

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม  
ด้วยการออกแบบสกรูลำเลียง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**AN IMPROVEMENT OF CHOCOLATE STRANDS  
PROCESS BY SCREW DESIGN**



**Punnaphop Watcharamaisakul**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering In Industrial Systems  
And Environmental Engineering  
Suranaree University of Technology  
Academic 2019**

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม  
ด้วยการออกแบบสกรูลำเลียง


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



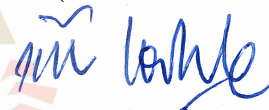
(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชวล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.นิวิท เจริญใจ)

กรรมการ



(อ. ดร.นรา สมัตถภาพงศ์)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต : การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม  
ด้วยการออกแบบสกรูลำเลียง (AN IMPROVEMENT OF CHOCOLATE STRANDS  
PROCESS BY SCREW DESIGN) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร  
พิทยชวล, 103 หน้า.

ช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าทางการตลาดได้อย่างมาก โดยปี 2554-2558  
สามารถสร้างมูลค่ารวมได้ถึง 24,838 ล้านบาท (ศูนย์วิจัยชะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2016)  
กระบวนการผลิตช็อกโกแลตจึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดต้นทุนการผลิตในรูปแบบต่าง ๆ  
รวมไปถึงกระบวนการขึ้นรูปอัดรีดแบบใช้สกรู (Screw extrusion)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การวิจัยคือ การเพิ่มกำลังการผลิตช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม  
โดยปรับปรุงขั้นตอนการผลิตและออกแบบสกรูในการอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม  
สมมติฐานของงานวิจัยนี้คือ กระบวนการขึ้นรูปช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมสามารถลดขั้นตอน  
การพักเพื่อลดอุณหภูมิช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม และการออกแบบสกรูที่เหมาะสม สามารถขึ้น  
รูปช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมในสถานะของแข็งกึ่งเหลว (Paste) ได้ ผลการวิจัยพบว่า สามารถ  
ลดขั้นตอนการพักช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมได้ ทำให้กำลังการผลิตช็อกโกแลตโรยแต่งหน้า  
ขนมเพิ่มขึ้น 128 % และสกรูที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมในสถานะ  
ของแข็งกึ่งเหลว ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 100 มิลลิเมตร ความลึกของช่องสกรู 28  
มิลลิเมตร สามารถอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ Dilatant ด้วย  
อัตราเฉือน  $1.7 - 9.3 \text{ s}^{-1}$  อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบสกรู 50 รอบต่อนาที ทั้งนี้  
ใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ควรมีลักษณะบ่าเอียง ข้อสังเกตจากงานวิจัยนี้คือ เมื่อเพิ่มความเร็วรอบสกรู  
จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมมีแนวโน้มลดลง

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหกรรม  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ปภากร

PUNNAPHOP WATCHARAMAISAKUL : AN IMPROVEMENT OF  
CHOCOLATE STRANDS PROCESS BY SCREW DESIGN. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. PAPHAKORN PITAYACHAVAL, Ph.D.,  
103 PP.

CHOCOLATE/FLOW PROPERTIES/FLOW PROPERTIES MEASUREMENT/  
SCREW EXTRUSION/SCREW EXTRUSION DESIGN/EXTRUSION  
PARAMETERS

Since a high market value of chocolate during 2011-2015 C.E. are 24,838 million baths, chocolate production process has been continuous developed in order to reduce production cost including chocolate forming process based screw extrusion.

This research aims to improve chocolate strands forming process and to design a screw for chocolate extrusion. There are two assumptions, 1) a temperature decreasing process after chocolate strand components mixing are eliminated, 2) a designed screw is conduct chocolate strands based on paste state. The result shown that a process of chocolate strands temperature decreasing has been remove in which the chocolate strands forming capacity has been increased for 128%. Additionally, the specifications of designed screw for paste state extrusion are 100 mm. of screw diameters and 28 mm. of screw channel depths in which this screw specifications has been used to extrude Dilatant chocolate strands behavior based on shear rate  $1.7 - 9.3 \text{ s}^{-1}$  with  $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and screw speed 50 rpm. However, screw speed is increased while chocolate strands diameters are decreased.

School of Industrial Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature พูนทรัพย์ วัชรธรรมสาร

Advisor's Signature ปภากรณ์ พิทยชาวัล

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลดังต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อในการให้คำปรึกษา ชี้แนะ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ตลอดจนในด้านวิชาการและด้านการดำเนินการวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปภากร พิทยชวล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการศึกษาและการแก้ไขปัญหา เมตตา อบรมสั่งสอนเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนให้คำปรึกษาในการเขียนบทความทางวิชาการ วิทยานิพนธ์ และตรวจแก้ไขจนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท เจริญใจ และ ดร.นรา สมัตถภาพงศ์ คณะกรรมการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ รวมไปถึงคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและนำการทำงานวิจัย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

คุณสมชาย พงศ์พินิจกุล ผู้บริหาร และคุณปัทมา ประกอบธรรม ผู้จัดการฝ่ายผลิต บริษัท โคราช ฟู้ดส์ โปรดักส์ จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนในเรื่องสถานที่วิจัย วัสดุดิบ อุปกรณ์ ตลอดจนการให้คำปรึกษา เป็นอย่างดี

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดู สั่งสอน ตลอดจนการสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ปณณภพ วัชรมัชสกุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>6</b>
2.1 บทนำ.....	6
2.2 พฤติกรรมการไหลของช็อกโกแลต.....	9
2.3 กระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู.....	12
2.4 การออกแบบสกรูอัดรีด.....	16
2.5 อุณหภูมิอัดรีด.....	18
2.6 ความเร็วรอบและลักษณะสกรูอัดรีด.....	22
<b>3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>31</b>
3.1 กรอบการวิจัย.....	31
3.2 ศึกษาพฤติกรรมการไหล คุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม และการออกแบบสกรู.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1	การเตรียมตัวอย่างซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	33
3.2.2	การทดสอบหาค่าความเค็มเหนียนและความหนืดปรากฏ .....	36
3.2.3	คำนวณค่าอัตราเหนียน .....	39
3.2.4	การออกแบบสกรูอัดรีด .....	40
3.3	ศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	41
3.4	การวิเคราะห์และสรุปผล .....	46
3.5	สรุปขั้นตอนการทดลอง .....	47
4	ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล .....	50
4.1	บทนำ .....	50
4.2	คุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	53
4.3	อัตราเหนียนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	53
4.4	ขนาดของช่องความลึกสกรูสำหรับอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	56
4.5	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	58
4.6	ความสัมพันธ์ตัวแปรการทดลองกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น ซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	67
5	บทสรุป .....	80
5.1	สรุปผลงานวิจัย .....	80
5.1.1	พฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตร ควบคุม .....	80
5.1.2	การออกแบบสกรูอัดรีด .....	80
5.1.3	ค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและให้ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....	81
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	81
5.2.1	พฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตร ควบคุม .....	81



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.2 การออกแบบสกรูอัดรีด .....	82
5.2.3 ค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและให้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลด์สูตรควบคุม.....	82
5.2.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป.....	82
รายการอ้างอิง .....	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	87
ประวัติผู้เขียน .....	103



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	Interaction effects (P value) ของความเร็วสกรูและอุณหภูมิอัดรีดต่อการคืนสภาพน้ำตาลจากชีวมวลต่าง ๆ (Chinnadurai et al., 2012).....28
2.2	ผลของความเร็วสกรูและอุณหภูมิที่มีต่อการคืนสภาพน้ำตาลของ Switchgrass (Chinnadurai et al., 2012).....28
2.3	ผลกระทบของความเร็วสกรูและอุณหภูมิที่มีต่อการคืนสภาพน้ำตาลของ Big bluestem (Chinnadurai et al., 2012).....29
2.4	ผลกระทบของความเร็วสกรูและอุณหภูมิที่มีต่อการคืนสภาพน้ำตาลของ Prairie cord grass (Chinnadurai et al., 2012) .....30
3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....34
3.2	ส่วนผสมและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....35
3.3	การกำหนดตัวแปรในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและทดสอบคุณสมบัติทางกลของ ชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....36
3.4	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....38
3.5	ผลการคำนวณค่าอัตราเฉือนแต่ละอุณหภูมิทดสอบของชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....39
3.6	การกำหนดตัวแปรในการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....42
3.7	การบันทึกผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....43
3.8	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นชี้อกโกแลตสูตรควบคุม .....43
3.9	ขั้นตอนการศึกษากฎการไหล และคุณสมบัติทางกลของชี้อกโกแลตสูตรควบคุมและการออกแบบสกรู.....48

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.10	ขั้นตอนศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....48
4.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....51
4.2	ผลการคำนวณอัตราเนื้อของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....54
4.3	ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นตำแหน่งช่วงหัว (H).....60
4.4	ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นตำแหน่งช่วงกลาง (M) .....61
4.5	ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นตำแหน่งช่วงท้าย (T) .....61
4.6	ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นหลังจากตัดค่าออก .....64
4.7	สมการเส้นตรงของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....66
4.8	ระดับของอุณหภูมิ (Temperature) ทดลอง .....68
4.9	ผลการหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น .....68
4.10	ระดับของความเร็รรอบสกรูทดลอง .....69
4.11	ผลการหาผลกระทบของความเร็รรอบสกรูต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น .....70
4.12	ระดับของลักษณะใบมีดทดลอง .....71
4.13	ผลการหาผลกระทบของลักษณะใบมีดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น .....71
4.14	ระดับของตัวแปรทดลอง .....73
4.15	ผลการหาผลกระทบของตัวแปรอุณหภูมิอัดรีด, ความเร็รรอบสกรู และลักษณะใบมีดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....74
4.16	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....77
4.17	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส .....78
4.18	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส .....79

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตรูปร่างต่าง ๆ (williamdeanchocolates.com; jeanpaulhevin.com) .....1
1.2	กระบวนการผลิตช็อกโกแลตแบบเม็ดแท่ง (Strand).....2
2.1	มูลค่าตลาดช็อกโกแลตในไทย ปี 2554-2558 (ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2016).....6
2.2	การนำค่าความเค้น ความหนืดปรากฏ และอัตราการเฉือนมาพล็อต เป็นกราฟเพื่อศึกษา พฤติกรรมของช็อกโกแลต (Servais et al., 2003) .....8
2.3	แนวโน้มของความหนืดในวัสดุแบบ Pastes ซึ่งเป็นของไหลประเภท non-Newtonian fluid เมื่ออัตราเฉือนเปลี่ยนแปลง (ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015).....10
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนในพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian fluid และ non-Newtonian fluid (ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015).....10
2.5	หลักการพื้นฐานของความหนืด (ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015) .....11
2.6	เครื่องอัดรีดแบบใช้สกรู (Rosato D.V., 1998) .....11
2.7	องค์ประกอบของสกรูอัดรีด (Rosato DV., 1998).....15
2.8	ความดันอัดขึ้นรูปของสองตัวอย่าง ( $^{\circ}$ และ $\times$ ) ของพอลิเมอร์ที่ความเร็วการอัด (L / D) เท่ากับ 8.33 1.157 มม./ วินาที และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่อความยาวสกรู (L.J. Wells et al., 2005) .....17
2.9	การเปลี่ยนแปลงของความหนืดในค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ (L.J. Wells et al., 2005).....20
2.10	ความหนืดเชิงซ้อนของช็อกโกแลตนมโดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ความถี่ ต่างกันสามระดับ (Hesam et al., 2014)..... 21
2.11	แรงดันอัดรีดของ Milk chocolate โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Hesam et al., 2014)..... 21

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.12	ลักษณะสกรูทั้ง 3 แบบ (An-I et al., 1999).....22
2.13	การวัดแรงบิดที่ความเร็วรอบสกรูต่างๆและอัตราการป้อน: a, Forward element; b, Mixing disk; c, non-Flight element (An-I et al., 1999).....24
2.14	The degree of fill ที่แสดงในรูปของฟังก์ชันของอัตราการป้อนต่อความเร็วรอบของสกรู (Fr/Ss): a, Forward element; b, Mixing disk; c, non-Flight element โดยเส้นที่ป = The degree of fill; เส้นประ = แรงบิด (An-I et al., 1999) .....25
2.15	ผลกระทบของความเร็วรอบของสกรูต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อน (Chinnadurai et al., 2012)..... 26
2.16	ผลกระทบของอุณหภูมิอัดรีดต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อน (Chinnadurai et al., 2012) .....27
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....31
3.2	ขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมการไหล คุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตร และควบคุมการออกแบบสกรูสำหรับอัดรีด .....33
3.3	เครื่อง HAAKE Viscometer รุ่น 550.....37
3.4	ถ้วย (Cup) และจานหมุน (Bob).....37
3.5	อัตราการผลิตวัสดุโดยขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Harold FG.; John RW.; Eldridge M., 2004).....41
3.6	ตำแหน่งการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม.....46
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอุณหภูมิทดสอบ.....52
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความความหนืดกับอุณหภูมิทดสอบ .....52
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความความหนืดกับความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม.....53
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม .....55
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม.....55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.6	ขนาดความลึกของช่องสกรูที่ทำการออกแบบและองค์ประกอบของเครื่องอัดรีด.....	57
4.7	สกรุดันแบบที่ได้จากการคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรู .....	58
4.8	ผลการทดลองอัดรีดเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ทั้งหมด 180 เส้น.....	59
4.9	ตัวอย่างข้อมูลที่โปรแกรมแสดงในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม.....	60
4.10	แผนภูมิ Boxplot ของช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้ง 3 ตำแหน่งการวัด .....	62
4.11	แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้ง 3 ตำแหน่งการวัด .....	63
4.12	กราฟเส้นตรงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้งหมด 18 เส้น .....	65
4.13	ตัวอย่างกราฟเส้นตรงของเงื่อนไขอุณหภูมิอัดรีด 50 C° ความเร็วรอบสกรู 50 rpm ไบมีดแบบไม่มีป่า .....	67
4.14	การกระจายตัวของข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม.....	68
4.15	Interval Plot ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอุณหภูมิทดลอง .....	69
4.16	Interval Plot ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วรอบสกรูทดลอง .....	70
4.17	Interval Plot ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะไบมีดทดลอง .....	72
4.18	การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลผลการทดลอง.....	73
4.19	Main Effects Plot ของอุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะไบมีด.....	75

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

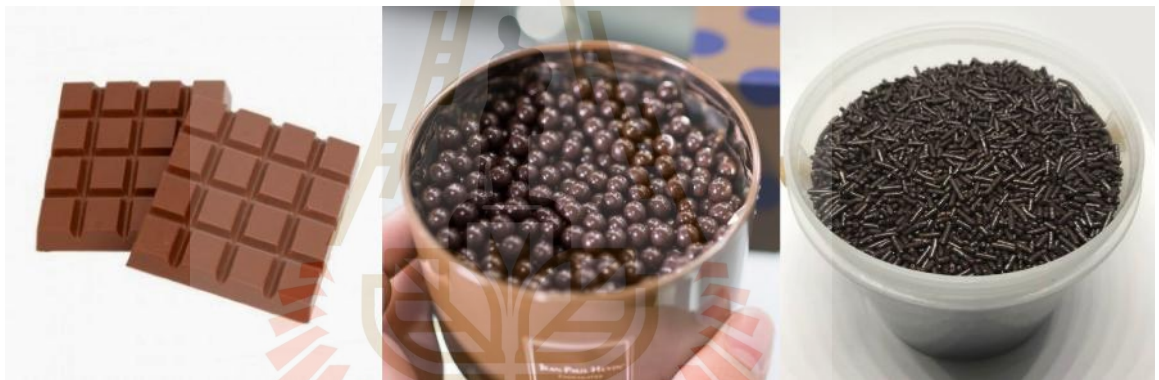
A	=	พื้นที่รับแรง
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู
F	=	แรงซึ่งกระทำบนแผ่นวัตถุที่เคลื่อนที่
g	=	กรัม
h	=	ความลึกของช่องสกรู
m	=	ความชัน
mm	=	มิลลิเมตร
N	=	ความเร็วรอบ
$\eta$	=	สัมประสิทธิ์ความหนืดเฉือน
Pa	=	ปาสคาล
Pa*s	=	ปาสคาล วินาที
r	=	ระยะระหว่างแผ่นวัตถุ
rpm	=	รอบต่อนาที
StDev	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
$\tau$	=	ความเค้นเฉือน
U	=	ความเร็วของแผ่นวัตถุ
$\gamma$	=	อัตราเฉือน

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าทางการตลาดได้อย่างมาก โดยตลาดช็อกโกแลตในประเทศไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในปี 2554-2558 โดยทั้ง 4 ปีนี้สามารถสร้างมูลค่ารวมได้ถึง 24,838 ล้านบาท (ศูนย์วิจัยระยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2016) ซึ่งผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตในปัจจุบันมีหลากหลายรูปร่างลักษณะ เช่น บาร์ เม็ดกลม และเม็ดแท่ง (Strand) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1



บาร์

เม็ดกลม

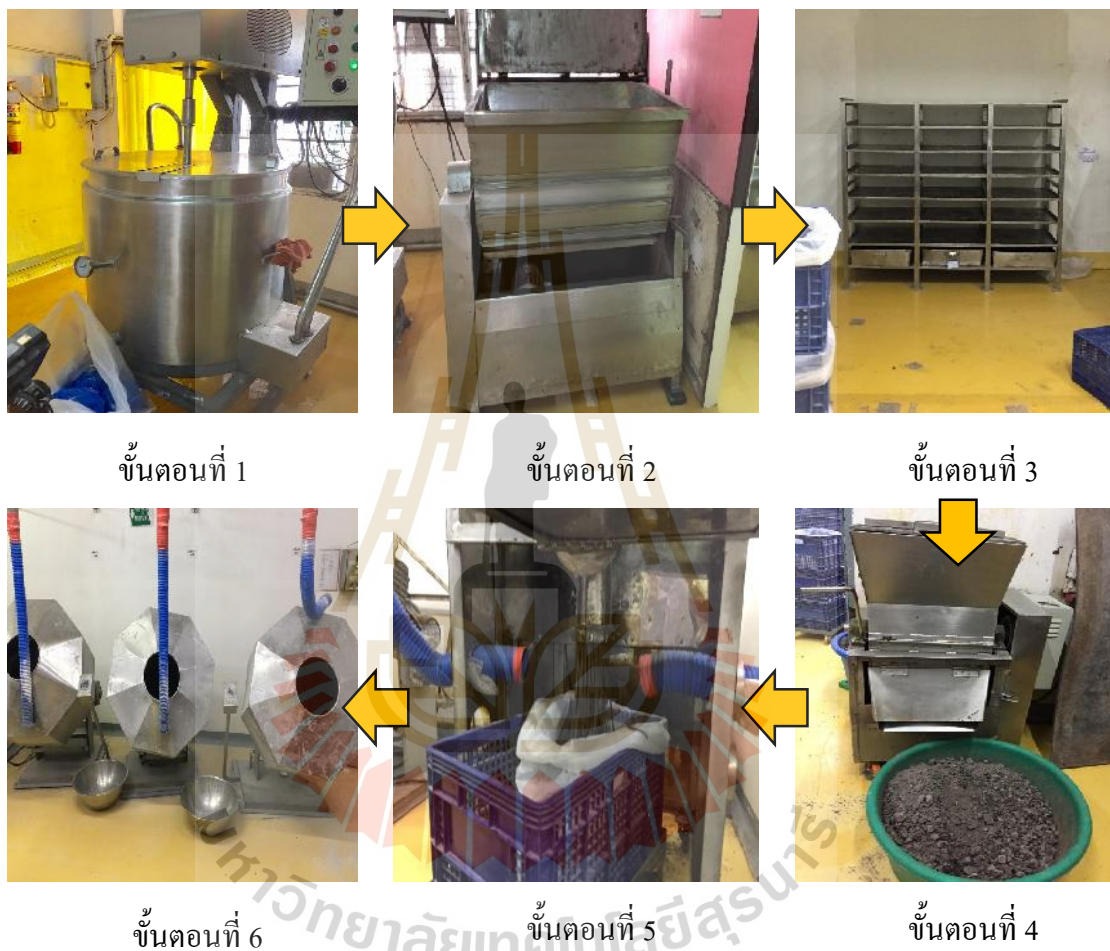
เม็ดแท่ง

รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตรูปร่างต่างๆ (williamdeanchocolates.com; jeanpaulhevin.com, 2017)

โดยรูปร่างช็อกโกแลตที่ต้องการศึกษาเป็นช็อกโกแลตแบบเม็ดแท่ง (Strand) ซึ่งช็อกโกแลตชนิดนี้มักใช้โรยแต่งหน้าขนมเบเกอรี่ และไอศกรีม โดยกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 1.2 ขั้นตอนแรกเป็นกระบวนการละลายก้อนไขมันให้เหลวเพื่อรอผสม ขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องผสม ได้แก่ ผงโกโก้ น้ำตาลไอซิ่ง เลซิติน และไขมันเหลวให้เป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนการพักวัตถุดิบให้อุณหภูมิตกลงเพื่อรออบด้วยเครื่องอบ ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนการบดวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลงเพื่อรอเข้าเครื่องอัดรีดต่อไป ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนการอัดรีดวัตถุดิบด้วยเครื่องอัดรีดแบบใช้สกรู (Screw Extruder) ผ่านแม่พิมพ์ (Die) ให้



เป็นเส้น ขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นการลดขนาดเส้นวัตถุดิบให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องมือ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการนำเม็ดไปเคลือบเงา โดยปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตคือ เกิดกระบวนการที่ไม่จำเป็นเกิดขึ้นคือขั้นตอนที่ 3 เนื่องจากสูญเสียเวลาในการผลิตเพราะต้องพักวัตถุดิบเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ถ้าสามารถปรับปรุงกระบวนการนี้ได้จะสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้



รูปที่ 1.2 กระบวนการผลิตซ็อกโกแลตแบบเม็ดแท่ง (Strand)

ในปัจจุบันมีการแข่งขันทั้งในด้านของการพัฒนาสูตรอาหาร ด้านการพัฒนาเทคโนโลยี เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ด้านกรรมวิธีการผลิต และด้านการลดต้นทุนการผลิต โดยหนึ่งกรรมวิธีที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหารคือกระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู (Screw extrusion) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องการเพิ่มกำลังการผลิต การปรับปรุงสูตรผลิตภัณฑ์ การสร้างลักษณะรูปร่างที่มีความหลากหลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่มีความต่อเนื่อง (The Institute of Nutrition, 2017) โดย

ซี็อกโกแลตมีคุณสมบัติทางกลของ ตัวอย่างเช่น ความหนืด (Viscosity), ความเค้นเฉือน (Shear stress) และอัตราเฉือน (Shear rate) เป็นต้น โดยมีความแตกต่างกันขึ้นกับอัตราส่วนผสมของ ซี็อกโกแลตนั้น ๆ ซึ่งพฤติกรรมทางคุณสมบัติทางกลของซี็อกโกแลตนี้ส่งผลต่อกรรมวิธีการผลิต ในอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีผลต่อการออกแบบเครื่องจักร อุปกรณ์ และกระบวนการผลิต เพื่อให้ สามารถผลิตได้ตรงตามความต้องการ นอกจากนี้ปัจจุบันการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมมีการ ปรับปรุงกระบวนการผลิตหรือเครื่องจักร เพื่อให้สามารถแข่งขันในภาคอุตสาหกรรมได้

Rosato DV. (1998) ได้กล่าวว่าหนึ่งในกรรมวิธีการผลิตที่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตและมีความยืดหยุ่นสูงคือกระบวนการอัดรีดด้วยการใช้กรู (Screw Extrusion processing) ที่ได้รับความนิยมมากในวงการอาหารและพลาสติก โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้หลักการอัดรีด ทั่วไปแต่ใช้สกรูเป็นตัวขับเคลื่อนวัตถุดิบอัดผ่านแม่พิมพ์ (Die) มีการให้ความร้อนและกำหนด ความเร็วรอบ รวมทั้งมีอุปกรณ์เสริมต่างๆ ที่ช่วยให้การผลิตดีขึ้น โดยปัจจัยที่สำคัญที่สุดของ กระบวนการนี้คือการออกแบบสกรูอัดรีด (Whelan and Dunning, 1988) เพื่อให้ตรงตามคุณสมบัติ ของซี็อกโกแลตที่ต้องการอัดรีด ซึ่งคุณสมบัติหรือพฤติกรรมทางกลของซี็อกโกแลตนั้น ๆ ส่งผลต่อ รูปร่างลักษณะสกรูอัดรีด นำไปสู่การที่สกรูสามารถอัดรีดซี็อกโกแลตนั้นๆ ได้โดยไม่ติดขัด รวมไปถึง การควบคุมพารามิเตอร์ในกระบวนการ เช่น ความเร็วของสกรู (Screw speed), อุณหภูมิในการ อัดรีด และอุปกรณ์เสริมที่ช่วยในการอัดรีด เป็นต้น (Kruder, 1985) โดยความสำคัญของพารามิเตอร์ เหล่านี้จะมีผลต่อขนาดและลักษณะของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่ออกมาผ่านแม่พิมพ์ หากทุก พารามิเตอร์มีความสัมพันธ์กันจะทำให้ชิ้นงานออกมาได้ตรงตามความต้องการ อีกทั้งยังสามารถลด ของเสียที่เกิดจากการผลิตได้ (Martin, 2001)

นอกจากการออกแบบสกรูในการอัดรีดแล้ว พารามิเตอร์ในการอัดรีดก็มีความสำคัญ เช่นกัน Martin C. (2001) ได้กล่าวว่า ความเร็วของสกรูในการอัดรีดนั้นส่งผลต่อกระบวนการอัดรีด ในเรื่องของปริมาณอัตราป้อน (Feed rate) นั้นหมายความว่าพารามิเตอร์นี้ส่งผลถึงปริมาณการผลิต ของกระบวนการอัดรีดด้วยสกรู และเนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีการให้ความร้อน และซี็อกโกแลตมีคุณสมบัติการหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นพารามิเตอร์อุณหภูมิจึงส่งผล ต่อกระบวนการอัดรีดซี็อกโกแลตเป็นอย่างมาก นอกจากนี้อุณหภูมิยังส่งผลต่อกระบวนการอัดรีด ซี็อกโกแลตด้วยสกรู เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อความหนืดของวัสดุ ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปส่งผล ให้วัสดุไม่สามารถไหลผ่านออกจากกรูแม่พิมพ์ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้วัสดุมีความคง รูปลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ไม่ตรงตามความต้องการ (SPE Handbook on Single Screw Extrusion, 2006)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษากระบวนการอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรู โดยเริ่มศึกษาจากพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกายภาพของช็อกโกแลตโรยแต่งหน้า ได้แก่ ความหนืด (Viscosity), ความเค้นเฉือน (Shear stress) และอัตราเฉือน (Shear rate) และหาความสัมพันธ์ของพฤติกรรมในการไหลของช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมเพื่อให้สามารถนำความสัมพันธ์นี้มาทำการออกแบบสกรูอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมได้ จากนั้นทำการศึกษาระบวนการอัดรีดเส้นช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม โดยมีการกำหนดและปรับค่าตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed) และลักษณะใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมที่อัดรีดออกมา เพื่อระบุค่าตัวแปรที่มีความเหมาะสมต่อการอัดรีดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม รวมไปถึงอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการอัดรีดที่มีผลต่อเส้นเส้นช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม เพื่อเป็นข้อมูลในการผลิตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาการออกแบบสกรูอัดรีดและกระบวนการอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม (Chocolate strands) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบใช้สกรู (Screw extruder) โดยแบ่งเป็นวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

- 1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ได้แก่ ความหนืด (Viscosity), ความเค้นเฉือน (Shear stress) และ อัตราเฉือน (Shear rate) ของช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม
- 2) ศึกษาการออกแบบสกรูอัดรีดด้วยความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพของช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม
- 3) ศึกษาผลกระทบและระบุค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่ส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมมีค่าใกล้เคียงขนาดรูแม่พิมพ์มากที่สุดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ (1) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม โดยนิยามช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนมชนิดนี้ว่าช็อกโกแลตสูตรควบคุม และการออกแบบสกรูอัดรีดด้วยความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพของช็อกโกแลต สูตรควบคุม (2)

ศึกษาผลกระทบและระบุนค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยซ็อกโกแลตที่ใช้ในการวิจัยเป็นสูตรเดียวกันตลอดการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพซ็อกโกแลตสูตรควบคุม มีการทดสอบค่าความหนืด (Viscosity) และความเค้นเฉือน (Shear stress) จากนั้นนำทั้งค่าทั้งสองมาทำการคำนวณค่าอัตราเฉือน (Shear rate) ของซ็อกโกแลตซ็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการทดสอบเพื่อสังเกตพฤติกรรมและแนวโน้มของความหนืดและความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม เพื่อให้สามารถนำค่าดังกล่าวมาสรุปเป็นกราฟพฤติกรรมการไหลและคำนวณค่าอัตราเฉือน แล้วจึงนำข้อมูลไปทำการออกแบบสกรูอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

การศึกษาการออกแบบสกรูอัดรีด ทำการศึกษาการออกแบบสกรูอัดรีดโดยการใช้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุมาใช้ในการออกแบบ จากนั้นนำค่าอัตราเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพมาทำการคำนวณหาค่าความลึกของช่องสกรู (Chanel depth) เพื่อให้สามารถออกแบบสกรูอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้

ศึกษาผลกระทบและระบุนค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ทำการใช้สูตรควบคุม ที่ผสมใหม่โดยไม่ผ่านการพักอุณหภูมิทำการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรู โดยสกรูที่ใช้ในการวิจัยเป็นสกรูที่ได้จากการออกแบบ ตัวเครื่องสามารถปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบที่ใช้ในการอัดรีดได้ ทำการอัดรีดเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ที่อุณหภูมิห้อง 28 °C ขนาดรูแม่พิมพ์ (Die) 2 มิลลิเมตร

1) การศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปรอัดรีดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้น ทำการศึกษาตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed) และลักษณะใบมีดกวาดหน้าดาบ ทำการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรเพื่อศึกษาผลลัพธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

2) อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรในการอัดรีดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ผลลัพธ์แนวโน้มพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกายภาพซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ได้แก่ ความหนืด (Viscosity), ความเค้นเฉือน (Shear stress) และ อัตราเฉือน (Shear rate)

2) ได้ลักษณะและขนาดของสกรูที่ใช้ในการอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ในงานวิจัย

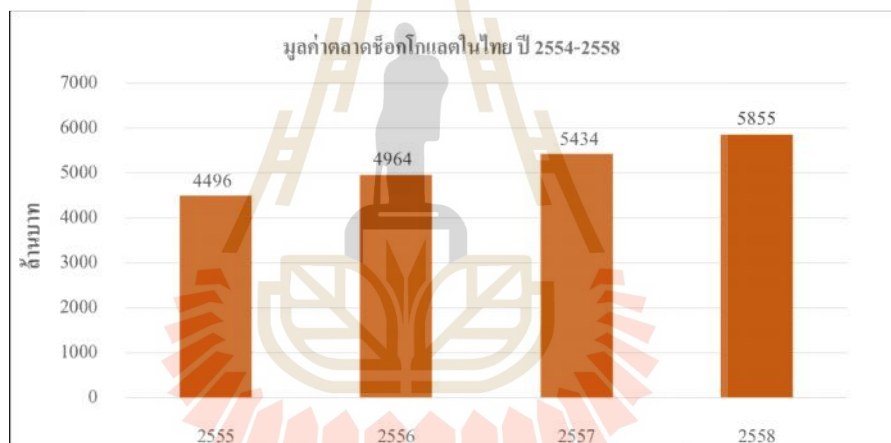
3) สามารถระบุนค่าตัวแปรที่ส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม มีค่าใกล้เคียงขนาดรูแม่พิมพ์มากที่สุด เท่ากับ 2 มิลลิเมตร

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าทางการตลาดได้อย่างมาก โดยตลาดช็อกโกแลตในไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในปี 2554-2558 โดยทั้ง 4 ปีนี้สามารถสร้างมูลค่ารวมได้ถึง 24,838 ล้านบาท (ศูนย์วิจัยระยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2016) แสดงในรูป 2.1 จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบว่าช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่สร้างมูลค่าสูงในประเทศไทย



รูปที่ 2.1 มูลค่าตลาดช็อกโกแลตในไทย ปี 2554-2558  
(ศูนย์วิจัยระยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, 2016)

กิตติศักดิ์ ยศอินทร์ (2009) ระบุว่าช็อกโกแลตจัดเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานในกลุ่มที่มีไขมันเป็นโครงสร้างหลัก ผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้จะมีไขมันห่อหุ้มส่วนผสมอื่น ๆ เช่น ผลึกน้ำตาล ชันถั่วที่บดละเอียด ของแข็งจากนมและเนือโกโก้เอาไว้ สมบัติของไขมันที่เป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์บ่งชี้ถึงความอ่อนหรือแข็ง (Hardness) ของเนื้อสัมผัส (Texture) และความรู้สึกเมื่อช็อกโกแลตอยู่ในปาก ช็อกโกแลตมีส่วนผสมหลักคือเนือโกโก้ ซึ่งได้จากเมล็ดของต้นโกโก้ที่คั่วแล้ว ปริมาณของโกโก้เป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ช็อกโกแลตที่มีปริมาณโกโก้สูงกว่าจะมีคุณภาพดีกว่า ซึ่งผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตอาจมีส่วนผสมอื่น ๆ เช่น น้ำตาล นม ถั่ว

และผลไม้ต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความหลากหลายในรูปแบบและรสชาติ นอกจากนี้ระยะเวลา อุณหภูมิ และการคั่วเมล็ดโกโก้มีส่วนทำให้รสชาติแตกต่างกันด้วย

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ (2015) กล่าวว่าสามารถช็อกโกแลตแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก คือ

- ช็อกโกแลตกึ่งหวาน (Semi-sweet chocolate) ประกอบด้วยเนื้อโกโก้เหลว เนยโกโก้ และน้ำตาลเล็กน้อย ใช้ทำขนมเค้ก คุกกี้ บราวนี่ มีปริมาณเนื้อโกโก้ (Cocoa solid) ประมาณ 40 – 60 %

- ช็อกโกแลตนม (Milk chocolate) ประกอบด้วยเนื้อโกโก้ เนยโกโก้ น้ำตาลและนมผง โดยส่วนมากจะมีส่วนผสมของนมผงมากกว่าเนื้อโกโก้ มีเนื้อโกโก้ ประมาณ 10 – 20 % และนมผง ประมาณ 12 %

- ช็อกโกแลตขาว (White chocolate) ประกอบด้วยเนยโกโก้ น้ำตาล และนมผง ไม่มีส่วนผสมของเนื้อโกโก้ แต่อาจมีการเติมวานิลลาหรือสารแต่งกลิ่น ซึ่งในบางประเทศจะไม่เรียกช็อกโกแลตชนิดนี้ว่าช็อกโกแลต เพราะไม่มีส่วนผสมของเนื้อโกโก้

