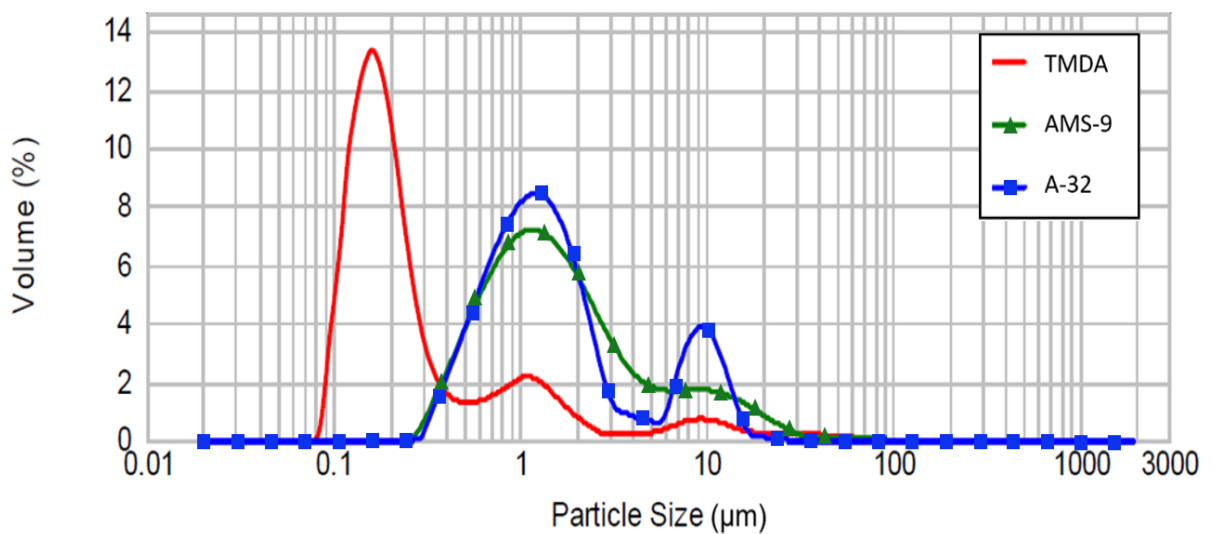
อนุภาคซิลิกาและอะลูมินาซึ่งเป็นสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค scanning electron microscopy แสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่า ตัวอย่างซิลิกา KE-P50 มีรูปร่างทรงกลม ผิวเรียบ และมีขนาดใกล้เคียงกันมาก โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 500 – 600 นาโนเมตร ส่วนผงอะลูมินาซึ่งมาจากสามแหล่ง ได้แก่ TMDA AMS-9 และ A-32 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับภาพแสดงโครงสร้างจุลภาค จะเห็นว่า อะลูมินาจากทั้งสามแหล่งล้วนมีรูปร่างแตกต่างกัน (irregular shape) โดย TMDA มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดและอนุภาคมีรูปร่างค่อนข้างสมมาตร ในขณะที่ AMS-9 และ A-32 ซึ่งมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า TMDA นั้น มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) ใกล้เคียงกัน แต่ A-32 มีการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาค (agglomeration) มากกว่า AMS-9



รูปที่ 1.13 โครงสร้างจุลภาคของผงซิลิกา (ก) KE-P50 และผงอะลูมินา (ข) TMDA (ค) AMS-9 และ (ง) A-32

4.1.2 การกระจายขนาดอนุภาคของอะลูมินา

จากการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของผงอะลูมินาด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง ซึ่งแสดงสรุปในรูปแบบที่ 4.2 และตารางที่ 4.1 พบว่า ให้ผลสอดคล้องกับผลจากภาพโครงสร้างจุลภาค นั่นคือ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบขนาดอนุภาคระหว่างผงอะลูมินาจากทั้งสามแหล่ง TMDA นั้นมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) 0.19 ไมครอน ในขณะที่ AMS-9 และ A-32 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงกัน เท่ากับ 1.33 และ 1.44 ไมครอน ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการกระจายขนาดอนุภาค จะเห็นว่าโดยรวมแล้ว ผงอะลูมินาในงานวิจัยนี้มีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 – 9.0 ไมครอน นอกจากนี้ยังพบว่า อะลูมินาจากทั้งสามแหล่งมีลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแบบ bimodal สำหรับตัวอย่าง AMS-9 และ A-32 และ trimodal สำหรับตัวอย่าง TMDA ซึ่งการกระจายของขนาดอนุภาคในลักษณะดังกล่าว มักบ่งชี้ถึงการจับตัวกันของอนุภาคปฐมภูมิเกิดเป็นกลุ่มก้อนอนุภาค (agglomeration)



รูปที่ 1.14 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของอะลูมินาแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1.6 สรุปการกระจายของขนาดอนุภาคของอะลูมินาแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษา

อะลูมินา	ขนาด (ไมครอน)		
	d_{10}	d_{50}	d_{90}
TMDA	0.12	0.19	1.49
AMS-9	0.55	1.33	8.38
A-32	0.57	1.44	8.99

4.2 พฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียร์ติกเคนนิง

4.2.1 ผลของปริมาณซิลิกา

จากการเตรียมสารแขวนลอยซิลิกาในของเหลวพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณซิลิกาจาก 30% ถึง 52% โดยปริมาตร ($\phi = 0.3$ ถึง 0.52) จากนั้น ทำการทดสอบพฤติกรรมการไหลของตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate) แก่ของไหล ตั้งแต่ 1 ถึง 1000 วินาที⁻¹ ณ อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่า ตัวอย่างที่มีซิลิกาในปริมาณน้อยกว่า 40% โดยปริมาตร แสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน นั่นคือ มีความหนืดคงที่เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนแก่ระบบจนถึง 1000 วินาที⁻¹ ในขณะที่ตัวอย่างที่มีปริมาณซิลิกามากกว่า 40% โดยปริมาตร ขึ้นไป แสดงพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิงหรือมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน ณ ช่วงอัตราการเฉือนต่ำ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนจนถึงค่าหนึ่ง (ที่อัตราการเฉือนอยู่ในช่วง 30-200 วินาที⁻¹) ตัวอย่างดังกล่าวจะเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลมาเป็นแบบเชียร์ติกเคนนิง กล่าวคือตัวอย่างมีความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน

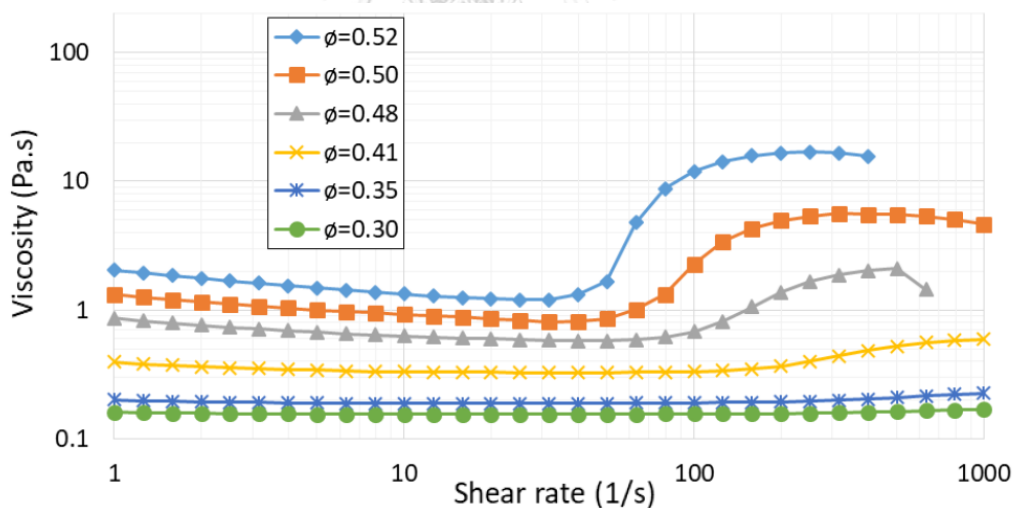
ค่าอัตราการเฉือนที่พฤติกรรมของของไหลเริ่มเปลี่ยนจากการไหลแบบเชียร์ทินนิงมาเป็นเชียร์ติกเคนนิง เรียกว่า อัตราการเฉือนวิกฤต (critical shear rate) จากการพิจารณาพฤติกรรมการไหลในรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาในของไหลจาก 41% ขึ้นไปเป็น 48 50 และ 52% โดยปริมาตร อัตราการเฉือนวิกฤตจะมีค่าลดลงจาก 200 วินาที⁻¹ ลงมาเป็น 100 70 และ 50 วินาที⁻¹ ตามลำดับ ผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Gurgun และคณะ [4] ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากสารฟุ้งซิลิกา ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร ที่กระจายตัวในของเหลวพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยผู้วิจัยได้รายงานว่ อัตราการเฉือนวิกฤตมีค่าลดลงจาก 40 วินาที⁻¹ เป็น 20 วินาที⁻¹ เมื่อเพิ่มปริมาณฟุ้งซิลิกาในสารแขวนลอยจาก 5% เพิ่มขึ้นเป็น 20% โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเฉือนวิกฤตที่ลดลงกับปริมาณซิลิกา ϕ ที่เพิ่มขึ้นในงานวิจัยนี้ (แสดงในรูปที่ 4.4) จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{อัตราการเฉือนวิกฤต} = -1389.1 \times \phi + 768.29$$

