

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพิมพ์ช็อกโกแลตด้วยเครื่อง FDM แบบอัดขึ้นรูป
ด้วยสกรูเดียว



นายณัฐวุฒิ สานค่อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**A STUDY OF PARAMETER THAT EFFECT TO SINGLE
SCREW-BASED EXTRUSION FOR CHOCOLATE
PRINTING BY FUSED DEPOSITION
MANUFACTURING (FDM)**

Nattawut Sanklong



**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 2020**

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพิมพ์ช็อกโกแลตด้วยเครื่อง FDM
แบบอัดขึ้นรูปด้วยสกรูเดี่ยว

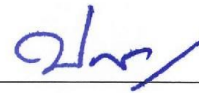
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ. ดร.นรา สมัตตภาพงศ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ปภากร พิทยชาวล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

กรรมการ



(รศ. ดร.นิวิท เจริญใจ)

กรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชอุยางกูร)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ
ประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐวุฒิ สานคต่อง : การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพิมพ์ช็อกโกแลตด้วยเครื่อง FDM แบบอัดขึ้นรูปด้วยสกรูเดี่ยว (A STUDY OF PARAMETER THAT EFFECT TO SINGLE SCREW-BASED EXTRUSION FOR CHOCOLATE PRINTING BY FUSED DEPOSITION MANUFACTURING (FDM)) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปภากร พิทยชวาล, 111 หน้า.

กระบวนการขึ้นรูป 3 มิติ หรือในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อื่น ๆ กระบวนการขึ้นรูปโดยการเติมเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง รวมถึงการขึ้นรูปขนมประเภทช็อกโกแลต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การวิจัยคือ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลต ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความกว้างของเกลียวสกรู (15, 20 และ 25 มิลลิเมตร) ความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐานพิมพ์ (3, 4 และ 5 มิลลิเมตร) และความเร็วของสกรูในการฉีดขึ้นรูป (10, 20 และ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสามระดับเต็มรูปแบบ (3k Full Factorial Design) วิเคราะห์ผลจากการเก็บค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต โดยมีค่าคาดหวังที่ขนาดเส้นมีค่าเท่ากับขนาดของหัวฉีดคือ 2 มิลลิเมตร จากการวิจัยพบว่าปัจจัยหลักทั้งสามส่งผลกระทบต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตแปรผันตรงต่อความกว้างของเกลียวสกรูและความเร็วในการอัดขึ้นรูปของสกรู แต่แปรผกผันกับความสูงของหัวฉีดกับฐานพิมพ์

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา ณัฐวุฒิ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ปภากร

NATTAWUT SANKLONG : A STUDY OF PARAMETER THAT EFFECT
TO SINGLE SCREW-BASED EXTRUSION FOR CHOCOLATE PRINTING
BY FUSED DEPOSITION MANUFACTURING (FDM). THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. PAPHAKORN PITAYACHAVAL, Ph.D., 111 PP.

ADDITIVE MANUFACTURING/SCREW- BASED EXTRUSION/CHOCOLATE

The 3D forming process or the forming process of other products is achieved using additive manufacturing and is widely used in the manufacturing industry. Chocolate bars are also made using this method. The objective of this research is to study factors that affect the result of the forming of chocolate line. The factors being studied in this research are the width of different screw threads (15 , 20 , and 25 millimeters), the height between the nozzle and the workspace (3 , 4 , and 5 millimeters), and the speed of the screw during the formation of objects (10, 20, and 30 millimeters per second). The experiment was conducted using a 3K Full Factorial Design. The analysis was done by measuring the diameter of each chocolate line with the expected value of 2 millimeters – the same as the diameter of the nozzle. The result shows that all three main factors affect the size of chocolate lines at the significance level of 0.05. The diameter of the chocolate line has a direct variation with the width of the screw thread and the speed used during the formation but has a reverse variation with the height between the nozzle and the workspace.

School of Industrial Engineering

Academic Year 2020

Student's Signature _____ 

Advisor's Signature _____ 

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลดังต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อในการให้คำปรึกษา ชี้แนะ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ตลอดจนในด้านวิชาการและด้านการดำเนินการวิจัย

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

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

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดู สั่งสอน ตลอดจนการสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจอย่างดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ณัฐวุฒิ สานคล่อง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การพิมพ์แบบ 3D มิติ หรือการผลิตสารเติมแต่ง (Additive Manufacturing, AM).....	7
2.2 เทคนิคการพิมพ์สามมิติในอุตสาหกรรมอาหาร.....	9
2.2.1 การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing).....	9
2.2.2 การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting).....	10
2.2.3 การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing).....	11
2.2.4 การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion based printing).....	11
2.3 โครงสร้างชุดเคลื่อนที่ของการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป.....	14
2.3.1 คาร์ทีเซียน (Cartesian).....	14
2.3.2 เดลต้า (Delta).....	15
2.3.3 โพล่า (Polar).....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	สกาล่า (Scara)	15
2.4	ซ็อกโกแลต	16
2.5	การวิเคราะห์อาหารด้วยเทคนิครีโอโลยี (Rheology)	17
2.6	การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบสามระดับ	20
2.7	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3	วิธีการดำเนินการวิจัย	23
3.1	การออกแบบการทดลอง.....	24
3.2	การเตรียมการทดลอง	35
3.2.1	การตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดด้วยโปรแกรม Pronterface	35
3.2.2	การตั้งค่าเครื่องฉีด	35
3.2.3	การเตรียมซ็อกโกแลตสูตรควบคุม	39
3.3	การทดลอง.....	40
3.3.1	การทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยีของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม	40
3.3.2	การฉีดเส้นซ็อกโกแลตตามแผนการทดลอง	41
3.4	การวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง	42
3.4.1	การวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลต	42
3.4.2	การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง	45
4	ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล	47
4.1	ผลการทดลอง	47
4.1.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยีของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม	47
4.1.2	ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลต.....	50
4.2	การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ Full Factorial Design	56
4.2.1	การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง	56
4.2.2	การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ทำการทดลอง	59
4.2.3	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย.....	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	บทสรุป.....	66
5.1	สรุปผลงานวิจัย.....	66
5.1.1	การศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของซ็อกโกแลต	66
5.1.2	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นซ็อกโกแลต	66
5.2	ข้อเสนอแนะ	67
5.2.1	ชนิดของของไหลมีผลต่อการออกแบบระบบหัวฉีด	67
5.2.2	ค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการฉีดเส้นซ็อกโกแลต	67
	รายการอ้างอิง	68
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตารางบันทึกผลการทดสอบความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม	71
	ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	92
	ประวัติผู้เขียน	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ปัจจัยในการทดลอง24
3.2	ตารางแผนการทดลอง.....26
3.3	การกำหนดตัวแปรในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและทดสอบคุณสมบัติ ทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม.....40
4.1	แสดงรูปเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลตในแต่ละการทดลอง.....51
4.2	ตารางแสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต.....53
4.3	ผลการหาผลกระทบของตัวแปรขนาดเกลียวของสกรู (mm), ความสูงของ หัวฉีดกับฐาน (mm) และความเร็วของการอัดขึ้นรูป (mm/s) ต่อขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลต59
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์.....64
4.5	การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย65

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เทคนิคการพิมพ์แบบ 3 มิติ	2
1.2	กลไกการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป	4
2.1	กระบวนการพื้นฐานของการพิมพ์สามมิติ	8
2.2	การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (selective sintering printing)	10
2.3	การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (binder jetting)	10
2.4	การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (inkjet printing)	11
2.5	การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (extrusion-based printing)	12
2.6	การฉีดแบบเข็มฉีดยา (Syringe-Based Extrusion)	12
2.7	การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Air Pressure Driven Extrusion)	13
2.8	การฉีดแบบสกรู (Screw-Based Extrusion)	13
2.9	คาร์ทีเซียน (Cartesian)	14
2.10	เดลต้า (Delta)	15
2.11	โพล่า (Polar)	16
2.12	สกาล่า (Scara)	26
2.13	แนวโน้มของความหนืดของไหลประเภท Newtonian fluid	18
2.14	แนวโน้มของความหนืดของไหลประเภท non-Newtonian fluid	19
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนในพฤติกรรมการไหล แบบ Newtonian fluid และ non-Newtonian fluid	19
2.16	การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^k	20
3.1	กรอบการวิจัย	23
3.2	ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา	25
3.3	โปรแกรม Pronterface	35
3.4	ชุดเคลื่อนที่ในแนว 3 แกน	36
3.5	ระบบหัวฉีดแบบสกรู	37

ถารบัญญัติ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	สกรูที่ใช้ในงานวิจัย สกรู ก ระยะพิต 15 มิลลิเมตร, สกรู ข ระยะพิต 20 มิลลิเมตร และสกรู ค ระยะพิต 25 มิลลิเมตร38
3.7	บอร์ด Arduino Mega 2560 R339
3.8	ช็อกโกแลตสูตรควบคุม40
3.9	เครื่อง Modular Compact Rheometer รุ่น MCR52.....41
3.10	อุปกรณ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลต42
3.11	ขั้นตอนการฉีดเส้นช็อกโกแลต.....43
3.12	ตำแหน่งการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม.....44
3.13	ตัวอย่างโปรแกรม Minitab และชุดคำสั่ง Analyze Factorial Design.....46
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (Viscosity (Pa s)) กับอัตราเนียน (Shear rate(1/s)).....48
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเนียน (Shear stress (Pa)) กับอัตราเนียน (Shear Rate(1/s)).....49
4.3	แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals).....56
4.4	การกระจายตัวของค่า Residual บนกราฟ Histogram57
4.5	การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order58
4.6	การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Fitted Value58
4.7	Interaction Plot ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต62
4.8	Main Effects Plot ของขนาดเกลียวของสกรู ความสูงของหัวฉีดกับฐาน และความเร็วของการอัดขึ้นรูป63
4.9	ค่าที่เหมาะสมต่อการฉีดเส้นช็อกโกแลตให้มีขนาดใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร64

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

mm	=	มิลลิเมตร
cm	=	เซนติเมตร
mm/s	=	มิลลิเมตรต่อวินาที
Pa	=	ปาสคาล
Pa•s	=	ปาสคาล วินาที
StDev	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
τ	=	ความเค้นเฉือน
γ	=	อัตราเฉือน
η	=	ความหนืด



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

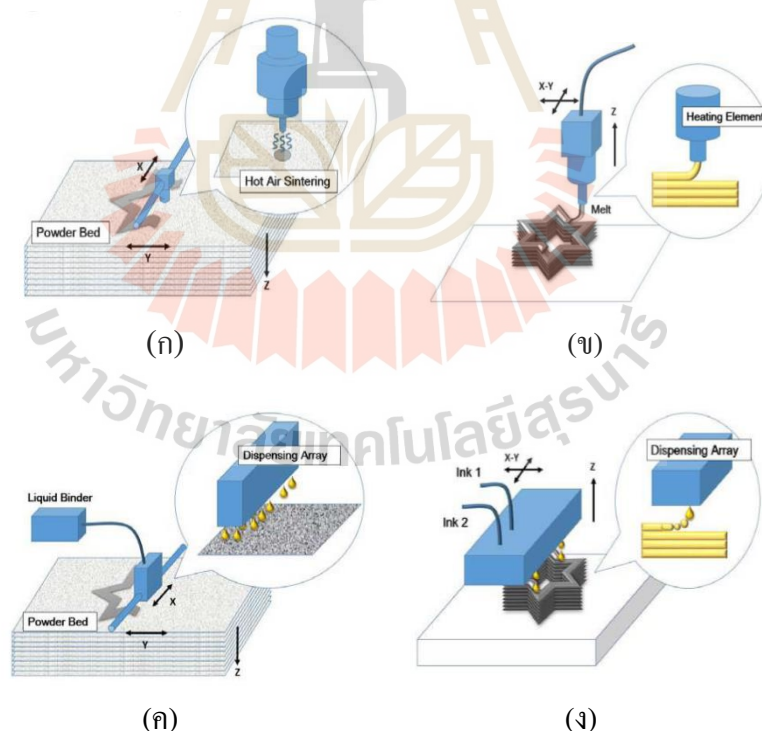
หลายปีที่ผ่านมา ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการสร้างความเปลี่ยนแปลงต่อวิถีชีวิตของผู้คน เศรษฐกิจและสังคมในปัจจุบันเป็นอย่างมาก มีเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม หรือแม้แต่เทคโนโลยีที่ช่วยให้ชีวิตของเราสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น (Liu Zhang et al., 2017) เช่น การทำธุรกรรมทางการเงินออนไลน์ สื่อ Social ต่างๆ ที่สร้างสังคมออนไลน์ขึ้นและหนึ่งในเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่นิยมและได้รับการกล่าวขานถึงมากที่สุดขณะนี้ก็คือ “3D printing” หรือเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ 3 มิติ (Dankar Haddarah et al., 2018)

การพิมพ์แบบ 3D printing หรือการผลิตสารเติมแต่ง (Additive Manufacturing : AM) เป็นกระบวนการสร้างวัตถุสามมิติจากไฟล์ CAD (Computer Aided Design) การสร้างวัตถุที่พิมพ์แบบ 3 มิติทำได้โดยใช้กระบวนการเติมเนื้อวัสดุ วัตถุจะถูกสร้างขึ้น โดยการเติมเนื้อของวัสดุทีละชั้น (Layer by Layer) ต่อเนื่องจนครบ (Sun Peng et al., 2015) ขั้นตอนการทำงานของ 3D printing สามารถแบ่งได้เป็นสามส่วนใหญ่ๆ ด้วยกันคือ 1. สร้างรูปแบบจำลองสามมิติจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประเภท CAD/CAM หรือทำการสแกนวัตถุแบบสามมิติให้ได้รูปทรงของวัตถุออกมา 2. นำข้อมูลที่ได้มาใส่เครื่องพิมพ์สามมิติ และ 3. ปลอ่อยให้ระบบสร้างวัตถุขึ้น โดยเริ่มจากชั้นล่างสุดค่อยๆ ขึ้นมาจนได้วัตถุที่ต้องการ สำหรับเวลาที่ใช้นั้นก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นความซับซ้อนของงาน หรือความเร็วของเครื่องพิมพ์ ซึ่งอาจกินเวลาตั้งแต่หลายนาที่ไปจนถึงหลายชั่วโมง (Diaz et al., 2014)

การพิมพ์ 3 มิติ ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย ในด้านชีวการแพทย์มีการนำไปสร้างเนื้อเยื่อและอวัยวะเทียมเพื่อใช้ในการผ่าตัด (Murphy and Atala, 2014) ในด้านอวกาศมีการใช้เข้ามาช่วยการซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆ ในห้องเครื่องของยานอวกาศหรือการตกแต่งภายในยานอวกาศ (Wohlers, 2014) ด้านอาคารและโครงสร้างมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปประยุกต์ใช้กับการสร้างที่พักอาศัยบนดวงจันทร์ (Gosselin Duballet et al., 2016) และล่าสุดคือการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติกับการพิมพ์อาหาร (Godoi Prakash et al., 2016)

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่นำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารมีประโยชน์หลายอย่าง เช่น การออกแบบอาหารที่สามารถปรับเปลี่ยนโภชนาการเฉพาะบุคคลได้ (Thompson Moroni et al., 2016) การใช้เทคโนโลยีนี้ช่วยให้การออกแบบอาหารที่มีรูปร่างซับซ้อนซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยการใช้แรงงานหรือแม่พิมพ์แบบธรรมดาให้สามารถผลิตโดยอาศัยไฟล์ข้อมูลการออกแบบที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อกำหนดรูปร่างของขนมและภาพที่มีสีสันลงบนพื้นผิวของอาหาร เช่น กาแฟร้อน นอกจากนี้การพิมพ์อาหาร 3 มิติยังช่วยให้สามารถปรับขนาดและปรับเปลี่ยนความต้องการด้านโภชนาการและพลังงานของแต่ละบุคคลตามความต้องการทางกายภาพและทางโภชนาการได้ การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้จะทำให้การสร้างอาหารเข้าใกล้ชิดกับลูกค้ามากขึ้นและจะทำให้ปริมาณการขนส่งลดลงซึ่งจะช่วยลดบรรจุภัณฑ์ การกระจายสินค้าและลดค่าใช้จ่ายได้

ขณะนี้เทคนิคการพิมพ์แบบ 3 มิติที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมอาหารโดยทั่วไปมี 4 ประเภท (Lanaro Forrestal et al., 2017) ได้แก่ การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) การพิมพ์แบบพองยึดเหนี่ยว (Binder jetting) การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) และการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion-based printing) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 เทคนิคการพิมพ์แบบ 3 มิติ (ก) การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) (ข) การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion-based printing) (ค) การพิมพ์แบบพองยึดเหนี่ยว (Binder jetting) (ง) การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) (Sun Peng et al., 2015)

การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งพลังงานในการเผาอนุภาคที่เป็นผง โครงสร้างของวัตถุถูกสร้างขึ้น โดยการยิงแสงเลเซอร์ไปยังจุดที่กำหนดไว้ด้วยโมเดล 3 มิติ หลังจากนั้นเพียงผงจะค่อยๆ เคลื่อนลงด้านล่าง โดยความหนาของชั้นหนึ่งชั้นขึ้นอยู่กับอนุภาคของผงแป้งที่สะสมอยู่ด้านบนและกระบวนการจะถูกทำซ้ำจนกว่าวัตถุจะสิ้นสุดลง วิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชั้นอาหารหลายชั้นในแต่ละชั้นซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุอาหารที่แตกต่างกัน (Liu Zhang et al., 2018)

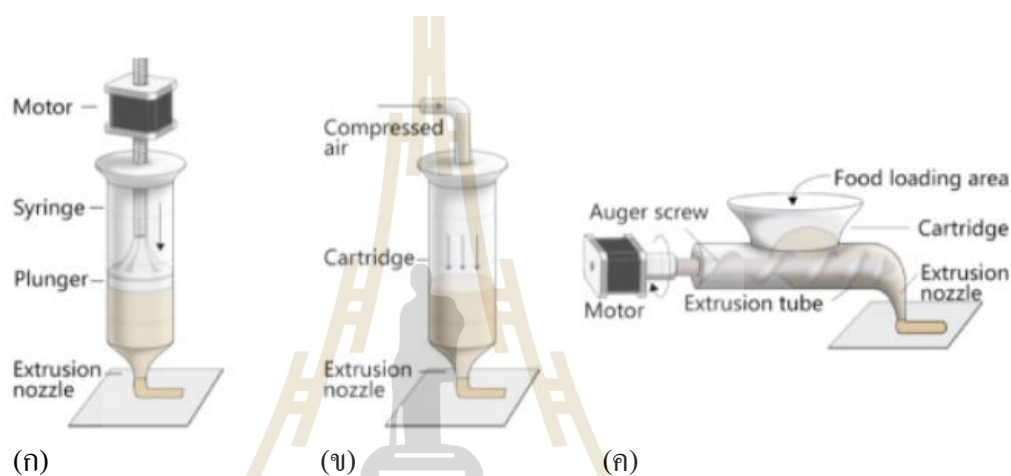
การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting) ลักษณะการทำงานจะมีความคล้ายกับแบบการพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์เพียงแต่ใช้ตัวกลางในการประสานหรือสร้างรูปร่างของผงที่เป็นของเหลวหรือกาว โดยหลักการคือการฉีดกาวหรือตัวประสานไปยังผงวัสดุเพื่อสร้างวัตถุทีละชั้นทีละชั้น จากนั้นฐานรองชิ้นงานจะเคลื่อนลงและเพิ่มผงแป้งขึ้นมาอีกชั้น กระบวนการจะทำไปจนได้วัตถุที่ต้องการ เทคนิคการผลิตนี้ช่วยให้สามารถผลิตโครงสร้างที่ซับซ้อนและยุ่งยากได้ และผงที่ไม่ใช้แล้วจะถูกนำออกมารีไซเคิลเพื่อใช้ต่อไป (Li Ghazanfari et al., 2017)

การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทส่วนใหญ่ทำงานโดยใช้ความร้อนหรือ Piezoelectric ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทหัวพิมพ์จะถูกให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงกดดันที่ผลักดันหยดละอองจากหัวฉีดออกมา เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบพายโซอิเล็กทริกมีคริสตัล Piezoelectric อยู่ภายในหัวพิมพ์เพื่อแยกของเหลวออกเป็นหยดในช่วงเวลาที่สม่ำเสมอ การใช้แรงดันไฟฟ้ากับวัสดุ Piezoelectric กระตุ้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่รวดเร็วซึ่งจะทำให้มีการหยดละอองออกจากหัวฉีด (Sun Peng et al., 2015)

สุดท้าย การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion-based printing) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมาก หลักการทำงานคือการอัด ริด หรือนิวตริคัลที่มีลักษณะเป็นของเหลว หรือกึ่งแข็งกึ่งเหลวออกมาจากหัวฉีดอย่างต่อเนื่อง โดยชุดหัวฉีดหรือฐานรองจะเป็นตัวเคลื่อนที่ขึ้นลงขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่อง (Orisaleye Adefuye et al., 2018) มีการทดลองพิมพ์อาหารจากวัสดุที่มีความหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ช็อกโกแลต น้ำตาล น้ำตาลไอซ์ซิ่ง พาสต้า ซีส เจลน้ำส้ม และมันบด เป็นต้น

กลไกการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูปที่ใช้กับการพิมพ์อาหารมี 3 กลไกด้วยกันดังรูปภาพที่ 2 คือ การฉีดแบบเข็มฉีดยา (Syringe-based extrusion) จะประกอบด้วยกระบอกเข็มสำหรับเก็บวัสดุและมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนกระบวนการอัด มอเตอร์จะทำหน้าที่ในการดันให้วัสดุออกจากกระบอกฉีดยาโดยผ่านทางหัวฉีด ความเร็วในการฉีดสามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มหรือลดได้จากการกำหนดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ การฉีดชนิดนี้เหมาะกับการฉีดวัสดุประเภทของแข็งหรือกึ่งแข็งของเหลว ต่อมาการฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Air pressure driven extrusion) เป็นการพิมพ์อาหารโดยที่อาหารไม่สัมผัสกับหัวฉีดด้านบน ระบบจะปล่อยลมออกมาตามความดันที่กำหนด ลม

จะเป็นตัวกลางในการดันให้วัสดุออกจากหัวฉีด ดังนั้นลมที่ใช้ต้องมีการกรองและทำความสะอาดเป็นอย่างดี การฉีดแบบนี้เหมาะกับวัสดุที่เป็นของเหลวหรือวัสดุที่มีความหนืดต่ำ และสุดท้ายการฉีดแบบสกรู (Screw-based extrusion) เป็นการพิมพ์ขึ้นรูปโดยใช้สกรูในการหมุนเพื่อขับเคลื่อนให้วัสดุออกจากหัวฉีด การพิมพ์แบบนี้ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นของเหลวที่มีความหนืดและความแข็งแรงทางกลสูง ตลอดกระบวนการพิมพ์โดยใช้สกรูนี้ สามารถเติมวัสดุเข้าสู่กระบอกเก็บวัสดุตลอดเวลา กล่าวคือเป็นการพิมพ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างกับการพิมพ์แบบเข็มฉีดยาและการพิมพ์แบบใช้ลมที่ไม่สามารถพิมพ์แบบต่อเนื่องได้ (Lanaro Forrestral et al., 2017)



รูปที่ 1.2 กลไกการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (ก)การฉีดแบบเข็มฉีดยา (Syringe-based extrusion) (ข) การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Air pressure driven extrusion) (ค) การฉีดแบบสกรู (Screw-based extrusion)

ช็อกโกแลตเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากที่สุดในการพิมพ์อาหาร เนื่องจากความสามารถในการหลอมละลายความสามารถในการอัดรีดและความนิยมในตลาดอาหาร (Lanaro Forrestral et al., 2017) Hao และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยพื้นฐานหลายประการเกี่ยวกับความสามารถในการพิมพ์แบบ 3 มิติ รวมถึงความสูงของหัวฉีดกับฐาน ปริมาณของช็อกโกแลตที่อัดรูปขึ้นต่อหน่วยเวลาและความเร็วในการเคลื่อนที่ จากการวิจัยครั้งนี้พวกเขาได้สร้างเครื่องช็อกโกแลตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเป็นครั้งแรกคือ Choc Edge ซึ่งสามารถพิมพ์รูปทรง 2D และ 3D ได้หลากหลายรูปแบบ และ Matthew Lanaro และคณะได้ออกแบบเครื่องพิมพ์ช็อกโกแลตต้นทุนต่ำโดยใช้ส่วนประกอบที่มีราคาไม่แพง และได้ทดลองเปลี่ยนแปลงปัจจัยการพิมพ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการพิมพ์ประกอบด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ อัตราการอัดรีดและอัตราการระบายความร้อนในกระบวนการพิมพ์ และ Matthew Lanaro ยังทิ้งท้ายในงานวิจัยของเขา

ไว้ว่าในอนาคตควรมีการศึกษาการใช้สกรูในการพิมพ์ขึ้นรูปช็อกโกแลตเพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการพิมพ์ การศึกษาเกี่ยวกับการพิมพ์ช็อกโกแลต 3 มิติที่ผ่านมา จะศึกษากลไก เครื่องพิมพ์แบบเพิ่มเนื้อเยื่อ ซึ่งพบว่ากลไกชนิดนี้มีปัญหาคือ

1. เกิดปัญหาความล่าช้าในขั้นตอนการหยุดกระบวนการพิมพ์ กล่าวคือเมื่อสั่งให้ เครื่องพิมพ์หยุดพิมพ์แต่ยังคงมีวัสดุถูกฉีดออกมาจากหัวพิมพ์ (Liu Zhang et al., 2018)

2. หัวและท้ายของวัสดุที่ถูกพิมพ์มีลักษณะโตและลากยาว

3. ไม่สามารถพิมพ์แบบต่อเนื่องได้ (Li Ghazanfari et al., 2017) โดยปัญหาเหล่านี้สามารถ แก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนกลไกการพิมพ์เป็นแบบสกรู

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะศึกษาผลกระทบจากการปรับค่าปัจจัยของเครื่องพิมพ์ช็อกโกแลต 3 มิติ ด้วยเทคนิคการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูปกลไกการฉีดแบบใช้สกรู โดยปัจจัยประกอบด้วย ความเร็วของการอัดขึ้นรูป ความสูงของหัวฉีดกับฐานพิมพ์และระยะพิทของสกรู

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปแบบใช้สกรู

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

การวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็นสองส่วนคือ (1) ศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของ ช็อกโกแลตสูตรควบคุม (2) ศึกษาผลกระทบและระบุนค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม

การศึกษาคูณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลตสูตรควบคุม มีการทดสอบค่าความหนืด (Viscosity) และความเค้นเฉือน (Shear stress) และค่าอัตราเฉือน (Shear rate) ของช็อกโกแลต โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิในการทดสอบเพื่อสังเกตพฤติกรรมและแนวโน้มของความหนืดและความเค้นเฉือนของช็อกโกแลต เพื่อสรุปเป็นกราฟพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ศึกษาผลกระทบและระบุนค่าที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยสกรูที่ใช้ในการวิจัยเป็นสกรูที่ได้จากการออกแบบเพื่อการวิจัย โดยเฉพาะ ชุดเคลื่อนที่สามแกนและระบบหัวฉีดจะถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อการวิจัย โดยฉีดเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม ที่อุณหภูมิห้อง 28 °C ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด 2 มิลลิเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางรีโอโลยีของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ได้แก่ ความหนืด (Viscosity), ความเค้นเฉือน (Shear stress) และ อัตราเฉือน (Shear rate)
- 2) สามารถระบุตัวแปรที่ส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม
- 3) ได้พารามิเตอร์สำหรับฉีดขึ้นรูปเส้นซ็อกโกแลตให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพิมพ์แบบ 3D มิติ หรือการผลิตสารเติมแต่ง (Additive Manufacturing, AM)

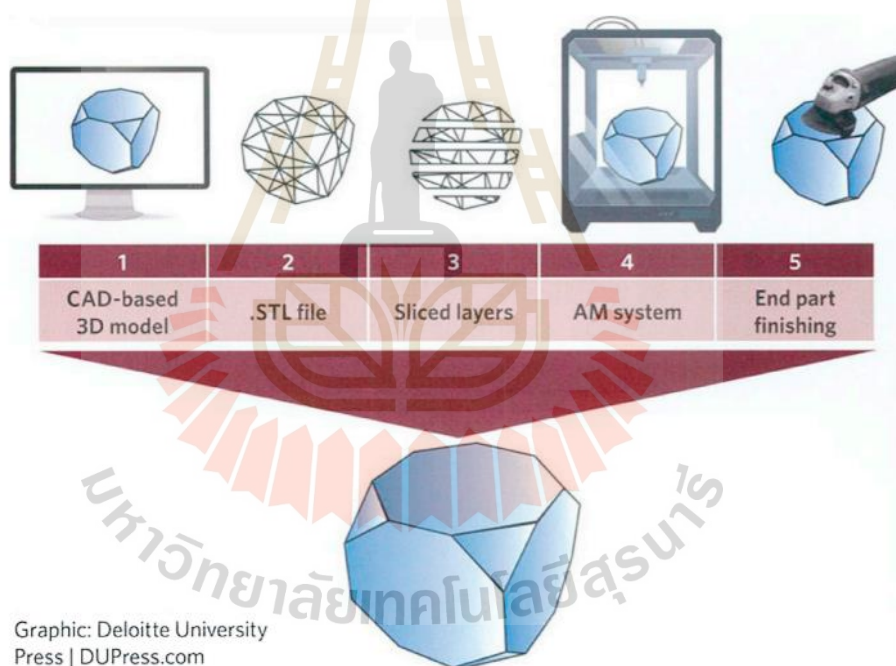
เทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมและมีบทบาทในด้านการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต้นแบบในระบบอุตสาหกรรมมีแนวโน้มที่จะเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ได้แก่ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D printing) หรือ การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing, AM) คือ การขึ้นรูปชิ้นงานหรือวัตถุโดยการเติมเนื้อวัสดุทีละชั้น จนสำเร็จเป็นรูปทรงสามมิติ เป็นการผลิตที่ไม่มีความซับซ้อน ใช้งานได้ง่าย ซึ่งช่วยลดต้นทุน ขั้นตอน ระยะเวลา และวัสดุ ปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุสำหรับการพิมพ์สามมิติทั้งประเภทพลาสติก เรซิน โลหะ กระจก เซรามิก แก้ว ปูนซีเมนต์ หรือกระทั่งอาหารออกมาให้ผู้ใช้ได้เลือกสรรตามคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น คุณสมบัติในด้านความแข็งแรงทนทาน ความยืดหยุ่น การทนต่อความร้อน และทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น (สมพร สินเจริญ โภคัย, 2563)

กระบวนการพื้นฐานของการพิมพ์สามมิติ มีขั้นตอนพื้นฐานต่างๆ ดังนี้ (สมพร สินเจริญ โภคัย, 2563)

1. การออกแบบต้นแบบหรือการสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการออกแบบ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เครื่องสแกนเนอร์วัตถุสามมิติ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ ไปที่ใช้ในการออกแบบ เช่น AutoCAD, Pro/Engineer หรือ SolidWork (สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, 2551)
2. การเปลี่ยนวัตถุสามมิติที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นไฟล์เอสทีแอล (Standard Triangle Language) เป็นไฟล์ที่เก็บข้อมูลสำหรับโมเดลสามมิติ โดยรูปแบบของไฟล์นี้เป็นเพียงข้อมูลพื้นผิว รูปทรงเรขาคณิตที่มีความลึกเท่านั้น ไม่รวมถึงสี พื้นผิว เป็นเพียงไฟล์ที่แสดงรูปทรงของวัตถุเท่านั้น
3. แบ่งไฟล์ภาพแบบจำลองสามมิติให้เป็นชั้น ๆ โดยใช้โปรแกรม Slicing สร้างเป็นไฟล์นามสกุล G-Code (.gcode) ซึ่งเป็นภาษาโปรแกรมประเภทหนึ่งที่ใช้กับเครื่องพิมพ์สามมิติ ชั้นเหล่านี้เป็นการกำหนดการเคลื่อนไหวเชิงเส้นของหัวเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พิกัดหัวฉีด อุณหภูมิของฐานพิมพ์ การควบคุมพัลลม ความเร็ว

หัวพิมพ์ และตัวแปรอื่น ๆ ความหนาของแต่ละชั้นมีผลต่อความแม่นยำของต้นแบบ กล่าวคือ ยิ่งความหนาของชั้นสูงจะส่งผลให้ความละเอียดและความแม่นยำของชิ้นงานลดลงไปด้วย ในขณะที่เดียวกันจะสามารถลดระยะเวลาการพิมพ์ต้นแบบให้เร็วกว่าการพิมพ์ความหนาของชั้นที่บาง