- ช็อกโกแลตดำ (Dark chocolate) มีทั้งชนิดกึ่งหวาน หวานปนขม และรสชาติขม ส่วนประกอบคือเนื้อโกโก้และเนยโกโก้ ส่วนนมผงอาจมีเล็กน้อยหรือไม่มีเลย มีเนื้อโกโก้ประมาณ 50 – 85 %

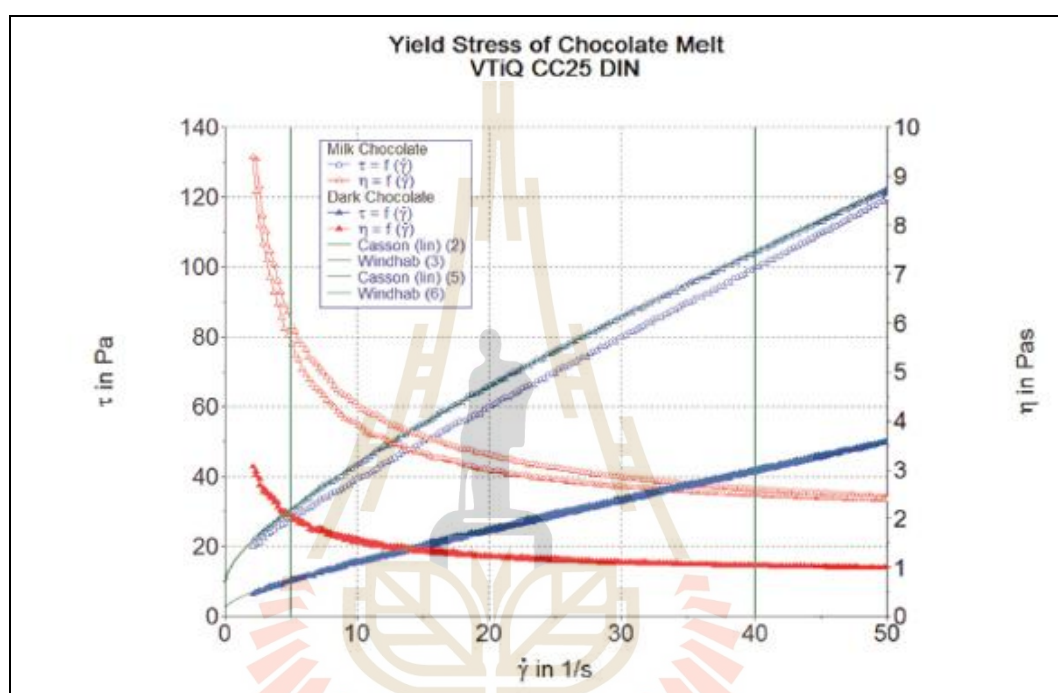
Beckett ST. (2009) กล่าวว่าช็อกโกแลตมีคุณสมบัติในการหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และมีความสามารถในการไหลซึ่ง คุณสมบัติการไหลของช็อกโกแลตมีความสำคัญเนื่องจากการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งจำเป็น โดยเรียกคุณสมบัติเหล่านี้ว่า Chocolate rheology โดยคุณสมบัติการไหลขึ้นกับความหนืดและอุณหภูมิที่ช็อกโกแลตได้รับ

Afoakwa (2008) กล่าวว่าความหนืดยังส่งผลต่อรสชาติของช็อกโกแลตขณะอยู่ในปาก ดังนั้นผู้บริโภคจึงสามารถรับรู้การไหลของช็อกโกแลตในระหว่างการรับประทานได้ โดยรสชาติที่รับรู้ขึ้นอยู่กับสัมผัสซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืดและอัตราการหลอมเหลวของช็อกโกแลตที่รับประทาน ดังนั้นช็อกโกแลตที่เก็บไว้ในตู้เย็นหรือในห้องอุ่นจึงมีรสชาติที่แตกต่างกัน เนื่องจากความหนืดมีความแตกต่างกัน

Sokmen, A.; Gunes, G. (2006) กล่าวว่า Chocolate rheology มักถูกวัดปริมาณในกระบวนการผลิตโดยใช้พารามิเตอร์สองตัวคือความเค้น (Yield stress) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมระหว่างของแข็งและของเหลวโดยมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการเฉือน (Shear rate)

Servais C.; Ranc, H. (2003) ทำการศึกษาการเปรียบเทียบ Chocolate rheology ระหว่าง Milk chocolate และ Dark chocolate โดยการหาคุณสมบัติทางกล ได้แก่ ความเค้นเฉือน (Shear strain), ความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) และอัตราเฉือน (Shear rate) แล้วจึงนำข้อมูล

ทั้งหมดมาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.2 เพื่อศึกษาว่าพฤติกรรมทางกลของทั้งช็อกโกแลตทั้ง 2 ชนิดนี้ และยังสามารถกล่าวอีกว่า Chocolate rheology มักถูกวัดปริมาณในกระบวนการผลิตโดยใช้พารามิเตอร์สองตัวคือความเค้น (Yield stress) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมระหว่างของแข็งและของเหลวโดยมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการเฉือน (Shear rate)



รูปที่ 2.2 การนำค่าความเค้น ความหนืดปรากฏ และอัตราการเฉือนมาพล็อตเป็นกราฟเพื่อศึกษาพฤติกรรมของช็อกโกแลต (Servais et al., 2003)

Joye (2003) กล่าวว่าช็อกโกแลตที่มีความหนืดสูงจะมีความรู้สึกที่นุ่มนวลและอยู่ในปากนานได้ขึ้น และยังได้ระบุว่าความหนืดนั้นเกี่ยวข้องกับการกระจายขนาดอนุภาคองค์ประกอบของช็อกโกแลตนั้น ๆ ดังนั้น การกำหนดคุณสมบัติการไหลของช็อกโกแลตเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและมีพื้นผิวดี รวมทั้งปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปริมาณไขมัน การกระจายขนาดอนุภาค ความชื้นอิมัลซิไฟเออร์ และอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อคุณสมบัติการไหลและค่าใช้จ่ายในการผลิต นอกจากนี้ยังได้มีการจัดประเภทการไหลของช็อกโกแลตว่าเป็นของไหลแบบ non-Newtonian fluid

Hesam AA.; Evan M.; Savvas G. (2014) ระบุว่าซ็อกโกแลตเป็นของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลแบบประเภท non-Newtonian fluid คือไม่ขึ้นกับเวลาและแรงเฉือนมีผลต่อค่าความหนืด นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดลองอัดรีด (Extrusion) ซ็อกโกแลตที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส ซ็อกโกแลตมีความหนืดสูง ดังนั้น ในการศึกษาการอัดรีดซ็อกโกแลตควรศึกษาที่อุณหภูมิมากกว่า 30 องศาเซลเซียส ขึ้นไป

มหาวิทยาลัยมหิดล (2017) กล่าวว่ากรรมวิธีที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหารคือกระบวนการอัดแบบใช้สกรู (Screw Extrusion) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องการเพิ่มกำลังการผลิต การปรับปรุงสูตรผลิตภัณฑ์ การสร้างลักษณะรูปร่างที่มีความหลากหลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่มีความต่อเนื่องทำให้การผลิตมีความต่อเนื่อง ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีเอกซ์ทรูชัน (Extrusion) มาใช้ในการผลิตอาหารหลากหลายชนิด เนื่องจากข้อดีของกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) คือ ประหยัดเวลาและพลังงาน ลดแรงงานจากคน ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลง และมีความยืดหยุ่นต่อการใช้วัตถุดิบ ในสูตรการผลิตสามารถผสมส่วนผสมให้เข้ากันได้เป็นอย่างดี ประสิทธิภาพ ประหยัดเนื้อที่ในการติดตั้งเครื่องมือ นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ตามต้องการ

## 2.2 พฤติกรรมการไหลของซ็อกโกแลต

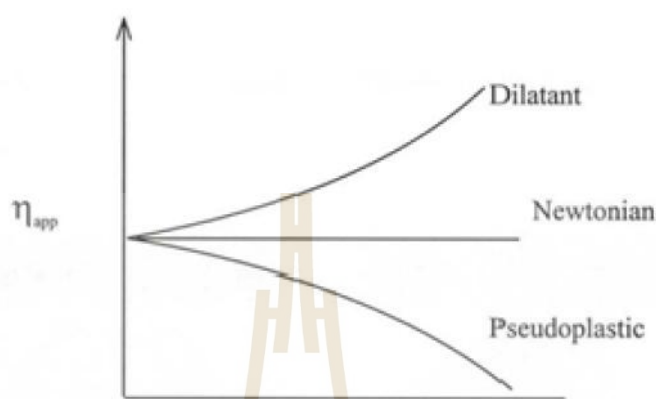
Afoakwa (2008) ได้กล่าวว่าคุณลักษณะของซ็อกโกแลตมีการปรับปรุงในหลายขั้นตอน เพื่อให้ได้คุณสมบัติเนื้อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการต่าง ๆ จำเป็นต้องมีการให้ความร้อนเพื่อให้ซ็อกโกแลตมีการหลอมละลาย ทำให้สถานะของซ็อกโกแลตแปรสภาพเป็นของแข็งกึ่งเหลวที่สามารถไหลได้ อีกทั้ง ยังทำให้ไขมันในซ็อกโกแลตออกมาจากซ็อกโกแลตและเกิดการกระจายตัว ทำให้ซ็อกโกแลตสามารถไหลได้ง่าย

Schantz B.; Rohm H. (2005) ได้ระบุว่าซ็อกโกแลตสามารถจัดได้ว่าเป็นสารแขวนลอยที่ประกอบด้วยอนุภาคที่มีของน้ำตาลและของแข็งโกโก้กระจายตัวในเนยโกโก้ เรียกได้ว่าเป็นวัสดุแข็งกึ่งเหลว (Pastes Material)

P. Coussot. (2005) วัสดุที่มีส่วนประกอบของของแข็งมากกว่าของเหลวจะทำให้วัสดุชนิดนี้มีความหนืดที่สูงกว่าของเหลวปกติ โดยเรียกวัสดุที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่าเป็นวัสดุแบบ Pastes



Benbow J.; Bridgwater. (1993) วัสดุแบบ Pastes มีพฤติกรรมการไหลแบบ non-Newtonian fluid ที่มีค่าขึ้นกับอัตราเฉือนสามารถแสดงได้ในรูปแบบของการแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่ออัตราเฉือนเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3

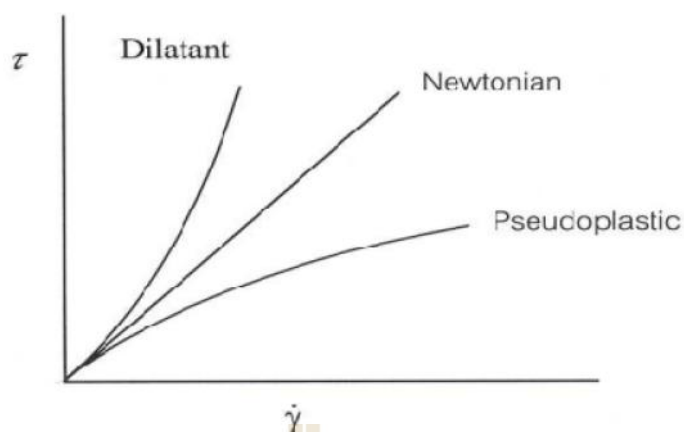


รูปที่ 2.3 แนวโน้มของความหนืดในวัสดุแบบ Pastes ซึ่งเป็นของไหลประเภท non-Newtonian fluid เมื่ออัตราเฉือนเปลี่ยนแปลง (ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015)

ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ (2015) ได้กล่าวว่าการพิจารณาความหนืดของไหลแบบ non-Newtonian fluid นั้นสามารถกล่าวได้ว่า สำหรับของเหลวธรรมดาความหนืดมีความคงที่ แต่ในวัสดุที่อยู่ในลักษณะหลอมเหลว ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนจะไม่คงที่ โดยที่กราฟระหว่างความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) และ อัตราเฉือน ( $\dot{\gamma}$ ) จะไม่เป็นเส้นตรง เช่นในของเหลวแบบ non-Newtonian fluid ซึ่งความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือนในช่วงอัตราเฉือนหนึ่ง พฤติกรรมแบบ non-Newtonian fluid มี 2 ลักษณะที่แตกต่างกัน คือ

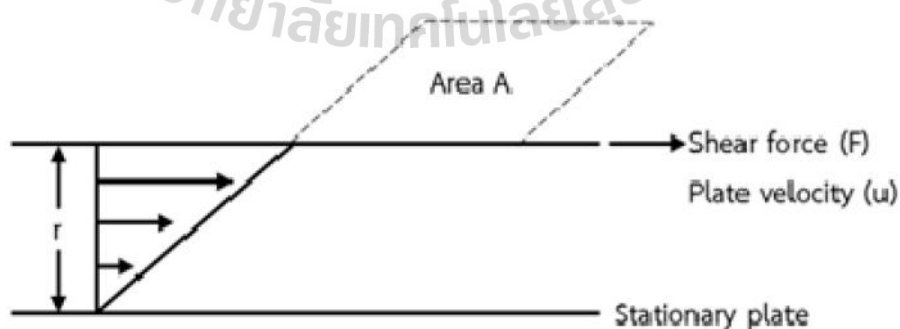
- 1) Pseudo plastic หรือ Shear thinning คือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนแล้วความหนืดลดลง
- 2) Dilatant หรือ Shear thickening คือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนแล้วความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดง

ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนในพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian fluid และ non-Newtonian fluid (ยูพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015)

ยูพาพร รักสกุลพิวัฒน์ (2015) ได้อธิบายเกี่ยวกับความหนืดว่าเมื่อวัตถุได้รับความเค้น (Stress) จากภายนอกโดยส่วนใหญ่มักจะเปลี่ยนรูปร่าง (Deform) โดยคุณสมบัติซึ่งวัตถุพยายามต่อต้านการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation) นี้ จะเรียกว่า ความหนืด (Viscosity) พิจารณาแผ่นวัตถุ 2 แผ่น วางห่างกันในระยะ  $r$  ระยะช่องว่างระหว่างแผ่นบรรจุด้วยของไหล (fluid) ถ้าแผ่นหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพันธ์กับอีกแผ่นหนึ่งเท่ากับ  $u$  ดังแสดงในรูปที่ 1 การเคลื่อนที่นี้จะถูกขัดขวางด้วยปฏิกิริยาความหนืด (Viscous reaction) ในของไหลนั้น เนื่องจากการเคลื่อนที่นี้จัดว่าเป็นการเฉือน (Shear) ดังนั้น ปฏิกิริยานี้จึงเรียกว่า ความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หลักการพื้นฐานของความหนืด (ยูพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015)

จากกฎของนิวตันค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) หาได้จากแรงซึ่งกระทำบนแผ่นวัตถุที่เคลื่อนที่  $F$  และพื้นที่รับแรง  $A$  โดยเขียนเป็นสมการดังสมการที่ 2.1

$$\text{Shear stress, } \tau = \frac{F}{A} \quad (\text{Nm}^{-2}) \quad (2.1)$$

อัตราเฉือน (shear rate) หาได้จากความเร็ว  $U$  ที่สัมพันธ์กับระยะ  $r$  ดังสมการที่ 2.2

$$\text{Shear rate, } \gamma = \frac{U}{r} \quad (1/s) \quad (2.2)$$

เนื่องจากความเค้นเฉือนแปรผันโดยตรงกับอัตราเฉือน ดังนั้น เขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.3

$$\tau \propto \gamma \quad (2.3)$$

โดยที่  $\eta$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดเฉือนเป็นค่าคงที่ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.4

$$\tau = \eta \gamma \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ ยังมีการระบุว่าความหนืดสามารถแสดงได้ในหลายหน่วย ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็นในระบบเอสไอ (SI unit) โดยความหนืดมีหน่วยเป็น Pascal seconds (Pas) หน่วยที่นิยมใช้อีกหน่วยหนึ่งในทางเทคนิค เรียกว่า พอยส์ (Poise) ความสัมพันธ์ระหว่าง Poise กับ Pascal seconds สามารถเขียนได้ดังนี้  $10 \text{ Poise} = 1 \text{ Pas}$

### 2.3 กระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู

Riaz (2007) กล่าวว่าเครื่องอัดรีด (Extruder) เป็นเครื่องจักรที่มีอุณหภูมิสูงทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงหลายวัตถุดิบผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป ซึ่งรวมการดำเนินงานหลายหน่วยไว้ในเครื่องเดียว ได้แก่ การผสม, การนวด, การตัด และการขึ้นรูป

Kruder GA. (1985) กล่าวว่า การอัดรีดขึ้นรูป (Extrusion process) เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการแปรรูปที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในอุตสาหกรรมพลาสติกยางและอาหาร ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์พลาสติกมากกว่าครึ่งหนึ่งรวมทั้งถุงพลาสติกแผ่นและท่อผลิต

Tadmor Z.; Klein I. (1970) กล่าวว่า การอัดรีดขึ้นรูปสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้วัตถุดิบไหลเวียนได้อย่างสม่ำเสมอในอัตราที่สูง โดยเครื่องอัดรีดประกอบด้วยสองส่วนที่แตกต่างกันคือระบบลำเลียงซึ่งจะขนส่งวัตถุดิบทำให้ส่วนประกอบในวัตถุดิบเกิดการกระจายตัว และระบบ Die ทำให้วัตถุดิบมีรูปร่างตรงตามความต้องการ

Chris R. (1990) กล่าวว่า เครื่องอัดรีดแบบสกรูสามารถจำแนกได้ตามจำนวนสกรูในเครื่อง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw Extruder) ซึ่งมีจำนวนสกรู 1 อัน และเครื่องอัดรีดแบบหลายสกรู (Multi screw Extruder) ซึ่งจะมีจำนวนสกรูมากกว่า 1 อัน

Riaz (2000) ระบุว่า ข้อได้เปรียบหลักของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวเหนือเครื่องอัดรีดสกรูคู่คือ พวกมันใช้งานง่ายมากและมีราคา 1/4 ถึง 1/2 ของราคาเครื่องอัดรีดสกรูคู่ขนาดใกล้เคียงกัน ด้วยข้อได้เปรียบนี้ เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวจึงถูกนำมาใช้ในทุกระดับอุตสาหกรรม เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวขึ้นอยู่กับ การไหลแบบลากเพื่อการขนส่ง ดังนั้นมวลจะต้องติดกับผนัง Barrel เพื่อการเคลื่อน ไหวที่เหมาะสม ภายใน Barrel โดยทั่วไป เครื่องอัดรีดที่มีแรงเสียดทานสูงจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น ปัญหาที่สำคัญที่ต้องเผชิญขณะใช้งานเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวคือการผสมวัสดุไม่เข้ากัน การไหลและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุในเครื่องอัดรีด

เครื่องอัดรีดสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนได้แก่ Feeding, Transition และ Final cooking zones โดยใน Feeding zone เป็นส่วนรับรับวัสดุแล้วผ่านการปรับสภาพ จากนั้นจึงส่งไปยัง Transition zone ในส่วนนี้อัตราการบีบอัดจะเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยในการผสมและนวด ใน Final cooking zone พลังงานความร้อนและพลังงานกลที่ป้อนเข้ามาจะทำให้วัสดุอยู่เหนือจุดหลอมเหลว องค์ประกอบสุดท้ายของสกรูจะช่วยลดการรีดวัสดุออกและเพิ่มการบีบอัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (2015) กล่าวว่า เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw Extruder) ที่ใช้คู่กันโดยทั่วไปเป็นประเภท Plasticating Extruders ซึ่งหมายถึงเครื่องอัดรีดที่ใส่ วัสดุเริ่มต้นในสถานะของแข็งเข้าไปและทำให้เกิดการหลอมในเครื่องอัดรีด แล้วส่งพอลิเมอร์ไปยัง หัวอัดรีด ลักษณะของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวสามารถจำแนกได้ตามจำนวนของส่วนกดอัด (Compression section) ได้สองแบบ ได้แก่ สกรูระยะเดียว (Single stage Screw) หมายถึง สกรูที่มีส่วนของระยะกดอัดเพียงบริเวณเดียว และสกรูที่มีส่วนของระยะกดอัดมากกว่าหนึ่งบริเวณ (Multi stage Screw) ซึ่งสกรูประเภทนี้ โดยส่วนใหญ่จะใช้ในกรณีที่มีจุดประสงค์ในการระบายไอหรือสารระเหยออกจากเครื่องอัด นอกจากนี้ยังมีการอธิบายเพิ่มเติมอีกว่ากลไกที่เกิดขึ้นในเครื่องอัดรีดแบบ

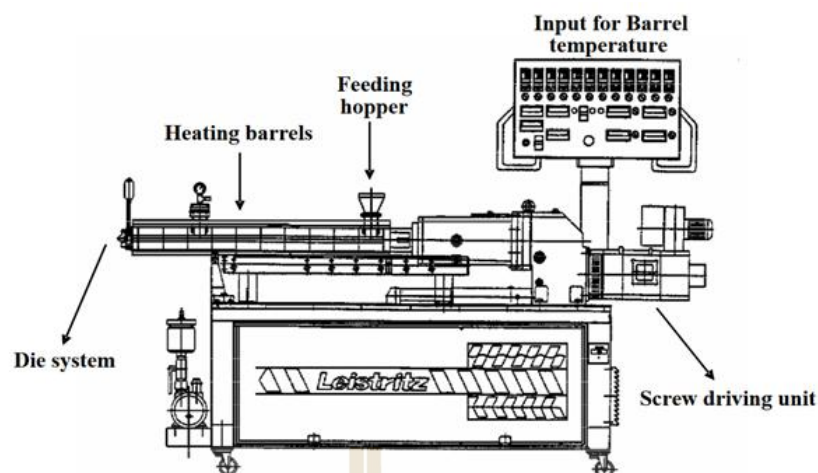
สกรูเดี่ยวคือ เมื่อวัสดุซึ่งถูกส่งผ่านกรวยเติม (Hopper) ตกลงมายัง Barrel นั้น วัสดุจะอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างสกรู และ Barrel ซึ่งล้อมรอบโดยสันสกรู ทั้งข้างหน้า ข้างหลัง ช่องว่างบริเวณนี้เรียกว่า ช่องสกรู (Screw channel) เนื่องจากในขณะที่สกรูมีการหมุนไปเรื่อย ๆ ในขณะที่ Barrel อยู่หนึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้น จะมีแรงเสียดทานกระทำกับวัสดุจาก barrel และสกรู ซึ่งแรงเสียดทานนี้เองเป็นตัวการสำคัญในการส่งถ่ายวัสดุไปข้างหน้าตราบเท่าที่วัสดุยังอยู่ในลักษณะของแข็ง เมื่อวัสดุถูกผลักให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยแรงเสียดทานนั้นแล้วก็จะมีความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก

1. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดทาน (Friction heat Generation)
2. ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการนำความร้อนจากแผ่นให้ความร้อนที่อยู่ Barrel

ดังนั้น เมื่อวัสดุเคลื่อนที่ไปข้างหน้ามากขึ้น ปริมาณของพอลิเมอร์ในสถานะของแข็งก็จะค่อยๆ ลดลงเป็นศูนย์ ที่บริเวณปลายของส่วนกดอัดและเข้าสู่ส่วนสุดท้ายคือ ส่วนส่งรีดเพื่อบีบวัสดุเข้าสู่หัวฉีดเพื่อขึ้นให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย (2015) กล่าวว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ถูกใช้ในระบบอุตสาหกรรมกันอย่างมากมาย มีทั้งแบบที่ใช้แรงเหวี่ยงสูง มักใช้ในการผลิต Breakfast Cereals และ Snack foods แรงเหวี่ยงปานกลาง มักใช้ผลิตขนมปังและอาหารสัตว์ที่มีความชื้นปานกลาง และแรงเหวี่ยงต่ำ ที่มักใช้ในการผลิต เส้นพาสตา สပါเก็ตตี้ และผลิตเนื้อสัตว์ แต่ทั้งสามแบบที่ถูกแยกมานั้น จะมีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน

Rosato DV. (1998) ได้กล่าวว่าการแปรรูปโดยกระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู (Screw Extrusion) เป็นกระบวนการที่รวมหลายกรรมวิธีเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การต้ม การนวด การเนียน การขึ้นรูป เป็นต้น โดยเครื่องจักรสำคัญของกระบวนการนี้คือเครื่องอัดรีด (Extruder) โดยหลักการทำงานของเครื่องอัดรีด คือวัตถุดิบจะถูกส่งไปที่ส่วนรับวัตถุดิบ (Feed hopper) จากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเครื่องอัดรีด วัตถุดิบจะถูกให้ความร้อน และมีแรงเฉือน (Shear force) เกิดขึ้นในกระบอกอัดรีด (Barrel) จากนั้น วัตถุดิบจะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการหมุนของสกรู และทำให้เกิดรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน (Die) ซึ่งเป็นรูเปิดอยู่ส่วนสุดท้ายของเครื่องอัดรีด ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องอัดรีดแบบใช้สกรู (Rosato DV., 1998)

Martin C. (2001) กล่าวว่าตัวแปรที่สำคัญที่ต้องควบคุมภายในกระบวนการอัดรีดแบบสกรู คืออุณหภูมิของกระบอกอัดรีด, อัตราป้อน, ความเร็วของสกรู และภาระของมอเตอร์ โดยตัวแปรที่สำคัญหลักมีดังนี้

- 1) อุณหภูมิกระบอกอัดรีด: การเปลี่ยนสถานะหรืออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุเม็ดถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิของกระบอกอัดรีด
- 2) อัตราการป้อนและความเร็วของสกรู: อัตราการป้อนและความเร็วของสกรูที่คงที่ในตลอดกระบวนการมีความสำคัญ เพราะปัจจัยทั้งสองนี้จะกำหนดปริมาณการเติมวัสดุเข้าสู่เครื่องอัดรีด หากอัตราการป้อนและความเร็วของสกรูคงที่จะส่งผลให้อัตราถ่อนและเวลาในการอัดรีดวัสดุคงที่
- 3) ภาระมอเตอร์และแรงดันหลอม: พารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนและความเร็วของสกรู พารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัสดุรวมไปถึงปริมาณอัตราส่วนผสมของวัสดุนั้น ๆ

Shah RD.; Kabadi M. (1994) ได้กล่าวว่ากระบวนการอัดขึ้นรูปต้องตรวจสอบอย่างใกล้ชิด และทำความเข้าใจกับตัวแปรต่าง ๆ ได้แก่ ความหนืด, ความผันแปรของความหนืดด้วยอัตราถ่อน และอุณหภูมิ เป็นต้น

Whelan T.; Dunning D. (1988) ได้กล่าวว่าช่วงอัดรีดภายใน Barrel แบ่งออกเป็นสามส่วน ได้แก่ Feed zone, Transition zone และ Metering zone

Rina C.; Hossein Z. (2004) ได้กล่าวว่าเทคโนโลยีการอัดรีดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแข็งและของแข็ง ศักยภาพของเทคโนโลยีนี้สะท้อนอยู่ใน

รูปแบบที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของวัตถุดิบในเครื่องอัดรีดได้โดยใช้กระบวนการทางวิศวกรรมและการใช้วัตถุดิบต่างๆ ข้อเสียของเทคโนโลยีนี้มักเกี่ยวข้องกับการป้อนพลังงานสูงโดยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับความถี่และอุณหภูมิ ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระบวนการทางวิศวกรรม การออกแบบสกรูและเครื่องอัดรีดเป็นสองส่วนหลักซึ่งมีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

Chris R. (2015) ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการอัดรีดด้วยเครื่องอัดรีดที่ผ่านมา ซึ่งพบว่ามีปัญหาคือ

- 1) ปริมาณผลผลิตต่ำ และเกิดความแปรปรวนของผลผลิต คือ ปริมาณผลผลิตต่ำกว่าที่ต้องการ และมีปริมาณที่ไม่คงที่ แม้ว่าจะมีการใช้เครื่องมือและปัจจัยเดียวกัน
- 2) ผลิตภัณฑ์มีตำหนิ หรือเสียหาย คือ ผลิตภัณฑ์หลังจากการผลิตมีรูปร่าง หรือขนาดที่ไม่ได้ตามที่ต้องการ
- 3) อุณหภูมิในการอัดรีดไม่เหมาะสม คือ ไม่สามารถกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตได้ ส่งผลให้ซ็อกโกแลตเหลวหรือเปราะเกินไป ส่งผลกระทบต่อการใช้วัตถุดิบอย่างสิ้นเปลือง และเสียเวลาในการผลิต

Hesam AA.; Evan M.; Savvas G. (2014) ได้ทำการศึกษาการไหลของซ็อกโกแลตทั้ง 3 ชนิดคือ white chocolate, milk chocolate และ dark chocolate ด้วยกระบวนการอัดรีดแบบ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30 และ 35 องศาเซลเซียส รวมทั้งขนาดของรูแม่พิมพ์ พบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซ็อกโกแลตอยู่ในสภาพ Soft solid และที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ซ็อกโกแลตอยู่ในสภาพค่อนข้างเหลว ดังนั้นการศึกษการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการอัดรีดซ็อกโกแลตจึงมีความสำคัญ

## 2.4 การออกแบบสกรูอัดรีด

Harold FG.; John RW.; Eldridge M.; (2004) กล่าวว่า การออกแบบสกรูอัดรีดมีความสำคัญ เพราะตัวสกรูนี้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการและเป็นตัวกำหนดประเภทของวัสดุที่ใช้และปริมาณการผลิตโดยรวม โดยโครงสร้างลักษณะและองค์ประกอบของสกรูอัดรีดที่มีความสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งส่วนประกอบต่างๆของสกรูอัดรีดล้วนส่งผลต่อกระบวนการอัดรีด ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของสกรูมีดังนี้

Channel Depths (h): หากออกแบบให้มีความลึกเหมาะสมจะทำให้วัสดุไหลได้อย่างไม่ติดขัด ถ้าออกแบบให้มีความตื้นมากๆจะทำให้ความสามารถในการผสมดีขึ้นแต่ถ้าออกแบบให้มีความลึกมาก ๆ จะทำให้การอัดรีดมีแรงดันที่สูง

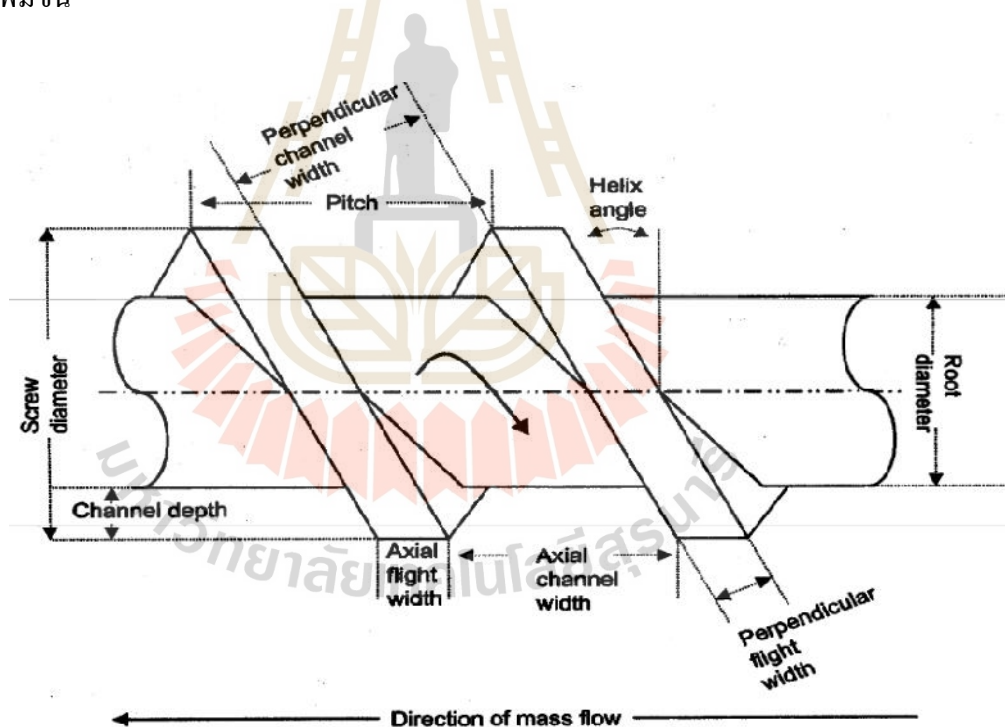
Pitch: ระยะพิตช์ของเกลียวเป็นตัวกำหนดปริมาณงานที่ความเร็วการหมุนคงที่ของสกรู

Flight Widths: เป็นความหนาของใบเกลียว ถ้ามีความหนามากจะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น และมีอัตราอัดรีดดีขึ้น ในขณะที่ถ้ามีความบางมากจะส่งผลให้ความสามารถในการผสมดีขึ้นแต่ อัตราการอัดรีดลดลง

Length of Screw (L): ความยาวของสกรูส่งผลโดยตรงกับการผสมและความร้อนในตัววัสดุ โดยความยาวนี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุและลักษณะผลิตภัณฑ์

Diameter of Screw (D): ส่งผลโดยตรงกับกำลังอัดและกำลังการผลิต ยิ่งมีค่ามากจะทำให้สกรูมีขนาดใหญ่และรองรับวัสดุได้มากกว่าไปถึงการอัดรีดวัสดุที่มีอัตราเนียนมากๆ ได้อีกด้วย

Chevanan N.; Muthukumarappan K.; Rosentrater K.A.; Julson J.L.; (2007) กล่าวว่า อัตราส่วน L/D ดายก็มีผลต่อคุณสมบัติการอัดรีดด้วยเช่นกัน โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน L / D (3.33, 3.33, 3.43, 4.81, 5.83, 7.25 และ 10.00) ของหัวฉีด Die ส่งผลให้ความหนาแน่น และแรงบิดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบของสกรูอัดรีด (Rosato DV., 1998)

Johnson PS. (1982) ได้กล่าวว่ารูปทรงของสกรูช่วยในการป้อนวัสดุได้ง่าย เพื่อช่วยให้วัสดุสามารถลำเลียงไปตาม ระยะพิชและมุมเกลียว นอกจากนี้ควรมีการกำหนดความเร็วในการหมุนของสกรู (Screw speed) เพื่อเป็นตัวกำหนดอัตราการป้อนวัสดุไปยัง Transition zone ที่มีการผสม,



การบีบอัดและการหลอมเหลวของวัสดุ การบีบอัดจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการลดระยะห่างของเกลียว แต่ยังคงความลึกของใบเกลียว (Channel depth) ไว้หรือทำการลดความลึกของใบเกลียว

Javier V.S.; Adrian L.K.; Elaine C.B.; Tim G.; Chamil A.; Phil D.C.; Jing Deng.; Kang L.; Eileen H.J.; Mark P. (2014) กล่าวว่าในการออกแบบสกรูนั้นจำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่จะใช้ในการดำเนินงาน ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่ใช้, ความเร็วรอบที่ใช้อัดรีด, คุณสมบัติของวัสดุอัดรีด, กำลังการผลิตที่ต้องการ เป็นต้น โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนด ลักษณะและขนาดของอุปกรณ์หรือเครื่องอัดรีดให้เหมาะสมกับค่าพารามิเตอร์ ซึ่งการออกแบบสกรูอัดรีดนั้นจะออกแบบโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุและความเร็วรอบที่ใช้อัดรีดเป็นหลัก โดยประกอบไปด้วย ค่าความหนืดเฉือน (Shear viscosity), ค่าความเค้นเฉือน (Shear strain) และค่าอัตราเฉือน (Shear rate)

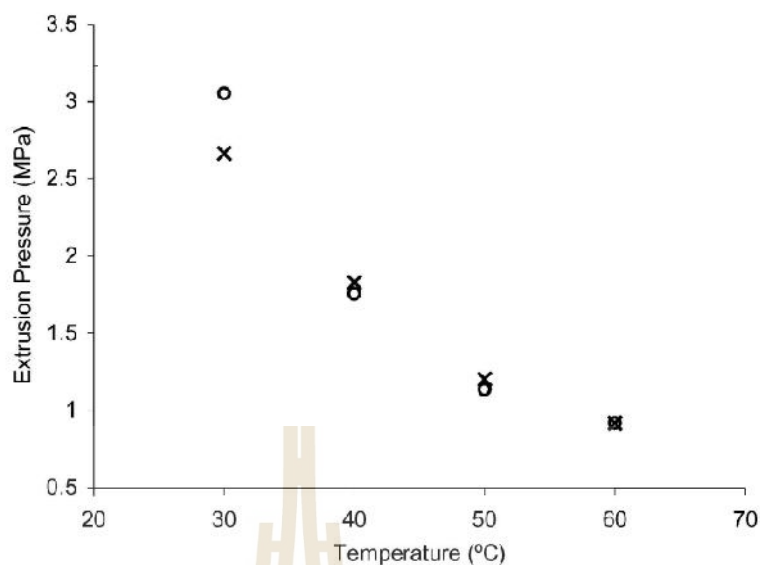
Giles H.F.; Wagner J.R.; Mount E.M. (2005) ได้ระบุสมการในการออกแบบสกรู โดยแทนค่าความเร็วรอบ (N), อัตราเฉือน ( $\gamma$ ) และกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (D) จากปริมาณการผลิตลงในสมการที่ (2.5) เพื่อหาค่าความลึกของช่องสกรู (h)

$$\gamma = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times h} \quad (1 / s) \quad (2.5)$$

โดยที่	$\gamma$	คือ	อัตราเฉือน (Shear rate, 1 / s)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diameter of Screw, mm.)
	N	คือ	ความเร็วรอบ (Screw speed, rpm)
	h	คือ	ความลึกของช่องสกรู (Channel Depth, mm.)