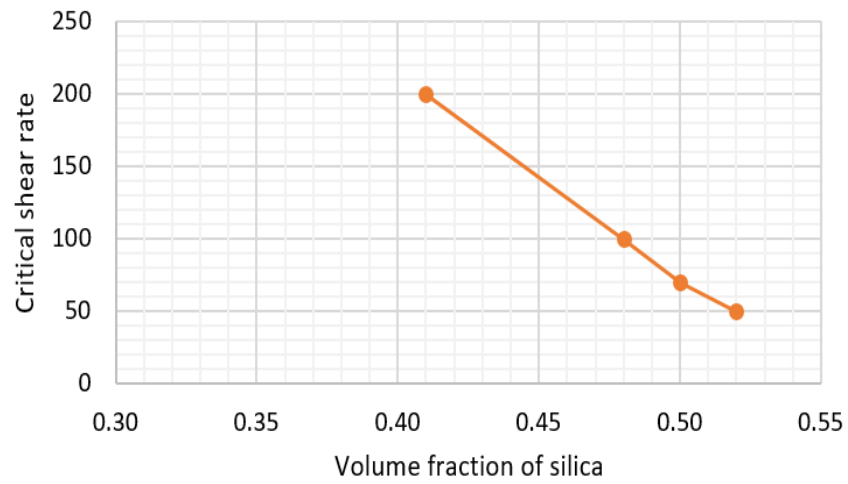
ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนวิกฤตและปริมาณซิลิกาในตัวอย่างสารแขวนลอยดังแสดงในรูปที่ 4.5 นั้นพบว่าเป็นอิสระต่อกัน

การที่ความหนืดเริ่มต้นของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น นับเป็นปรากฏการณ์ปกติที่เกิดขึ้นในของไหลทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น T.J. Kang และคณะ [5] ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของสารแขวนลอยซิลิกา ที่มีขนาดอนุภาค 120 นาโนเมตร กระจายตัวในของเหลวพอลิเอทิลีนไกลคอล พบว่าความหนืดของตัวอย่างดังกล่าว มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 8 ปาสคาล·วินาที เป็น 45 ปาสคาล·วินาที เมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 65% โดยน้ำหนัก โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้อธิบายพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิ่งว่า เกิดจากอิทธิพลของการสัมผัสกันของอนุภาค และแรงไฮโดรไดนามิกที่ส่งผลต่อความหนืดของตัวอย่าง [31] โดยเมื่อตัวอย่างมีจำนวนอนุภาคในระบบมากขึ้น แรงระหว่างอนุภาค (inter-particle forces) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และช่วยส่งเสริมให้เกิดการสัมผัสกันของอนุภาค ส่งผลให้อัตราการเฉือนวิกฤตมีค่าลดลง และทำให้เกิดพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิ่งของตัวอย่างได้ง่ายขึ้น [45] เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยนี้ รูปที่ 4.6 แสดงอัตราส่วนการเกิดเชียร์ติกเคนนิ่ง (thickening ratio) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอนุภาคซิลิกา ϕ ในตัวอย่างเพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

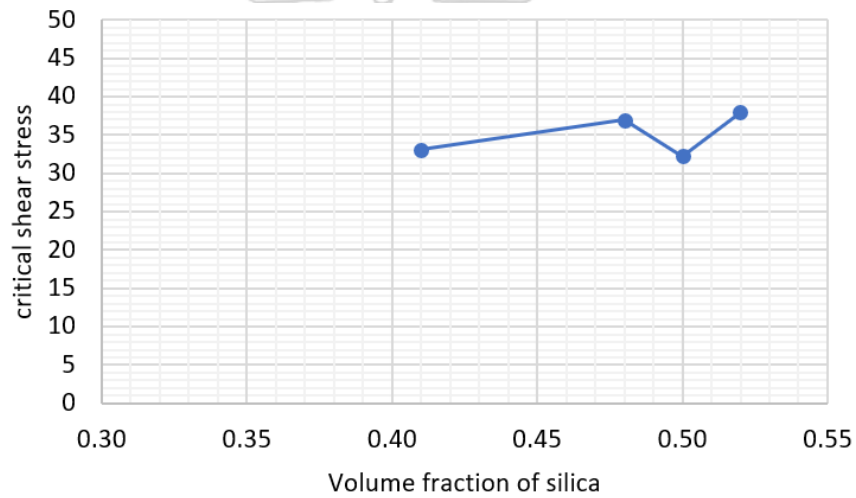
$$\text{อัตราส่วนการเกิดเชียร์ติกเคนนิ่ง} = 0.2317e^{0.6802\phi} \quad \text{เมื่อ } \phi > 0.4$$



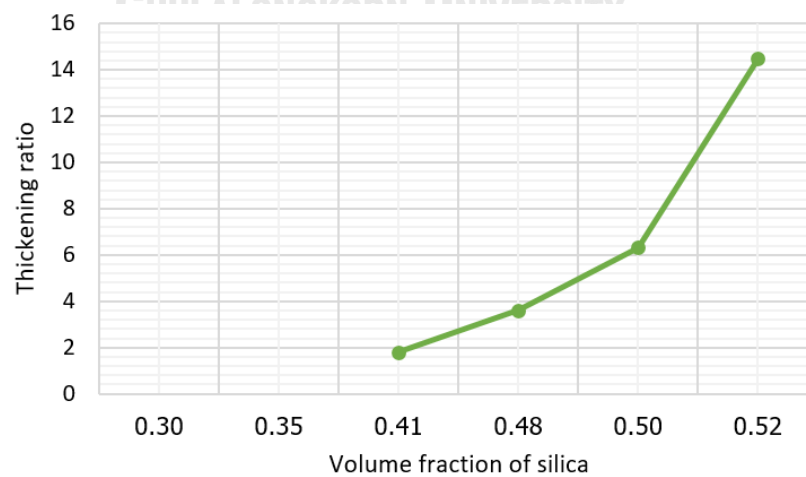
รูปที่ 1.15 พฤติกรรมการไหลของตัวอย่างสารแขวนลอยที่มีปริมาณซิลิกาแตกต่างกัน



รูปที่ 1.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนวิกฤติและปริมาณซิลิกาในตัวอย่างสารแขวนลอย



รูปที่ 1.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนวิกฤติและปริมาณซิลิกาในตัวอย่างสารแขวนลอย



รูปที่ 1.18 อัตราส่วนการเกิดพฤติกรรมไหลแบบเชียร์ทิกเคนนิ่งของตัวอย่างสารแขวนลอยที่มีปริมาณซิลิกาแตกต่างกัน