4. ส่งไฟล์นามสกุล G-Code ไปยังเครื่องพิมพ์สามมิติเพื่อสร้างต้นแบบ จากนั้นเครื่องพิมพ์สามมิติจะเริ่มกระบวนการพิมพ์วัตถุต้นแบบ
5. ตกแต่งวัตถุต้นแบบสามมิติ เนื่องจากในการพิมพ์สามมิติอาจมีส่วนที่ยื่นออกมา ทำให้จำเป็นต้องสร้างโครงสร้างรองรับ (Support Structure) ดังนั้นหลังจากพิมพ์เสร็จจึงต้องมีการแกะชิ้นส่วนโครงสร้างรองรับออกก่อนหรือเก็บรายละเอียดให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการพื้นฐานของการพิมพ์สามมิติ

การพิมพ์สามมิติหรือการสร้างต้นแบบรวดเร็ว มีส่งผลกระทบต่อภาคการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง (ประกาศ ตั้งอุดมรัตน์, 2015) โดยสรุปดังนี้

1. สามารถผลิตงานจำนวนน้อยได้โดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการสร้างแม่พิมพ์ต้นแบบ

2. มีน้ำหนักเบาเนื่องจากขึ้นรูปจากพลาสติกหรือวัสดุอื่นๆ
3. สามารถใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน
4. ความสามารถในการผลิตที่รวดเร็ว ส่งผลถึงความต่อเนื่องในการผลิต และทันต่อความต้องการ เช่น เมื่อมีชิ้นส่วนการผลิตเสีย ก็สามารถผลิตตัวสำรองใช้ได้ทันทีไม่จำเป็นต้องรอสั่งซื้อเป็นระยะเวลาานานๆ
5. สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ได้ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้และเครื่องประดับ ของเล่น สื่อการเรียนการสอน อุปกรณ์ทางการแพทย์ ไปจนถึง ชิ้นส่วนรถยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องบิน Airbus หรือกระทั่งการผลิตบ้านจากคอนกรีต เป็นต้น

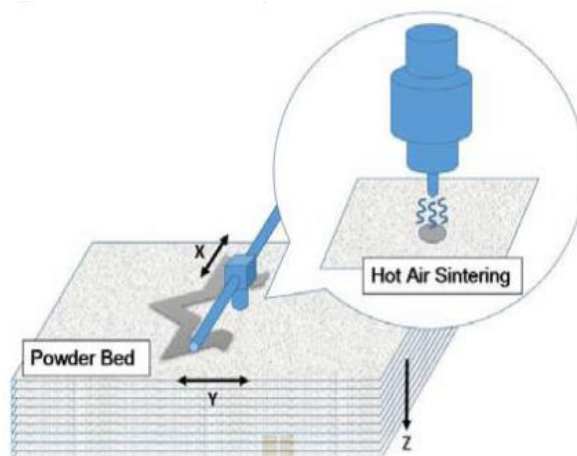
การพิมพ์สามมิติ ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย เช่น ในด้านชีวิตการแพทย์มีการนำไปสร้างเนื้อเยื่อและอวัยวะเทียมเพื่อใช้ในการผ่าตัด ในด้านอวกาศมีการใช้เข้ามาช่วยการซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆในห้องเครื่องของยานอวกาศหรือการตกแต่งภายในยานอวกาศ ด้านอาคารและโครงสร้างมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปประยุกต์ใช้กับการสร้างที่พักอาศัยบนดวงจันทร์ และล่าสุดคือการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติกับการพิมพ์อาหาร

2.2 เทคนิคการพิมพ์สามมิติในอุตสาหกรรมอาหาร

เทคนิคการพิมพ์สามมิติที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยทั่วไปมี 4 ประเภทได้แก่ การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting) การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) และการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion based printing) ดังนี้

2.2.1 การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing)

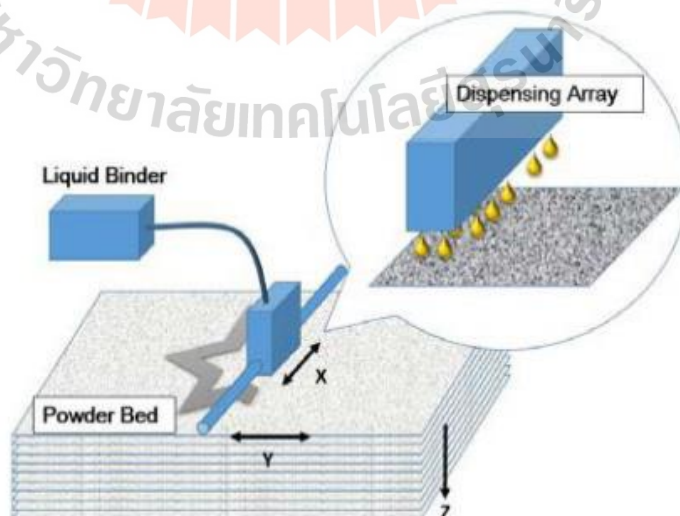
การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งพลังงานในการเผาอนุภาคที่เป็นผง โครงสร้างของวัตถุถูกสร้างขึ้นโดยการยิงแสงเลเซอร์ไปยังจุดที่กำหนดไว้ด้วยโมเดล 3 มิติ หลังจากนั้นเตียงผงจะค่อยๆเคลื่อนลงด้านล่าง โดยความหนาของชั้นหนึ่งชั้นขึ้นอยู่กับอนุภาคของผงแข็งที่สะสมอยู่ด้านบนและกระบวนการจะถูกทำซ้ำจนกว่าวัตถุจะสิ้นสุดลง วิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชิ้นอาหารหลายชั้นในแต่ละชั้นซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุอาหารที่แตกต่างกัน (Liu Zhang et al., 2018)



รูปที่ 2.2 การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) (Sun Peng et al., 2015)

2.2.2 การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting)

การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting) ลักษณะการทำงานจะมีความคล้ายกับแบบการพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์เพียงแต่ใช้ตัวกลางในการประสานหรือสร้างรูปร่างของผงที่เป็นของเหลวหรือกาว โดยหลักการคือการฉีดกาวหรือตัวประสานไปยังผงวัสดุเพื่อสร้างวัตถุทีละชั้นทีละชั้น จากนั้นฐานรองชั้นงานจะเคลื่อนลงและเพิ่มผงแข็งขึ้นมาอีกชั้น กระบวนการจะทำได้วัสดุที่ต้องการ เทคนิคการผลิตนี้ช่วยให้สามารถผลิตโครงสร้างที่ซับซ้อนและยุ่งยากได้ และผงที่ไม่ใช้แล้วจะถูกนำออกมารีไซเคิลเพื่อใช้ต่อไป (Li Ghazanfari et al., 2017)



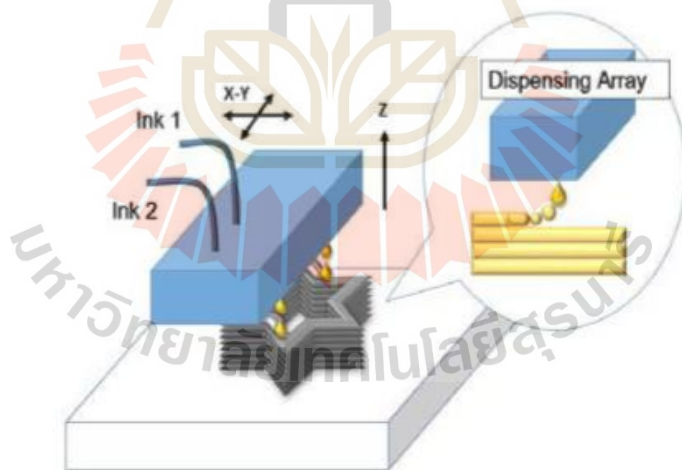
รูปที่ 2.3 การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting) (Sun Peng et al., 2015)

2.2.3 การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing)

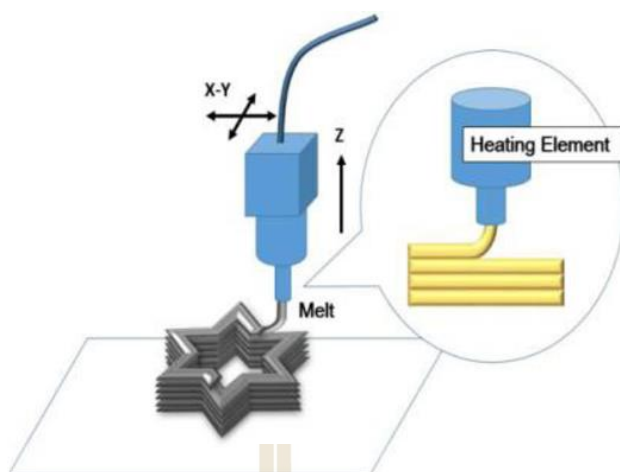
การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทส่วนใหญ่ทำงานโดยใช้หัวความร้อนหรือ Piezoelectric ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทหัวพิมพ์จะถูกให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงกดที่ผลักดันหยดละอองจากหัวฉีดออกมา เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบพายโซอิเล็กทริกมีคริสตัล Piezoelectric อยู่ภายในหัวพิมพ์เพื่อแยกของเหลวออกเป็นหยดในช่วงเวลาที่สม่ำเสมอ การใช้แรงดันไฟฟ้ากับวัสดุ Piezoelectric กระตุ้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่รวดเร็วซึ่งจะทำให้มีการหยดละอองออกจากหัวฉีด (Sun Peng et al., 2015)

2.2.4 การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion based printing)

การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion based printing) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมาก หลักการทำงานคือการอัด รีด หรือฉีดวัสดุที่มีลักษณะเป็นของเหลว หรือกึ่งแข็งกึ่งเหลวออกมาจากหัวฉีดอย่างต่อเนื่อง โดยชุดหัวฉีดหรือฐานรองจะเป็นตัวเคลื่อนที่ขึ้นลงขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่อง มีการทดลองพิมพ์อาหารจากวัสดุที่มีความหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ช็อกโกแลต น้ำตาล น้ำตาลไอซ์ซิ่ง พาสต้า ซีส เจลน้ำส้ม และมันบด เป็นต้น (Sun Peng et al., 2015)



รูปที่ 2.4 การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) (Sun Peng et al., 2015)



รูปที่ 2.5 การพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion based printing) (Sun Peng et al., 2015)

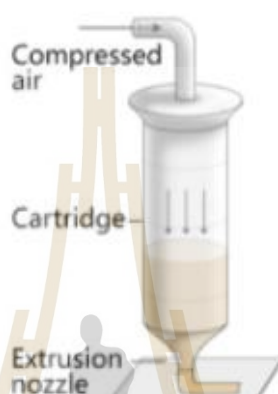
กลไกการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูปที่ใช้กับการพิมพ์อาหารมี 3 กลไกด้วยกัน การฉีดแบบเข็มฉีดยา (Syringe-based extrusion) การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Air pressure driven extrusion) และการฉีดแบบสกรู (Screw-based extrusion) ดังนี้

การฉีดแบบเข็มฉีดยา (Syringe-based extrusion) จะประกอบด้วยกระบอกเข็มสำหรับเก็บวัสดุและมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนกระบวนการอัด มอเตอร์จะทำหน้าที่ในการดันให้วัสดุออกจากกระบอกฉีดยาโดยผ่านทางหัวฉีด ความเร็วในการฉีดสามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มหรือลดได้จากการกำหนดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ การฉีดชนิดนี้เหมาะกับการฉีดวัสดุประเภทของแข็งหรือกึ่งของแข็งของเหลว (Sun Zhou et al., 2018)



รูปที่ 2.6 การฉีดแบบเข็มฉีดยา (Syringe-based extrusion) (Sun Zhou et al., 2018)

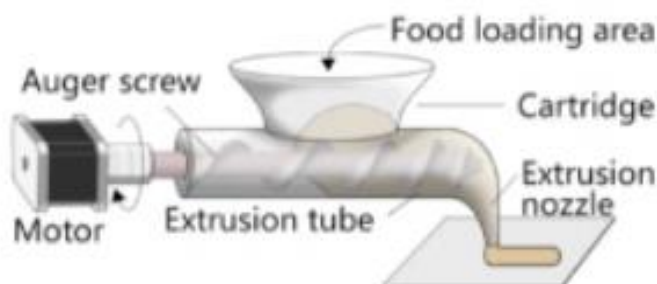
การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Air pressure driven extrusion) เป็นการพิมพ์อาหาร โดยที่อาหารไม่สัมผัสกับหัวฉีดด้านบน ระบบจะปล่อยลมออกมาตามความดันที่กำหนด ลมจะเป็นตัวกลางในการดันให้วัสดุออกจากหัวฉีดด้านบนลมที่ใช้ต้องมีการกรองและทำความสะอาดเป็นอย่างดี การฉีดแบบนี้เหมาะกับวัสดุที่เป็นของเหลวหรือวัสดุที่มีความหนืดต่ำ (Sun Zhou et al., 2018)



รูปที่ 2.7 การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน (Air pressure driven extrusion)

(Sun Zhou et al., 2018)

การฉีดแบบสกรู (Screw-based extrusion) เป็นการพิมพ์ขึ้นรูปโดยใช้สกรูในการหมุน เพื่อขับเคลื่อนให้วัสดุออกจากหัวฉีด การพิมพ์แบบนี้ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นของเหลวที่มีความหนืดและความแข็งแรงทางกลสูง ตลอดกระบวนการพิมพ์โดยใช้สกรูนี้ สามารถเติมวัสดุเข้าสู่กระบอกเก็บวัสดุตลอดเวลา กล่าวคือเป็นการพิมพ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างกับการพิมพ์แบบเข็มฉีดยาและการพิมพ์แบบใช้ลมที่ไม่สามารถพิมพ์แบบต่อเนื่องได้ (Sun Zhou et al., 2018)



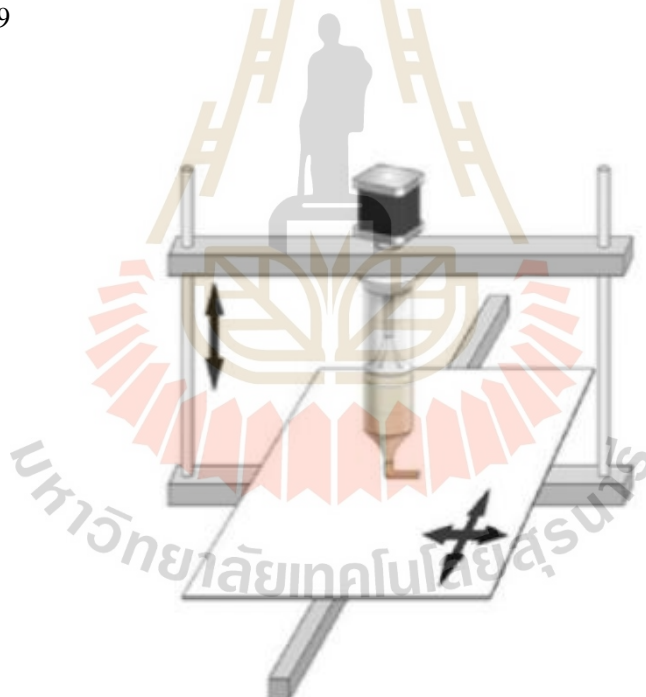
รูปที่ 2.8 การฉีดแบบสกรู (Screw-based extrusion) (Sun Zhou et al., 2018)

2.3 โครงสร้างชุดเคลื่อนที่ของการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูป (Extrusion based printing configuration)

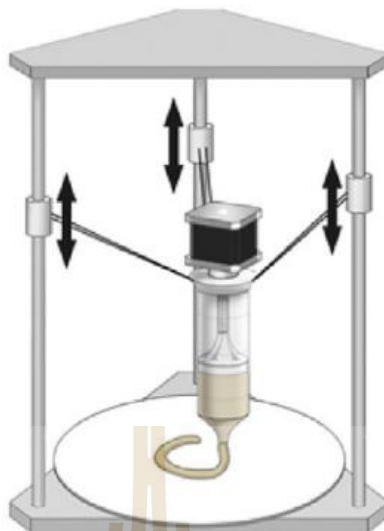
โครงสร้างชุดเคลื่อนที่ของการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูปแบบหลายแกน ประกอบไปด้วยโครงแบบ 4 ชนิดด้วยกันคือ คาร์ทีเซียน (Cartesian) เดลต้า (Delta) โพล่า (Polar) และสกาดา (Scara) ดังคำอธิบายดังนี้

2.3.1 คาร์ทีเซียน (Cartesian)

ชุดเคลื่อนที่แบบคาร์ทีเซียน เป็นการเคลื่อนที่ในแนวสามแกนประกอบไปด้วยแกน x คือเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา แกน Y เคลื่อนที่จากหน้าไปหลัง และแกน Z เคลื่อนที่จากบนสู่ล่าง ลักษณะของการเคลื่อนที่จะมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมตามระยะการเคลื่อนที่ที่เครื่องสามารถเคลื่อนที่ไปได้ พื้นที่การทำงานของเครื่องขึ้นอยู่กับการกำหนดระยะการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 คาร์ทีเซียน (Cartesian) (Sun Zhou et al., 2018)



รูปที่ 2.10 เดลต้า (Delta) (Sun Zhou et al., 2018)

2.3.2 เดลต้า (Delta)

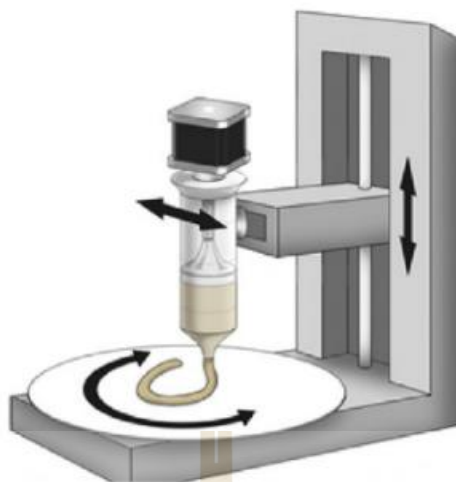
ชุดเคลื่อนที่แบบเดลต้า เป็นการเคลื่อนที่ในรูปแบบวงกลม ประกอบด้วย โครงสร้าง 3 ขาตั้ง หัวฉีดจะถูกประกอบเข้ากับขาตั้งทั้ง 3 แขน การสั่งการการเคลื่อนที่จะเป็นการ สั่งการในรูปแบบพิกัด ตามพิกัดที่กำหนด ชุดเคลื่อนที่แบบเดลต้านี้มีต้นทุนการผลิตที่ถูกกว่าแบบ คาร์ทีเซียน ทำงานได้รวดเร็วกว่า แต่จะมีความแม่นยำน้อยกว่าแบบคาร์ทีเซียน ดังนั้นหากต้องการ งานที่ละเอียดและแม่นยำควรเลือกรูปแบบการเคลื่อนที่แบบคาร์ทีเซียน โครงสร้างการทำงานของชุด เคลื่อนที่แบบเดลต้าแสดงดังรูปที่ 2.10

2.3.3 โพล่า (Polar)

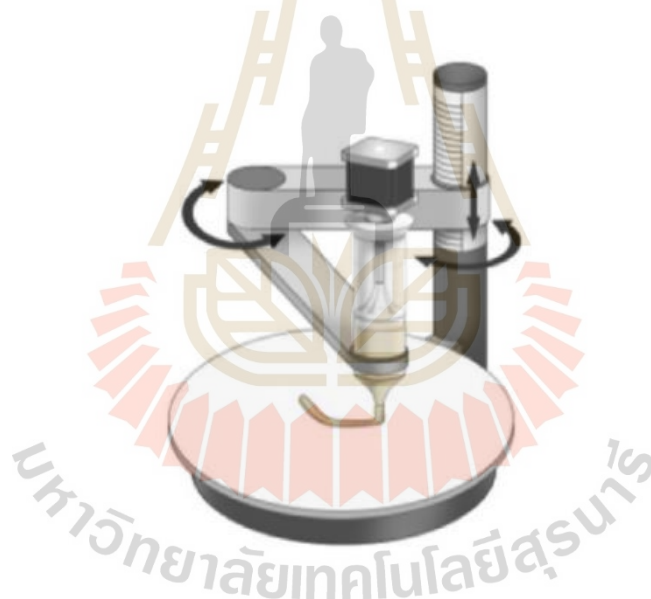
ชุดเคลื่อนที่แบบโพล่าเป็นระบบที่ใช้กำหนดตำแหน่งของจุดโดยอ้างอิงจากมุม และระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง เครื่องพิมพ์ที่ใช้ชุดเคลื่อนที่แบบนี้นิยมให้แท่นพิมพ์หมุนเป็น วงกลมและชุดหัวฉีดเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ชุดเคลื่อนที่แบบนี้จะใช้พื้นที่การทำงานน้อยกว่าแบบ อื่นๆ และสามารถทำงานได้เร็วกว่าแบบอื่นด้วย และให้ความแม่นยำในการพิมพ์รูปทรงวงกลมได้ ดีกว่า โครงสร้างชุดเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 2.11

2.3.4 สกาล่า (Scara)

ชุดเคลื่อนที่แบบสกาล่า จะประกอบไปด้วยแขนกลที่กำหนดการเคลื่อนที่ใน แนวแกน X และแกน Y มอเตอร์ที่กำหนดการเคลื่อนที่ในแนวแกนดังกล่าวนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ เกือบ 360 องศา ชุดเคลื่อนที่ชนิดนี้กำลังเป็นที่สนใจในอุตสาหกรรมการพิมพ์อาหาร 3 มิติ ดังแสดง ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 โพล่า (Polar) (Sun Zhou et al., 2018)



รูปที่ 2.12 สกาด่า (Scara) (Sun Zhou et al., 2018)

2.4 ซ็อกโกแลต

ซ็อกโกแลตเป็นขนมหวานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก มีรสชาติหวาน กลิ่นหอม มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง (ที่ 25-30 องศาเซลเซียส) จะเริ่มละลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส เนื่องจากไขมันเนยโกโก้ที่เป็นองค์ประกอบหลักของซ็อกโกแลต ซึ่งเนยโกโก้จะทำหน้าที่ยึดน้ำตาลและผงโกโก้เข้าไว้ด้วยกัน ซ็อกโกแลตมีผิวสัมผัสที่เนียนเรียบ มันวาว (Beckett, 2008) ซ็อกโกแลตเกิดจากการผสมของส่วนผสม 3 ส่วนคือ โกโก้

ลิเคอร์ น้ำตาลและเนยโกโก้ เนื่องจากเนยโกโก้มีจุดหลอมเหลวที่แคบจึงทำให้สามารถละลายได้ที่อุณหภูมิของร่างกายมนุษย์ ช็อกโกแลตที่ดีควรมีสีที่สม่ำเสมอ ผิวเรียบเนียน เนื้อสัมผัสเนียนเรียบ ไม่เป็นทรายหยาบ แดกหักง่าย ซึ่งช็อกโกแลตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

ช็อกโกแลตนม (Milk chocolate) คือ ช็อกโกแลตที่ผสมนม มีส่วนผสมโกโก้เหลวบริสุทธิ์ร้อยละ 10-25 มีส่วนประกอบสำคัญคือ โกโก้ น้ำตาล เนยโกโก้ และนม ช็อกโกแลตชนิดนี้ถูกใช้สำหรับแต่งหน้าขนมเป็นส่วนใหญ่ (โสภิตา สุขจรุง, ม.ป.ป.)

ช็อกโกแลตไม่ใส่นม (Dark chocolate) คือช็อกโกแลตที่ไม่มีนมเป็นส่วนผสม หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็นช็อกโกแลตธรรมชาติ มีส่วนประกอบของโกโก้บริสุทธิ์อย่างน้อยร้อยละ 35

ช็อกโกแลตขาว (White chocolate) คือช็อกโกแลตที่มีส่วนผสมของเนยโกโก้แต่ไม่มีโกโก้ที่อยู่ในรูปไขมัน มีส่วนผสมสำคัญคือ น้ำตาล เนยโกโก้ นมสดและแต่งกลิ่นด้วยวนิลา มีลักษณะสำคัญคือสีขาวและแตกหักง่าย

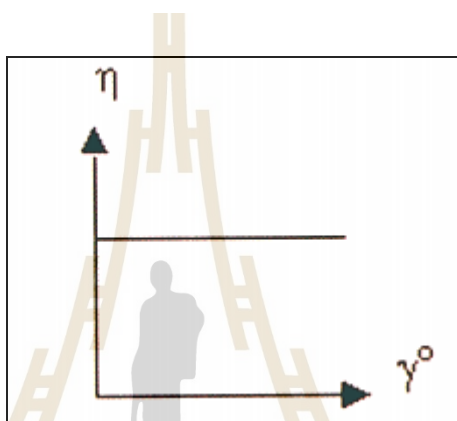
ช็อกโกแลตเป็นวัสดุที่นิยมใช้มากที่สุดในการพิมพ์อาหาร เนื่องจากความสามารถในการหลอมละลายความสามารถในการอัดรีดและความนิยมในตลาดอาหาร Hao และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยพื้นฐานหลายประการเกี่ยวกับความสามารถในการพิมพ์แบบ 3 มิติ รวมถึงความสูงของหัวฉีดกับฐาน ปริมาณของช็อกโกแลตที่อัดรูปขึ้นต่อหน่วยเวลาและความเร็วในการเคลื่อนที่ จากการวิจัยครั้งนี้พวกเขาได้สร้างเครื่องช็อกโกแลตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเป็นครั้งแรกคือ Choc Edge ซึ่งสามารถพิมพ์รูปทรง 2D และ 3D ได้หลากหลายรูปแบบ และ Matthew Lanaro และคณะได้ออกแบบเครื่องพิมพ์ช็อกโกแลตต้นทุนต่ำโดยใช้ส่วนประกอบที่มีราคาไม่แพง และได้ทดลองเปลี่ยนแปลงปัจจัยการพิมพ์ต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการพิมพ์ ประกอบด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ อัตราการอัดรีดและอัตราการระบายความร้อนในกระบวนการพิมพ์

2.5 การวิเคราะห์อาหารด้วยเทคนิครีโวลยี (Rheology)

การวิเคราะห์ทางรีโวลยีในอุตสาหกรรมอาหารมีความสำคัญมาก ใช้สำหรับศึกษาพฤติกรรมการไหลของอาหารเบื้องต้นและยังช่วยในการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารด้วยคุณสมบัติทางรีโวลยีที่สำคัญของอาหารคือ ความหยาบความละเอียด (Texture) ความมัน ความนุ่ม ความลื่น (Smooth-ness) ความเปรี้ยว ความแข็ง ความสามารถในการไหลหรือความหนืด (Viscosity (Pa.s)) ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในอาหาร พฤติกรรมทางรีโวลยีสามารถทดสอบได้ทั้งวัสดุที่เป็นของแข็งและของเหลว ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวัสดุประเภทของเหลว (นิสกา คีตะปันย์, 2546)

จิตติพร เครือเนตร (2546) กล่าวว่าวัสดุชนิดของเหลวสามารถแสดงพฤติกรรมทางรีโอโลยีที่แตกต่างกันออกไป วัสดุบางชนิด เช่น น้ำหรือนม มีความหนืดต่ำสามารถไหลได้อย่างง่าย ส่วนบางชนิดเช่น น้ำผึ้ง น้ำเชื่อม มีความหนืดสูงจะมีความสามารถในการไหลต่ำกว่า ทางรีโอโลยีของเหลวแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ของเหลวในอุดมคติกับของเหลวนอกอุดมคติ

ของเหลวในอุดมคติ (Newtonian) หรือเรียกว่าของเหลวแบบนิวตัน เป็นของเหลวที่ไม่สามารถอัดได้ กล่าวคือเมื่อมีแรงมากกระทำกับวัตถุ ปริมาตรจะไม่เปลี่ยนแปลง มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกๆ ทาง แสดงดังรูปที่ 2.13

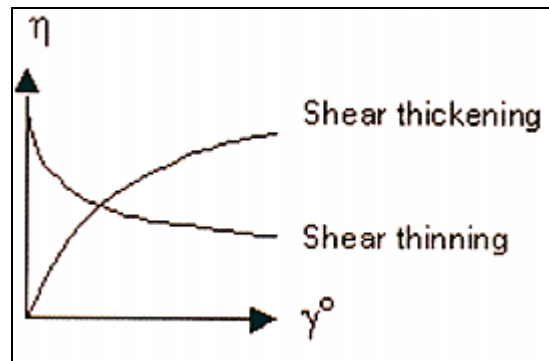


รูปที่ 2.13 แนวโน้มของความหนืดของไหลประเภท Newtonian fluid (นิสกา ศีตะบันย์, 2546)

ของเหลวนอกอุดมคติ (Non-Newtonian) ประกอบด้วยของเหลวนอกอุดมคติ ที่ขึ้นกับอัตราเฉือนและไม่ขึ้นกับเวลา และของเหลวนอกอุดมคติ ที่ขึ้นกับอัตราเฉือนและขึ้นกับเวลา

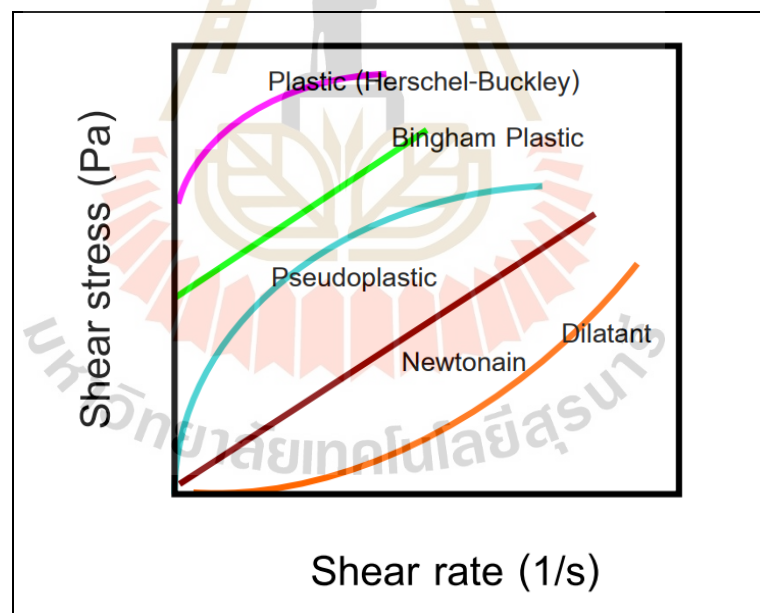
ของเหลวนอกอุดมคติ ที่ขึ้นกับอัตราเฉือนและไม่ขึ้นกับเวลา ความหนืดจะไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (Shear Rate (1/s)) ที่เปลี่ยนแปลงไปกับระยะเวลาที่ให้แรงเฉือน เช่นความหนืดของของเหลวอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดที่นิยมใช้จะเป็นค่าความหนืดสังเกต (apparent viscosity) เนื่องจากไม่ใช่ค่าคงที่แบบของเหลวแบบนิวตัน ของเหลวประเภทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ของไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluids) และของไหลแบบไดลาแทนต์ (Dilatant fluids)

- ของไหลแบบซูโดพลาสติก(Pseudoplastic fluids) มีลักษณะความหนืดของของเหลวจะลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น
- ของไหลแบบไดลาแทนต์ (Dilatant fluids) พบไม่บ่อยนัก ลักษณะคือความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.14 แนวโน้มของความหนืดของไหลประเภท Non-Newtonian fluid (นิสกา คีตะปັນย์, 2546)

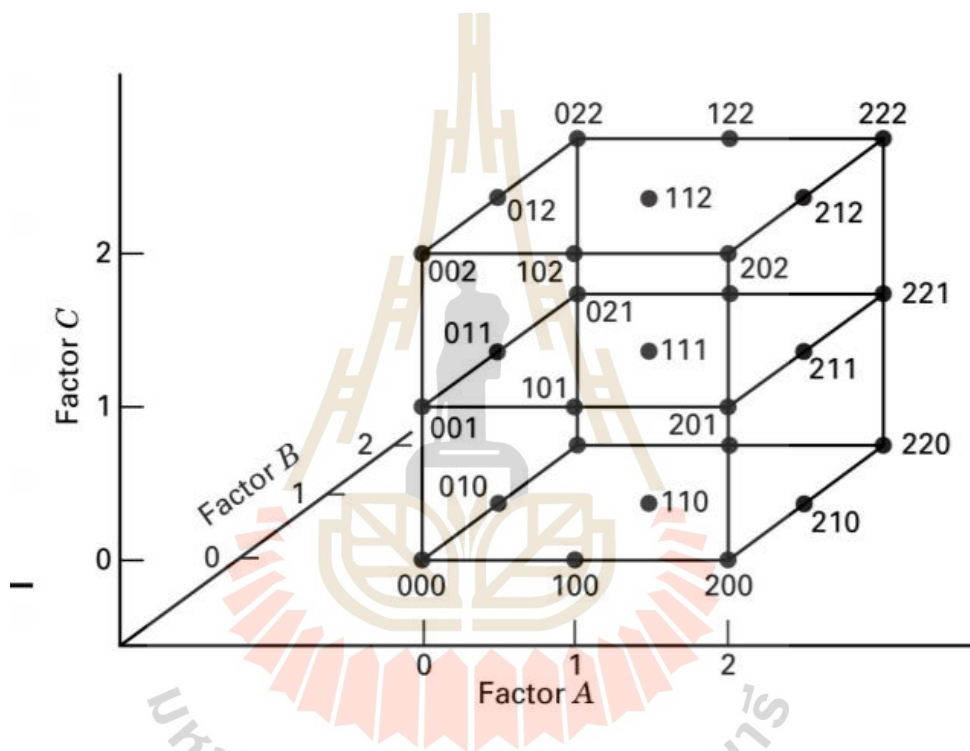
ของเหลวนอกอุคมคติ ที่ขึ้นกับอัตราเฉือนและขึ้นกับเวลา ลักษณะของของเหลวชนิดนี้เมื่อถูกแรงกระทำจะสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้และมีแบบไม่สามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนในพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian fluid และ Non-Newtonian fluid (สาย์ณห์ สุขพงษ์พันธ์และ วิรัตน์ ปฐมชัยอัมพร, ม.ป.ป.)