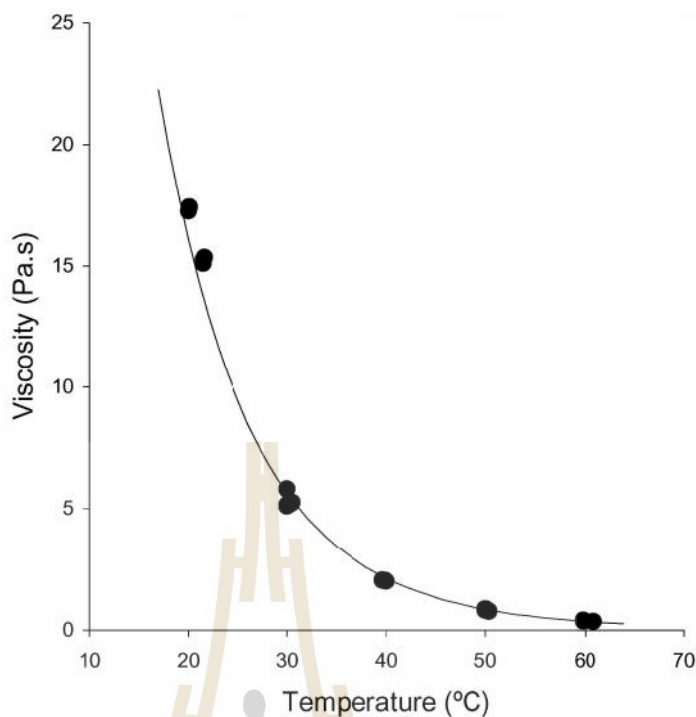
## 2.5 อุณหภูมิอัดรีด

L.J. Wells; S.A. Nightingale, G.M. Spinks (2005) ได้กล่าวว่าอุณหภูมิของกระบวนการอัดขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของการอัดรีด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อในกระบวนการมีความผันผวนของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองอัดรีดโพลีเมอร์ซึ่งเป็นวัสดุ Pastes หาค่าแรงดันอัดขึ้นรูปและความหนืดของสารยึดเกาะฟีนอลิก อัดรีดที่อุณหภูมิระหว่าง 30 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความยาวของสกรู (L/D) ที่แตกต่างกัน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำการสังเกตการลดลงของแรงดันในการอัดรีดขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.8 พบว่าความดันอัดรีดขึ้นรูปลดลงเมื่ออุณหภูมิการอัดเพิ่มขึ้น



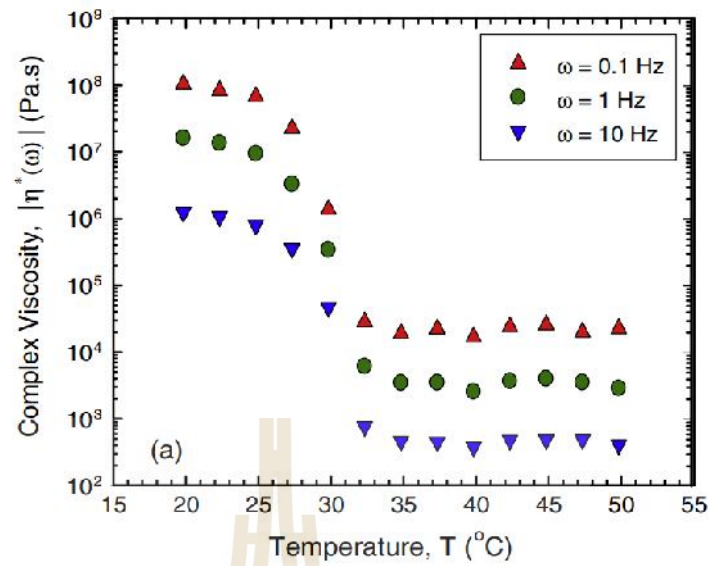
รูปที่ 2.8 ความดันอัดขึ้นรูปของสองตัวอย่าง ( ° และ ×) ของพอลิเมอร์ที่ความเร็วการอัด 1.157 มม. วินาทีและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความยาวสกรู (L / D) เท่ากับ 8.33 (L.J. Wells et al., 2005)

L.J. Wells; S.A. Nightingale, G.M. Spinks (2005) ยังได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความหนืดของวัสดุที่ช่วงอุณหภูมิ 20 และ 60 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.9 พบว่าความหนืดของวัสดุลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น



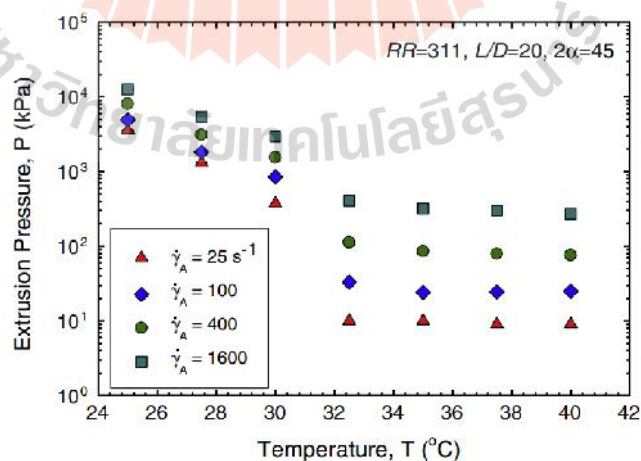
รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของความหนืดในค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ของพอลิเมอร์  
(L.J. Wells et al., 2005)

Hesam AA.; Evan M.; Savvas G. (2014) ได้กล่าวว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อแรงดันอัดรีดช็อกโกแลต ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของช็อกโกแลตที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ 3 แบบ ได้แก่ Dark chocolate, Milk chocolate และ White chocolate เพื่อให้เข้าใจลักษณะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างกันโดยใช้การไหลผ่านกระบวนการอัดรีด ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวช็อกโกแลต จะมีสถานะเป็นวัสดุกึ่งแข็ง (Pastes) และต้องการแรงอัดที่สูงขึ้นสำหรับการรีด การเพิ่มอุณหภูมิการอัดรีดขึ้นรูปจะเป็นการละลายโครงสร้างไขมันและลดปริมาณไขมันช็อกโกแลตที่เป็นของแข็ง และอุณหภูมิยังส่งผลต่อ Rheology ของช็อกโกแลต ดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิอัดรีดให้สูงขึ้น ความหนืดของช็อกโกแลตทดสอบมีค่าลดลงโดยเริ่มลดลงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป



รูปที่ 2.10 ความหนืดเชิงซ้อนของช็อกโกแลตนม โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ความถี่ต่างกันสามระดับ (Hesam et al., 2014)

นอกจากนี้ Hesam AA.; Evan M.; Savvas G. (2014) ยังได้ทำการทดสอบพฤติกรรมการไหลของ Milk chocolate โดยทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอัดรีดและแรงดันอัดรีดเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 พบว่าความดันอัดรีดขึ้นรูปลดลงเมื่ออุณหภูมิการอัดเพิ่มขึ้น



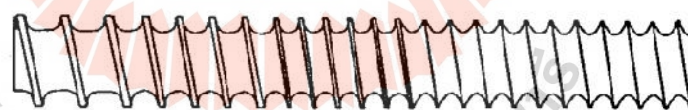
รูปที่ 2.11 แรงดันอัดรีดของ Milk chocolate โดยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Hesam et al., 2014)

## 2.6 ความเร็วรอบและลักษณะสกรูอัดรีด

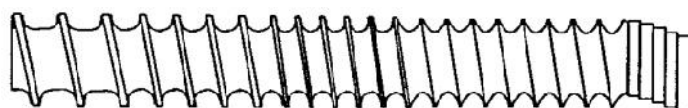
Jingtao H.; Xianghua L.; Zhengyi J. (2014) ได้ทำการจำลองกระบวนการอัดขึ้นรูปของเครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยวโดยใช้ความเร็วสกรูที่แตกต่างกัน โดยใช้ซอฟต์แวร์การวิเคราะห์องค์ประกอบข้อจำกัด ได้ข้อสรุปว่าความเร็วของสกรูมีผลต่อคุณภาพการอัดรีดขึ้นรูปและแรงดันทางออกของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว การเพิ่มความเร็วของสกรูทำให้คุณภาพการอัดขึ้นรูปของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะแย่งและแรงดันทางออกของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะเพิ่มขึ้น

Grenus K.M.; Hsieh F.; Huff H.E. (1993) กล่าวว่าแรงบิด (Torque) ที่ใช้ในการหมุนสกรูอัดขึ้นรูปนั้นมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการเติมวัสดุและความหนืดของวัสดุในช่องสกรู และได้กล่าวเพิ่มว่าการเพิ่มความเร็วของสกรูทำให้แรงบิดลดลง

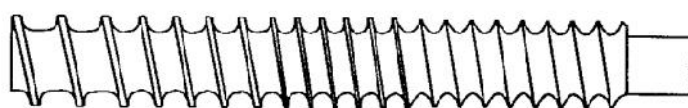
An-I Y.; Yih-Mon J. (1999) การกำหนดค่าสกรูที่มีประสิทธิภาพการลำเลียงต่ำส่งผลให้ปริมาณการเติมวัสดุใน Barrel และใช้แรงบิดมากขึ้น อัตราการป้อนและความเร็วของสกรูเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อปริมาณการเติมวัสดุใน Barrel รวมไปถึงลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติในการอัดรีดขึ้นรูป นอกจากนี้ An-I Y.; Yih-Mon J. (1999) ได้ทำการทดลองปรับค่าความเร็วรอบสกรูที่อัดรีดแป้งข้าวเจ้า โดยทำการอัดรีดด้วยสกรู 3 แบบ ได้แก่ Forward element, Mixing disk และ non-Flight element ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เพื่อตรวจสอบผลกระทบของอัตราการป้อนและความเร็วสกรูว่าส่งผลต่อแรงบิดหรือไม่ ด้วยการอัดรีดแป้งข้าวเจ้าด้วยการอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวโดยทำการปรับค่าความเร็วรอบของสกรู (Screw speed) และอัตราการป้อน (Feed rate)



forward screw profile



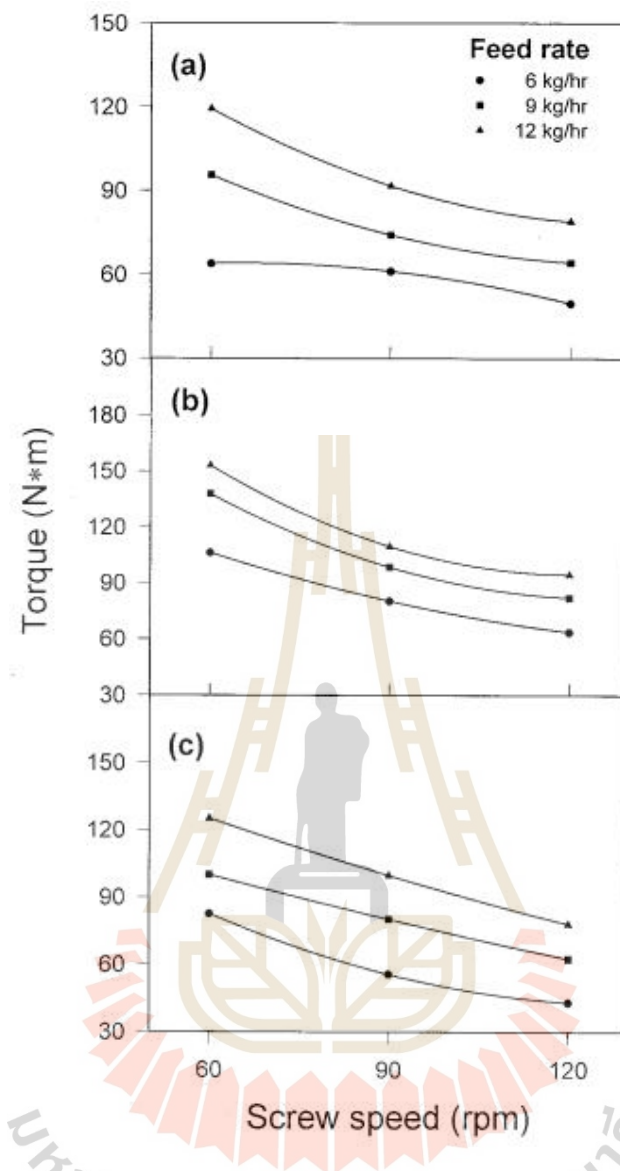
5 mixing disc 60° screw profile



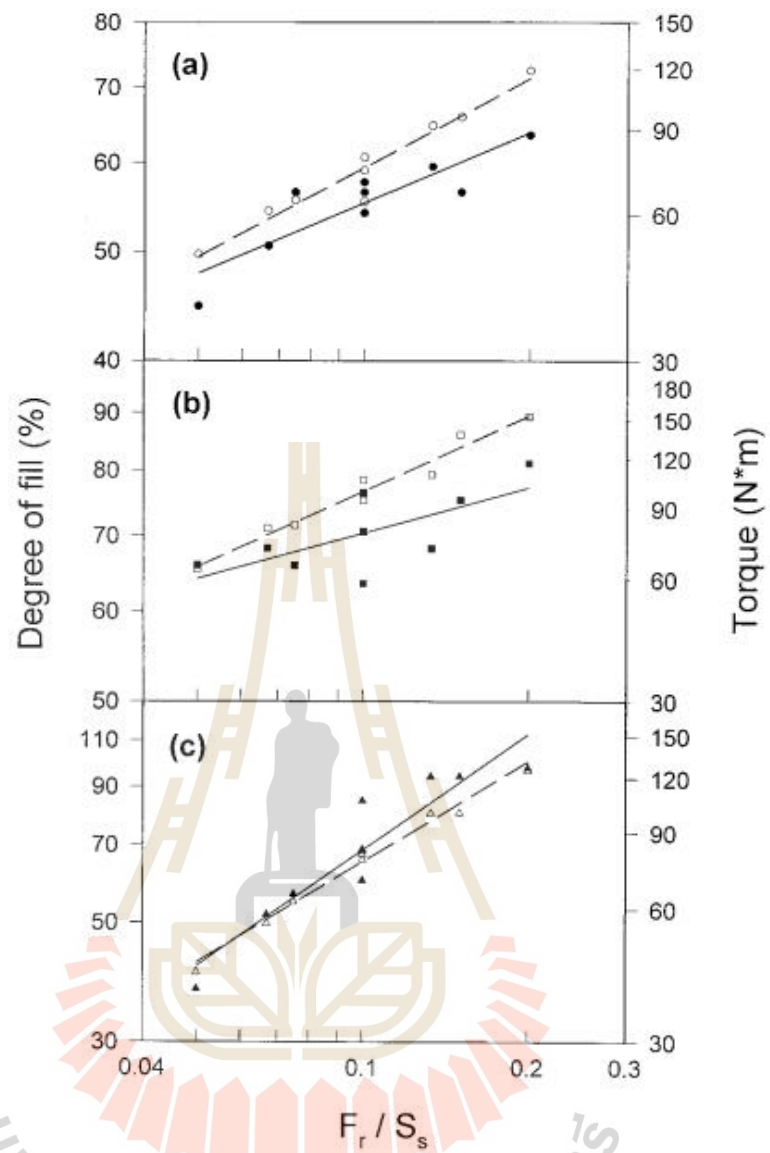
5 cm non-flight screw profile

รูปที่ 2.12 ลักษณะสกรูทั้ง 3 แบบ (An-I et al., 1999)

เมื่อทำการทดลองวัดค่าแรงบิดจากการปรับค่าความเร็วรอบสกรูได้ผลลัพธ์ว่า แรงบิดมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 43.1–153.1 N·m ดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูแล้วค่าแรงบิดมีแนวโน้มที่ลดลงและเมื่อค่าแรงบิดมีค่ามาก ค่าของอัตราการป้อนก็มีแนวโน้มที่มากตามไปด้วย นอกจากนี้ An-I Y.; Yih-Mon J. (1999) ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าปัจจัยอื่น ๆ เช่น ปริมาณปริมาณการเติมวัสดุใน Barrel (The degree of fill) อาจมีบทบาทได้เช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่ง The degree of fill เป็นฟังก์ชันของอัตราการป้อน (Fr) ต่อความเร็วรอบของสกรู (Ss) (Fr/Ss) โดย Fr / Ss มีหน่วยเป็นกิโลกรัม / รอบ ซึ่งค่านี้บ่งบอกถึงมวลของวัสดุที่จะถูกป้อนเข้าสู่ช่องสกรู ซึ่งเป็นหนึ่งในลักษณะการทำงาน of เครื่องอัดรีด โดยจากรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วของสกรูและการลดอัตราการป้อนส่งผลให้ The degree of fill ลดลง นอกจากนี้พบว่าลักษณะของสกรูส่งผลต่อช่วงของ The degree of fill โดยสกรูแบบ Forward element ให้ปริมาณการเติมวัสดุในระดับต่ำ (45–64%) ที่สภาวะการทดสอบ สกรูแบบ Mixing disk ให้ระดับการเติมที่สูงขึ้น (60–81%) และสกรูแบบ non-Flight element แทบจะไม่มีประสิทธิภาพในการลำเลียงเนื่องจากมีระดับการเติมปริมาณการเติมวัสดุที่ต่ำที่สุด (36–99%) จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระดับปริมาณการเติมวัสดุ Barrel ในเครื่องอัดรีดได้รับผลกระทบจากลักษณะของสกรู



รูปที่ 2.13 การวัดแรงบิดที่ความเร็วรอบสกรูต่างๆ และอัตราการป้อน: a, Forward element; b, Mixing disk; c, non-Flight element (An-I et al., 1999)

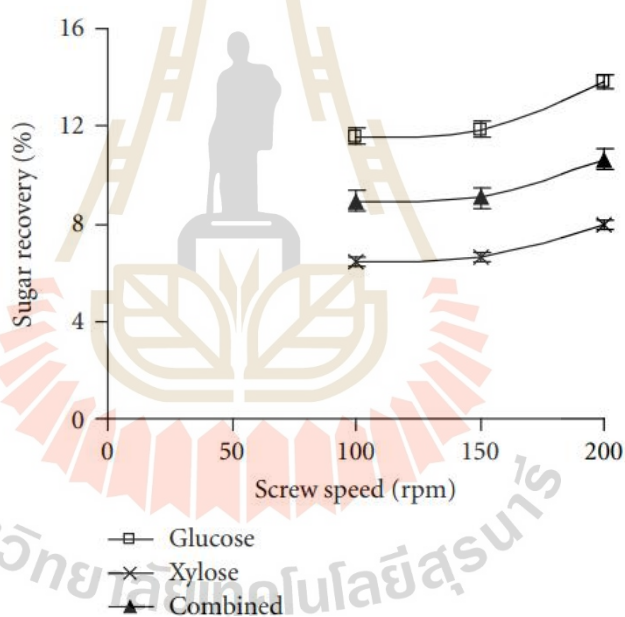


รูปที่ 2.14 The degree of fill ที่แสดงในรูปของฟังก์ชันของอัตราการบินต่อความเร็วรอบของสกรู ( $F_r/S_s$ ): a, Forward element; b, Mixing disk; c, non-Flight element โดยเส้นทึบ = The degree of fill; เส้นประ = แรงบิด (An-I et al., 1999)



Dale B.E.; Weaver J.; Byers F.M. (1999) กล่าวว่า การอัดรีดขึ้นรูปเป็นซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น แรงเฉือนสูง มีการผสมอย่างรวดเร็ว เวลาที่อยู่อาศัยสั้น กำหนดอุณหภูมิอัดรีดได้โดยไม่เกิดการเกิดเฟอร์ฟูรัลและ HMF การใช้กระบวนการอัดรีดในการปรับสภาพน้ำตาลเพียงไม่กี่ครั้งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงการคืนสภาพของน้ำตาล (Sugar recovery) จากชีวมวลต่าง ๆ

Chinnadurai K.; Kasiviswanathan M.; William R.G. (2012) ได้ทำการศึกษาและจัดการกับขั้นตอนที่มีราคาแพงที่สุดในกระบวนการคืนสภาพน้ำตาล เช่น การปรับสภาพ และการไฮโดรไลซ์ของเอนไซม์ในกระบวนการเปลี่ยนถ่ายสารชีวมวล โดยใช้กระบวนการอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวในการทดลอง ทำการปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบของสกรูอัดรีด มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของความเร็วของสกรูและอุณหภูมิอัดรีดในการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อน การวิเคราะห์ผลกระทบของความเร็วรอบของสกรูต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อนแสดงในรูปที่ 2.15



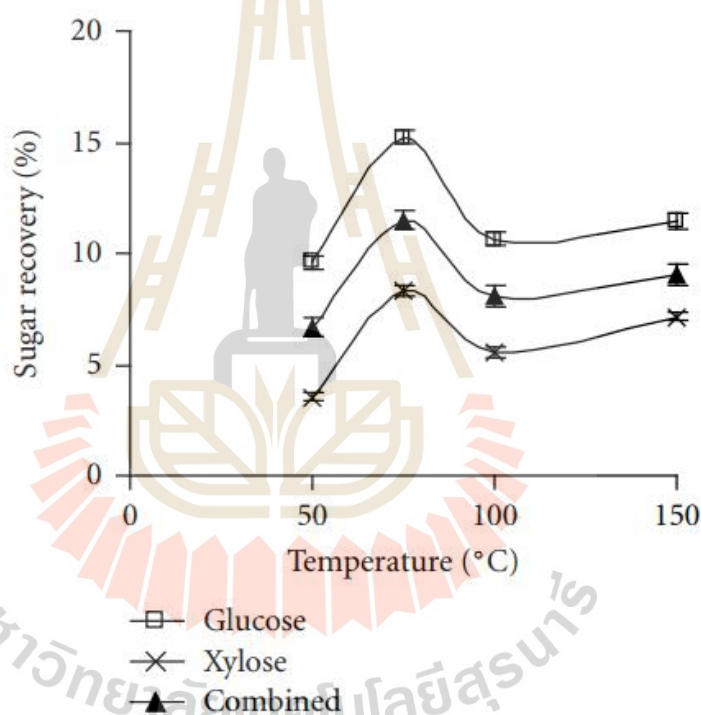
รูปที่ 2.15 ผลกระทบของความเร็วรอบของสกรูต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อน

(Chinnadurai et al., 2012)

ผลจากการอัดรีดที่ความเร็วรอบของสกรูตั้งแต่ 100 ถึง 150 รอบต่อนาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงของการคืนสภาพน้ำตาลไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อความเร็วรอบของสกรูเพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 200 รอบต่อนาที กลูโคสไซโลสและการคืนสภาพของน้ำตาลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 16-30, 6-23 และ 14-25%

ตามลำดับขึ้นอยู่กับการผสมผสานของเอนไซม์และอัตราส่วน ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอัตราเดือนมีความสำคัญมาก

นอกจากนี้ Chinnadurai K.; Kasiviswanathan M.; William R.G. (2012) ยังได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการอัดรีดต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อน โดยกำหนดค่าอุณหภูมิอัดรีดทดลองที่ 50°C ถึง 150°C โดยการวิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิอัดรีดต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อนแสดงในรูปที่ 2.16 พบว่าการคืนสภาพน้ำตาลเริ่มเพิ่มขึ้น 25% เมื่ออุณหภูมิอัดรีดเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 75°C นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิอัดรีดขึ้นเรื่อยๆทำให้ลดการคืนสภาพน้ำตาลลดลง



รูปที่ 2.16 ผลกระทบของอุณหภูมิอัดรีดต่อการคืนสภาพน้ำตาลของหญ้าฤดูร้อน

(Chinnadurai et al., 2012)

Chinnadurai K.; Kasiviswanathan M.; William R.G. (2012) ได้ทำการทดลองแบบดังกล่าวกับหญ้าทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Switchgrass, Big bluestem, and Prairie cord grass จากนั้นจึงทำการหา interaction effect ระหว่างความเร็วรอบของสกรูกับอุณหภูมิอัดรีดในการคืนสภาพน้ำตาล ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 Interaction effects (*P* value) ของความเร็วสกรูและอุณหภูมิอัดรีดต่อการคืนสภาพน้ำตาลจากชีวมวลต่าง ๆ (Chinnadurai et al., 2012)

Source	Switchgrass			Big bluestem			Prairie cord grass		
	Glucose	Xylose	Combined	Glucose	Xylose	Combined	Glucose	Xylose	Combined
1 Cellulase : 1 $\beta$ -glucosidase									
Temp	0.2115	0.4627	0.2793	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0011	0.0008	0.0040
Screw speed	0.1277	0.3122	0.1752	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.7399	0.5537	0.6705
Temp*screw speed	0.4888	0.4940	0.5078	<0.0001	0.0002	<0.0001	0.7055	0.2894	0.7271
1 Cellulase : 4 $\beta$ -glucosidase									
Temp	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0110	0.0468	0.0234	0.4655	0.5518	0.5633
Screw speed	<0.0001	0.0046	<0.0001	0.2526	0.3593	0.2526	0.9793	0.9417	0.9522
Temp*screw speed	0.0043	0.0102	0.0765	0.3452	0.5526	0.3654	0.5521	0.6598	0.6163
1 Multienzyme : 1 $\beta$ -glucosidase									
Temp	<0.0001	<0.0001	0.0011	0.6948	<0.0001	0.0137	0.0032	<0.0001	0.4914
Screw speed	0.0012	0.0008	0.0412	0.7554	0.0006	0.3020	0.0005	0.1499	<0.0001
Temp*screw speed	0.0002	0.0109	0.1987	0.7897	0.0322	0.7827	0.0017	0.4073	<0.0001

จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าอุณหภูมิอัดรีดและความเร็วของสกรูเป็นตัวแปรอิสระมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทั้ง 2 ตัวแปรนี้รวมกัน และน้ำตาลจาก Switchgrass ไม่ได้มี Interaction effects อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิอัดรีดและความเร็วของสกรูมี Interaction effects อย่างมีนัยสำคัญมากที่สุดคือ Big bluestem ใช้อัตราส่วน 1 cellulase ต่อ 1 beta-glucosidase ซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อ Glucose, Xylose และ Combined sugar recovery (การคืนสภาพน้ำตาล)

Chinnadurai K.; Kasiviswanathan M.; William R.G. (2012) ได้นำเสนอการวิเคราะห์การจับกลุ่มทางสถิติของ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ถึงตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.2 ผลของความเร็วสกรูและอุณหภูมิที่มีต่อการคืนสภาพน้ำตาลของ Switchgrass (Chinnadurai et al., 2012)

Screw speed, rpm	Temperature, °C															
	50				75				100				150			
	1 cellulase : 1 $\beta$ -glucosidase				1 cellulase : 4 $\beta$ -glucosidase				1 multienzyme : 1 $\beta$ -glucosidase							
Glucose																
100	25.1 <sup>a</sup>	21.7 <sup>a</sup>	18.6 <sup>a</sup>	21.9 <sup>a</sup>	30.6 <sup>cd</sup>	31.4 <sup>c</sup>	22.8 <sup>h</sup>	27.7 <sup>f</sup>	7.6 <sup>e</sup>	12.5 <sup>bc</sup>	11.0 <sup>cd</sup>	11.2 <sup>cd</sup>				
150	23.7 <sup>u</sup>	29.7 <sup>u</sup>	18.5 <sup>u</sup>	19.6 <sup>u</sup>	24.8 <sup>g</sup>	33.2 <sup>b</sup>	21.9 <sup>h</sup>	26.5 <sup>f</sup>	11.3 <sup>cd</sup>	13.3 <sup>b</sup>	10.5 <sup>d</sup>	11.7 <sup>b-d</sup>				
200	NA	27.3 <sup>a</sup>	25.1 <sup>a</sup>	28.8 <sup>a</sup>	NA	38.7 <sup>a</sup>	27.3 <sup>f</sup>	29.2 <sup>de</sup>	NA	19.7 <sup>a</sup>	10.4 <sup>d</sup>	11.4 <sup>cd</sup>				
Xylose																
100	19.3 <sup>a</sup>	20.3 <sup>a</sup>	15.9 <sup>a</sup>	21.0 <sup>a</sup>	16.7 <sup>bc</sup>	19.9 <sup>a</sup>	13.3 <sup>d</sup>	17.2 <sup>bc</sup>	2.5 <sup>d</sup>	8.2 <sup>a</sup>	4.2 <sup>c</sup>	6.9 <sup>b</sup>				
150	19.9 <sup>a</sup>	22.9 <sup>a</sup>	17.2 <sup>a</sup>	16.6 <sup>a</sup>	13.2 <sup>d</sup>	17.1 <sup>bc</sup>	13.8 <sup>d</sup>	16.3 <sup>c</sup>	4.5 <sup>c</sup>	8.4 <sup>a</sup>	5.0 <sup>c</sup>	6.5 <sup>b</sup>				
200	NA	20.9 <sup>a</sup>	22.1 <sup>a</sup>	24.0 <sup>a</sup>	NA	18.2 <sup>ab</sup>	17.2 <sup>bc</sup>	18.2 <sup>ab</sup>	NA	8.4	7.5 <sup>ab</sup>	8.1 <sup>a</sup>				
Combined																
100	20.4 <sup>a</sup>	19.0 <sup>a</sup>	15.7 <sup>a</sup>	19.4 <sup>a</sup>	23.2 <sup>bc</sup>	24.7 <sup>b</sup>	17.4 <sup>e</sup>	21.7 <sup>cd</sup>	5.3 <sup>d</sup>	10.2 <sup>bc</sup>	7.7 <sup>c</sup>	8.9 <sup>bc</sup>				
150	19.9 <sup>a</sup>	24.2 <sup>a</sup>	16.1 <sup>u</sup>	16.5 <sup>a</sup>	18.9 <sup>e</sup>	24.9 <sup>b</sup>	17.9 <sup>e</sup>	20.7 <sup>d</sup>	8.0 <sup>bc</sup>	10.4 <sup>b</sup>	7.8 <sup>c</sup>	8.9 <sup>bc</sup>				
200	NA	22.1 <sup>a</sup>	21.5 <sup>u</sup>	24.1 <sup>a</sup>	NA	28.2 <sup>a</sup>	21.7 <sup>cd</sup>	22.7 <sup>c</sup>	NA	14.0 <sup>a</sup>	8.7 <sup>bc</sup>	9.3 <sup>bc</sup>				

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอัดรีดและความเร็วรอบของสกรูมี interaction effects ต่อการคืนสภาพของน้ำตาล โดยทั่วไปอุณหภูมิอัดรีดที่ 75°C แสดงให้เห็นว่าการการคืนสภาพของน้ำตาลใน Switchgrass สูงขึ้น โดยยังไม่ได้คำนึงถึงความเร็วรอบของสกรู ปริมาณ Glucose, Xylose และ Combined sugar recovery รวมอยู่ที่ 38.7, 18.2 และ 28.2% ที่ความเร็วรอบสกรู 200 รอบต่อนาที ตามลำดับ เมื่อใช้ 1 cellulase ต่อ 4 beta-glucosidase

ตารางที่ 2.3 ผลกระทบของความเร็วนสกรูและอุณหภูมิที่มีต่อการคืนสภาพน้ำตาลของ Big bluestem (Chinnadurai et al., 2012)