4.2.2 ผลของการเติมสารตัวเติมอะลูมินา

การศึกษาอิทธิพลของการเติมผงอะลูมินาที่มีต่อพฤติกรรมกรรมการไหลตัวของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในสารแขวนลอยซิลิกาที่กระจายตัวในตัวกลางพอลิเอทิลีนไกลคอล โดยกำหนดความเข้มข้นของซิลิกาให้มีค่าเท่ากับ 50% โดยปริมาตร และทำการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณสารตัวเติมอะลูมินา โดยใช้อะลูมินาจากสามแหล่ง ได้แก่ TMDA AMS-9 และ A-32 ซึ่งได้แสดงคุณลักษณะไว้ในหัวข้อ 4.1 และปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมสารจาก 1% ถึง 5% โดยปริมาตร ($\phi_a = 0.01$ ถึง 0.05) ทำการทดสอบพฤติกรรมกรรมการไหลของตัวอย่างที่เตรียมได้ โดยเพิ่มอัตราการเฉือนแก่ตัวอย่างตั้งแต่ 1 ถึง 500 วินาที¹ ณ อุณหภูมิห้อง และแสดงผลดังรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า ตัวอย่างทุกชนิดแสดงพฤติกรรมกรรมการไหลคล้ายกัน นั่นคือ มีพฤติกรรมกรรมการไหลแบบเซียร์ทิกเคนนิงในช่วงแรก และเริ่มแสดงพฤติกรรมกรรมการไหลแบบเซียร์ทิกเคนนิง เมื่อถึงอัตราการเฉือนค่าหนึ่ง นอกจากนี้ การเติมผงอะลูมินาจากทั้งสามแหล่งยังให้ผลที่เหมือนกันคือ เมื่อเติมสารในปริมาณ 1% โดยปริมาตร พฤติกรรมกรรมการไหลตัวของของไหลแทบไม่ต่างไปจากสถานะที่ไม่เติมสารตัวเติม การเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมกรรมการไหลเริ่มสังเกตเห็นได้เมื่อมีเติมสารตัวเติมในปริมาณ 3% โดยปริมาตร

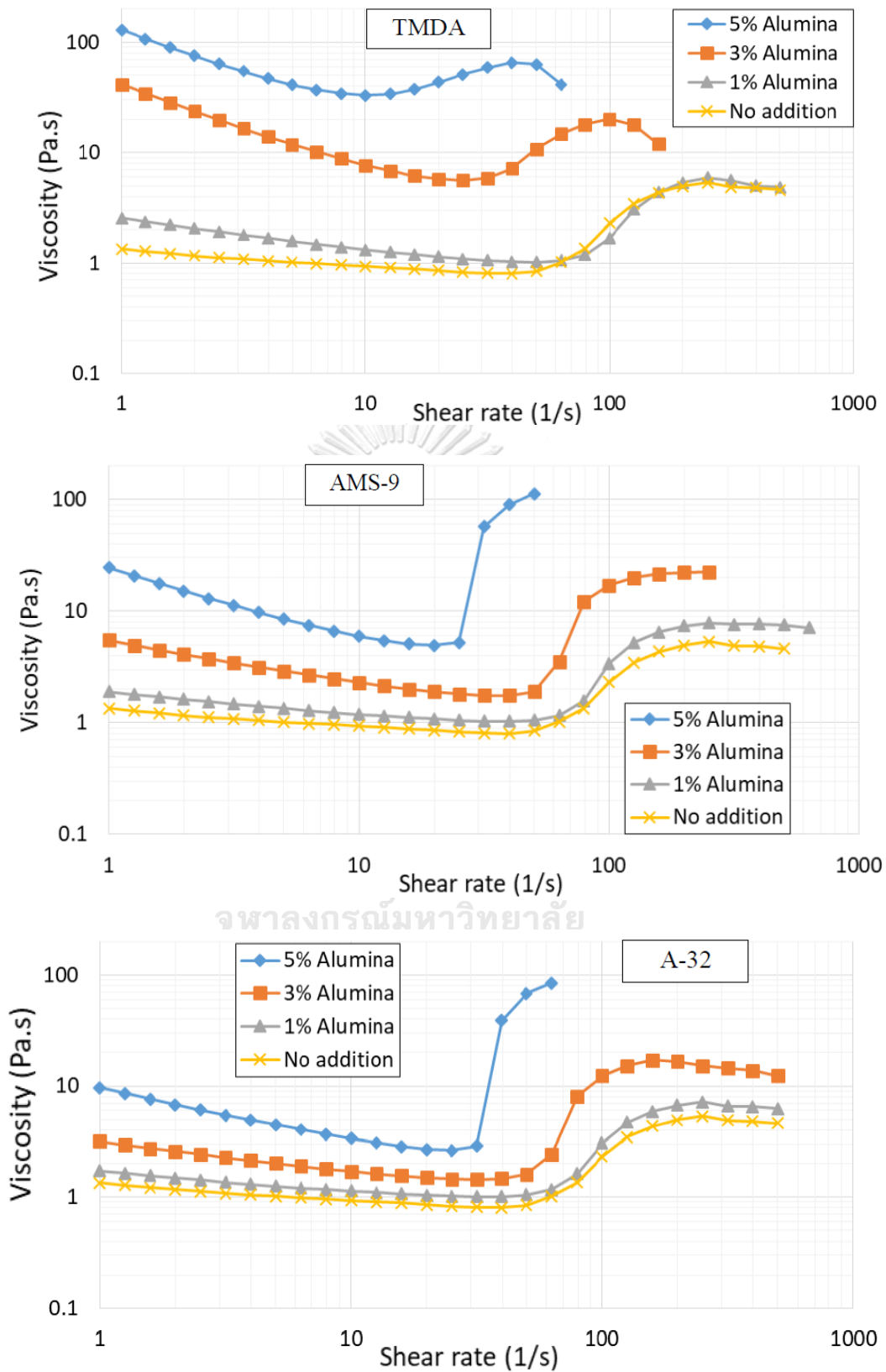
เมื่อพิจารณาอิทธิพลจากปริมาณสารตัวเติม จะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณผงอะลูมินาเพิ่มขึ้น ความหนืดของตัวอย่างจะมีค่าสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่เติมอนุภาค TMDA ความหนืดของไหลได้เพิ่มขึ้นจาก 3 ปาสคาล·วินาที เป็น 4 และ 10 ปาสคาล·วินาที เมื่อปริมาณ TMDA เพิ่มขึ้นจาก 1% เป็น 3% และ 5% โดยปริมาตร ตามลำดับ แนวโน้มลักษณะเดียวกันนี้พบได้ทั้งในกรณีที่เติมอนุภาค AMS-9 และ A-32 การที่ความหนืดมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น น่าจะเป็นผลมาจากการสัมผัสกันของอนุภาคในของไหลเพิ่มมากขึ้น [2] ทั้งนี้ งานวิจัยของ Petel และคณะ [46] ได้รายงานผลการวิจัยในลักษณะเดียวกัน เมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมกรรมการไหลตัวของตัวอย่างของไหลเซียร์ทิกเคนนิง ที่เตรียมจากสารแขวนลอยซิลิกาเข้มข้น 50.2% โดยน้ำหนัก และเติมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 25.5% โดยน้ำหนัก พบว่าความหนืดของตัวอย่างนี้มีค่าใกล้เคียงกับสารแขวนลอยซิลิกาเข้มข้น 72.5% ที่ไม่ได้เติมสารตัวเติม

นอกจากปริมาณสารตัวเติมแล้ว ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมก็ส่งผลต่อความหนืดของตัวอย่างเช่นกัน พบว่า ตัวอย่างมีความหนืดสูงที่สุด ณ บริเวณช่วงอัตราการเฉือนต่ำ เมื่อเติม TMDA ซึ่งเป็นผงอะลูมินาขนาดเล็กที่สุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และเมื่อพิจารณาการเติมอนุภาค AMS-9 และ A-32 ซึ่งเป็นอะลูมินาที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน ตัวอย่างที่มีการเติมอะลูมินาทั้งสองชนิดนี้ต่างก็แสดงพฤติกรรมกรรมการไหลที่ใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างเช่น เมื่อเติมผงอะลูมินาปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ที่อัตราการเฉือนต่ำ พบว่าตัวอย่างที่เติมอนุภาค TMDA AMS-9 และ A-32 มีความหนืดเท่ากับ 120, 25 และ 10 ปาสคาล·วินาที ตามลำดับ การที่ความหนืดของตัวอย่างในช่วงอัตราการเฉือนต่ำมีค่าเพิ่มสูงเมื่อเติมสารตัวเติมขนาดเล็ก อาจเป็นผลมาจาก ที่ปริมาณการเติมสารที่เท่ากัน อนุภาคขนาดเล็กจะมี

จำนวนอนุภาคมากกว่ากระจายอยู่ในตัวอย่าง ทำให้ลักษณะพฤติกรรมการไหลมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับกรณีที่ใช้สารตัวเติมในปริมาณสูงขึ้น