2.6 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบสามระดับ

ปารเมศ ชูติมา (2545) กล่าวว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ กำหนดให้สัญลักษณ์ของปัจจัยและอันตรกิริยาแทนด้วยอักษรตัวใหญ่ และระดับทั้งสามของปัจจัยมีค่าเป็น สูง กลาง และต่ำ ใช้สัญลักษณ์แทนเป็นตัวเลข 2(สูง) 1(กลาง) และ 0(ต่ำ) การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 3^k จะแทนด้วยตัวเลข k ตัว โดยที่ตัวเลขตัวแรกแทนระดับของปัจจัย A ตัวเลขตัวที่สองแทนระดับของปัจจัย B และตัวเลขตัวที่ k แทนระดับของปัจจัย k โครงสร้างทางเรขาคณิตของการออกแบบ 3^k แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^k (ปารเมศ ชูติมา ,2545)

สายชล สินสมบูรณ์ทอง (2558) กล่าวว่าในการออกแบบ 3^k เมื่อปัจจัยมีลักษณะเป็นเชิงปริมาณ เราจะแทนระดับ สูง, กลาง และต่ำ ด้วย -1, 0 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งการใช้สัญลักษณ์เช่นนี้จะทำให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองการถดถอยของผลตอบที่เกิดจากแต่ละระดับของปัจจัย การออกแบบที่ง่ายที่สุดในระบบ $3k$ คือการออกแบบ 3^2 ซึ่งประกอบด้วย 2 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ แต่ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองแบบ 3^3 จึงจะกล่าวถึงเพียง 3^3 เท่านั้น

สมมติว่ามีปัจจัยหรือตัวแปรต้น 3 ปัจจัย คือ A, B และ C แต่ละปัจจัยมีระดับการทดลองอยู่ 3 ระดับ จัดการทดลองแบบแฟกทอเรียลแผนแบบ 3^k แฟกทอเรียล ผังการทดลองและสัญลักษณ์การจัดกลุ่มของทริทเมนต์ดังกล่าวจะมีทั้ง 27 ทริทเมนต์โดยทั้ง 27 ทริทเมนต์มีจำนวนองศาความ

อิสระเท่ากับ 26 ในแต่ละอิทธิพลหลักของปัจจัย A, B และ C มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 2 และแต่ละปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย คือ AB, AC และ BC มีจำนวนองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 4 และปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย คือ ABC มีจำนวนองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 8 ถ้ามีจำนวน n ซ้ำ จะมีจำนวนองศาความเป็นอิสระทั้งหมดเท่ากับ $n3^3-1$ และจำนวนองศาความเป็นอิสระสำหรับความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $3^3(n-1)$

ผลบวกกำลังสองสามารถคำนวณได้ด้วยวิธีมาตรฐานสำหรับการวางแผนแฟกทอเรียล นอกจากนี้ ถ้าปัจจัยเป็นเชิงปริมาณ อิทธิพลหลักคือ A, B และ C สามารถแยกออกเป็น ส่วนประกอบ 2 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 1 คืออิทธิพลเชิงเส้นตรงและเส้นโค้ง

ปฏิสัมพันธ์ 2 ปัจจัย คือ AB, AC และ BC สามารถแยกออกเป็น ส่วนประกอบ 4 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 1 คือ อิทธิพลเชิงเส้นตรง x เชิงเส้นตรง อิทธิพลเชิงเส้นตรง x เชิงเส้นโค้งกำลังสอง อิทธิพลเชิงเส้นโค้งกำลังสอง x เชิงเส้นตรง และอิทธิพลเชิงเส้นโค้งกำลังสอง x เชิงเส้นโค้งกำลังสอง

ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง 3 ปัจจัย ABC สามารถแยกออกเป็น ส่วนประกอบ 8 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนองศาความเป็นอิสระเท่ากับ 1 คืออิทธิพลเชิงเส้นตรง x เชิงเส้นตรง x เชิงเส้นตรง อิทธิพลเชิงเส้นตรง x เชิงเส้นตรง x เชิงเส้นโค้งกำลังสอง และอื่นๆ โดยทั่วไปการแยกสำหรับปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 3 ปัจจัยจะไม่มีประโยชน์มากนัก

2.7 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhenbin Liu et al. (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของคุณสมบัติทางรีโอโลยีของมันฝรั่งบด โดยการพิมพ์จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบใช้สกรูฉีด ของบริษัท Bolimai รุ่น FSE2 พบว่าการที่เลือกใช้เครื่องพิมพ์แบบนี้ทำให้ไม่เกิดปัญหาบริเวณหัวและท้ายของเส้นวัสดุที่พิมพ์ออกมา มีขนาดและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ คือ บริเวณหัวจะมีขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดในการพิมพ์แบบใช้เครื่องแบบเข็มฉีด (Syringe-based extrusion)

Wenbin Li et al. (2017) ได้ทำการปรับปรุงความแม่นยำในการอัดรีดโดยการเปรียบเทียบกลไกการอัดขึ้นรูปที่แตกต่างกันและใช้รูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลไก โดยเปรียบเทียบ 3 กลไกคือ Ram extruder, Shutter valve-based extruder และ Auger extruder พบว่ากลไกสองอย่างแรกมีความล่าช้าในการเริ่มและหยุดการพิมพ์ เมื่อเทียบกับกลไกที่ 3 คือ Auger extruder และ Auger extruder เป็นกลไกเดียวที่สามารถพิมพ์วัสดุที่มีขนาดใหญ่ได้เนื่องจากมีความต่อเนื่องของการเติมวัสดุเข้าไปในเครื่อง

ANDRÉS SACRISTÁN, ARTURO (2016) ได้ศึกษาและออกแบบหัวพิมพ์พลาสติกโดยใช้หลักการพิมพ์แบบอัดขึ้นรูปโดยใช้สกรู งานวิจัยนี้กำหนดให้วัสดุที่ใช้เป็นเม็ดพลาสติก โดยมีความพยายามที่จะออกแบบหัวฉีดแบบใช้สกรูให้มีขนาดเล็กที่สุด โดยได้เลือกขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรูเป็น 15 มิลลิเมตร และความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวของสกรู L/D คือ 10 โดยงานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวของสกรู สุดท้ายนักวิจัยให้ข้อเสนอแนะไว้ว่า ขนาดของหัวฉีดหรือสกรูจะสามารถเล็กลงกว่านี้ได้ (<15mm.) ถ้าหากเปลี่ยนวัสดุจากเม็ดพลาสติกเป็นผงพลาสติก

Jian-Wei Tsenga et al. (2018) ได้พัฒนาเครื่องพิมพ์ 3 มิติกลไกการฉีดแบบสกรู สำหรับวัสดุที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูงอย่าง Polyether-ether-ketone (PEEK) โดยเครื่องพิมพ์นี้สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวัสดุประเภทนี้คือ สามารถทำให้คุณภาพการพิมพ์ดีขึ้น มีความสามารถในการไหลของวัสดุที่คงที่ด้วยความเร็วของการพิมพ์ที่สูงถึง 370 มิลลิเมตรต่อวินาที และชิ้นงานที่พิมพ์ออกมามีความแข็งแรงทางกลสูง

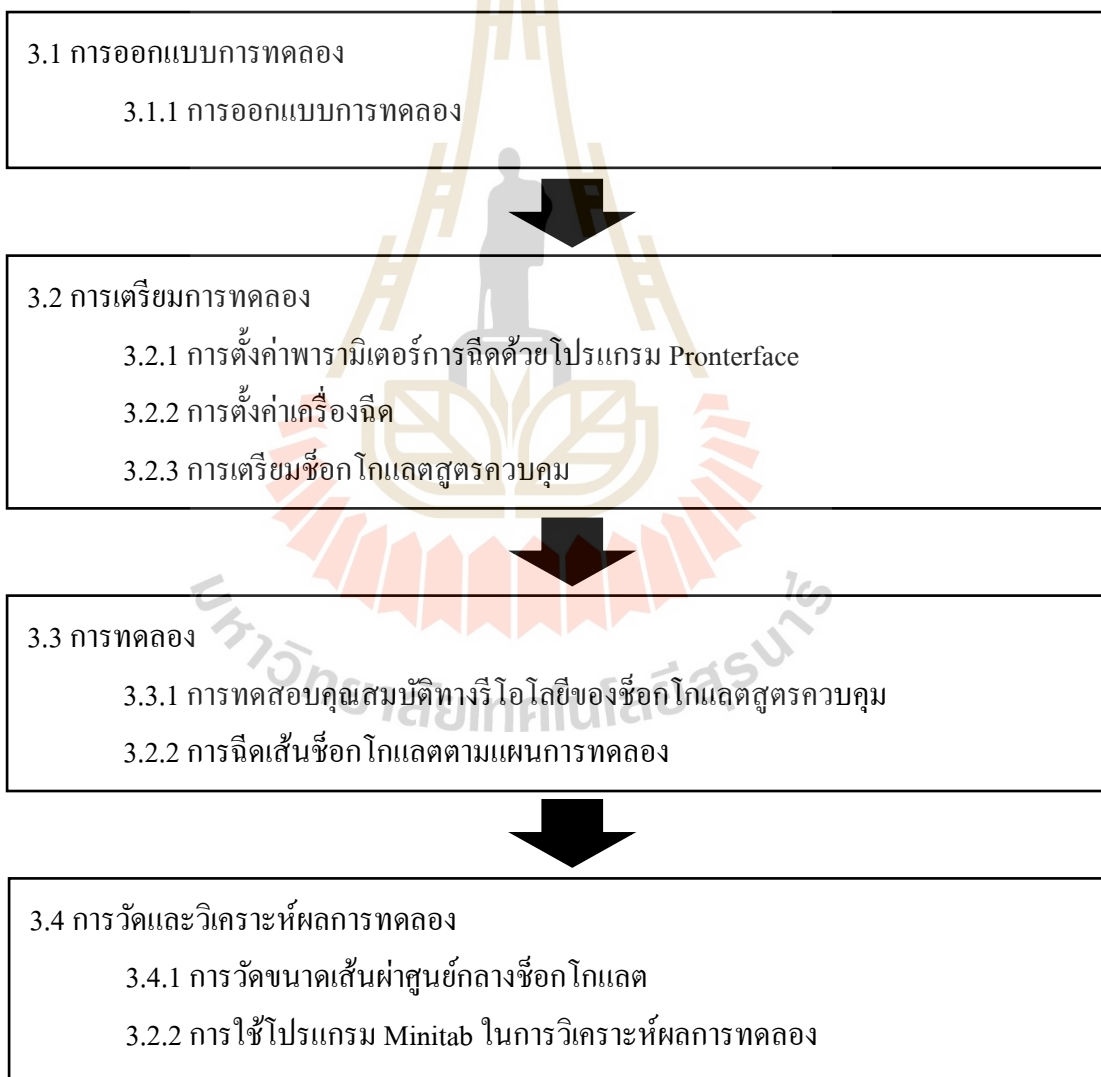
Valkenaers Hans et al. (2013) ได้ทำการศึกษาและสร้างเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบใช้สกรูในการอัดขึ้นรูป โดยวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก ในการอัดขึ้นรูป วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อต้องการลดข้อจำกัดของการพิมพ์แบบ FDM (Fused Deposition Modeling) คือ ต้องใช้วัสดุที่อยู่ในรูปแบบของเส้นพลาสติกขนาดเล็ก ซึ่งพบว่ามีข้อจำกัดในการขึ้นรูปของเส้นดังกล่าวที่มีความยุ่งยาก

Dylan T.J. Drotman (2015) ได้ออกแบบกระบวนการอัดขึ้นรูปโดยใช้สกรู โดยการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของสกรูโดยใช้ thermistor array ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของการพิมพ์ พบว่าระบบสามารถพิมพ์วัสดุได้ดีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด 0.2 มิลลิเมตร อัตราการไหลของวัสดุสูงสุด 7.14 มิลลิเมตรต่อวินาที Dylan T.J. Drotman สรุปทั้งที่ทำงานวิจัยว่าการพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีนี้จะช่วยเพิ่มความละเอียดในการพิมพ์ 3 มิติได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

บทนี้นำเสนอวิธีการดำเนินการวิจัยโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วย (1) การกำหนดตัวแปรในการศึกษาวิจัย (2) การตั้งสมมติฐานการวิจัย (3) ขั้นตอนการศึกษาวิจัย และ (4) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ดังแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 กรอบการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

3.1.1 การออกแบบการทดลอง

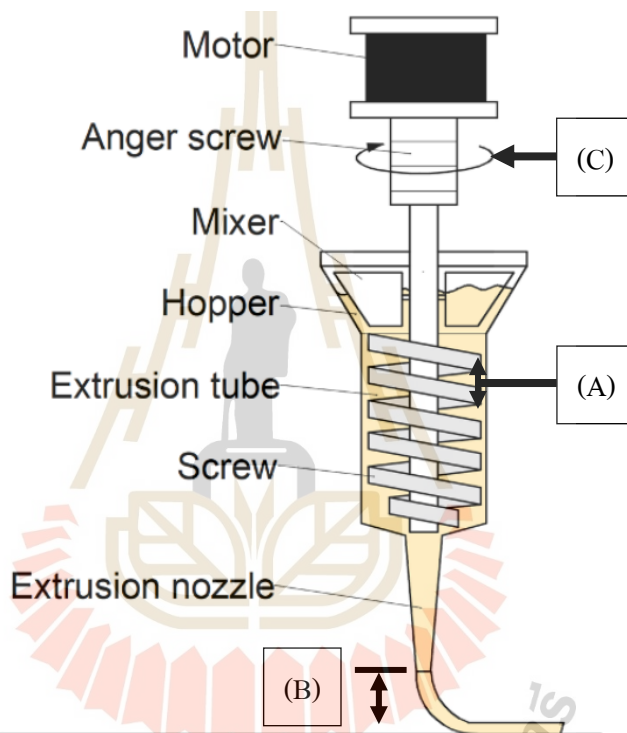
ในการดำเนินการวิจัยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบทดสอบโดยใช้ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ (Full Factorial Design Three – Level Factors) เป็นการออกแบบที่กำหนดให้มีการทดสอบทุก ๆ ทางเลือกที่เป็นไปได้ของปัจจัยทั้งหมด ซึ่งทำให้สามารถประมาณอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษาได้ การกำหนดระดับปัจจัยในการทดลองพิจารณาจากลักษณะการใช้งานและลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่สามารถนำไปต่อยอดและใช้ประโยชน์ได้จริง ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลองเป็น 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย (Factor)	สัญลักษณ์ (Symbol)	ระดับปัจจัย (Level)			หน่วย
		1	2	3	
ความกว้างของเกลียวสกรู	A	15	20	25	mm
ความสูงระหว่างหัวนิตกับฐาน	B	3	4	5	mm
ความเร็วของการอัดขึ้นรูป	C	10	20	30	mm/s
ผลตอบสนอง (Responses)					
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นซ็อกโกแลต(mm)					
ตัวแปรควบคุม					
1. ซ็อกโกแลตสูตรควบคุม					
2. ทดลองในห้องควบคุมอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส					
3. ขนาดหัวนิตเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร					
4. ใช้สกรูทรงสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร					

แผนภาพตัวแปรต้นหรือปัจจัยหลักในการทดลองนั้น แสดงดังรูปที่ 3.2 ความกว้างของเกลียวสกรู(A) คือระยะห่างระหว่างสันของสกรู 2 สัน ซึ่งความกว้างของเกลียวสกรูนี้มีผลต่อความยาวของสันสกรูตลอดแกนสกรู เมื่อความกว้างของเกลียวสกรูมากจะส่งผลให้ความยาวของสัน

สกรูสั้นลง ในขณะที่เมื่อความยาวของสันสกรูสั้นจะส่งผลให้ความยาวของสันสกรูที่ยาวขึ้น ต้นแปรต้นที่สองคือ ความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐาน (B) คือ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฐานรองรับวัสดุที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีด ยิ่งระยะห่างมากจะยิ่งส่งผลให้วัสดุตกถึงฐานรับช้าลง ตัวแปรต้นตัวที่สามคือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูป (C) เป็นตัวแปรกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการหมุนของสกรูฉีด เมื่อเพิ่มความเร็วให้กับสกรูจะยิ่งส่งผลให้สกรูหมุนได้เร็วยิ่งขึ้น ตัวอย่างภาพของปัจจัยแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา (Guo Zhang et al., 2019)

แผนการทดลอง

แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ในกรณี 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ (Full Factorial Design Three – Level Factors) จำนวนการทดลองซ้ำ (Replication) 20 ซ้ำ จำนวนครั้งของการทดลองหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$\text{จำนวนครั้งในการทดลอง} = 3^k \times n \quad (3.1)$$

โดยที่	3	คือจำนวนระดับของปัจจัย
	k	คือจำนวนปัจจัยที่พิจารณาในการทดลอง
	n	คือจำนวนครั้งในการทดลองซ้ำ

ดังนั้น จำนวนครั้งในการทดลองเท่ากับ $3^3 \times 20 = 540$ ครั้ง และในการทดลองจะมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องคือ

ระดับของปัจจัย A จากระดับ 1, 2 และ 3	แทนด้วย i
ระดับของปัจจัย B จากระดับ 1, 2 และ 3	แทนด้วย j
ระดับของปัจจัย C จากระดับ 1, 2 และ 3	แทนด้วย k
จำนวนครั้งในการทดลองจากการทดลองที่ปัจจัย A, B และ C ที่ระดับ i, j และ k ตามลำดับครั้งที่ n	แทนด้วย y_{ijkn}

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลอง

Exp.no.	ความกว้างของเกลียวสกรู(mm)	ความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐาน(mm)	ความเร็วของการอัดขึ้นรูป(mm/s)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต(mm)
1	15	3	10	y_{1111}
2	15	3	10	y_{1112}
.
.
20	15	3	10	y_{11120}
21	15	3	20	y_{1121}
22	15	3	20	y_{1122}
.
.
40	15	3	20	y_{11220}
41	15	3	30	y_{1131}
42	15	3	30	y_{1132}
.

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp.no.	ความกว้างของ เกลียวสกรู(mm)	ความสูงระหว่าง หัวฉีดกับฐาน (mm)	ความเร็วของการ อัดขึ้นรูป(mm/s)	ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ของเส้น ซ็อกโกแลต(mm)
.
60	15	3	30	Y ₁₁₃₂₀
61	15	4	10	Y ₁₂₁₁
62	15	4	10	Y ₁₂₁₂
.
.
80	15	4	10	Y ₁₂₁₂₀
81	15	4	20	Y ₁₂₂₁
82	15	4	20	Y ₁₂₂₁
.
.
100	15	4	20	Y ₁₂₂₂₀
101	15	4	30	Y ₁₂₃₁
102	15	4	30	Y ₁₂₃₂
.
.
120	15	4	30	Y ₁₂₃₂₀
121	15	5	10	Y ₁₃₁₁
122	15	5	10	Y ₁₃₁₂
.
.
140	15	5	10	Y ₁₃₁₂₀
141	15	5	20	Y ₁₃₂₁
142	15	5	20	Y ₁₃₂₁
.

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp.no.	ความกว้างของ เกลียวสกรู(mm)	ความสูงระหว่าง หัวฉีดกับฐาน (mm)	ความเร็วของการ อัดขึ้นรูป(mm/s)	ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ของเส้น ช็อกโกแลต(mm)
.
160	15	5	20	Y ₁₃₂₁
161	15	5	30	Y ₁₃₃₁
162	15	5	30	Y ₁₃₃₂
.
.
180	15	5	30	Y ₁₃₃₂₀
181	20	3	10	Y ₂₁₁₁
182	20	3	10	Y ₂₁₁₂
.
.
200	20	3	10	Y ₂₁₁₂₀
201	20	3	20	Y ₂₁₂₁
202	20	3	20	Y ₂₁₂₂
.
.
220	20	3	20	Y ₂₁₂₂₀
221	20	3	30	Y ₂₁₃₁
222	20	3	30	Y ₂₁₃₂
.
.
240	20	3	30	Y ₂₁₃₂₀
241	20	4	10	Y ₂₂₁₁
242	20	4	10	Y ₂₂₁₂
.

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp.no.	ความกว้างของ เกลียวสกรู(mm)	ความสูงระหว่าง หัวฉีดกับฐาน (mm)	ความเร็วของการ อัดขึ้นรูป(mm/s)	ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ของเส้น ช็อกโกแลต(mm)
.
260	20	4	10	Y ₂₂₁₂₀
261	20	4	20	Y ₂₂₂₁
262	20	4	20	Y ₂₂₂₁
.
.
280	20	4	20	Y ₂₂₂₂₀
281	20	4	30	Y ₂₂₃₁
282	20	4	30	Y ₂₂₃₂
.
.
300	20	4	30	Y ₂₂₃₂₀
301	20	5	10	Y ₂₃₁₁
302	20	5	10	Y ₂₃₁₂
.
.
320	20	5	10	Y ₂₃₁₂₀
321	20	5	20	Y ₂₃₂₁
322	20	5	20	Y ₂₃₂₁
.
.
340	20	5	20	Y ₂₃₂₁
341	20	5	30	Y ₂₃₃₁
342	20	5	30	Y ₂₃₃₂
.

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp.no.	ความกว้างของ เกลียวสกรู(mm)	ความสูงระหว่าง หัวฉีดกับฐาน (mm)	ความเร็วของการ อัดขึ้นรูป(mm/s)	ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ของเส้น ซ็อกโกแลต(mm)
.
360	20	5	30	Y ₂₃₃₂₀
361	30	3	10	Y ₃₁₁₁
362	30	3	10	Y ₃₁₁₂
.
.
380	30	3	10	Y ₃₁₁₂₀
381	30	3	20	Y ₃₁₂₁
382	30	3	20	Y ₃₁₂₂
.
.
400	30	3	20	Y ₃₁₂₂₀
401	30	3	30	Y ₃₁₃₁
402	30	3	30	Y ₃₁₃₂
.
.
420	30	3	30	Y ₃₁₃₂₀
421	30	4	10	Y ₃₂₁₁
422	30	4	10	Y ₃₂₁₂
.
.
440	30	4	10	Y ₃₂₁₂₀
441	30	4	20	Y ₃₂₂₁
442	30	4	20	Y ₃₂₂₁
.

ตารางที่ 3.2 ตารางแผนการทดลอง (ต่อ)

Exp.no.	ความกว้างของ เกลียวสกรู(mm)	ความสูงระหว่าง หัวฉีดกับฐาน (mm)	ความเร็วของการ อัดขึ้นรูป(mm/s)	ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง ของเส้น ช็อกโกแลต(mm)
.
460	30	4	20	Y ₃₂₂₂₀
461	30	4	30	Y ₃₂₃₁
462	30	4	30	Y ₃₂₃₂
.
.
480	30	4	30	Y ₃₂₃₂₀
481	30	5	10	Y ₃₃₁₁
482	30	5	10	Y ₃₃₁₂
.
.
500	30	5	10	Y ₃₃₁₂₀
501	30	5	20	Y ₃₃₂₁
502	30	5	20	Y ₃₃₂₁
.
.
520	30	5	20	Y ₃₃₂₁
521	30	5	30	Y ₃₃₃₁
522	30	5	30	Y ₃₃₃₂
.
.
540	30	5	30	Y ₂₃₃₂₀

ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เมื่อทำการทดลองตามแผนการทดลองและผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2 โดยมี y_{ijkn} แทน Response จากการทดลองที่ระดับ i ของปัจจัย A ที่ระดับ j ของปัจจัย B ที่ระดับ k ของปัจจัย C จำนวน n ครั้ง ซึ่งจะมีข้อมูลทั้งหมด 540 ตัวจากการทดลอง โดยปัจจัยทั้งสามส่งผลต่อตัวแปรตาม (Response) คงที่ และตัวแปรตาม (Response) จากการทดลองสามารถแทนด้วยตัวแบบทางสถิติตามสมการที่ (3.2)

$$y_{ijkn} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkn} \quad (3.2)$$

โดยที่ μ = ค่าเฉลี่ยรวม = $\frac{\sum \sum y_{ijk}}{N}$; N = จำนวนครั้งที่ทดลอง
 τ_i = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 1 ที่ระดับ i ; $i = 1, 2, \dots, a$
 β_j = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 2 ที่ระดับ j ; $j = 1, 2, \dots, b$
 γ_k = ผลกระทบจากปัจจัยที่ 3 ที่ระดับ k ; $k = 1, 2, \dots, c$
 $(\tau\beta)_{ij}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับ i และปัจจัย 2 ที่ระดับ j
 $(\tau\gamma)_{ik}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับ i และปัจจัย 3 ที่ระดับ k
 $(\beta\gamma)_{jk}$ = อิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 2 ที่ระดับ j และปัจจัย 3 ที่ระดับ k
 $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ = อิทธิพลร่วม 3 ปัจจัยระหว่างปัจจัยที่ 1 ที่ระดับ i ปัจจัยที่ 2 ที่ระดับ j และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับ k
 ε_{ijkn} = ค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มของการทดลอง

สมการที่ (3.2) อธิบายได้ว่า ค่าของ Response จากการทดลองแต่ละครั้งจะขึ้นอยู่กับอิทธิพลหลักของปัจจัย A, B และ C และอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัย AB, AC, BC และ ABC ในการวิเคราะห์ซึ่งต้องการทดสอบสมมติฐานว่าอิทธิพลของปัจจัย A, B และ C มีผลต่อ Response หรือไม่และอิทธิพลร่วมกันระหว่างปัจจัย AB, AC, BC และ ABC มีผลต่อ Response หรือไม่ โดยการใช้การทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่นัยสำคัญ 0.05 เป็นตัวชี้วัด เขียนเป็นสมมติฐานได้ดังนี้

อิทธิพลของปัจจัยหลัก A คือ ความกว้างของเกลียวสกรูมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของความกว้างของเกลียวสกรูไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

H_1 : อิทธิพลของความกว้างของเกลียวสกรูมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

โดยที่

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots, \tau_a$$

$$H_1: \tau_i \neq \tau_j ; i \neq j \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลของปัจจัยหลัก B คือ ความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐานมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐาน ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต

H_1 : อิทธิพลของความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐาน มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต

โดยที่

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots, \beta_b$$

$$H_1: \beta_i \neq \beta_j ; i \neq j \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลของปัจจัยหลัก C คือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของความเร็วของการอัดขึ้นรูป ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต

H_1 : อิทธิพลของความเร็วของการอัดขึ้นรูป มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต

โดยที่

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots, \gamma_c$$

$$H_1: \gamma_i \neq \gamma_j ; i \neq j \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A คือ ความกว้างของเกลียวสกรู และ B คือ ความสูงระหว่างหัวฉีดกับฐานมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต

H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลต

โดยที่

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots, (\tau\beta)_{ab}$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq (\tau\beta)_{kl} ; ij \neq kl \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A คือ ความกว้างของเกลียวสกรู และ C คือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อก โกลแลต

H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อก โกลแลต

โดยที่

$$H_0: (\tau\gamma)_{11} = (\tau\gamma)_{12} = \dots, (\tau\gamma)_{ac}$$

$$H_1: (\tau\gamma)_{ik} \neq (\tau\gamma)_{il} ; ik \neq jl \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย B คือ ความสูงระหว่างหัวนิตกับฐานและ C คือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อก โกลแลต

H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อก โกลแลต

โดยที่

$$H_0: (\beta\gamma)_{11} = (\beta\gamma)_{12} = \dots, (\beta\gamma)_{bc}$$

$$H_1: (\beta\gamma)_{jk} \neq (\beta\gamma)_{il} ; jk \neq il \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย A คือ ความกว้างของเกลียวสกรู ปัจจัย B คือ ความสูงระหว่างหัวนิตกับฐานและ ปัจจัย C คือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อก โกลแลต

H_1 : อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อก โกลแลต

โดยที่

$$H_0: (\tau\beta\gamma)_{111} = (\tau\beta\gamma)_{112} = \dots, (\tau\beta\gamma)_{abc}$$

$$H_1: (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq (\tau\beta\gamma)_{ijk} ; ijk \neq 1 \text{ อย่างน้อย 1 คู่}$$

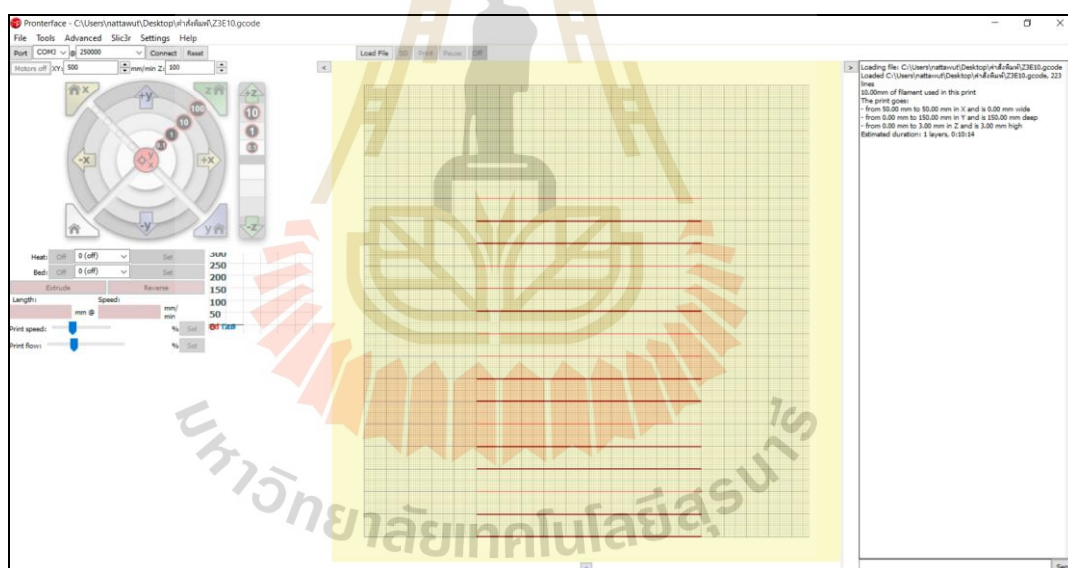
ซึ่งในการวิเคราะห์ผลจะใช้ตาราง ANOVA ในโปรแกรม Minitab เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองและวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้

3.2 การเตรียมการทดลอง

ในการเตรียมการทดลองนั้นประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ การตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดด้วยโปรแกรม Pronterface การตั้งค่าเครื่องฉีดและการเตรียมซ็อกโกแลตสูตรควบคุม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดด้วยโปรแกรม Pronterface

การตั้งค่าพารามิเตอร์การฉีดด้วยโปรแกรม Pronterface เป็นการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการฉีดขึ้นรูปเส้นซ็อกโกแลต โปรแกรม Pronterface จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและสั่งการเครื่องฉีดขึ้นรูปเส้นซ็อกโกแลตด้วยหัวฉีดแบบสกรู โปรแกรมสามารถกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องฉีดได้ซึ่งประกอบไปด้วย ความเร็วของการเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z การกำหนดพื้นที่ฉีดหรือตำแหน่งของการฉีดเส้นซ็อกโกแลต โดยตัวอย่างของหน้าโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.3

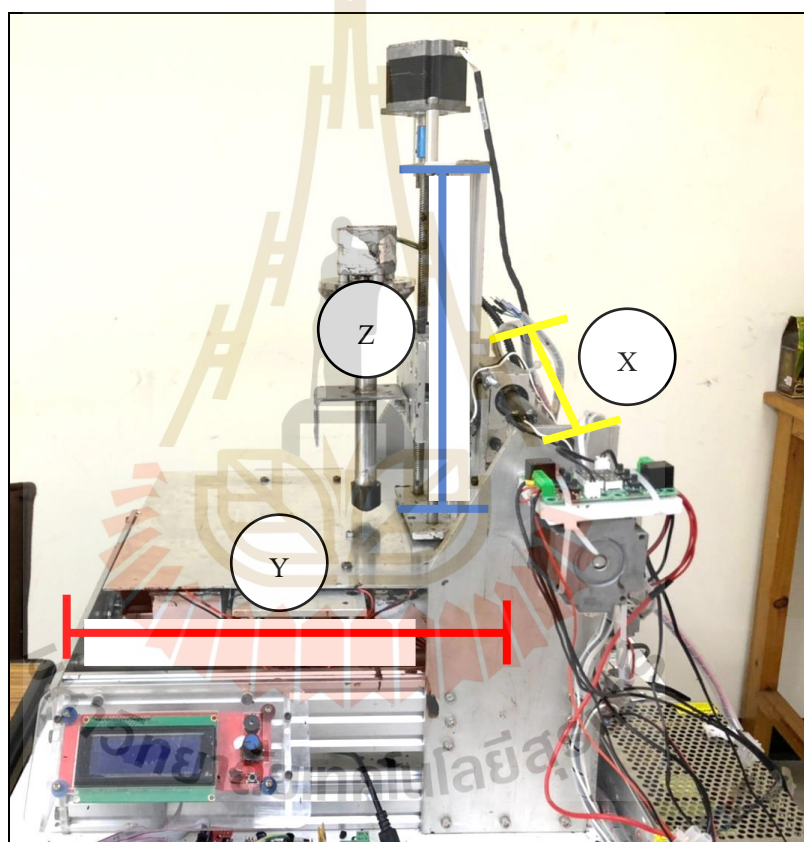


รูปที่ 3.3 โปรแกรม Pronterface

3.2.2 การตั้งค่าเครื่องฉีด

เครื่องฉีดขึ้นรูปเส้นซ็อกโกแลตหรืออาจเรียกว่าเครื่องพิมพ์เส้นซ็อกโกแลตประกอบไปด้วย 3 ส่วนการทำงานคือชุดเคลื่อนที่ ระบบหัวฉีดแบบสกรูและชุดควบคุมการทำงาน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