Screw speed, rpm	Temperature, °C								
	100			150			200		
	1 cellulase : 1 β-glucosidase			1 cellulase : 4 β-glucosidase			1 multienzyme : 1 β-glucosidase		
Glucose									
100	17.8 <sup>a</sup>	33.0 <sup>c</sup>	46.9 <sup>d</sup>	31.2 <sup>c</sup>	43.3 <sup>a-c</sup>	53.3 <sup>ab</sup>	17.5 <sup>a</sup>	17.4 <sup>a</sup>	18.2 <sup>a</sup>
150	25.7 <sup>d</sup>	34.6 <sup>c</sup>	42.6 <sup>b</sup>	41.7 <sup>a-c</sup>	45.3 <sup>a-c</sup>	47.2 <sup>b-c</sup>	17.6 <sup>a</sup>	17.7 <sup>a</sup>	17.3 <sup>a</sup>
200	33.9 <sup>c</sup>	43.2 <sup>b</sup>	48.2 <sup>a</sup>	37.1 <sup>bc</sup>	57.5 <sup>a</sup>	54.3 <sup>ab</sup>	17.1 <sup>a</sup>	18.6 <sup>a</sup>	18.5 <sup>a</sup>
Xylose									
100	9.6 <sup>e</sup>	10.7 <sup>e</sup>	32.0 <sup>b</sup>	46.7 <sup>b</sup>	56.2 <sup>ab</sup>	60.9 <sup>ab</sup>	3.8 <sup>e</sup>	4.0 <sup>e</sup>	22.2 <sup>b</sup>
150	10.3 <sup>e</sup>	18.0 <sup>d</sup>	32.2 <sup>b</sup>	55.2 <sup>ab</sup>	57.8 <sup>ab</sup>	57.5 <sup>ab</sup>	5.4 <sup>de</sup>	8.9 <sup>d</sup>	19.4 <sup>bc</sup>
200	16.8 <sup>d</sup>	28.1 <sup>c</sup>	37.1 <sup>a</sup>	50.9 <sup>ab</sup>	66.2 <sup>a</sup>	63.3 <sup>a</sup>	6.8 <sup>de</sup>	16.3 <sup>c</sup>	26.8 <sup>a</sup>
Combined sugar									
100	15.0 <sup>f</sup>	25.6 <sup>c</sup>	40.8 <sup>d</sup>	33.1 <sup>c</sup>	44.6 <sup>a-c</sup>	51.4 <sup>ab</sup>	13.3 <sup>b</sup>	13.2 <sup>b</sup>	18.9 <sup>e</sup>
150	20.4 <sup>d</sup>	13.8 <sup>e</sup>	37.8 <sup>b</sup>	43.4 <sup>a-c</sup>	45.7 <sup>a-c</sup>	46.5 <sup>b-c</sup>	13.6 <sup>b</sup>	14.7 <sup>ab</sup>	17.5 <sup>e</sup>
200	27.8 <sup>c</sup>	36.9 <sup>b</sup>	42.9 <sup>a</sup>	38.7 <sup>c</sup>	57.6 <sup>a</sup>	53.2 <sup>ab</sup>	13.9 <sup>b</sup>	17.5 <sup>a</sup>	20.1 <sup>e</sup>

จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่าถ้าอุณหภูมิอัดรีดและความเร็วรอบของสกรูสูงขึ้นทำให้ปริมาณ Glucose, Xylose และ Combined sugar recovery ใน Big bluestem สูงขึ้นตามไปด้วย โดยมีปริมาณการเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ Glucose (57.5%), Xylose (66.2%) และ Combined sugar recovery (57.5%) โดยกำหนดตัวแปรที่อุณหภูมิอัดรีดที่ 150 °C และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เมื่อใช้อัตราส่วน 1 cellulase ต่อ 4 beta-glucosidase

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของความเร็วสกรูและอุณหภูมิที่มีต่อการคืนสภาพน้ำตาลของ Prairie cord grass (Chinnadurai et al., 2012)

Screw speed, rpm	Temperature, °C								
	1 cellulase : 1 $\beta$ -glucosidase			1 cellulase : 4 $\beta$ -glucosidase			1 multienzyme : 1 $\beta$ -glucosidase		
	Glucose								
100	31.7 <sup>ab</sup>	22.2 <sup>cd</sup>	24.4 <sup>bc-d</sup>	32.4 <sup>a</sup>	32.2 <sup>a</sup>	36.7 <sup>a</sup>	16.3 <sup>f</sup>	20.2 <sup>cd</sup>	17.5 <sup>c-e</sup>
150	34.5 <sup>a</sup>	20.9 <sup>d</sup>	25.9 <sup>b-d</sup>	41.1 <sup>a</sup>	39.2 <sup>a</sup>	21.3 <sup>a</sup>	22.8 <sup>ab</sup>	19.5 <sup>c-e</sup>	19.1 <sup>c-e</sup>
200	29.6 <sup>a-c</sup>	22.2 <sup>cd</sup>	25.3 <sup>b-d</sup>	37.3 <sup>a</sup>	31.7 <sup>a</sup>	29.1 <sup>a</sup>	23.9 <sup>a</sup>	21.1 <sup>bc</sup>	18.8 <sup>de</sup>
	Xylose								
100	12.1 <sup>ab</sup>	7.9 <sup>b</sup>	12.1 <sup>ab</sup>	43.5 <sup>a</sup>	43.9 <sup>a</sup>	46.4 <sup>a</sup>	2.2 <sup>c</sup>	3.0 <sup>bc</sup>	7.4 <sup>a</sup>
150	11.9 <sup>ab</sup>	7.8 <sup>b</sup>	15.6 <sup>a</sup>	49.2 <sup>a</sup>	50.0 <sup>a</sup>	33.6 <sup>a</sup>	2.7 <sup>bc</sup>	2.7 <sup>bc</sup>	6.6 <sup>a</sup>
200	9.3 <sup>b</sup>	8.3 <sup>b</sup>	14.9 <sup>a</sup>	44.8 <sup>a</sup>	43.1 <sup>a</sup>	40.3 <sup>a</sup>	2.5 <sup>bc</sup>	3.8 <sup>b</sup>	7.7 <sup>a</sup>
	Combined sugar								
100	25.6 <sup>ab</sup>	18.8 <sup>bc</sup>	21.0 <sup>a-c</sup>	34.7 <sup>a</sup>	37.8 <sup>a</sup>	41.2 <sup>a</sup>	12.3 <sup>c</sup>	15.3 <sup>cd</sup>	14.8 <sup>d</sup>
150	28.0 <sup>a</sup>	17.3 <sup>c</sup>	23.1 <sup>a-c</sup>	44.6 <sup>a</sup>	44.5 <sup>a</sup>	24.0 <sup>a</sup>	17.0 <sup>a</sup>	14.7 <sup>d</sup>	15.7 <sup>bc</sup>
200	23.9 <sup>a-c</sup>	18.3 <sup>c</sup>	21.8 <sup>a-c</sup>	39.9 <sup>a</sup>	35.7 <sup>a</sup>	31.8 <sup>a</sup>	17.67 <sup>a</sup>	16.2 <sup>b</sup>	15.8 <sup>bc</sup>

จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่าปริมาณการเพิ่มขึ้นสูงสุดอยู่ที่ Glucose (41.1%), Xylose (49.2%) และ Combined sugar recovery (44.56%) เมื่อทำการกำหนดตัวแปรที่อุณหภูมิอัตราที่ 100 °C และความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามลำดับ และใช้อัตราส่วน 1 cellulase ต่อ 4 beta-glucosidase

โดย Chinnadurai K.; Kasiviswanathan M.; William R.G. (2012) สามารถสรุปการทดลองได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรูจะส่งผลทำให้ปริมาณ Glucose, Xylose และ Combined sugar recovery สูงขึ้นในกรณีของ Switchgrass และ Big bluestem ซึ่งแตกต่างจากในกรณีของ Prairie cord grass

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้นำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วย (1) การศึกษาพฤติกรรมการไหล คุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุมและออกแบบสกรูสำหรับอัดรีด (2) การศึกษาค่าตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการอัดรีด ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด (Extrusion temperature) ความเร็วรอบสกรู (Screw speed) และใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ (Die Cutting Blade) ซึ่งการศึกษาใน (1) จะนำไปสู่การออกแบบสกรูอัดรีด และ การศึกษาใน (2) เพื่อควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่จะถูกอัดรีดออกมาจากแม่พิมพ์

#### 3.1 กรอบการวิจัย

กรอบการศึกษาวิจัยในงานนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

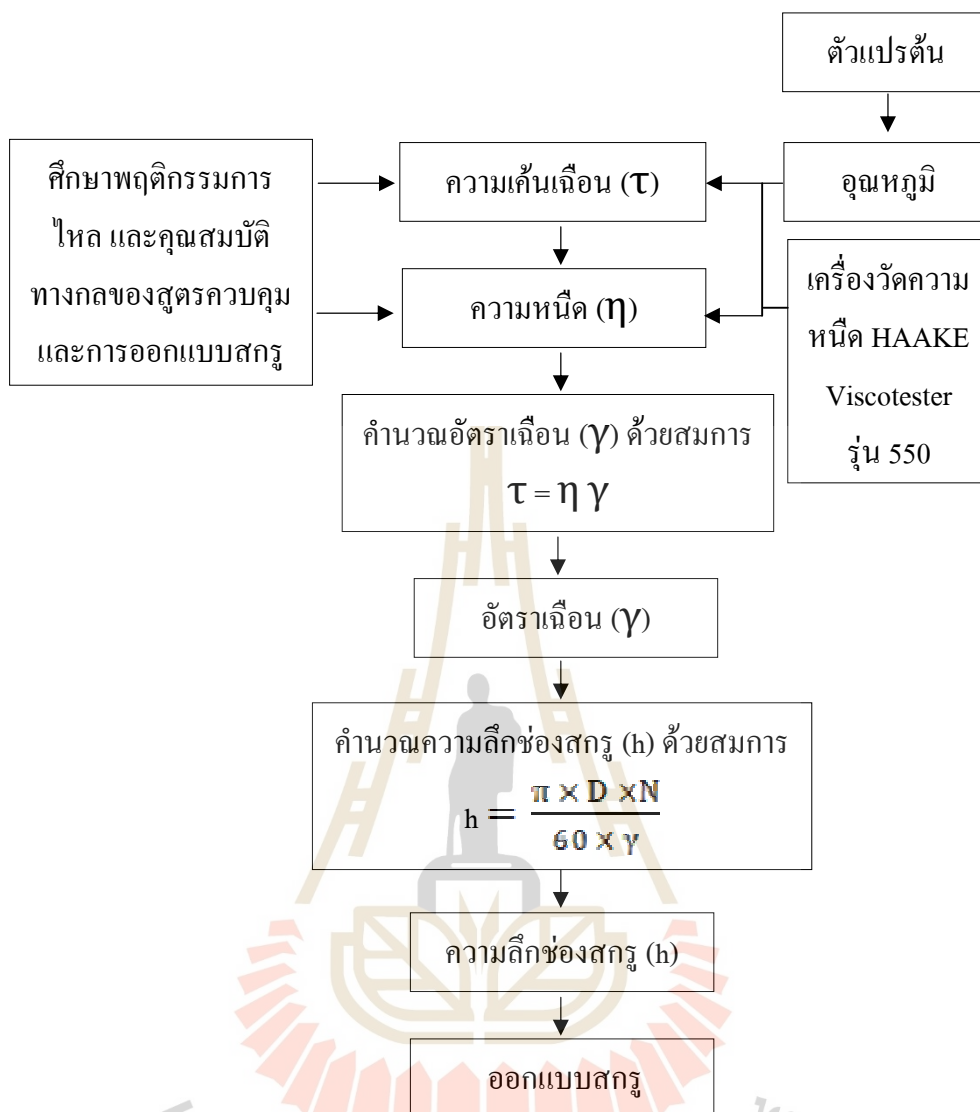
1) ศึกษาพฤติกรรมการไหล คุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม และการออกแบบสกรูสำหรับอัดรีดคือ ขั้นตอนการทดสอบหาค่าความเค้นเฉือน ความหนืด และอัตราเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ซึ่งค่าตัวแปรดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณและออกแบบสกรู

2) ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมคือ ขั้นตอนการทดลองอัดรีดเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยใช้รูแม่พิมพ์ขนาด 2 มิลลิเมตร โดยตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ ตัวแปรตามคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

3) การวิเคราะห์และสรุปผลคือขั้นตอนการนำผลการทดลองมาทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยใช้โปรแกรม Minitab

### 3.2 ศึกษาพฤติกรรมการไหล และคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม และการออกแบบสกรู

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหล และคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้ทำการกำหนดตัวแปรต้นคือ อุณหภูมิทดสอบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) มีตัวแปรตามคือค่าความเค้นเฉือน และความหนืดมีหน่วยเป็น พาสคาล (Pa) และ พาสคาลวินาที (Pa·s) ตามลำดับ โดยขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมการไหล คุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม และการออกแบบสกรู ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม และการออกแบบสกรู

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างช็อกโกแลตสูตรควบคุม

การเตรียมตัวอย่างช็อกโกแลตสูตรควบคุมต้องทำการเตรียมที่อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 28 องศาเซลเซียส โดยรายละเอียดของเครื่องมือ ดังแสดงในตารางที่ 3.1



ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

เครื่องมือ	รูปเครื่องมือ
1. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Hot plate)	
2. เครื่องชั่ง	
3. บีกเกอร์ (Beaker)	
4. เทอร์โมมิเตอร์	

ในการเตรียมตัวอย่างซ็อกโกแลตสูตรควบคุมต้องมีการเตรียมส่วนผสมก่อนทำการผสม ได้แก่ ผงโกโก้, น้ำตาลไอซิ่ง, ไขมันแข็ง และเลซิทิน และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชี็อกโกแลตสูตรควบคุม

ส่วนผสม	การต้มไขมัน	การผสม
<p>1. ผงโกโก้</p> 		
<p>2. น้ำตาลไอซิ่ง</p> 		
<p>3. ไขมันแข็ง</p> 		
<p>4. เลซิติน</p> 		

1) การต้มไขมัน: ให้ความร้อนกับไขมันแข็งที่ 100-120 องศาเซลเซียส จากนั้นไขมันแข็งจะเกิดการหลอมเหลว

2) การผสม: เมื่อไขมันแข็งหลอมเหลวแล้ว ทำการผสมส่วนผสมอื่น ๆ ลงไปในไขมันเหลว ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

- ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- 1) ตวงส่วนผสมผงโกโก้, น้ำตาลไอซิ่ง, ไขมันก้อน และเลซิติน
- 2) ต้มไขมันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
- 3) ลดอุณหภูมิลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส
- 4) ใส่ผงโกโก้, น้ำตาลไอซิ่ง และเลซิติน ลงในบีกเกอร์ไขมัน ทำการผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน

### 3.2.2 การทดสอบหาค่าความเค้นเฉือนและความหนืดปรากฏ

ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและทดสอบคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุมทำการกำหนดตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การกำหนดตัวแปรในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและทดสอบคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

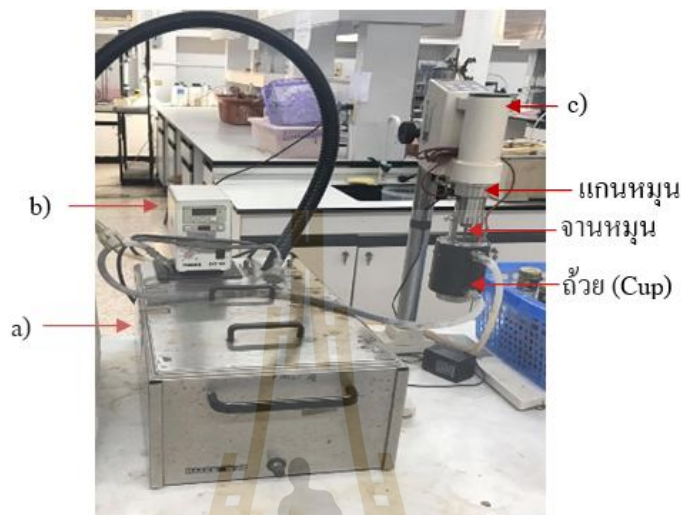
ตัวแปร	รายการ	หน่วย
ตัวแปรต้น	1. อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส (°C)
ตัวแปรตาม	1. ความเค้นเฉือน	ปาสคาล (Pa)
	2. ความหนืด	ปาสคาล วินาที (Pa·s)
ตัวแปรควบคุม	1. สูตรช็อกโกแลต	-
	2. ความเร็วแกนหมุน	4 รอบต่อนาที (rpm)

โดยรายละเอียดของเครื่องมือและขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

- เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1) เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุนแบบวัดในกระบอก (Concentric Cylinder viscometer) ยี่ห้อ HAAKE Viscotester รุ่น 550 ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle) ได้ โดยส่วนประกอบของเครื่อง ประกอบด้วย a) อ่างน้ำ (Water bath) ใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนที่น้ำในอ่าง b) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Heater) ใช้สำหรับกำหนดอุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำ และ c) เครื่องมือวัดความหนืดแบบแกนหมุนที่มี

จอแสดงผลและปุ่มปรับค่าความเร็วแกนหมุนดังแสดงในรูปที่ 3.3 พร้อมถ้วย (Cup) และจานหมุน (Bob) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 เครื่อง HAAKE Viscometer รุ่น 550



ก) ภาพร่างของถ้วย (Cup) และจานหมุน (Bob)

ข) ถ้วย (Cup) และจานหมุน (Bob)

รูปที่ 3.4 ถ้วย (Cup) และจานหมุน (Bob)

- 2) ส่วนผสมของซีก โกลด์สูตรควบคุมที่ผสมแล้ว
- 3) เครื่องชั่ง
- 4) ปีกเกอร์ (Beaker)

## 5) ถูมือกันความร้อน

## ● ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ชั่งช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ผสมแล้วด้วยเครื่องชั่งใส่ในบีกเกอร์
- 2) ตั้งอุณหภูมิตัวควบคุมอุณหภูมิ (Heater) ของอ่างน้ำไปที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษาที่ละอุณหภูมิ ได้แก่ 50, 55, 60, 65, 70, 75, 85, 90, 95 และ 97 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- 3) ใส่ช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ผสมแล้วลงในถ้วย (Cup) 6 g
- 4) เปิดเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุนแบบวัดในกระบอก แล้วติดตั้งถ้วย (Cup) และจานหมุน (Bob) และปรับอุณหภูมิให้ได้ตามอุณหภูมิตดสอบ (ตัวแปรต้น)
- 5) กดปุ่มเริ่มการหมุนแกนหมุน (Spindle) ที่ความเร็ว 4 รอบต่อนาที ตลอดการทดสอบ
- 6) ทำการบันทึกค่าความเค้นและความหนืดจากจอแสดงผลลงในตารางที่ 3.4 ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2) – 6) จนครบทุกอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (ตามตัวแปรต้น)

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	
อุณหภูมิตดสอบ (°C)	ความหนืด (Pa·s)	ความเค้นเฉือน (Pa)
97		
95		
90		
85		
80		
75		
70		
65		
60		
55		
50		

### 3.2.3 คำนวณค่าอัตราเฉือน

การศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของวัสดุกึ่งแข็งกึ่งเหนียวนั้นมักถูกวัดปริมาณโดยใช้ตัวแปรสองตัวคือ ความเค้นเฉือน (Shear stress) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมระหว่างของแข็งและของเหลวโดยมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการเฉือน (Shear rate) (Servais C.; Ranc, H., 2003) เมื่อได้ค่าความเค้นเฉือนและความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมจากการทดสอบในหัวข้อที่ 3.2.2 แล้ว นำการค่าความเค้นเฉือนและความหนืดมาทำการคำนวณหาอัตราเฉือนของแต่ละอุณหภูมิทดสอบจากสมการหาอัตราเฉือนตามสมการที่ 3.1 (ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์, 2015) โดยอัตราเฉือนมีหน่วยเป็น 1/s จากนั้นจึงบันทึกผลการคำนวณอัตราเฉือนลงในตารางที่ 3.5

$$\tau = \eta \gamma \quad (3.1)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ อัตราเฉือน (Shear rate, 1/s)  
 $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress, Pa.)  
 $\eta$  คือ ความหนืด (Viscosity, Pa•s )

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณค่าอัตราเฉือนแต่ละอุณหภูมิทดสอบของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม		ผลการคำนวณ
	Viscosity ( $\eta$ ) (Pa•s)	Shear stress ( $\tau$ ) (Pa)	
97			
95			
90			
85			
80			
75			
70			
65			
60			
55			
50			

เมื่อได้ค่าคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ได้แก่ ค่าความเค้นเฉือน, ความหนืด และ อัตราเฉือนแล้ว ทำการวาดกราฟความหนืด และ อัตราเฉือน ตามวิธีการของ ยูพาพร รักสกุลพิวัฒน์ (2015) เพื่อดูแนวโน้มของพฤติกรรมการไหลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมชนิดนี้ว่ามีพฤติกรรมใกล้เคียงของไหลประเภทใด ซึ่งจากผลการวาดกราฟแล้วทำให้ทราบแนวโน้มและพฤติกรรมการไหลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมชนิดนี้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการทดลองและอุปกรณ์การทดลองในขั้นตอนต่อไป

### 3.2.4 การออกแบบสกรูอัดรีด

ลักษณะสกรูมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการอัดรีดและการออกแบบสกรูอัดรีดก็มีความสำคัญเพราะตัวสกรูนี้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการและเป็นตัวกำหนดประเภทของวัสดุที่ใช้และปริมาณการผลิตโดยรวม (Harold FG.; John RW.; Eldridge M., 2004) ดังนั้นในการออกแบบสกรูจึงต้องทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่จะนำมาใช้ทดลอง เพราะจะเป็นตัวกำหนดลักษณะและขนาดของสกรูรวมไปถึงความเร็วรอบสกรูที่ใช้ทดลอง เนื่องจากความเร็วรอบสกรูมีผลต่ออัตราการป้อน เพราะปัจจัยทั้งสองนี้จะกำหนดปริมาณการเติมวัสดุเข้าสู่เครื่องอัดรีดและกำลังการผลิต (Martin C., 2001)

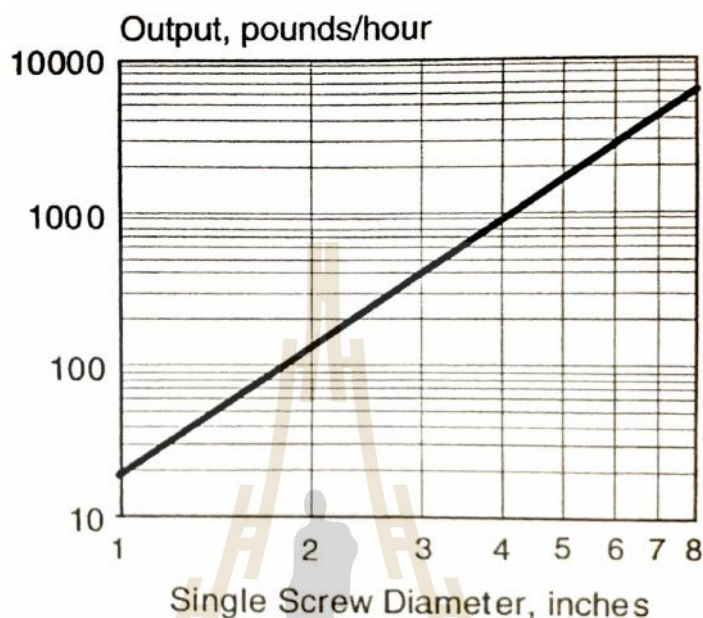
จากการคำนวณค่าอัตราเฉือนในหัวข้อที่ 3.2.3 เพื่อหาขนาดของช่องสกรู (Channel depths) จากสมการออกแบบสกรูของ Giles H.F.; Wagner J.R.; Mount E.M. (2005) ตามสมการที่ 3.2

$$h = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times \gamma} \quad (\text{mm.}) \quad (3.2)$$

โดยที่ $\gamma$	คือ	อัตราเฉือน (Shear rate, 1/s)
D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diameter of Screw, mm.)
N	คือ	ความเร็วรอบ (Screw speed, rpm)
h	คือ	ความลึกของช่องสกรู (Channel depth, mm.)

นอกจากนี้ Harold FG.; John RW.; Eldridge M. (2004) ยังได้กล่าวว่าเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (Diameter of Screw) ส่งผลโดยตรงกับกำลังอัดและกำลังการผลิต ยิ่งมีค่ามากจะทำให้สกรูมีขนาดใหญ่และรองรับวัสดุได้มากกว่ารวมไปถึงการอัดรีดวัสดุที่มีอัตราเฉือนมาก ๆ ได้อีกด้วย ดังนั้น ในการออกแบบสกรูในครั้งนี้ จึงกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูเท่ากับ 100 mm. หรือ 3.937 in.

โดยประมาณ เพื่อให้ได้กำลังการผลิตขั้นต่ำ 700 lb หรือ 350 kg ต่อชั่วโมงโดยประมาณอ้างอิงจากกราฟของ Harold FG.; John RW.; Eldridge M. (2004) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อัตราการอัดรีดวัสดุ โดยขึ้นกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู  
(Harold FG.; John RW.; Eldridge M., 2004)

หลังจากทำการกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูแล้ว ทำการกำหนดความเร็วรอบสกรู (N) ไปที่ 50 รอบต่อนาที จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าความลึกของช่องสกรู (h) ต่อไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนี้เพื่อให้ได้ขนาดสกรูที่สามารถใช้ทำการทดลองอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้อย่างไม่มีอุปสรรค

### 3.3 ศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาหาค่าตัวแปรอัดรีด ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และไบมอดกวาดหน้าแม่พิมพ์ ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูแม่พิมพ์ขนาด 2 มิลลิเมตรมากที่สุด



ในการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม ทำการกำหนดตัวแปรดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การกำหนดตัวแปรในการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตัวแปร	รายการ	หน่วย
ตัวแปรต้น	1. อุณหภูมิ - 50, 55 และ 60	องศาเซลเซียส (°C)
	2. ความเร็วรอบสกรู - 40, 50 และ 60	รอบต่อนาที (rpm)
	3. ลักษณะใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ - มีป่าและไม่มีป่า	-
ตัวแปรตาม	1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม	มิลลิเมตร (mm.)
ตัวแปรควบคุม	1. สูตรช็อกโกแลต	-
	2. อุณหภูมิห้องทดลอง (28°C)	องศาเซลเซียส (°C)
	3. รูแม่พิมพ์ (2 mm.)	มิลลิเมตร (mm.)

โดยเงื่อนไขการทดลองทั้งหมดมี 18 เงื่อนไข รายละเอียดการกำหนดตัวแปรและการเก็บข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตารางที่ 3.7 การบันทึกผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม



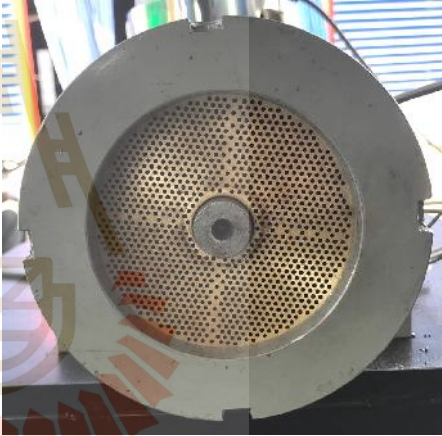
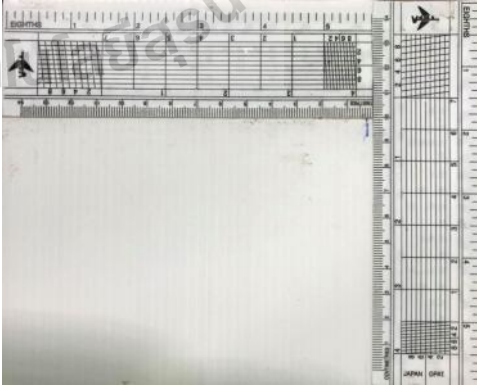
Temperature (C°)	Screw Speed (rpm)	ลักษณะใบมีด	ครั้งที่										เฉลี่ย	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
50	40	มีใบ												(mm) ระบุทศ
		ไม่มีใบ												
	50	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
	60	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
55	40	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
	50	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
	60	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
60	40	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
	50	มีใบ												
		ไม่มีใบ												
	60	มีใบ												
		ไม่มีใบ												

โดยรายละเอียดของเครื่องมือและวัสดุทดลองมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

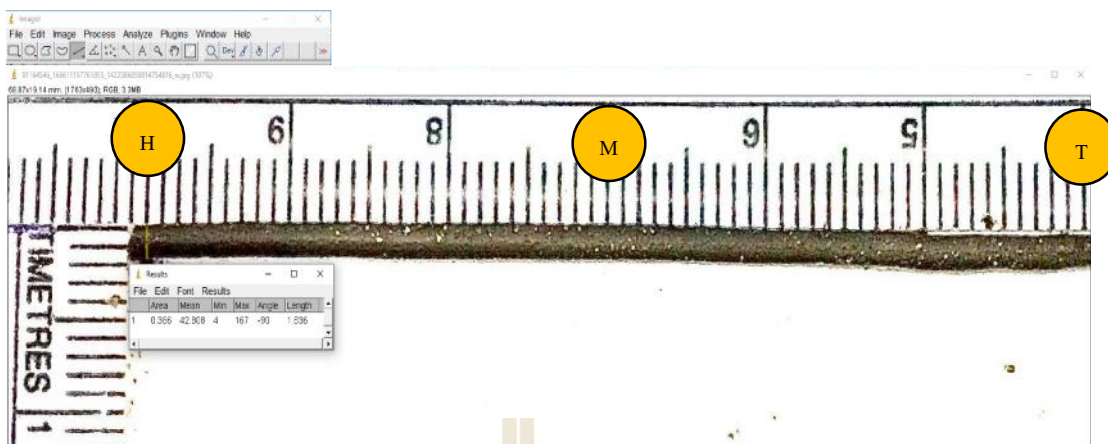
เครื่องมือ	รูปเครื่องมือ
1. เครื่องอัดรีดแบบใช้สกรูเดี่ยว 1.1 ตัวปรับค่าอุณหภูมิ (Heater) 1.2 มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า 1.3 กรวยรับวัตถุดิบ (Hopper) 1.4 แม่พิมพ์ทองเหลือง (Die) 1.5 ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์และอุณหภูมิ	

ตารางที่ 3.8 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

<p>2. ไบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <span>มีป่า</span> <span>ไม่มีป่า</span> </div>
<p>3. แม่พิมพ์ทองเหลือง (Die)</p>	
<p>4. กระดาษสเกล ไม้บรรทัด</p>	

- ขั้นตอนการทดลอง

- 1) ทำการติดตั้งแม่พิมพ์ทองเหลืองและใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์แบบมีบ่าที่เครื่องอัดรีดสกรูเดี่ยว ทำการล็อกแม่พิมพ์ทองเหลืองให้แน่น
- 2) ตั้งอุณหภูมิไปที่ตัวปรับค่าอุณหภูมิปลายกระบอกรีดไปที่ 50 องศาเซลเซียส ทำการสังเกตค่าอุณหภูมิที่จอแสดงผลว่าค่าอุณหภูมิกำลังขึ้นหรือไม่ ถ้ายังไม่คงที่ควรรอนจนกว่าค่าอุณหภูมิจะนิ่งเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลารอ 20 – 30 นาทีโดยประมาณ
- 3) เปิดมอเตอร์ตั้งค่าความเร็วรอบสกรูไปที่ 40 รอบต่อนาที สังเกตว่าสกรูหมุนหรือไม่
- 4) นำช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ผสมแล้วใส่กรวยเติมวัตถุดิบ สังเกตว่าช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีการไหลออกจากแม่พิมพ์ทองเหลืองหรือไม่
- 5) นำกระดาษสเกลไม้บรรทัดรองที่ปลายเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ไหลออกมาจากแม่พิมพ์ทองเหลือง จากนั้นปล่อยให้เส้นไหลพาดไปตามกระดาษสเกลไม้บรรทัด กำหนดระยะความยาวเส้นที่ 6 cm.
- 6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4) – 5) จำนวน 10 ซ้ำ
- 7) เมื่อทำเงื่อนไขแรกครบแล้ว ทำการทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) – 6) แต่ปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรจนกว่าจะครบตามตารางบันทึกผล
- 8) ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยโปรแกรม ImageJ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับการวัดโดยเฉพาะ โดยทำการวัดค่า 3 ส่วน คือ ส่วนหัว, กลาง และท้าย ใช้สัญลักษณ์ H, M และ T ตามลำดับ โดยส่วนหัวเริ่มทำการวัดที่ตำแหน่ง 1 mm. ส่วนกลางเริ่มทำการวัดที่ตำแหน่ง 30 mm. และส่วนท้ายเริ่มทำการวัดที่ตำแหน่ง 60 mm. ดังแสดงในรูปที่ 3.6
- 9) บันทึกผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

- ขั้นตอนการวัด
  - 1) นำรูปเข้าสู่ตัวโปรแกรม ImageJ
  - 2) ทำการคาลิเบรทสเกลในการวัด โดยการลากจุด 2 จุด เป็นระยะอ้างอิง ในที่นี้ทำการลากระยะอ้างอิงในรูปตามสเกลไม้บรรทัดเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร
  - 3) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้ง 3 ตำแหน่ง
  - 4) บันทึกค่าที่วัดได้
  - 5) ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1) – 4) ทุกเส้นที่ทำการทดลอง

### 3.4 การวิเคราะห์และสรุปผล

เมื่อได้ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการนำข้อมูลมาใส่ในตารางที่ 3.3 จากนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมในแต่ละตำแหน่ง รวมถึงไปการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมแต่ละตำแหน่ง เพื่อให้ทราบว่าที่ตำแหน่งใดมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด เพื่อที่จะทำการศึกษาที่ตำแหน่งนั้นต่อไป โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

- ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง
  - 1) นำผลที่ได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมาใส่ในตารางที่ 3.3 แล้วหาค่าเฉลี่ยรวมถึงไปการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น

- ช็อกโกแลตสุตรควบคุมในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุมที่มีขนาดใกล้เคียง 2 มิลลิเมตรจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี
- 2) เลือกตำแหน่งของเส้นที่มีค่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุมมาทำการศึกษาต่อไป
  - 3) นำข้อมูลมาวาดกราฟ ในกราฟแต่ละเส้นจะมีข้อมูล 10 ค่า แทนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุมแต่ละเส้น เพื่อหาสมการเส้นตรงเพื่อดูค่าความชันในแต่ละเส้น ถ้าค่าความชันของเส้นใดเส้นหนึ่งมีค่าน้อยที่สุด แสดงว่าเงื่อนไขที่ใช้อัดรีดของเส้นดังกล่าวเป็นเงื่อนไขที่ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นมีค่าความแปรปรวนน้อยที่สุด
  - 4) นำข้อมูลจากตารางที่ 3.7 เข้ามาสู่โปรแกรม Minitab เพื่อใช้หลักการทางสถิติทำการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุม รวมไปถึงหาผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุม
  - 5) นำข้อมูลจากตารางที่ 3.7 ทำการตรวจสอบข้อมูลในโปรแกรม Minitab ว่ามีการกระจายตัวแบบ Normal distribution หรือไม่
  - 6) ถ้าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบ Normal distribution จึงทำการทำ ANOVA โดยใช้คำสั่ง General Linear Model ในโปรแกรม Minitab เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลและระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุม รวมไปถึงหาผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุม
  - 7) ทำ Main Effect Plot เพื่อดูว่าค่าตัวแปรใดมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุมมากที่สุด และแต่ละตัวแปรนั้นมีแนวโน้มเป็นอย่างไร
  - 8) บันทึกผลการวิเคราะห์และสรุปผล

### 3.5 สรุปขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการศึกษาสรุปได้เป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาพฤติกรรมการไหล และคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสุตรควบคุม และการออกแบบสกรู กับศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 3.9 และตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาพฤติกรรมการไหล และคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมและการออกแบบสกรู

การศึกษาพฤติกรรมการไหล และคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมและการออกแบบสกรู			
ขั้นตอนการทดลอง	1. การทดสอบความหนืดและความเค้นเฉือน	2. การคำนวณอัตราเฉือน	3. การคำนวณความลึกของช่องสกรู
ผลลัพธ์	ค่าความหนืดและความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม	ค่าอัตราเฉือนพฤติกรรมการไหลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม	ค่าความลึกของช่องสกรูและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูที่ใช้ในการอัดรีดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตารางที่ 3.10 ขั้นตอนศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม			
ขั้นตอนการทดลอง	1. การทดลองอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุมโดยกำหนดตัวแปรศึกษาได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด (50, 55, 60 องศาเซลเซียส) ความเร็วรอบสกรู (40, 50, 60 รอบต่อนาที) และลักษณะใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ (แบบมีบ่าและแบบไม่มีบ่า)	2. การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยโปรแกรม ImageJ	3. การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab

ตารางที่ 3.10 ขั้นตอนศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

ศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม	
ผลลัพธ์	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>เส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมทุกเงื่อนไขการทดลอง (180 เส้น)</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม</p> </div> </div>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เงื่อนไขการอัดรีดที่มีความแปรปรวนของข้อมูลน้อยที่สุด</li> <li>- ตัวแปรการอัดรีดที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมใกล้เคียงกับขนาดรูแม่พิมพ์ (2 มิลลิเมตร) มากที่สุด</li> <li>- ตัวแปรการอัดรีดที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมากที่สุด</li> </ul>



## บทที่ 4

### ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็น การนำเสนอผลการศึกษาในส่วนแรกคือ การศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ทั้งค่าความเค้นเฉือน (Shear stress), ความหนืด (Viscosity) และอัตราเฉือน (Shear rate) นำไปสู่การระบุพฤติกรรมการไหลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม รวมไปถึงการแสดงผลการออกแบบสกรูอัดรีด โดยแสดงค่าความลึกของช่องสกรู (Channel depths) เพื่อกำหนดลักษณะและขนาดของสกรูที่สามารถใช้ในการทดลองอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาในส่วนที่สอง คือการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีด ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับรูแม่พิมพ์มากที่สุด นอกจากนี้ได้แสดงผลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม มากที่สุด ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อสังเกตหรือปรับใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้

#### 4.2 คุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ทั้งค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) และความหนืด (Viscosity) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอุณหภูมิทดสอบ ความหนืดและอุณหภูมิทดสอบ และเค้นเฉือนกับความหนืดในดังแสดงรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

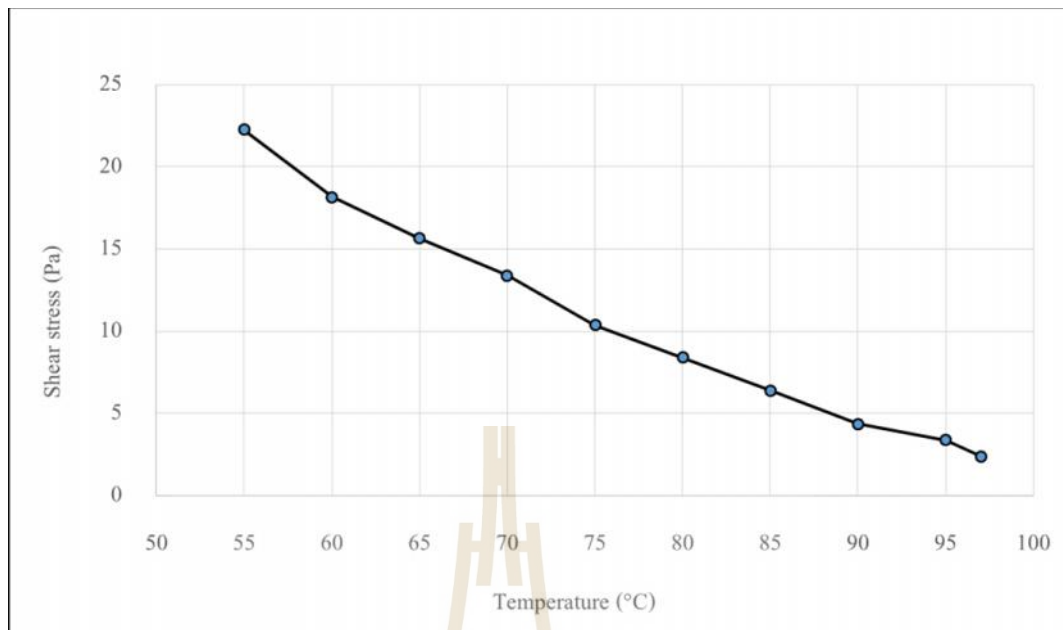
โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของค่าความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ รวมไปถึงค่าความหนืดที่เมื่ออุณหภูมิทดสอบเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของค่าความหนืดก็มีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน และเมื่อนำค่าคุณสมบัติทางกลทั้งสองมาทำการวาดเป็นกราฟความเค้นเฉือนและความหนืดพบว่า เมื่อความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมเพิ่มขึ้นค่าความเค้นเฉือนก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความเค้นเฉือน นอกจากนี้จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ยังแสดงให้เห็นว่าทั้งความหนืดและความเค้นเฉือนของ

ซ็อกโกแลตโรยสูตรควบคุมมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือยิ่งอุณหภูมิสูง ค่าความหนืดและความเค้นเฉือนจะมีค่าลดลง

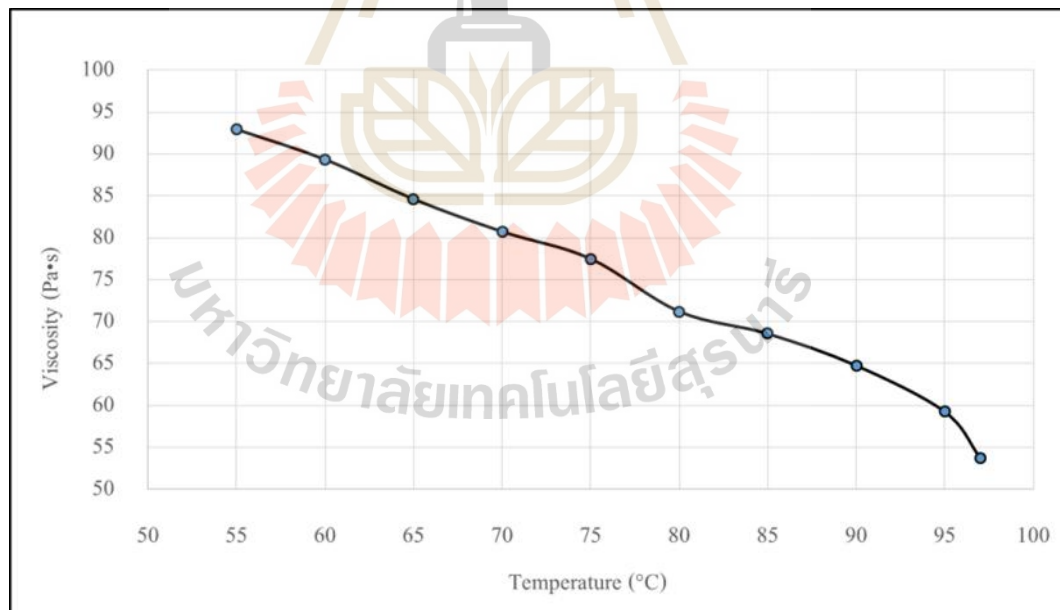
จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมชนิดนี้พบว่าค่าความเค้นเฉือนที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 93.7248 Pa ที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ที่ 867.5004 Pa นอกจากนี้จากผลการทดสอบพบว่าค่าความหนืดที่ต่ำที่สุดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอยู่ที่ 53.78 Pa·s ที่อุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนืดมีค่าอยู่ที่ 92.952 Pa·s ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่สูงที่สุดในการทดสอบ จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 จะพบว่าที่อุณหภูมิทดสอบ 50 องศาเซลเซียส ไม่สามารถวัดค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวซ็อกโกแลตสูตรควบคุมชนิดนี้เกิดการแข็งตัวจนทำให้จานหมุน (Bob) ไม่สามารถหมุนได้ ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมจึงไม่สามารถวัดค่าค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ได้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

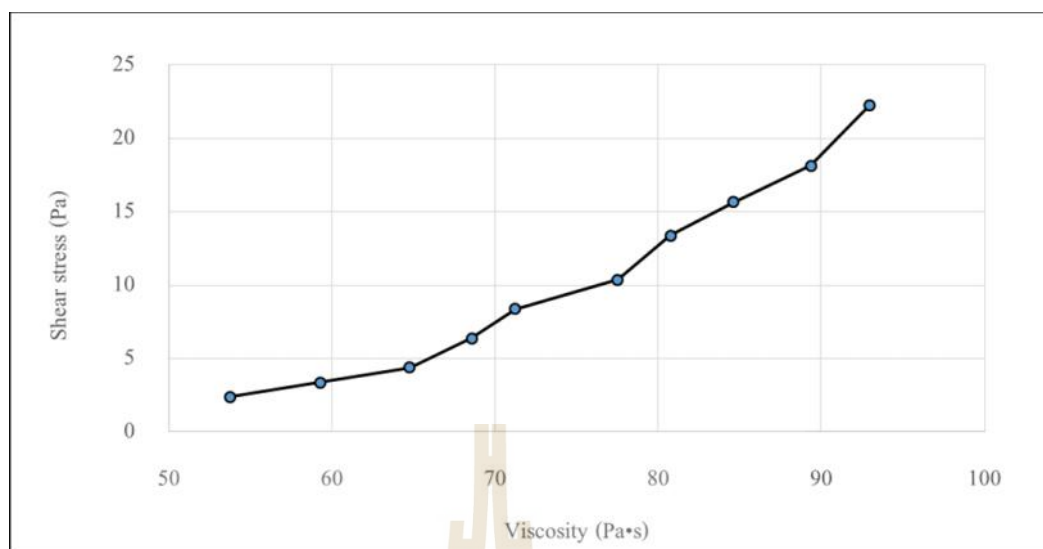
ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	
Temperature (°C)	Viscosity (Pa·s)	Shear stress (Pa)
97	53.78	93.7248
95	59.262	132.1242
90	64.776	170.5626
85	68.572	249.0228
80	71.222	327.1242
75	77.52	404.3442
70	80.762	522.1242
65	84.63	610.2642
60	89.364	707.7642
55	92.952	867.5004
50	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอุณหภูมิทดสอบ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิทดสอบ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิจากการทดลองมีความสำคัญในการระบุพฤติกรรมระหว่างซ็อกโกแลตสูตรควบคุมกับอุณหภูมิขณะอัดรีด โดยนำไปสู่การควบคุมอุณหภูมิอัดรีดให้เหมาะสมโดยควรอยู่ในช่วง 50 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ถูกอัดรีดออกมาด้วยจึงจะสามารถระบุอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้ ซึ่งการทดลองนี้ทำให้ทราบช่วงอุณหภูมิที่ควรใช้ในการอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

#### 4.3 อัตราเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

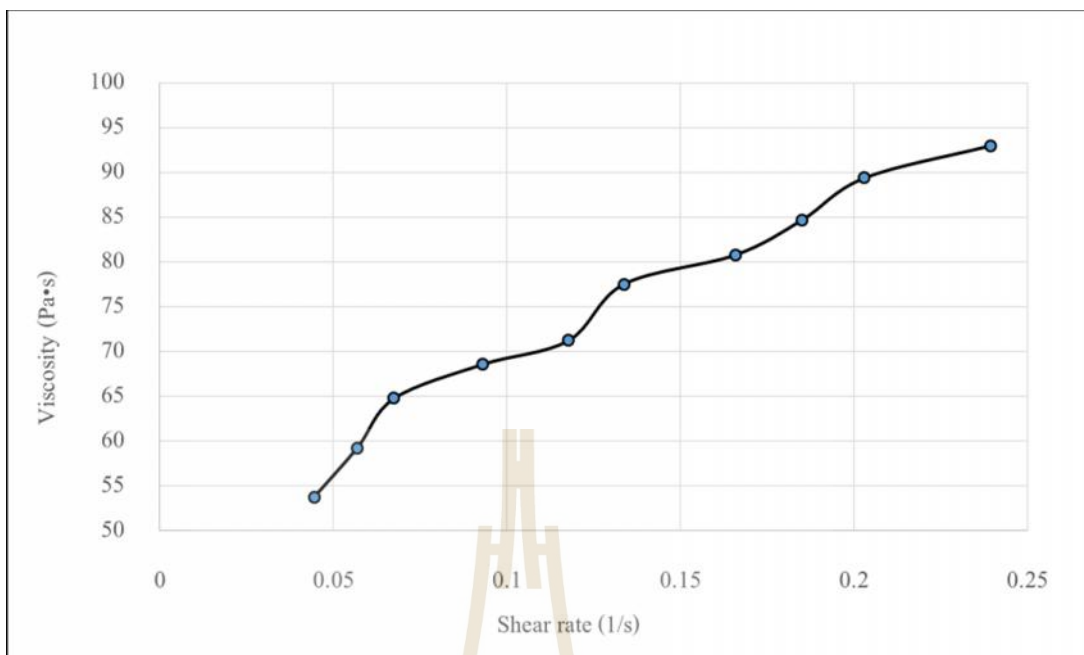
เมื่อได้ค่าความหนืดและความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมแล้ว ทำการคำนวณหาค่าอัตราเฉือน (Shear rate) ของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยสมการที่ 3.1 สมการหาอัตราเฉือนยูพาพร รักสกุลวัฒน์ (2015) โดยอัตราเฉือนมีหน่วยเป็น  $1/s$  โดยทำการแทนค่าความหนืด ( $\eta$ ) และความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) ลงในสมการ โดยทำการคำนวณอัตราเฉือนทุกค่าอุณหภูมิทดสอบ โดยผลการคำนวณอัตราเฉือนจะถูกแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าอัตราเฉือนที่ต่ำที่สุดเท่ากับ  $1.7427 1/s$  และมีค่าสูงสุดอยู่ที่  $9.3327 1/s$  จากนั้นจึงนำค่าอัตราเฉือนมาทำการวาดกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืด และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือน และเพื่อทราบว่าซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีพฤติกรรมไหลแบบใด

$$\tau = \eta \gamma \quad (4.1)$$

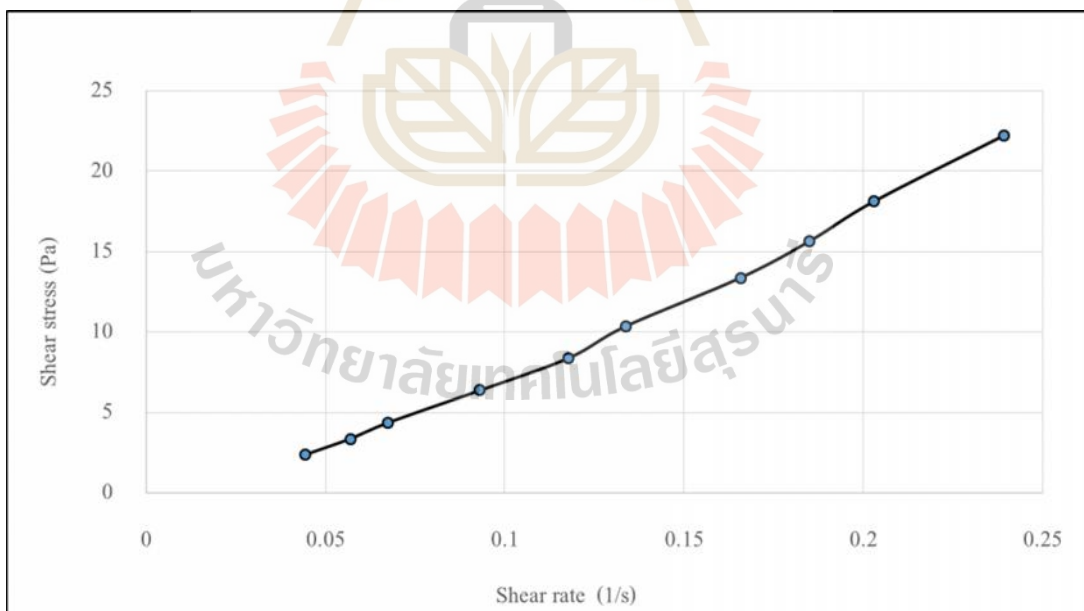
จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับความหนืดและความเค้นเฉือน กล่าวคือเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นค่าความหนืดและความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมว่ามีความสอดคล้องกับค่ากล่าวของ ยูพาพร รักสกุลพิวัฒน์ (2015) คือมีพฤติกรรมการไหลแบบ Dilatant หรือ Shear thickening ที่เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนแล้วความหนืดจะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณอัตราเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม		ผลการคำนวณ
Temperature (°C)	Viscosity (Pa•s)	Shear stress (Pa)	Shear rate (1/s)
97	53.78	93.7248	1.7427
95	59.262	132.1242	2.229
90	64.776	170.5626	2.6331
85	68.572	249.0228	3.6315
80	71.222	327.1242	4.5930
75	77.52	404.3442	5.2159
70	80.762	522.1242	6.4649
65	84.63	610.2642	7.2109
60	89.364	707.7642	7.9200
55	92.952	867.5004	9.3327
50	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	-



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือนของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

#### 4.4 ขนาดของช่องความลึกสกรูสำหรับอัดรีดช็อกโกแลตสูตรควบคุม

เมื่อได้ค่าอัตราเฉือนของทุกอุณหภูมิทดสอบแล้วจึงนำค่าอัตราเฉือนมาทำการคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรู (Channel depths, h) ในสมการที่ 3.2 เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลของวัสดุกับสกรูอัดรีดตามการระบุของ Giles H.F.; Wagner J.R.; Mount E.M. (2005) โดยนำค่าอัตราเฉือนที่มากที่สุดในการทดสอบคือ 9.3327 1/s เหตุผลที่นำค่าอัตราเฉือนที่มากที่สุดมาทำการคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรูคือ ถ้าหากนำค่าอัตราเฉือนที่น้อยที่สุดมาทำการคำนวณจะส่งผลให้ขนาดความลึกของช่องสกรูที่ได้จะไม่สามารถอัดรีดช็อกโกแลตสูตรควบคุมได้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 97 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงนำค่าอัตราเฉือนที่มากที่สุดมาทำการคำนวณเพื่อให้ได้ขนาดความลึกของช่องสกรูที่สามารถอัดรีดช็อกโกแลตสูตรควบคุมได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 55 - 97 องศาเซลเซียส

$$\gamma = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times h} \quad (1 / s) \quad (4.2)$$

โดยที่	$\gamma$	คือ	อัตราเฉือน (Shear rate, 1 / s)
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diameter of Screw, mm.)
	N	คือ	ความเร็วรอบ (Screw speed, rpm)
	h	คือ	ความลึกของช่องสกรู (Channel depth, mm.)

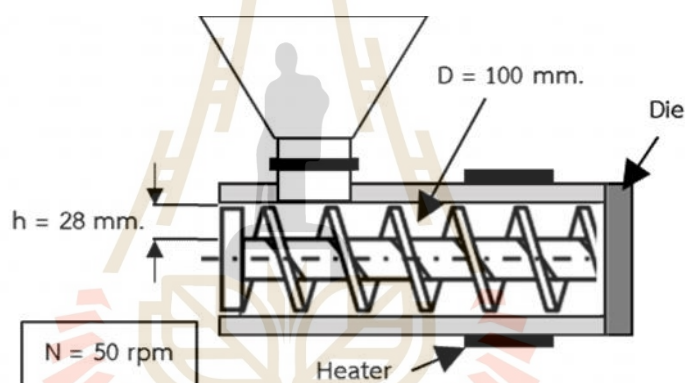
ดังนั้น ในการออกแบบสกรูในครั้งนี้จึงกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูเท่ากับ 100 mm. หรือ 3.937 in. โดยประมาณ เพื่อให้ได้กำลังการผลิตขั้นต่ำ 700 lb หรือ 350 kg ต่อชั่วโมง โดยประมาณจากการกล่าวของ Harold FG.; John RW.; Eldridge M. (2004) และทำการกำหนดความเร็วรอบสกรู (N) ไปที่ 50 รอบต่อนาที (rpm) และเมื่อทำการจัดรูปแบบสมการแล้วจะได้ตามสมการที่ 4.3

$$h = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times \gamma} \quad (\text{mm.}) \quad (4.3)$$

สามารถคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรูได้ดังนี้

$$h = \frac{\pi \times 100 \text{ mm.} \times 50 \text{ rpm}}{60 \times 9.3327 \text{ 1/s}} = 28 \text{ mm.}$$

จากผลการคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรูพบว่าขนาดความลึกของช่องสกรูที่สามารถอัดรีดช็อกโกแลตสูตรควบคุมได้คือ 28 mm. ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 100 mm. ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยคุณสมบัติของสกรูที่ได้ทำการออกแบบคือ สามารถอัดรีดวัสดุแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่มีพฤติกรรมไหลแบบ Dilatant ที่มีค่าอัตราเฉือนตั้งแต่ 1.7 - 9.3 1/s และมีค่าความหนืดตั้งแต่ 53 - 92 Pa•s จากนั้นจึงได้ทำการทำต้นแบบสกรูขึ้นมาตามขนาดที่ได้ทำการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ขนาดความลึกของช่องสกรูที่ทำการออกแบบและองค์ประกอบของเครื่องอัดรีด





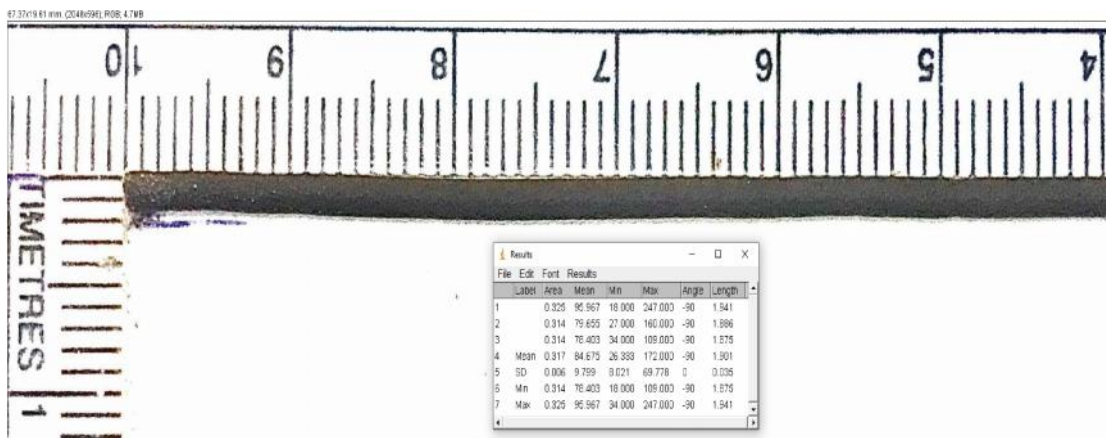
รูปที่ 4.7 สกรุดันแบบที่ได้จากการคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรู

#### 4.5 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของเส้นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ได้ทำการทดลองอัดรีด โดยในการทดลองได้ทำการทดลองอัดรีดทั้งหมด 18 เงื่อนไข ประกอบไปด้วยตัวแปรต้นอุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 40, 50 และ 60 รอบต่อนาที และลักษณะใบมีด 2 แบบ คือแบบมีใบและไม่มีใบ ในแต่ละเงื่อนไขทำจำนวนซ้ำ 10 ซ้ำ อัดรีดผ่านรูแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีผลการทดลองทั้งหมด 180 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยได้ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นละ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ช่วงหัว (H), ช่วงกลาง (M) และช่วงท้าย (T) โดยมีความคาดหวังของผลลัพธ์คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของช็อกโกแลตสูตรควบคุมสูตรควบคุมต้องมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับขนาดรูแม่พิมพ์พอดี ในการวัดเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของช็อกโกแลตสูตรควบคุมโปรแกรมจะแสดงผลการวัดขนาดทั้ง 3 ตำแหน่ง ตัวอย่างการวัดขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 คือ แสดงขนาด, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, ค่าขนาดที่ต่ำและสูงที่สุดของเส้น โดยผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นในตำแหน่งช่วงหัว (H), ช่วงกลาง (M) และช่วงท้าย (T) ดังแสดงในตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองอัดรีดเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้งหมด 180 เส้น



รูปที่ 4.9 ตัวอย่างข้อมูลที่โปรแกรมแสดงในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น  
ซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นตำแหน่งช่วงหัว (H)

ตัวแปรต้น		ครั้งที่											
Temperature (C°)	Screw Speed (rpm)	โมบิต	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
50	40	มีบิต	1.633	2.194	1.854	1.628	1.515	2.145	2.033	1.954	1.738	1.683	1.8377
		ไม่มีบิต	1.639	2.037	1.824	1.967	1.9	1.574	2	2.017	1.917	1.815	1.869
	50	มีบิต	1.588	2.063	1.812	2.086	2.22	1.805	1.911	1.911	1.886	2.24	1.9522
		ไม่มีบิต	1.863	1.94	1.689	1.854	2	1.908	1.914	1.973	1.973	1.867	1.8981
	60	มีบิต	1.987	2.181	1.873	2.086	1.541	2.204	1.765	1.414	1.767	1.405	1.8223
		ไม่มีบิต	1.863	1.919	2.037	1.612	1.744	1.906	1.881	2.137	1.633	2.202	1.8934
55	40	มีบิต	1.875	1.821	1.927	1.857	1.767	1.941	1.921	1.917	1.594	1.949	1.8569
		ไม่มีบิต	2.022	1.903	1.8	1.727	1.89	2.042	1.954	1.761	1.728	1.894	1.8721
	50	มีบิต	1.558	1.899	1.667	1.691	1.943	2.153	2.062	1.825	2.017	2.005	1.882
		ไม่มีบิต	1.978	1.879	1.404	2.2	1.916	2.065	1.967	1.612	2.27	1.902	1.9193
	60	มีบิต	1.993	1.965	2.045	2.006	2.236	2.4	1.894	2.159	2.333	2.124	2.1155
		ไม่มีบิต	1.875	1.933	2.149	1.954	1.934	1.974	1.848	1.705	2.093	1.9	1.9345
60	40	มีบิต	1.534	1.714	1.825	1.483	1.672	1.836	1.237	1.715	1.935	1.597	1.6548
		ไม่มีบิต	1.96	1.932	1.895	1.96	1.828	1.947	2.171	1.922	1.85	1.933	1.9398
	50	มีบิต	1.818	1.325	2.991	1.262	1.382	1.962	2.053	1.966	1.844	1.678	1.8281
		ไม่มีบิต	1.824	1.933	2.007	1.869	1.9	1.672	1.797	1.782	2.156	1.941	1.8681
	60	มีบิต	1.455	1.941	1.993	2.226	2.074	2.165	1.987	1.828	1.706	1.921	1.9296
		ไม่มีบิต	1.838	1.881	1.967	1.722	2.178	2.138	1.848	1.864	1.954	1.6	1.899

จากตารางข้อมูล (ขนาด) เส้นผ่านศูนย์กลาง

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นตำแหน่งช่วงกลาง (M)

ตัวแปรต้น			ครั้งที่										
Temperature (C°)	Screw Speed (rpm)	ใบมีด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
50	40	มีดแก้ว	1.8	1.968	1.821	1.86	1.919	1.914	1.9	1.854	1.9	1.821	1.8757
		ไม่มีดแก้ว	1.941	1.894	1.959	1.967	1.875	1.902	1.815	2.017	2	2.013	1.9383
	50	มีดบ่า	1.892	1.882	1.813	2.053	2.087	1.805	1.843	1.906	1.905	1.987	1.9173
		ไม่มีดบ่า	1.928	1.956	1.887	1.954	1.967	1.941	1.914	1.92	1.956	1.933	1.9356
	60	มีดบ่า	1.987	1.879	1.895	1.954	1.803	2.039	1.928	1.842	1.733	1.906	1.8966
		ไม่มีดบ่า	1.895	1.919	1.815	1.875	1.941	2.007	1.881	1.974	1.967	1.967	1.9241
55	40	มีดบ่า	1.974	1.935	2.049	1.974	1.838	1.994	2.005	1.881	1.884	1.949	1.9483
		ไม่มีดแก้ว	1.949	1.759	1.967	1.927	1.923	1.821	1.887	1.894	1.894	1.927	1.8948
	50	มีดแก้ว	1.903	1.935	1.895	1.927	1.905	2.012	1.835	1.89	2.071	2.028	1.9401
		ไม่มีดแก้ว	2.027	1.934	2.025	1.967	1.851	1.992	1.988	1.993	1.875	1.967	1.9619
	60	มีดบ่า	2.015	2	1.748	1.863	1.881	1.867	2.027	1.96	2.006	1.838	1.9205
		ไม่มีดบ่า	1.908	1.983	1.934	1.77	1.934	1.941	2.013	1.869	1.905	1.967	1.9224
60	40	มีดแก้ว	1.867	1.929	1.971	2.034	1.82	1.955	1.906	1.79	1.855	1.881	1.9006
		ไม่มีดแก้ว	1.941	1.965	1.961	1.827	1.901	1.967	1.875	2.007	1.896	1.8	1.914
	50	มีดบ่า	1.981	2.015	2.006	1.909	1.914	1.995	1.954	1.966	1.844	1.941	1.9523
		ไม่มีดบ่า	1.954	1.967	1.973	1.902	1.933	1.836	1.863	1.914	1.927	1.886	1.9153
	60	มีดบ่า	2.09	1.955	2.02	2.024	1.98	2.05	1.973	2.015	1.911	1.971	1.9989
		ไม่มีดบ่า	1.732	1.749	1.867	1.854	1.881	1.903	1.914	1.936	1.854	1.8	1.8495

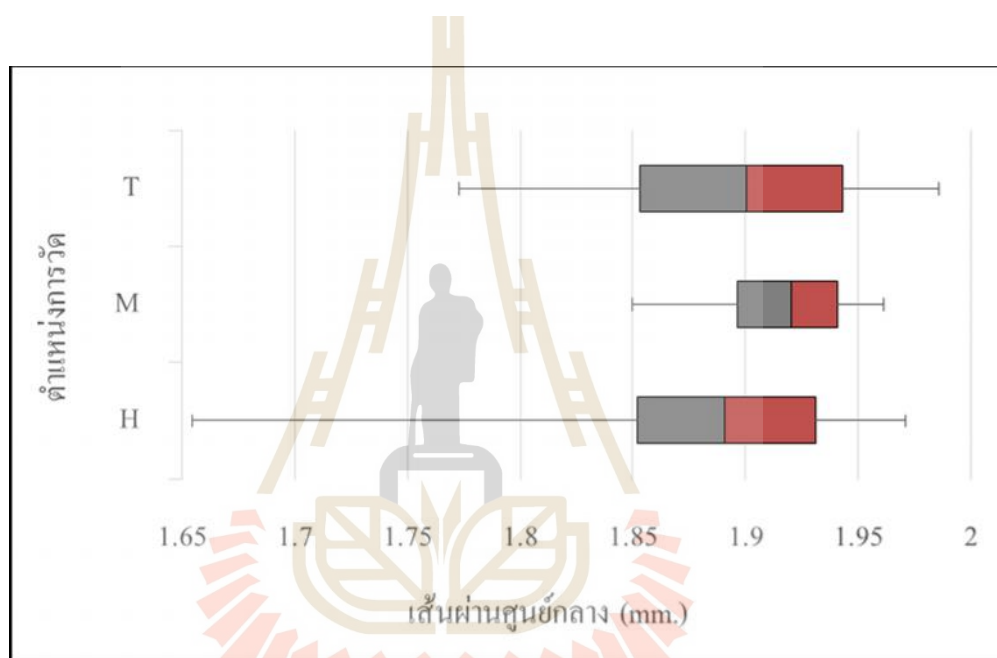
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นตำแหน่งช่วงท้าย (T)

ตัวแปรต้น			ครั้งที่										
Temperature (C°)	Screw Speed (rpm)	ใบมีด	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
50	40	มีดแก้ว	1.7	1.884	1.755	1.993	1.919	1.815	2.1	1.788	1.67	1.535	1.8159
		ไม่มีดแก้ว	1.908	1.93	1.926	1.836	1.933	1.836	1.947	1.928	1.902	1.913	1.9059
	50	มีดบ่า	1.892	1.946	1.922	1.863	2.079	1.993	2.014	2.014	1.723	2.023	1.9469
		ไม่มีดบ่า	1.863	1.94	1.97	1.887	1.804	1.923	1.815	1.973	2.007	1.867	1.9049
	60	มีดบ่า	1.922	1.913	1.838	1.97	1.869	1.842	1.961	1.743	1.985	1.918	1.8961
		ไม่มีดบ่า	1.895	1.886	1.782	1.875	1.875	1.94	1.914	1.776	1.8	1.9	1.8643
55	40	มีดบ่า	1.85	1.935	1.906	1.904	1.944	1.959	2.005	1.952	1.993	1.858	1.9306
		ไม่มีดบ่า	1.913	1.596	1.867	1.86	1.989	1.755	1.954	1.835	1.96	1.96	1.8689
	50	มีดบ่า	2.065	2.042	1.947	1.87	1.941	2.012	1.977	1.991	1.982	2.04	1.9667
		ไม่มีดบ่า	1.927	1.915	1.959	1.867	1.786	1.906	1.41	1.851	1.809	1.935	1.8365
	60	มีดบ่า	2.087	2	1.95	1.887	1.952	1.8	1.927	1.86	1.933	1.895	1.9291
		ไม่มีดบ่า	1.908	2.056	2.119	2.021	1.88	1.974	2	1.845	1.694	2.021	1.9518
60	40	มีดบ่า	1.834	1.286	1.535	2.138	1.815	1.758	1.839	1.788	1.932	1.807	1.773
		ไม่มีดบ่า	1.794	1.867	1.895	1.926	1.803	1.833	1.565	1.941	1.896	2	1.852
	50	มีดบ่า	1.948	2.55	2.036	1.909	1.645	1.995	1.325	2.156	1.934	1.941	1.9419
		ไม่มีดบ่า	1.975	1.875	1.906	1.869	1.914	1.809	1.863	1.749	1.96	1.875	1.8795
	60	มีดบ่า	2.001	1.941	1.927	2.014	2.007	1.811	1.987	2.087	1.911	2.053	1.9739
		ไม่มีดบ่า	1.797	1.749	1.933	1.788	1.881	1.842	1.98	1.854	1.945	1.767	1.8536

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)