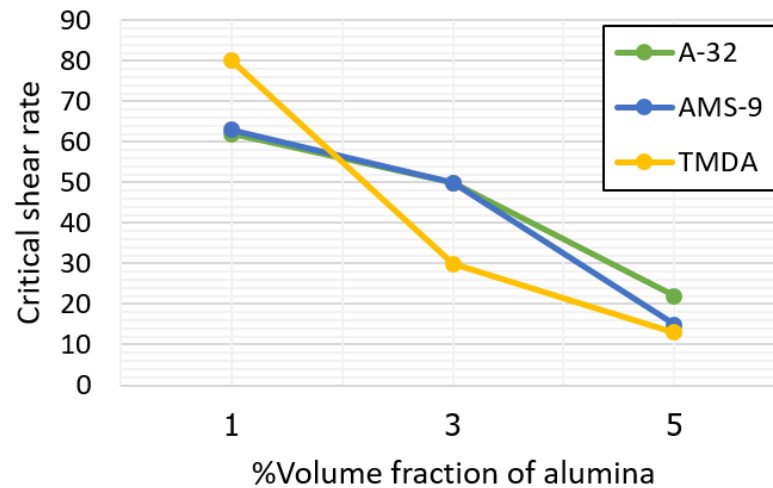
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารตัวเติมที่มีต่อค่าอัตราการเฉือนวิกฤติ พบว่า เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นหรือเมื่ออนุภาคสารตัวเติมมีขนาดเล็กลง อัตราการเฉือนวิกฤติของของไหลมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังที่แสดงในรูปที่ 4.8 ผลที่ได้กล่าวมานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Gurgen และคณะ [3] ที่ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอยที่เตรียมจากพุ่มซิลิกาขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร ความเข้มข้น 20% โดยน้ำหนัก กระจายตัวในของเหลวพอลิเอทิลีนไกลคอล และได้เติมสารตัวเติมอะลูมินา 3 ขนาด ได้แก่ 0.340, 0.512 และ 1.114 ไมครอน ในปริมาณ 5% ถึง 45% โดยน้ำหนัก พบว่า อัตราการเฉือนวิกฤติของตัวอย่างที่เตรียมได้มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมอะลูมินาหรือเมื่อใช้สารตัวเติมอะลูมินาขนาดเล็กกลง

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนการเกิดเชียร์ติกเคนนิง (รูปที่ 4.9) พบว่า ในกรณีที่เติม AMS-9 และ A-32 อัตราส่วนการเกิดเชียร์ติกเคนนิงจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับของไหลที่ไม่เติมสารตัวเติม (0.50 STF) โดยอัตราส่วนการเกิดเชียร์ติกเคนนิงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติม พฤติกรรมที่กล่าวมานี้ขัดแย้งกับผลในงานวิจัยของ S. Gurgen และคณะ [3] ที่รายงานว่าอัตราส่วนการเกิดเชียร์ติกเคนนิงจะลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เติมอนุภาค TMDA พฤติกรรมการไหลของตัวอย่างที่ได้เป็นไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยของ S. Gurgen และคณะ [3]

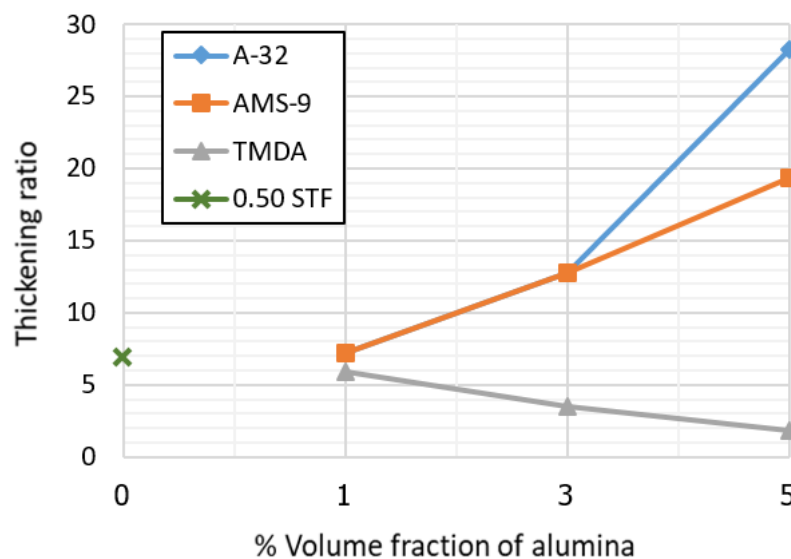


รูปที่ 1.19 พฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงที่เติมสารตัวเติมอะลูมินาต่างชนิดกัน

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้ ซึ่งพบว่า การเติมสารตัวเติมอะลูมินา A-32 ปริมาณ 5% โดยปริมาตร ลงในสารแขวนลอย 0.50 STF ได้แสดงค่าอัตราส่วนการเกิดเซียร์ทิกเคนนิ่งสูงที่สุดคือ 28 ดังนั้น จึงได้เลือกตัวอย่างของไหลที่เตรียมที่สภาวะนี้ สำหรับงานวิจัยในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 1.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนวิกฤตกับปริมาณสารตัวเติมอะลูมินาที่เติมในสารแขวนลอย 0.50 STF



รูปที่ 1.21 อัตราส่วนการเกิดเซียร์ทิกเคนนิ่งของของไหลที่มีการเติมอะลูมินาทั้งสามชนิดในปริมาณ 1% ถึง 5% โดยปริมาตร

4.3 การจุ่มแช่สิ่งทอเคล้า (Impregnation)

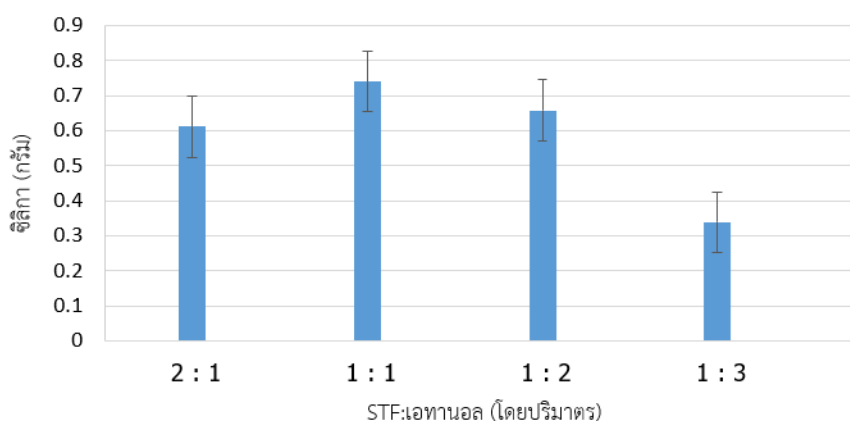
ในขั้นตอนการจุ่มแช่สิ่งทอเคล้ามีความจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อหาสภาวะในการจุ่มแช่ที่เหมาะสม เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้หลังการจุ่มแช่มีมาตรฐานเดียวกันและมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใน

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาปรับเปลี่ยน 2 ตัวแปร ได้แก่ อัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอล และเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่

4.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอล

ในงานวิจัยส่วนนี้ได้ทดลองปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอล และทำการจุ่มแช่สิ่งทอเคฟล่าขนาด 3×3 เซนติเมตร ลงในสารผสมที่เตรียมได้นี้ (ปริมาณส่วนละ 10 มิลลิลิตร) เป็นเวลา 5 นาที จากการทดลองพบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลโดยปริมาตร ให้มีค่าเท่ากับ 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:3 พบว่า ปริมาณซิลิกาที่อยู่ติดอยู่บนชิ้นงานหลังอบแห้งจะมีปริมาณโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.61, 0.74, 0.66, และ 0.34 กรัม ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า อัตราส่วนของเอทานอลที่ใช้ในกระบวนการจุ่มแช่มีผลต่อชิ้นงานเกราะชนิดของเหลว ชิ้นงานที่จุ่มแช่ในสารผสมที่มีความเข้มข้นของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงสูงกว่า แสดงแนวโน้มที่ซิลิกาจะอยู่ในชิ้นงานเป็นปริมาณมากกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้อัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอล เท่ากับ 2:1 โดยปริมาตร ปริมาณซิลิกาในชิ้นงานกลับลดต่ำลง สันนิษฐานได้ว่า สารผสมอาจจะมีเข้มข้นสูงเกินไปทำให้การดูดซึมเข้าสู่ชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าเกิดได้ยากขึ้นหรือซาลง ปริมาณซิลิกาในชิ้นงานจึงมีค่าลดต่ำลง ผลการทดสอบในส่วนนี้สามารถแสดงเป็นกราฟเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.10