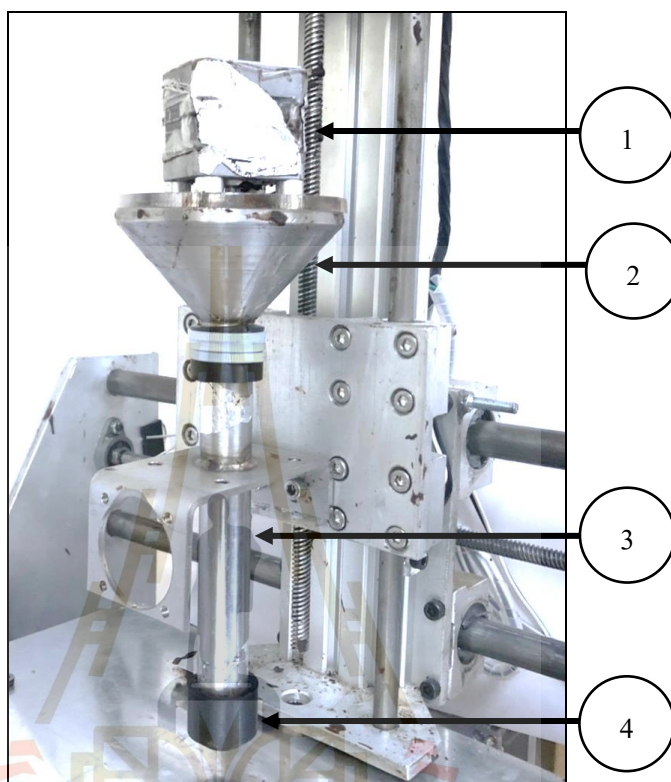
ชุดเคลื่อนที่ถูกออกแบบให้เป็นชุดเคลื่อนที่แบบแบบคาร์ทีเซียน เป็นการเคลื่อนที่
ในแนวสามแกนประกอบไปด้วยแกน x คือเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา แกน Y เคลื่อนที่จากหน้าไป
หลัง และแกน Z เคลื่อนที่จากบนสู่ล่าง ลักษณะของการเคลื่อนที่จะมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม
ตามระยะการเคลื่อนที่ที่เครื่องสามารถเคลื่อนที่ไปได้ พื้นที่การทำงานของเครื่องขึ้นอยู่กับ
กำหนดระยะการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน โดยกำหนดให้แทนพิมพ์หรือฐานฉีดเคลื่อนที่ในแนวแกน
X และแนวแกน Y ชุดหัวฉีดจะถูกติดตั้งเพื่อเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ส่วนประกอบของชุดเคลื่อนที่
แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ชุดเคลื่อนที่ในแนว 3 แกน

ระบบหัวฉีดที่ทำการศึกษาเป็นระบบหัวฉีดแบบสกรู (Screw-based extrusion)
เป็นการพิมพ์ขึ้นรูปโดยใช้สกรูในการหมุนเพื่อขับเคลื่อนให้วัสดุออกจากหัวฉีด เนื่องจากการฉีด
หรือพิมพ์วัสดุด้วยระบบนี้เหมาะกับวัสดุประเภทของเหลวที่มีความหนืดสูง กระบวนการพิมพ์โดย
ใช้สกรูนี้ สามารถเติมวัสดุเข้าสู่กระบอกรอบเก็บวัสดุตลอดเวลา สามารถฉีดวัสดุแบบต่อเนื่อง ซึ่ง

แตกต่างกับการพิมพ์แบบเข็มฉีดยาและการพิมพ์แบบใช้ลมที่ไม่สามารถพิมพ์แบบต่อเนื่องได้ ส่วนประกอบของระบบหัวฉีดแบบสกรูมีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบหัวฉีดแบบสกรู

ระบบหัวฉีดแบบสกรูประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลายส่วน ดังนี้

หมายเลขที่ 1 คือ มอเตอร์ ทำหน้าที่ขับเคลื่อนสกรูฉีดที่บรรจุอยู่ภายในกระบอกสูบ สามารถกำหนดความเร็วในการฉีดเส้นซ็อกโกแลตได้ โดยกำหนดผ่านโปรแกรมควบคุม

หมายเลขที่ 2 ถังจัดเก็บวัสดุ ทำหน้าที่รองรับวัสดุหรือซ็อกโกแลตสำหรับฉีดขึ้นรูป ถูกออกแบบให้เป็นรูปทรงกรวยเพื่อเพิ่มความสามารถในการไหลของซ็อกโกแลต ถังเก็บวัสดุนี้สามารถเติมซ็อกโกแลตได้ตลอดระยะเวลาการฉีดเส้นซ็อกโกแลต เพื่อความต่อเนื่องของการฉีด และเพื่อเพิ่มขีดความสามารถที่ระบบหัวฉีดแบบเข็มฉีดยาและระบบลมอีกไม่สามารถทำได้

หมายเลขที่ 3 กระบอกสูบ ทำหน้าที่เป็นกระบอกบรรจุสกรูสำหรับฉีดขึ้นรูปเส้นซ็อกโกแลต มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร

หมายเลขที่ 4 หัวฉีด ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดขนาดของเส้นซ็อกโกแลตที่ถูกฉีดออกมา มีขนาด 2 มิลลิเมตร

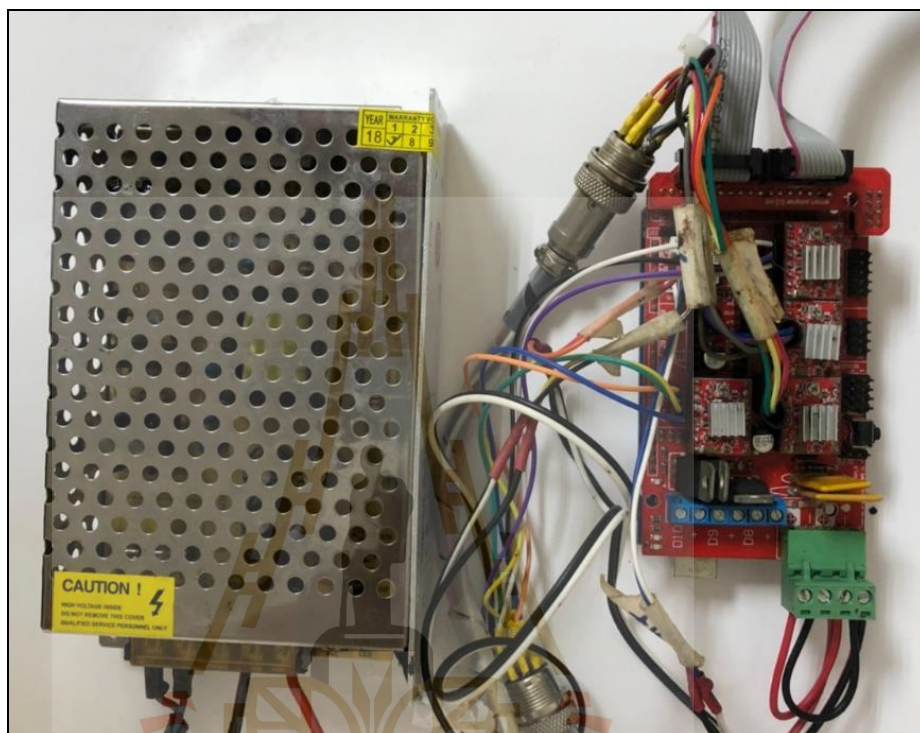
ส่วนต่อมาที่มีความสำคัญมากต่อระบบหัวฉีดแบบสกรู ในการศึกษาครั้งนี้กำหนดใช้สกรูแบบความกว้างของเกลียวสกรูเท่ากันตลอดทั้งแท่ง ขนาดของแกนสกรูจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจากบนสู่ล่าง สกรูขนาดนี้จะสามารถช่วยให้ประสิทธิภาพของการฉีดเพิ่มขึ้น ช่วยลดขนาดของวัสดุที่ฉีด โดยในการศึกษาใช้สกรูที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากันคือ 15 มิลลิเมตร โดยปรับระยะพิตให้แตกต่างกัน 3 ขนาดคือ 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 สกรูที่ใช้ในงานวิจัย สกรู ก ระยะพิต 15 มิลลิเมตร, สกรู ข ระยะพิต 20 มิลลิเมตรและ สกรู ค ระยะพิต 25 มิลลิเมตร

การควบคุมการเคลื่อนที่ของชุดเคลื่อนที่คือแกน X, Y, Z และแกนฉีด ถูกควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3 เป็นบอร์ด Arduino โครงการ Open Source จาก

โครงการ Arduino เป็นบอร์ดที่นิยมใช้กับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทำงานผ่านการควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Pronterface ในการควบคุมการทำงานของบอร์ดนี้ ตัวอย่างบอร์ดควบคุมและโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3

3.2.3 การเตรียมซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

ซ็อกโกแลตที่ใช้ในการทดสอบเป็นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มีส่วนผสมหลักคือ น้ำตาลร้อยละ 50 ไขมันร้อยละ 20 และโกโก้ร้อยละ 7.4 และส่วนผสมอื่นๆ กำหนดให้ซ็อกโกแลตที่ใช้ทดสอบผลิตที่วันเดือนปีผลิตเดียวกัน เก็บรักษาในอุณหภูมิห้อง ตัวอย่างซ็อกโกแลตแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ช็อกโกแลตสูตรควบคุม

3.3 การทดลอง

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ในการทดสอบพฤติกรรมการไหลของช็อกโกแลต ผู้วิจัยใช้เครื่องวัดความหนืด modular compact rheometer ยี่ห้อ Anton peer รุ่น MCR-52 ในการทดสอบความหนืด โดยกำหนดตัวแปรในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การกำหนดตัวแปรในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและทดสอบคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตัวแปร	รายการ	หน่วย
ตัวแปรต้น	1. อุณหภูมิ (26, 28, 30, 32, 34)	องศาเซลเซียส (°C)
ตัวแปรตาม	1. ความเค้นเฉือน	ปาสคาล (Pa)
	2. ความหนืด	ปาสคาล วินาที (Pa*s)
ตัวแปรควบคุม	1. สูตรช็อกโกแลต	น้ำตาลร้อยละ 50 ไขมันร้อยละ 20 และ โกโก้ร้อยละ 7.4

โดยรายละเอียดของเครื่องมือและขั้นตอนการการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ เครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน ยี่ห้อ Anton peer รุ่น MCR-52 ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิและปรับความเร็วรอบของแกนหมุน (Spindle) ได้ โดยส่วนประกอบของเครื่อง ประกอบด้วย (1) หัวทดสอบ เป็นลักษณะแท่นหมุนสำหรับทดสอบ

แรงบิดที่เกิดขึ้นบนเนื้อวัสดุจากนั้นคำนวณและแสดงผลออกมาเป็นค่าความหนืด (2) แทนควบคุมอุณหภูมิ (Heater) ใช้สำหรับกำหนดอุณหภูมิของวัสดุทดสอบ และ (3) จอควบคุมแสดงผล คือหน้าสำหรับกำหนดอุณหภูมิการทดสอบและแสดงผลการทดสอบค่าความหนืด ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่อง Modular Compact Rheometer รุ่น MCR-52

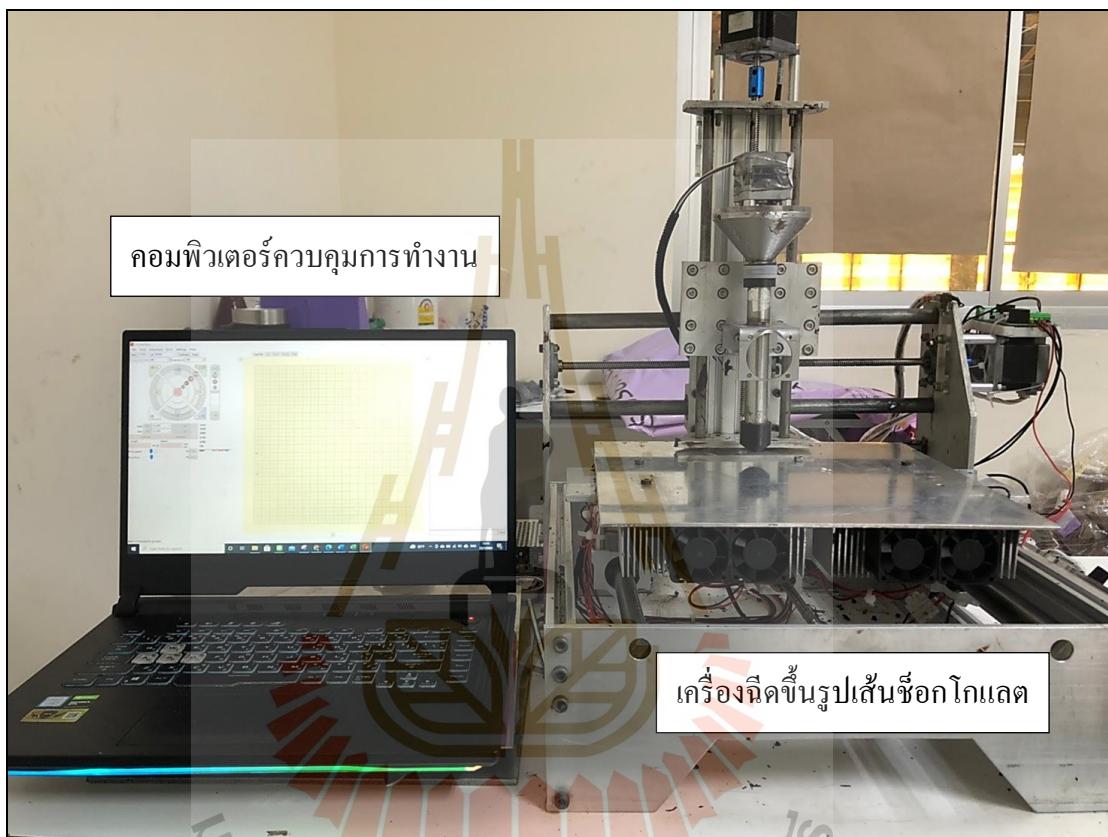
ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) นำช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่เตรียมไว้ใส่บนหัวทดสอบ
- 2) ตั้งอุณหภูมิทดสอบได้แก่ 26, 28, 30, 32 และ 34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- 3) เปิดเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน รออุณหภูมิให้ได้ตามอุณหภูมิทดสอบ (ตัวแปรต้น)
- 4) กดปุ่มเริ่มการหมุนแกนหมุน
- 5) ทำการบันทึกผลการทดสอบลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของเครื่องทดสอบ

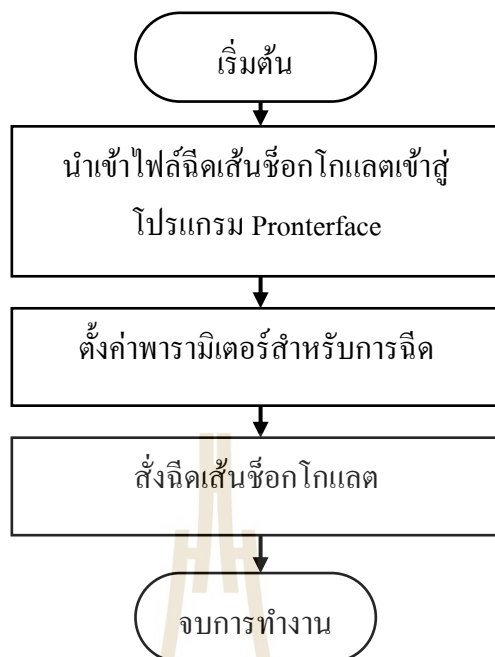
3.3.2 การฉีดเส้นช็อกโกแลตตามแผนการทดลอง

การดำเนินการฉีดเส้นช็อกโกแลตตามแผนการทดลองนี้มีส่วนประกอบในการดำเนินการ 2 ส่วน ประกอบด้วย 1) เครื่องฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลต 2) คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 การฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลตเริ่มต้นโดยการเขียนคำสั่งการพิมพ์ในรูป

ของ G-code จากนั้นโหลดไฟล์เข้าโปรแกรม Pronterface เพื่อสั่งคำสั่งฉีดเส้นแก่เครื่องฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลต จากนั้นตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องฉีดตามที่กำหนด จากนั้นตรวจสอบข้อมูลทั้งหมดในการฉีดขึ้นรูป เมื่อทุกอย่างครบถ้วนจึงสั่งฉีดเส้นช็อกโกแลตผ่านทางโปรแกรม Pronterface ขั้นตอนการดำเนินการแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลต



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการขีดเส้นช้อกโกแลต

ในการดำเนินการทดลอง จะประกอบไปด้วยขั้นตอนการเตรียมแผ่นทดสอบ การเตรียมโปรแกรมชุดคำสั่งขีดเส้นช้อกโกแลต ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

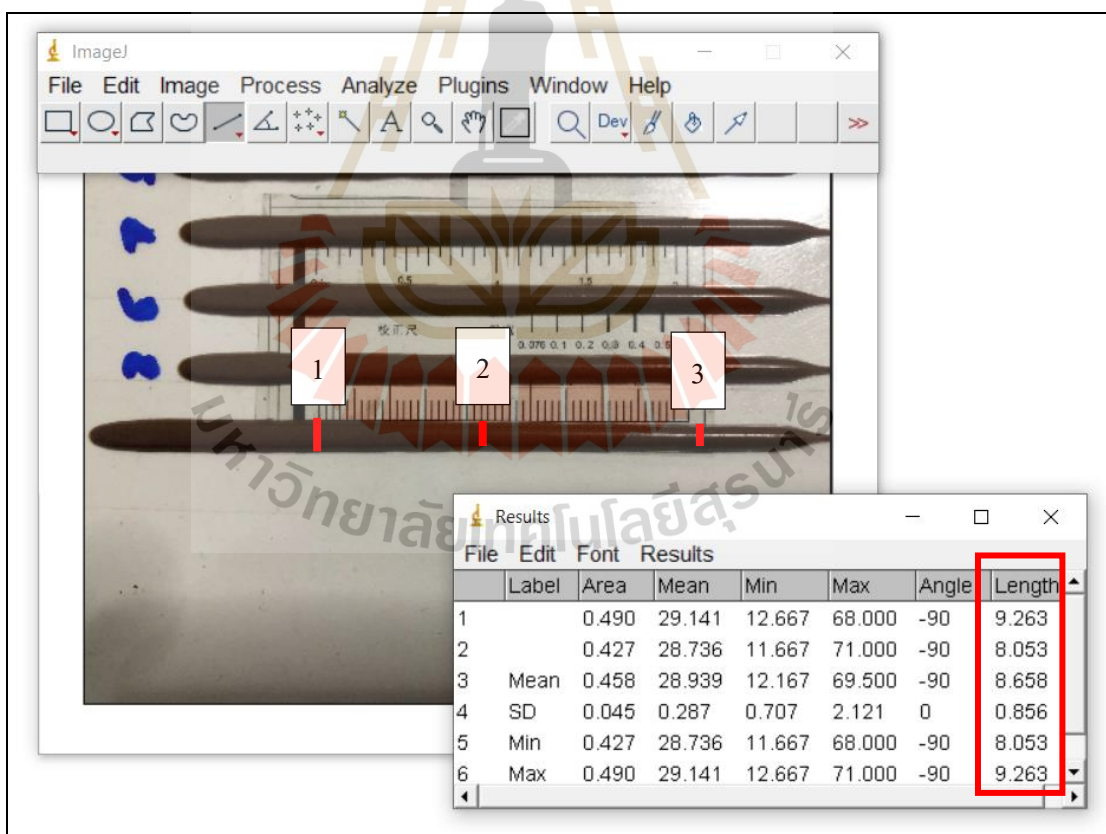
- 1) ปรับอุณหภูมิห้องให้อยู่ในอุณหภูมิการทดลองคือ 28 องศาเซลเซียส
- 2) เปิดเครื่องขีดเส้นช้อกโกแลต ตั้งค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของชุดหัวขีดให้เข้าสู่ตำแหน่ง $x=0$, $y=0$ และ $z=0$ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการขีดเส้นช้อกโกแลต
- 3) เต็มช้อกโกแลตบริเวณช่องใส่วัสดุจนเต็ม
- 4) เปิดระบบหัวขีดช้อกโกแลตเพื่อลำเลียงช้อกโกแลตให้เต็มสกรูขีดก่อนเริ่มทำการทดลอง
- 5) ทดสอบระบบหัวขีดจนแน่ใจว่าช้อกโกแลตถูกลำเลียงเข้าสู่สกรูจนเต็ม
- 6) ติดตั้งแผ่นใสรองเส้นช้อกโกแลตบนแท่นพิมพ์
- 7) เริ่มดำเนินการขีดเส้นช้อกโกแลตจำนวน 20 เส้นต่อ 1 การทดลอง
- 8) ดำเนินการทดลองจนครบ 20 ชั่วโมง 1 การทดลอง
- 9) ดำเนินการทดลองจนครบ 540 การทดลอง

3.4 การวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.1 การวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต

ในการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

- 1) นำเส้นช็อกโกแลตที่ได้มาวางบนแท่นสำหรับการถ่ายรูปเพื่อนำไปวัดค่าความกว้างของเส้นผ่าศูนย์กลาง
- 2) นำรูปเข้าสู่ตัวโปรแกรม ImageJ
- 3) ตั้งค่าระยะการวัดทุกครั้งก่อนการวัด โดยอ้างอิงจากขนาดมาตรฐานหรือมาตรวัดของแต่ละรูป โดยกำหนดให้มีระยะ 10 มิลลิเมตร
- 4) วัดเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุมทั้ง 3 ตำแหน่ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อเส้น
- 5) บันทึกค่าที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

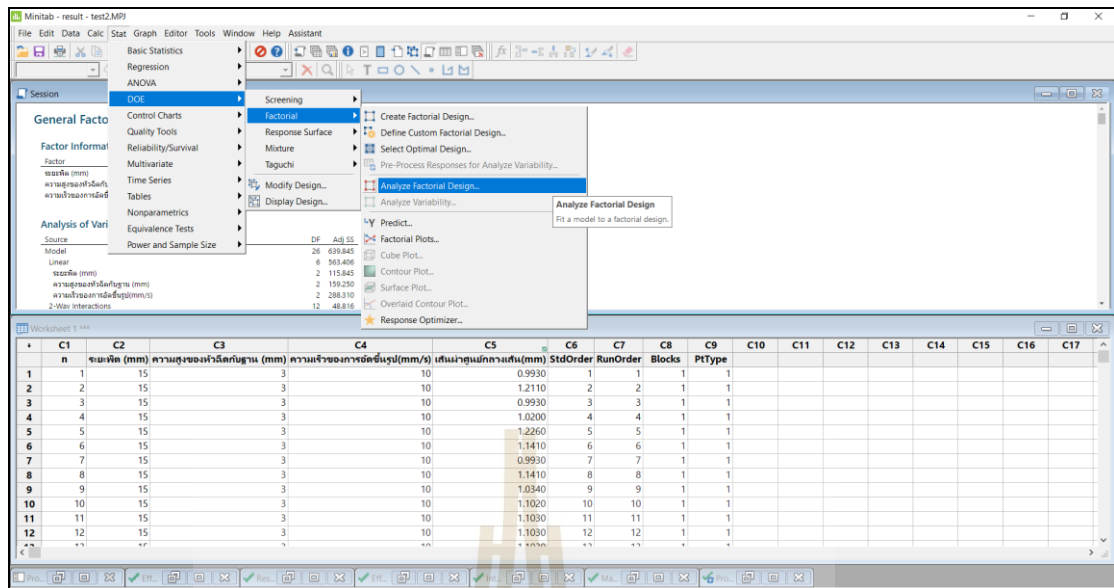


รูปที่ 3.12 ตำแหน่งการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสุตรควบคุม

3.4.2 การใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อได้ผลการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยการนำข้อมูลมาใส่ในตารางบันทึกผลการทดลอง จากนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมในแต่ละตำแหน่ง รวมถึงไปการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมแต่ละตำแหน่ง โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

- 1) นำผลที่ได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมาใส่ในตารางที่ 3.2 แล้วหาค่าเฉลี่ยรวมถึงไปการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่มีขนาดใกล้เคียง 2 มิลลิเมตรจะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี
- 2) นำข้อมูลเข้ามาสู่โปรแกรม Minitab เพื่อใช้หลักการทางสถิติทำการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม รวมไปถึงหาผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม
- 3) การตรวจสอบข้อมูลในโปรแกรม Minitab ว่ามีการกระจายตัวแบบ Normal distribution หรือไม่
- 4) ถ้าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบ Normal distribution จึงทำการทำ ANOVA โดยใช้คำสั่ง Analyze Factorial Design ในโปรแกรม Minitab เพื่อคุณลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล และระบุความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม รวมไปถึงหาผลกระทบของแต่ละตัวแปรที่มีต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุม ดังแสดงในรูป 3.13
- 5) ทำ Main Effect Plot เพื่อดูว่าค่าตัวแปรใดมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมากที่สุด และแต่ละตัวแปรนั้นมีแนวโน้มเป็นอย่างไร
- 6) ทำ Interaction Plot เพื่อหาอิทธิพลระหว่างปัจจัยหลักว่ามีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช็อกโกแลตหรือไม่
- 7) บันทึกผลการวิเคราะห์และสรุปผล



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างโปรแกรม Minitab และชุดคำสั่ง Analyze factorial design

บทที่ 4

ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาในส่วนแรกคือ การศึกษาพฤติกรรมการไหลและคุณสมบัติทางกลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม ทั้งค่าความเค้นเฉือน (Shear stress), ความหนืด (Viscosity) และอัตราเฉือน (Shear rate) นำไปสู่การระบุพฤติกรรมการไหลของช็อกโกแลตสูตรควบคุม นอกจากนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาในส่วนที่สอง คือการศึกษาค่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลต ได้แก่ อัตราเร็วการฉีด (Extrusion rate) ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฐานพิมพ์ (Distances between nozzle and workspace) และขนาดเกลียวของสกรู (Pitch) ที่ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีค่าใกล้เคียงกับรูแม่พิมพ์มากที่สุด นอกจากนี้ได้แสดงผลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมมากที่สุด

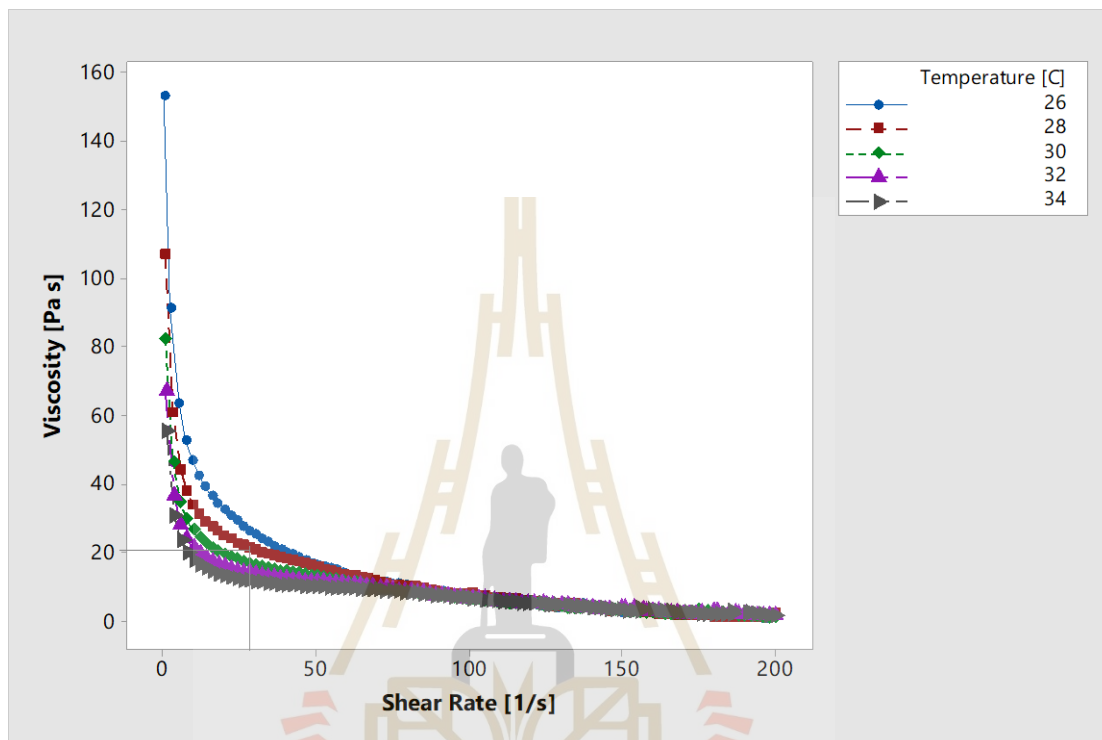
4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลตสูตรควบคุม

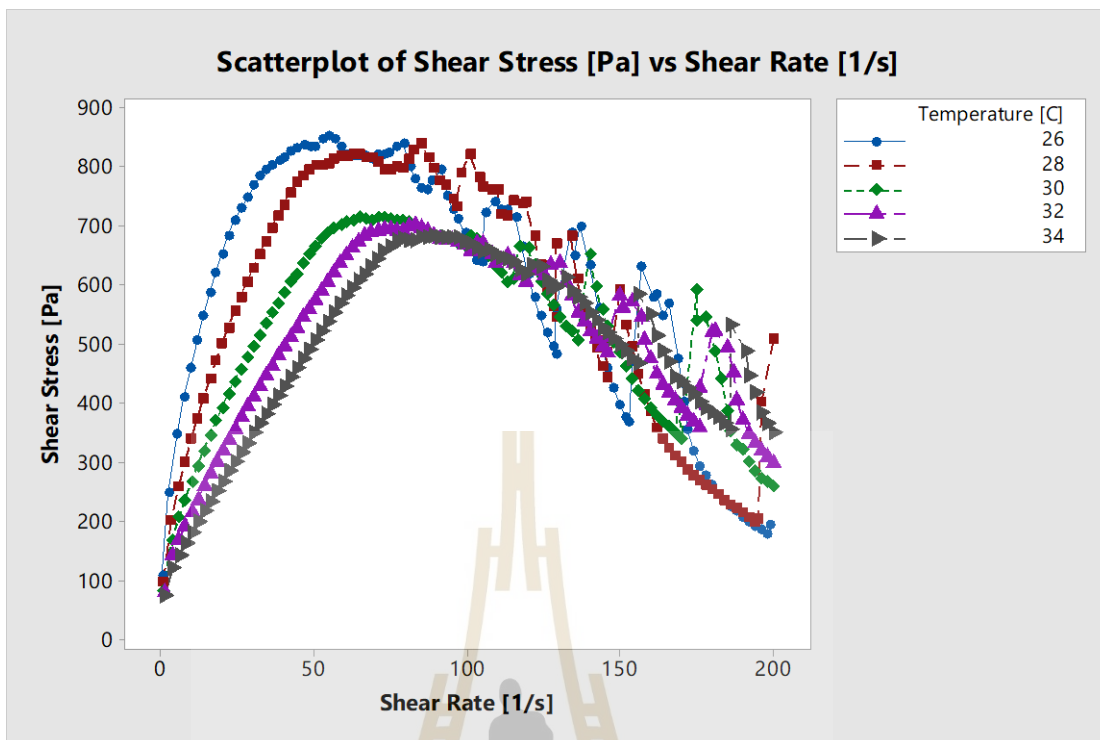
จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลตสูตรควบคุมดังแสดงในตารางภาคผนวก ก ทั้งค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) และความหนืด (Viscosity) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอุณหภูมิทดสอบ ความหนืดและอุณหภูมิทดสอบ และเค้นเฉือนกับความหนืดในดังแสดงรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราเฉือน (Shear rate(1/s)) ที่กระทำต่อช็อกโกแลตสูตรควบคุมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แนวโน้มความหนืด (Viscosity(Pa s)) ของช็อกโกแลตสูตรควบคุมลดลง ในขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทดสอบให้กับช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่อัตราเฉือนที่เท่ากันความหนืดของช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีความหนืดที่น้อยกว่า กล่าวคือเมื่อช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ช็อกโกแลตสูตรควบคุมนั้นมีค่าความหนืดลดลง ในขณะที่เดียวกับเมื่ออัตราเฉือนที่กระทำกับช็อกโกแลตสูตรควบคุมเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนืดของช็อกโกแลตสูตรควบคุมมีแนวโน้มลดลง กล่าวโดยสรุปคือเมื่ออุณหภูมิของช็อกโกแลตสูตรควบคุมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดลดลง

อีกหนึ่งกราฟที่จะแสดงลักษณะพฤติกรรมการไหลและสมบัติทางรีโอโลยีคือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน (Shear stress(Pa)) กับอัตราเฉือน (Shear Rate(1/s)) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (Viscosity(Pa s)) กับอัตราเฉือน (Shear rate(1/s))



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (Shear stress(Pa)) กับอัตราเฉือน (Shear Rate(1/s))

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางรีโอโลยีของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมชนิดนี้พบว่าค่าความเค้นเฉือนที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 682 Pa ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ที่ 839 Pa นอกจากนี้จากผลการทดสอบพบว่าค่าความหนืดที่ต่ำที่สุดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมอยู่ที่ 55.4 Pa*s ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนืดมีค่าอยู่ที่ 153 Pa*s ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่สูงที่สุดในการทดสอบ จากข้อมูลจะพบว่าที่อุณหภูมิทดสอบ 24 องศาเซลเซียส ไม่สามารถวัดค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมได้ เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวซ็อกโกแลตสูตรควบคุมชนิดนี้เกิดการแข็งตัวจนทำให้หัวทดสอบไม่สามารถหมุนได้ ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติทางกลของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมจึงไม่สามารถวัดค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียสได้

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีพฤติกรรมการไหลของวัสดุและคุณสมบัติรีโอโลยีในรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่า ซ็อกโกแลตสูตรควบคุมเป็นของเหลวชนิดนอนนิวตันเนียน (Non-Newtonian) คือ ที่อุณหภูมิใดใดของเหลวจะมีค่าความหนืดที่แตกต่างกัน

และจะเปลี่ยนไปเมื่อมีอัตราเฉือนมากกระทำกับของเหลว ซึ่งซ็อกโกแลตสูตรควบคุมนี้มีพฤติกรรมของการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) หรืออีกชื่อหนึ่งคือ Shear thinning มีลักษณะคือ เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นความเค้นเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นด้วยในขณะที่ความหนืดของซ็อกโกแลตจะมีแนวโน้มค่อยๆลดลง โดยความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิจากการทดลองมีความสำคัญในการระบุพฤติกรรมระหว่างซ็อกโกแลตสูตรควบคุมกับอุณหภูมิขณะอัดรีด โดยนำไปสู่การควบคุมอุณหภูมิอัดรีดให้เหมาะสมโดยควรอยู่ในช่วง 26 องศาเซลเซียส

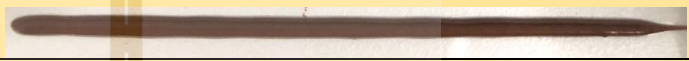
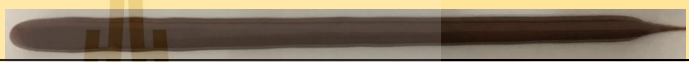
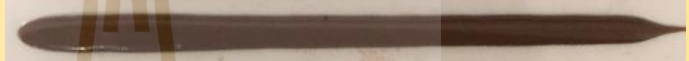

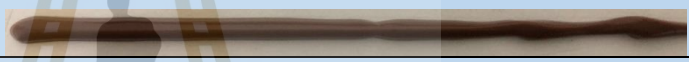
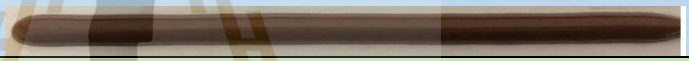
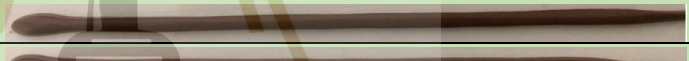
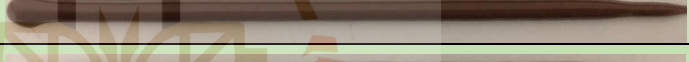

4.1.2 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางซ็อกโกแลต

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองฉีดเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยในการทดลองได้ทำการทดลองอัดรีดทั้งหมด 27 เงื่อนไข ประกอบไปด้วยตัวแปรต้น ได้แก่ อัตราเร็วการฉีด 10, 20 และ 30 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฐานพิมพ์ 3, 4 และ 5 เซนติเมตร และขนาดเกลียวของสกรู 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร ในแต่ละเงื่อนไขทำจำนวนซ้ำ 20 ซ้ำ ฉีดผ่านหัวฉีดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงมีผลการทดลองทั้งหมด 540 เส้น ดังตารางที่ 4.1 โดยได้ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นละ 3 ตำแหน่งแล้วคำนวณค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ตำแหน่ง โดยมีความคาดหวังของผลลัพธ์คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมสูตรควบคุมต้องมีค่าใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร ซึ่งเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดพอดี ในการวัดเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นของซ็อกโกแลตสูตรควบคุมโปรแกรมจะแสดงผลการวัดขนาดทั้ง 3 ตำแหน่ง ตัวอย่างการวัดขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลตในแต่ละการทดลอง

ปัจจัย			รูปเส้นช็อกโกแลต
ขนาด เกลียว ของสกรู (mm)	ความ สูงของ หัวฉีด กับฐาน (mm)	ความเร็ว ของการ อัดขึ้น รูป	
15	3	10	
		20	
		30	
	4	10	
		20	
		30	
	5	10	
		20	
		30	
20	3	10	
		20	
		30	
	4	10	
		20	
		30	
	5	10	
		20	
		30	

ตารางที่ 4.1 แสดงรูปเส้นผ่าศูนย์กลางช็อกโกแลตในแต่ละการทดลอง(ต่อ)

ปัจจัย			รูปเส้นช็อกโกแลต
ขนาด เกลียว ของสกรู (mm)	ความ สูงของ หัวฉีด กับฐาน (mm)	ความเร็ว ของการ อัดขึ้น รูป (mm/s)	
25	3	10	
		20	
		30	
	4	10	
		20	
		30	
	5	10	
		20	
		30	

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตน้อยสุดที่ 0 มิลลิเมตร คือไม่สามารถฉีดให้เป็นเส้นได้ที่ปัจจัยอัตราเร็วการฉีด 10 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฐานพิมพ์เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และขนาดเกลียวของสกรูเท่ากับ 15 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุดที่ 4.798 มิลลิเมตรที่ปัจจัยอัตราเร็วการฉีด 30 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับฐานพิมพ์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และขนาดเกลียวของสกรูเท่ากับ 25 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นซ็อก โกลแลต

		เส้นผ่าศูนย์กลางเส้นซ็อกโกลแลต (mm)																					
ขนาด เกลียว ของสกรู (mm)	ความสูงของ หัวพืดกับฐาน (mm)	ความเร็วของ การอัดขึ้นรูป (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	เฉลี่ย
15	3	10	0.99	1.141	1.1	1.1	1.21	0.99	1.1	1.06	0.99	1.14	1.1	1.1	1.02	1.03	1.12	0.92	1.23	1.1	1.36	0.98	1.090
		20	2.15	2.012	2.03	2.04	2.05	2.63	2.26	2.29	2.38	1.85	2.79	2.26	2.13	2.54	2.58	2.23	2	2.01	2.21	2.31	2.237
		30	2.49	2.632	2.77	3	2.61	2.58	2.54	2.91	2.45	2.47	2.52	2.67	2.31	2.45	2.76	2.55	2.8	2.65	2.94	3.03	2.657
	4	10	1.02	0.872	1.05	1.19	0.82	1.06	1.22	1.08	1.34	1.21	1.09	1.32	1.26	1.28	1.23	0.94	1.09	1.21	1.3	0.89	1.123
		20	1.99	1.416	1.38	1.48	1.55	1.28	1.55	1.51	1.55	1.74	1.45	1.37	1.69	1.28	1.81	1.66	1.67	1.58	1.81	1.85	1.579
		30	2.1	2.026	2.13	2.28	2.17	2.18	2.1	1.93	2.42	2.27	2.38	2.16	1.97	2.12	2.13	2.13	2.5	2.29	2.33	2.38	2.200
	5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
		20	1.94	1.704	1.93	1.69	1.92	1.72	1.31	1.45	1.94	1.51	1.67	1.44	1.85	1.62	1.93	1.71	1.5	1.81	1.59	1.49	1.684
		30	1.89	1.769	2.07	2.17	1.77	1.64	2.39	2.06	1.87	1.85	1.61	2.16	2.04	1.81	1.69	1.53	2.04	1.81	1.69	1.53	1.868

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นข้อกโกแลต (ต่อ)

		เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นข้อกโกแลต (mm)																					
ขนาด เกลียว ของสกรู (mm)	ความสูงของ หัวพืดกับฐาน (mm)	ความเร็วของ การอัดขึ้นรูป (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	เฉลี่ย
20	3	10	2.28	1.882	2.14	2.32	2.41	2.37	2.15	2.6	1.96	2.08	2.59	2.32	2.12	2.15	2.14	2.56	2.43	2.32	2.49	2.27	2.279
		20	3.27	3.365	3.42	3.49	3.41	3.77	3.72	3.74	3.4	3.19	3.47	3.42	3.33	3.35	3.44	3.38	3.62	3.79	3.84	4.07	3.524
		30	4.12	4.416	4.28	4.25	4.11	4.52	4.38	4.38	4.49	4.16	4.44	4.47	4.09	4.16	4.38	4.32	4.15	4.36	4.27	4	4.287
	4	10	1.23	1.007	1.43	1.03	1.15	1.3	1.26	1.09	1.4	1.27	1.52	1.22	1.29	0.92	1.02	1	1.2	1.18	1.3	1.07	1.193
		20	2.38	2.794	2.56	2.53	2.86	3	3.08	2.58	2.27	3.06	3.21	3.1	2.7	2.87	2.95	2.8	2.95	2.58	3.19	2.7	2.808
		30	2.79	2.793	3.06	2.57	2.46	2.26	2.65	2.76	2.47	2.72	2.76	2.6	2.77	2.68	3.34	2.77	2.05	2.58	2.52	2.4	2.650
	5	E10	1.65	1.397	1.42	0.97	1.56	1.24	1.35	1.15	1.26	1.13	1.4	1.12	1.47	1.01	1.19	1.13	1.47	1.21	1.19	1.13	1.272
		E20	2.5	2.464	2.21	2.46	2.21	1.69	1.69	1.93	2.46	1.81	1.69	1.93	2.79	2.5	2.79	2.4	2.21	1.69	1.69	1.93	2.152
		E30	2.75	3.142	3.1	3.04	2.94	2.61	3.02	2.75	2.75	3.14	3.1	3.04	2.67	3.36	2.91	2.8	2.94	2.61	3.02	2.75	2.923

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นซ็อกโกแลต (ต่อ)

		เส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลต (mm)																					
ขนาด เกลียว ของสกรู (mm)	ความสูงของ หัวพืดกับฐาน (mm)	ความเร็วของ การอัดขึ้นรูป (mm/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	เฉลี่ย
25	3	E10	2.73	2.833	2.61	2.76	2.59	2.42	2.24	2.36	2.46	2.72	2.59	2.87	2.06	2.15	2.65	2.4	2.51	2.77	2.4	2.95	2.553
		E20	3.85	3.44	3.47	3.75	3.78	3.65	3.95	3.38	3.39	3.29	3.56	3.62	3.55	3.48	3.58	3.91	3.29	3.3	3.12	3.19	3.527
		E30	4.2	4.529	4.92	4.18	5.08	4.85	5.37	4.3	4.44	4.68	4.96	5.19	4.97	5.14	4.75	4.93	4.54	5.13	5.01	4.79	4.798
	4	E10	2.24	2	1.97	2.43	2.05	2.01	1.81	2.1	1.77	1.93	1.87	1.83	2.34	1.61	2.05	2.05	1.79	2.03	2.1	2.11	2.003
		E20	2.61	1.704	1.85	1.77	1.96	2.27	2.23	1.97	2.23	1.87	2.26	2.12	2.72	2.46	2.49	2.42	1.81	1.97	1.94	1.97	2.132
		E30	3.57	3.398	3.41	2.86	2.76	2.94	3.27	2.93	2.69	2.79	3.14	2.88	2.69	2.79	3.14	2.88	3.1	3.1	2.99	3.67	3.049
	5	E10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
		E20	2.41	2.382	2.27	2.15	2.68	2.79	2.92	2.6	2.61	2.71	2.75	2.29	2.32	2.46	2.65	2.49	2.57	2.56	2.69	2.39	2.534
		E30	2.76	2.496	2.37	2.87	2.76	2.91	2.97	2.36	2.76	2.79	2.76	2.56	2.84	3.22	3.3	3.06	3.01	3.19	3.12	3.3	2.870

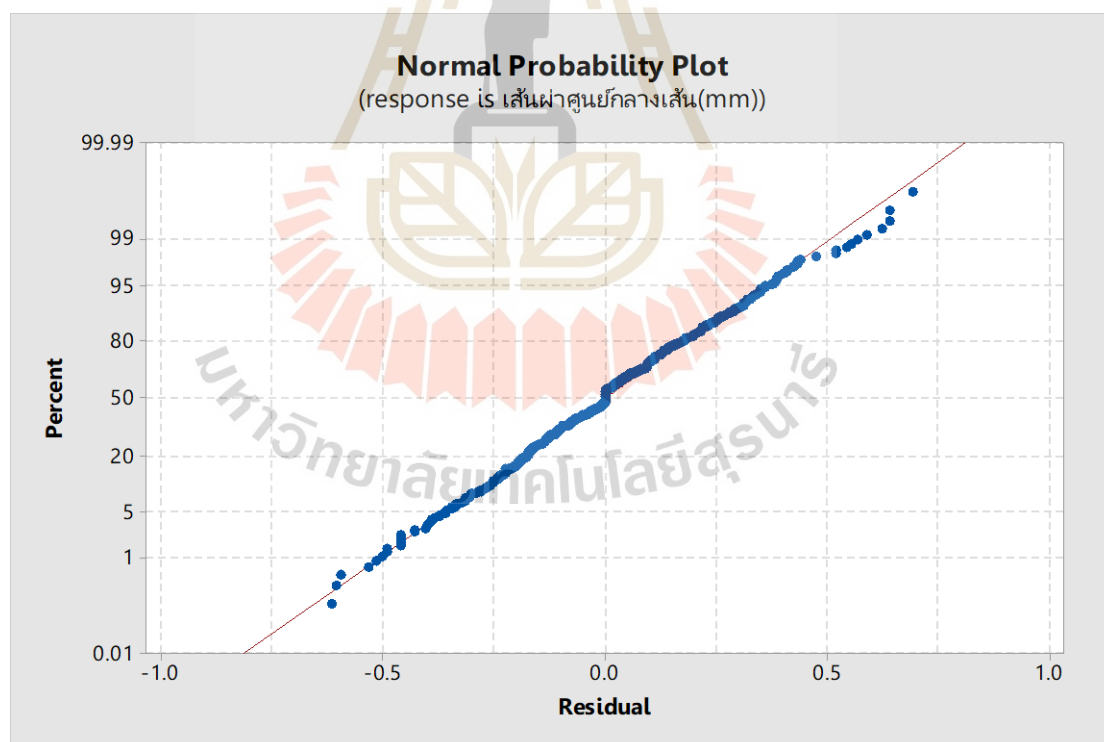
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ Full Factorial Design

จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลตสูตรควบคุม โดยอาศัยโปรแกรมทางสถิติ Minitab Version 17 มาทำการทดลอง จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 นำมาวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

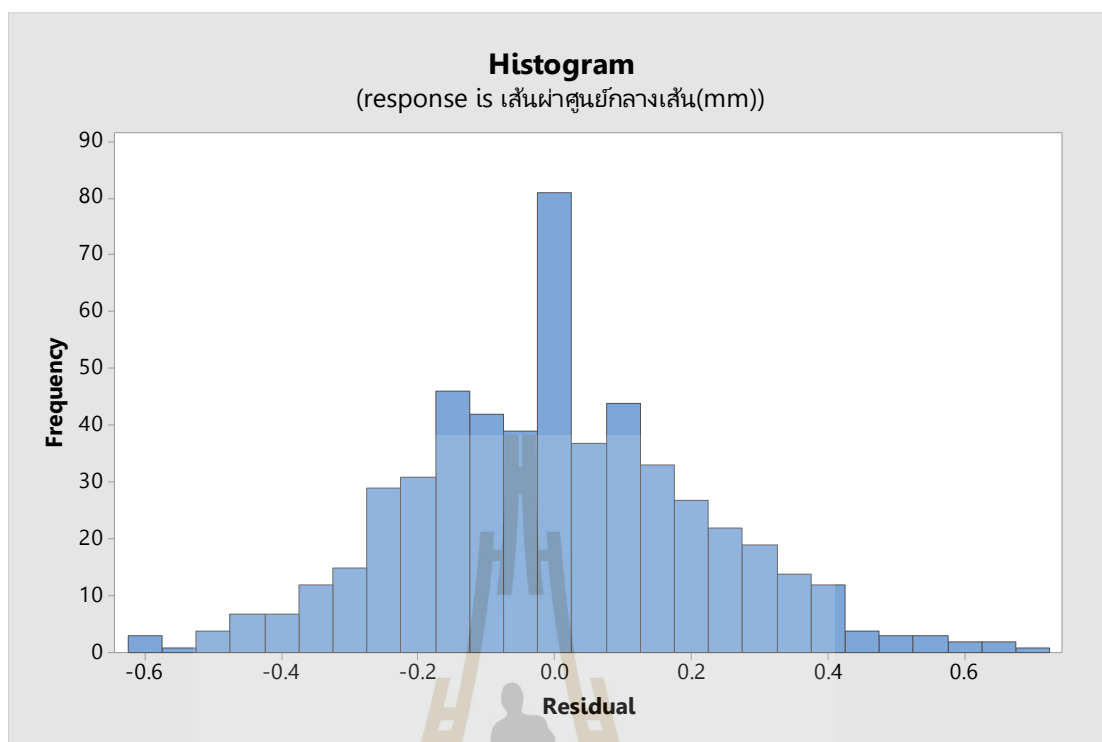
4.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการตรวจสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้แสดงดังนี้

4.2.1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างของชุดข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



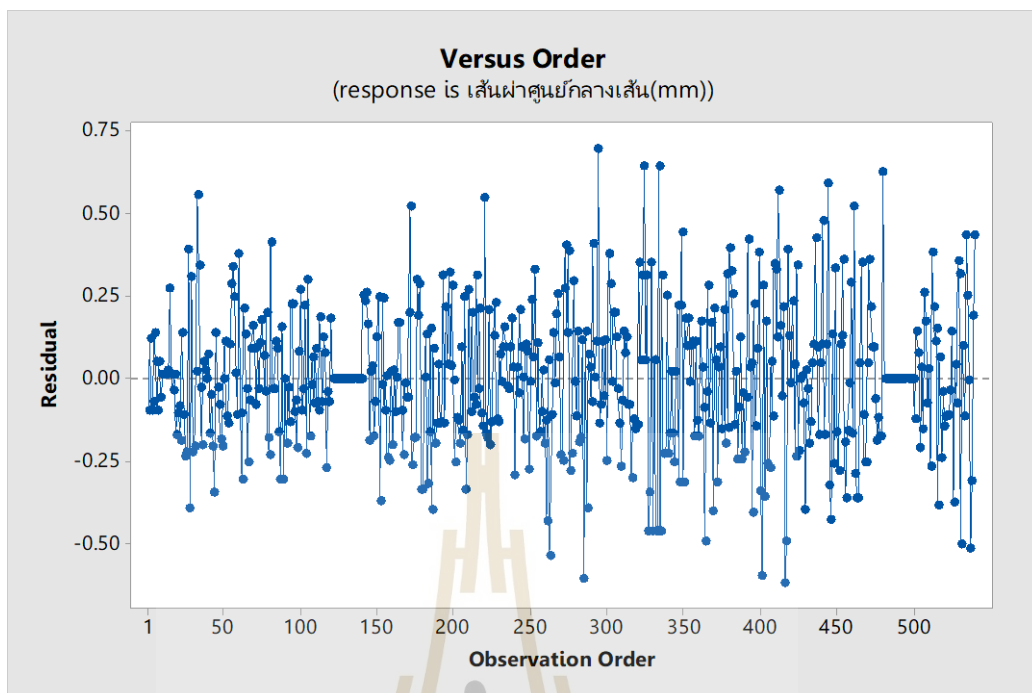
รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)



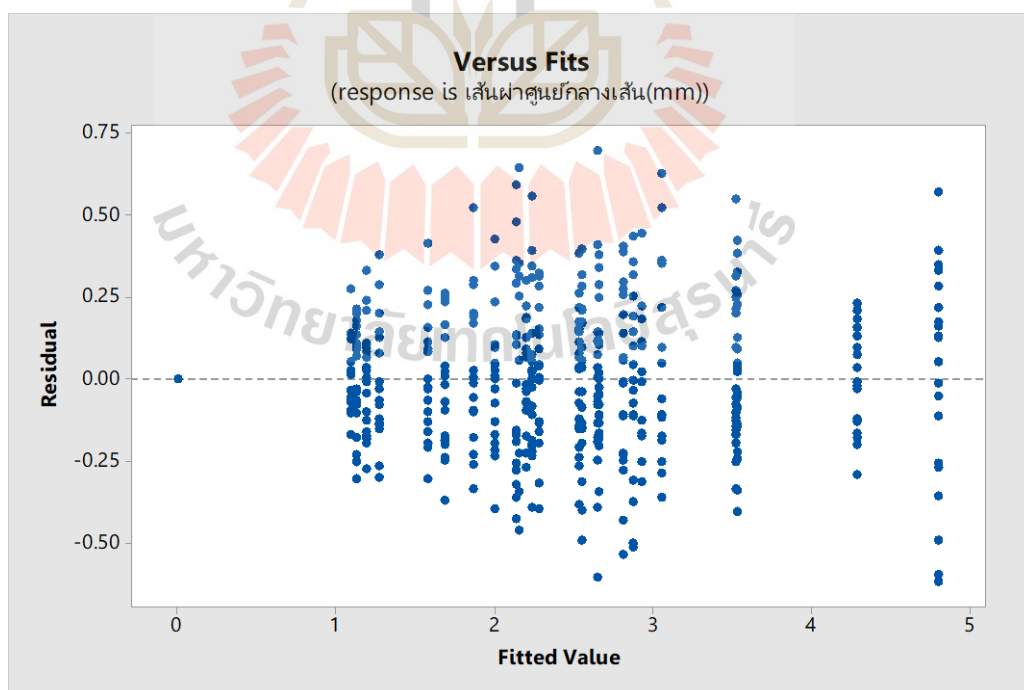
รูปที่ 4.4 การกระจายตัวของค่า Residual บนกราฟ Histogram

4.2.1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) โดยพิจารณาจากการนำข้อมูลค่าส่วนตกค้างมาสร้างเป็นแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) เมื่อพิจารณาจากการกระจายของข้อมูลค่าส่วนตกค้างบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบหรือแนวโน้มที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

4.2.1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับ Fitted Value พบว่า ค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันทั้งแกนบวกและแกนลบ ไม่พบแนวโน้มหรือรูปแบบของการกระจายตัวของส่วนตกค้าง จึงสรุปว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Observation Order



รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของ Residual เทียบกับ Fitted Value

4.2.2 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่ทำการทดลอง

เมื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นซ็อกโกแลต โดยการใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการคำนวณ ได้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการหาผลกระทบของตัวแปรขนาดเกลียวของสกรู (mm), ความสูงของหัวฉีดกับฐาน (mm) และความเร็วของการอัดขึ้นรูป (mm/s) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นซ็อกโกแลต

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	26	639.845	24.609	490.96	0.00
Linear	6	563.406	93.901	1873.33	0.00
ขนาดเกลียวของสกรู (mm)	2	115.845	57.923	1155.56	0.00
ความสูงของหัวฉีดกับฐาน (mm)	2	159.25	79.625	1588.53	0.00
ความเร็วของการอัดขึ้นรูป(mm/s)	2	288.31	144.155	2875.91	0.00
2-Way Interactions	12	48.816	4.068	81.16	0.00
ขนาดเกลียวของสกรู (mm)*ความสูงของหัวฉีดกับฐาน (mm)	4	22.116	5.529	110.3	0.00
ขนาดเกลียวของสกรู (mm)*ความเร็วของการอัดขึ้นรูป(mm/s)	4	5.586	1.397	27.86	0.00
ความสูงของหัวฉีดกับฐาน (mm)*ความเร็วของการอัดขึ้นรูป(mm/s)	4	21.114	5.278	105.31	0.00
3-Way Interactions	8	27.623	3.453	68.88	0.00
ขนาดเกลียวของสกรู(mm)*ความสูงของหัวฉีดกับฐาน (mm)*ความเร็วของการอัดขึ้นรูป(mm/s)	8	27.623	3.453	68.88	0.00
Error	513	25.714	0.05		
Total	539	665.559			

จากตารางที่ 4.3 สัดส่วนของค่าเฉลี่ยความผันแปร (F-Value) มีพฤติกรรมที่อธิบายและหา
ค่าได้ ดังนั้นการวิเคราะห์ว่าอิทธิพลจากปัจจัย A, B, C, AB, AC, BC และ ABC มีผลอย่างมี
นัยสำคัญหรือไม่ สามารถวิเคราะห์ได้ตามสมมติฐาน โดยการทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยัน
ผลลัพธ์ที่นัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีการทดสอบสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานที่ 1 อิทธิพลของปัจจัยหลัก A คือ ความกว้างของเกลียวสกรูมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของความกว้างของเกลียวสกรูไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

H_1 : อิทธิพลของความกว้างของเกลียวสกรูมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เนื่องจากค่า P-value มีค่า 0.00 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึง
ยอมรับ H_1 : อิทธิพลของความกว้างของเกลียวสกรูมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

สมมติฐานที่ 2 อิทธิพลของปัจจัยหลัก B คือ ความสูงระหว่างหัวนึ้ดกับฐานมีผลหรือไม่ สมมติฐาน
คือ

H_0 : อิทธิพลของความสูงระหว่างหัวนึ้ดกับฐานไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
ซ็อกโกแลต

H_1 : อิทธิพลของความสูงระหว่างหัวนึ้ดกับฐานมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เนื่องจากค่า P-value มีค่า 0.00 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึง
ยอมรับ H_1 อิทธิพลของความสูงระหว่างหัวนึ้ดกับฐานมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

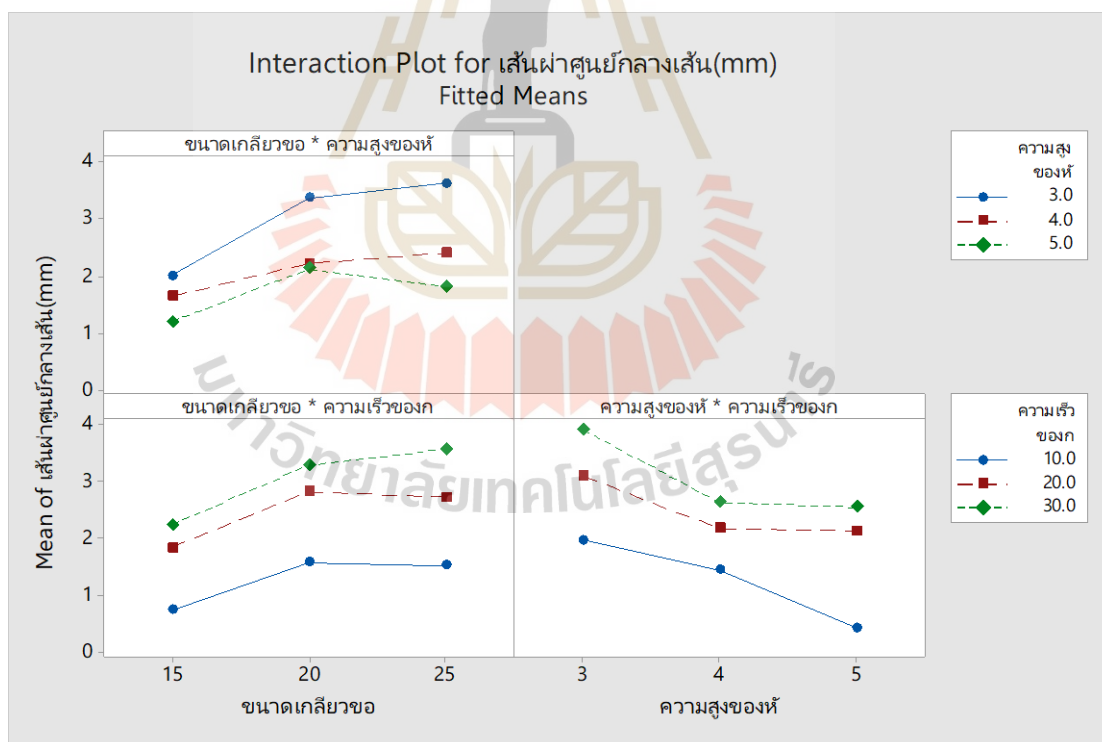
สมมติฐานที่ 3 อิทธิพลของปัจจัยหลัก C คือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลหรือไม่ สมมติฐานคือ

H_0 : อิทธิพลของความเร็วของการอัดขึ้นรูปไม่มีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

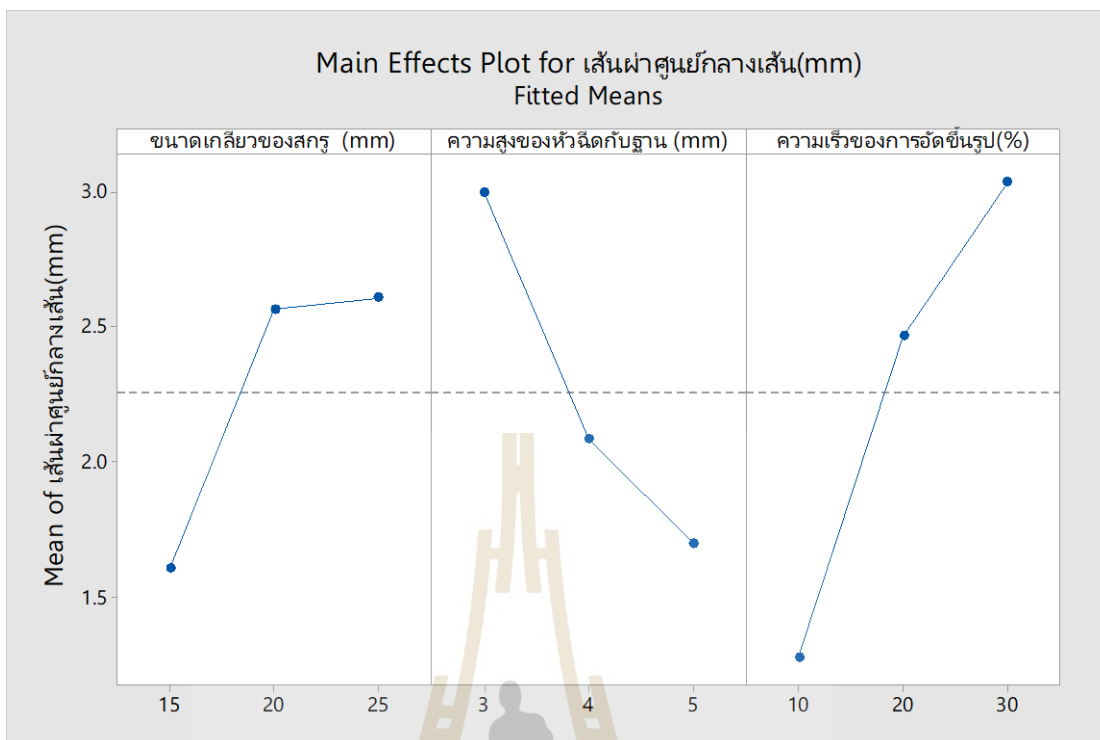
H_1 : อิทธิพลของความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

ปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เนื่องจากค่า P-value มีค่า 0.00 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นจึง
ยอมรับ H_1 อิทธิพลของความเร็วของการอัดขึ้นรูปมีผลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางซ็อกโกแลต

จากการวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักสองปัจจัย (2-Way Interactions) คือ ขนาดเกลียวของสกรูกระทำร่วมกับความสูงของหัวนึ้ดกับฐาน ขนาดเกลียวของสกรูกระทำร่วมกับความเร็วของการอัดขึ้นรูปและความเร็วของการอัดขึ้นรูปกระทำร่วมกับความสูงของหัวนึ้ดกับฐาน พบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักสองปัจจัย มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าพบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักสองปัจจัยทั้งสามมีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญ การวิเคราะห์อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยสามปัจจัย (3-Way Interactions) คือ การกระทำร่วมกันของปัจจัยหลักสามปัจจัยประกอบด้วย ขนาดเกลียวของสกรู ความสูงของหัวนึ้ดกับฐานและความเร็วของการอัดขึ้นรูป พบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักสามปัจจัย มีค่า P-Value เท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าพบว่าอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักทั้งสามปัจจัยมีอิทธิพลต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยสามปัจจัย สามารถตรวจสอบแนวโน้มของการกระทำร่วมกันของปัจจัยได้จากรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 Interaction Plot ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต



รูปที่ 4.8 Main Effects Plot ของขนาดเกลียวของสกรู ความสูงของหัวน๊อตกับฐานและ
ความเร็วของการอัดขึ้นรูป

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดเกลียวของสกรูเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ที่ขนาดเกลียวของสกรูเท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตประมาณ 1.5 มิลลิเมตร และที่ขนาดเกลียวสกรูเท่ากับ 20 และ 25 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ต่อมาคือความสูงของหัวน๊อตกับฐาน จากรูปพบว่า เมื่อความสูงของหัวน๊อตกับฐานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตมีแนวโน้มลดลง ที่ความสูง 4 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตใกล้เคียงกับขนาดของหัวน๊อตที่สุดคือ 2 มิลลิเมตร สุดท้ายความเร็วของการอัดขึ้นรูป พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของการอัดขึ้นรูปมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่าที่ความเร็วของการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 20 ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตมีค่าใกล้เคียงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวน๊อตมากที่สุด

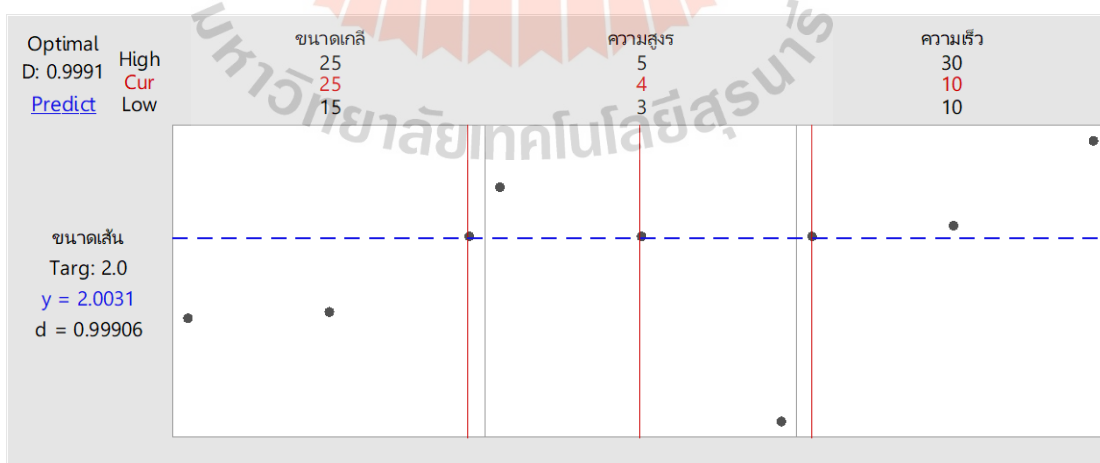
จากชุดข้อมูลทั้งหมดพบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ R-sq โดยค่า R-sq มีค่าเท่ากับ 96.14% และค่า R-sq(adj) มีค่าเท่ากับ 95.94% ซึ่งมีความมากกว่า 70% ซึ่งตามหลักสถิติถือว่ายอมรับได้ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.223886	96.14%	95.94%	95.72%

4.2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต จะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4 มิลลิเมตร ซึ่งในงานวิจัยต้องการหาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลตให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นที่ใกล้เคียงกับขนาดของหัวฉีดมากที่สุดเพื่อความถูกต้องของการฉีดขึ้นรูปงานสามมิติต่อไป ซึ่งผู้วิจัยใช้คำสั่ง Response Optimizer ในโปรแกรม Minitab V.17 ในการวิเคราะห์หาระดับปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการฉีดเส้นช็อกโกแลตให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ผลลัพธ์แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ค่าที่เหมาะสมต่อการฉีดเส้นช็อกโกแลตให้มีขนาดใกล้เคียง 2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย

Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้น (mm)	Target	0	2	5.367	1	1
Solution						
Solution	ขนาดเกลียวของสกรู(mm)	ความสูงระหว่างหัวลึดกับฐาน (mm)	ความเร็วของการอัดขึ้นรูป (mm/s)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้น (mm)	Composite Desirability	
1	25	4	10	2.00315	0.999064	
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI		
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้น (mm)	2.0031	0.0501	(1.9048, 2.1015)	(1.5524, 2.4539)		

จากการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.5 พบว่า ระดับปัจจัยที่ส่งผลให้สามารถฉีดเส้นช็อก โกลเดตให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต้องกำหนดตัวแปรต้นดังนี้ ขนาดเกลียวของสกรูเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ความสูงระหว่างหัวลึดกับฐานเท่ากับ 4 มิลลิเมตรและความเร็วของการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 10 จะส่งผลให้ได้เส้นช็อก โกลเดตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.00315 มิลลิเมตร ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาในงานวิจัยนี้ทั้ง 2 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนที่หนึ่ง การศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลต และส่วนที่สองเป็นการหาค่าตัวแปรการฉีดที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการและให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด 2 มิลลิเมตรมากที่สุด สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1.1 การศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลต

ผลการทดสอบพฤติกรรมการไหลและการศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของช็อกโกแลตพบว่า ช็อกโกแลตสูตรควบคุมเป็นของเหลวชนิดนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) คือที่อุณหภูมิใดใดของเหลวจะมีค่าความหนืดที่แตกต่างกันและจะเปลี่ยนไปเมื่อมีอัตราเฉือนมากระทำกับของเหลว ซึ่งช็อกโกแลตสูตรควบคุมนี้มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) มีลักษณะคือ เมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นความเค้นเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นด้วยในขณะเดียวกันความหนืดของช็อกโกแลตจะมีแนวโน้มค่อยๆลดลง ค่าความเค้นเฉือนมีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 682 Pa ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส และมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส มีค่าอยู่ที่ 839 Pa นอกจากนี้จากผลการทดสอบพบว่าค่าความหนืดที่ต่ำที่สุดของช็อกโกแลตสูตรควบคุมอยู่ที่ 55.4 Pa·s ที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 26 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนืดมีค่าอยู่ที่ 153 Pa·s ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่สูงที่สุดในการทดสอบ

5.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลต

จากการทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตที่ฉีดขึ้นรูปด้วยสกรูเดี่ยว ด้วยวิธีการทำการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลสามระดับ (Full Factorial Design) พบว่าปัจจัยหลักทั้งสามปัจจัยคือ ขนาดเกลียวของสกรู ความสูงของหัวฉีดกับฐานและความเร็วของการอัดขึ้นรูป ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลระหว่างปัจจัยที่ระดับสองปัจจัยและสามปัจจัย ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตอย่างมีนัยสำคัญในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ความสัมพันธ์ของปัจจัยกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตนั้น ปัจจัยแรกคือ ขนาดเกลียวของสกรู เมื่อเพิ่มขนาดเกลียวของสกรูจากขนาด 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร ส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตเพิ่มขึ้นตามลำดับ ปัจจัยที่สองคือ ความสูงของหัวฉีดกับฐาน เมื่อเพิ่มความสูงของหัวฉีดกับฐานจาก 3, 4 และ 5 มิลลิเมตร ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตลดลงตามลำดับ และปัจจัยที่สามคือ ความเร็วของการอัดขึ้นรูป เมื่อเพิ่มความเร็วของการอัดขึ้นรูปพบว่า ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากการวิเคราะห์ข้างต้นทำให้สามารถกำหนดระดับตัวแปรของปัจจัยหลักที่ส่งผลทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นช็อกโกแลตมีขนาดใกล้เคียงกับหัวฉีด คือ 2 มิลลิเมตรมากที่สุด คือ ขนาดเกลียวของสกรูเท่ากับ 25 มิลลิเมตร ความสูงของหัวฉีดกับฐานเท่ากับ 4 มิลลิเมตรและความเร็วของการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้ได้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเส้นช็อกโกแลตเท่ากับ 2.00 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ชนิดของของไหลมีผลต่อการออกแบบระบบหัวฉีด

ช็อกโกแลตสูตรควบคุมที่นำมาทำการทดลองคือของไหลที่ขึ้นกับเวลาและอัตราเฉือน กล่าวคือความหนืดจะเปลี่ยนไปเมื่อมีแรงกระทำกับวัสดุ จากการทดลองพบว่าเมื่อนิดเส้นช็อกโกแลตเป็นระยะเวลาานาน ความหนืดของช็อกโกแลตมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลา คือเมื่อเวลาผ่านไปช็อกโกแลตจะเริ่มเหลวขึ้นเรื่อยๆ สันฐานว่าเกิดจากการที่ช็อกโกแลตสะสมตัวอยู่ในสกรูเป็นระยะเวลาานานไปทำให้ได้รับแรงกระทำกับวัสดุมาก อีกทั้งระยะเวลาของสกรูนืดก่อนเข้ายาว ดังนั้นในการศึกษาในอนาคตควรเพิ่มการออกแบบสกรูให้เหมาะสมกับชนิดและพฤติกรรมของวัสดุ

5.2.2 ค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการนืดเส้นช็อกโกแลต

ในการทดลองนืดเส้นช็อกโกแลตนั้นยังมีตัวแปรในการขึ้นรูปอีกมากเช่น ความเร็วชุดเคลื่อนที่หัวฉีด อุณหภูมิวัสดุฉีด อุณหภูมิฐานรองวัสดุ ซึ่งเป็นตัวแปรที่น่าสนใจในการศึกษา เนื่องจากตัวแปรที่ผู้วิจัยได้ศึกษานั้นอาจไม่เพียงพอต่อการนืดขึ้นรูปช็อกโกแลตในรูปแบบทรงสามมิติ

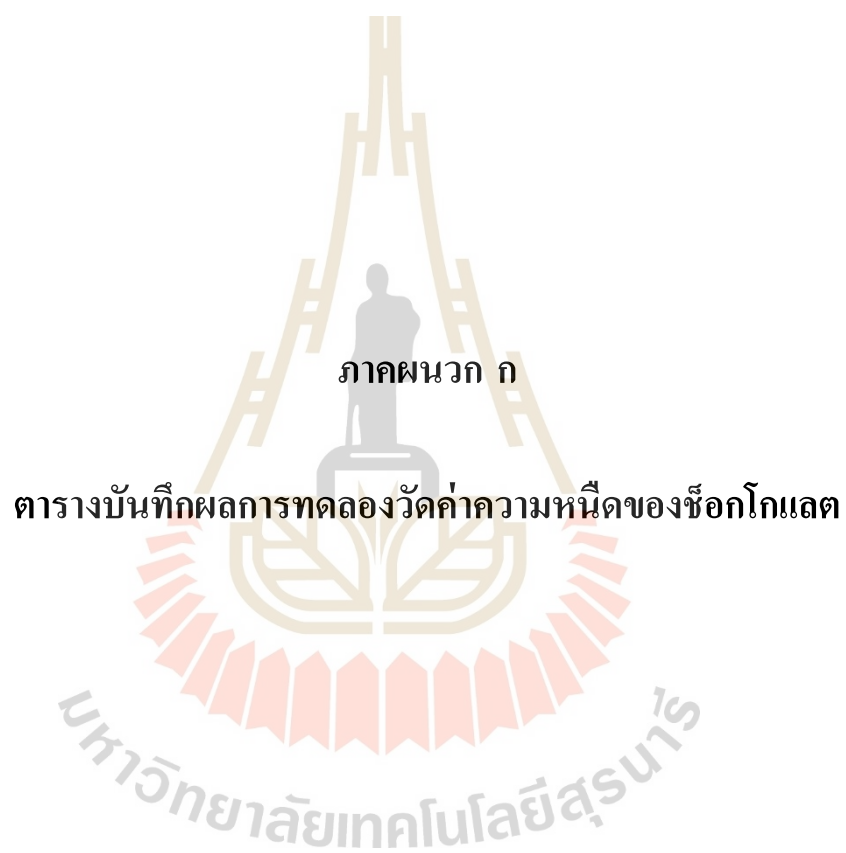
รายการอ้างอิง

- โสภิตา สุขจรุง. (ม.ป.ป.). **เรื่องดีๆของช็อกโกแลต**. ศูนย์น้ำมันที่ 12 จังหวัดยะลา กองบรรณาธิการ.
2015. **Productivity 2015 Conference**พัฒนาภาคอุตสาหกรรมไทยให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงตามแนวทางการจัดการในอนาคต. *Future Management Issue* 119
- จิตติพร เครือเนตร. (2546). **กลศาสตร์ของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน ตอนที่ 1**. วารสาร MTEC. 25-28
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นิสกา ศีตป์ปีย์. (2546). **การวิเคราะห์อาหารด้วยเทคนิครีโอโลยี**. วารสาร MTEC. 24-28
- สมพร สีนเจริญ โภคย์. (ม.ป.ป.). **เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) กับการออกแบบเซรามิก**. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, 29-32
- สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. (2551). **การสร้างต้นแบบรวดเร็ว(Rapid Prototyping)**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สายชล สีนสมบูรณ์ทอง. (2558). **การวางแผนแบบการทดลอง เล่ม 2**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สายันท์ สุขพงษ์พันธ์และวิรัตน์ ปฐมชัยอัมพร. (2549). **ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล**
- Beckett, S.T. (2009). **The science of chocolate**, 2 ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry Paperbacks, 2009b. pp. 240.
- Chao-Fan Guo, Min Zhang, Bhesh Bhandari. (2019). **“A comparative study between syringe-based and screw-based 3D food printers by computational simulation”**. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 162. pp. 397-404
- C. Gosselin, R. Duballet, Ph. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, Ph. Morel. (2016). **“Large-scale 3D printing of ultra-high-performance concrete – a new processing route for architects and builders”**. *Materials & Design*. Volume 100. pp. 102-109
- Fernanda C. Godoi, Sangeeta Prakash, Bhesh R. Bhandari. (2016). **“3 d printing technologies applied for food design: Status and prospects”**. *Journal of Food Engineering*. Volume 179. pp. 44-54

- Iman Dankar, Amira Haddarah, Fawaz E.L. Omar, Francesc Sepulcre, Montserrat Pujolà. (2018).
“3D printing technology: The new era for food customization and elaboration”
 Trends in Food Science & Technology. Volume 75. pp. 231-242
- Jie Sun, Weibiao Zhou, Liangkun Yan, Dejian Huang, Lien-ya Lin. (2018). **“Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control”**. Journal of Food Engineering. Volume 220. pp. 1-11
- Jie Sun, Zhuo Peng, Weibiao Zhou, Jerry Y.H. Fuh, Geok Soon Hong, Annette Chiu. (2015). **“A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication”**. Procedia Manufacturing. Volume 1. pp. 308-319
- J.I. Orisaleye, O.A. Adefuye, A.A. Ogundare, O.L. Fadipe. (2018). **“Parametric analysis and design of a screw extruder for slightly non-Newtonian (pseudoplastic) materials”**. Engineering Science and Technology, an International Journal. Volume 21, Issue 2. pp. 229-237
- J.V. Diaz, B.K.J.C. Van, M.W.J. Noort, J. Henket, P. Briër. (2014). **“Method for the Production of Edible Objects Using SIs and Food Products”**. Google Patents.
- Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhriгу Ahuja, Filomeno Martina. (2016). **“Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints”**. CIRP Annals. Volume 65, Issue 2. pp. 737-760
- Matthew Lanaro, David P. Forrestal, Stefan Scheurer, Damien J. Slinger, Sam Liao, Sean K. Powell, Maria A. Woodruff. (2017). **“3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation”**. Journal of Food Engineering. Volume 215. pp. 13-22
- Murphy, S. V. and A. Atala. (2014). **“3D bioprinting of tissues and organs”**. Nature Biotechnology 32(8): 773-785.
- Wenbin Li, Amir Ghazanfari, Ming C. Leu, and Robert G. Landers. (2017). **“Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication”**. Virtual and Physical Prototyping 12(3): 193-205.
- Wohlers, T. T. (2014). Wohlers Report...: **“3D Printing and Additive Manufacturing, State of the Industry”**. Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates Incorporated.

- Zhenbin Liu, Min Zhang, Bhesh Bhandari, Chaohui Yang. (2018). **“Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing”**. Journal of Food Engineering. Volume 220. pp. 76-82
- Zhenbin Liu, Min Zhang, Bhesh Bhandari, Yuchuan Wang. (2017). **“3D printing: Printing precision and application in food sector”**. Trends in Food Science & Technology. Volume 69, Part A. pp. 83-94





ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
1	0.718	110	153000	26	153
2	2.73	249	91100	26	91.1
3	5.49	349	63600	26	63.6
4	7.75	410	52900	26	52.9
5	9.86	461	46800	26	46.8
6	11.9	507	42500	26	42.5
7	14	549	39200	26	39.2
8	16.1	587	36600	26	36.6
9	18.1	622	34300	26	34.3
10	20.2	653	32400	26	32.4
11	22.2	685	30900	26	30.9
12	24.3	711	29300	26	29.3
13	26.4	731	27700	26	27.7
14	28.4	750	26400	26	26.4
15	30.4	769	25300	26	25.3
16	32.5	785	24100	26	24.1
17	34.5	795	23100	26	23.1
18	36.6	805	22000	26	22
19	38.7	811	21000	26	21
20	40.6	817	20100	26	20.1
21	42.5	827	19400	26	19.4
22	44.6	833	18700	26	18.7
23	46.7	838	18000	26	18
24	48.8	836	17100	26	17.1
25	50.7	836	16500	26	16.5

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
26	52.8	847	16000	26	16
27	54.8	853	15600	26	15.6
28	57	848	14900	26	14.9
29	58.9	836	14200	26	14.2
30	60.9	823	13500	26	13.5
31	62.8	819	13000	26	13
32	64.7	819	12700	26	12.7
33	67	819	12200	26	12.2
34	68.8	815	11800	26	11.8
35	70.8	823	11600	26	11.6
36	72.8	823	11300	26	11.3
37	74.7	824	11000	26	11
38	76.9	836	10900	26	10.9
39	79.3	839	10600	26	10.6
40	81.6	801	9820	26	9.82
41	83.3	780	9370	26	9.37
42	85.2	765	8980	26	8.98
43	87.1	762	8750	26	8.75
44	88.5	777	8790	26	8.79
45	91.6	797	8700	26	8.7
46	93.6	751	8030	26	8.03
47	95.5	729	7630	26	7.63
48	97.3	712	7320	26	7.32
49	99.5	688	6920	26	6.92
50	101	668	6580	26	6.58

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
51	103	643	6230	26	6.23
52	105	639	6090	26	6.09
53	106	722	6780	26	6.78
54	109	742	6780	26	6.78
55	111	729	6560	26	6.56
56	113	729	6430	26	6.43
57	116	715	6190	26	6.19
58	118	667	5660	26	5.66
59	120	619	5160	26	5.16
60	122	581	4770	26	4.77
61	124	548	4430	26	4.43
62	126	519	4130	26	4.13
63	128	496	3890	26	3.89
64	129	485	3740	26	3.74
65	129	559	4330	26	4.33
66	134	690	5150	26	5.15
67	135	651	4820	26	4.82
68	137	700	5090	26	5.09
69	140	635	4530	26	4.53
70	143	562	3940	26	3.94
71	144	501	3480	26	3.48
72	146	461	3160	26	3.16
73	148	426	2880	26	2.88
74	150	398	2660	26	2.66
75	152	376	2470	26	2.47

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
76	153	370	2420	26	2.42
77	154	472	3070	26	3.07
78	157	631	4010	26	4.01
79	161	579	3610	26	3.61
80	162	584	3610	26	3.61
81	164	550	3340	26	3.34
82	166	569	3440	26	3.44
83	169	477	2830	26	2.83
84	171	402	2360	26	2.36
85	172	356	2070	26	2.07
86	174	321	1840	26	1.84
87	176	295	1670	26	1.67
88	178	278	1560	26	1.56
89	180	262	1450	26	1.45
90	182	246	1350	26	1.35
91	184	236	1280	26	1.28
92	186	227	1220	26	1.22
93	188	218	1160	26	1.16
94	190	209	1100	26	1.1
95	192	201	1050	26	1.05
96	194	193	992	26	0.992
97	196	187	952	26	0.952
98	198	180	907	26	0.907
99	199	196	989	26	0.989
2	0.912	97.8	107000	28	107

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
3	3.31	202	60900	28	60.9
4	5.86	261	44400	28	44.4
5	7.93	301	38000	28	38
6	9.97	340	34100	28	34.1
7	12	375	31300	28	31.3
8	14	409	29100	28	29.1
9	16.1	442	27500	28	27.5
10	18.1	473	26100	28	26.1
11	20.1	502	24900	28	24.9
12	22.2	529	23900	28	23.9
13	24.2	556	22900	28	22.9
14	26.3	581	22100	28	22.1
15	28.3	605	21400	28	21.4
16	30.3	629	20800	28	20.8
17	32.3	652	20200	28	20.2
18	34.4	673	19600	28	19.6
19	36.3	696	19100	28	19.1
20	38.4	718	18700	28	18.7
21	40.4	737	18200	28	18.2
22	42.4	758	17900	28	17.9
23	44.5	774	17400	28	17.4
24	46.6	786	16900	28	16.9
25	48.6	796	16400	28	16.4
26	50.8	803	15800	28	15.8
27	52.8	805	15300	28	15.3

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
28	54.8	806	14700	28	14.7
29	56.7	813	14300	28	14.3
30	58.8	819	13900	28	13.9
31	60.8	819	13500	28	13.5
32	62.9	821	13100	28	13.1
33	64.9	822	12700	28	12.7
34	67	818	12200	28	12.2
35	68.9	818	11900	28	11.9
36	71.1	808	11400	28	11.4
37	73	795	10900	28	10.9
38	74.9	795	10600	28	10.6
39	77	802	10400	28	10.4
40	79.1	798	10100	28	10.1
41	80.8	814	10100	28	10.1
42	82.7	831	10000	28	10
43	85.3	841	9860	28	9.86
44	87.4	818	9360	28	9.36
45	89.3	798	8940	28	8.94
46	91.2	778	8540	28	8.54
47	93.3	769	8240	28	8.24
48	95.4	747	7830	28	7.83
49	96.4	733	7600	28	7.6
50	98.3	792	8060	28	8.06
51	101	823	8150	28	8.15
52	104	783	7560	28	7.56

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
53	105	767	7300	28	7.3
54	108	763	7090	28	7.09
55	110	763	6970	28	6.97
56	111	721	6460	28	6.46
57	113	717	6350	28	6.35
58	115	745	6500	28	6.5
59	118	739	6270	28	6.27
60	119	742	6220	28	6.22
61	122	685	5620	28	5.62
62	124	634	5110	28	5.11
63	126	592	4710	28	4.71
64	128	565	4420	28	4.42
65	129	547	4220	28	4.22
66	129	670	5180	28	5.18
67	134	683	5090	28	5.09
68	136	610	4470	28	4.47
69	138	567	4110	28	4.11
70	140	525	3750	28	3.75
71	142	493	3480	28	3.48
72	144	464	3230	28	3.23
73	146	445	3060	28	3.06
74	145	508	3510	28	3.51
75	150	594	3950	28	3.95
76	152	533	3510	28	3.51
77	154	497	3220	28	3.22

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
78	156	450	2880	28	2.88
79	158	416	2630	28	2.63
80	160	388	2420	28	2.42
81	162	358	2210	28	2.21
82	164	341	2080	28	2.08
83	166	324	1950	28	1.95
84	168	311	1850	28	1.85
85	170	301	1770	28	1.77
86	172	288	1680	28	1.68
87	174	278	1600	28	1.6
88	176	271	1540	28	1.54
89	178	262	1470	28	1.47
90	180	254	1410	28	1.41
91	182	246	1350	28	1.35
92	184	237	1290	28	1.29
93	186	228	1220	28	1.22
94	188	223	1180	28	1.18
95	190	215	1130	28	1.13
96	192	208	1080	28	1.08
97	194	201	1040	28	1.04
98	195	206	1060	28	1.06
99	196	402	2050	28	2.05
100	200	511	2550	28	2.55
2	1.02	84.5	82500	30	82.5
3	3.62	168	46400	30	46.4

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
4	5.99	208	34700	30	34.7
5	8.02	238	29700	30	29.7
6	10.1	267	26600	30	26.6
7	12.1	295	24400	30	24.4
8	14.1	321	22800	30	22.8
9	16.1	346	21500	30	21.5
10	18.1	371	20400	30	20.4
11	20.2	394	19500	30	19.5
12	22.2	417	18800	30	18.8
13	24.2	438	18100	30	18.1
14	26.3	459	17500	30	17.5
15	28.3	478	16900	30	16.9
16	30.3	498	16400	30	16.4
17	32.3	516	16000	30	16
18	34.3	535	15600	30	15.6
19	36.4	554	15200	30	15.2
20	38.4	569	14800	30	14.8
21	40.4	587	14500	30	14.5
22	42.5	605	14200	30	14.2
23	44.4	620	14000	30	14
24	46.5	637	13700	30	13.7
25	48.5	652	13400	30	13.4
26	50.5	666	13200	30	13.2
27	52.6	678	12900	30	12.9
28	54.6	689	12600	30	12.6

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
29	56.7	696	12300	30	12.3
30	58.8	702	11900	30	11.9
31	60.7	708	11700	30	11.7
32	62.8	711	11300	30	11.3
33	64.9	714	11000	30	11
34	66.8	713	10700	30	10.7
35	68.9	711	10300	30	10.3
36	70.9	714	10100	30	10.1
37	72.9	716	9830	30	9.83
38	74.9	712	9510	30	9.51
39	77	709	9200	30	9.2
40	79	709	8970	30	8.97
41	81	708	8740	30	8.74
42	83	703	8470	30	8.47
43	85.1	694	8150	30	8.15
44	87.1	687	7890	30	7.89
45	89	687	7710	30	7.71
46	91.2	683	7500	30	7.5
47	93.1	679	7300	30	7.3
48	95.2	675	7090	30	7.09
49	97.2	671	6910	30	6.91
50	98.9	669	6760	30	6.76
51	101	683	6760	30	6.76
52	103	678	6560	30	6.56
53	105	661	6270	30	6.27

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
54	107	650	6060	30	6.06
55	109	633	5780	30	5.78
56	111	621	5580	30	5.58
57	113	606	5350	30	5.35
58	115	611	5310	30	5.31
59	117	665	5700	30	5.7
60	120	664	5550	30	5.55
61	122	634	5210	30	5.21
62	124	606	4900	30	4.9
63	126	585	4650	30	4.65
64	128	566	4440	30	4.44
65	130	547	4220	30	4.22
66	132	530	4030	30	4.03
67	134	524	3920	30	3.92
68	136	507	3730	30	3.73
69	136	507	3710	30	3.71
70	140	652	4670	30	4.67
71	142	599	4220	30	4.22
72	144	558	3870	30	3.87
73	146	531	3630	30	3.63
74	148	505	3420	30	3.42
75	150	487	3250	30	3.25
76	152	462	3040	30	3.04
77	154	441	2860	30	2.86
78	156	422	2710	30	2.71

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
79	158	408	2590	30	2.59
80	160	392	2450	30	2.45
81	162	381	2350	30	2.35
82	164	369	2250	30	2.25
83	166	361	2180	30	2.18
84	168	351	2090	30	2.09
85	170	342	2010	30	2.01
86	169	403	2390	30	2.39
87	175	592	3380	30	3.38
88	175	541	3090	30	3.09
89	178	546	3060	30	3.06
90	181	490	2720	30	2.72
91	183	441	2420	30	2.42
92	185	388	2100	30	2.1
93	186	354	1900	30	1.9
94	188	330	1760	30	1.76
95	190	322	1690	30	1.69
96	192	302	1570	30	1.57
97	194	285	1470	30	1.47
98	196	274	1400	30	1.4
99	198	267	1350	30	1.35
100	200	259	1300	30	1.3
2	1.21	81.4	67100	32	67.1
3	3.87	142	36600	32	36.6
4	6.04	169	28000	32	28

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
5	8.06	193	24000	32	24
6	10.1	216	21400	32	21.4
7	12.1	238	19700	32	19.7
8	14.1	259	18400	32	18.4
9	16.1	280	17400	32	17.4
10	18.2	301	16600	32	16.6
11	20.2	320	15900	32	15.9
12	22.2	339	15300	32	15.3
13	24.2	357	14800	32	14.8
14	26.3	376	14300	32	14.3
15	28.3	395	14000	32	14
16	30.3	412	13600	32	13.6
17	32.3	429	13300	32	13.3
18	34.3	447	13000	32	13
19	36.4	463	12700	32	12.7
20	38.4	481	12500	32	12.5
21	40.4	497	12300	32	12.3
22	42.4	513	12100	32	12.1
23	44.4	529	11900	32	11.9
24	46.5	545	11700	32	11.7
25	48.5	560	11500	32	11.5
26	50.5	576	11400	32	11.4
27	52.5	591	11300	32	11.3
28	54.6	607	11100	32	11.1
29	56.5	622	11000	32	11

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
30	58.6	636	10900	32	10.9
31	60.6	650	10700	32	10.7
32	62.6	662	10600	32	10.6
33	64.7	673	10400	32	10.4
34	66.7	684	10200	32	10.2
35	68.7	689	10000	32	10
36	70.9	693	9780	32	9.78
37	73	694	9510	32	9.51
38	74.9	694	9260	32	9.26
39	76.9	692	9000	32	9
40	78.9	693	8780	32	8.78
41	80.9	700	8650	32	8.65
42	83	703	8470	32	8.47
43	85	698	8210	32	8.21
44	87.1	692	7940	32	7.94
45	89.1	685	7690	32	7.69
46	91.1	680	7470	32	7.47
47	93.1	676	7260	32	7.26
48	95.1	677	7120	32	7.12
49	97.2	673	6930	32	6.93
50	99.2	668	6730	32	6.73
51	101	659	6510	32	6.51
52	103	670	6510	32	6.51
53	105	672	6370	32	6.37
54	108	653	6070	32	6.07

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
55	109	637	5830	32	5.83
56	111	642	5790	32	5.79
57	113	651	5740	32	5.74
58	115	637	5510	32	5.51
59	117	617	5260	32	5.26
60	119	606	5080	32	5.08
61	121	628	5190	32	5.19
62	124	623	5040	32	5.04
63	125	616	4910	32	4.91
64	127	634	5000	32	5
65	130	637	4910	32	4.91
66	132	607	4610	32	4.61
67	134	583	4360	32	4.36
68	136	555	4090	32	4.09
69	138	539	3920	32	3.92
70	140	524	3750	32	3.75
71	142	509	3590	32	3.59
72	144	498	3470	32	3.47
73	146	487	3340	32	3.34
74	146	513	3520	32	3.52
75	150	583	3890	32	3.89
76	151	562	3710	32	3.71
77	154	573	3730	32	3.73
78	157	546	3490	32	3.49
79	158	507	3210	32	3.21

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
80	160	477	2980	32	2.98
81	162	449	2770	32	2.77
82	164	431	2630	32	2.63
83	166	418	2520	32	2.52
84	168	405	2410	32	2.41
85	170	393	2310	32	2.31
86	172	380	2210	32	2.21
87	174	369	2120	32	2.12
88	176	358	2030	32	2.03
89	176	427	2430	32	2.43
90	180	521	2890	32	2.89
91	181	524	2890	32	2.89
92	185	495	2680	32	2.68
93	187	453	2430	32	2.43
94	188	407	2160	32	2.16
95	190	372	1950	32	1.95
96	192	349	1820	32	1.82
97	194	333	1710	32	1.71
98	196	321	1640	32	1.64
99	198	310	1560	32	1.56
100	200	298	1490	32	1.49
2	1.36	75.7	55400	34	55.4
3	3.98	122	30700	34	30.7
4	6.07	143	23600	34	23.6
5	8.09	163	20100	34	20.1

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
6	10.1	182	18000	34	18
7	12.1	200	16500	34	16.5
8	14.1	218	15400	34	15.4
9	16.2	235	14500	34	14.5
10	18.2	252	13900	34	13.9
11	20.2	268	13300	34	13.3
12	22.2	285	12800	34	12.8
13	24.2	302	12500	34	12.5
14	26.3	318	12100	34	12.1
15	28.3	334	11800	34	11.8
16	30.3	350	11600	34	11.6
17	32.3	366	11300	34	11.3
18	34.3	382	11100	34	11.1
19	36.4	398	10900	34	10.9
20	38.4	413	10800	34	10.8
21	40.4	429	10600	34	10.6
22	42.4	445	10500	34	10.5
23	44.4	461	10400	34	10.4
24	46.5	476	10300	34	10.3
25	48.5	492	10200	34	10.2
26	50.5	508	10100	34	10.1
27	52.5	524	9980	34	9.98
28	54.5	539	9890	34	9.89
29	56.6	555	9810	34	9.81
30	58.6	569	9720	34	9.72

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
31	60.6	582	9600	34	9.6
32	62.7	596	9510	34	9.51
33	64.6	609	9420	34	9.42
34	66.7	620	9290	34	9.29
35	68.7	633	9200	34	9.2
36	70.7	646	9130	34	9.13
37	72.7	657	9030	34	9.03
38	74.8	667	8910	34	8.91
39	76.9	675	8770	34	8.77
40	79	679	8590	34	8.59
41	81	677	8370	34	8.37
42	82.9	677	8170	34	8.17
43	84.9	681	8020	34	8.02
44	87	682	7840	34	7.84
45	89	683	7670	34	7.67
46	91.1	682	7480	34	7.48
47	93.1	682	7320	34	7.32
48	95.1	682	7180	34	7.18
49	97.2	681	7010	34	7.01
50	99.2	674	6800	34	6.8
51	101	670	6610	34	6.61
52	103	662	6410	34	6.41
53	105	657	6240	34	6.24
54	107	660	6150	34	6.15
55	109	653	5970	34	5.97

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
56	111	647	5810	34	5.81
57	113	645	5700	34	5.7
58	115	641	5550	34	5.55
59	117	628	5350	34	5.35
60	119	619	5190	34	5.19
61	121	635	5240	34	5.24
62	124	631	5100	34	5.1
63	126	608	4840	34	4.84
64	127	596	4680	34	4.68
65	129	597	4620	34	4.62
66	132	615	4670	34	4.67
67	134	590	4410	34	4.41
68	136	580	4280	34	4.28
69	138	570	4140	34	4.14
70	140	553	3960	34	3.96
71	142	540	3810	34	3.81
72	144	527	3670	34	3.67
73	146	520	3570	34	3.57
74	148	510	3450	34	3.45
75	150	500	3340	34	3.34
76	152	488	3210	34	3.21
77	154	476	3100	34	3.1
78	156	468	3010	34	3.01
79	156	586	3750	34	3.75
80	160	551	3440	34	3.44

ภาคผนวก ก ตารางผลการวัดค่าความหนืดของซ็อกโกแลตสูตรควบคุม (ต่อ)

Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [cP]	Temperature [C]	Viscosity [Pa s]
81	162	515	3180	34	3.18
82	164	490	2990	34	2.99
83	166	470	2830	34	2.83
84	168	446	2650	34	2.65
85	170	438	2580	34	2.58
86	172	427	2480	34	2.48
87	174	416	2390	34	2.39
88	176	402	2290	34	2.29
89	178	393	2210	34	2.21
90	180	386	2140	34	2.14
91	182	377	2070	34	2.07
92	184	366	1990	34	1.99
93	186	356	1910	34	1.91
94	186	534	2870	34	2.87
95	191	490	2570	34	2.57
96	192	447	2320	34	2.32
97	194	418	2150	34	2.15
98	196	386	1970	34	1.97
99	198	368	1850	34	1.85
100	200	351	1750	34	1.75



ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Sanklong, N. and P. Pitayachaval (2021). “ **A Study of Parameters that Effect to Width of Chocolate Line Based on Additive Manufacturing and Screw Based Extrusion.**”

Solid State Phenomena 319: 35-40.

ณัฐวุฒิ สานค่อง และ ปภากร พิทยชवाल. (2563). การศึกษารูปทรงและองศาตันสกรูที่มีผลต่อขนาดเส้นช็อคโกแลตที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2563 (IE Network Conference 2020), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 7-8 พฤษภาคม 2563. 260-265.

Pitayachaval, Paphakorn, Sanklong, Nattawut and Thongrak, Anantapoom. (2018). **A Review of 3D Food Printing Technology.** MATEC Web of Conferences. 213. 01012(2018).

Publishing doi: 10.1051/mateconf/201821301012.



A Study of Parameters that Effect to Width of Chocolate Line Based on Additive Manufacturing and Screw Based Extrusion

Nattawut Sanklong^{1,a*}, Paphakorn Pitayachaval^{2,b}

¹Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

²Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

^an.sanklong@gmail.com, ^bpaphakorn@g.sut.ac.th

Keywords: additive manufacturing, screw- based extrusion, chocolate

Abstract. This paper presents a study of parameters that effect to width of chocolate line based on additive manufacturing and screw based extrusion. In order control a width of chocolate extruded lines for constructing chocolate model, three pitch of lead screw, three distances between nozzle and workspace, and three extrusion rates are assigned as independent variables. The result was showed that those three independent parameters were affects to width of extruded chocolate line. When the pitch of lead screw and the chocolate extrusion rate were increased, the width of the chocolate width had been expended. Moreover, if the distances between nozzle and workspace was increase, the chocolate width had been narrow.

Introduction

An additive manufacturing technology (AM), constructs model without mold and die based on layer by layer, has been applied in several advantages such as food customization [1]. AM technology-mediated food industry does open not only the new era of food customization in domestic cuisine but also provide a new class of food creators, and a new economy of custom products.

In general food industries, there are four types of 3D printing mechanic [2]: 1) selective sintering printing that apply laser to selective sinter powder, 2) binder jetting that use glue or special liquid to bind powder together, 3) Inkjet printing utilize a thermal print head, known as a piezoelectric, controlled the heat by the electrical potential for dispensing droplets smoothly and systematically, 4) extrusion based printing that extrude material on semisolid state from nozzle or print-based. There are several food products that are form model based on those process such as chocolate, sugar, icing, pasta, cheese, gel, or mashed potatoes [8].

The liquid semisolid material can be extruded via three extrusion mechanisms, as depicted in Fig. 1. In Fig. 1 (A), there are two components for extrusion via the syringe-based extrusion consisting of a syringe for storing food and a step motor for driving the extrusion process. However, the more material's viscosity, the more motor power is required, and this extrusion type is useful for semisolid or solid food materials [7]. In case of an air pressure driven extrusion in Fig. 1 (B), a pneumatic pump is required to generate an air pressure to push the food material in a cartridge out of the nozzle. This type of extrusion is suitable for a food material with low viscosity, which is to avoid the attachment of raw food in the food cartridge.

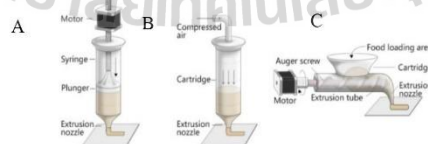


Fig. 1 Extrusion mechanisms (A) Syringe-Based Extrusion (B) Air Pressure Driven Extrusion (C) Screw-Based Extrusion [11]

As shown in Fig. 1 (C), the 3D food products are built from the screw-based extrusion technique. In short principle, a raw material in the cartridge is transported in an extrusion tube via a step motor with auger screw and released out through the nozzle to make the 3D food products. During the modeling process, the raw food material can be added to the food cartridge installed on top of the extrusion tube with a wide opening chamber design. The major advantage of this extrusion type over others is the real-time loading of the raw material during the 3D printing process, which allows for continuous modeling[8]. Yet, this type of extrusion is inappropriate for high viscosity and rigid material.

Chocolate is one of the most popular raw materials for 3D food printing due to its low melting point, the ability of extrusion, and its popularity in the market[9]. Hao and co-workers reported the fundamental parameters that determine the 3D printing capabilities related to the length between the nozzle to plate, the amount of chocolate extruded per unit time, and movement speed. As a result, they found that the nozzle-to-plate distance received from experimental investigation gave significantly different results from the theoretical model. However, they can release the first commercial chocolate printer, which can produce 2D or 3D chocolate shapes[10].

Recently, Matthew Lanaro and their research team constructed a melt extrusion 3D printer based on open-source components with newly optimizing many factors: movement speed, extrusion rate, and cooling rate, to improve the 3D printing capabilities. The investigation demonstrated that the chocolate spanning distance was 20 unaffected by movement speeds ranging from 300 to 700 mm/min and that the optimal extrusion rate was 10–20% leaner. Matthew Lanaro, however, suggested in conclusion that to further improve their system, a screw thread extrusion process should be introduced to the system for overcoming the capacity limitations of the system. According to the previous studies of 3D chocolate printing, Syringe-based extrusion has often been received considerable interest rather than others, but many drawbacks have also existed. The main disadvantages are 1) a sluggish stop printing when stopping a printer[11], 2) a lack of extrusion precision at starting and ending points[12], and 3) non-continuous printing. To solve these problems, the screw-based extrusion is required.

In this paper, parameters that influence to width of chocolate line were investigated. These parameters are lead screw pitch, distances between nozzle and workspace, and extrusion rate. These parameters establish the capability of 3D chocolate printing associated with the single screw extrusion mechanism.

Materials and Methods

Chocolate. Chocolate-controlled ingredients that were used in this experiments consisted of sugar 50%, fat 20%, and cocoa 7.4%. The rheological properties of chocolate were tested by Anton paar modular compact Rheometer: MCR 502 for analyzing flow behavior.

Mechanical platform. Computer numerically-controlled (CNC) machine that can move along X, Y, and Z (3 axes-moving machine) directions was built with the mechanical platform, as shown in Fig. 2. An arduino controller board was applied to control all electrical circuits of the 3D printer. Electrical power was supplied to the board from a 220 V AC to 24 V DC. Pronterface open source software was installed to configure, compile and upload firmware to the arduino controller board. Pronterface open source software was used to operate the printer from an external PC connected to the arduino controller board via USB.

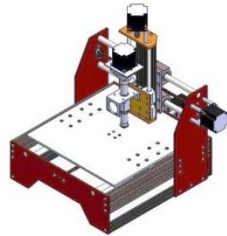


Fig. 2 Chocolate screw extrusion machine

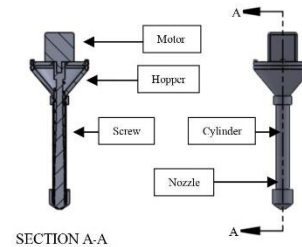


Fig. 3 Extruder system

Extruder system. A custom screw extrusion system was designed and fitted to 3 axes-moving machine for the controlled transport of chocolate. It consisted of a stepper motor, hopper, cylinder, nozzle, and screw. The motor extruder was connected to the screw and was installed on the top of the hopper. The chocolate could be added to the top of the hopper for allowing a non-stop process. During the working process, the chocolate would be gravitationally fell into the screw groove and mechanically transported by rotation of the screw from the top of the cylinder to the nozzle. The complete 3D printer image was performed in Fig. 3

Results and discussion

Material analysis and characterization. Rheological data was collected by an M502 Rheometer (Anton Paar), including stress, strain, and viscosity. Viscosity data was recorded at 26, 28, 30, 32, and 34 °C. The result in Fig. 4 showed that the chocolate was a shear-thinning (pseudoplastic fluid) material with shear rates below 75 s⁻¹ in the temperature range from 26 to 34 °C. Therefore, to print in the Newtonian region of chocolate, it was important to ensure that the temperature was maintained above the minimum point at 26°C, and the shear rate was higher than 75 s⁻¹. As a result in Fig. 4, the chocolate viscosity decreased along with the increase of the shear rate[13], confirming the chocolate is a pseudoplastic fluid[14].

Optimization of printing parameters. Several printing parameters were investigated to optimize the ability of complex 3D printing by measuring of chocolate line width, as shown in Table 1. The chocolate that extruded out of the nozzle with a printed command designed would be imaged and measured the width using a microscope.

Table 1 Experimental conditions.

	Independent variables			Dependent variable	Control variable
	Pitch of lead screw (mm)	Distances between nozzle and workspace(mm)	Extrusion rate(%)		
Level	15	3	10	width of chocolate lines	- nozzle diameter of 2 mm - movement speed of 500mm/min - room temperature at 28 °C - chocolate-controlled ingredients
	20	4	20		
	25	5	30		

The pitch of lead screw was studied at three levels. The result showed that the pitch of lead screw influenced the width of the chocolate line. Moreover, transporting the chocolate in a hopper to the nozzle using the 25 mm screw pitch was faster than the 15 mm screw pitch. Notably, the less lead screw pitch, the longer time is required to release out the chocolate. Therefore, the rapid conveying chocolate could be observed when a longer pitch of lead screw was applied, as showed in Fig. 6

The distances between nozzle and workspace is a variable that has been frequently studied. The experimental result demonstrated that the chocolate line width was narrower when the distances between nozzle and workspace was increased. The variation of line width was due to the distance between the nozzle and the base. Faster chocolate's dropping rate was observed in case of a lower dropping height, and high compression during extrusion made the flat line of chocolate. On the other hand, a higher dropping height created a narrower chocolate line width, but the chocolate's height was higher than the case as mentioned earlier, as showed in Fig. 6.

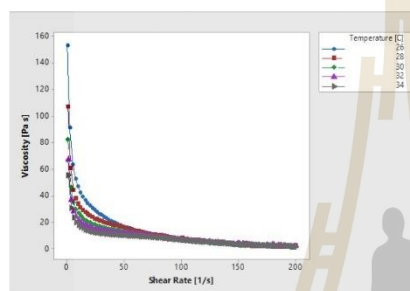


Fig. 4 Viscosity data for chocolate samples at temperatures 26, 28, 30, 32 and 34 °C.

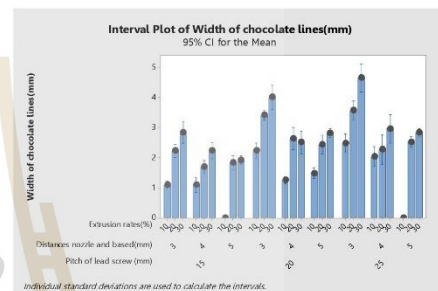


Fig. 5 Interval plot of width of chocolate lines

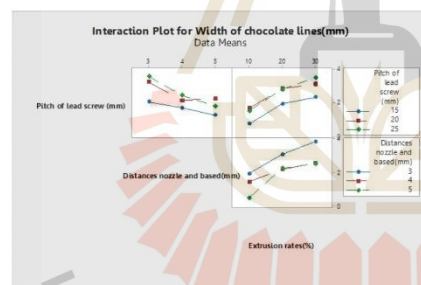


Fig. 6 Interaction plot for width of chocolate lines



Fig. 7 Example chocolate lines were extruded from experiment NO.1-NO.15

In addition, the extrusion rate was examined to study the chocolate line width. It was found that the higher amount of chocolate would emerge from the nozzle, which allowed the width of the chocolate line wider than the lower extrusion rate as showed in Fig. 6.

Moreover, based on its pseudoplastic property, thermal change during machine processing also affected the size of the chocolate line. After the chocolate was stirred in the hopper for a while, the heat could be generated, which could reduce the chocolate's viscosity. The result showed that the chocolate line width was expanded along with the increase of working time because the chocolate's viscosity was declined by heat, as showed in Fig. 7.

Conclusion

In this study, reported the influence of lead screw pitch, distances between nozzle and workspace, and extrusion rate to the capability of a 3D chocolate printing machine. The set of variables related to chocolate line extrusion with a single screw extrusion mechanism was investigated under various control variables. It was found that the lead screw pitch, the distances between nozzle and workspace, and the extrusion rate played an important role in determining the width of the chocolate line. However, the chocolate line width was gradually increasing as a function of extrusion time due to the pseudoplastic fluid of chocolate. Therefore, three fundamental variables and mechanical properties of the material were considered in this work to yield a constant width of the chocolate line. In addition, an appropriate design of the screws and a cooling system are still required to improve the modeling ability of chocolate extrusion for forming complex workpieces as the future work.

References

- [1] Iman Dankar, Amira Haddarah, Fawaz E.L.Omar, Francisc Sepulcre, Montserrat Pujolà. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 75, May 2018, Pages 231-242
- [2] Zhenbin Liu, Min Zhang, Bhesh Bhandari, Yuchuan Wang. 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 69, Part A, November 2017, Pages 83-94.
- [3] Jie Sun, Zhuo Peng, Weibiao Zhou, Jerry Y.H.Fuh, Geok Soon Hong, Annette Chiu. A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. *Procedia Manufacturing*, Volume 1, 2015, Pages 308–319
- [4] Diaz et al., 2014a J.V. Diaz, B.K.J.C. Van, M.W.J. Noort, J. Henket, P. Briër. Method for the Production of Edible Objects Using SIs and Food Products. Google Patents (2014)
- [5] E.M. Sachs, J.S. Haggerty, M.J. Cima, P.A. Williams. Three-dimensional printing techniques. Google patents (1994)
- [6] S.V. Murphy, A. Atala. 3D bioprinting of tissues and organs *Nat. Biotech.*, 32 (8) (2014), pp. 773-785
- [7] Jie Sun, Weibiao Zhou, Liangkun Yan, Dejian Huang, Lien-ya Lin. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, Volume 220, March 2018, Pages 1-11
- [8] Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadeld, R. Ian Campbelle, Ian Gibsonf, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhriagu Ahuja, Filomeno Martinaj. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 65 (2016) 737–760738
- [9] Matthew Lanaro, David P.Forrestal, Stefan Scheurer, Damien J.Slinger, Sam Liao, Sean K.Powell, Maria A.Woodruff. 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, Volume 215, December 2017, Pages 13-22
- [10] L. Hao, S. Mellor, O. Seaman, J. Henderson, N. Sewell, M. Sloan. Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual Phys. Prototyp.*, 5 (2) (2010), pp. 57-64
- [11] Zhenbin Liu, Min Zhang, Bhesh Bhandari, Chaohui Yang. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering* 220 (2018) 76-82.

-
- [12] Wenbin Li, Amir Ghazanfari, Ming C. Leu & Robert G. Landers (2017): Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication, Virtual and Physical Prototyping, DOI: 10.1080/17452759.2017.1312735
- [13] J.I. Orisaleye, O.A. Adefuye, A.A Ogundare, O.L. Fadipe. Parametric analysis and design of a screw extruder for slightly non-Newtonian (pseudoplastic) materials. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2018 (21). 229-237.
- [14] Jitiporn Cruanate. Newtonian Non-Fluid Mechanics, Part 1. Journal of materials technology, (2003), Issue 30 Pages 25-28.





งานประชุมวิชาการช่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563 (IE Network 2020)
วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

การศึกษารูปร่างและองศาสันสกรูที่มีผลต่อขนาดเส้นช็อคโกแลต
ที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป
A study of screw shape and ridge screw that effect
to size of chocolate lines by the screw extrusion process

ณัฐวุฒิ สานคลอง¹ ปภากร พิทยชาวล²
Nattawut Sanklong¹ Paphakorn Pitayachaval²
n.sanklong@gmail.com¹ paphakorn@g.sut.ac.th²

บทคัดย่อ

กระบวนการขึ้นรูป 3 มิติ หรือกระบวนการขึ้นรูปโดยการเติมเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing) ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง รวมถึงการขึ้นรูปขนมประเภทช็อคโกแลต บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูปช็อคโกแลตให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ โดยกำหนดตัวแปรต้นในการศึกษา คือ รูปร่างของสันสกรูมี 2 รูปร่างประกอบรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู องศาของสันสกรูมี 2 ขนาดประกอบด้วยสันสกรูขนาด 17.66° และ 47.66° ตัวแปรตามคือขนาดของเส้นช็อคโกแลต ตัวแปรควบคุมคือขนาดหัวฉีดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร จากผลการทดลองพบว่า รูปร่างสันสกรูไม่มีผลต่อขนาดความกว้างของเส้นช็อคโกแลต ในขณะที่องศาของสันสกรูมีผลต่อขนาดความกว้างของเส้นช็อคโกแลต และเมื่อวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของเส้นช็อคโกแลต พบว่า โดยสกรูรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู-องศาสันสกรู 47.66° ให้ความสม่ำเสมอในการฉีดขึ้นรูปมากที่สุด
คำสำคัญ : ฉีดขึ้นรูปด้วยสกรู, ช็อคโกแลต, กระบวนการขึ้นรูปโดยการเติมเนื้อวัสดุ

Abstract

An additive manufacturing processes are broad utilized including a forming of chocolate desserts. The objective of this article is to study the parameters that affect an accuracy size of extruded chocolate line. The independent variables are shape of the ridge screw (square and trapezoid) and the angle of the ridge screw (17.66° and 47.66°). The dependent variable is the size of the chocolate line. The control variable is the nozzle diameter 5 mm. The results of experiment shown that the shape of ridge screw had no effect to the width of the chocolate line, while the degree of ridge screw had affected to chocolate line. Furthermore, the consistency of the chocolate lines, were suitable based the trapezoidal screw with 47.66 degree of ridge screw.

Keywords : Screw extrusion process, Chocolate, Additive manufacturing

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. บทนำ

เทคโนโลยีการขึ้นรูปแบบรวดเร็ว (Rapid Prototyping Technology) หรือการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing : AM) เป็นกระบวนการสร้างชิ้นงานได้ทันทีและไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ โดยชิ้นงานสามารถขึ้นรูปได้จากไฟล์ 3D-CAD (Computer Aided Design) วัตถุจะถูกสร้างขึ้นโดยการเติมเนื้อของวัสดุทีละชั้น (layer by layer) ต่อเนื่องจนครบ [3, 4] การขึ้นรูปแบบรวดเร็ว ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ในด้านชีวการแพทย์มีการนำไปสร้างเนื้อเยื่อและอวัยวะเทียมเพื่อใช้ในการผ่าตัด[5] ในด้านอวกาศมีการใช้เข้ามาช่วยการซ่อมแซมชิ้นส่วนต่าง ๆ ในห้องเครื่องของยานอวกาศหรือการตกแต่งภายในยานอวกาศ[6] ด้านอาคารและโครงสร้างมีการนำเทคโนโลยีนี้ไปประยุกต์ใช้กับการสร้างที่พักอาศัยบนดวงจันทร์[7] และล่าสุดคือการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติกับการพิมพ์อาหาร

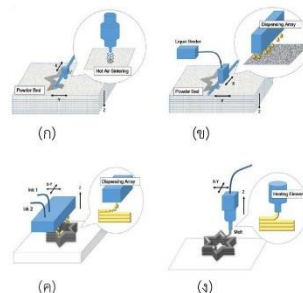
เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติที่นำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอาหารมีประโยชน์หลายอย่าง เช่น การออกแบบอาหารที่สามารถปรับเปลี่ยนโภชนาการเฉพาะบุคคลได้[8] การใช้เทคโนโลยีนี้ช่วยให้การออกแบบอาหารที่มีรูปร่างซับซ้อนซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยการใช้แรงงานหรือแม่พิมพ์แบบธรรมดาให้สามารถผลิตโดยอาศัยไฟล์ข้อมูลการออกแบบที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อกำหนดรูปร่างของขนมและภาพที่มีสีสันลงบนพื้นผิวของอาหาร เช่นกาแฟร้อน นอกจากนี้การพิมพ์อาหาร 3 มิติยังช่วยให้สามารถปรับขนาดและปรับเปลี่ยนความต้องการด้านโภชนาการและพลังงานของแต่ละบุคคลตามความต้องการทางกายภาพและทางโภชนาการได้ การประยุกต์ใช้เทคนิคนี้จะทำให้การสร้างอาหารเข้าใกล้ชิดกับลูกค้ามากขึ้นและจะทำให้ปริมาณการขนส่งลดลงซึ่งจะช่วยลดบรรจุภัณฑ์ การกระจายสินค้าและลดค่าใช้จ่ายได้

เทคนิคการพิมพ์แบบ 3 มิติที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมอาหารโดยทั่วไปมี 4 ประเภท [9] ได้แก่ การพิมพ์ด้วยแสง การพิมพ์แบบผงยึด การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ทและการพิมพ์แบบฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 1

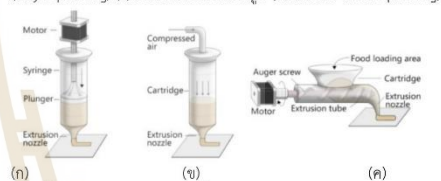
ในรูปที่ 1(ก) แสดงการพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งพลังงานในการเผาอนุภาคที่เป็นผง โครงสร้างของวัตถุถูกสร้างขึ้นโดยการยิงเลเซอร์ไปยังจุดที่กำหนดไว้ด้วยไมโคร 3 มิติ หลังจากนั้นเตียงพิมพ์จะค่อยๆ เคลื่อนลงด้านล่าง วิธีนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชิ้นอาหารหลายชิ้นในแต่ละชั้นซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุอาหารที่แตกต่างกัน [11]

ในรูปที่ 1(ข) แสดงการพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting) ลักษณะการทำงานจะมีความคล้ายกับแบบการพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ เพียงแต่ใช้ตัวกลางในการประสานหรือสร้างรูปร่างของผงที่เป็นของเหลวหรือกาว โดยหลักการคือการฉีดกาวหรือตัวประสานไปยังผงวัสดุเพื่อสร้างวัตถุทีละชั้นทีละชั้น เทคนิคการผลิตนี้ช่วยให้สามารถผลิตโครงสร้างที่ซับซ้อนและยุ่งยากได้ และผงที่ไม่ใช้แล้วจะถูกนำออกมารีไซเคิลเพื่อใช้ต่อไป [12]

ในรูปที่ 1(ค) แสดงการพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทส่วนใหญ่ทำงานโดยใช้หัวความร้อนหรือ piezoelectric ในเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทหัวพิมพ์จะถูกให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าเพื่อสร้างแรงกดดันที่ผลักดันหยดของเหลวออกจากหัวฉีดออกมา เครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ทแบบพายโซอิเล็กทริกมีคริสตัล piezoelectric อยู่ภายในหัวพิมพ์เพื่อแยกของเหลวออกเป็นหยดในช่วงเวลาที่สม่ำเสมอ การใช้แรงดันไฟฟ้ากับวัสดุ piezoelectric กระตุ้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่รวดเร็วซึ่งจะทำให้มีการหยดของเหลวออกจากหัวฉีด [13]



รูปที่ 1 (ก) การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (Selective sintering printing) [10] (ข) การพิมพ์แบบผงยึดเหนี่ยว (Binder jetting) (ค) การพิมพ์แบบอิงค์เจ็ท (Inkjet printing) (ง) การพิมพ์แบบฉีดขึ้นรูป (Extrusion based printing)



รูปที่ 2 กลไกการพิมพ์แบบฉีดขึ้นรูป (ก)การฉีดแบบเข็มฉีดยา(Syringe-Based Extrusion) (ข)การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน(Air Pressure Driven Extrusion) (ค)การฉีดแบบสกรู(Screw-Based Extrusion) [14]

ในรูปที่ 1(ง) แสดงการพิมพ์แบบฉีดขึ้นรูป (Extrusion based printing) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมาก หลักการทำงานคือการอัด รีด หรือฉีดวัสดุที่มีลักษณะเป็นของเหลว หรือกึ่งแข็งกึ่งเหลวออกมาจากหัวฉีดอย่างต่อเนื่อง โดยชุดหัวฉีดหรือฐานรองจะเป็นตัวเคลื่อนที่ขึ้นลงขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่อง [14] มีการทดลองพิมพ์อาหารจากวัสดุที่มีความหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น ช็อคโกแลต น้ำตาล น้ำตาลไอซิ่ง พาสต้า ชีส เจลลี่ส้ม และมันบด เป็นต้น[15]

กลไกการพิมพ์แบบฉีดขึ้นรูปที่ใช้กับการพิมพ์อาหารมี 3 กลไกด้วยกัน ดังรูปที่ 2 คือ การฉีดแบบเข็มฉีดยา(Syringe-Based Extrusion) จะประกอบด้วยกระบอกเข็มสำหรับเก็บวัสดุและมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนกระบวนการอัด มอเตอร์จะทำหน้าที่ในการดันให้วัสดุออกจากกระบอกฉีดยาโดยผ่านทางหัวฉีด ความเร็วในการฉีดสามารถปรับเปลี่ยนเพิ่มหรือลดได้จากการกำหนดความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ การฉีดชนิดนี้เหมาะกับการฉีดวัสดุประเภทของแข็งหรือกึ่งแข็งของเหลว[14] ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) การฉีดแบบใช้ลมเป็นตัวขับเคลื่อน(Air Pressure Driven Extrusion) เป็นการพิมพ์อาหารโดยใช้อาหารไม่สัมผัสกับหัวฉีดด้านบน ระบบจะปล่อยลมออกมาตามความดันที่กำหนด ลมจะเป็นตัวกลางในการดันให้วัสดุออกจากหัวฉีด ดังนั้นลมที่ใช้ต้องมีกรองและทำความสะอาดเป็นอย่างดี การฉีดแบบนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นของเหลวหรือวัสดุที่มีความหนืด[14] ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) และสุดท้ายการฉีดแบบสกรู(Screw-Based Extrusion) เป็นการพิมพ์ขึ้นรูปโดยใช้สกรูในการหมุนเพื่อขับเคลื่อนให้วัสดุออกจากหัวฉีด การพิมพ์แบบนี้ไม่เหมาะสำหรับวัสดุที่เป็นของเหลวที่มีความหนืดและความ



งานประชุมวิชาการช่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563 (IE Network 2020)
วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

แข่งแรงทางกลสูง ตลอดจนกระบวนการพิมพ์โดยใช้สกรูนี้ สามารถเติมวัสดุเข้าสู่กระบวนการเก็บวัสดุตลอดเวลา กล่าวคือเป็นการพิมพ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งแตกต่างกับการพิมพ์แบบเชื่อมติดและการพิมพ์แบบใช้ลมที่ไม่สามารถพิมพ์แบบต่อเนื่องได้[9] ดังแสดงในรูปที่ 2 (ง)

ข้อดีอีกประการหนึ่งที่น่าสนใจที่สุดในการพิมพ์อาหาร เนื่องจากความสามารถในการหลอมละลายความสามารถในการอัดรีดและความนิยมในตลาดอาหาร[16] Hao และคณะ (2010) ได้ศึกษาลักษณะของปัจจัยพื้นฐานหลายประการเกี่ยวกับความสามารถในการพิมพ์แบบ 3 มิติ รวมถึงความสูงของหัวฉีดกับฐาน ปริมาณของช็อกโกแลตที่อัดรูปขึ้นต่อหน่วยเวลาและความเร็วในการเคลื่อนที่ จากการวิจัยครั้งนี้พวกเขาได้สร้างเครื่องช็อกโกแลตที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเป็นครั้งแรกคือ Choc Edge ซึ่งสามารถพิมพ์รูปทรง 2D และ 3D ได้หลากหลายรูปแบบ [17] และ Matthew Lanaro และคณะได้ออกแบบเครื่องพิมพ์ช็อกโกแลตต้นทุนต่ำโดยใช้ส่วนประกอบที่มีราคาไม่แพง และได้ทดลองเปลี่ยนแปลงปัจจัยการพิมพ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการพิมพ์ประกอบด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ อัตราการอัดรีดและอัตราการระบายความร้อนในกระบวนการพิมพ์ และ Matthew Lanaro ยังทิ้งท้ายในงานวิจัยของเขาไว้ว่าในอนาคตควรมีการศึกษาการใช้สกรูในการพิมพ์ขึ้นรูปช็อกโกแลตเพื่อลดข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการพิมพ์ [16] การศึกษาเกี่ยวกับการพิมพ์ช็อกโกแลต 3 มิติที่ผ่านมา จะศึกษากลไกการพิมพ์แบบเชื่อมติด ซึ่งพบว่ากลไกชนิดนี้มีปัญหาคือ 1. เกิดปัญหาความล่าช้าในขั้นตอนการหยุดกระบวนการพิมพ์ กล่าวคือเมื่อสั่งให้เครื่องพิมพ์หยุดพิมพ์แต่ยังคงมีวัสดุถูกฉีดออกมาจากหัวพิมพ์[18] 2. หัวและท้ายของวัสดุที่ถูกพิมพ์มีลักษณะบิดและลากยาว 3. ไม่สามารถพิมพ์แบบต่อเนื่องได้[19] โดยปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนกลไกการพิมพ์เป็นแบบสกรู

ดังนั้นบทความนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาว่ารูปทรงสกรูที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปช็อกโกแลตแบบเส้น โดยกำหนดตัวแปรต้น คือ รูปทรงของสกรูที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู องศาของเส้นสกรูมี 2 ขนาดคือ 17.66° และ 47.66° ตัวแปรตามคือขนาดของเส้นช็อกโกแลต ตัวแปรควบคุมคือขนาดหัวฉีดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร

2. วิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบการทดลอง

2.1.1 ตัวแปรในการทดลอง

กำหนดตัวแปรในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงสกรูกับองศาของเส้นสกรูออกแบบการทดลองเป็นการทดลองแบบ 2x2 แฟกทอเรียล (2x2 Factorial Experiment) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) ปัจจัยและระดับของปัจจัยแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรต้น	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
-รูปทรงสกรู -องศาของเส้นสกรู	ขนาดความกว้างเส้นช็อกโกแลต	-หัวฉีด 5 mm. -ความเร็วเคลื่อนที่ หัวฉีด 10 mm/s. -ความเร็วการฉีด ขึ้นรูป 1 mm/s. -ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 28 °C -ช็อกโกแลตสูตรควบคุม

ตารางที่ 2 ตารางแสดงการออกแบบการทดลอง

Order	รูปทรงสกรู	องศาของเส้นสกรู [20]
1	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	47.66 °
2	สี่เหลี่ยมจัตุรัส	17.66 °
3	สี่เหลี่ยมคางหมู	47.66 °
4	สี่เหลี่ยมคางหมู	17.66 °

2.1.2 สมมติฐานการทดลอง

สมมติฐานที่ 1

H₀: รูปทรงของสกรูไม่มีผลต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลต

H_a: รูปทรงของสกรูมีผลต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลต

สมมติฐานที่ 2

H₀: องศาของเส้นสกรูไม่มีผลต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลต

H_a: องศาของเส้นสกรูมีผลต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลต

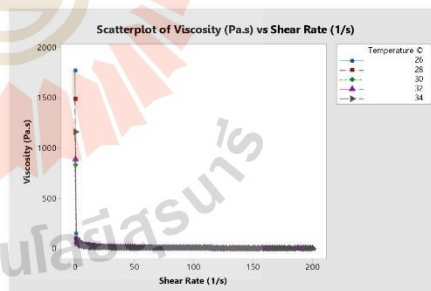
2.2 ช็อกโกแลต

งานวิจัยนี้เลือกใช้ช็อกโกแลตสูตรควบคุมในการศึกษา เนื่องจากง่ายต่อการพิมพ์ที่มีความนุ่มที่คงที่ และไม่จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ น้ำตาล 50% ไขมัน 20% ผงโกโก้ 7.4% ช็อกโกแลตที่ใช้ในการทดลองมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic fluid) คือ ความหนืด (Viscosity) ที่เกิดขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราแรงเฉือน (Shear rate)[1, 2] ดังแสดงในรูปที่ 3

2.3 อุปกรณ์การทดลอง

2.3.1 เครื่องฉีดขึ้นรูปด้วยสกรูเดี่ยว

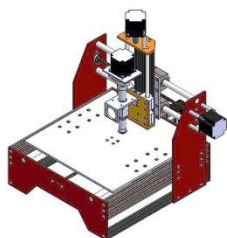
เครื่องฉีดขึ้นรูปด้วยสกรูเดี่ยวใช้ชุดเคลื่อนที่ 3 แกนคือแกน X แกน Y และแกน Z โดยใช้หลักการการทำงานของเครื่องแบบ CNC (Computer Numerical Control) ระบบการเคลื่อนไหวทั้ง 3 แกนของเครื่องถูกควบคุมโดยบอร์ด Arduino และใช้โปรแกรม open-source ชื่อ Pronterface ในการควบคุมและสั่งการการทำงานของเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน



งานประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563 (IE Network 2020)
วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร



รูปที่ 4 เครื่องฉีดเส้นลวดแบบสกรูเดี่ยว

2.3.2 การออกแบบสกรู

J.I. Orisaley และคณะ ได้ศึกษาของศาของเกลียวสกรูที่เหมาะสมกับเครื่องฉีดลวด [20] ดังแสดงในสมการที่ (1) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณทางกลศาสตร์ในการทดลอง

$$\text{Helix angle} = \pm \tan^{-1} \left[\frac{(2n^2 + 1)^{1/2}}{2n + 1} \right] \quad (1)$$

เมื่อ

Helix angle คือ องศาของสันสกรู
n คือ ค่าดัชนีการไหล (Flow behavior index)

2.3.3 การวัดขนาดความกว้างเส้นลวดเกล็ด

การวัดขนาดความกว้างเส้นลวดเกล็ดโดยการวัดขนาดความกว้างของเส้นลวดเกล็ดหลังจากการพิมพ์ขึ้นรูปเสร็จแล้วทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ส่วนต้น ตำแหน่งที่วัดจากจุดเริ่มต้นฉีด 2.5 เซนติเมตร ส่วนกลาง ตำแหน่งที่วัดจากจุดเริ่มต้นฉีด 6.5 เซนติเมตร และส่วนท้าย ตำแหน่งที่วัดจากจุดเริ่มต้นฉีด 10.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยทำการกำหนดตำแหน่งของการวัดแต่ละจุดบนฐานวัดเพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งที่ทำการวัดในแต่ละครั้งนั้นเป็นตำแหน่งเดียวกัน และกำหนดความยาวในการฉีดของเส้นลวดเกล็ดแต่ละครั้งเท่ากับ 12 เซนติเมตร โดยใช้โปรแกรม Dino Capture 2.0 ในการวัดขนาดของเส้นลวดเกล็ด ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งการวัดความกว้างของเส้นลวดเกล็ดที่ฉีดยกมา

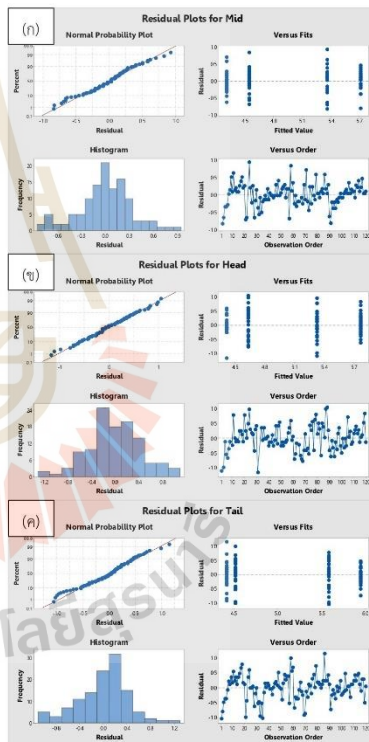


รูปที่ 6 แสดงการวัดขนาด Diameter ของเส้นลวดเกล็ด โดยใช้โปรแกรม Dino Capture 2.0

3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ความปกติของข้อมูล

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) พบว่า ข้อมูลมีแนวโน้มเรียงตัวกันเป็นเส้นตรง มีระยะห่างระหว่างจุดค่อนข้างสม่ำเสมอเป็นส่วนใหญ่ จึงยอมรับได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Versus Fits) พบว่า ความแปรปรวนของขนาดความกว้างของเส้นลวดเกล็ดมีการกระจายในด้านบวกและด้านลบที่สมดุลกัน และรูปแบบของการกระจายตัวของข้อมูลไม่เป็นรูปแบบการกระจายแบบปลายเปิดหรือรูปลิ่ม การตรวจสอบการกระจายความถี่ของข้อมูล (Histogram) พบว่า ข้อมูลมีการกระจายความถี่เป็นรูประฆังคว่ำ การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Versus Order) พบว่า การกระจายตัวของคุณภาพเส้นลวดเกล็ดมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้ม จากการตรวจสอบแผนภาพเศษเหลือ (Residual plots) ที่ 4 แผนภาพ สรุปว่าชุดข้อมูลนี้มีการกระจายตัวแบบปกติและเป็นชุดข้อมูลที่มีความปกติ สามารถใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรได้ ดังแสดงในรูปที่ 7



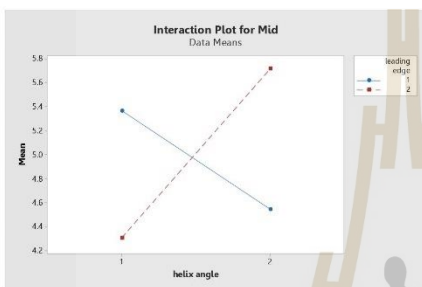
รูปที่ 7 (ก) Residual Plots สำหรับคุณภาพเส้นลวดเกล็ดส่วนต้น
(ข) Residual Plots สำหรับคุณภาพเส้นลวดเกล็ดส่วนกลาง
(ค) Residual Plots สำหรับคุณภาพเส้นลวดเกล็ดส่วนปลาย



งานประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563 (IE Network 2020)
วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
leading edge	1	0.0910	0.0910	0.83	0.365
helix angle	1	2.5500	2.5500	23.13	0.000
leading edge*helix angle	1	36.3539	36.3539	329.79	0.000
Error	113	12.4563	0.1102		
Total	116	51.7328			

รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA) ของคุณภาพเส้นเชื่อมโกแลต



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยส่งผลกระทบต่อขนาดเส้นเชื่อมโกแลตบริเวณส่วนกลาง

3.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-way ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ทำการศึกษานั้นมีปัจจัยใดบ้างที่ส่งผลต่อขนาดความกว้างของเส้นเชื่อมโกแลต โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab18 ในการวิเคราะห์ผล โดยเลือกความกว้างของเส้นเชื่อมโกแลตส่วนกลางในการวิเคราะห์ผล ได้ผลดังรูปที่ 8

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ค่า P-Value ของรูปทรงของสันสกรู (leading edge) มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แสดงว่า รูปทรงของสันสกรูไม่มีผลต่อคุณภาพของเส้นเชื่อมโกแลต ค่า P-Value ขององศาสันสกรู (helix angle) มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แสดงว่า องศาของสันสกรูมีผลต่อคุณภาพของเส้นเชื่อมโกแลต และค่า P-Value ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงของสันสกรูและองศาของสันสกรูมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 แสดงว่า มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างรูปทรงของสันสกรูและองศาของสันสกรู

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพเส้นเชื่อมโกแลต พบว่าเกิดจุดตัดหรือ Interaction ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 กล่าวคือ มีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างรูปทรงของสันสกรูและองศาของสันสกรู จึงสามารถสรุปได้ว่ารูปทรงของสันสกรูและองศาของสันสกรูมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน และส่งผลกระทบต่อขนาดความกว้างของเส้นเชื่อมโกแลต

3.3 การวิเคราะห์ความความสม่ำเสมอของเส้นเชื่อมโกแลตและความถูกต้องของขนาดเส้นเชื่อมโกแลตโดยใช้ Box Plot

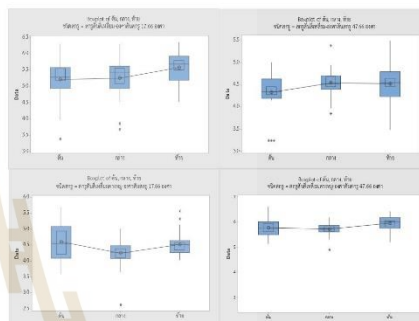
3.3.1 การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของเส้นเชื่อมโกแลต

การวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของเส้นเชื่อมโกแลตที่พิจารณาจากการกระจายตัวของความกว้างของเส้นวัดกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

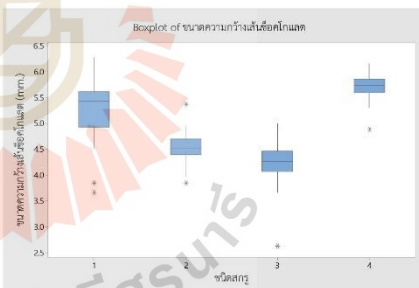
พบว่า สกรูสันสี่เหลี่ยมคางหมู-องศาสันสกรู 47.66 ° มีความสม่ำเสมอของเส้นเชื่อมโกแลตมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของขนาดความกว้างของเส้นเท่ากับ 5.81 mm. ความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.32 ซึ่งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 10

3.3.2 การวิเคราะห์ความถูกต้องของขนาดเส้นเชื่อมโกแลต

เลือกใช้การวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างของเส้นเชื่อมโกแลตเปรียบเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด 5 mm. พบว่า จากทั้ง 4 การทดลองสกรูสันสี่เหลี่ยม-องศาสันสกรู 47.66 ° มีค่าเฉลี่ยขนาดความกว้างของเส้นมากที่สุด เท่ากับ 4.46 mm. ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 แสดงแผนภูมิการวัดการกระจายตัวของข้อมูลขนาดความกว้างของเส้นเชื่อมโกแลต โดยแกน X เป็นตำแหน่งการวัด ต้น ตำแหน่งที่วัดจากจุดเริ่มต้นฉีด 2.5 เซนติเมตร กลาง คือ ตำแหน่งที่วัดจากจุดเริ่มต้นฉีด 6.5 เซนติเมตรและท้าย คือ ตำแหน่งที่วัดจากจุดเริ่มต้นฉีด 10.5 เซนติเมตร



รูปที่ 11 แสดง Boxplot ขนาดความกว้างเส้นเชื่อมโกแลตในตำแหน่งกลางเส้น โดยเรียงตามชนิดสกรู 1 คือ สกรูสันสี่เหลี่ยม-องศาสันสกรู 17.66 ° ชนิดสกรู 2 คือ สกรูสันสี่เหลี่ยมคางหมู-องศาสันสกรู 47.66 ° ชนิดสกรู 3 คือ สกรูสันสี่เหลี่ยมคางหมู-องศาสันสกรู 17.66 ° และชนิดสกรู 4 คือ สกรูสันสี่เหลี่ยมคางหมู-องศาสันสกรู 47.66 °



งานประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563 (IE Network 2020)
วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

4.สรุป

รูปทรงของเส้นสกรูไม่มีผลต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลตที่ต้องคานของเส้นกรูมีผลต่อขนาดของเส้นช็อกโกแลตที่ฉีดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่ารูปทรงเส้นกรูสี่เหลี่ยมคางหมู-องศาเส้นกรู 47.66° ให้ความสม่ำเสมอในการฉีดขึ้นรูปเส้นช็อกโกแลตมากที่สุด เส้นกรูสี่เหลี่ยม-องศาเส้นกรู 47.66° ให้ความถูกต้องของขนาดเส้นช็อกโกแลตเมื่อเทียบกับขนาดหัวฉีดมากที่สุด ทั้งนี้การขึ้นรูปช็อกโกแลตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยสกรูจะเกิดความร้อนสะสมในระหว่างกระบวนการ ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจะต้องมีการควบคุมหรือลดความร้อนที่สะสมในกระบวนการอีกทั้งช็อกโกแลตที่ใช้ทดลองมีลักษณะการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ซึ่งมีแนวโน้มเนื่องจากการหมุนตัวของสกรูมากขึ้นจะทำให้ความหนืดของช็อกโกแลตลดลงตามคุณสมบัติเชิงวัสดุ ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปควรมีการพิจารณาควบคุมอุณหภูมิของวัสดุให้คงที่และลดการตึงเครียดภายในหัวฉีด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

- 1 จิตติพร เจริญนคร. 2546. "กลศาสตร์ของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน ตอนที่ 1" วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 30: 25-28.
- 2 นิสภา ศิเดชปิ่นยี่. 2546. "การวิเคราะห์อาหารด้วยเทคนิคโวลูมิเมตริก ตอนที่ 1" วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, ฉบับที่ 32: 24-28.
- 3 What is 3D printing?. สืบค้นจาก <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- 4 3D Printing นวัตกรรมพลิกโลก, BitWiredBlog(2012). สืบค้นจาก <https://bitwiredblog.com/2012/05/01/3d-printing-นวัตกรรมพลิกโลก/>
- 5 S.V. Murphy, A. Atala. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*, 32 (8) (2014), pp. 773-785
- 6 C.K. Chua, K.F. Leong, C.S. Lim. *Rapid prototyping: principles and applications*. World Scientific (2010)
- 7 N. Labeaga-Martinez, M. Sanjurjo-Rivo, J. Diaz-Álvarez, J. Martinez-Frias. Additive manufacturing for a Moon village. *Procedia Manuf*, 13 (2017), pp. 794-801
- 8 Iman Dankar, Amira Haddarah, Fawaz E.L.Omar, Francesc Sepulcre, Montserrat Pujolà. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 75, May 2018, Pages 231-242.
- 9 Zhenbin Liu, Min Zhang, Bheshe Bhandari, Yuchuan Wang. 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 69, Part A, November 2017, Pages 83-94.
- 10 Jie Sun, Zhuo Peng, Weibiao Zhou, Jerry Y.H.Fuh, Geok Soon Hong, Annette Chiu. A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. *Procedia Manufacturing*, Volume 1, 2015, Pages 308-319
- 11 Diaz et al., 2014a J.V. Diaz, B.K.J.C. Van, M.W.J. Noort, J. Henket, P. Briër. Method for the Production of Edible Objects Using SIs and Food Products. *Google Patents* (2014)
- 12 E.M. Sachs, J.S. Haggerty, M.J. Cima, P.A. Williams. Three-dimensional printing techniques. *Google patents* (1994)
- 13 S.V. Murphy, A. Atala. 3D bioprinting of tissues and organs *Nat. Biotech.*, 32 (8) (2014), pp. 773-785
- 14 Jie Sun, Weibiao Zhou, Liangkun Yan, Dejian Huang, Liensya Lin. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering*, Volume 220, March 2018, Pages 1-11
- 15 Mary Kathryn Thompson, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhrgu Ahuja, Filomeno Martinaj. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals Manufacturing Technology* 65 (2016) 737-760738
- 16 Matthew Lanaro, David P.Forrestal, Stefan Scheurer, Damien J.Slinger, Sam Liao, Sean K.Powell, Maria A.Woodruff. 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, Volume 215, December 2017, Pages 13-22
- 17 L. Hao, S. Mellor, O. Seaman, J. Henderson, N. Sewell, M. Sloan. Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual Phys. Prototyp.*, 5 (2) (2010), pp. 57-64
- 18 Zhenbin Liu, Min Zhang, Bheshe Bhandari, Chaohui Yang. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing. *Journal of Food Engineering* 220 (2018) 76-82.
- 19 Wenbin Li, Amir Ghazanfari, Ming C. Leu & Robert G. Landers (2017): Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication, *Virtual and Physical Prototyping*, DOI: 10.1080/17452759.2017.1312735
- 20 J.I. Orisaleye, O.A. Adefuye, A.A Ogunbare, O.L. Fadipe. Parametric analysis and design of a screw extruder for slightly non-Newtonian (pseudoplastic) materials. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2018 (21). 229-237.

A Review of 3D Food Printing Technology

Paphakorn Pitayachaval¹, Nattawut Sanklong¹ and Anantapoom Thongrak¹

¹School of Industrial Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

Abstract. The additive manufacturing technology has been applied to directly construct physical model from 3D model without mold and die. Several industries utilize this technology to manufacture a complicated part such as automobile, aerospace including food industry. The advantage 3D food printing are ability to produce complex food model and ability to design unique pattern. A 3D food printing technique is composed of an extrusion-based printing, binder jetting and inkjet printing. The food materials such as sugar, chocolate, and cheese are used to create designed shape based on layer-by-layer. This paper presents a review of 3D food printing techniques. This review is to categorize, printability, productivity, properties of material and mechanism of 3D food printing techniques, as well as to provide the direction of future development.

1 Introduction

A three-dimensional (3D) printing, called additive manufacturing (AM), established since 1980s, have been developed and applied in variety applications for many industries. AM crates model by adding material layer by layer from a computerized 3D solid model. An advantage of AM is to construct a complexity model without mold and die, fixtures, cutting tools and coolants. The application of construction AM model have been wildly used in many fields of industry such as automotive, architecture, medical and fashion design. Including, food manufacturing also applies this technology to fabricate food design. However, a sustainable nutrition and food security are the global agenda and key themes, which are considered during, apply 3D food printing. There are several techniques to construct 3D food printing that are an extrusion-based printing, binder jetting and inkjet printing. This paper aims to review those techniques based on a printability, productivity, properties of material, effect parameters and mechanism of 3D food printing techniques. Including, the advantages and disadvantages of those techniques are also established.[1-7]

2 Category of 3D Food Printing Technique

The 3D food printing technique has been classified into three categories that are an extrusion-based printing, binder jetting and inkjet printing, as shown in figure 1.

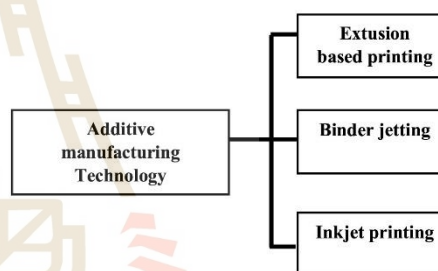


Figure 1. Classified of 3D printing technique

2.1 Extrusion-based printing

The extrusion-based printing constructs food model by extruding food through a nozzle with a constant pressure. This technique is similar to a conventional Fused Deposition Modeling (FDM). However, the starting material of extrusion-based printing can be both solid and paste (soft) with low viscosity, while the starting material of FDM is wire. In this extrusion-based printing process, material is loaded in extruder (cylinder) before it is extruded through nozzle by ram pressure to create food shape layer – by – layer, as shown in figure 2. The example of food, fabricated via this technique, are dough meat paste and cheese. Lipton, et al. (2010) tested a variety of recipes to print sugar cookies. The result shown that the variation of ingredient concentration effected to fabricate food model especially ratio of butter, yolk and sugar. Therefore, transglutaminase and bacon fat were added to simplify model fabrication. Moreover, Fanli

Yang, et al.[8] applied extrusion at room temperature to print lemon juice gel using the extruder conveying screw, as shown in figure 3. After that, L. Wang, et al. [9] conducted the experiment via the similar system with Fanli Yang, et al. [8] to print fish surimi gel. The results shown that the nozzle diameter, the nozzle movement speed and the extrusion rate affect the quality of 3D food printing, excluding the nozzle height. To print solid staving material, M. Lanaro et al. [10] investigated on melting extrusion for printing complex chocolate model based on machine design, including mechanism design. The results shown that there are two important areas of design in which (1) designing the extruder assembly to be as rigid as possible, thereby reducing flexion and enabling more accurate deposition of chocolate and (2) improving the design of active cooling system to quench the chocolate at lower temperatures, as shown in figure 4.

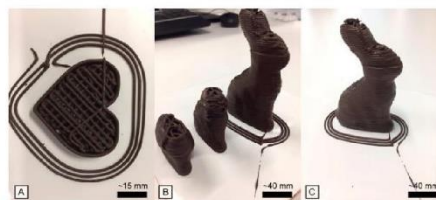


Figure 4. The 3D printing technique based on melting extrusion. (Lanaro, et al. 2017)

2.2 Inkjet Printing (IJP)

The inkjet printing dispenses a material stream of droplets from a thermal head to certain regions for creating the surface filling or decorating on food surfaces, such as cookie, cake, and pizza, as shown in figure 5. This process generally operates by using thermal or piezoelectric heads. In a thermal inkjet printer, the print head is electrically heated to establish pulses of pressure that push droplets from the nozzle [11]. There are two types of inkjet printing methods: a continuous jet printing and a drop-on-demand printing. For the continuous jet printer, an ink is ejected continuously through a piezoelectric crystal by vibrating with a constant frequency. In order to obtain a desired flow ability of the ink, some conductive agents had been added. For a drop-on-demand printer, a valve is a controller ink to eject out from heads under designed pressure. The printing rates of drop-on-demand systems are generally slower than the continuous jet systems, beside the resolution and precision of produced images are higher [12]. The inkjet printer normally handle low viscosity materials; therefore, it does not find application on the construction of complex food structure. Typical deposited materials are chocolate, liquid dough, sugar icing, meat paste, cheese, jams, gels and etc[11].

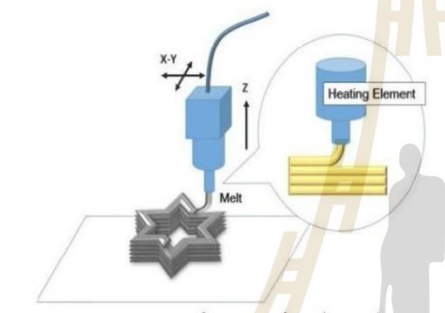


Figure 2. Extrusion-based printing (Peng, Zhou, Jerry, Hong, and Annette, 2015)



Figure 3. The 3D printing technique based on soft-material (A. Anchor, B. Gecko, C. Snowflake, D. Ring, E. Tetrahedron). L. Wang et al. (2018)

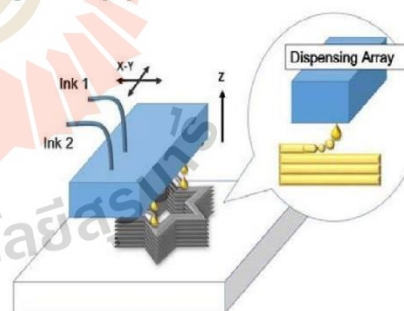


Figure 5. Inkjet printing (IJP) (Peng, Zhou, Jerry, Hong, and Annette, 2015)

2.3 Binder jetting

The binder jetting, which is an additive manufacturing technology, constructs model by using a binder to selectively bond layers of powders. In this process, small droplets of binder with diameters less than 100 μm are successively deposited on to the powder bed surface, which those are a drop-on-demand print head based on raster scanning pattern. After deposition of the liquid binder, the entire surface of the powder bed is exposed to a fixed amount of heat, which commonly use a heat lamp, for establishing an appropriated mechanical strength via partially cured binder within the generated layer to withstand the shear and gravitational compressive forces involved in the spreading and printing of subsequent

layers. These steps are repeated for each layer until the whole feature was completed [13].

For binder jetting process, properties of powdered material and binder are important to the successful fabrication of parts. The binder has to be suitable low viscosity in which surface tension and ink density are suitable properties to prevent spreading from nozzles [14]. S. Holland, et al. were developed food grade inks possessed the necessary properties to be successfully ink jet printed in a Fujifilm Dimatix printer, as shown in figure 6.[15].

Table 1. List of printability 3D printing technology applied for food design.

	Category		
	Extrusion-based printing	Binder jetting	Inkjet printing
Principle	Extrusion and deposition	Powder binding and binder drop-on demand deposition	Drop-on-demand deposition and Continuous jet printing
Material	Solid-based, Paste material	Liquid-based, Powder-based	Liquid-based, low viscosity material
Processing factor	-Printing head height -Nozzle diameter -Printing rate -Nozzle movement rate	-Printing head types -Printing rate -Nozzle diameter -Layer thickness	-Temperature in print head -Printing rate -Nozzle diameter -Printing head height
Advantage	-Low cost of the entry-level machines -A variety of raw materials are available -Easy to customize	-Large number of potential materials -Very high production speed -Support structures are included automatically in layer fabrication -Low-imaging specific energy -Complex 3D food fabrication	-No waste of model material -High resolution and accuracy -Multiple materials and multiple colors -Fast fabrication
Disadvantage	-Low level of precision and long build time -Unable to build sharp external corners -Anisotropic nature of a printed part -Difficult to hold 3D structures in post-processing	-Rough or grainy appearance -Post-processing required to remove moisture or improve strength -Limited material -Less nutritious products	-Post-processing may damage thin and small features -Support materials cannot be recycled thus wasted -Simple food design -Only for surface filling or image decoration
Application	Chocolate, Confection, Decorations made of sugar, Candies	Chocolate, Pizza (Powder form), Fake food	Chocolate, Liquid dough, sugar icing, meat paste, cheese, jams, gels
Machine	Choc Creator, AIBOULLY Chocolate, Createbot 3D Food	Chefjet, Fujifilm Dimatix	Foodjet, Filament six-head 3D
Company	Chocedge, AIBOULLY, Createbot	3D systems, Fujifilm Dimatix	De Grood Innovations, TNO

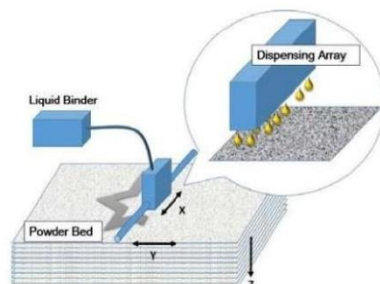


Figure 6. Binder jetting (BJ) (Peng, Zhou, Jerry, Hong, and Annette, 2015)

3 Summary

The Additive manufacturing technologies have been widely used in several industries including food manufacturing to create the fantastic food shape. There are variety techniques such as extrusion-based printing, binder jetting and inkjet printing.

In extrusion-based printing, food materials are extruded through nozzle to create food designed shape layer – by – layer. Based on the low viscosity property of material, the suitable materials in this technique are solid-based and paste material. The processing factor of this technique are printing head height, nozzle diameter and nozzle movement rate. The advantage of this technique are the low cost of the entry-level machines, a variety of raw materials are available and easy to customize while the low level of precision and long build time are the disadvantage of extrusion-based printing.

In inkjet printing, food materials are loaded in print head then they are electrically heated to establish pulses of pressure that push droplets from the nozzle. There are two types of printing: a jet printing and a drop-on-demand printing. By using the low viscosity property of material, the suitable materials in this technique is liquid-based. The processing factor of this technique are temperature print head, nozzle diameter and printing rate. The advantages of this technique are high resolution, accuracy and multiple materials while post-processing may damage thin and small features, which is disadvantage of inkjet printing.

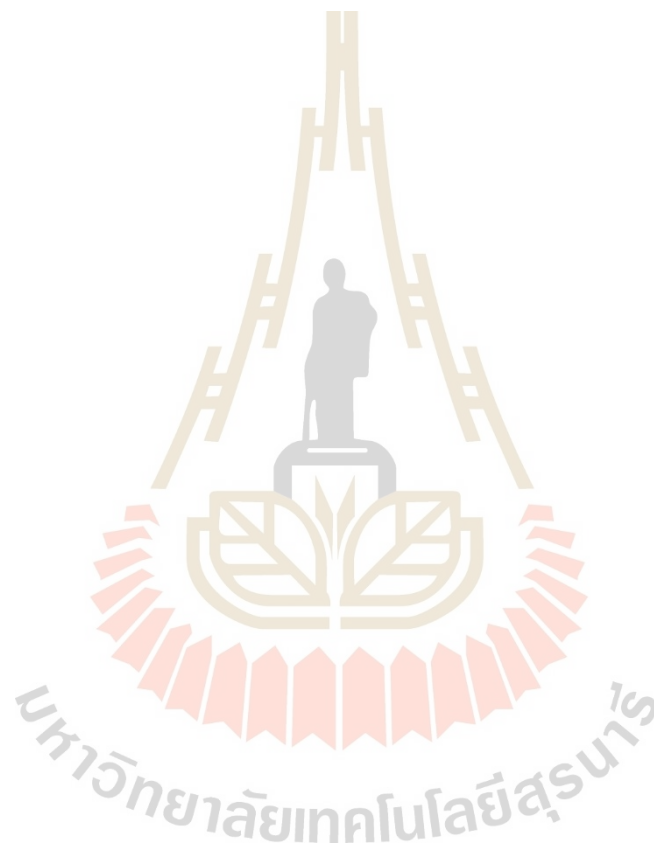
In binder jetting, food materials are successively deposited on to the powder bed surface through nozzle. Based on the low viscosity, surface tension and ink density, the suitable material in this technique are liquid-based, powder-based. The processing factor of this technique are printing head type, nozzle diameter and layer thickness. The advantage of this technique are the very high production speed, support structures are included automatically in layer fabrication while the disadvantage are rough or grainy appearance, post-

processing required to remove moisture or improve strength of binder jetting.

References

1. M. Annoni , H. Gilberti , M. Strano. (2016). Feasibility Study of an Extrusion-based Direct Metal Additive Manufacturing Technique. 44th Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME <http://www.sme.org/namrc>. Volume 5, 2016, Pages 916-927.
2. Shannon E. Bakarich , R. Gorkin III , R. Gately , S. Naficy , Marc in het Panhuis , Geoffrey M. Spinks. (2017). 3D printing of tough hydrogel composites with spatially varying materials properties. *Additive Manufacturing* 14 (2017) 24-30.
3. Teresa F. Wegrzyn , Matt Golding , Richard H. Archer. (2012). Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology* 27 (2012) 66-72.
4. J.Y. Lee , Jia An , Chee Kai Chua. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today* 7 (2017) 120-133.
5. Nguyen, Tuan C. "Hungry? A Startup Wants You to 3D Print Your Next Meal." <http://www.smithsonianmag.com/innovation/hungry-a-startup-wants-you-to-3d-print-your-next-meal-180947702/> (accessed September 18, 2017).
6. Jayakuma, Amrita. "Home-Baked Idea? Nasa mulls 3D printers for food replication." *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/technology/2013/jun/04/nasa-3d-printer-space-food> (accessed September 18, 2017).
7. New technology often builds on old technology. Understanding how the present printers work and discovering their advantages and disadvantages may help people create more useful food printers in the future.
8. F. Yang, M. Zhang, B. Bhandari, Y. Liud. (2018). Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT - Food Science and Technology* Volume 87, January 2018, Pages 67-76
9. L. Wang, M. Zhanga, B. Bhandari, C. Yangd. (2018). Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. *Journal of Food Engineering* Volume 220, March 2018, Pages 101-108
10. M. Lanar, David P.Forrestal, S Scheurer, Damien J.Slinger, S. Liao, S. K.Powell, Maria A.Woodruff. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering* Volume 215, December 2017, Pages 13-22
11. Fernanda C.Godoi, Sangeeta Prakash, Bhesh R.Bhandari. (2016). 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering* Volume 179, June 2016, Pages 44-54

12. Z. Liu, M. Zhang, B. Bhandari, Y. Wang. (2017). 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology* Volume 69, Part A, November 2017, Pages 83-94
13. H. Miyanaji, N. Momenzadeh, L. Yanga. (2018). Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process. *Additive Manufacturing* Volume 20, March 2018, Pages 1-10
14. J. Sun, Z. Peng, W. Zhou, Jerry Y.H.Fuh, G. Soon Hong, A. Chiu. (2015). A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication. *Procedia Manufacturing* Volume 1, 2015, Pages 308-319
15. S. Holland, T. Foster, W. MaNaughtan, C. Tuck. (2018). Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing. *Journal of Food Engineering* Volume 220, March 2018, Pages 12-19



ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวุฒิ สานคล่อง เกิดเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2538 ณ จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนบุญวัฒนา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพจากวิทยาลัยเทคนิคสุรนารี อำเภอโชคชัย จังหวัดนครราชสีมาในปีการศึกษา 2556 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2560 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมระบบอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพ.ศ. 2560 ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสนำเสนอบทความวิชาการ 3 บทความ ประกอบด้วยบทความ A Review of 3D Food Printing Technology งาน 6th Asia Conference on Mechanical and Materials Engineering (ACMME 2018) Seoul, South Korea, June 15-18, 2018 บทความการศึกษารูปทรงและองศาเส้นสกรูที่มีผลต่อขนาดเส้นซ็อกโกแลตที่ขึ้นรูปโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป งานประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ครั้งที่ 38 ประจำปี 2563 ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และบทความ A study of parameters that effect to width of chocolate line based on additive manufacturing and screw based extrusion ในงาน The 4th International Symposium on Advanced Material Research (4th ISAMR 2021) in Jeju Island, South Korea และ ได้รับ การ ตี พิมพ์วารสารวิชาการ 1 บทความ ได้แก่ บทความ A study of parameters that effect to width of chocolate line based on additive manufacturing and screw based extrusion ในวารสารวิชาการ Solid State Phenomena Vol. 319 p. 35-40