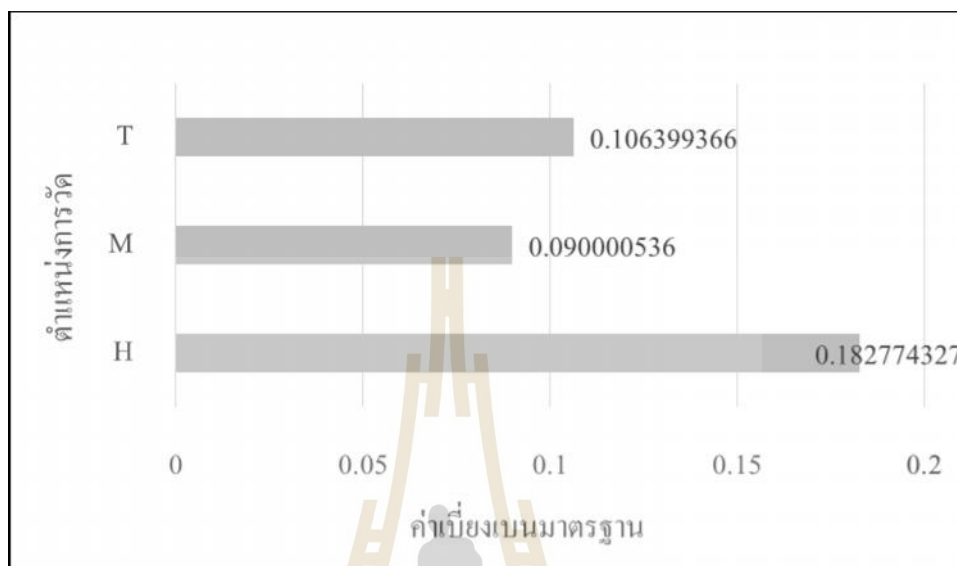
โดยเมื่อได้ผลการวัดแล้วจึงนำมาวาดแผนภูมิ Boxplot ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จึงพบว่า ช่วงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในตำแหน่งช่วงหัว (H) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.6548 ถึง 2.1155 mm. ตำแหน่งช่วงกลาง (M) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.8495 ถึง 2.9989 mm. และตำแหน่งช่วงท้าย (T) อยู่ในช่วงตั้งแต่ 1.7730 ถึง 1.9867 mm. จากนั้นจึงได้ทำการหาค่าเฉลี่ยของทุกตำแหน่งการวัดพบว่า ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตำแหน่งช่วงกลาง (M) มีค่ามากที่สุดอยู่ที่ 1.9417 mm. และตำแหน่งช่วงหัว (H) มีค่าเฉลี่ยน้อยที่สุดอยู่ที่ 1.8884 mm. กล่าวคือบริเวณตำแหน่งช่วงกลางของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีขนาดใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุด



รูปที่ 4.10 แผนภูมิ Boxplot ของช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ทั้ง 3 ตำแหน่งการวัด

เมื่อทราบว่าตำแหน่งช่วงกลางของเส้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียง 2 มิลลิเมตรมากที่สุดแล้วมากที่สุดแล้ว จึงทำการตรวจสอบว่า ณ ตำแหน่งใดที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหรือความแปรปรวนของข้อมูลมากที่สุด โดยทำการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทุกตำแหน่งการวัดแล้วจึงนำมาวาดเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้ง 3 ตำแหน่งการวัด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งช่วงกลางของเส้นมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ประมาณ 0.09 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งช่วงหัวมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.1828 กล่าวคือค่าความแปรปรวนของข้อมูลในตำแหน่งช่วงกลางของเส้นมีค่าน้อยที่สุด นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง

กลางเส้นยังมีขนาดที่ใกล้เคียง 2 มิลลิเมตรมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะทำการศึกษาที่ตำแหน่งช่วงกลางของเส้น

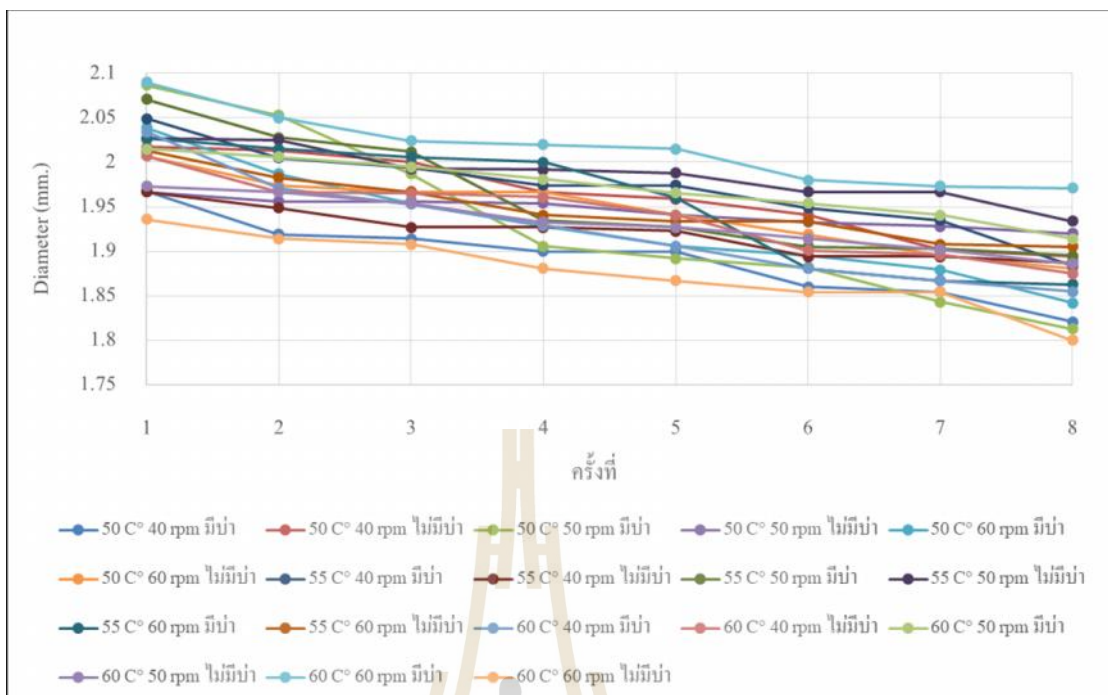


รูปที่ 4.11 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้ง 3 ตำแหน่งการวัด

จากการเปรียบเทียบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทำให้ได้ตำแหน่งที่จะทำการศึกษาคือตำแหน่งช่วงกลางของเส้นแล้ว เมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.11 จะพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในตำแหน่งที่จะศึกษาคือ ตำแหน่งช่วงกลางของเส้นนั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.09 ซึ่งมีค่ามากเกินไป จึงได้ทำการตัดข้อมูลที่มีค่ามากหรือน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร จนเกินไป ทำให้ได้ชุดข้อมูลใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ทำให้จำนวนผลการทดลองเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอยู่ที่ 144 เส้น และพบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.0457 ซึ่งมีค่าลดลง 0.0443 จึงทำให้ชุดข้อมูลนี้มีความแปรปรวนลดลง จากนั้นได้ทำการตรวจสอบว่าผลการทดลองของเงื่อนไขใดมีความแปรปรวนของชุดข้อมูลและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุด โดยใช้วิธีการวาดกราฟเส้นตรงโดยนำข้อมูลของทุกเงื่อนไขทดลองมาทำการวาดกราฟเพื่อหาสมการเส้นตรง เพื่อดูค่าความความชัน (m) ของผลการทดลองแต่ละเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อทำการหาสมการเส้นตรงของแต่ละเส้นแล้วจะได้ผลตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นหลังจากตัดค่าออก

ตัวแปรต้น			ครั้งที่								
Temperature (C°)	Screw Speed (rpm)	ใบมีด	1	2	3	4	5	6	7	8	เฉลี่ย
50	40	มีใบ	1.968	1.86	1.919	1.914	1.9	1.854	1.9	1.821	1.892
		ไม่มีใบ	1.941	1.894	1.959	1.967	1.902	2.017	2	2.013	1.961625
	50	มีใบ	1.892	1.882	1.813	2.053	1.843	1.906	1.905	1.987	1.910125
		ไม่มีใบ	1.928	1.956	1.954	1.967	1.914	1.92	1.956	1.933	1.941
	60	มีใบ	1.987	1.879	1.895	1.954	2.039	1.928	1.842	1.906	1.92875
		ไม่มีใบ	1.895	1.919	1.875	1.941	2.007	1.974	1.967	1.967	1.943125
55	40	มีใบ	1.974	1.935	2.049	1.974	1.994	2.005	1.884	1.949	1.9705
		ไม่มีใบ	1.949	1.967	1.927	1.923	1.887	1.894	1.894	1.927	1.921
	50	มีใบ	1.903	1.935	1.895	1.927	1.905	2.012	1.89	2.028	1.936875
		ไม่มีใบ	2.027	1.934	2.025	1.967	1.967	1.992	1.988	1.993	1.986625
	60	มีใบ	2.015	2	1.863	1.881	1.867	2.027	1.96	2.006	1.952375
		ไม่มีใบ	1.908	1.983	1.934	1.934	1.941	2.013	1.905	1.967	1.948125
60	40	มีใบ	1.867	1.929	1.971	2.034	1.953	1.906	1.855	1.881	1.9245
		ไม่มีใบ	1.941	1.965	1.961	1.901	1.967	1.875	2.007	1.896	1.939125
	50	มีใบ	1.981	2.015	2.006	1.941	1.914	1.995	1.954	1.966	1.9715
		ไม่มีใบ	1.954	1.967	1.973	1.902	1.933	1.914	1.927	1.886	1.932
	60	มีใบ	2.09	1.971	2.02	2.024	1.98	2.05	1.973	2.015	2.015375



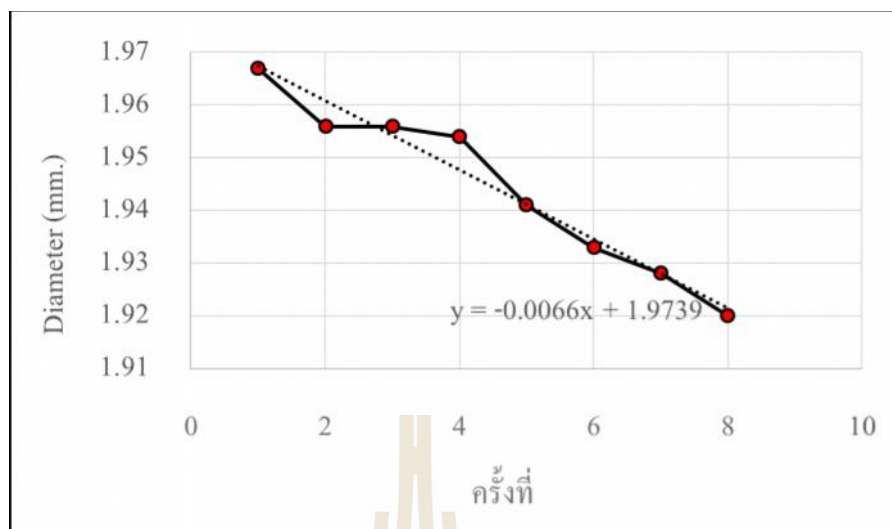
รูปที่ 4.12 กราฟเส้นตรงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมทั้งหมด 18 เส้น



ตารางที่ 4.7 สมการเส้นตรงของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

Temperature (C°)	Screw Speed (rpm)	ใบมีด	สมการเส้นตรง	m
50	40	มีใบมีด	$y = -0.0172x + 1.9704$	-0.0172
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0191x + 2.0474$	-0.0191
	50	มีใบมีด	$y = -0.0296x + 2.0433$	-0.0296
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0066x + 1.9739$	-0.0066
	60	มีใบมีด	$y = -0.0252x + 2.0422$	-0.0252
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0177x + 2.0229$	-0.0177
55	40	มีใบมีด	$y = -0.0195x + 2.0585$	-0.0195
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0112x + 1.9714$	-0.0112
	50	มีใบมีด	$y = -0.0199x + 2.0263$	-0.0199
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0122x + 2.0414$	-0.0122
	60	มีใบมีด	$y = -0.0274x + 2.0758$	-0.0274
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.017x + 1.9533$	-0.017
60	40	มีใบมีด	$y = -0.024x + 2.0323$	-0.024
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0178x + 2.019$	-0.0178
	50	มีใบมีด	$y = -0.0139x + 2.0342$	-0.0139
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.0126x + 1.9888$	-0.0126
	60	มีใบมีด	$y = -0.0161x + 2.088$	-0.0161
		ไม่มีใบมีด	$y = -0.017x + 1.9533$	-0.017

จากผลการหาสมการเส้นตรงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าความชันของเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ใช้เงื่อนไขอุณหภูมิอัดรีด 50 C° ความเร็วรอบสกรู 50 rpm ใบมีดแบบไม่มีใบมีดมีค่าความชัน (m) ที่น้อยที่สุดอยู่ที่ -0.0066 ดังนั้นการใช้เงื่อนไขนี้จึงให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีความคงที่ของข้อมูลมากที่สุด และในรูปที่ 4.13 คือตัวอย่างกราฟเส้นตรงของเงื่อนไขอุณหภูมิอัดรีด 50 C° ความเร็วรอบสกรู 50 rpm ใบมีดแบบไม่มีใบมีด

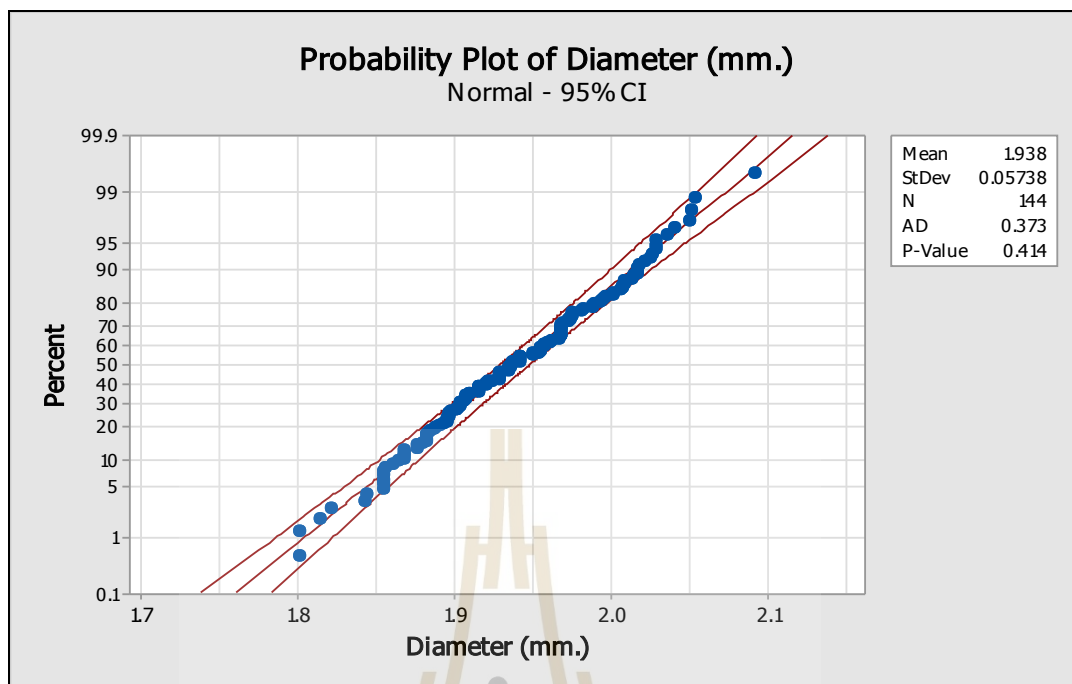


รูปที่ 4.13 ตัวอย่างกราฟเส้นตรงของเงื่อนไขอุณหภูมิจัดรีด 50 C° ความเร็วรอบสกรู 50 rpm ไบมีดแบบไม่มีป่า

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าในการทดลองจัดรีดหากใช้เงื่อนไขอุณหภูมิจัดรีด 60 C° ความเร็วรอบสกรู 60 rpm ไบมีดแบบมีป่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมจะมีขนาดใกล้เคียง 2 มิลลิเมตรมากที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 2.01 มิลลิเมตร โดยมีค่าความชันหรือความแปรปรวนของข้อมูลอยู่ที่ -0.0161

#### 4.6 ความสัมพันธ์ตัวแปรการทดลองกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรทดลองจัดรีดที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิจัดรีด, ความเร็วสกรูและลักษณะไบมีด โดยได้ทำการนำข้อมูลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมาทำการกระจายตัวของข้อมูลในโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าชุดข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมนี้มีการกระจายตัวแบบ Normal distribution ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สังเกตจากค่า P-Value ที่มีค่า 0.414 ซึ่งมากกว่า 0.05 ค่าเฉลี่ย (Mean) ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 1.9380 มิลลิเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (StDev) อยู่ที่ 0.0574



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสุตรควบคุม

นอกจากนี้ได้ทำการหาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีดว่ามีผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสุตรควบคุมอย่างไร โดยใช้โปรแกรม Minitab ด้วยวิธี One-way ANOVA โดยอุณหภูมิทดลองมี 3 ระดับ ได้แก่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส (C°) ดังแสดงในตารางที่ 4.8

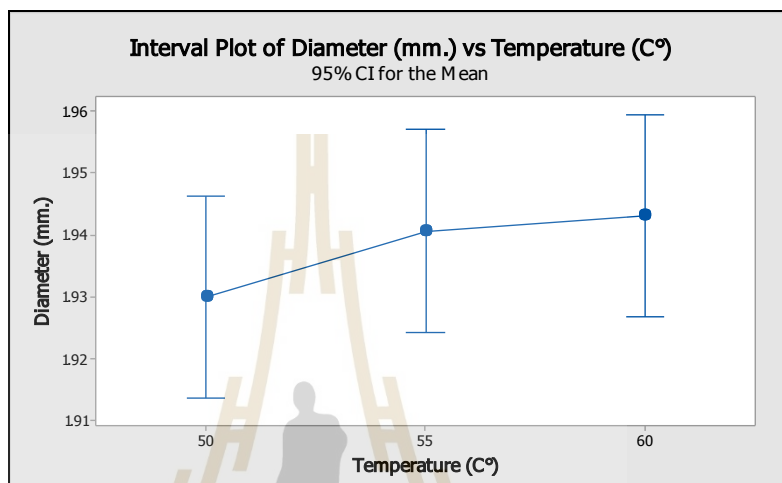
ตารางที่ 4.8 ระดับของอุณหภูมิ (Temperature) ทดลอง

Factor	Levels	Values
Temperature (C°)	3	50, 55, 60

ตารางที่ 4.9 ผลการหาผลกระทบของอุณหภูมิต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temperature (C°)	2	0.004721	0.002360	0.71	0.491
Error	141	0.466102	0.003306		
Total	143	0.470823			

จากตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าปริมาณอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับในการทดลองอัดรีดนั้น ไม่ได้มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-Value จากการหาความสัมพัทธ์ด้วยวิธีการ One-way ANOVA มีค่าเท่ากับ 0.491 ซึ่งมากกว่า 0.05 จากนั้นได้ทำการวาด Interval Plot ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 Interval Plot ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและอุณหภูมิทดลอง

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิทดลองที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส มีขนาดอยู่ที่ 1.9432 มิลลิเมตร

จากนั้นจึงได้หาผลกระทบของความเร็วรอบสกรูต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยวิธีการ One-way ANOVA โดยความเร็วรอบสกรู (Screw speed) ทดลองมี 3 ระดับ ได้แก่ 40 , 50 และ 60 รอบต่อนาที (rpm) ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ระดับของความเร็วรอบสกรูทดลอง

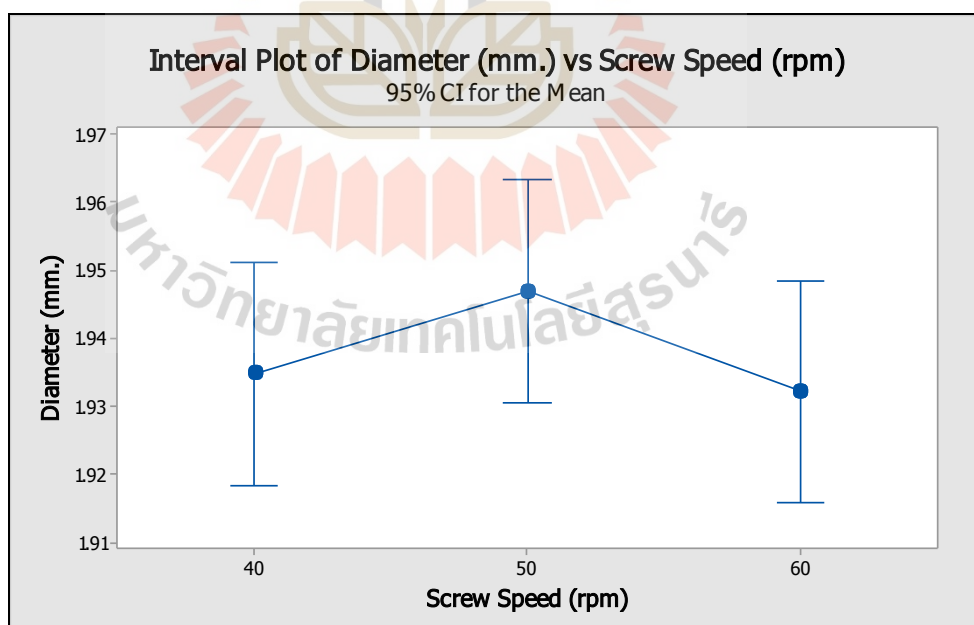
Factor	Levels	Values
Screw speed (rpm)	3	40, 50, 60

ตารางที่ 4.11 ผลการหาผลกระทบของความเร็วรอบสกรูต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Screw speed	2	0.005932	0.002966	0.90	0.409
Error	141	0.464891	0.003297		
Total	143	0.470823			

จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเร็วรอบสกรูทั้ง 3 ระดับในการทดลองอัดรีดนั้น ไม่ได้มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-Value จากการหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีการ One-way ANOVA มีค่าเท่ากับ 0.409 ซึ่งมากกว่า 0.05 จากนั้นได้ทำการวาด Interval Plot ดังแสดงในรูปที่ 4.16

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบสกรูทดลองที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อก โกลแลตสูตรควบคุมมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุดคือ ความเร็วรอบสกรูที่ 50 รอบต่อนาที มีขนาดอยู่ที่ 1.9469 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.16 Interval Plot ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วรอบสกรูทดลอง

จากนั้น จึงได้หาผลกระทบของลักษณะใบมีดต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยวิธีการ One-way ANOVA โดยความเร็วรอบสกรู (Screw speed) ทดลองมี 2 ระดับ ได้แก่ ใบมีดแบบมีบ่า (1) และใบมีดแบบไม่มีบ่า (2) ดังแสดงในตารางที่ 4.12

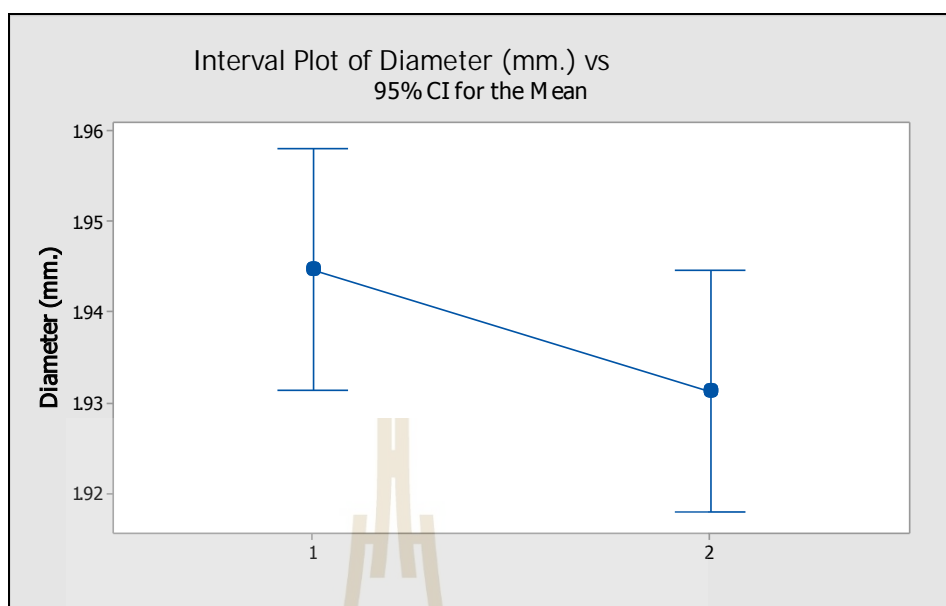
ตารางที่ 4.12 ระดับของความเร็วรอบสกรูทดลอง

Factor	Levels	Values
ลักษณะใบมีด	2	1, 2

ตารางที่ 4.13 ผลการหาผลกระทบของความเร็วรอบสกรูต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้น

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
ลักษณะใบมีด	1	0.006467	0.006467	1.98	0.162
Error	142	0.464356	0.003270		
Total	143	0.470823			

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าลักษณะใบมีดทั้ง 2 ระดับในการทดลองอัดรีดนั้น ไม่ได้มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-Value จากการหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีการ One-way ANOVA มีค่าเท่ากับ 0.162 ซึ่งมากกว่า 0.05 จากนั้นได้ทำการวาด Interval Plot ดังแสดงในรูปที่ 4.17

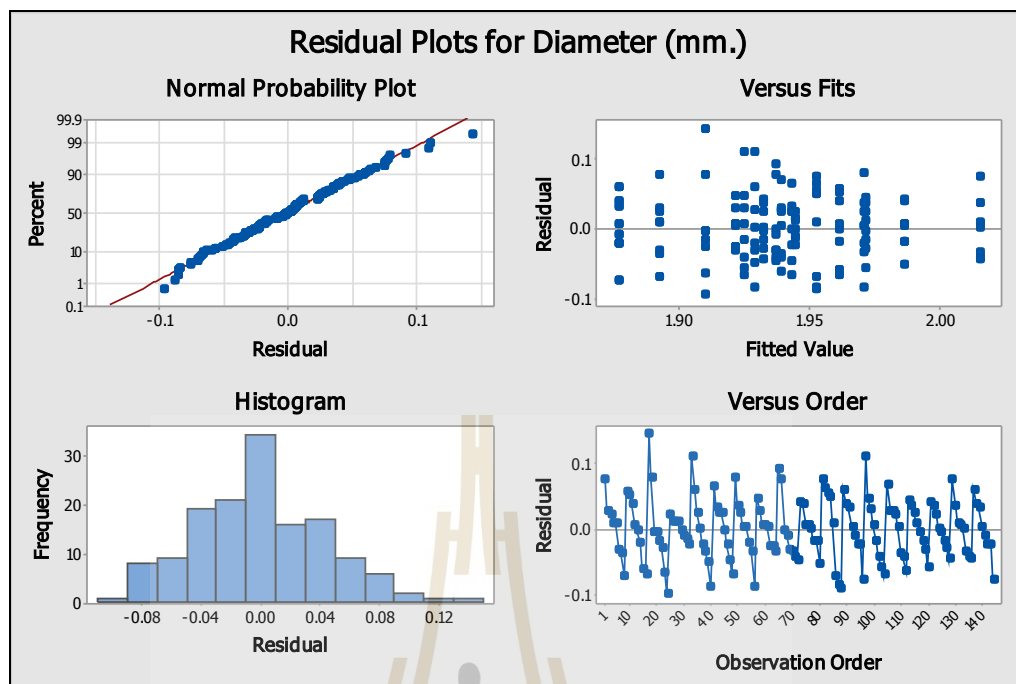


รูปที่ 4.17 Interval Plot ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะใบมีดทดลอง

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าลักษณะใบมีดที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลต สูตรควบคุมมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุดคือ ลักษณะใบมีดแบบมีป่า มีขนาดอยู่ที่ 1.9446 มิลลิเมตร

จากผลการทำ One-way ANOVA ทั้ง 3 ตัวแปร พบว่าทั้ง 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีดนั้น ไม่ได้มีผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลต สูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ จึงได้ทำการหาความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างตัวแปรที่ส่งผลกระทบบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยวิธีการดังกล่าวคือการทำ General Linear Model โดยทำการหาความสัมพันธ์และผลกระทบของอุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีดร่วมกัน โดยแฟกเตอร์ (factor) ดังแสดงในตารางที่ 4.14

จากนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลผลการทดลองโดยมีสมมติฐาน 3 ข้อ ที่จะทำให้ข้อมูลจากการทดลองถูกต้องและเชื่อถือได้ ตามวิธีของ จามร หรุจิตตวิวัฒน์, (2012) โดยทำการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal probability plot), การตรวจสอบความเป็นอิสระของ Residual (Versus order) และการตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus fits) พบว่า ข้อมูลผลการทดลองอยู่ในสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์ความถูกต้องของข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ 4.14 ระดับของตัวแปรทดลอง

Factor	Type	Levels	Values
ใบมีด	Fixed	2	1, 2
Screw Speed (rpm)	Fixed	3	40, 50, 60
Temperature (C°)	Fixed	3	50, 55, 60



ตารางที่ 4.15 ผลการหาผลกระทบของตัวแปรอุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีด ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลแลตสูตรควบคุม

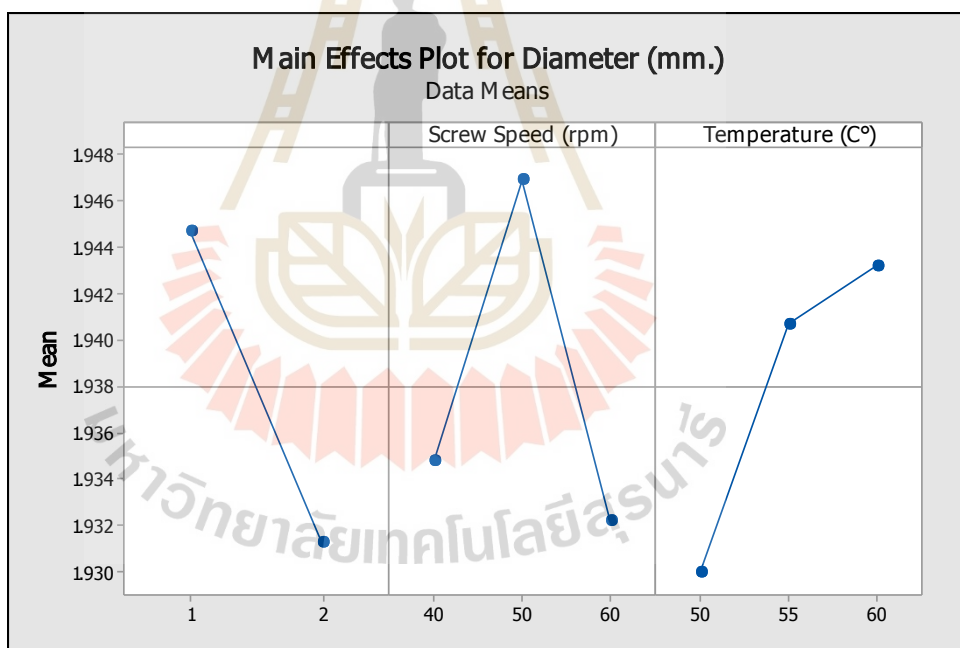
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Screw speed (rpm)	2	0.005932	0.002966	1.28	0.282
Temperature (C°)	2	0.004721	0.002360	1.02	0.364
ลักษณะใบมีด	1	0.006467	0.006467	2.79	0.097
Screw speed (rpm)*Temperature (C°)	4	0.016720	0.004180	1.80	0.132
Screw speed (rpm)*ลักษณะใบมีด	2	0.051050	0.025525	11.01	0.000
Temperature (C°)*ลักษณะใบมีด	2	0.055395	0.027698	11.95	0.000
Screw speed (rpm)*Temperature (C°)*ลักษณะใบมีด	4	0.038539	0.009635	4.16	0.003
Error	126	0.291999	0.002317		
Total	143	0.470823			

จากตารางที่ 4.15 พบว่าที่ตัวแปรความเร็วรอบสกรู (Screw speed) เพียงตัวแปรเดียวไม่ได้มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า P-Value เท่ากับ 0.282 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ในกรณีของตัวแปรอุณหภูมิ (Temperature) และลักษณะใบมีด เช่นเดียวกัน ถ้าสังเกตที่ค่า P-Value ของทั้ง 2 ตัวแปร พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกับความเร็วรอบสกรู โดยตัวแปรอุณหภูมิและลักษณะใบมีดมีค่า P-Value เท่ากับ 0.364 และ 0.097 ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 ตัวแปรหากไม่หาความสัมพันธ์ร่วมกันจะไม่มีผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อสังเกตตารางที่ 4.15 เพิ่มเติมจะพบว่าเมื่อหาความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างความเร็วรอบสกรูกับอุณหภูมิพบว่าไม่ได้ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากมีค่า P-Value เท่ากับ 0.132 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แต่ในกรณีของความสัมพันธ์ของความเร็วรอบสกรูกับลักษณะใบมีดแตกต่างกันออกไป เนื่องจากในกรณีนี้เมื่อมาหาความสัมพันธ์ร่วมกันแล้วพบว่าส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อก โกลแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 รวมไปถึงในกรณีของความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับลักษณะใบมีดเช่นกัน พบว่าค่า P-Value ของกรณีนี้มีค่าน้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกัน ดังนั้นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับลักษณะใบมีดจึงส่งผลกระทบ

ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อสังเกตที่ความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ตัวแปรประกอบกันแล้ว พบว่าทั้ง 3 ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญและส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทำ General Linear Model พบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมากที่สุดคือ การใช้ลักษณะใบมีด เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวเมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ร่วมกับทั้งความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิ พบว่ามีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้นในกระบวนการอัดรีดจริง การเลือกใช้ชนิดใบมีดเป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงมากที่สุด

นอกจากนี้เพื่อให้เห็นว่าตัวแปรใดมีผลกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมากที่สุด และดูแนวโน้มของตัวแปร เพื่อระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทดลอง และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยวิธีการวาดกราฟ Main Effects Plot ในโปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 Main Effects Plot ของอุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วรอบสกรู และลักษณะใบมีด

จากรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 50 รอบต่อนาที และใช้ใบมีดแบบมีป่า จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตรมากที่สุด นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการเพิ่มอุณหภูมิและความเร็วรอบสกรูต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยถ้าปรับค่าความเร็ว

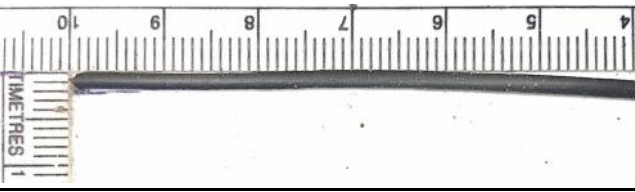
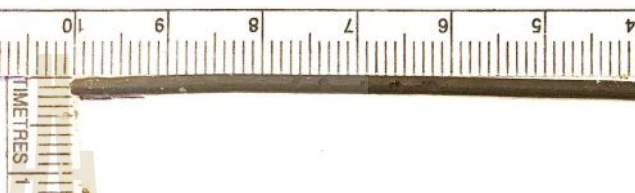




สกรูเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีแนวโน้มที่จะลดลง แต่ในขนาดเดียวกันหากเราตั้งอุณหภูมิอัดรีดให้สูงขึ้น ขนาดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ดังนั้น จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลทำให้ทราบได้ว่าถ้าปรับอุณหภูมิอัดรีดไปที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบสกรูที่ 50 รอบต่อนาที ใช้ใบมีดลักษณะแบบมีบ่าจะทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียงขนาดรูแม่พิมพ์มากที่สุดคือเท่ากับ 2 มิลลิเมตร โดยรูปผลการทดลองของแต่ละเงื่อนไขทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.16, 4.17 และ 4.18