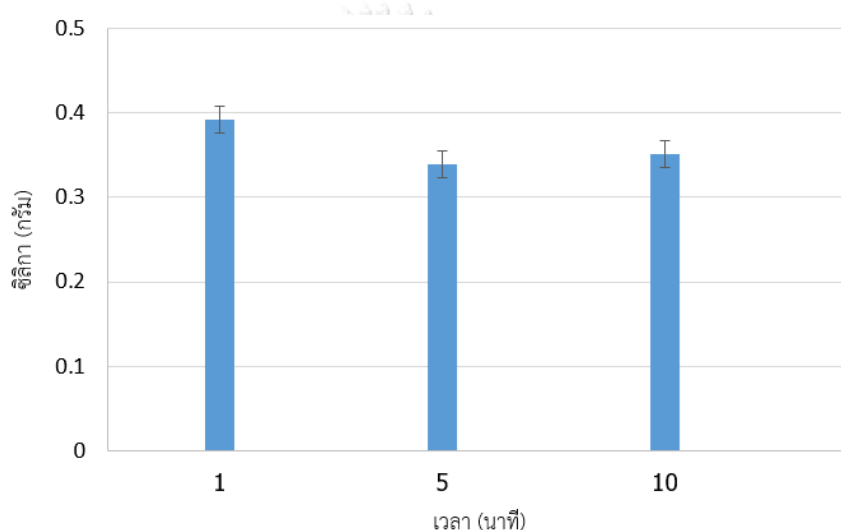
อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ตีพิมพ์ในช่วงเวลาไม่นานมานี้ พบว่า ส่วนใหญ่จะทำการจุ่มแช่สิ่งทอเคฟล่าโดยใช้ อัตราส่วนของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลเท่ากับ 1:3 โดยปริมาตร และเป็นเพียงการกำหนดค่าเพื่อควบคุมปริมาณซิลิกาในแต่ละชิ้นงานให้เท่ากัน นอกจากนี้ จากการทดสอบจริงพบว่า ชิ้นงานเคฟล่าจากการจุ่มแช่โดยใช้อัตราส่วนของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลเท่ากับ 1:3 นั้นปราศจากของเหลวส่วนเกินที่เกาะที่ผิวชิ้นงาน ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมานี้ ผู้วิจัยจึงเลือกสถานะอัตราส่วนของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลเท่ากับ 1:3 โดยปริมาตร นำมาใช้ในงานวิจัยขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 1.22 อิทธิพลของอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลที่มีต่อปริมาณซิลิกาในชิ้นงานเคฟล่า

4.3.2 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่

นอกจากอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลแล้ว อีกปัจจัยหนึ่งที่น่าจะส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานเกราะแบบของเหลวก็คือ เวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่ สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้ กำหนดอัตราส่วนของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอล เท่ากับ 1:3 โดยปริมาตร พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่จาก 1 นาที เป็น 5 และ 10 นาที ปริมาณซิลิกาที่อยู่ในชิ้นงานหลังอบแห้งมีค่าเท่ากับ 0.39, 0.34 และ 0.35 กรัม ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณซิลิกาในชิ้นงานที่ผ่านการจุ่มแช่เป็นเวลาต่างกันจาก 1 ถึง 10 นาที มีค่าใกล้เคียงกันมาก อาจกล่าวได้ว่า ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่ที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ไม่แสดงผลกระทบต่อปริมาณซิลิกาที่ปรากฏในชิ้นงานสิ่งทอเคลือบ กราฟสรุปผลการทดลองในหัวข้อนี้แสดงดังรูปที่ 4.11

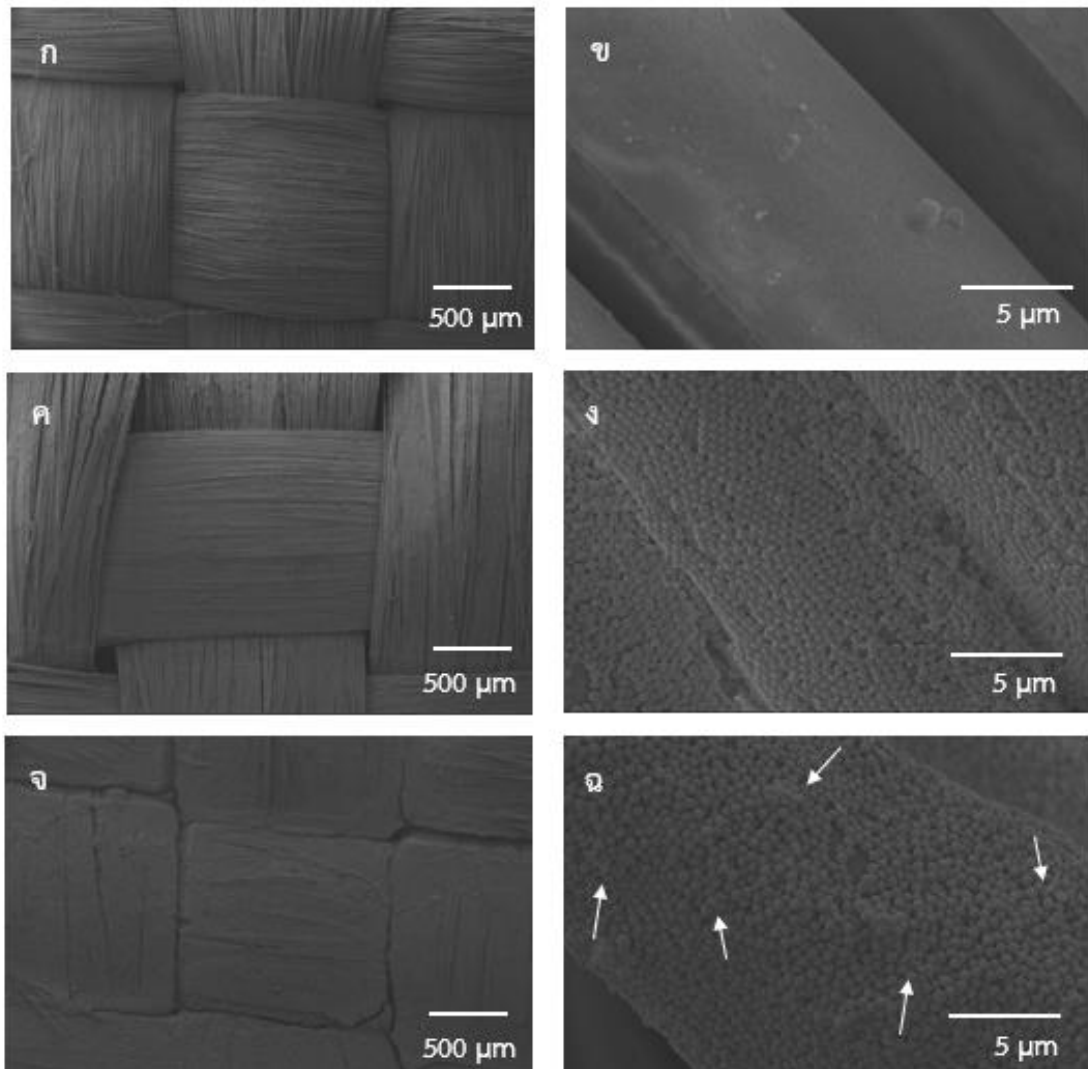


รูปที่ 1.23 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการจุ่มแช่ที่มีต่อปริมาณซิลิกาในชิ้นงานเคลือบ

4.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเกราะชนิดของเหลว

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานสิ่งทอเคลือบ ทั้งก่อนและหลังกระบวนการจุ่มแช่ด้วยของไหลเซียร์ทิกเคนนิงในรูปแบบที่ไม่มีและมีการเติมสารตัวเติมอะลูมินา A-32 ได้ถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิค scanning electron microscopy ที่กำลังขยาย 35 และ 500 เท่า และนำมาแสดงผลในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่า โครงสร้างสิ่งทอเคลือบที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ประกอบไปด้วยเส้นใยฝ้ายที่จัดเรียงตัวสานกันอย่างเป็นระเบียบแน่นอนหนา ปราศจากอนุภาคอื่นใดในโครงสร้างนอกจากเส้นใย ในขณะที่สิ่งทอเคลือบที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่เป็นเวลา 5 นาที ในของไหลเซียร์ทิกเคนนิง 0.50 STF โดยใช้อัตราส่วนของของไหลเซียร์ทิกเคนนิงต่อเอทานอลเท่ากับ 1:3 โดยปริมาตร นั้น ในภาพที่กำลังขยายต่ำจะเห็นว่าความคมชัดของเส้นใยลดน้อยลงเนื่องจากผิวถูกปกคลุมด้วยของไหล ส่วนในภาพกำลังขยายสูงปรากฏอนุภาคซิลิกา KE-P50 ซึ่งมีรูปร่างกลมขนาดสม่ำเสมอ กระจายตัวอย่างหนาแน่นบนผิวของชิ้นงาน (รูปที่ 4.12 ค-ง) และเมื่อทำการจุ่มแช่สิ่งทอเคลือบในของไหลที่เตรียมตามสภาวะข้างต้นและได้เติมสารตัวเติมอะลูมินา A-32 ในปริมาณ 5% โดยปริมาตร โครงสร้าง

จุลภาคของชิ้นงานหลังกระบวนการจุ่มแช่จะปรากฏอนุภาคของ A-32 ซึ่งมีรูปร่างหลายเหลี่ยมบนผิวชิ้นงาน (รูปที่ 4.12 ก-ฉ) ผลจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้กล่าวมานี้ ถือเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของกระบวนการจุ่มแช่ในงานวิจัยนี้ว่าได้ทำให้ของไหลเซียร์ทิกเคนนิงถูกตรึงอยู่ในโครงสร้างสิ่งทอเคฟล่า

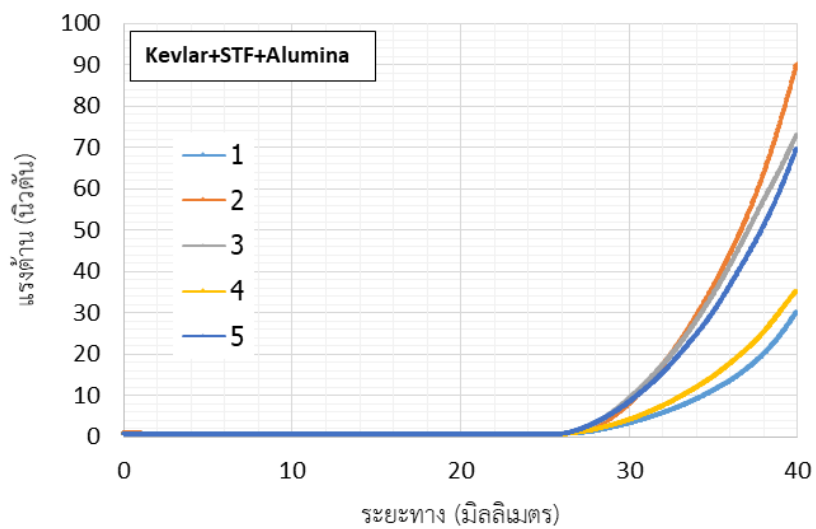
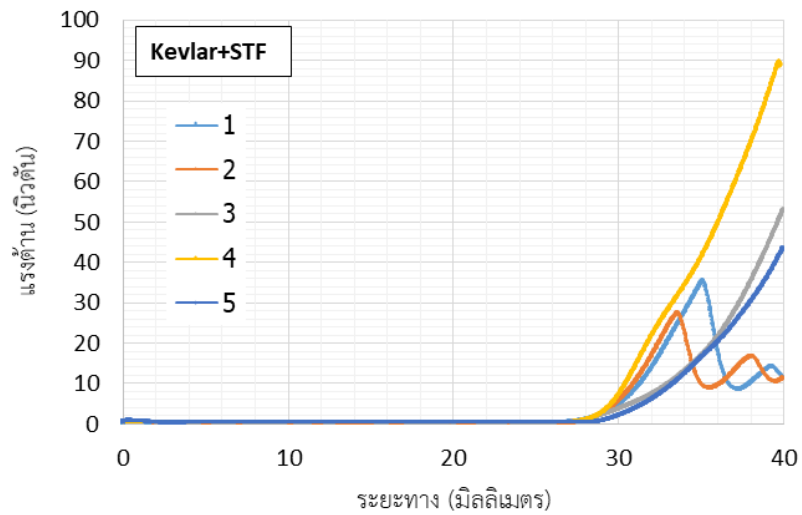
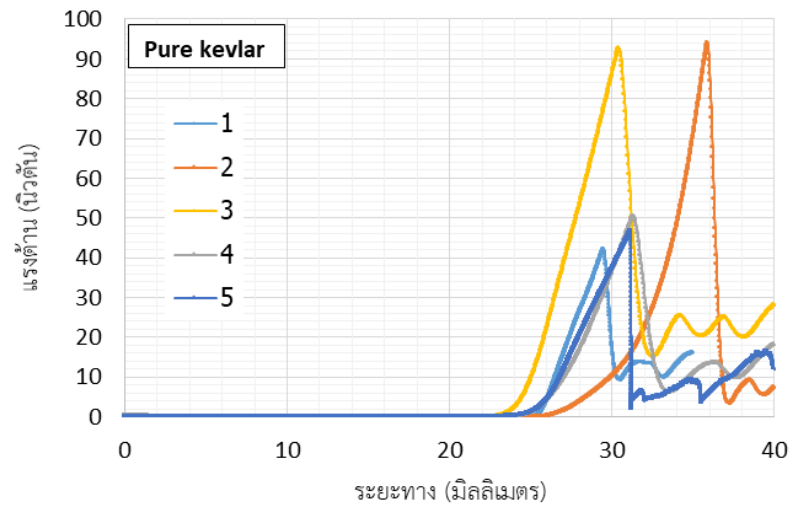


รูปที่ 1.24 โครงสร้างจุลภาคของ (ก-ข) สิ่งทอเคฟล่า (ค-ง) สิ่งทอเคฟล่าที่ผ่านการจุ่มแช่ด้วยของไหล 0.50 STF (จ-ฉ) สิ่งทอเคฟล่าที่ผ่านการจุ่มแช่ด้วยของไหล 0.50 STF และมีการเติมสารตัวเติมอะลูมินา

4.5 ความสามารถในการต้านทานต่อการแทง

ชิ้นงาน 3 ประเภท ได้แก่ สิ่งทอเคฟล่า สิ่งทอเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหล 0.50 STF และสิ่งทอเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหล 0.50 STF ที่ได้เติมสารตัวเติมอะลูมินา A-32 ปริมาณ 5% โดยปริมาตร ได้ถูกนำมาทำการทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแทงด้วยเครื่องทดสอบ INSTRON 5943 ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกทดสอบการแทงด้วยอัตราเร็ว 2 เมตร/นาที โดยใช้มีดปลายแหลมตามมาตรฐาน NIJ Standard-0115.00 ผลการทดสอบแสดงสรุปได้ดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.2 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า จากการทดสอบโดยใช้จำนวนชิ้นงาน 5 ชิ้นงาน/สภาวะ ความสามารถในการต้านทานต่อการแทงที่สภาวะเดียวกันนี้มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจุ่มแช่มีค่าเฉลี่ยในการต้านทานต่อการแทงสูงสุด คือ 65.18 นิวตัน ชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานรองลงมาคือสิ่งทอเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลที่มีการเติมสารตัวเติม A-32 (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 59.75 นิวตัน) ส่วนชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหล 0.5 STF โดยไม่เติมสารตัวเติมชิ้นงาน มีค่าเฉลี่ยความต้านทานต่อการแทงต่ำที่สุด (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 49.96 นิวตัน) ผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ผิดความคาดหมายของผู้วิจัยและเป็นผลที่ขัดแย้งกับรายงานวิจัยที่ผ่านมา โดยอย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานทั้ง 3 ประเภทนี้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน สาเหตุของผลการทดสอบที่แตกต่างไปจากงานวิจัยอื่นนี้ยังไม่เป็นที่ทราบชัด

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร่องรอยจากการแทงที่ปรากฏบนชิ้นงานทั้ง 3 ประเภท (รูปที่ 4.14) สังเกตพบว่า มีดปลายแหลมสามารถแทงทะลุชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ได้ทั้งหมด สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ด้วยของไหล 0.50 STF นั้น มีดปลายแหลมแทงทะลุชิ้นงานได้เพียง 2 ชิ้นงาน จากจำนวนชิ้นงานทดสอบที่สภาวะเดียวกัน 5 ชิ้นงาน ในขณะที่ มีดปลายแหลมไม่สามารถแทงทะลุชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลเซียร์ทิกเคนนิงและอะลูมินา A-32 ได้เลย และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีดปลายแหลมไม่สามารถเจาะทะลุได้ จะพบร่องรอยการยึดตัวของเส้นใยตรงบริเวณที่ถูกแทง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แม้ว่าจากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะยังไม่อาจสรุปได้แน่ชัดว่าชิ้นงานประเภทใดสามารถต้านทานต่อการแทงได้ดีที่สุด แต่ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าที่จุ่มแช่ด้วยของไหลเซียร์ทิกเคนนิงและอะลูมินา A-32 น่าจะสามารถต้านทานต่อการแทงได้ดีที่สุด โดยขั้นตอนการทดสอบในส่วนนี้จะได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงสำหรับงานวิจัยในอนาคตต่อไป



รูปที่ 1.25 ความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานสิ่งทอเคลือบ 3 รูปแบบ

ตารางที่ 1.7 รายละเอียดผลทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานสิ่งทอเคลือบ 3 ประเภท

Pure kevlar		Maximum Load (N)
	1	42.11
	2	94.11
	3	92.61
	4	50.49
	5	46.57
	Maximum	94.11
	Mean	65.18
	Standard deviation	25.90
Kevlar+STF		Maximum Load (N)
	1	35.37
	2	27.46
	3	53.49
	4	89.61
	5	43.85
	Maximum	89.61
	Mean	49.96
	Standard deviation	24.19
Kevlar+STF+Alumina		Maximum Load (N)
	1	30.28
	2	90.34
	3	73.12
	4	35.24
	5	69.79
	Maximum	90.34
	Mean	59.75
	Standard deviation	25.91



รูปที่ 1.26 ลักษณะรอยขาดของชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าหลังการทดสอบความต้านทานต่อการแทง



รูปที่ 1.27 การยึดตัวของเส้นใยในชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าที่มีดปลายแหลมไม่สามารถเจาะทะลุได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาและการเติมสารตัวเติมอะลูมินา ต่อพฤติกรรมการไหลของตัวอย่างของไหลเชียร์ติกเคนนิงในระบบซิลิกา-พอลิเอทิลีนไกลคอล โดยทำการปรับเปลี่ยนปริมาณอนุภาคซิลิกาจาก 30% ถึง 52% โดยปริมาตร และปรับเปลี่ยนชนิดของสารตัวเติมอะลูมินา ได้แก่ TMDA AMS-9 และ A-32 ซึ่งมีลักษณะอนุภาคแตกต่างกัน รวมถึงปริมาณของสารตัวเติมจาก 1% ถึง 5% โดยปริมาตร ตัวอย่างของไหลเชียร์ติกเคนนิงที่เตรียมได้นี้ถูกนำไปตรวจสอบพฤติกรรมการไหลตัวที่อัตราการเฉือนต่างๆ จากนั้นนำของไหลที่มีสภาวะเหมาะสมไปใช้ในกระบวนการจุ่มแข็งงานสิ่งทอเคลือบ ท้ายสุด ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการจุ่มแข็งได้ถูกนำมาตรวจสอบความต้านทานต่อการแท่ง ตามมาตรฐาน NIJ Standard-0115.00 จากการรวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ ดังต่อไปนี้

1. สารแขวนลอยซิลิกา-พอลิเอทิลีนไกลคอล ที่มีปริมาณซิลิกา KE-P50 น้อยกว่า 40% โดยปริมาตร แสดงพฤติกรรมการไหลตัวแบบนิวโตเนียน นั่นคือ ตัวอย่างมีความหนืดคงที่ ไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือน เมื่อปริมาณซิลิกาในสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นมากกว่า 40% โดยปริมาตร พฤติกรรมการไหลจะเปลี่ยนไป โดยจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ติกเคนนิง ณ ช่วงอัตราการเฉือนต่ำ และเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลเป็นแบบเชียร์ติกเคนนิง เมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง
2. ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกามีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลของสารแขวนลอยซิลิกา-พอลิเอทิลีน กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาจาก 30% ถึง 52% โดยปริมาตร สารแขวนลอยจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น อัตราการเฉือนวิกฤติ (critical shear rate) หรือค่าอัตราการเฉือนที่เริ่มเกิดพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิงมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการเกิดเชียร์ติกเคนนิง (thickening ratio) เพิ่มขึ้น เนื่องจากของไหลมีจำนวนอนุภาคในระบบมากขึ้น ช่วยส่งเสริมให้เกิดการสัมผัสกันของอนุภาค ส่งผลให้เกิดพฤติกรรมการไหลตัวแบบเชียร์ติกเคนนิงของของไหลให้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความเค้นเฉือนวิกฤติ (critical shear stress) เป็นอิสระต่อปริมาณซิลิกา
3. การเติมสารตัวเติมอะลูมินาทั้งสามชนิด ได้แก่ TMDA, AMS-9 และ A-32 ในปริมาณ 1% โดยปริมาตร ในสารแขวนลอยซิลิกา-พอลิเอทิลีน ไม่พบว่าส่งผลเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการไหลตัวของสารแขวนลอย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเป็น 3% โดยปริมาตร จึงจะเริ่มสังเกตเห็นอิทธิพลที่มีต่อพฤติกรรมการไหลตัว โดยพบว่า ขนาดอนุภาคสารตัวเติมที่เล็กลง และปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นในขณะที่อัตราเฉือนวิกฤติมีค่าลดลง

4. การเติมสารตัวเติมอะลูมินา AMS-9 และ A-32 ในสารแขวนลอยซิลิกา-พอลิเอทิลีน ทำให้ อัตราการเกิดเชียรท์กเคนนิงเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเทียบกับสารแขวนลอยที่ไม่เติมผงอะลูมินา แต่ การเติม TMDA ส่งผลให้อัตราการเกิดเชียรท์กเคนนิงลดต่ำลง จากการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า การเติม A-32 ในปริมาณ 5% โดยปริมาตร แสดงอัตราการเกิดเชียรท์กเคนนิงสูงที่สุด เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในกระบวนการจุ่มแช่สิ่งทอเคฟล่า เพื่อผลิตเกราะชนิดของเหลว
5. เมื่อทำการทดสอบความต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานเกราะอ่อนที่จัดเตรียมต่างกัน 3 สภาวะ พบว่า จากการทดสอบโดยใช้จำนวนชิ้นงาน 5 ชิ้นงาน/สภาวะ ความสามารถในการ ต้านทานต่อการแทงที่สภาวะเดียวกันนั้นมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน และค่าเฉลี่ยความ ต้านทานต่อการแทงของชิ้นงานทั้งสามประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาร่องรอยจาก การทดสอบแทงบนชิ้นงาน พบว่ามีดปลายแหลมสามารถแทงทะลุชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่าที่ไม่ ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ได้ทั้งหมด สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ด้วยของไหล 0.50 STF นั้น มีดปลายแหลมแทงทะลุชิ้นงานได้เพียง 2 ชิ้นงาน จากจำนวนชิ้นงานทดสอบที่ สภาวะเดียวกัน 5 ชิ้นงาน ในขณะที่ มีดปลายแหลมไม่สามารถแทงทะลุชิ้นงานสิ่งทอเคฟล่า ที่ผ่านกระบวนการจุ่มแช่ในของไหลเชียรท์กเคนนิงและอะลูมินา A-32 ได้เลย จากผลการ ทดลองที่ได้ในส่วนนี้ ยังไม่อาจสรุปได้แน่ชัดว่าชิ้นงานเกราะรูปแบบใดสามารถต้านทานต่อ การแทงได้ดีที่สุด

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. ศึกษาพฤติกรรมการไหลตัวของของไหลเชียรท์กเคนนิงโดยใช้สารชนิดอื่น ไม่ว่าจะเป็น อนุภาคของแข็ง ของเหลวตัวกลาง หรือชนิดของสารตัวเติม พร้อมทั้งทำการจุ่มแช่และ ทดสอบสมบัติเชิงกล
2. หาสาเหตุที่ทำให้ค่าความต้านทานต่อการแทงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ต่อได้ จากนั้นพัฒนา ปรับปรุงขั้นตอนและ/หรือเครื่องมือในการทดสอบความต้านทานต่อการแทงให้มี ประสิทธิภาพน่าเชื่อถือ
3. เพื่อให้เป็นงานวิจัยที่ใช้ประโยชน์ได้จริง ควรจะมีการขยายขนาดชิ้นงาน และผลิตเป็นเสื้อ เกราะชนิดของเหลวต้นแบบ

บรรณานุกรม

1. Lee, Y.S., E.D. Wetzel, and N.J. Wagner, *The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid*. Journal of Materials Science, 2003. 38(13): p. 2825-2833.
2. Gürgen, S., M.C. Kuşhan, and W. Li, *Shear thickening fluids in protective applications: A review*. Progress in Polymer Science, 2017. 75: p. 48-72.
3. Gürgen, S., M.C. Kuşhan, and W. Li, *The effect of carbide particle additives on rheology of shear thickening fluids*. Korea-Australia Rheology Journal, 2016. 28(2): p. 121-128.
4. Gürgen, S., W. Li, and M.C. Kuşhan, *The rheology of shear thickening fluids with various ceramic particle additives*. Materials & Design, 2016. 104: p. 312-319.
5. Kang, T.J., C.Y. Kim, and K.H. Hong, *Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor*. Journal of Applied Polymer Science, 2012. 124(2): p. 1534-1541.
6. Anutoon, K. ความหมายของเสื้อเกราะ. 2016; Available from: http://il258kanya.blogspot.com/2016/03/blog-post_52.html.
7. Anutoon, K. ประวัติความเป็นมาของเสื้อเกราะ. 2016; Available from: http://il258kanya.blogspot.com/2016/03/blog-post_66.html.
8. น.อ.รุ่งธรรม, บ. เรื่องของเสื้อเกราะ. 2016; Available from: <http://www.dstd.mi.th/board/index.php?topic=1245.0>.
9. บุญรักษ์, ก. เสื้อเกราะกันกระสุน. 2003; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/210_16-19.pdf.
10. บุญรักษ์, ก. สารหน้ารู้ : การพัฒนาเสื้อเกราะกันกระสุนแบบเกราะแข็ง. 2014; Available from: http://www.electron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=2230&Itemid=3.
11. Hobbyrover. 1100D 200gsm Yellow Kevlar Fabric PARA-ARAMID SYNTHETIC Aramid fiber Cloth plain NOMEX. 2019 [cited 2019 27 April]; Available from:

- <https://pl.aliexpress.com/item/1100D-200gsm-Yellow-Kevlar-Fabric-PARA-ARAMID-SYNTHETIC-Aramid-fiber-Cloth-plain-NOMEX/32621489882.html>.
12. *Aramid Fabrics*. 2015 [cited 2019 10 May]; Available from: <https://www.kicinsu.com/aramid-fabrics-30424.page>.
 13. ผศ.ดร.อภิชาติ, ส. บทที่ 7 เส้นใยสมรรถนะสูง (*High-Performance Fibers*). Available from: http://www.ttcexpert.com/2012/Powerpoint/High_Performance_Fibers.pdf.
 14. Rebecca. *What are Aramid Fibers? - The Introduction to A Versatile Material*. 2016 [cited 2019 10 May]; Available from: <https://www.ipitaka.com/blogs/news/what-are-aramid-fibers-i>.
 15. *Aramid*. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aramid>
 16. WILSON, T.V. *How liquid body armor works*. [cited 2018 5 February]; Available from: <https://science.howstuffworks.com/liquid-body-armor1.htm>
 17. Burton, S. *Liquid body armor could be next best thing for officers*. 2012 [cited 2018 5 February]; Available from: <https://www.bodyarmornews.com/liquid-body-armor-could-be-next-best-thing-for-officers/>.
 18. ของไหล. Available from: <https://bit.ly/2XWx6Up>.
 19. สายัณห์, ส. and ป. วิรัตน์. ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล. 2005; Available from: http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_9_2549_viscosity.pdf.
 20. Database, P.P. *FLOW PROPERTIES OF POLYMERS TIME-INDEPENDENT FLUIDS*. 2015 [cited 2018 26 February]; Available from: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Viscosity2.html>.
 21. ซิลิกอนไดออกไซด์. [cited 2018 27 October]; Available from: <https://bit.ly/2CcLtdg>
 22. ซิลิกา (*silica/SiO₂*) และประโยชน์ซิลิกา. [cited 2018 27 October]; Available from: <https://1th.me/65fF>.
 23. SHOKUBAI, N. *Particle Products*. [cited 2018 25 October]; Available from: <https://www.shokubai.co.jp/en/products/functionality/epokara.html>.
 24. ภญ. พิษญา, ด. โพลี เอธิลีน ไกคอล คืออะไร. 2010; Available from: https://www.pharmacy.mahidol.ac.th/dic/OA_full.php?id=2234.
 25. *Poly (ethylene glycol)*. [cited 2018 25 October]; Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/81150?lang=en®ion=TH>.

26. Wagner, N.J. and J.F. Brady, *Shear thickening in colloidal dispersions*. Physics Today, 2009. 62(10): p. 27-32.
27. Hoffman, R.L., *Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. II. Theory and experimental tests*. Journal of Colloid and Interface Science, 1974. 46(3): p. 491-506.
28. Eric, B. and M.J. Heinrich, *The role of dilation and confining stresses in shear thickening of dense suspensions*. Journal of Rheology, 2012. 56: p. 875.
29. Lin, N.Y., et al., *Hydrodynamic and Contact Contributions to Continuous Shear Thickening in Colloidal Suspensions*. Phys Rev Lett, 2015. 115(22): p. 228304.
30. Srinivasa, R.R. and A.K. Saad, *Shear-Thickening Response of Fumed Silica Suspensions under Steady and Oscillatory Shear*. JOURNAL OF COLLOID AND INTERFACE SCIENCE, 1997. 185: p. 57-67.
31. Seto, R., et al., *Discontinuous shear thickening of frictional hard-sphere suspensions*. Phys Rev Lett, 2013. 111(21): p. 218301.
32. Denn, M.M., J.F. Morris, and D. Bonn, *Shear thickening in concentrated suspensions of smooth spheres in Newtonian suspending fluids*. Soft Matter, 2018. 14(2): p. 170-184.
33. Peters, I.R., S. Majumdar, and H.M. Jaeger, *Direct observation of dynamic shear jamming in dense suspensions*. Nature, 2016. 532(7598): p. 214-7.
34. Pednekar, S., J. Chun, and J.F. Morris, *Simulation of shear thickening in attractive colloidal suspensions*. Soft Matter, 2017. 13(9): p. 1773-1779.
35. Maranzano, B.J. and N.J. Wagner, *The effects of interparticle interactions and particle size on reversible shear thickening: Hard-sphere colloidal dispersions*. Journal of Rheology, 2001. 45(5): p. 1205-1222.
36. Maranzano, B.J. and N.J. Wagner, *The effects of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions*. The Journal of Chemical Physics, 2001. 114(23): p. 10514-10527.
37. Qin, J., G. Zhang, and X. Shi, *Study of a shear thickening fluid: the suspensions of monodisperse polystyrene microspheres in polyethylene glycol*. Journal of Dispersion Science and Technology, 2016. 38(7): p. 935-942.
38. สารตัวเติม. Available from: <https://bit.ly/2SM3KoT>.

39. Gürgen, S. and M.C. Kuşhan, *The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017. 94: p. 50-60.
40. สุรศักดิ์, ว. อลูมินา วัสดุสารพัดประโยชน์. Available from:
<http://www.material.chula.ac.th/RADIO44/FEBRUARY/RADIO2-5.HTM>.
41. *Stab resistance of personal body armor NIJ standard-0115.00*. 2000, U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice.
42. Lin, H., W. Hwu, and M. Ger. *The mechanism of shear thickening fluid with nanoparticles applied to liquid armor*. in 2007 *Digest of papers Microprocesses and Nanotechnology*. 2007.
43. Tian, T., et al. *Study of the temperature effect of shear thickening fluid*. in 2013 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2013.
44. Li, X., et al., *Preparation of body armour material of Kevlar fabric treated with colloidal silica nanocomposite*. *Plastics, Rubber and Composites*, 2013. 37(5-6): p. 223-226.
45. Hasanzadeh, M. and V. Mottaghitlab, *The Role of Shear-Thickening Fluids (STFs) in Ballistic and Stab-Resistance Improvement of Flexible Armor*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014. 23(4): p. 1182-1196.
46. Petel, O.E., et al., *A comparison of the ballistic performance of shear thickening fluids based on particle strength and volume fraction*. *International Journal of Impact Engineering*, 2015. 85: p. 83-96.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐนิชา นวมภักดี
วัน เดือน ปี เกิด	17 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในวันที่ 6 มิถุนายน พ.ศ. 2559 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต วิทยาศาสตร์ หลักสูตรเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	121 หมู่ 9 ตำบล บ้านเลือก อำเภอ โพธาราม จังหวัด ราชบุรี 70120
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Poster presentation เรื่อง "Effect of Alumina Addition on the Rheological Behavior of Shear Thickening Fluids" ในงานประชุมวิชาการ The 10th International Conference on Materials Science and Technology (MSAT-10) ระหว่างวันที่ 6-7 กันยายน 2561