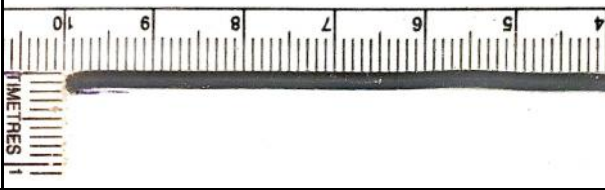
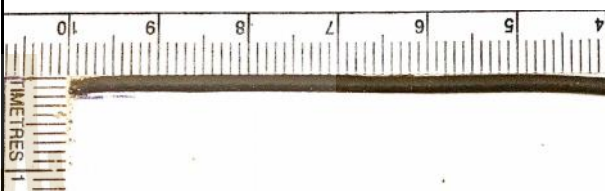
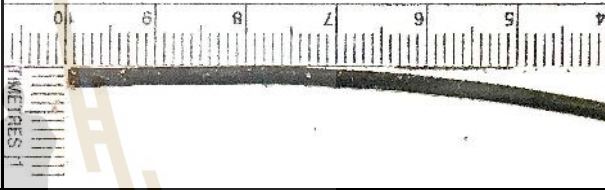



นอกจากนี้ จากผลการหาความแปรปรวนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นด้วยการทำ General Linear Model พบว่าปัจจัยที่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญ คือ ใบมีดกับอุณหภูมิอัดรีด และใบมีดกับความเร็วสกรู โดยมี P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นในการใช้งานจริงควรให้ความสำคัญกับการเลือกลักษณะใบมีดและเมื่อทำการอัดรีดพารามิเตอร์ทั้ง 3 นี้ควรมีความสัมพันธ์กัน



ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

Temperature (C°)	Screw speed (rpm)	ลักษณะใบมีด	รูปผลการทดลอง
50	40	มีป่า	
		ไม่มีป่า	
	50	มีป่า	
		ไม่มีป่า	
	60	มีป่า	
		ไม่มีป่า	

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

Temperature (C°)	Screw speed (rpm)	ลักษณะใบมีด	รูปผลการทดลอง
55	40	มีใบมีด	
		ไม่มีใบมีด	
	50	มีใบมีด	
		ไม่มีใบมีด	
	60	มีใบมีด	
		ไม่มีใบมีด	

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Temperature (C°)	Screw speed (rpm)	ลักษณะ ไบมีด	รูปผลการทดลอง
60	40	มีบ่า	
		ไม่มีบ่า	
	50	มีบ่า	
		ไม่มีบ่า	
60	60	มีบ่า	
		ไม่มีบ่า	

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ทั้ง 2 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนที่หนึ่ง การออกแบบสกรูอัดรีด และส่วนที่สองเป็นการหาค่าตัวแปรอัดรีด ได้แก่ อุณหภูมิอัดรีด (Extrusion temperature), ความเร็วรอบสกรู (Screw speed) และใบมีดกวาดหน้าแม่พิมพ์ (Die Cutting Blade) ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลต สูตรควบคุมที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูแม่พิมพ์ขนาด 2 มิลลิเมตรมากที่สุด

##### 5.1.1 พฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลพบว่าช็อกโกแลตสูตรควบคุมพฤติกรรมการไหลแบบ Dilatant หรือ Shear thickening กล่าวคือ มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับความหนืดและความเค้นเฉือน เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นค่าความหนืดและความเค้นเฉือนของช็อกโกแลตสูตรควบคุมจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จากความสัมพันธ์ดังกล่าวทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการไหลของช็อกโกแลตสูตรควบคุมว่ามีความสอดคล้องกับค่ากล่าวของ ยูพาพร รักสกุลวัฒน์ (2015) คือมีพฤติกรรมการไหลแบบ ที่เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนแล้วความหนืดจะเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอัตราเฉือนสูงสุดอยู่ที่ 9.3327 1/s ค่าความหนืดสูงสุดอยู่ที่ 92.952 Pa·s และค่าความเค้นเฉือนสูงสุดอยู่ที่ 867.5004 Pa

##### 5.1.2 การออกแบบสกรูอัดรีด

เมื่อทำการคำนวณหาความลึกของช่องสกรูเพื่อทำการออกแบบสกรู ด้วยสมการออกแบบสกรูในสมการที่ 3.2

$$\gamma = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times h} \quad (1 / s) \quad (5.1)$$

จากผลการคำนวณขนาดความลึกของช่องสกรูพบว่าขนาดความลึกของช่องสกรูที่สามารถอัดรีดช็อกโกแลตสูตรควบคุมได้คือ 28 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู 100 มิลลิเมตร โดยคุณสมบัติของสกรูที่ได้ทำการออกแบบคือ สามารถอัดรีดวัสดุแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่

มีพฤติกรรมการไหลแบบ Dilatant ที่มีค่าอัตราเฉือนตั้งแต่ 1.7 - 9.3 1/s และมีค่าความหนืดตั้งแต่ 53 - 92 Pa·s

### 5.1.3 ค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม

เมื่อได้ทำการหาค่าเบี่ยงมาตรฐานของผลการทดลองทั้ง 3 ตำแหน่งการวัดพบว่า ตำแหน่งการวัดตรงกึ่งกลางมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่ 0.09 เนื่องจากในการอัดรีดบริเวณตรงกลางเส้นมีความสมดุลในการอัดรีดมากที่สุด จึงได้เลือกทำการศึกษาบริเวณกึ่งกลางเส้น

จากนั้น จึงได้ทำการหาความแปรปรวนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นสูตรควบคุมด้วยการทำ พบว่า ปัจจัยที่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญ คือ ไขมันกับอุณหภูมิอัดรีด และไขมันกับความเร็วสกรู โดยมี P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นอกจากนี้เมื่อนำทั้ง 3 พารามิเตอร์มาทำ General Linear Model พบว่าอุณหภูมิอัดรีด, ความเร็วสกรูและลักษณะไขมันมีผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร โดยมี P-Value = 0.003

จากการหาค่าตัวแปรที่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุดด้วยการทำ Main Effect Plot พบว่า ตัวแปรที่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร มากที่สุดจากทั้ง 3 พารามิเตอร์ คือ ความเร็วสกรูที่ 50 รอบต่อนาที เนื่องจากมีค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นมากที่สุด และเมื่อสังเกตตัวแปรอีก 2 ตัวที่เหลือ พบว่า ที่อุณหภูมิอัดรีด 60 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นมากที่สุดเช่นกัน ดังนั้น หากต้องการขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียงรูแม่พิมพ์มากที่สุด เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ควรปรับค่าความเร็วรอบสกรูไปที่ 50 รอบต่อนาที ตั้งอุณหภูมิไปที่ 60 องศาเซลเซียส และใช้ไขมันแบบมีบำ นอกจากนี้ Main Effect Plot ยังแสดงว่า หากเราปรับค่าความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น ขนาดของเส้นมีแนวโน้มที่จะลดลง แต่ในขนาดเดียวกันหากเราตั้งอุณหภูมิอัดรีดให้สูงขึ้น ขนาดเส้นจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

### 5.2.1 พฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ช็อกโกแลตสูตรควบคุมเป็นวัสดุที่มีการไหลแบบ Dilatant ซึ่งค่าอัตราเฉือนจะแปรผันตรงกับค่าความหนืดและความเค้นเฉือนโดยไม่ขึ้นกับเวลา ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้อัตราเฉือนของช็อกโกแลตสูตรควบคุมเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการใช้งานอัดรีดจริงจึงต้องมีการกำหนดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับช็อกโกแลตสูตรควบคุม เพราะอุณหภูมิมิมีค่าแปรผกผัน



กับความหนืด ถ้าหากความหนืดมีค่าสูงอาจทำให้การอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรนี้เกิดอุปสรรคได้ เช่น ซ็อกโกแลตสูตรควบคุมไม่สามารถไหลออกจากหน้าแม่พิมพ์ได้ เป็นต้น อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์และผลิตภัณฑ์

### 5.2.2 การออกแบบสกรูอัดรีด

ประสิทธิภาพหรือความสามารถของสกรูที่ได้ทำการออกแบบจากการทดสอบความหนืดและความเค้นเฉือนนี้ สามารถอัดรีดวัสดุที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ Dilatant ที่มีค่าอัตราเฉือนตั้งแต่ 1.7 - 9.3 1/s และมีค่าความหนืดตั้งแต่ 53 – 92 Pa·s รวมไปถึงการทำความสะอาดสกรูสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนที่ตัวสกรูเพื่อให้ซ็อกโกแลตได้รับความร้อน จากนั้นจึงใช้น้ำล้างทำความสะอาดได้ตามปกติ

### 5.2.3 ค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการอัดรีดและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ในการทดลองอัดรีดซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีการใช้กระดานสเกลในการรองรับเส้นซ็อกโกแลตที่ถูกอัดรีดออกมาโดยการเลื่อนกระดานสเกลไม่มีเครื่องมือที่ควบคุมความเร็วในการเลื่อน ซึ่งถ้าหากมีการทดลองควรมีเครื่องมือควบคุมความเร็วกระดานสเกลในส่วนนี้

นอกจากนี้ ถ้าต้องการให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมีขนาดใกล้เคียงแม่พิมพ์มากที่สุดควรปรับอุณหภูมิไปที่ 60 องศาเซลเซียส ตั้งความเร็วรอบไปที่ 50 รอบต่อนาที และใช้ใบมีดแบบมีใบ และควรระวังในการปรับค่าความเร็วรอบ เนื่องจากถ้ายังปรับค่าความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมจะมีแนวโน้มลดลง รวมไปถึงตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมมากคือ ลักษณะของใบมีด ดังนั้น ในการใช้งานจริงควรมีการปรับใช้ลักษณะใบมีดหรืออุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมกับงาน

### 5.2.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัยต่อไป

ในการวัดประสิทธิภาพของเครื่องอัดรีดและสกรูดังกล่าวนี้ควรมีการวัดอัตราการป้อน (Feed rate) ว่าความคงที่หรือไม่ นอกจากนี้ตัวเครื่องอัดรีดนี้สามารถปรับค่าอุณหภูมิได้ ดังนั้นในการปรับสูตรซ็อกโกแลตสูตรควบคุมสามารถทำการศึกษาได้ โดยผลลัพธ์เป็นสูตรซ็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ได้รับการปรับปรุงให้ตรงตามความต้องการ

## รายการอ้างอิง

- กิตติศักดิ์ ยศอินทร์. 2552. **ช็อกโกแลต: ขนมหวานมหัศจรรย์**. บทความวิทยุกระจายเสียงรายการ  
วันนี้กับวิทยาศาสตร์ครั้งที่ 18 (สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์  
บริการ).
- ชัยคร ออกระลา. 2553. **Fluid Mechanics**. เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาวิศวกรรม ชลประทาน,  
คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน.
- บรรเลง ศรีนิล. งานอัดรีดขึ้นรูป **Extrusion**. หนังสือเทคโนโลยีพลาสติก ฉบับปรับปรุง พิมพ์  
ครั้งที่ 17.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2015. **Chocolate / ช็อกโกแลต**. สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์,  
สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. สืบค้นเมื่อ: 3 พฤษภาคม, 2563  
(<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1138/chocolate-ช็อกโกแลต>).
- ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์. 2015. **Introduction to polymer rheology and process**. Subject Document.  
Suranaree University of Technology.
- ศูนย์วิจัยและพัฒนาเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2559. **พฤติกรรมการบริโภคช็อกโกแลตในประเทศไทย**.
- Adebowale, A.A., (2012). **Food Rheology**. FST 310. Federal University of Agriculture Abeokuta,  
Abeokuta, pp. 37.
- Afoakwa, E.O. et al. (2008). **Relationship between rheological, textural and melting  
properties of dark chocolate as influenced by particle size distribution and  
composition**. European Food Research Technology, Vol. 227, pp. 1215-1223.
- Ardakani, H., Mitsoulis, E. and Hatzikiriakos S. (2014). **Capillary flow of milk chocolate**.  
Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 210, pp. 56–65.
- Arun, J.S., George, M., Kalpana, K., Janardhana, S., Jaya, J. and Jaina, G. (2014). **Defects  
Identification in Chocolates Using Neural Fuzzy Interface Segmentation**, International  
Journal of Engineering Science Invention.

- Beckett, S.T. (2009). **The science of chocolate, 2 ed.** Cambridge: Royal Society of Chemistry Paperbacks, 2009b. pp. 240.
- Benbow, J.B. (1993). **Paste Flow and Extrusion.** Oxford series on advanced manufacturing, chapter 4, pp. 25.
- Breitenbach, J. (2002). **Melt extrusion: from process to drug delivery technology.** (Biopharm: EurJ Pharm), chapter 54, pp. 107-17.
- Chamil, A. (2016). **Single screw extrusion control: A comprehensive review and directions for improvements.** Control Engineering Practice, Vol. 51, June 2016, pp. 69-80
- Chris, R. (1986). **Polymer Extrusion,** Hanser publishers, München. pp. 20-25
- Chris, R. (1990). **Polymer Extrusion,** Hanser Publishers, New York. ISBN 3-446-16080-9.
- Chris, R. (2015). **Effective Troubleshooting of Extrusion Problems.** Proceedings of the Regional Conference Graz, Polymer Processing Society (PPS).
- Giles, H.F., Wagner, J.R. and Mount, E.M. (2005). **Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook, 1st ed.** William Andrew Publishing, New York.
- Javier, V.S., Adrian, L.K., Elaine, C.B., Tim, G., Chamil, A.; Phil, D.C., Jing D., Kang L., Eileen, H.J. and Mark, P. (2014). **The effect of melt viscosity on thermal efficiency for single screw extrusion of HDPE.** Chemical engineering research and design 92, 2404–2412.
- Johnson, PS. (1982). **Development in Extrusion Science and Technology.** Polysar technical publication, Ontario.
- Joye D.D. (2003). **Shear rate and viscosity corrections for a Casson fluid in cylindrical (Couette) geometries.** Journal of Colloid and Interface.
- Kruder, GA. (1985). **Extrusion.** In: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering Vol. 1, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc., New York. pp. 571-631.
- Lucisano, M., Casiraghi, E. and Mariotti, M. (2006). **Influence of formulation and processing variables on ball mill refining of milk chocolate.** European Food Research Technology, Vol. 223, pp. 797–802.
- Martin, C. (2001). **Guidelines for Operation of Leistritz Twin-screw Extruder.** American Leistritz Corporation, Somerville.

- Mian, N., Riaz, G. and Rokey J. (2012). **Extrusion Problems Solved Food**. Pet Food and FeedA volume in Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition Book.
- Milivoje, M.K. (2006). **Design of Extrusion Dies**. Encyclopedia of Chemical Processing.
- Morris, S.A. and Langari R. (2016). **Measurement and Instrumentation**. Theory and Application, Second Edition.
- N.D. Frame. (1994). **The Technology of Extrusion Cooking**.
- Nicholas, P. (1998). **Cheremisinoff: Guidebook to Extrusion Technology**. New York: Potsdam Clarkson College of Technology.
- Coussot P. (2005). **Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials: Applications in Industry and Environment**. Wiley, New York.
- Rina, C. and Hossein, Z. (2004). **Hot-Melt Extrusion Technique**. Iranian Journal of Pharmaceutical Research.
- Rheotest. (2010). Applications for laboratories and process control. Ottendorf- Ockrilla, Germany. accessed on: May 03, 2010 ([http://www.rheotest.de/html\\_en/applications.html](http://www.rheotest.de/html_en/applications.html))
- Rosato, D.V. (1998). **Extruding Plastics a practical processing handbook**. USA: Chatham MA.
- Schantz, B. and Rohm, H. (2005). **Influence of lecithin-PGPR blends on the rheological properties of chocolate**. Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, Vol. 38, pp. 41-45.
- Servais, C. and Ranc, H. et al. (2003). **Determination of chocolate viscosity**, The Journal of Texture Studies, Vol. 267, pp. 204-210,
- Shah, R.D., Kabadi M., Pope, D.G. and Augsburg, L.L. (1994). **Physicomechanical characterization of the extrusion-spheronization process**. Pharm. Res. 11: 355-360.
- Sokmen, A. and Gunes, G. (2006). **Influence of some bulk sweeteners on rheological properties of chocolate**. LWT, Vol. 39, pp. 1053-1058.
- Tadmor, Z. and Klein, I. (1970). **Engineering Principles of Plasticating Extrusion**. Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 152-158.
- The Institute of Nutrition. (2017). **Extruder Design**. Mahidol University.
- VIVAR-VERA, G. et al. (2008). **Chonching - Rheological and structural changes of chocolate mass**. Deutsche Lebensmittel-Rundschau, Vol. 104, pp. 376-382.

Whelan, T. and Dunning, D. (1988). **The Dynisco Extrusion Processors Handbook, 1st ed.**  
London School of Polymer Technology, London.

Yuan, L.G., Xin, W. and Li, Z. (2014). **The Effect of Screw Speed on Extrusion Quality of the  
Single-Screw Extruder.** Advanced Materials Research, Vol. 941-944.

Zhenbin, L., Min, Z., Bhesh, B. and Yuchuan, W. (2017). **3D printing: Printing precision and  
application in food sector.** Trends in Food Science & Technology,  
doi:10.1016/j.tifs.2017.08.018.





ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

P Watcharamaisakul, P Pitayachaval. (2019). **A review of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder.** International Conference on Informatics, Technology, and Engineering 2019 (InCITE 2019), The Anvaya Resort in Denpasar, Bali, Indonesia. August 22-23, 2019.

P Watcharamaisakul, P Pitayachaval. (2019). **A review of a machine design of chocolate extrusion based corotating twin screw extruder.** IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 703. 012012. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/703/1/012012.

ปริญญภ วัชรมัชสกุล, ปภากร พิทยชวล. (2563). การออกแบบสกรูลำเลียงสำหรับกระบวนการอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2563 (The Conference of Industrial Engineering Network 2020), โรงแรมพูลแมน พัทยา จี.ชลบุรี. 6-8 พฤษภาคม 2563.

PAPER • OPEN ACCESS

## A review of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder

To cite this article: P Pitayachaval and P Watcharamaisakul 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **703** 012012

View the [article online](#) for updates and enhancements.





## A review of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder

P Pitayachaval and P Watcharamaisakul

School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand

E-mail: [paphakorn@g.sut.ac.th](mailto:paphakorn@g.sut.ac.th)

**Abstract.** Based on innovation and competitive market for food industry, there are several food products which have been designed to attract customer. Since there is USD 39,431 millions of chocolate sales in 2018, USA [1], chocolate product shapes have been developed based on manufacturing process. This paper presents a review process of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder. A property of suitable chocolate for extruder was established. The pros and cons of machine extruder for food processing including, a screw extruder design were exposed. Since there were problems in the chocolate extruder, the process parameters such as barrel temperatures, feed rate, screw speed, motor load and melt pressure were established. These parameters would be applied to design screw extruder for chocolate processing.

### 1. Introduction

Several new technologies or innovations have been introduced in order to increase productivity while reducing production cost. There are several areas in food industry that have high competition, such as, the chocolate market which has market of USD 39,431 millions of chocolate sales in 2018 in USA with consumers ranging from children to adults [1]. Therefore, many technologies have been applied to increase productivity of chocolate production while enraging flavors and various shapes. Since the properties of chocolate are melted in normal temperature, flowed in a container and changed viscosity depending on the temperature, chocolate is processed via many production processes such as extrusion, printing, and so on. However, there are several problems during extrusion process such as low productivity rates, product waste and improper extrusion temperature affect to increase production costs. Therefore, the chocolate extrusion is processed with the screw extruder in order to reduce those problems, and the screw extruder has been applied to control various factors including high flexibility. This paper presented a review process of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder.

### 2. Chocolate

Chocolate is composed of nonfat particles (sugar, cocoa solids, and milk powder particles) dispersed in cocoa butter as a continuous phase [2]. The flow properties to control the quality of chocolate product of a chocolate flow is an important parameter since too low viscosity will cause the weight of the chocolate over the enrobed candy will also be too low. However, if it is too high, then bubbles may be formed and put chocolate. Moreover, the different chocolate viscosity provides distinguished



Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.  
 Published under licence by IOP Publishing Ltd

flavor, that can be detected by consumers. The perceived taste is related to the viscosity and rate of melt. Therefore, the flavor of chocolate is different between stored in the refrigerator or in a room temperature [3]. Therefore, the designs of the machine to process chocolate are important to control the parameters that affect the flow and viscosity of chocolate. Those factors affect the chocolate extrusion process because they are involved in melting, as well as extrusion through the die.

### 3. Extrusion processing in food industrial

The extrusion processing for the food industry has been widely used in production process since it provides a variety of food shapes. The products vary depending on the ingredients and the condition of the control. The Machine, called Extruder, has been incorporated with various processes. The extruder mechanism is to blend raw materials and ingredients (feed or transport section) under pressure and heat conditions to shape or meter the section from compression, and to push the product out to die. Extrusion technology has been introduced to shape a variety of food productions because there are many advantages such as saving energy, reducing labor and production costs, flexibility for several raw materials, ability for mixing ingredient, and saving space for tool installation. Those properties can also improve the quality of products as needed [4].

### 4. Screw extruder design

Hot-melt extrusion equipment consists of an extruder, auxiliary equipment for the extruder, downstream processing equipment, and other monitoring tools used for performance and product quality evaluation [5]. The extruder is typically composed of a feeding hopper, barrels, single or twin screws, and the die and screw-driving unit (figure 1). The auxiliary equipment for the extruder mainly consists of a heating/cooling device for the barrels, a conveyer belt to cool down the product and a solvent delivery pump. The monitoring devices on the equipment include temperature gauges, a screw-speed controller, an extrusion torque monitor and pressure gauges.

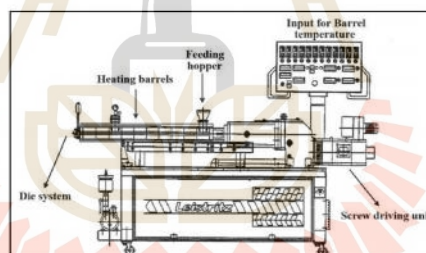
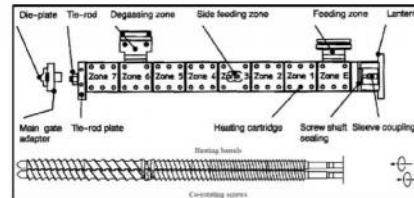
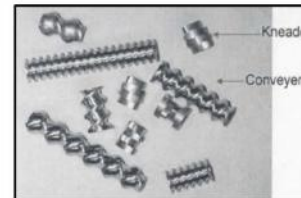


Figure 1. Micro-18 Twin screw co-rotating Leistritz extruder[6]

The theoretical approach to understanding the melt extrusion process is generally presented by dividing the process flows into four sections, as follows [7]: 1) Feeding of the extruder, 2) Conveying of mass (mixing and reduction of particle size), 3) Flow through the die, 4) Exit from the die and down-stream processing. Generally, the extruder consists of one or two rotating screw inside a stationary cylindrical barrel. The barrel is often manufactured in sections, which are bolted or clamped together. An end-plate die, connected to the end of the barrel determines the shape of the extruded product shown in figure 1 and figure 2.

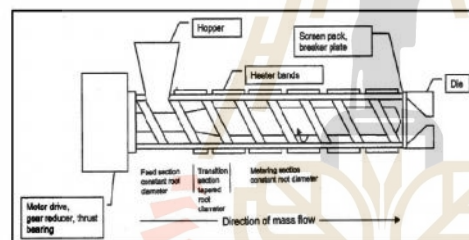


**Figure 2.** Heating barrels and co-rotating screws for hot-melt extruder [6]

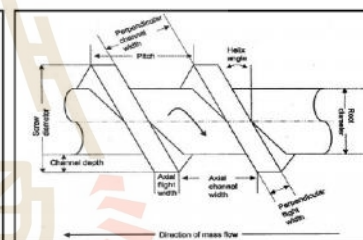


**Figure 3.** Screw and kneading elements [6]

The heat that is generated from friction force is required to melt or fuse the material. This force is a shear force occurring between the rotating screws and the wall of the barrel that is mounted with electric or liquid heaters [8]. Most commercial extruders have a modular design, providing a choice of screws or interchangeable sections which modify the configuration of the feed, transition, and metering zones. The modular design has been introduced to meet special process requirements, such as, increase high shear extrusion, addition more solvent and enlarge evaporate solvent from raw material. Modifying screw designs also allow the extruder to perform a mixing and reduction of particle size in addition to extrusion, so that material can be blended into the extrudate or even dissolved, as shown in figure 3.



**Figure 4.** Component parts of single-screw extruder [6]



**Figure 5.** Extrusion screw geometry [6]

The screw and die design was available, and a practical considerations of thermoplastic extrusion were reviewed by Whelan and Dunning [9]. The extrusion channels were conventionally divided into three sections: feed zone, transition zone, and metering zone, as shown in figure 4. The starting material was fed from a hopper directly into the feed section, which has deeper flights or flights of greater pitch, as shown in figure 5. This geometry enabled the feed material to fall easily into the screw for conveying along the barrel. The pitch and helix angle determined the throughput at a constant rotation speed of the screws. The material was transported as a solid plug to the transition zone where it was mixed, compressed, melted and plasticized. Compression was developed into two types: (1) decreasing the thread pitch while keeping a constant flight depth, and (2) decreasing flight depth but keeping a constant thread pitch [10]. Both types resulted in increasing pressure as the material moved along the barrel. The melt conveyed by circulation in a helical path by means of transverse flow, drag flow, pressure flow and leakage; the latter two mechanisms reversed the flow of material along the barrel. The space between screw diameter and width of the barrel is normally in the range of 0.1-0.2 mm [8]. The material reaches the metering zone in the form of a homogeneous plastic

melt suitable for extrusion. To extrude a uniform part thickness, flow must be consistent without stagnant zones right up to the die entrance. The function of the metering zone is to eliminate pulsating flow and ensure a uniform delivery rate through the die cavity [7].

### 5. Twin screw extrusion

The twin-screw extruder has two agitator assemblies mounted on parallel shafts. These shafts are driven through a splitter/reducer gearbox and rotate together in the same direction of rotation (co-rotating) or in the opposite direction (counter rotating) and are often fully intermeshing. In such case, the agitator element wipes both the surface of the corresponding element on the adjacent shaft, and the internal surfaces of the mixing chamber and ensures a narrow and well-defined residence time distribution. In general, co-rotating shafts have better mixing capabilities as the surfaces of the screws move towards each other. This leads to a sharp change in mass flow between the screw surfaces [7]. As the screws rotate, the flight of one screw element wipes the flank of the adjacent screw, causing material to transfer from one screw to the other. In this manner the material is transported along the extruder barrel. The twin-screw extruder was characterized by the following descriptive features [8]: 1) Short residence time: The residence time in the twin-screw extruder in a typical extrusion processes ranges from 5-10 minutes depending on the feed rate and screw speed, 2) Self-wiping screw profile: The self-wiping screw profile is the flight of the one screw wipes the root of the screw on the shaft next to it, ensures near complete emptying of the equipment and minimizes product wastage on shutdown, 3) Minimum inventory: Continuous operation of the equipment coupled with the continuous feeding of the material helps in reducing inventories of work in progress. This is important when processing valuable or potentially hazardous materials, 4) Versatility: Operating parameters can be changed easily and continuously to change extrusion rate or mixing action. The segmented screw elements allow agitator designs to be easily optimized to suit a particular application. Die plates can also be easily exchanged to alter the extrudate diameter. This allows processing of many different formulations on a single machine, leading to good equipment utilization. Polymers with a wide range of viscoelastic and melt viscosities may be processed and even fine powders may be directly fed into the system, 5) Superior mixing: The screws have various mixing elements which impart two types of mixing, distributive mixing and dispersive mixing. The distributive mixing ideally maximizes the division and recombine the material while minimizing energy. The dispersive mixing ideally breaks droplet or solid domains to fine morphologies using energy at or slightly above the threshold level needed. This mixing aids in efficient compounding of two or more materials in the twin-screw extruder.

Typical twin-screw laboratory scale machines have a diameter of 16-18 mm and length of four to ten times the diameter. Atypical throughput for this type of equipment is 0.5- 5 gm/min. As the residence time in the extruder is rather short and the temperature of all the barrels are independent and can be accurately controlled from low temperatures (30°C) to high temperatures (300°C), degradation by heat can be minimized [8]. Extrusion processing requires close monitoring and understanding the various parameters: viscosity and variation of viscosity with shear rate and temperature, elasticity and extensional flow over hot metal surfaces. Today, extruders allow in-process monitoring and control of parameters, such as the temperature in the extruder, head and die as well as pressure in extruder and die [11].

### 6. Extrusion parameters

The main monitoring and controlling parameters are barrel temperatures, feed rate, screw speed, motor load and melt pressure. Barrel temperature, feed rate and screw speed are controlling parameters and motor load and melt pressure are monitoring parameters. 1) Barrel temperatures: The glass transition or melting temperatures of polymers and drug usually determines the barrel temperature, 2) Feed rate and screw speed. The constant feeding rate and screw speed throughout the process is important as the combination of these two factors establishes the level of fill in extruder. This is critical to the process, because it governs the balance between the weak and strong mass transfer mode [8]. Due to constant feed rate and screw speed, there will be a constant amount of material in the extruder and thus the

shear stress and residence time applied to material remains constant, 3) The motor load and melt pressure: These parameters depend on feed rate and screw speed. With constant feed rate and screw speed these parameters depend upon the molecular weight of polymer and drug as well as polymer miscibility in binary mixtures [7].

#### 7. Co-rotating and counter rotating twin screw

Since there are varieties of raw materials to mix into chocolates, the co-rotating twin screw extruders has been interesting to investigate in order to improve chocolate extruder machine. The twin screw extruder has been classified into two types as following [12]: 1. Based on screw rotation direction: co-rotating and counter-rotating, as shown in figure 6, 2. Based on degree of meshing: non overlap (non-intermeshing) and overlaps which are a partially intermeshing and a fully intermeshing as shown in figure 7.

The range of twin screw extruder operation is during low speed (10-40 rpm) to high speed (200-500 rpm). In most industries, counter-rotating twin screw extruders are preferred because they have better conveying performance than co-rotating twin screw extruders as well as counter-rotating twin screw extruders and the heat generated by the shear is less [12].

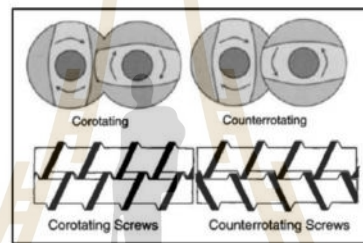


Figure 6. Screw rotation direction, co-rotating screw and counter-rotating [6]

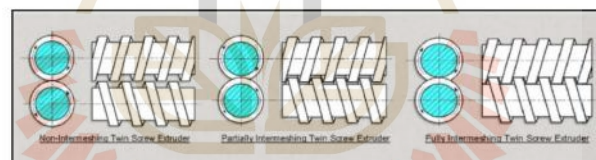


Figure 7. The amount of overlap between the screws in the twin-screw extruder [6]

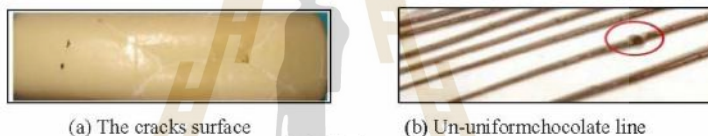
Twin screw extruder offers advantages over single screw extruder in that it does not require a drag force to push the material. Less shear results in less shear heat, more efficient mixing and less flexibility for low speed applications [6]. A comparison of screw parameters was concluded as table 1.

**Table 1.** A review of investigating screw parameters.

Researchers	Year	Screw parameters				
		Single screw extruder	Twin screw extruder	Ram extruder	Screw speed	Material temperature
Milivoje M. Kostic [14]	2006	die design	-	-	-	-
Vivar-Vera [15]	2008	-	-	-	40-60rpm	40- 80°C
HesamAnvariArdakani [16]	2014	-	-	-	-	30- 50°C
Chris Rauwendaal [1]	2015	solving extrusion problems	-	-	50 rpm	50 - 100°C

### 8. Screw extrusion problems

Although there are several benefits of screw extrusion e.g. available for many chocolate formulas, flexible for process parameters and suitable for continuous process, there are many extrusion problems such as shape accuracy, appearance problems, functional product properties, high melt temperature, high motor load, wear of screw and/or barrel. Moreover, process problems had been mentioned [1] such as low yield productivity, and products defected, as shown in figure 8. A non-appropriate extrusion temperature affects to product surface that increases production cost, as shown in Figure 8(a), and to chocolate state that constructs un-uniform chocolate line, as shown in figure 8(b).



(a) The cracks surface

(b) Un-uniformchocolate line

**Figure 8.** Defective product [13]

### 9. Future experimental design

Based on the literature reviews, the temperature and screw speed parameters affected the product shape and flaw. However, there were a few studies on twin screw condition. In order to improve product development, the co-rotating twin screw extrusion will be investigated as a future work to determine suitable conditions such as screw speed and appropriate temperature for extrusion process. The co-rotating twin screw for chocolate extruder will be conducted based on two parameters that are screw speed and temperature in barrel. Then, the width of the extruded chocolate lines and the error between extruded chocolate and nozzle diameter will be measured as the results in which the design tolerance will be controlled with in  $\pm 0.1$  millimeters.

### 10. Conclusion

Screw extrusion is widely used in the food industry e.g. pasta and dessert. One of the desserts with high market value is chocolate, in which chocolate is also capable of melting and extrusion. The extruder also has many problems in the manufacturing process, such as low productivity and defective products. As a result, the extruder design has been investigated to improve process efficiency and reduce the production problems that occurred during extrusion process. The co-rotating twin-screw extruder has been redesigned in order to reduce product flaws while increase productivity. Since co-rotating twin-screw composes of feeder element, transition element and metering element, the advantages of co-rotating twin-screw are well mix chocolate paste and good conveying performance of paste products. However, the process parameters of co-rotating twin-screw chocolate extrusion should be investigated in order to minimize screw extrusion problems as a future work.

#### Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the Suranaree University of Technology, in particular School of Industrial Engineering, Institute of Engineering for support the research

#### References

- [1] Chris R 2015 Effective troubleshooting of extrusion problems *Proc. Reg. Conf. Graz Polym. Processing Soc. (PPS)*
- [2] Schantz B and Rohm H 2005 Influence of lecithin-PGPR blends on the rheological properties of chocolate *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie* **38** p 41-5
- [3] Beckett ST 2009 *The Science of Chocolate* vol 2 (Cambridge: Royal Society of Chemistry Paperbacks) p 240
- [4] The Institute of Nutrition 2017 *Extruder Design* (Mahidol University)
- [5] Kruder G A 1985 *Extrusion* vol 1, 2<sup>nd</sup> ed John Wiley and Sons Inc (New York: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering) p 571-631
- [6] Rosato DV 1998 *Extruding Plastics a practical processing handbook* (USA: Chatham MA)
- [7] Breitenbach J 2002 *Melt extrusion: from process to drug delivery technology* (Biopharm: EurJ Pharm) chapter 54 p 107-17
- [8] Martin C 2001 *Guidelines for Operation of Leistritz Twin screw Extruder* (Somerville: American Leistritz Corporation)
- [9] Whelan T and Dunning D 1988 *The Dynisco Extrusion Processors Handbook*, 1<sup>st</sup> ed (London: London School of Polymer Technology)
- [10] Johnson P S 1982 *Development in Extrusion Science and Technology* (Ontario: Polysar technical publication)
- [11] Shah R D, Kabadi M, Pope D G and Augsburg L L 1994 Physicomechanical characterization of the extrusions pherionization process *Pharm. Res.* chapter 11 p 355- 60
- [12] Nicholas P 1998 *Cheremisinoff: Guidebook to Extrusion Technology* (New York: Potsdam Clarkson College of Technology)
- [13] Arun J S, George M, Kalpana K, Janardhana S, Jaya J and Jaina G 2014 Defects identification in chocolates using neural fuzzy interface segmentation *Int. J. Eng. Sci. Inv.* **3** p 50-7
- [14] Milivoje M K 2006 *Design of Extrusion Dies* (Encyclopedia of Chemical Processing)
- [15] Vivar-Vera G, Torrestiana-Sanchez B, Monroy-Rivera J A and Fuente E B 2008 *Chonching Rheological and Structural Changes of Chocolate Mass* (*Deutsche Lebensmittel-Rundschau*) **104** p 376-82
- [16] Ardakani H A, Mitsoulis E and Hatzikiriakos S G 2014 Capillary Flow of Milk Chocolate J Non-Newtonian Fluid Mech. **210** p 56-65

## การออกแบบสกรูลำเลียงสำหรับกระบวนการอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม A Screw design for the Chocolate Strands Extrusion process

ปภากร พิทยชาวล<sup>1</sup> ปุณณภพ วัชรชัยสกุล<sup>2</sup>

Paphakorn Pitayachaval<sup>1</sup> Punnaphop Watcharamaisakul<sup>2</sup>

paphakorn@s.sut.ac.th<sup>1</sup> punnaphop.w@gmail.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

กระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู (Screw Extrusion Process) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตแบบต่อเนื่องที่ใช้ในอุตสาหกรรม การขึ้นรูปช็อกโกแลต เนื่องจากช็อกโกแลตมีคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความหนืดและความเค้นเฉือน ทำให้ช็อกโกแลตสามารถไหล ผ่านสกรูและขึ้นรูปได้ดี สกรูจึงถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิตช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการคำนวณ ค่าความลึกของช่องสกรูเพื่อนำไปออกแบบรูปร่างสกรูในการอัดรีดช็อกโกแลตให้สามารถขึ้นรูปได้ตามที่ต้องการ โดยทำการศึกษา พฤติกรรมการไหลเมื่ออุณหภูมิของช็อกโกแลตเปลี่ยนไป โดยกำหนดตัวแปรต้นคือ อุณหภูมิ ตัวแปรตามคือ ค่าความหนืดและค่าความ เค้นเฉือน เพื่อนำไปคำนวณและออกแบบความลึกของสกรูที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปช็อกโกแลตตามอัตราส่วนผสมที่ควบคุม โดย การทดลองพบว่าการขึ้นรูปช็อกโกแลตตามอัตราส่วนผสมที่ควบคุมนั้นความลึกของช่องสกรูมีค่าผกผันกับอุณหภูมิของช็อกโกแลตที่ขึ้น รูป ซึ่งนำไปสู่การลดความสูญเสียของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูป และความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักร

**คำสำคัญ :** ช็อกโกแลต, คุณสมบัติการไหล, การทดสอบคุณสมบัติการไหล, กระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู, การออกแบบสกรูอัดรีด

### Abstract

The screw extrusion process is a continuous process used in the forming industry, including the chocolate forming industry. Chocolate has physical properties such as viscosity and shear stress. Thus, chocolate able to flow through the screw and mold well. In addition, screw is used in the production of chocolate strands extrusion process. The purpose of this research is calculate the screw channel depth by viscosity and shear stress measurement in order to design the screw shape in the extrusion of chocolate for able to form products as desired. The initial variable is temperature. Define dependent variables are viscosity and shear stress. Then calculate and design the suitable screw channel depth for extrude chocolate according to the controlled ingredient ratio. In the experiment, found that screw channel depth scale for extrude this chocolate formula. In addition, found that screw channel depth inversely proportional with temperature of chocolate. Thus, experiment results leads to design screw and extrusion process for reduction of product waste and machine damage risking.

**Keywords :** Chocolate, Flow properties, Flow properties measurement, Screw extrusion, Screw extrusion design

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



## 1. บทนำ

ช็อกโกแลตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าทางการตลาดได้อย่างมาก โดยตลาดช็อกโกแลตในไทยมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นปี 2554-2558 โดยทั้ง 4 ปีนี้สามารถสร้างมูลค่ารวมได้ถึง 24,838 ล้านบาท[1] ในปัจจุบันมีการแข่งขันทั้งในด้านของการพัฒนาสูตรอาหาร ด้านการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต ด้านกรรมวิธีการผลิต และด้านการลดการผลิต โดยหนึ่งกรรมวิธีที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมอาหารคือ กระบวนการอัดแบบใช้สกรู (Screw extrusion) ซึ่งมีข้อดีในเรื่องการเพิ่มกำลังการผลิต การปรับปรุงสูตรผลิตภัณฑ์ การสร้างลักษณะรูปร่างที่มีความหลากหลาย เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตที่มีความต่อเนื่อง[2] นอกจากนี้การศึกษาด้านอาหารมีเตอร์และออกแบบเครื่องมือการผลิตที่มีความเหมาะสมในการผลิตจะช่วยให้ป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องจักรและผลิตภัณฑ์ ทั้งยังทำให้สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้[3] ซึ่งปัญหาจากการที่ได้ทำการศึกษาคือ ปัญหาที่ไม่สามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้เต็มกำลังและเกิดการรองานขึ้นในกระบวนการผลิต จึงเป็นที่มาในการศึกษาการนำกระบวนการอัดแบบใช้สกรูมาประยุกต์ใช้ในการผลิตช็อกโกแลตและออกแบบสกรูที่เหมาะสมในการอัดรีด นำไปสู่การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการ

### 1.1 ช็อกโกแลต

ช็อกโกแลตจัดเป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานในกลุ่มที่มีไขมันเป็นโครงสร้างหลัก ผลิตภัณฑ์กลุ่มนี้จะมีไขมันที่ส่วนผสมอื่นๆ เช่น ผัก น้ำตาล ซึ่งตัวที่บดละเอียด ของแข็งจากนมและเนือโกโก้ให้สมบัติของไขมันที่เป็นโครงสร้างหลักของผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความอ่อนหรือแข็ง (Hardness) ของเนื้อสัมผัส (Texture) และความรู้สึกเมื่อช็อกโกแลตอยู่ในปาก ช็อกโกแลตมีส่วนผสมหลักคือเนือโกโก้ ซึ่งได้จากเมล็ดของต้นโกโก้ที่คั่วแล้ว ปริมาณของโกโก้เป็นปัจจัยหนึ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ช็อกโกแลตที่มีปริมาณโกโก้สูงกว่าจะมีคุณภาพดีกว่า ซึ่งผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตอาจมีส่วนผสมอื่นๆ เช่น น้ำตาล นม ถั่วและผลไม้ต่างๆ เพื่อให้เกิดความหลากหลายในรูปแบบและรสชาติ นอกจากนี้ระยะเวลา อุณหภูมิและการคั่วเมล็ดโกโก้มีส่วนทำให้รสชาติแตกต่างกันด้วย โดยสามารถช็อกโกแลตแบ่งเป็น 4 ประเภทหลัก[4] คือ

- ช็อกโกแลตที่หวาน (Semi-sweet chocolate) ประกอบด้วยเนือโกโก้เหลว เนือโกโก้ และน้ำตาลเล็กน้อย ใช้ทำขนมเค้ก คุกกี้ บราวนี่ มีปริมาณเนือโกโก้ (Cocoa solid) ประมาณ 40 – 60 %
- ช็อกโกแลตนม (Milk chocolate) ประกอบด้วยเนือโกโก้ เนือโกโก้ น้ำตาลและนมผง โดยส่วนมากจะมีส่วนผสมของนมผงมากกว่าเนือโกโก้ มีเนือโกโก้ ประมาณ 10 – 20 % และนมผงประมาณ 12 %
- ช็อกโกแลตขาว (White chocolate) ประกอบด้วยเนือโกโก้ น้ำตาลและนมผง ไม่มีส่วนผสมของเนือโกโก้ แต่อาจมีการเติมวานิลลาหรือสารแต่งกลิ่น ซึ่งในบางประเทศจะไม่เรียกช็อกโกแลตชนิดนี้ว่าช็อกโกแลต เพราะไม่มีส่วนผสมของเนือโกโก้

- ช็อกโกแลตดำ (Dark chocolate) มีทั้งชนิดที่หวาน หวานปนขม และรสขามส่วนประกอบคือเนือโกโก้และเนือโกโก้ ส่วนนมผงอาจมีเล็กน้อยหรือไม่เลย มีเนือโกโก้ประมาณ 50 – 85 %

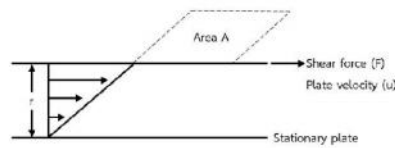
#### 1.1.1 คุณสมบัติของช็อกโกแลต

ช็อกโกแลตมีคุณสมบัติในการหลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนและมีความสามารถในการไหลซึ่ง คุณสมบัติการไหลของช็อกโกแลตมีความสำคัญเนื่องจากควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งจำเป็น โดยเรียกคุณสมบัติเหล่านี้ว่า Chocolate rheology โดยคุณสมบัติการไหลขึ้นกับความหนืดและอุณหภูมิที่ช็อกโกแลตได้รับ[5] นอกจากนี้ความหนืดยังส่งผลต่อรสชาติของช็อกโกแลตขณะอยู่ในปาก ดังนั้นผู้บริโภคจึงสามารถรับรู้การไหลของช็อกโกแลตในระหว่างการรับประทานได้ โดยรสชาติที่รับรู้ขึ้นอยู่กับการสัมผัสซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืดและอัตราการหลอมเหลวของช็อกโกแลตที่รับประทาน ดังนั้นช็อกโกแลตที่เก็บไว้ในตู้เย็นหรือในห้องอุ่นจึงมีรสชาติที่แตกต่างกัน เนื่องจากความหนืดมีความแตกต่างกัน

Chocolate rheology มีกฎวัดปริมาณในกระบวนการผลิตโดยใช้พารามิเตอร์สองตัวคือความเค้น (Yield stress) และความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมระหว่างของแข็งและของเหลวโดยมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการเฉือน (Shear rate) ในงานวิจัยบางชิ้นพบว่า[6] ช็อกโกแลตที่มีความหนืดสูงจะมีความรู้สึกที่นุ่มนวลและอยู่ในปากนานได้ขึ้น และยังได้ระบุว่าความหนืดนั้นเกี่ยวข้องกับกระบวนการกระจายขนาดอนุภาคของช็อกโกแลตเช่นกัน ดังนั้นการกำหนดคุณสมบัติการไหลของช็อกโกแลตเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและมีพื้นผิวดี รวมทั้งปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณไขมัน การกระจายขนาดอนุภาค ความชื้นอิมัลซิไฟเออร์ และอุณหภูมิเป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลต่อคุณสมบัติการไหลและค่าใช้จ่ายในการผลิต นอกจากนี้ยังได้มีการจัดประเภทการไหลของช็อกโกแลตว่าเป็นของไหลแบบ non-Newtonian fluid นอกจากนี้ยังมีการศึกษาขีดเส้นโค้งการไหลที่อัตราการเฉือนควบคุมตาม IOCCC (International Office of Cocoa, Chocolate and Confectionery)[7] อีกด้วย

### 1.2 ความหนืด

เมื่อวัสดุได้รับความเค้น (Stress) จากภายนอกโดยส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนรูปร่าง (deform) โดยคุณสมบัติซึ่งวัดผลพยายามต่อต้านการเปลี่ยนรูปร่าง (deformation) นี้ จะเรียกว่า ความหนืด (Viscosity) ที่พิจารณาผ่านวัตถุ 2 แผ่น วางห่างกันในระยะ  $r$  ระยะช่องว่างระหว่างแผ่นบรรจุด้วยของไหล (fluid) ถ้าแผ่นหนึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสัมพันธ์กับอีกแผ่นหนึ่งเท่ากับ  $u$  ดังแสดงในรูปที่ 1 การเคลื่อนที่นี้จะถูกขัดขวางด้วยปริทธิความหนืด (viscous reaction) ในของไหลนั้น เนื่องจากการเคลื่อนที่นี้จัดว่าเป็นการเฉือน (shear) ดังนั้นปริทธิความหนืดจึงเรียกว่า ความหนืดเฉือน (shear viscosity)[8]



รูปที่ 1 หลักการพื้นฐานของความหนืด[8]

จากกฎของนิวตันค่าความเค้นเฉือน (Shear stress)  $\tau$  หาได้จากแรงซึ่งกระทำบนแผ่นวัตถุที่เคลื่อนที่ F และพื้นที่รับแรง A โดยเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\text{Shear stress, } \tau = \frac{F}{A} \quad (\text{Nm}^{-2}) \quad (1)$$

อัตราเฉือน (shear rate) หาได้จากความเร็ว  $u$  ที่สัมพันธ์กับระยะ  $r$  ดังนี้

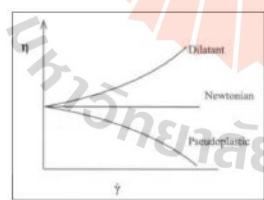
$$\text{Shear rate, } \dot{\gamma} = \frac{u}{r} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (2)$$

เนื่องจากความเค้นเฉือนแปรผันโดยตรงกับอัตราเฉือน ดังนั้น เขียนสมการได้ดังนี้

$$\tau \propto \dot{\gamma} \quad (3)$$

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (4)$$

โดยที่  $\eta$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืดเฉือน เป็นค่าคงที่ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน ความหนืดสามารถแสดงได้ในหลายหน่วย ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็นในระบบเอสไอ (SI unit) โดยความหนืดมีหน่วยเป็น Pascal seconds (Pas) หน่วยที่นิยมใช้อีกหน่วยหนึ่งในทางเทคนิค เรียกว่า พอยส์ (Poise) ความสัมพันธ์ระหว่าง Poise กับ Pascal seconds สามารถเขียนได้ดังนี้  $10 \text{ Poise} = 1 \text{ Pas}$ [9]



รูปที่ 3 แนวโน้มของความหนืดเมื่ออัตราเฉือนเปลี่ยนแปลง[9]

ซ็อกโกแลตได้ถูกนิยามว่าเป็นของไหลประเภทหนึ่งเนื่องจากซ็อกโกแลตเมื่อได้รับความร้อนแล้วจะมีสถานะที่เปลี่ยนไป มีความหนืดคุณสมบัติในการไหลเกิดขึ้น[10] แต่ด้วยส่วนประกอบของซ็อกโกแลตที่ประกอบด้วยของแข็งมากกว่าเหลวจึงทำให้มีความหนืดที่สูงกว่าของเหลวปกติโดยเรียกวีสลิตที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติดังกล่าวเรียกว่าเป็นวีลคูปแบบ Pastes[11]

1.2.1 พฤติกรรมการไหลในวีลคูปแบบ Pastes

เป็นพฤติกรรมแบบอนนิวทอนเนียน สามารถแสดงได้ในรูปแบบของการแสดงการเปลี่ยนแปลงความหนืด เมื่ออัตราเฉือนเปลี่ยนไป[12] ดังแสดงในรูปที่ 3

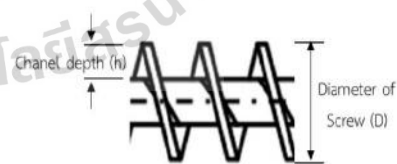
1.3 กระบวนการอัดรีดแบบใช้สกรู

1.3.1 ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการอัดรีดด้วยสกรู

พารามิเตอร์ที่สำคัญคือควบคุมคืออุณหภูมิของกระบอกอัดรีด, อัตราป้อน, ความเร็วของสกรู และภาระของมอเตอร์ โดยตัวแปรที่สำคัญหลักมีดังนี้ 1) อุณหภูมิกระบอกอัดรีด: การเปลี่ยนสถานะหรืออุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุถูกกำหนดด้วยอุณหภูมิของกระบอกอัดรีด 2) อัตราการป้อนและความเร็วของสกรู: อัตราการป้อนและความเร็วของสกรูที่คงที่ในตลอดกระบวนการมีความสำคัญ เพราะปัจจัยทั้งสองนี้จะกำหนดปริมาณการเติมวัสดุเข้าสู่เครื่องอัดรีด[13] หากอัตราการป้อนและความเร็วของสกรูคงที่ จะส่งผลให้อัตราเฉือนและเวลาในการอัดรีดวัสดุคงที่ไปด้วย 3) ภาระมอเตอร์และแรงดันหลอม: พารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนและความเร็วของสกรู พารามิเตอร์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของวัสดุรวมไปถึงปริมาณอัตราส่วนผสมของวัสดุนั้นๆด้วย [14] ดังนั้นการออกแบบกระบวนการและการควบคุมปัจจัยการอัดรีดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะส่งผลต่อผลิตภัณฑ์และต้นทุนที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการผลิต

1.3.2 การออกแบบสกรูอัดรีด

การออกแบบสกรูอัดรีดก็มีความสำคัญเพราะตัวสกรูนี้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการและเป็นตัวกำหนดประเภทของวัสดุที่ใช้และปริมาณการผลิตโดยรวม โดยโครงสร้างลักษณะและองค์ประกอบของสกรูอัดรีดที่มีความสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งส่วนประกอบต่างๆของสกรูอัดรีดล้วนส่งผลต่อกระบวนการอัดรีด ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญของสกรูมีดังนี้



รูปที่ 4 โครงสร้างลักษณะและองค์ประกอบของสกรูอัดรีด[15]

Channel Depths (h): หากออกแบบให้มีความลึกเหมาะสมจะทำให้วัสดุไหลได้อย่างไม่ติดขัด ถ้าออกแบบให้มีความคั่นมากจะทำให้ความสามารถในการผสมดีขึ้นแต่ถ้าออกแบบให้มีความลึกมากจะทำให้การอัดรีดมีแรงดันที่สูง

Pitch: ระยะพิชชี่ของเกลียวเป็นตัวกำหนดปริมาณงานที่ความเร็วการหมุนคงที่ของสกรู

Flight Widths: เป็นความหนาของใบเกลียว ถ้ามีความหนามากจะทำให้มีความร้อนเกิดขึ้นและมีอัตราอัดรีดขึ้น ในขณะที่ถ้ามีความหนามากจะส่งผลให้ความสามารถในการผสมดีขึ้นแต่อัตราการอัดรีดลดลง

Length of Screw (L): ความยาวของสกรูส่งผลโดยตรงกับการผสมและความร้อนในวัสดุ โดยความยาวนี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุและลักษณะผลิตภัณฑ์

Diameter of Screw (D): ส่งผลโดยตรงกับกำลังอัดและกำลังการผลิต ยิ่งมีค่ามากจะทำให้สกรูมีขนาดใหญ่มากและรองรับวัสดุได้มากกว่าไปถึงการอัดรีดวัสดุที่มีอัตราไหลมากได้อีกด้วย[15]

ในการออกแบบสกรูนั้นจำเป็นจะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่จะใช้ในการคำนวณ ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิที่ใช้, ความเร็วรอบที่ใช้อัดรีด, คุณสมบัติของวัสดุอัดรีด, กำลังการผลิตที่ต้องการ เป็นต้น โดยคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนด ลักษณะและขนาดของอุปกรณ์หรือเครื่องอัดรีดให้เหมาะสมกับค่าพารามิเตอร์ ซึ่งการออกแบบสกรูอัดรีดนั้นจะออกแบบโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุและความเร็วรอบที่ใช้อัดรีดเป็นหลัก โดยประกอบไปด้วย ค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity), ค่าความเค้นเฉือน (shear strain) และค่าอัตราเฉือน (shear rate)[16] ดังนั้นจึงได้ทำการทดสอบความหนืดของวัสดุที่เป็นช็อกโกแลตเพื่อระบุค่าความหนืดเฉือนและค่าความเค้นเฉือน แล้วนำมาคำนวณหาอัตราเฉือนโดยคำนวณได้จากสมการที่ (4) เมื่อได้ค่าอัตราเฉือนแล้วจึงนำมาคำนวณในสมการออกแบบสกรู โดยแทนค่าความเร็วรอบ(N), อัตราเฉือน( $\dot{\gamma}$ ) และกำหนดค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (D) จากปริมาณการผลิตลงในสมการที่ (5) เพื่อหาค่าความลึกของช่องสกรู (h)

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times h} \quad (s^{-1}) \quad (5)$$

โดยที่  $\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน (Shear rate, 1/s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Diameter of Screw, mm.)

N คือ ความเร็วรอบ (Screw speed, rpm)

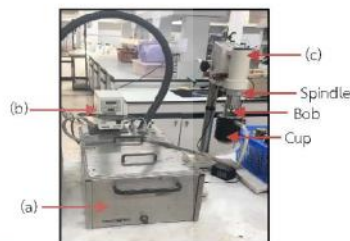
h คือ ความลึกของช่องสกรู (Channel Depth, mm.)

## 2. การทดลอง

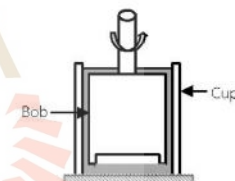
### 2.1 ความหนืดและความเค้นเฉือน

เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความหนืดและความเค้นเฉือน คือ เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Concentric cylinder viscometer) ซึ่งมี

ขนาดเล็กกะทัดรัด ง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน และสามารถวัดความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความหนืดได้อย่างต่อเนื่อง[17] การทดลองนี้ใช้เครื่องวัดความหนืดยี่ห้อ HAAKE Viscotester รุ่น 550 ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบของแกนหมุน (Bob) ได้โดยส่วนประกอบของเครื่องแสดงในรูปที่ 5 ประกอบด้วย (a) อ่างน้ำ (Water bath) ใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิโดยการให้ความร้อนที่น้ำ (b) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Heater) ใช้สำหรับกำหนดอุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำ (Water bath) และ (c) เครื่องมือวัดความหนืดแบบแกนหมุน ซึ่งจะประกอบด้วย ถ้วย(cup) และจานหมุน(bob) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยช็อกโกแลตจะถูกบรรจุในถ้วย (Cup) ส่วนแกนหมุน (Bob) จะทำหน้าที่หมุนและเมื่อเนื้อช็อกโกแลตเพื่อวัดค่าความหนืด พร้อมแสดงค่าที่วัดได้ผ่านทางหน้าจอ



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่อง HAAKE Viscotester รุ่น 550



รูปที่ 6 เครื่องมือวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Concentric cylinder viscometer)

### 2.2 การออกแบบการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการกำหนดตัวแปรควบคุม คือ ช็อกโกแลตสูตรควบคุมและความเร็วรอบของ spindle เนื่องจากในการทดสอบต้องการวัดผลกระทบของอุณหภูมิมากกว่าความเร็วรอบ ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าความเร็วรอบ spindle เป็นตัวแปรควบคุมโดยใช้ค่าที่ 4 รอบ ต่อนาที ตัวแปรต้น คือ ค่าอุณหภูมิทดลอง 11 ค่า ได้แก่ 50, 55, 60, 65, 70, 75, 85 ,90, 95 และ 97 องศาเซลเซียส และตัวแปรตาม คือ ค่าความหนืดและความเค้นเฉือน

The Conference of Industrial Engineering Network (IE NETWORK 2020)

การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2563

6-8 พฤษภาคม 2563 โรงแรมพูลแมน พัทยา จี จ.ชลบุรี

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. วัดความหนืดด้วยเครื่อง HAAKE Viscotester รุ่น 550
2. คำนวณค่าอัตราเฉือน
3. คำนวณความสัมพันธ์ของช่องสกรู (h) จากค่าอัตราเฉือนที่มากที่สุดจากขั้นตอนที่ 2.
4. ออกแบบสกรูอัตราเฉือนของโกลแลคตุรควคุม

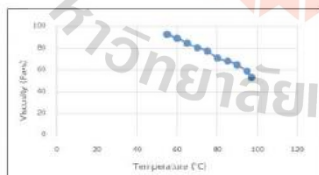
3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบความหนืดและความเค้นเฉือนของช็อกโกแลตตุรควคุม ทั้งหมด 11 ค่าอุณหภูมิสามารถบันทึกค่าและคำนวณอัตราเฉือนได้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลทดสอบความหนืดและความเค้นเฉือน

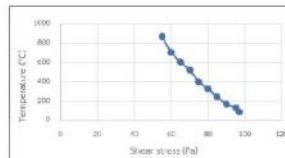
ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม		ผลการคำนวณ
Temperature (°C)	Viscosity (Pas)	Shear stress (Pa)	Shear rate (1/s)
97	53.78	93.7248	1.7427
95	59.262	132.1242	2.229
90	64.776	170.5626	2.6331
85	68.572	249.0228	3.6315
80	71.222	327.1242	4.5930
75	77.52	404.3442	5.2159
70	80.762	522.1242	6.4649
65	84.63	610.2642	7.2109
60	89.364	707.7642	7.9200
55	92.952	867.5004	9.3327
50	วัดค่าไม่ได้	วัดค่าไม่ได้	-

จากตารางที่ 1 หากสังเกตค่าความหนืดที่ได้จากการทดสอบจะพบว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหากอุณหภูมิลดลง ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยค่าความหนืดสูงสุดคือ 92.952 Pas อยู่ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิค่าสุดคือ 50 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าช็อกโกแลตตุรควคุมแข็งตัวเกินกว่าจะทำการทดสอบได้ จึงทำให้ไม่สามารถเป็นผลการทดลองได้



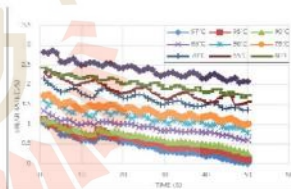
รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของช็อกโกแลตตุรควคุม

กล่าวคือยิ่งอุณหภูมิต่ำความหนืดของช็อกโกแลตตุรควคุมยิ่งมีค่ามากขึ้น และเมื่อสังเกตค่าของความเค้นเฉือนจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าความเค้นเฉือนของช็อกโกแลตตุรควคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความหนืด ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยค่าความเค้นเฉือนสูงสุดคือ 867.5 Pa อยู่ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอุณหภูมิของช็อกโกแลตตุรควคุม

เมื่อคำนวณค่าอัตราเฉือนที่ได้จากการทดสอบพบว่าค่าอัตราเฉือนสูงสุดของช็อกโกแลตตุรควคุม คือ 9.3327 1/s อยู่ที่อุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาพล็อตเป็นกราฟเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าช็อกโกแลตตุรควคุมเป็นวัสดุที่มีการไหลแบบ Dilatant ซึ่งค่าอัตราเฉือนจะแปรผันตรงกับค่าความหนืดและความเค้นเฉือนโดยเพิ่มขึ้นกับเวลา ซึ่งอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้อัตราเฉือนของช็อกโกแลตตุรควคุมเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการใช้ในงานอัดรีดจึงจึงต้องมีการกำหนดอุณหภูมิให้เหมาะสมกับช็อกโกแลตตุรควคุมนี้ เพราะอุณหภูมิต่ำค่าแปรผันกับความหนืด ถ้าหากความหนืดมีค่าสูงอาจทำให้การอัดรีดช็อกโกแลตตุรควคุมนี้เกิดอุปสรรคได้ เช่น ช็อกโกแลตไม่สามารถไหลออกจากหน้าแม่พิมพ์ได้ เป็นต้น อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์และผลิตภัณฑ์



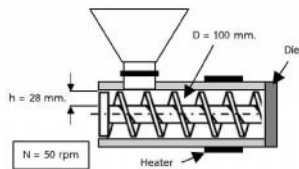
รูปที่ 9 กราฟแสดงอัตราเฉือนที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นของช็อกโกแลตตุรควคุม

จากนั้นได้นำค่าอัตราเฉือนจากการทดสอบที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 9.3327 1/s มาทำการคำนวณเพื่อหาค่าความลึกของช่องสกรู (Channel Depth, h) โดยมีการกำหนดตัวแปรอื่นในการคำนวณ กำหนดให้ความเร็วของสกรูที่ใช้ในการอัดรีดเท่ากับ 50 rpm, เส้นผ่านศูนย์กลางสกรูเท่ากับ 100 mm. แล้วนำมาคำนวณในสมการที่ (5) จึงได้ค่าความลึกของช่องสกรูเท่ากับ 28 mm. เมื่อได้ขนาดในการออกแบบของสกรูแล้วจึงได้ทำการกำหนดปัจจัยโดยรวมที่ใช้ในงานอัดรีดด้วยสกรูที่ได้ทำการออกแบบนี้ดังแสดงในรูปที่ 10

The Conference of Industrial Engineering Network (IE NETWORK 2020)

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2563

6-8 พฤษภาคม 2563 โรงแรมพูลแมน พญา จี จ.ชลบุรี



รูปที่ 10 เครื่องอัดรีดที่มีสกรูที่ทำการออกแบบ

โดยประสิทธิภาพหรือความสามารถของสกรูที่ได้ทำการออกแบบจากการทดสอบความหนืดและความเค้นเฉือนนี้ สามารถอัดรีดวัสดุที่มีพฤติกรรม การไหลแบบ Dilatant ที่มีค่าอัตราเฉือนตั้งแต่ 1.7 - 9.3 1/s และมีค่าความหนืดตั้งแต่ 53 - 92 Pa.s รวมไปถึงการทำความสะอาดสกรูสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนที่ตัวสกรูเพื่อให้ช็อกโกแลตได้รับความร้อน จากนั้นจึงใช้น้ำล้างทำความสะอาดได้ตามปกติ ซึ่งในการทดลองและ ออกแบบในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองต่อไปในเรื่องของการทดสอบประสิทธิภาพในการอัดรีดจริงว่าผลการทดลองที่ได้จากสกรู ที่ทำการออกแบบนั้นส่งผลต่อลักษณะผลิตภัณฑ์หรือกำลังการผลิตอย่างไร

7. สรุป

จากการทดสอบคุณสมบัติการไหลของช็อกโกแลตสูตรควบคุมด้วยเครื่องมือ ทดสอบความหนืดพบว่าช็อกโกแลตสูตรควบคุมเป็นวัสดุที่มีลักษณะการ ไหลเป็นแบบ Dilatant ซึ่งค่าอัตราเฉือนจะแปรผันตรงกับค่าความหนืดและ ความเค้นเฉือนโดยมีขึ้นกับเวลา ซึ่งอุณหภูมิเป็นค่าแปรสาคัญที่ทำให้ความ เหนืดเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อนำค่าอัตราเฉือนของช็อกโกแลตสูตรควบคุมมา ทำการคำนวณเพื่อทำการหาค่าความลึกของสกรู (h) ที่ใช้ในการอัดรีดที่ ความเร็ว 50 rpm พบว่ามีสกรูที่มีความลึกของสกรู 28 mm. จึงจะ เหมาะสมต่อการอัดรีดช็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยสกรูที่ทำการออกแบบ สามารถอัดรีดวัสดุที่มีพฤติกรรมการไหลแบบ Dilatant ที่มีค่าอัตราเฉือน ตั้งแต่ 1.7 - 9.3 1/s และมีค่าความหนืดตั้งแต่ 53 - 92 Pa.s

8. กิตติกรรมประกาศ

สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีให้การสนับสนุนงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- 1 ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. 2559. "ตลาดช็อกโกแลตในประเทศไทย". Thailand food market report. Thailand.
- 2 The Institute of Nutrition. 2017. "Extruder Design" (Mahidol University).
- 3 Chamil Abeykoon. 2016. "Single screw extrusion control: A comprehensive review and directions for

- 4 นายกิตติศักดิ์ ยศอินทร์. 2552. "ช็อกโกแลต: ชมหวานเมท์จอร์จรี". บทความวิทยุกระจายเสียงรายการ วันนี้กับวิทยาศาสตร์ครั้งที่ 18 (สำนักบริหารและรับรองห้องปฏิบัติการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ).
- 5 Beckett ST. 2009. "The Science of Chocolate vol2" (Cambridge: Royal Society of Chemistry Paperbacks), p 240.
- 6 Sokmen, A.; Gunes, G. 2006. "Influence of some bulk sweeteners on rheological properties of chocolate". LWT, v. 39, p. 1053-1058.
- 7 Rheotest. 2010. Applications for laboratories and process control. Ottendorf- Okrilla, Germany. accessed on: May 03, 2010 ([http://www.rheotest.de/html\\_en/applications.html](http://www.rheotest.de/html_en/applications.html))
- 8 ฉัยบุตร ออกรสลา. 2553. "Fluid Mechanics". เอกสารประกอบการสอน. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน.
- 9 รศ. ดร. ยุพาพร รักษ์สกุลพิวัฒน์. 2015. "Introduction to polymer rheology and process". Subject Document. Suranaree University of Technology.
- 10 Ardakani H.; Mitsoulis E.; Hatzikiriakos S. 2014. "Capillary flow of milk chocolate". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 210, p 56-65.
- 11 P. Coussot. 2005. "Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials: Applications in Industry and Environment". Wiley, New York.
- 12 Benbow J.; Bridgwater. 1993. "Paste Flow and Extrusion". Oxford series on advanced manufacturing, chapter 4, p 25.
- 13 Martin C. 2001. "Guidelines for Operation of Leistritz Twin screw Extruder". (Somerville: American Leistritz Corporation).
- 14 Breitenbach J. 2002. "Melt extrusion: from process to drug delivery technology". (Biopharm: EurJ Pharm), chapter 54, p 107-17.
- 15 Harold F. Giles, Jr.; John R. Wagner, Jr.; Eldridge M.; Mount; 2004. "Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook". PDL Handbook Series.
- 16 Javier V.S.; Adrian L.K.; Elaine C.B.; Tim G.; Chamil A.; Phil D.C.; Jing Deng.; Kang L.; Eileen H.J.; Mark P. 2014. "The effect of melt viscosity on thermal efficiency for single screw extrusion of HDPE". Chemical engineering research and design 92, 2404-2412.
- 17 S. Morris A.; Langari R. 2016. "Measurement and Instrumentation" Theory and Application, Second Edition.

## ประวัติผู้เขียน

นายปยุตฉภ วัชรมัชสกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2539 ณ กรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา ในปีการศึกษา 2554 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพจากวิทยาลัยเทคนิค สุรนารี อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมาในปีการศึกษา 2557 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี การศึกษา 2561 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ในปีพ.ศ. 2561 ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสนำเสนอบทความวิชาการ 2 บทความ ได้แก่ A review of a machine design of chocolate extrusion based co-rotating twin screw extruder งานInternational Conference on Informatics, Technology, and Engineering 2019 (InCITE 2019), The Anvaya Resort in Denpasar, Bali, Indonesia. และการออกแบบสกรูลำเลียงสำหรับ กระบวนการอัดรีดช็อกโกแลตโรยแต่งหน้าขนม การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี2563 (The Conference of Industrial Engineering Network 2020), โรงแรมพูลแมน พัทยา จ.ชลบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี