

กระบวนการกำจัดสารพิษไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังชนิดขมิ้นแห้งด้วยพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่
ความดันบรรยากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROCESS FOR CYANIDE DETOXIFICATION OF DRY-MILLED BITTER CASSAVA FLOUR
USING ATMOSPHERIC NONTHERMAL PLASMA TREATMENT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Food Technology
Department of Food Technology
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2021
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

น.ส.พิมพ์กมล ทวีวงศ์

สาขาวิชา

เทคโนโลยีทางอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันต์กุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตรีช กวีเทพูร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันต์กุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิกันต์ กุ้งษ์ศักดิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.วรรณฯ ตูยชัย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พิมพ์กัศ ทวีวงษ์ : กระบวนการกำจัดสารพิษไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังชนิดขมไม่แห้งด้วยพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ. (PROCESS FOR CYANIDE DETOXIFICATION OF DRY-MILLED BITTER CASSAVA FLOUR USING ATMOSPHERIC NONTHERMAL PLASMA TREATMENT) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล

การผลิตพลาสมาสำหรับกำจัดสารพิษไซยาไนด์ในแป้งมันสำปะหลังสามารถทำได้โดยใช้การไม่แห้ง ซึ่งสามารถช่วยลดต้นทุนเรื่องน้ำในกระบวนการผลิตและการบำบัดน้ำเสียได้ แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถกำจัดไซยาไนด์ซึ่งเป็นสารพิษในมันสำปะหลังให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภคได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมันสำปะหลัง และศึกษาสภาวะของพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศต่อการลดลงของไซยาไนด์ในพลาสมาสำหรับกำจัด โดยศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมันสำปะหลัง ได้แก่ 60, 70 และ 80°C พบว่าอุณหภูมิอบแห้งในช่วง 60 ถึง 80°C มีอัตราการลดลงของไซยาไนด์และปริมาณไซยาไนด์ที่คงเหลือในพลาสมาสำหรับกำจัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อพิจารณาผลทางเคมีกายภาพพบว่าพลาสมาสำหรับกำจัดมีรอยแตกและรูเกิดขึ้นที่ผิวเมล็ดสตาร์ช มีลักษณะผลึกแบบ A มีความสามารถในการจับน้ำ กำล้างการพองตัว การละลาย อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน ความหนืดสูงสุด และผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) สูงขึ้น มีค่าการคืนตัว (setback) และค่าดัชนีความขาวลดลงเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังไม่เปียกหรือสตาร์ช การศึกษาสภาวะของพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนเพื่อลดปริมาณไซยาไนด์แปรรูปแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20 กิโลวัตต์ และเวลาที่ใช้ ได้แก่ 5, 10 และ 15 นาที พบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้สูงสุดที่สภาวะแรงดันไฟฟ้า 20 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยมีร้อยละการลดลงสูงสุดเท่ากับร้อยละ 40 และเมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นของพลาสมาสำหรับกำจัด แรงดันไฟฟ้าและเวลาต่อปริมาณไซยาไนด์ในพลาสมาสำหรับกำจัด พบว่าการลดลงของไซยาไนด์ที่เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง และเมื่อทำการให้พลาสมาโดยเพิ่มจำนวนรอบของการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลวัตต์ เป็นเวลา 10 นาที พบว่าไซยาไนด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพลาสมาไม่สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการบริโภคได้ พิจารณาผลด้านเคมีกายภาพของพลาสมาสำหรับกำจัดที่ให้พลาสมาพบว่าเกิดรอยแตกและรูมากขึ้นที่ผิวของเมล็ดสตาร์ช มีรูปแบบผลึกแบบ A ค่าความสามารถในการจับน้ำไม่เปลี่ยนแปลง กำล้างการพองตัวและการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันสูงขึ้น ความหนืดสูงสุด ผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุด และการคืนตัวลดลง และมีดัชนีความขาวไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับพลาสมาสำหรับกำจัดปกติ

สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370128223 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORD: Cyanide, cassava, dry-milled flour, dry milling, nonthermal plasma

Pimphak Thaweewong : PROCESS FOR CYANIDE DETOXIFICATION OF DRY-MILLED BITTER CASSAVA FLOUR USING ATMOSPHERIC NONTHERMAL PLASMA TREATMENT. Advisor: Assoc. Prof. Jirarat Anuntagool

The cassava flour production is done by dry milling, which reduce cost from manufacturing process and wastewater treatment. The limitation of the dry milling method is that it cannot reduce the level of cyanide content to comply with the standard. This research aimed to study the effect of drying temperature on the change of cyanide content in cassava and the effect of atmospheric nonthermal plasma treatment on cyanide reduction in dry milled cassava flour. The drying temperature of 60, 70 and 80°C found that in the range of 60 to 80°C have cyanide reduction rate and the residual cyanide content in dry milled cassava flour were not significantly different ($p > 0.05$). The physicochemical properties of dry milled flour showed that dry milled flour has more holes and fractures on starch granule surface and has a A type crystallinity pattern. Dry milled flour has higher water binding capacity, swelling power, solubility, pasting temperature, peak viscosity and breakdown and lower setback and whiteness index than wet milled cassava flour or starch. The study of nonthermal plasma on cyanide reduction using different voltages levels, at 5, 10, 15 and 20 kilovolts, and different treatment times, at 5, 10 and 15 minutes, found that the highest cyanide removal was achieved at a voltage of 20 kilovolts for 10 minutes with a 40% reduction. The effect of initial cyanide content of dry milled cassava flour, voltage levels, and treatment times on cyanide content in dry milled flour was studied found that the reduction of cyanide followed the first order reaction and when applied plasma with an increase in the number of plasma treatment cycles at 20 kilovolts for 10 minutes, a significant decrease in cyanide content was observed ($p \leq 0.05$) as the plasma cycle increased. However, plasma has not been able to reduce the amount of cyanide content to a safe level for consumption. The physicochemical properties of plasma treated flour found that it has more holes and fractures and has a A type crystallinity pattern. The plasma treated flour has no change in water binding capacity compared to native flour and plasma treated flour tend to have higher swelling power, solubility and pasting temperature and has lower peak viscosity, breakdown and setback than native flour. The whiteness index of plasma treated flour has no different from native flour.

Field of Study: Food Technology

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และคอยรับฟังและอบรมสั่งสอน ให้ข้อคิดในการทำงานเสมอมา ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง และความทุ่มเทของอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตรีช กวิกเพฑูรย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิกานต์ กุ้พงษ์ศักดิ์ ศาสตราจารย์ ดร.วรรณมา ตุลยธัญ และ ดร.สุนีย์ โชตินรินาท์ ที่กรุณาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และกรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ กลั่นกรอง และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์

พิมพ์ฉัตร ทวีวงษ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ค
สารบัญรูปภาพ.....	จ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
บทที่ 2	3
วารสารปริทัศน์	3
2.1 มันสำปะหลัง.....	3
2.2 ฟลาวัวร์และสตาร์ช.....	5
2.3 ไชยาไนตในมันสำปะหลัง	5
2.4 การผลิตแป้งในอุตสาหกรรม.....	7
2.4.1 การม่เปียก	7
2.4.2 การม่แห้ง	8
2.5 พลาสมา.....	8
2.5.1 ประเภทของพลาสมา (ธีรวรรณ, 2558).....	8
2.5.1.1 พลาสมาร้อนหรือพลาสมาอุณหภูมิสูง	9

2.5.1.2	พลาสติกเยื่อหรือพลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อน.....	9
2.5.2	กลไกการกำจัดสารพิษของพลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อนในตัวอย่างอาหาร	10
2.5.2.1	การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำโดยใช้พลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อน	10
2.5.2.2	การกำจัดยาฆ่าแมลงในน้ำโดยใช้พลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อน	10
2.5.2.3	การกำจัดยาฆ่าแมลงในบลูเบอร์รี่โดยใช้พลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อน.....	12
2.5.2.4	การกำจัดยาฆ่าแมลงในมะม่วงโดยใช้พลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อน	12
2.5.2.5	ประสิทธิภาพของพลาสติกแบบดัดจากรังจําฉนวนที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศ ต่อการลดปริมาณสารพิษที่ทุทอกซิน และเอชทีทุทอกซิน ในฟลาวัวร์ข้าวโอ๊ต	13
2.5.3	กลไกการเกิดปฏิกิริยาของฟลาวัวร์หรือสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสติก.....	14
2.5.3.1	การเชื่อมข้าม (cross linking).....	14
2.5.3.2	ดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization)	15
2.5.3.3	การกัดผิว (etching)	15
2.6	การเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของสาร (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2559).....	16
2.6.1	อันดับปฏิกิริยา	16
2.6.1.1	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์.....	16
2.6.1.2	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	17
2.6.1.3	ปฏิกิริยาอันดับสอง.....	17
2.7	การตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟลาวัวร์หรือสตาร์ช.....	18
2.7.1	สมบัติทางเคมี.....	18
2.7.2	สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่.....	21
2.7.2.1	ลักษณะของเม็ดสตาร์ช	21
2.7.2.2	กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility)	22
2.7.2.3	ความหนืด	23
2.7.2.4	การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)	25

2.7.2.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)	26
บทที่ 3	27
วิธีการทดลอง	27
3.1 วัตถุประสงค์และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	27
3.1.1 วัตถุประสงค์	27
3.1.2 วัสดุและสารเคมี	27
3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย	27
3.2.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของโซయాไนต์ในฟลาวัวร์มัน สำหรับหลังโม้แห้งเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำหรับหลังโม้เปียกทางการค้า.....	27
3.2.1.1 ศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณโซยาไนต์	27
3.2.1.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	28
3.2.2 ศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณโซยาไนต์ในฟลาวัวร์มันสำหรับหลังโม้แห้ง โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....	29
3.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นโซยาไนต์เริ่มต้นของฟลาวัวร์มันสำหรับหลังโม้แห้ง แรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณโซยาไนต์ในฟลาวัวร์มันสำหรับหลังโม้แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ	30
3.2.3.1 ศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณโซยาไนต์	31
3.2.3.2 ศึกษาปริมาณโซยาไนต์ของฟลาวัวร์มันสำหรับหลังโม้แห้งที่ให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที เมื่อมีจำนวนรอบการให้พลาสมาตั้งแต่ 1 ถึง 4 รอบ	31
3.2.3.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟลาวัวร์มันสำหรับหลังโม้แห้งเมื่อให้พลาสมาที่ สภาวะที่ลดปริมาณโซยาไนต์ได้มากที่สุด	31
บทที่ 4	33
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	33
4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของโซยาไนต์ในฟลาวัวร์มันสำหรับ หลังโม้แห้งเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำหรับหลังโม้เปียกทางการค้า.....	33

4.1.1	จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงไชยาไนต์ในมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ การอบแห้งแตกต่างกัน.....	33
4.1.2	กราฟการอบแห้งของมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งแตกต่าง กัน.....	35
4.1.3	Moisture sorption isotherm ของมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิการ อบแห้งแตกต่างกัน.....	37
4.1.4	ปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	38
4.1.5	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้ง แตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	38
4.1.6	โครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้ง แตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	39
4.1.7	ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้ง แตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	41
4.1.8	กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการ อบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	43
4.1.9	สมบัติการเกิดเฟสของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	44
4.1.10	ค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการ อบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง.....	45
4.2	การศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไชยาไนต์ในฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....	47
4.2.1	ปริมาณไชยาไนต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับ แรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	47
4.2.2	ปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับ แรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	49

4.2.3	ลักษณะสัญญาณวิทยาของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	51
4.2.4	โครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.	52
4.2.5	ความสามารถในการจับน้ำของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	55
4.2.6	กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	56
4.2.7	สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	61
4.2.8	ค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง.....	64
4.3	การศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง แรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....	66
4.3.1	จลนศาสตร์การลดลงของไซยาไนด์ในฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน	66
4.3.2	ปริมาณความชื้นของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน.....	67
4.3.3	ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่แตกต่างกัน	70
4.3.4	สมบัติทางเคมีและกายภาพของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที.....	71

4.3.4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลัง โม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที 71	
4.3.4.2 โครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้น สำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที 72	
4.3.4.3 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้น สำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที 73	
4.3.4.4 กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและ ฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที 74	
4.3.4.5 สมบัติการเกิดเฟสดีของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้ แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ... 75	
4.3.4.6 ค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรี ม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็น เวลา 10 นาที 76	
4.3.4.7 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลัง โม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที.. 1	
บทที่ 5 2	
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 2	
บรรณานุกรม 4	
บรรณานุกรม 5	
ภาคผนวก ก 13	
วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ 13	
ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ 13	
ก.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ 16	

ก.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกราด.....	16
ก.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชในน้ำมันสำปะหลัง	16
ก.5 ความสามารถในการจับน้ำ.....	17
ก.6 กำล้างการพองตัว และการละลาย.....	18
ก.7 สมบัติการเกิดเพสต์.....	19
ก.8 ค่าสี (.....	20
ก.9 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น.....	20
ก.10 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน	21
ก.11 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า.....	23
ก.12 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน.....	23
ก.13 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ.....	24
ก.14 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต.....	26
ภาคผนวก ข.....	27
ผลการทดลองเพิ่มเติม.....	27
ภาคผนวก ค.....	31
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	31
ค.1 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของ ไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังไม่เปียกทาง การค้า.....	31
ค.2 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ใน พลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....	46
ค.3 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นของพลาว์มัน สำปะหลังไม่แห้ง แรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้ง โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ.....	65
ประวัติผู้เขียน.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันสำปะหลังสดและแห้ง	4
ตารางที่ 3.1 กำลังและงานของสภาวะของเครื่องพลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน 30	
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C).....	33
ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C).....	41
ตารางที่ 4.3 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)	46
ตารางที่ 4.4 ค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C).....	46
ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง	49
ตารางที่ 4.6 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง	50
ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง	54
ตารางที่ 4.8 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อร้อยละผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง.....	54
ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง.....	56
ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อกำลังการพองตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง	58

ตารางที่ 4.11 ทฤษฎีของปัจจัยที่ศึกษาต่อร้อยละการละลายของฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้ พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง กัน.....	60
ตารางที่ 4.12 สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งที่ ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	63
ตารางที่ 4.13 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อสมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้ พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง กัน.....	64
ตารางที่ 4.14 ค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวรรีม้น สำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	65
ตารางที่ 4.15 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของฟลาวรรีม้น สำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	65
ตารางที่ 4.16 ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งที่มี ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน.....	68
ตารางที่ 4.17 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อค่าคงที่อัตราการลดลงของไซยาไนด์ของฟลาวรรีม้น สำปะหลังไม่แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลา แตกต่างกัน.....	69
ตารางที่ 4.18 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งที่มีความ เข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน.....	70
ตารางที่ 4.19 ร้อยละผลึกของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการ ให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	73
ตารางที่ 4.20 สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการ ให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที.....	77
ตารางที่ 4.21 ค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของฟลาวรรีม้นสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวรรีม้น สำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที.....	77

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 หัวหรือรากมันสำปะหลัง	3
รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสลายพันธะของลินามาริน	6
รูปที่ 2.3 การเกิดพลาสมาโดยการให้พลังงานแก่วัตถุ โดยสถานะที่สี่ของสสารเรียกว่า “พลาสมา”	8
รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสมา	15
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดดีพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสมา	15
รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดการกัดผิวของโมเลกุลสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสมาพลาสมา	16
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลส	19
รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลเพกติน	19
รูปที่ 2.9 แบบจำลองโครงสร้างของสตาร์ช; โครงสร้างเกลียวคู่และกิ่งก้านของแอมิโลเพกตินแสดงเป็นเส้นสีดำ; โครงสร้างสายตรงของแอมิโลสแสดงเป็นเส้นสีเขียว; และวงกลมหมายถึงโครงสร้างเกลียวคู่ในโครงสร้างผลึกแบบ A หรือ B.....	20
รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A, B, C และ V	22
รูปที่ 2.11 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Rapid visco analyzer (RVA)	25
รูปที่ 4.1 สัดส่วนของไซยาไนด์ที่เหลือหลังการอบแห้งต่อไซยาไนด์เริ่มต้นของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)	35
รูปที่ 4.2 กราฟการอบแห้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)	36
รูปที่ 4.3 Moisture sorption isotherm ของมันสำปะหลังที่อุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)	37
รูปที่ 4.4 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)	38
รูปที่ 4.5 รูปร่าง และพื้นผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500x.....	39
รูปที่ 4.6 X-ray diffractogram ของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)	40
รูปที่ 4.7 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C).....	42

รูปที่ 4.8 กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้ แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C).....	44
รูปที่ 4.9 ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการ ให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	47
รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการ ให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	50
รูปที่ 4.11 รูปร่าง และพื้นผิวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่าน การให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500x.....	52
รูปที่ 4.12 X-ray diffractogram ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	53
รูปที่ 4.13 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	56
รูปที่ 4.14 กำลังการพองตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการ ให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	57
รูปที่ 4.15 ร้อยละการละลายของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่าน การให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน.....	60
รูปที่ 4.16 ปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความ เข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน.....	68
รูปที่ 4.17 ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการ ให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่ แตกต่างกัน.....	71
รูปที่ 4.18 รูปร่าง และพื้นผิวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้ พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราดที่กำลังขยาย 1500x.....	72

รูปที่ 4.19 X-ray diffractogram ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที..... 73

รูปที่ 4.20 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที..... 74

รูปที่ 4.21 กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที..... 75

รูปที่ 4.22 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที.....1



บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง นับเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมเกษตรที่สำคัญของประเทศไทย โดยในปี 2563 ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตมันสำปะหลังอันดับสองของโลก มีปริมาณการผลิตประมาณ 29 ล้านเมตริกตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2563) และมีปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังประมาณ 9.7 ล้านตัน (สมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลัง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 2564) คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 1 แสนล้านบาท (กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ, 2564) ทุกส่วนของมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ส่วนใบมันสำปะหลังนำไปทำอาหารสัตว์ ส่วนลำต้นนำไปใช้ปลูกมันสำปะหลังต่อ และส่วนหัวหรือราก นิยมนำมาแปรรูปเป็นสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava starch) โดยสตาร์ชมันสำปะหลังคุณภาพดีควรผลิตภายในวันที่เก็บเกี่ยวมัน ซึ่งสตาร์ชมันสำปะหลัง สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ หรือนำไปทำสตาร์ช ดัดแปร (modified starch) น้ำเชื่อมกลูโคส (glucose syrup) มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ และกาว เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลัง ทำได้โดยใช้วิธีการโม่แบบเปียก (Wet-milling) โดยการโม่จะเป็นการสกัดสตาร์ชออกจากหัวมัน ซึ่งวิธีนี้จะทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีคุณภาพสูง และสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลังจนถึงระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อการบริโภค แต่ด้วยวิธีการโม่เปียกนี้มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิตมาก ทำให้เกิดน้ำเสียจากการผลิตมากตามไปด้วย ส่งผลต่อต้นทุนทั้งในเรื่องปริมาณน้ำ และการบำบัดของเสีย แต่นอกจากวิธีการโม่เปียกแล้ว ยังมีวิธีการโม่แห้ง (dry-milling) ซึ่งไม่มีการใช้น้ำในระบบ ทำให้สามารถประหยัดต้นทุนและพลังงานได้ แต่มีข้อจำกัด คือ การโม่แห้งไม่สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวัวร์มันสำปะหลังจนถึงระดับที่ปลอดภัยได้ โดยมีรายงานว่าถ้าได้รับไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ประมาณ 1.4 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม จะเป็นพิษถึงตายได้ นอกจากนี้การโม่แห้งยังส่งผลต่อคุณภาพของฟลาวัวร์มันสำปะหลัง เนื่องจากแรงเฉือนที่กระทำต่อฟลาวัวร์โดยตรง อาจทำให้เม็ดสตาร์ชเสียหาย และมีคุณภาพต่ำลง

ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycosides) คือ ไซยาไนด์ที่เชื่อมกับโมเลกุลน้ำตาล พบในทุกรัฐของมันสำปะหลัง โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปลินามาริน (linamarin) และโลทอสตราลิน (lotaustralin) ซึ่งมีรายงานว่าไม่มีพิษ แต่เมื่อมีการกระทำที่ทำให้เนื้อเยื่อพืชเสียหาย เช่น กระบวนการแปรรูป สารในกลุ่มไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์จะถูกย่อยโดยเอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) ทำให้เกิดไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ซึ่งเป็นพิษ นอกจากนี้ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ ในมันสำปะหลังยังมีไซยาไนด์ในรูปอื่น ๆ ได้แก่ ไซยาโนไฮดริน (cyanohydrin) และไซยาไนด์อิสระ

(free cyanide) ซึ่งจะอยู่ในรูปไฮโดรเจนไซยาไนด์ โดยปริมาณของไซยาไนด์ในมันสำปะหลังจะขึ้นอยู่กับพันธุ์ และระยะการเติบโตของมันสำปะหลัง โดยสามารถแบ่งประเภทของมันสำปะหลังได้เป็น 3 ชนิดตามปริมาณไซยาไนด์ ได้แก่ เป็นพืชต่ำ (ชนิดหวาน) เป็นพืชปานกลาง และเป็นพืชสูง (ชนิดขม) โดยมันสำปะหลังชนิดหวานมีปริมาณไซยาไนด์ น้อยกว่า 50 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัมตัวอย่างสด ชนิดพืชปานกลาง 50-100 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัมตัวอย่างสด และชนิดขมมีปริมาณไซยาไนด์มากกว่า 100 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัมตัวอย่างสด (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) มันสำปะหลังที่นิยมนำมาใช้แปรรูปเป็นสตาร์ชมันสำปะหลังคือมันสำปะหลังชนิดขม ซึ่งมีปริมาณการปลูกมาก และให้ผลผลิตต่อไร่สูง กระบวนการแปรรูปโดยการไม่เปียกสามารถกำจัดสารประกอบไซยาไนด์ได้ นอกจากนี้อาจมีการใช้ความร้อนร่วมด้วยเพื่อกำจัดไซยาไนด์ แต่จะยังคงมีไซยาไนด์บางส่วนหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ซึ่งปริมาณของไซยาไนด์ที่เหลืออยู่จะขึ้นกับสภาวะในการแปรรูป โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสตาร์ชมันสำปะหลังกำหนดให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณไซยาไนด์ไม่เกิน 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง (FAO/WHO, 1991; Cardoso และคณะ, 2005)

ในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา มีรายงานเรื่องการศึกษาการใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (non-thermal plasma) ในเชิงอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การยับยั้งจุลินทรีย์ ยับยั้งเอนไซม์ การดัดแปรสมบัติเชิงหน้าที่ของวัตถุดิบอาหาร การทำลายสารพิษและสารตกค้างทางเกษตร นอกจากนี้ยังมีรายงานเรื่องการศึกษาการใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำ (Valsero และคณะ, 2013) โดยพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนเป็นวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และไม่มีของเสีย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเทคโนโลยีพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนมาใช้ในการลดปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้ง เพื่อช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวอร์มันสำปะหลังให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตราย อันจะเป็นการแก้ปัญหาการจัดการน้ำเสียที่มาจากกระบวนการไม่เปียก ช่วยประหยัดต้นทุนการผลิต และรักษาพลังงาน

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) เป็นพืชหัวชนิดหนึ่ง อยู่ในวงศ์ยางพารา (Euphorbiaceae) นิยมปลูกในเขตร้อน สามารถขึ้นได้ในดินทั่วไปแม้แต่ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ และทนทานต่อสภาพดินที่เป็นกรดและด่างได้ดี มันสำปะหลังมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์คือเป็นไม้พุ่ม ความสูง 1.3 ถึง 5.0 เมตร มีรากแบบสะสมอาหาร (tuberous root) ลำต้นเปราะ ใบเดี่ยวเรียงเวียน มีร่องลึก 3 ถึง 7 ร่อง มีหูใบ ก้านใบยาว ดอกเป็นช่อดอก และมีผลแบบแคปซูลทรงกลม (โครงการอนุรักษ์พันธุพืช, ไม่ปรากฏ) มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทยรองจากข้าว ในปี 2563 ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตมันสำปะหลังอันดับสองของโลก มีปริมาณการผลิตประมาณ 29 ล้านเมตริกตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2563) และมีปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังประมาณ 9.7 ล้านตัน (สมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลัง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 2564) คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 1 แสนล้านบาท ทุกส่วนของมันสำปะหลังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ส่วนใบมันสำปะหลังนำไปผลิตอาหารสัตว์ ส่วนลำต้นนำไปใช้ปลูกมันสำปะหลังต่อ และส่วนหัวหรือราก นิยมนำมาแปรรูปเป็นสตาร์ชมันสำปะหลัง



รูปที่ 2.1 หัวหรือรากมันสำปะหลัง

ที่มา: allrecipes (2563)

มันสำปะหลังมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ น้ำ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เส้นใยอาหาร และโปรตีน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มันสำปะหลังมีองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่ใช่สตาร์ชน้อยมาก โดยองค์ประกอบ

หลักทางเคมีของสตาร์ช ได้แก่ แอมิโลส (Amylose) และแอมิโลเพกติน (Amylopectin) (Muhlbauer และ Muller, 2020)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งหลังสวดและแห้ง

ปริมาณ	แป้งหลังสวด	แป้งหลังแห้ง
องค์ประกอบหลักทางเคมี	%	
น้ำ	65	14
โปรตีน	0.95	2.3
ไขมัน	0.22	0.54
คาร์โบไฮเดรต	30.4	74.8
เส้นใยหยาบ	2.8	6.8
แร่ธาตุ	0.66	1.63
วิตามิน	µg/100 g	
แคโรทีนอยด์ (carotenoid)	28	70
วิตามินบี 1 (vitamin B1)	57	140
วิตามินบี 2 (vitamin B2)	28	70
วิตามินซี (vitamin C)	28	70
ไซยาโนจีนิก (cyanogenic)	ppm	
กรดไฮโดรไซยานิก (hydrocyanic acid)	285	699
คุณค่าทางโภชนาการ	kJ/100 g	
	542	1331

ที่มา: Muhlbauer และ Muller (2020)

แป้งหลังที่ปลูกในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามปริมาณไซยาไนด์ คือชนิดขมและชนิดหวาน โดยแป้งหลังชนิดขมมีปริมาณไซยาไนด์สูง เป็นพิษ มีรสขม มีปริมาณสตาร์ชในหัวมันสูง ไม่เหมาะกับการนำมาบริโภคโดยตรง นิยมปลูกเพื่อใช้สำหรับอุตสาหกรรม เช่น ผลิตสตาร์ชดัดแปร (modified starch) ผลิตผงชูรส และอุตสาหกรรมกระดาษและกาว เนื่องจากปลูกได้ง่ายและให้ผลผลิตต่อไร่สูง แป้งหลังชนิดหวาน มีปริมาณไซยาไนด์ต่ำ ไม่มีรสขม มีปริมาณสตาร์ชในหัวมันสูง มีราคาสูงกว่าแป้งหลังชนิดขม (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2562)

2.2 ฟลาวาร์และสตาร์ช

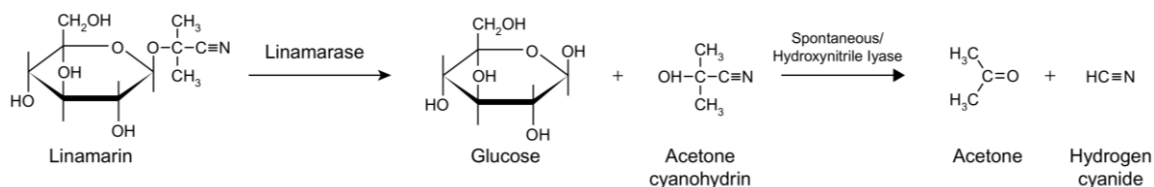
แป้งโม้แห้งแห้งหรือฟลาวาร์ (flour) จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตจำพวกพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) เป็นผลิตภัณฑ์ที่สะสมตามส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น เมล็ด หัว ราก ลำต้น และผล โดยนำมาโม่หรือบด และตีร่อนให้เป็นผงละเอียด ซึ่งฟลาวาร์มีองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ เป็นไปตามวัตถุดิบดั้งเดิมทั้งหมด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร วิตามิน และแร่ธาตุ โดยหากทำการแยกองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตออก จนเหลือสตาร์ชบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จะเรียกว่า สตาร์ช (starch) ซึ่งองค์ประกอบหลักทางเคมีของสตาร์ชประกอบไปด้วยแอมิโลส และแอมิโลเพกติน โดยโมเลกุลของแอมิโลสเป็น พอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาลกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ชนิด α -(1,4) แอมิโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส ที่จัดเรียงตัวเป็นสายตรงและเป็นกิ่ง เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ชนิด α -(1,4) และ α -(1,6) ตามลำดับ

ทั้งนี้ฟลาวาร์และสตาร์ชนับเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญทั้งมนุษย์และสัตว์ โดยฟลาวาร์และสตาร์ชมีคุณสมบัติเด่นที่สำคัญคือสามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์หลายชนิด ทั้งที่เป็นอาหารและไม่ใช่อาหาร เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น

2.3 ไซยาโนไนด์ในมันสำปะหลัง

ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycosides) เป็นสารที่พบในทุกส่วนของต้นมันสำปะหลัง โดยไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ คือไซยาโนไนด์ที่เชื่อมกับโมเลกุลน้ำตาล โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปลินามาริน (linamarin) และโลทอสตราลิน (lotaustralin) ซึ่งสังเคราะห์มาจากการดอะมีโน 2 ชนิด คือ วาลีน (valine) และไอโซลิวซีน (isoleucine) ตามลำดับ โดยมักพบลินามารินและโลทอสตราลินในมันสำปะหลังในอัตราส่วน 20 ต่อ 1 ความเป็นพิษของไซยาโนไนด์ในมันสำปะหลังเกิดจากเมื่อมีการกระทำที่ทำให้เนื้อเยื่อของพืชเสียหาย เช่น กระบวนการแปรรูป โดยจะเป็นการทำให้เอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ในกลุ่มเบต้ากลูโคซิเดส (β -glucosidase) ที่อยู่บริเวณผนังเซลล์มาเจอกับสารในกลุ่มไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ที่อยู่ในภายในแวคิวโอ (vacuole) ภายในเซลล์ ทำให้เกิดการสลายพันธะไกลโคไซด์ภายในโมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำตาลกลูโคสและไซยาโนไฮดริน (cyanohydrin) โดย ไซยาโนไฮดรินจะถูกสลายโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองได้ (spontaneous) หรือโดยเอนไซม์ไฮดรอกซีไนไตรไลเอส (hydroxynitrile lyase) ทำให้เกิดสารระเหยได้คือไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) หรือไซยาไนด์อิสระ ซึ่งเป็นสารที่มีพิษต่อร่างกายทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ค่าพีเอชที่สูงกว่า 6 หรือสภาวะที่มี

อุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า ไฮยาโนจีนีซิส (cyanogenesis) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าไฮยาโนดในมันสำปะหลังมีทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ ไฮยาโนเจนิกไกลโคไซด์ ไฮยาโนไฮดริน และไฮยาโนดอิสระที่อยู่ในรูปไฮโดรเจนไฮยาโนด



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาการสลายพันธะของลินามาริน

ที่มา: Szabo และคณะ (2010)

ปริมาณของไฮยาโนดที่เป็นพิษออกฤทธิ์แบบเฉียบพลันอยู่ที่ 0.5 ถึง 3.5 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัม น้ำหนักตัว ซึ่งคิดเป็น 30 ถึง 210 มิลลิกรัม HCN ในคนน้ำหนัก 60 กิโลกรัม ซึ่งในร่างกายมนุษย์มีกลไกที่สามารถกำจัดไฮยาโนดได้ 100 มิลลิกรัม HCN ภายในเวลา 24 ชั่วโมง โดยกลไกการกำจัดพิษเกิดจากการเปลี่ยนไฮยาโนดให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่ำลงอย่างไทโอไฮยาเนต (thiocyanate) และจะถูกขับออกทางปัสสาวะ อย่างไรก็ตามการบริโภคไฮยาโนดในปริมาณมากอาจส่งผลให้เกิดการเสียชีวิตแบบเฉียบพลันซึ่งมักเกิดจากการบริโภคมันสำปะหลังที่ไม่ได้รับการกำจัดไฮยาโนดอย่างมีประสิทธิภาพในระหว่างการทำอาหารเพื่อบริโภค อาการที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับพิษไฮยาโนดคือ คลื่นไส้ อาเจียน เวียนหัว ปวดท้อง ปวดหัว ท้องเสีย อ่อนเพลีย และหมดสติ และนำไปสู่การเสียชีวิต โดยการเปลี่ยนไฮยาโนดไปเป็นไทโอไฮยาเนตจะต้องมีการใช้กรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอย่างซิสเตอีน (cysteine) และเมไทโอนีน (methionine) ดังนั้นการบริโภคอาหารที่มีปริมาณโปรตีนต่ำจะทำให้ผลจากสารพิษไฮยาโนดรุนแรงมากขึ้น (Ginting และ Widodo, 2013) นอกจากนี้มันสำปะหลังที่นำไปผลิตเป็นอาหารสัตว์ต้องมีการกำจัดไฮยาโนดก่อนเช่นกัน โดยปริมาณต่ำสุดของไฮยาโนดที่ทำให้สัตว์เสียชีวิตได้ (minimal lethal dose) เท่ากับ 2.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Mimapan และคณะ, 2016) ปริมาณของไฮโดรเจนไฮยาโนดในหัวหรือรากมันสำปะหลังที่แตกต่างกันขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ สายพันธุ์ เวลาที่เก็บเกี่ยว สภาพของสิ่งแวดล้อมที่ใช้ในการเจริญเติบโต และระบบการทำเกษตร โดยปริมาณของไฮยาโนดที่เปลือกของมันสำปะหลังมีมากกว่าส่วนเนื้อเยื่อสะสมอาหารของพืช ทั้งนี้สามารถแบ่งมันสำปะหลังตามปริมาณของไฮยาโนดในหัวมันสำปะหลังได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ เป็นพิษต่ำ (ชนิดหวาน) เป็นพิษปานกลาง และเป็นพิษสูง (ชนิดขม) โดยมันสำปะหลังชนิดหวานมีปริมาณไฮยาโนด น้อยกว่า 50 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัมตัวอย่างสด ชนิดพิษปานกลาง 50-100 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัมตัวอย่างสด และชนิดขมมีปริมาณไฮยาโนดมากกว่า 100 มิลลิกรัม HCN/กิโลกรัม

ตัวอย่างสด (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) มันสำปะหลังชนิดหวาน นิยมนำมาบริโภคได้โดยตรง แต่สำหรับมันสำปะหลังชนิดขมนิยมนำไปแปรรูปเพื่อใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งในระหว่างกระบวนการแปรรูป ไซยาไนด์ในมันสำปะหลังจะถูกกำจัด โดยปริมาณของ ไซยาไนด์ที่เหลืออยู่จะขึ้นกับสถานะในการแปรรูป ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมสตาร์ชมันสำปะหลังกำหนดให้สตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณไซยาไนด์ไม่เกิน 10 มิลลิกรัม/กิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2557)

2.4 การผลิตแป้งในอุตสาหกรรม

การแปรรูปแป้งสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีล้วนส่งผลต่อสมบัติของแป้งที่ได้แตกต่างกัน ทำให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกันตามไปด้วย ทั้งนี้การเลือกวิธีในการผลิตแป้งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของพืช ตำแหน่งที่สะสมสตาร์ชในพืช สารอาหารในพืช การเนาเสียหลังเก็บเกี่ยว เป็นต้น ซึ่งการผลิตสามารถใช้การแปรรูปทางกายภาพ หรืออาจมีการใช้สารเคมีหรือเอนไซม์ในการช่วยสกัดสตาร์ชออกจากพืช การผลิตแป้งโดยกระบวนการทางกายภาพสามารถทำได้ โดยการไม่หรืออบส่วนต่าง ๆ ของพืชด้วยวิธีที่ต่างกัน จนได้ผลิตภัณฑ์แป้งที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยวิธีการไม่แป้งนับเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของแป้งได้แก่ สมบัติทางเคมีและกายภาพ และสมบัติทางความหนืดของแป้ง โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมไม่แป้งโดยวิธีไม่เปียก (wet-milling) และไม่แห้ง (dry-milling) (Liaotrakoon และ Liaotrakoon, 2019) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไม่เปียกจะเรียกว่า สตาร์ช และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไม่แห้งจะเรียกว่า ฟลาวร์

2.4.1 การไม่เปียก

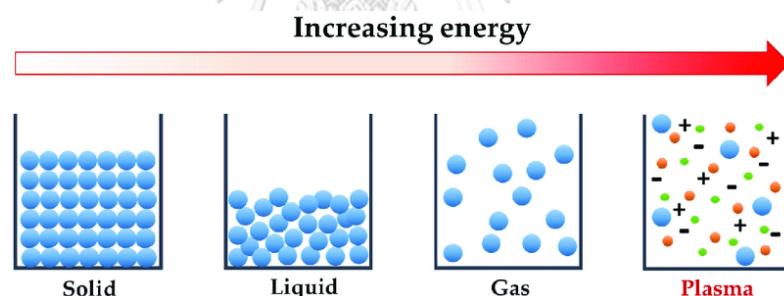
การไม่เปียกหรือไม่น้ำ เป็นการนำวัตถุดิบมาล้างสะอาดแล้วนำมาแช่น้ำ จากนั้นนำไปไม่ด้วยเครื่องไม่พร้อมก้านน้ำในปริมาณที่เหมาะสม และจึงนำสารละลายแขวนลอยของสตาร์ชเข้าเครื่องแยกน้ำออกจากตัวสตาร์ช แล้วนำสตาร์ชที่แยกได้ไปทำให้แห้ง และนำมาบดแล้วร่อนเพื่อให้ได้สตาร์ชที่มีเนื้อละเอียด และสม่ำเสมอ ซึ่งการไม่เปียกถือเป็นการสกัดสตาร์ชออกจากหัวมันโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย อย่างไรก็ตามการไม่เปียกมีข้อเสียคือทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากส่งผลต่อต้นทุนการผลิตและการกำจัดหรือบำบัดน้ำเสีย

2.4.2 การไม่แห้ง

การไม่แห้ง เป็นการนำวัสดุดิบมาทำให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านเครื่องร่อน โดยวิธีนี้ไม่มีการใช้น้ำในกระบวนการผลิต ทำให้ได้ฟลาวร์ที่มีลักษณะค่อนข้างหยาบ และมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ปนอยู่ด้วยส่งผลให้มีคุณค่าทางโภชนาการที่มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไม่เปียก

2.5 พลาสมา

พลาสมา คือ สภาวะที่อะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สเปลี่ยนเป็นไอออน ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีทั้งประจุบวกและลบในสัดส่วนที่ทำให้มีประจุสุทธิเป็นศูนย์ ทำให้พลาสมามีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยแก๊สที่ถูกไอออนไนซ์ประกอบด้วยอิเล็กตรอน ไอออน อะตอมที่สภาวะกระตุ้น และโฟตอน เป็นต้น การทำให้เกิดพลาสมาสามารถทำได้โดยกระบวนการดังนี้ การทำให้ร้อน (heating) การดึงชาร์จด้วยไฟฟ้า การเป็นไอออนด้วยรังสี (ionizing radiation) และการเป็นไอออนจากการชน (collisional ionization) พลาสมาถือเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร โดยหากทำการเพิ่มอุณหภูมิ หรือให้พลังงานจลน์แก่อนุภาคแก๊สไปเรื่อย ๆ จะทำให้เกิดพลาสมาของแก๊สนั้น ๆ ดังรูปที่ 2.3 นอกจากนี้พลาสมานับได้ว่าเป็นของไหลไฟฟ้า (conducting fluid)



รูปที่ 2.3 การเกิดพลาสมาโดยการให้พลังงานแก่วัตถุ โดยสถานะที่สี่ของสสารเรียกว่า “พลาสมา”
ที่มา: Hojnik และคณะ (2017)

2.5.1 ประเภทของพลาสมา (ธีรวรรณ, 2558)

สถานะพลาสมาแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ พลาสมาธรรมชาติ (natural plasma) และพลาสมาปฏิบัติการ (laboratory plasma) ซึ่งพลาสมาปฏิบัติการสามารถแบ่งออกเป็น พลาสมาฟิวชัน (fusion plasma) และแก๊สดิจชาร์จ (gas discharge) โดยพลาสมาที่ได้จากการการดึงชาร์จแก๊สด้วยไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ พลาสมาอุณหภูมิสูงหรือพลาสมาร้อน (hot/thermal plasma) และพลาสมาอุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (cold/non-thermal plasma)

โดยพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนสามารถแบ่งตามความดันของแก๊สที่ใช้ได้เป็น พลาสมาที่สูญญากาศ (vacuum plasma) และพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ (atmospheric plasma)

การเกิดพลาสมาจากการดิวซ์ด้วยไฟฟ้าทำได้โดยให้สนามไฟฟ้าความแรงสูงแก่แก๊สที่เป็นกลาง โดยถ้าพลังงานถูกส่งผ่านไปยังอิเล็กตรอนอิสระมากเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระชนกับอะตอมส่งผลให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม ซึ่งก็คือเกิดไอออนไนเซชัน (ionization) โดยกระบวนการนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว และจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้แก๊สแตกตัวกลายเป็นพลาสมา

2.5.1.1 พลาสมาร้อนหรือพลาสมาอุณหภูมิสูง (hot/thermal plasma)

พลาสมาร้อนหรือพลาสมาอุณหภูมิสูง เกิดจากการดิวซ์แก๊สแบบการปล่อยประจุในลักษณะอาร์คดิวซ์ (arc discharge) ซึ่งเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงจนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วนเกิดการแตกตัวอย่างรุนแรง กลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นสูง โดยอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สด้วยความถี่และรุนแรงสูง เกิดการปล่อยประจุในลักษณะของสปาร์ค (spark) ของประจุ เป็นเส้นเล็ก ๆ จำนวนมาก (filament) ทำให้เกิดสถานะของพลาสมาที่ความดันและพลังงานสูง ซึ่งพลาสมาร้อนจะถูกสร้างที่ความดันใกล้เคียงหรือมากกว่าความดันบรรยากาศ โดยพลาสมาที่ผลิตได้นิยมนำไปใช้ในการสเปรย์ หรือใช้ในการหลอม เชื่อม และตัดโลหะ

2.5.1.2 พลาสมาเย็นหรือพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (cold/non-thermal plasma)

พลาสมาเย็นหรือพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน เกิดจากการดิวซ์แก๊สแบบการปล่อยประจุในลักษณะโกลว์ดิวซ์ (glow discharge) โดยพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนเป็นการพัฒนามาจากการทำพลาสมาอุณหภูมิสูง โดยจะทำการลดความดันในการเกิดพลาสมาให้ต่ำลง และอุณหภูมิของอนุภาคหนักจะมีค่าต่ำและไม่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วอิเล็กโทรด จะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วบวกและขั้วลบที่สูงเพียงพอจนกระตุ้นให้แก๊สบางส่วนเกิดการแตกตัว กลายเป็นประจุบวกและอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และเคลื่อนที่ไปชนกับอะตอมหรือโมเลกุลของแก๊ส ทำให้เกิดการกระตุ้นและแตกตัวเป็นประจุ อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะปลดปล่อยรังสีออกมาและตกลงมาอยู่สถานะที่ต่ำลงมาทำให้เกิดแสงสว่าง นิยมใช้ในงานที่ไม่ต้องการให้เกิดความร้อน เช่น การกัดผิว (etching) การทำฟิล์มบาง (thin film) หรือในทางอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

2.5.2 กลไกการกำจัดสารพิษของพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนในตัวอย่างอาหาร

การใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนในการกำจัดสารพิษจากยาฆ่าแมลง จุลินทรีย์ หรือ สารพิษที่เกิดตามธรรมชาติของอาหารมีแนวโน้มว่าสามารถกำจัดสารพิษต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เป็นอันตรายหรือส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอาหาร

2.5.2.1 การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (Valsero และคณะ, 2013)

การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำโดยไซยาไนด์ที่ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร ในสารละลาย (0.025 โมลาร์ $\text{NaHCO}_3/\text{NaOH}$ buffer, pH 11) โดยใช้เทคโนโลยีพลาสมาแบบดิวอาร์จข้ามฉนวน และฮีเลียมเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99 เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 3 นาที โดยการดิวอาร์จแก๊สด้วยทำให้เกิดอนุมูลอิสระต่าง ๆ รวมถึงรังสียูวี มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการแยกหรือแทนที่พันธะสามที่เสถียรของไซยาไนด์ โดยไซยาไนด์ไอออน (CN^-) ทำปฏิกิริยากับ O_3 , $\cdot\text{OH}$ และ H_2O_2 ทำให้เกิดสารประกอบระหว่างปฏิกิริยา (intermediate compounds) เช่น OCN^- , NO_2^- , $\text{HO}=\text{C}=\text{N}$, $\text{O}=\text{C}=\text{NH}_2$ และ $\cdot\text{OOC}(\text{O})\text{NH}_2$ และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย ได้แก่ NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , N_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} และสารประกอบสบู่ (saponified compounds) ซึ่งมีความเป็นพิษต่ำ

ใช้เครื่องพลาสมาแบบดิวอาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge) ที่ความดันบรรยากาศในการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำนับเป็นวิธีการที่ไม่มีการใช้สารเคมี ต้นทุนต่ำ และสามารถนำน้ำไปใช้ซ้ำได้ โดยผลของการดิวอาร์จทางไฟฟ้า การเกิดอนุมูล และการเกิดรังสียูวี ทำให้สามารถแยกหรือแทนที่พันธะสามที่เสถียรของไซยาไนด์ได้ ($\text{C}\equiv\text{N}$) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของพลาสมาจะลดลงเมื่อสารละลายที่นำมาใช้ทดสอบมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มากขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดปรากฏการณ์บดบังหรือแข่งขันการเกิดปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ที่พลาสมาสร้างขึ้น ทั้งนี้ข้อจำกัดหลังของการใช้พลาสมาคือแก๊สที่ใช้ ดังนั้นจึงควรมีการเลือกใช้แก๊สที่สามารถใช้ซ้ำได้ หรือมีราคาที่ถูกลง เช่น O_2 และ O_3

2.5.2.2 การกำจัดยาฆ่าแมลงในน้ำโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (Sarangapani และคณะ, 2016)

การกำจัดยาฆ่าแมลงในน้ำโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้พลาสมาแบบดิวอาร์จข้ามฉนวน การระบุมะเลกุลของไนโตรเจนที่ถูกกระตุ้น (excited nitrogen) อนุมูลของออกซิเจน (reactive oxygen species, ROS) และอนุมูลไฮดรอกซิล ภายในเตาปฏิกรณ์พลาสมา ทำได้โดยใช้ optical emission spectroscopy (OES) การทดลองทำโดยแปร

ระดับความต่างศักย์ ได้แก่ 60, 70 และ 80 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 0 (ตัวอย่างควบคุม), 2, 4, 6 และ 8 นาที พบว่าประสิทธิภาพการสลายยาฆ่าแมลงสูงสุดที่ 80 กิโลโวลต์ 8 นาทีพบว่าสามารถกำจัดไดคลออร์วอส (dichlorvos) ได้ร้อยละ 78.98 ± 0.81 มาลาไทออน (malathion) ร้อยละ 69.62 ± 00.14 และเอนโดซัลแฟน (endosulfan) ร้อยละ 57.71 ± 0.58 ปฏิกริยาการสลายยาฆ่าแมลงเป็นไปตามจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และในการวิเคราะห์สารด้วย GC-MS พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายสารนั้นมีความเป็นพิษที่ต่ำลง

ทั้งนี้การสลายยาฆ่าแมลงนับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเนื่องจากการผลิตและการใช้ข้อมูลของออกซิเจนและไนโตรเจนในการสลายยาฆ่าแมลง ซึ่งความหนาแน่นของดีซาร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ ส่งผลให้เกิดอนุมูลเพิ่มมากขึ้น นอกจากไอโซนที่เกิดขึ้นจากพลาสมา ยังเกิดอนุมูลอื่น ๆ เช่น O , $\bullet OH$, $N\bullet$, $HO_2\bullet$, N_2^* , N^* , OH^- , O_2^- , O^- , O_2^+ , N_2^+ , N^+ และ O^+ โดยที่ความต่างศักย์ต่ำ การแยกโมเลกุลของยาฆ่าแมลงจะเกิดจากการชนกันของอิเล็กตรอน และ ไอออนไนเซชันเล็กน้อย ทำให้มีอัตราการเกิดอนุมูลที่ต่ำ แต่เมื่อให้ความต่างศักย์สูง ทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงขึ้นเกิดปฏิกิริยาการแยกเพื่อให้เกิดอนุมูล และสารที่ไม่เสถียรเพิ่มขึ้น

ไอโซนและอนุมูลไฮดรอกซิลเป็นสปีชีส์หลักที่ใช้ในการสลายยาฆ่าแมลง โดยกลไกการสลายยาฆ่าแมลงด้วยไอโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้โดยตรง หรือจากปฏิกิริยาลูกโซ่ที่ทำให้เกิดเพอร์ออกไซด์หรืออนุมูลไฮดรอกซิลแล้วไปออกซิไดซ์ยาฆ่าแมลง โดยปฏิกิริยาโดยตรงจะเกิดได้ที่พีเอชต่ำ ในขณะที่ปฏิกิริยาทางอ้อมจะเกิดที่พีเอชสูง โดยที่พีเอชต่ำการละลายของไอโซนและไฮดรเจนเพอร์ออกไซด์จะเกิดขึ้นช้า แต่ที่พีเอชสูงการละลายจะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาทางอ้อมเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ไอโซนทำหน้าที่แยกพันธะคู่ และทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารประกอบเช่น $-OH$, $-CH_3$, $-OCH_3$ และ $-NH_2$ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยปฏิกิริยาเหล่านี้มักเกิดในระหว่างการทำและหลังการทำพลาสมา

พฤติกรรมของการสลายยาฆ่าแมลงทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกันเนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน โดยไดคลออร์วอสและมาลาไทออนเป็นยาฆ่าแมลงกลุ่มออร์กาโนฟอสฟอรัส แต่เอนโดซัลแฟนอยู่ในกลุ่มออร์กาโนคลอรีน โดยโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันส่งผลให้มีความสามารถในการทนต่อการสลายตัวต่างกัน ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการสลายไดคลออร์วอสและมาลาไทออนสูงกว่าเอนโดซัลแฟนเนื่องจากมีพลังงานพันธะและค่า อิเล็กโตรเนกาติวิตีที่แตกต่างกัน พลังงานพันธะที่ต่ำกว่าของไดคลออร์วอส (P—O) และมาลาไทออน (P—S) ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงกว่าสารที่มีพลังงานพันธะสูงอย่างเอนโดซัลแฟน (S=O) นอกจากนี้การมีหมู่คลอรีนในโครงสร้างของเอนโดซัลแฟนนับเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการสลายต่ำ

ทั้งนี้พารามิเตอร์ เช่น ปริมาตรตัวอย่าง ดิจซาร์จแก๊ส ความกว้างระหว่างอิเล็กโทรด โครงสร้างทางเคมีและความหนืดของตัวอย่างยังส่งผลต่ออัตราการสลาย

2.5.2.3 การกำจัดยาฆ่าแมลงในบลูเบอร์รี่โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (Sarangapani และคณะ, 2017)

ศึกษาประสิทธิภาพการสลายสารตกค้างทางการเกษตรของบลูเบอร์รี่โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ ทำการทดลองโดยแปรความต่างศักย์ ได้แก่ 60 และ 80 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 0, 2 และ 5 นาที พบว่าประสิทธิภาพการสลายยาฆ่าแมลงสูงสุดเกิดที่ความต่างศักย์ 80 กิโลโวลต์ 5 นาที สามารถกำจัดบอสคาลิด (boscalid) ได้ร้อยละ 80.18 และอิมิดาโคลพริด (imidacloprid) ร้อยละ 75.62 ทำการวัดผลทางด้านคุณภาพของบลูเบอร์รี่ พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ 1 นาทีของการทำพลาสมาพารามิเตอร์ทางกายภาพ เช่น ค่าสี ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความแน่นเนื้อของบลูเบอร์รี่มีการลดลง

พลาสมาสปีชีส์ (O_3 , $\cdot OH$ และ H_2O_2) จะเกิดปฏิกิริยาแบบเลือกเฉพาะกับหมู่ฟังก์ชันบนโมเลกุลของยา ฆ่าแมลง ในขณะที่อนุมูลไฮดรอกซิลสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับทุกหมู่ โดยในงานวิจัยนี้การสลายบอสคาลิดเกิดจากการเข้าทำปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิลที่ไฮโดรเจนในวงเบนซีนและไพริมิดีน ทำให้เกิดสารกลุ่มไฮดรอกซีเลท (hydroxylated product) และกรดคาร์บอกซิลิก ในการสลายอิมิดาโคลพริดเกิดจากปฏิกิริยาของอนุมูลไฮดรอกซิลทำให้เกิด 6-คลอโรนิโคตินิก แอลดีไฮด์ (6-chloronicotinic aldehyde) และกรด 6-คลอโรนิโคตินิก (6-chloronicotinic acid)

การวัดผลของพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนต่อลักษณะปรากฏ พื้นผิว สี ความแน่นเนื้อ และของแข็งที่ละลายได้ในบลูเบอร์รี่ ทำการวิเคราะห์หลังเก็บรักษา 24 ชั่วโมง พบว่าความแน่นเนื้อของบลูเบอร์รี่ลดลง ซึ่งการลดลงของค่าความแน่นเนื้อเกิดจากพื้นผิวที่นุ่มขึ้นหรือเกิดจากความเสียหายที่บริเวณเซลล์ที่ผิวเนื่องจากการทำลายโครงสร้างภายในของพลาสมา นอกจากนี้ยังมีผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นระหว่างการทำพลาสมา

2.5.2.4 การกำจัดยาฆ่าแมลงในมะม่วงโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน (Phan และคณะ, 2018)

ผลของการใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนในการกำจัดยาฆ่าแมลงต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยแปรอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน (2, 4 และ 8 ลิตร/นาที) และเวลาที่ใช้ (5 และ 10 นาที) ในการสลายคลอร์ไพริฟอส (chlorpyrifos) และไซเพอร์เมทริน (cypermethrin) โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนแบบโกลดิ้งอาร์ค (gliding arc, GA) พบว่า

อัตราการไหลของอาร์กอนที่ 5 ลิตร/นาที่ เป็นเวลา 5 นาที สามารถลดความเข้มข้นของยาฆ่าแมลงได้สูงสุด (คลอรีนไฟรฟอสฟอรัสร้อยละ 74.0 และไซเพอร์เมทรินร้อยละ 62.9) ซึ่งอนุมูลที่ทำหน้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับยาฆ่าแมลงเป็นหลัก คือ ออกซิเจนอะตอม และอนุมูลไฮดรอกซิล โดยพบว่าปริมาณกรดทั้งหมดและปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดมีการลดลง แต่มีปริมาณแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด สี และพารามิเตอร์ทางเนื้อสัมผัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

ที่ระดับอัตราการไหลสูงจะช่วยให้เกิดการเคลื่อนย้ายของไอน้ำผ่านเข้าสู่ระบบพลาสมาได้ดี เพื่อให้เกิดพลาสมาได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามที่อัตราการไหลสูงกว่า 5 ลิตร/นาที่ ทำให้การทำอันตรกิริยากันระหว่างไอน้ำและดีซาร์จเกิดขึ้นน้อยลง เนื่องจากว่าไอน้ำมีการเคลื่อนที่ออกจากระบบเร็วเกินไป

ในการเกิดพลาสมาจะเกิดจากไอน้ำที่อยู่ในเฟสแก๊ส โดยเมื่อโมเลกุลของน้ำสัมผัสกับพลาสมาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแยกโมเลกุลของน้ำโดยอิเล็กตรอน และอัตราการเกิดปฏิกิริยารับกับปริมาณน้ำ พลังงานของอิเล็กตรอนและการชน โดยทั่วไปการชนระหว่างอิเล็กตรอนและโมเลกุลน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหล โดยผลที่กระทบต่ออิเล็กตรอนคือการกระตุ้นและการไอออนไนเซชันของอะตอมและโมเลกุลในดีซาร์จ

2.5.2.5 ประสิทธิภาพของพลาสมาแบบดีซาร์จข้ามฉนวนที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศต่อการลดปริมาณสารพิษที่ทูทอกซิน และเอชทีทูทอกซิน ในฟลาร์ข้าวโอ๊ต (Kis และคณะ, 2020)

ศึกษาการกำจัดสารพิษที่ทูและเอชทีทูในฟลาร์ข้าวโอ๊ต โดยแปรชนิดของแก๊สที่ใช้ในพลาสมา ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน อากาศ และอาร์กอน และเวลาที่ใช้ ได้แก่ 10, 20 และ 30 นาที โดยพบว่าการใช้แก๊สไนโตรเจนสามารถกำจัดสารพิษได้สูงสุด โดยกำจัดที่ทูทอกซินได้ร้อยละ 43.25 และ เอชทีทูทอกซินร้อยละ 38.54

การเกิดอนุมูลระหว่างการทำพลาสมาเป็นผลมาจากชนิดของแก๊สและความชื้นสัมพัทธ์ โดยความชื้นในตัวอย่างมีผลต่อพลาสมาที่ใช้ ออกซิเจนเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาตั้งแต่เริ่มให้สนามไฟฟ้า โดยความชื้นจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของการดีซาร์จลดลง โดยเป็นการป้องกันการแยกโมเลกุลออกซิเจน ทั้งนี้ ออกซิเจนอะตอมนับเป็นสารหลักที่ทำให้เกิดการแยกโมเลกุลของน้ำเพื่อให้เกิดไฮดรเจนอะตอมที่ถูกกระตุ้น นอกจากนี้อิเล็กตรอนยังสามารถแยกโมเลกุลของน้ำได้

ผลของพลาสมาต่อประสิทธิภาพในการกำจัดที่ทูและเอชทีทูทอกซินโดยใช้พลาสมาที่ความดันต่ำในฟลาร์ข้าวโอ๊ต พบว่าขึ้นกับชนิดของแก๊สที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา โดย

การลดลงของทีทูและเอชทีทูทอกซินโดยใช้แก๊สที่แตกต่างกัน 4 ชนิด และเวลาในช่วง 10 ถึง 30 นาที พบว่าแก๊สทั้ง 4 ชนิด ส่งผลต่อการสลายทีทูทอกซินอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยทีทูทอกซินมีการลดลงสูงสุดเมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาเป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้อัตราการสลายเอชทีทูน้อยกว่าทีทูทอกซินในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากการเปลี่ยนทีทูให้กลายเป็นเอชทีทูทอกซินเกิดขึ้นตลอดเวลา

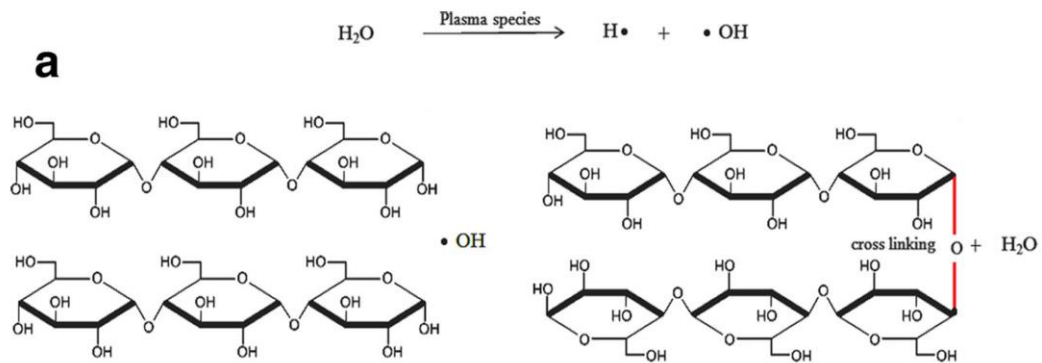
การสลายสารพิษจากเชื้อราโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของตัวอย่าง ธรรมชาติของเคมีพลาสมา และการเกิดอนุมูลที่ทำอันตรกิริยากับโมเลกุลสารพิษของเชื้อรา นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการสลายสารพิษยังขึ้นกับเมทริกซ์ของสารพิษ โดยการมีเมทริกซ์จะลดอัตราการสลายสารพิษได้

2.5.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของฟลัวร์หรือสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสมา (Thirumdas และคณะ, 2017)

กลไกการเกิดอันตรกิริยาระหว่างฟลัวร์หรือสตาร์ชกับพลาสมาสปีชีส์สามารถเกิดได้ 3 แบบ ได้แก่ การเชื่อมข้าม (cross linking) ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) และการกัดผิว (etching) โดยการเกิดกลไกที่แตกต่างกันนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่ผิวของวัตถุแตกต่างกัน โดยกลไกทั้ง 3 แบบขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา และเวลาที่ให้พลาสมา

2.5.3.1 การเชื่อมข้าม (cross linking)

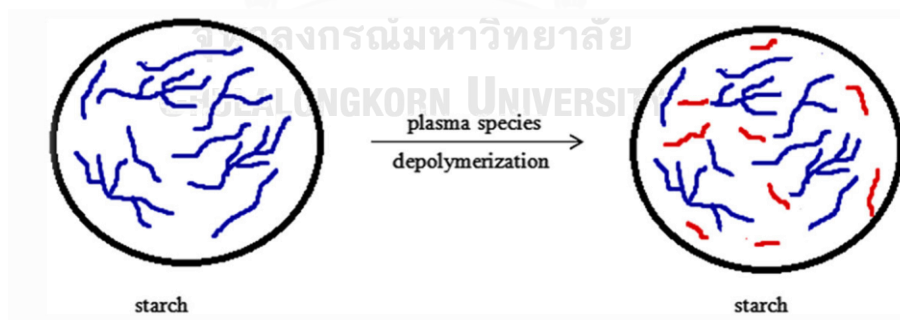
การเกิดพลาสมาทำให้มีอนุมูลอิสระและอิเล็กตรอนที่อยู่สภาวะกระตุ้นเกิดขึ้น ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมข้ามภายในสายพอลิเมอร์ของสตาร์ชได้ โดยจะเกิดการแยกระหว่างปลายรีดิวซ์ของสายพอลิเมอร์สองสาย (C-OH) และเกิด C-O-C linkage ระหว่างสายพอลิเมอร์ทั้งสอง และปลดปล่อยโมเลกุลน้ำออกมา ดังรูปที่ 2.4 โมเลกุลน้ำที่หลุดออกมาจะถูกสลายไปเป็นอนุมูลอิสระ ไฮดรอกซิล (*OH) ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถแยกพันธะไกลโคซิดิกได้เช่นกัน การเกิดการเชื่อมข้ามขึ้นกับชนิดของแก๊สที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเกิดพลาสมา



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดการเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสมา
ที่มา: Thirumdas และคณะ (2017)

2.5.3.2 ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization)

ไอออนที่เกิดการระเบิดที่สภาวะกระตุ้นของพลาสมาทำให้เกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินในโมเลกุลสตาร์ช ทำให้เกิดการแตกออกเป็นสายโซ่ที่สั้นลง โดยเมื่อเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ เช่น มอลโทส (maltose) มอลโทไตรโอส (maltotriose) มอลโทเตตราโอส (maltotetraose) กรดฟอร์มิก (formic acid) และฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) เป็นต้น โดยการเกิดกรดฟอร์มิกแสดงให้เห็นว่าสายแอมิโลเพกตินในโมเลกุลของสตาร์ชถูกทำลายจากการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน การเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันขึ้นกับพลาสมาสปีชีส์ อนุภาคลิสระที่ที่เกิดขึ้น ความเข้มข้นของไอออน ธรรมชาติและลักษณะสัญญาณของสตาร์ช

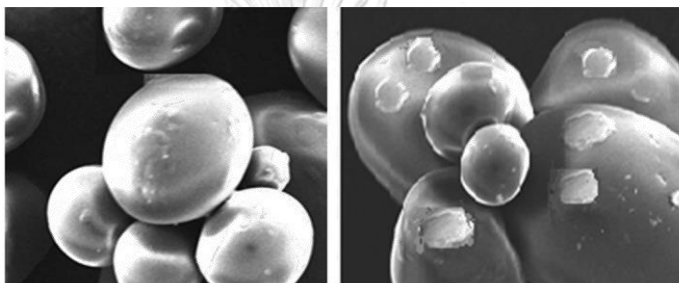


รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันของโมเลกุลสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสมา
ที่มา: Thirumdas และคณะ (2017)

2.5.3.3 การกัดผิว (etching)

การกัดผิวจากอนุภาคลิสระที่ที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดพลาสมาสามารถเกิดได้ทั้งจากกระบวนการสปัตเตอริง (sputtering) ซึ่งเป็นการปล่อยให้ผิวหน้าของของแข็งถูกระดมยิงด้วย

อนุภาคที่มีพลังงานจลน์จนอะตอมที่ผิวของของแข็งหลุดออกเนื่องจากการชนระหว่างสสารและอนุภาคพลังงาน และจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยการกัดผิวของพลาสติกสามารถเพิ่มสมบัติเชิงหน้าที่ของสารตั้งต้นที่อยู่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชได้ ซึ่งการกัดผิวทำให้พลังงานของสารตั้งต้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและเป็นการเพิ่มความชอบน้ำ (hydrophilicity) ให้แก่ตัวอย่าง ประสิทธิภาพของการกัดผิวขึ้นกับความหนาแน่นของพลาสติกและพลังงานของไอออนที่เกิดการชนกับสารตั้งต้นที่ผิว โดยประโยชน์สำคัญของการกัดผิวคือสามารถทำให้โมเลกุลที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเคลื่อนที่มาที่ผิวได้ง่ายขึ้น ซึ่งพื้นผิวที่ถูกกัดจะทำให้น้ำสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้ง่ายขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงหน้าที่ และวิทยาการระสของสตาร์ช



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดการกัดผิวของโมเลกุลสตาร์ชเมื่อได้รับพลาสติกพลาสติก
ที่มา: Thirumdas และคณะ (2017)

2.6 การเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของสาร (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2559)

จลนศาสตร์เคมี (chemical kinetics) คือ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีคือการที่สารตั้งต้นเปลี่ยนไปเป็นสารใหม่หรือสารผลิตภัณฑ์ โดยปริมาณหรือความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลง แต่ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น

2.6.1 อันดับปฏิกิริยา

อันดับปฏิกิริยาเป็นเลขที่บ่งบอกถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นหรือไม่ และเป็นจำนวนที่เท่าของความเข้มข้น

2.6.1.1 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์

ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (zero-order reaction) หมายถึงปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่เสมอ ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 3.3 โดยมีค่า n เท่ากับ 0 จะทำให้ได้สมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์แสดงดังสมการที่ 3.4

2.6.1.2 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (first-order reaction) หมายถึงปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 3.3 โดยมีค่า n เท่ากับ 1 จะทำให้ได้สมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์แสดงดังสมการที่ 3.5

2.6.1.3 ปฏิกิริยาอันดับสอง

ปฏิกิริยาอันดับสอง (second-order reaction) หมายถึงปฏิกิริยาที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง หรือขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นสองชนิด แต่ละชนิดยกกำลังหนึ่ง เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 3.3 โดยมีค่า n เท่ากับ 2 จะทำให้ได้สมการปฏิกิริยาอันดับศูนย์แสดงดังสมการที่ 3.6

$$-\frac{d[\text{HCN}]}{dt} = k[\text{HCN}]^n \quad (3.1)$$

$$\frac{d[\text{HCN}]}{[\text{HCN}]^n} = -k dt \quad (3.2)$$

$$\int_{[\text{HCN}]_0}^{[\text{HCN}]} \frac{d[\text{HCN}]}{[\text{HCN}]^n} = -k \int_0^t dt \quad (3.3)$$

$$[\text{HCN}]_0 - [\text{HCN}] = kt \quad (3.4)$$

$$\ln [\text{HCN}] - \ln [\text{HCN}]_0 = -kt \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{[\text{HCN}]_0} - \frac{1}{[\text{HCN}]} = -kt \quad (3.6)$$

เมื่อ $[\text{HCN}]$ คือ ความเข้มข้นไฮโดรเจนไซยาไนด์
 n คือ อันดับของปฏิกิริยา
 k คือ ค่าคงที่อัตรา ($\text{ppm} \cdot \text{min}^{-1}$)

เมื่อเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 0 และ 1

ถ้าค่า k มีค่าเป็นบวก หมายความว่า ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์สูงขึ้น

ถ้าค่า k มีค่าเป็นลบ หมายความว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนไซยาไนด์ลดลง

เมื่อเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2

ถ้าค่า k มีค่าเป็นบวก หมายความว่า ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไซยาไนด์ลดลง

ถ้าค่า k มีค่าเป็นลบ หมายความว่า ความเข้มข้นไฮโดรเจนไซยาไนด์สูงขึ้น

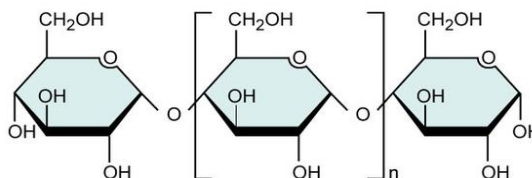
2.7 การตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของฟลาวาร์หรือสตาร์ช

2.7.1 สมบัติทางเคมี

ฟลาวาร์หรือสตาร์ชมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 อนุพันธ์ของฟลาวาร์เกิดจากการรวมกันของกลูโคสเป็นพอลิเมอร์สายยาว โดยมีหน่วยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ภายในเม็ดสตาร์ช โดยประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ แอมิโลส และแอมิโลเพกติน โดยสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินแตกต่างกัน ส่งผลให้รูปร่างของเม็ดสตาร์ชและคุณสมบัติของสตาร์ชมีความแตกต่างกัน (สุทธิณี, 2563) โดยทั่วไปสตาร์ชมันสำปะหลังมักมีแอมิโลสประมาณร้อยละ 20-30 และแอมิโลเพกตินร้อยละ 70-80

แอมิโลส เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่มีการจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง โดยมีกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ชนิด α -(1,4) ดังในรูปที่ 2.7 โดยแอมิโลสเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก มีความยืดหยุ่นและสามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งการมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากทำให้แอมิโลสสามารถจับกับโมเลกุลชนิดอื่นได้ด้วยพันธะไฮโดรเจน เช่น แอมิโลสจับกับแอมิโลเพกตินเป็นเกลียวคู่ (double helices) หรือเกลียวเดี่ยว (single helices) ทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายสามมิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง นอกจากนี้แอมิโลสยังสามารถจับกับไขมันเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose-lipid complex) ที่มีความเสถียร โดยการทำลายสารประกอบเชิงซ้อนนี้ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส แอมิโลสและแอมิโลเพกตินมีสมบัติไม่ละลายน้ำ หรืออาจจะกล่าวโดยรวมว่าสตาร์ชไม่ละลายน้ำ แต่สามารถอุ้มน้ำได้โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่สามารถอุ้มน้ำได้อย่างจำกัด จนเมื่อมีการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาตินเซชัน น้ำและความร้อนจะเป็นปัจจัยเสริมกันในการทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ช จึงทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระเพิ่มมากขึ้นภายในโมเลกุลสตาร์ช ทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้มากขึ้น สตาร์ชจึงพองตัวมากขึ้นและสามารถอุ้มน้ำได้ หลังจากเกิดเจลลาตินเซชันแล้วเมื่อปล่อยให้อุณหภูมิของสตาร์ชเย็นตัวลงจะเกิดปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินจัดเรียงตัวใหม่ โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันจึงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดการจัดเรียงตัวใหม่เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติที่สามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้ และหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเป็นเวลานานพอ

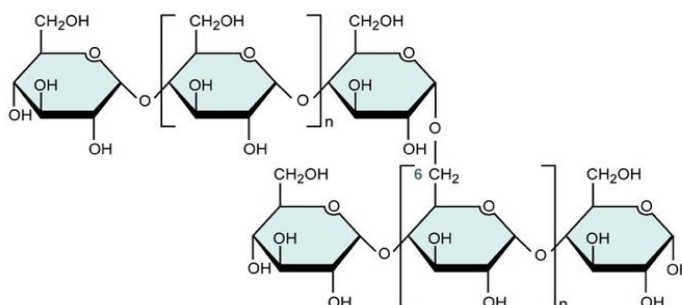
โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกตินสามารถจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบมากขึ้นจนเกิดโครงสร้างผลึกใหม่ได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลส

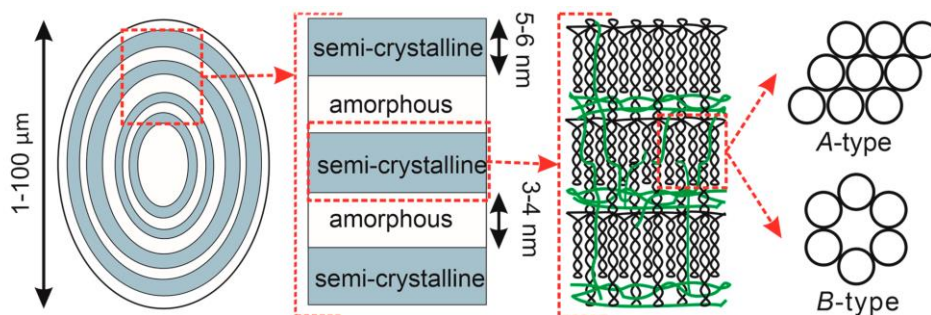
ที่มา: Rahman และคณะ (ไม่ปรากฏ)

โดยทั่วไปสตาร์ชมีปริมาณแอมิโลเพกตินประมาณร้อยละ 70-100 โดยแอมิโลเพกเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่จัดเรียงตัวเป็นสายตรงและกิ่ง โดยมีกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ชนิด α -(1,4) และ α -(1,6) ดังในรูปที่ 2.8 แอมิโลเพกตินจัดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าแอมิโลสถึง 1,000 เท่า เนื่องจากการมีขนาดที่ใหญ่กว่าและมีกิ่งก้านที่มากกว่าทำให้มีอัตราการคืบตัวต่ำ นอกจากนี้แอมิโลเพกตินยังสามารถเกิดเกลียวคู่โดยใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน กิ่งแอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเกิดผลึกได้ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่ม (cluster) เดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นแอมิโลเพกตินจึงมีความสำคัญกว่าแอมิโลสในด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ โดยแอมิโลเพกตินอย่างเดียวสามารถรวมตัวกันทำให้เกิดโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งรวมตัวเป็นเม็ดสตาร์ชได้ ส่วนแอมิโลสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดส่วนที่เป็นผลึกได้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของแอมิโลเพกติน

ที่มา: Rahman และคณะ (ไม่ปรากฏ)



รูปที่ 2.9 แบบจำลองโครงสร้างของสตาร์ช; โครงสร้างเกลียวคู่และกิ่งก้านของแอมิโลเพกตินแสดงเป็นเส้นสีดำ; โครงสร้างสายตรงของแอมิโลสแสดงเป็นเส้นสีเขียว; และวงกลมหมายถึงโครงสร้างเกลียวคู่ในโครงสร้างผลึกแบบ A หรือ B
ที่มา: Dome และคณะ (2020)

ภายในเม็ดสตาร์ชยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติที่สำคัญของสตาร์ช และมีปริมาณแตกต่างกันในสตาร์ชแต่ละชนิด ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เกล็ด และฟอสฟอรัส เป็นต้น

ไขมัน เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณในสตาร์ชต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยพบบริเวณพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชและกระจายอยู่ในเม็ดสตาร์ช ซึ่งไขมันบริเวณที่ผิวของเม็ดสตาร์ชมักอยู่ในกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) กลูโคลิพิด (glucolipid) และฟอสโฟลิพิด (phospholipid) สำหรับไขมันภายในเม็ดสตาร์ชจะเชื่อมต่อกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวม ๆ โดยสมบัติของไขมันภายในเม็ดสตาร์ชจะช่วยลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการดูดน้ำของสตาร์ช ส่วนไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่บริเวณพื้นผิวเม็ดสตาร์ชมักเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดกลิ่นหืน

โปรตีน เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณในสตาร์ชต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยพบบริเวณพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีประจุที่พื้นผิว ซึ่งมีส่งผลต่อการพองตัว การดูดน้ำ การกระจายของเม็ดสตาร์ช และอัตราการเกิดเจลลาติไนเซชัน ซึ่งโปรตีนในเม็ดสตาร์ชทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิงส์ (reducing sugar) ทำให้เกิดปฏิกิริยามอลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งมีผลต่อสีและกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์

เถ้า เป็นส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ในสตาร์ช ได้แก่ โซเดียม แมกนีเซียม แคลเซียม และโพแทสเซียม

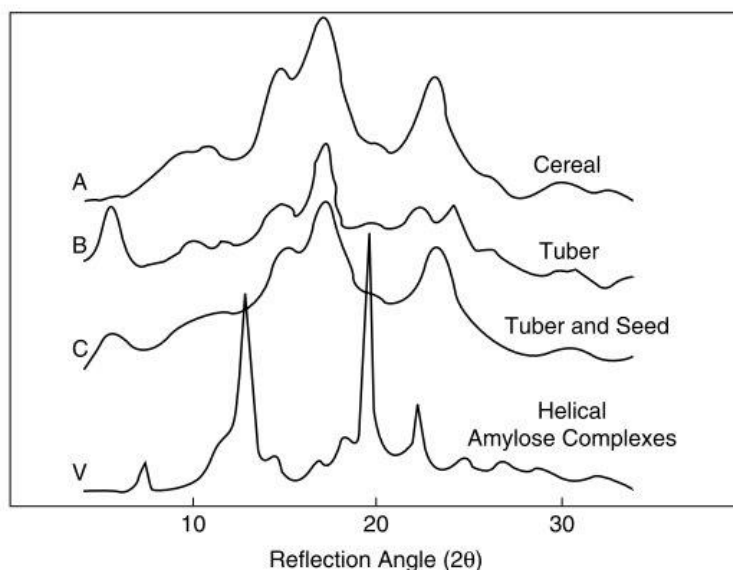
ฟอสฟอรัส เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณในสตาร์ชต่ำกว่าร้อยละ 0.1 โดยอยู่ในรูปของฟอสเฟตที่เชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส ฟอสฟอรัสทำให้พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชมีประจุลบ โดยแรงผลักระหว่างประจุลบทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวง่ายและมีความหนืดสูง

2.7.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

2.7.2.1 ลักษณะของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชส่วนใหญ่มีสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่ละลายในน้ำเย็น มีขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันไปตามชนิดของสตาร์ช การตรวจสอบลักษณะของเม็ดสตาร์ชโดยใช้กล้องจุลทรรศน์เป็นวิธีที่รวดเร็วและง่ายที่สุด สามารถตรวจสอบลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ รูปร่าง ขนาด การกระจายของขนาดเม็ดสตาร์ช และลักษณะไฮลัม (hilum) รวมทั้งตรวจสอบความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่สภาวะต่าง ๆ และการปนเปื้อนของสตาร์ชอีกชนิดหนึ่งได้ การตรวจสอบลักษณะเม็ดสตาร์ชโดยใช้กล้องจุลทรรศน์สามารถทำได้ทั้งภายใต้แสงปกติ (normal light) และภายใต้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ยังมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถดูโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้เนื่องจากมีการมีกำลังขยายที่ไม่เพียงพอ การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) สามารถตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้อย่างละเอียด เนื่องจากมีกำลังขยายที่มากกว่าหลายเท่า สามารถดูพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชได้ว่ามีรอยแตกหรือรอยร้าว

โครงสร้างสตาร์ชมีลักษณะเป็นโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline) โดยโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินในเม็ดสตาร์ชสามารถจัดเรียงตัวกัน ทำให้เกิดโครงสร้าง 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) และส่วนอสัณฐาน (amorphous region) สามารถตรวจสอบโครงสร้างผลึกเม็ดสตาร์ชด้วยวิธี Wide angle x-ray diffraction ได้ โดยสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันจะให้รูปแบบของรังสีเอกซ์ที่ต่างกัน ซึ่งสตาร์ชโดยทั่วไปสามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้เป็น 4 แบบ ได้แก่ ผลึกแบบ A เป็นการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแบบหนาแน่นมาก มีน้ำ 8 โมเลกุลในโครงสร้าง พบในสตาร์ชจากธัญพืช ผลึกแบบ B มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างอย่างหลวม มีน้ำ 36 โมเลกุล พบในสตาร์ชจากพืชหัว ผลึกแบบ C มีการจัดเรียงตัวสมระหว่างผลึกแบบ A และ B พบได้ในสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว และผลึกแบบ V เกิดจากแอมิโลสรวมตัวกับองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น แอมิโลสรวมตัวกับไขมัน (amylose-lipid complex) เกิดโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช ทำให้สตาร์ชพองตัวได้ช้า โดยสามารถดูรูปแบบผลึกของสตาร์ชได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A, B, C และ V
ที่มา: Oyeyinka และคณะ (2017)

2.7.2.2 กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility)

แอมิโลสและแอมิโลเพกตินจะเรียงตัวขนานกันตามแนวรัศมีภายในเม็ดสตาร์ช และแต่ละสายจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสของแต่ละสายที่อยู่ใกล้กัน ทำให้มีลักษณะคล้ายร่างแห ดังนั้นสตาร์ชดิบจะไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อยที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน โดยทั่วไปสตาร์ชสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ประมาณร้อยละ 20-30 และพองตัวได้น้อยมากจนไม่สามารถสังเกตได้ เมื่อสารละลายสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันในสภาวะที่มีน้ำเพียงพอและมีการกวนตลอดเวลา จะเกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นให้แก่เม็ดสตาร์ช ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย ส่งผลให้สายของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน คลายออกจากกัน หมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคสแต่ละสายเป็นอิสระ โมเลกุลของน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยาด้วยได้ เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำตลอดเวลาเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเป็นหลายเท่าของขนาดเดิม และแอมิโลสจะเกิดการหลุดออกมาละลายในน้ำที่อยู่บริเวณรอบเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้การละลาย ความหนืด และความใสของสารละลายสตาร์ชเพิ่มขึ้น และไบรีฟรินเจนซ์ (birefringence) ของสตาร์ชหายไปเนื่องจากชั้นผลึกถูกทำลาย กำลังการพองตัวของสตาร์ชจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ส่วนความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่แยกออกด้วยการปั่นเหวี่ยง นอกจากนี้ยังพบว่า การละลายและพองตัวมีความสัมพันธ์กัน โดยทั่วไป

พบว่าเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น จะเกิดรอยแตกบนเม็ดสตาร์ชทำให้แอมิโลสหลุดออกมานอกเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้การละลายสูงขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและการละลายของสตาร์ช คือ ชนิดของสตาร์ช ขนาดของสตาร์ช ปริมาณน้ำในสารละลายสตาร์ช สิ่งเจือปนภายในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต และความแข็งแรงของโครงสร้างและลักษณะของร่างแหภายในสตาร์ช เช่น อัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน จำนวนกิ่งก้านสาขา รวมถึงการจัดเรียงตัวและความยาวของสาขาในแอมิโลเพกติน โดยสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูง โครงสร้างร่างแหภายในเม็ดสตาร์ชจะมีความแข็งแรงมาก ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อย ในสตาร์ชจากรากหรือกลางลำต้น เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง อุดมหมู่โมโนแซ็กคาไรด์ในซึ่ต่ำกว่าสตาร์ชจากธัญพืช ทำให้มีการพองตัวและการละลายที่ดีกว่า และสตาร์ชจากส่วนหัว เช่น สตาร์ชมันฝรั่ง มีการพองตัวของเม็ดสตาร์ชดีที่สุด เนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ และมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหมู่ฟอสเฟตที่ทำให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำ

2.7.2.3 ความหนืด

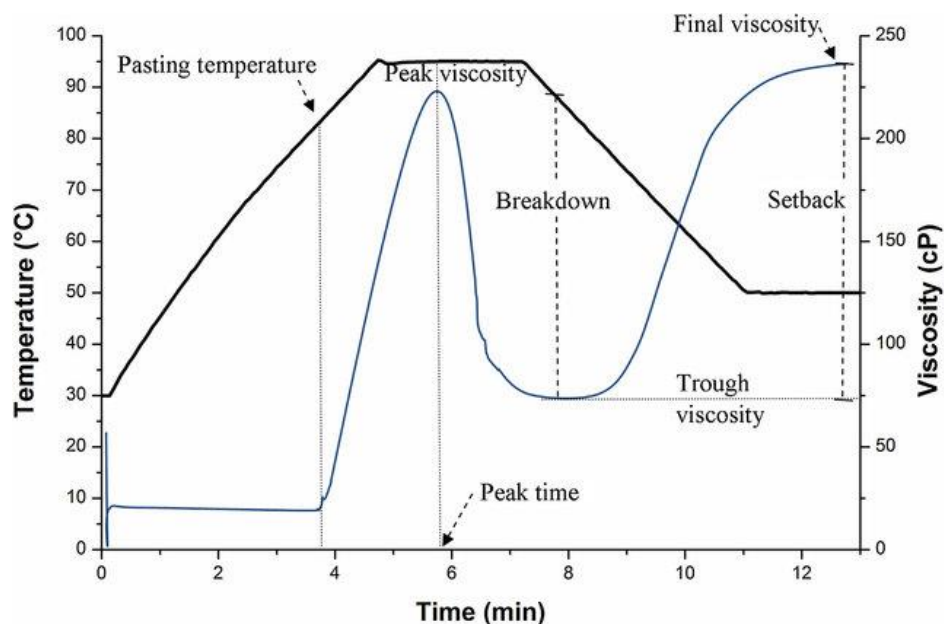
โดยทั่วไปสตาร์ชจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส แต่จะดูดซึมน้ำได้อย่างจำกัดและพองตัวได้เล็กน้อย การพองตัวของเม็ดสตาร์ชในช่วงแรกสามารถผันกลับได้โดยการทำให้แห้ง ความหนืดของสตาร์ชเกิดจากการนำสารละลายแขวนลอยของฟลาวร์ไปให้ความร้อน เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำได้มากขึ้น และพองตัวจนมีขนาดใหญ่ขึ้น จนถึงอุณหภูมิจุดหนึ่ง สตาร์ชจะเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งอยู่ในสภาวะที่ผันกลับไม่ได้ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting temperature) ซึ่งเรียกว่าเกิดเจลลาติไนเซชัน ซึ่งในขั้นนี้เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสูญเสียไปรีพรีนเจนซ์ เม็ดสตาร์ชจึงเริ่มเกิดความหนืด ต่อจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้ดีขึ้น ปริมาณน้ำอิสระรอบเม็ดสตาร์ชจะลดน้อยลง ทำให้เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) คือจุดที่เม็ดสตาร์ชพองตัวเต็มที่ ขณะที่อุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นอีกโดยมีแรงกวนอย่างสม่ำเสมอทำให้แอมิโลสและแอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชแตกออกจนมีความหนืดลดลง ต่อมาเมื่ออุณหภูมิลดลงจึงเกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ของโมเลกุลแอมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เรียกกระบวนการนี้ว่า รีโทรเกรเดชัน

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสารละลายสตาร์ชสามารถตรวจวัดได้หลายวิธี และมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัดหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีหลักการทำงานและอ่านค่าความหนืดแตกต่างกัน เช่น เครื่องวัดความหนืดแบบ Brookfield viscometer, Brabender amylograph, Capillary

viscometer และ Rapid visco analyzer (RVA) ซึ่งการใช้ RVA มีข้อดีคือสามารถเปลี่ยนระดับอุณหภูมิทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ รักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ ทำให้กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด (pasting curve) ภายในเวลาประมาณ 13 นาที เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนได้ดี และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ศึกษาการเกิดเจลาตินในเซชันและรีโทรเกรเดชัน โดยความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสตาร์ช สมบัติทางกายภาพและเคมีของสตาร์ช

ค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดดังรูปที่ 2.11 มีดังนี้ (Newport scientific, 2007)

- 1) Pasting temperature คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- 2) Peak temperature คือ อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด หรืออุณหภูมิที่เกิดพีค มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- 3) Peak time คือ เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด หรือเวลาที่เกิดพีคของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
- 4) Peak viscosity คือ ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือเซนติพอยส์ (cP)
- 5) Breakdown คือ ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือเซนติพอยส์ (cP)
- 6) Final viscosity คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU หรือเซนติพอยส์ (cP)
- 7) Setback from peak คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือเซนติพอยส์ (cP)
- 8) Setback from trough คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU หรือเซนติพอยส์ (cP)



รูปที่ 2.11 กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย Rapid visco analyzer (RVA)

ที่มา: Alay และคณะ (2016)

2.7.2.4 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นกระบวนการที่แสดงถึงการพองตัว และการดูดซึมน้ำของสตาร์ชในขณะที่ได้รับความร้อน ซึ่งสารละลายสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น สตาร์ชแต่ละชนิดมีการเกิดเจลาตินในเซชันที่ต่างกัน อุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันของสตาร์ชแต่ละชนิดไม่เท่ากัน การเกิดเจลาตินในเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในสตาร์ช โดยการให้ความร้อนแก่สตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำอย่างเพียงพอ โมเลกุลน้ำสามารถแพร่เข้าไปในส่วนอสัณฐานของเม็ดสตาร์ชได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชในส่วนอสัณฐานอ่อนแอลง สตาร์ชเริ่มเกิดการพองตัว แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลในโครงสร้างผลึกอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าไปในส่วนโครงสร้างผลึก ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำได้มากขึ้นพร้อมกับพองตัวขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งโครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชสลายไป เกิดเป็นการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ พร้อมกับโมเลกุลแอมิโลสที่แพร่ออกมานอกเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชเริ่มเกิดเจลาตินในเซชันที่บริเวณไฮลัมในบริเวณส่วนอสัณฐาน เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีพันธะไฮโดรเจนอ่อนแอ ส่วนโครงสร้างผลึกเป็นตัวขัดขวางการเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดสตาร์ช

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลาตินในเซชัน ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ปริมาณแอมิโลส ความเป็นผลึกของสตาร์ช ปริมาณโปรตีนและไขมัน วิธีการสกัดสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช วิธีที่ใช้ศึกษาการเกิดเจลาตินในเซชัน โครงสร้างของโมเลกุลแอมิโลเพกติน ปริมาณฟอสฟอรัส อัตราส่วนระหว่างแอมิโลสและแอมิโลเพกติน เป็นต้น

การตรวจสอบกระบวนการเกิดเจลลาตินในเซชันอาจสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยใช้ Kofler hot stage microscope (Maaruf และคณะ, 2001) นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบโดยเครื่องที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีของวัสดุในรูปของฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

2.7.2.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาตินในเซชันแล้วทำการให้ความร้อนต่อไป เมื่อดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของแอมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่แขวนลอยอยู่นั้นไม่เสถียร เพื่อให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น โมเลกุลเหล่านี้จึงพยายามจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล โดยการพันกันเป็นเกลียวคู่ (double-helix) สายเกลียวคู่สามารถรวมตัวกันจนเป็นโครงสร้างผลึกสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกกว่าการเกิดซินเนอริซิส (syneresis) โดยจะทำให้เกิดเจลที่มีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในสตาร์ช และปริมาณและขนาดของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน โดยปริมาณและขนาดของแอมิโลสมีความสำคัญต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าในสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า ซึ่งอัตราการเกิด รีโทรเกรเดชันจะลดลงเมื่อโมเลกุลของแอมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ โดยการทำให้แอมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส แอมิโลเพกตินมีผลทำให้การเกิด รีโทรเกรเดชันน้อยมาก ดังนั้นสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันแตกต่างกัน

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย คือ มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) และสตาร์ชมันสำปะหลังจากบริษัท ธารวัฒน์ สตาร์ช ควอลิตี้ จังหวัดกำแพงเพชร

3.1.2 วัสดุและสารเคมี

แก๊สฮีเลียม (ความบริสุทธิ์ 99.995%) จากบริษัทห้างหุ้นส่วนจำกัดธนบุรีวัฒนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบวิเคราะห์ระบุในภาคผนวก ก

3.2 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของไซยาไนด์ในฟลาวาร์มันสำปะหลังไม่แห้งเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังไม่เปียกทางการค้า

นำมันสำปะหลังสดมาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก หั่นเต๋าขนาด 0.5 เซนติเมตร × 0.5 เซนติเมตร × 0.5 เซนติเมตร และนำเนื้อมันสำปะหลังที่ได้มาอบแห้งโดยใช้ตู้อบลมร้อน (IKE, WRH-100AN/GN, ประเทศจีน) ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส จนได้มันสำปะหลังที่มีค่ากิจกรรมของน้ำไม่เกิน 0.6 ติดตามปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์ในสำปะหลังในระหว่างการอบแห้ง จากนั้นนำมันสำปะหลังอบแห้งที่ได้มาไม่โดยใช้เครื่องปั่น (EM-ICE, SHARP, ประเทศญี่ปุ่น) และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh บรรจุฟลาวาร์ในถุงอะลูมิเนียมพอยล์ลามิเนต (PET/AL/LDPE) ปิดสนิท และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ตามรายละเอียดในข้อ 3.2.1.1 และวิเคราะห์สมบัติตามรายละเอียดในข้อ 3.2.1.2

3.2.1.1 ศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ ตามสมการปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และ 2 ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\ln [\text{HCN}] - \ln [\text{HCN}]_0 = -kt \quad (1)$$

$$\frac{1}{[\text{HCN}]_0} - \frac{1}{[\text{HCN}]} = -kt \quad (2)$$

3.2.1.2 ศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังนี้

- 1) ปริมาณโซลานิน ตามวิธีของ Cooke (1978) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1)
- 2) ปริมาณความชื้น ตามวิธีของ AOAC ตามวิธีของ AOAC (2000) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)
- 3) ค่ากิจกรรมของน้ำ โดยใช้เครื่องวัดค่ากิจกรรมของน้ำ AquaLab Series 3, Decagon, USA) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.2)
- 4) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Model IT5R, JEOL Co., Ltd. Japan) ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.3)
- 5) โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชในเนื้อมันสำปะหลัง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) โดยใช้ X-ray diffractometer (Model D8 Discover, Bruker AXS, Germany) ตามวิธีของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.4)
- 6) ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามวิธีของ Medcalf และ Gilles (1965) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.5)
- 7) กำลังการพองตัว (Swelling power) และการละลาย (Solubility) ที่อุณหภูมิ 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส ตามวิธีของ Schoch (1964) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.6)
- 8) สมบัติการเกิดเพสต์ (Pasting properties) โดยใช้เครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) (Newport Scientific รุ่น RVA-4, Australia) ตามวิธีของ Haase และคณะ (1995) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.7)
- 9) ค่าสี โดยวัดเป็นค่า $L^* a^* b^*$ โดยใช้เครื่อง Chroma meter (Minolta รุ่น CR-300 series, Japan) (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.8) คำนวณเป็นค่าดัชนีความขาว (whiteness index) (Chen และ Lii, 1999)

ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของข้อมูลด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p

≤ 0.05) จากนั้นเลือกสภาวะที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากอุณหภูมิอบที่แห้งสามารถลดปริมาณโซลานีนได้สูงสุด เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

3.2.2 ศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณโซลานีนในฟลาว์ร์มันส์สำหรับหลังไม่แห้งโดยใช้พลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

นำฟลาว์ร์มันส์สำหรับที่ได้มาผ่านพลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ (PVM500/DIDRIVE10, ประเทศไทย) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Gao และคณะ (2019) และ Valsero และคณะ (2013) ทำการบรรจุฟลาว์ร์มันส์สำหรับไม่แห้ง 5 กรัม ลงใน sample holder ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และวางใน reactor chamber ของเครื่องพลาสติกแบบดิจิทัลจุ่มอุณหภูมิ ปรับความถี่ของเครื่องพลาสติกเท่ากับ 22.7 กิโลเฮิร์ตซ์ และใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแหล่งกำเนิดพลาสติก โดยศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์ และแปรเวลาที่ใช้ 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15 นาที โดยแสดงค่ากำลังและงานดังตารางที่ 3.1 บรรจุตัวอย่างลงในถุงอะลูมิเนียมพอลิเอทิลีน (PET/AL/LDPE) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติตามข้อที่ 3.2.1.2

ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ 3×4 Factorial experimental design ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของข้อมูลด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3.1 กำลังและงานของสภาวะของเครื่องพลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

แรงดันไฟฟ้า (กิโลโวลต์)	กำลัง (วัตต์)	เวลา (นาทีก)	งาน (กิโลจูล)
5	100	3	18
		5	30
		10	60
		15	90
10	200	3	36
		5	60
		10	120
		15	180
15	300	3	54
		5	90
		10	180
		15	270
20	400	3	72
		5	120
		10	240
		15	360

3.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นของฟลาวาร์มันสำปะหลังไม่แห้ง แรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวาร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

นำฟลาวาร์มันสำปะหลังที่ได้มาผ่านพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ (PVM500/DIDRIVE10, ประเทศไทย) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Gao และคณะ (2019) และ Valsero และคณะ (2013) ทำการบรรจุฟลาวาร์มันสำปะหลังไม่แห้ง 5 กรัม ลงใน sample holder ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และวางใน reactor chamber ของเครื่องพลาสมาแบบดิจิทัลจุ่มฉนวน ปรับความถี่ของเครื่องพลาสมาเท่ากับ 22.7 กิโลเฮิร์ตซ์ และใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา โดยศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์ในฟลาวาร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่แตกต่างกัน 3 ระดับ (69.16, 143.18 และ 232.60 ppm) แรงดันไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์ (200, 300 และ 400 วัตต์) และแปรเวลาที่ใช้ 4 ระดับ ได้แก่ 3, 5, 10 และ 15 นาที

โดยแสดงค่ากำลังและงานดังตารางที่ 3.1 บรรจุตัวอย่างลงในถุงอะลูมิเนียมพอยล์ลามิเนต (PET/AL/LDPE) เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไซยาไนด์เพื่อศึกษาอัตราการลดลงของไซยาไนด์ในฟลาวร์มันส์สำหรับหลังเมื่อให้พลาสติก และเลือกสภาวะที่ลดปริมาณไซยาไนด์ได้มากที่สุดเพื่อวิเคราะห์สมบัติตามข้อที่ 3.2.1.2

3.2.3.1 ศึกษาจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับที่ 1 ตามสมการที่ 1

3.2.3.2 ศึกษาปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันส์สำหรับหลังที่ให้พลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที เมื่อมีจำนวนรอบการให้พลาสติกตั้งแต่ 1 ถึง 4 รอบ

3.2.3.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟลาวร์มันส์สำหรับหลังไม่แห้งเมื่อให้พลาสติกที่สภาวะที่ลดปริมาณไซยาไนด์ได้มากที่สุด

1) ปริมาณความชื้น ตามวิธีของ AOAC (2000) section 32.1.03 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.9)

2) ปริมาณโปรตีน ตามวิธีของ AOAC (2000) section 32.1.22 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.10)

3) ปริมาณเถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000) section 32.1.05 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.11)

4) ปริมาณไขมัน ตามวิธีของ AOAC (2000) section 32.1.13 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.12)

5) ปริมาณเส้นใยหยาบ ตามวิธีของ AOAC (2000) section 32.1.15 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.13)

6) ปริมาณคาร์โบไฮเดรต คำนวณจากผลต่าง โดยนำองค์ประกอบอื่น ๆ หักออกจาก 100 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.14)

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น และแรงดันไฟฟ้าต่อค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ **3 × 3 Factorial experimental design in Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดลอง 2 ครั้ง** วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของข้อมูลด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยแรงดันไฟฟ้า และเวลา โดยมีความเข้มข้นไฮยาไนด์เริ่มต้น เป็นบล็อกต่อปริมาณความชื้น ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ **3 × 4 Factorial experimental design in Randomized Complete Block Design (RCBD)** ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของข้อมูลด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี ออกแบบการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ **Completely Randomized Design (CRD)** ทำการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) ของข้อมูลด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Software Version 22 และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DNMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของไซยาไนด์ในปลาวัวรมัน สำปะหลังไม่แห้งเปรียบเทียบกับสตราซมันสำปะหลังไม่เปียกทางการค้า

4.1.1 จลนศาสตร์การเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์ในมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งที่ อุณหภูมิจากอบแห้งแตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์การเพิ่มขึ้นและลดลงของไซยาไนด์ในมันสำปะหลัง (ตารางที่ 4.1) พบว่าการอบแห้งในช่วง 40 นาทีแรกส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์เพิ่มขึ้น ส่วนการอบแห้งตั้งแต่นาทีที่ 40 เป็นต้นไปส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์ลดลง โดยตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ในระหว่างการอบแห้ง (k) ทั้ง 2 ช่วง

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิจากอบแห้งแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

ตัวอย่าง	ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์ที่ เวลา 0-40 นาที		ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์ที่ เวลา 40-240 นาที	
	$k_{\text{first}}^{\text{ns}}$ (ppm.min ⁻¹)	R^2	$k_{\text{second}}^{\text{ns}}$ (ppm.min ⁻¹)	R^2
มันสำปะหลังที่ 60°C	+0.0190±0.0117	0.831-0.945	+0.0032±0.0028	0.751-0.876
มันสำปะหลังที่ 70°C	+0.0178±0.0083	0.970-0.100	+0.0047±0.0012	0.602-0.998
มันสำปะหลังที่ 80°C	+0.0140±0.0069	0.868-0.907	+0.0040±0.0015	0.623-0.837

a, b, c..... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในสดมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในสดมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่า k_{first} เป็นบวก สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง หมายความว่า ปริมาณไซยาไนด์เพิ่มขึ้น

ค่า k_{first} เป็นลบ สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง หมายความว่า ปริมาณไซยาไนด์ลดลง

ค่า k_{second} เป็นบวก สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่สอง หมายความว่า ปริมาณไซยาไนด์ลดลง

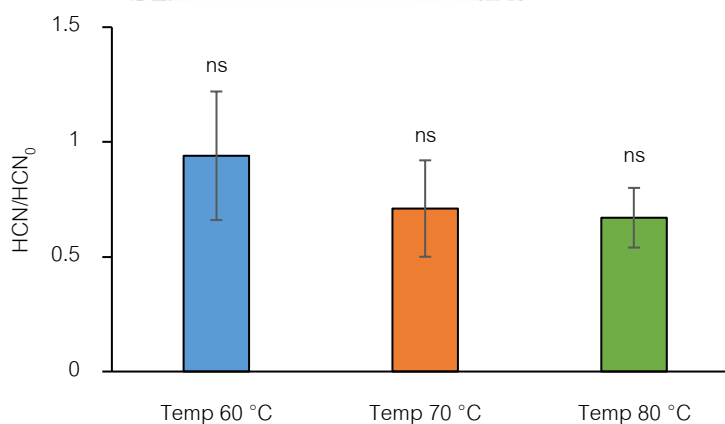
ค่า k_{second} เป็นลบ สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่สอง หมายความว่า ปริมาณไซยาไนด์เพิ่มขึ้น

โดยปกติแล้วไซยาไนด์ในมันสำปะหลังจะอยู่ในรูปไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycoside) ซึ่งเรียกว่าลินามาริน (linamarin) และโลทอสตราลิน (lotaustralin) เมื่อมีการกระทำให้น้ำเนื้อเยื่อพืชเสียหายจะทำให้เกิดการย่อยของเอนไซม์ลินามาเรส (linamarase) ทำให้ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์เปลี่ยนรูปไปเป็นไซยาโนไฮไดริน (cyanohydrin) และเอนไซม์ไฮดรอกซีไนโตรไลเอส (hydroxynitrile lyase) จะทำหน้าที่เปลี่ยนไซยาโนไฮไดรินไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ทั้งนี้ นอกจากการเปลี่ยนรูปของไซยาไนด์โดยใช้เอนไซม์แล้ว ในขั้นการเปลี่ยนจากไซยาโนไฮไดรินไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์สามารถเกิดขึ้นเองได้โดยไม่ต้องใช้เอนไซม์ถ้าอยู่ในสภาวะที่มีค่า pH เท่ากับ 5 หรือที่อุณหภูมิในช่วง 50 ถึง 60°C จะช่วยเร่งการเปลี่ยนแปลงนี้ โดยไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ไม่สามารถระเหยออกจากมันสำปะหลังได้เอง จึงต้องทำให้เกิดการเปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ จึงจะสามารถระเหยและกำจัดไซยาไนด์ออกจากมันสำปะหลังได้ (Szabo และคณะ, 2010) ซึ่งจากการเตรียมมันสำปะหลังสดนำมาหั่นเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำให้มีเซลล์พืชบางส่วนเกิดการเสียหาย แล้วเมื่อนำมันสำปะหลังสดที่หั่นแล้วมาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจะทำให้เอนไซม์ลินามาเรสที่อยู่ในผนังเซลล์พืชเข้ามาย่อยไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ที่อยู่ภายในเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ ส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์เพิ่มขึ้น (รูปที่ ข.1) และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่เวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นปริมาณไซยาไนด์จะเริ่มมีการลดลงจนถึงที่เวลา 24 ชั่วโมง โดยการลดลงของไซยาไนด์เกิดจากการระเหยของไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่สามารถระเหยได้ตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 25.6°C อย่างไรก็ตามมันสำปะหลังที่วางทิ้งไว้ยังคงมีปริมาณไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์เหลืออยู่ในมันสำปะหลังในส่วนหนึ่งของเซลล์ที่ไม่เสียหายจากการหั่น โดยในการทดลองจะใช้มันสำปะหลังสดที่หั่นและวางทิ้งเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่ไซยาไนด์เพิ่มขึ้นสูงสุด แล้วจึงนำไปอบแห้ง โดยผลการเพิ่มขึ้นของไซยาไนด์ในมันสำปะหลังที่ช่วง 0 ถึง 40 นาที ของการอบแห้งเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง โดยอุณหภูมิการอบแห้ง ได้แก่ 60, 70 และ 80°C มีค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์เท่ากับ 0.0190 ± 0.0117 , 0.0178 ± 0.0083 และ 0.0140 ± 0.0069 ppm.min⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ ค.1.1) แต่มีแนวโน้มว่าค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์ของอุณหภูมิ 60°C มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือที่ 70 และ 80°C ตามลำดับ ทั้งนี้ในการอบแห้งส่งผลให้ความร้อนของมันสดเพิ่มสูงขึ้นจนกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ลินามาเรสให้เกิดการย่อยไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ ทำให้ไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ จนทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อความร้อนในการอบแห้งที่ถ่ายโอนมายังมันสดสูงขึ้นจนทำให้น้ำระเหยออกจากมันสดได้มากขึ้น ส่งผลให้มีน้ำที่ต้องใช้ในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ทำให้เอนไซม์ลินามาเรสทำงานได้ลดลงจนหยุดปฏิกิริยาที่เวลาของการอบแห้งนาที่ที่ 40 ทำให้ที่เวลา 40 นาที มีปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์

สูงสุด ซึ่งการใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 60°C สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ได้มากที่สุด เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงานของเอนไซม์ลินามาเรสที่ใช้ในการเปลี่ยนไซยาโนเจนิก ไกลโคไซด์ไปเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์

การลดลงของไซยาไนด์ในช่วงหลังของการอบแห้งที่เวลา 40 ถึง 240 นาที โดยการลดลงของปริมาณไซยาไนด์เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่สอง กล่าวคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาแปรผันตามความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังสอง มีค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงไซยาไนด์เท่ากับ 0.0032 ± 0.0028 , 0.0047 ± 0.0012 และ 0.0040 ± 0.0015 ppm.min⁻¹ ที่อุณหภูมิการอบแห้ง 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ โดยค่าคงที่อัตราในช่วง 40 ถึง 240 นาที ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ ค.1.2) โดยการลดลงของไซยาไนด์ในช่วงหลังมาจากการที่อุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้เกิดการระเหยและสลายตัวของไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่สามารถระเหยไฮโดรเจนไซยาไนด์ได้คือตั้งแต่ 25.6°C และจะระเหยได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

พิจารณาปริมาณของไซยาไนด์ของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้ง โดยแสดงอัตราส่วนของปริมาณไซยาไนด์หลังอบแห้งต่อไซยาไนด์เริ่มต้นดังรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อปริมาณไซยาไนด์ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่มีแนวโน้มของการลดลงของปริมาณไซยาไนด์ตามอุณหภูมิในการอบแห้ง อย่างไรก็ตามปริมาณของไซยาไนด์ในฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ลดลงยังคงมีปริมาณที่สูงกว่าที่กฎหมายกำหนดทุกตัวอย่าง

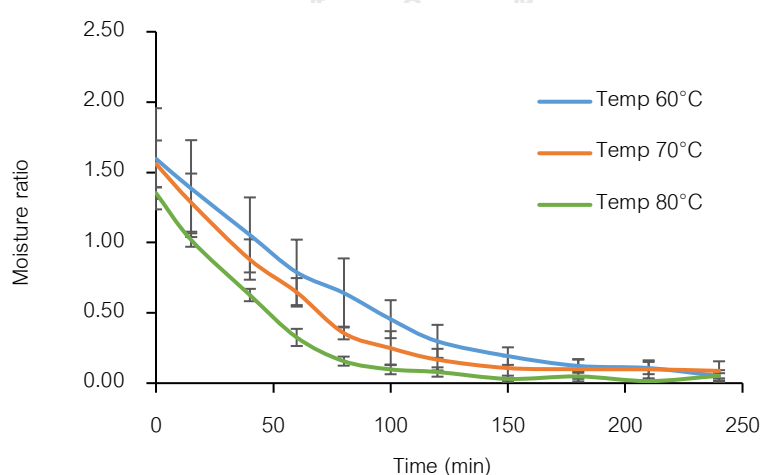


รูปที่ 4.1 สัดส่วนของไซยาไนด์ที่เหลือหลังการอบแห้งต่อไซยาไนด์เริ่มต้นของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

4.1.2 กราฟการอบแห้งของมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกัน

จากการศึกษาการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio) ซึ่งคำนวณมาจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในมันสำปะหลังต่อปริมาณของแข็งของมันสำปะหลัง มีการลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่าง โดยอัตราส่วนความชื้นหาได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่ระเหยต่อน้ำหนักของแข็งในตัวอย่าง และเวลาในการอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการอบแห้งพบว่าอุณหภูมิสูงมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่า และที่อุณหภูมิ 80°C สามารถลดค่ากิจกรรมของน้ำ (a_w) ให้ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นค่ากิจกรรมของน้ำของอาหารแห้ง ที่เวลา 100 นาที และมีความชื้น ร้อยละ 8.88 ± 2.92 เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C และที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C สามารถลดค่ากิจกรรมของน้ำให้ต่ำกว่า 0.6 ได้ที่เวลา 180 นาที และมีความชื้นร้อยละ 10.80 ± 3.95 และ 8.79 ± 5.75 ตามลำดับ

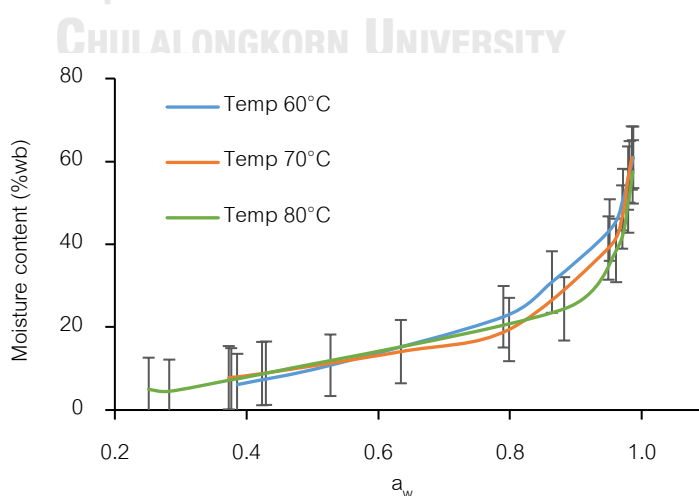
พิจารณาช่วงแรกของการอบแห้งที่เวลา 0 ถึง 60 นาที เป็นช่วงที่มีการถ่ายโอนความร้อนระหว่างลมร้อนและมันสำปะหลัง ทำให้อุณหภูมิตัวของมันสำปะหลังสูงขึ้น พบว่าอัตราการอบแห้งของอุณหภูมิตัวอบแห้ง 80°C สูงกว่าที่ 70 และ 60°C ตามลำดับ และเมื่อเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำภายในมันสำปะหลังเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้า และเกิดการระเหยออกจากมันสำปะหลัง โดยที่อุณหภูมิ 80°C มีอัตราการอบแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือที่ 70 และ 60°C และอัตราการอบแห้งเริ่มที่เวลา 120, 100 และ 70 นาที ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้งพบว่ามันสำปะหลังที่อบที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มันสำปะหลังมีค่ากิจกรรมของน้ำเท่ากับ 0.39 ± 0.00 , 0.37 ± 0.05 และ 0.25 ± 0.06 และมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 6.14 ± 1.74 , 7.79 ± 5.92 และ 4.98 ± 1.70 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟการอบแห้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

4.1.3 Moisture sorption isotherm ของมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งที่อุณหภูมิ การอบแห้งแตกต่างกัน

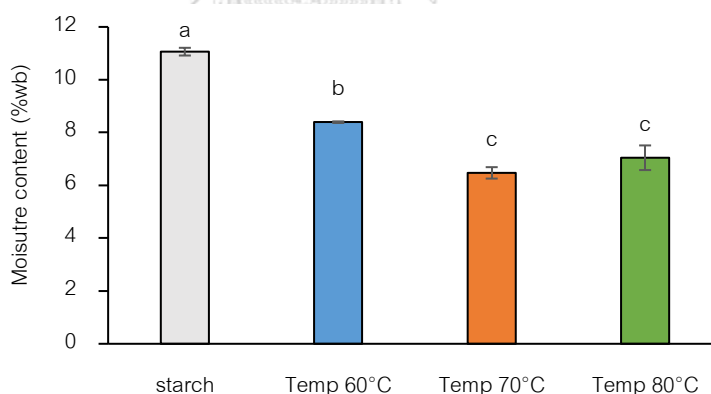
Moisture sorption isotherm ซึ่งบอกความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำของมันสำปะหลังในระหว่างการอบแห้งแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งบ่งบอกกลไกการดูดซึมน้ำและ อันตรกิริยาระหว่างอาหารและน้ำ ซึ่งสำคัญต่อการศึกษาระบวนการอบแห้งโดยสามารถใช้ ในการออกแบบกระบวนการอบแห้ง และใช้ในการประเมินอายุการเก็บรักษาอาหารได้ โดยพบว่าที่ อุณหภูมิตอบแห้งคงที่ ปริมาณความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำในมันสำปะหลังลดลงเมื่อเวลาในการ อบแห้งเพิ่มขึ้น โดยเกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ถูกกระตุ้นเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำ ที่อยู่ในสถานะกระตุ้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลน้ำเคลื่อนที่ได้มากขึ้นและมีพลังงานสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้มีรายงานว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการอบแห้งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทาง กายภาพและเคมี โดยจะลดบริเวณเร่ง (active sites) ที่ใช้ในการจับน้ำของตัวอย่างทำให้น้ำสามารถ ระเหยได้ดีขึ้น (Koua และคณะ, 2014) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.3 มันสำปะหลังสดเริ่มต้นมีความชื้น ในช่วงร้อยละ 57.48 ± 0.76 ถึง 60.98 ± 5.44 โดยช่วงแรกของการให้ความร้อน มันสำปะหลังสดมีค่า กิจกรรมของน้ำในช่วง 0.8 ถึง 1.0 พบว่าเส้นกราฟของอุณหภูมิตอบแห้งที่ 60°C สูงกว่าที่ 70°C และ 80°C ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่าสามารถทำให้น้ำในตัวอย่างเกิดการระเหยได้มากกว่าทำ ให้ปริมาณน้ำอิสระในตัวอย่างลดลง ดังนั้นความชื้นจึงลดลงตามไปด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณา ผลผลิตสุดท้ายเมื่อใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากัน มันสำปะหลังที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C มีปริมาณ ความชื้นและค่ากิจกรรมของน้ำต่ำที่สุด รองลงมาคือที่ 70°C และ 60°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 Moisture sorption isotherm ของมันสำปะหลังที่อุณหภูมิตอบแห้งแตกต่างกัน 3 ระดับ (60°C , 70°C และ 80°C)

4.1.4 ปริมาณความชื้นของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

ปริมาณความชื้นของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่อบที่อุณหภูมิแตกต่างกันเปรียบเทียบกับ สตาร์ชมันสำปะหลังซึ่งเป็นตัวอย่งที่ได้จากบริษัทธนระวัฒน์ สตาร์ช ควอลิตี้ จังหวัดกำแพงเพชร (รูปที่ 4.4) พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ได้จากการโม้เปียกมีความชื้นสูงกว่าฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้ง โดยสตาร์ชมันสำปะหลังมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 11.06 ± 0.15 และฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่อบที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีความชื้นร้อยละ 8.39 ± 0.03 , 6.47 ± 0.22 และ 7.05 ± 0.47 ตามลำดับ โดยสตาร์ชมันสำปะหลังมีความชื้นสูงกว่าฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งทุกตัวอย่างเนื่องจากในการโม้เปียกจะมีการใช้น้ำในการสกัดสตาร์ช ทำให้มีความชื้นที่หลงเหลืออยู่ในสตาร์ชสูงกว่าฟลาวรรที่ผ่านการโม้แห้งที่ไม่มีการใช้น้ำร่วมกับการโม้ และเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ความชื้นของฟลาวรรมันสำปะหลังลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการอบแห้งเมื่อเวลาในการอบแห้งเท่ากัน สามารถลดปริมาณน้ำในมันสำปะหลังได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

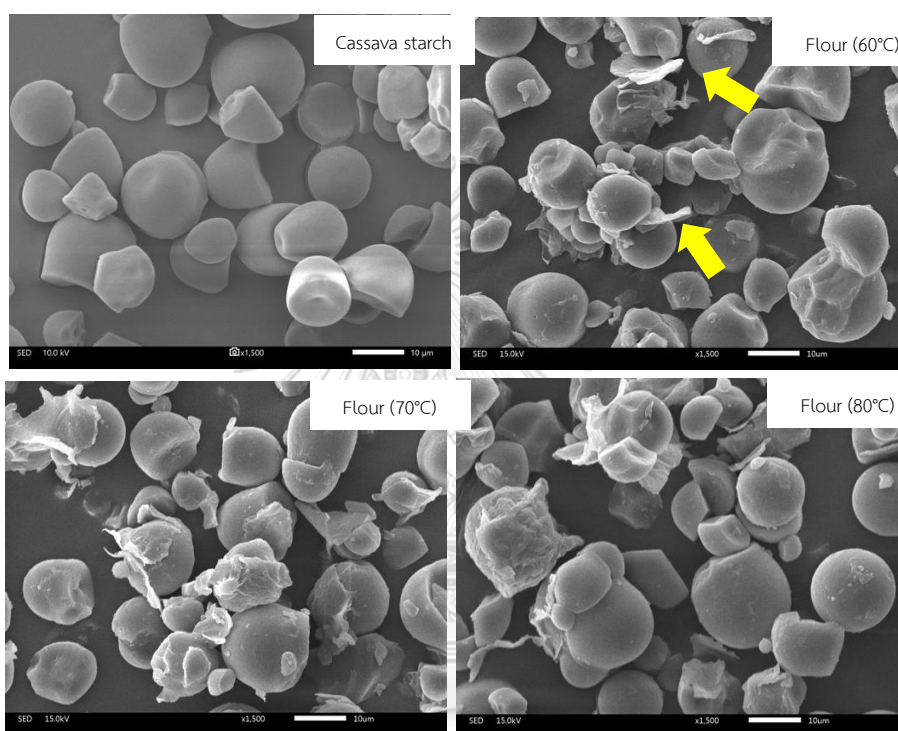


รูปที่ 4.4 ปริมาณความชื้นของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

4.1.5 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

ลักษณะรูปร่างและพื้นผิวของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตโดยการโม้

เปียกมีพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชที่เรียบ และเม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่มีรูปร่างกลมและรูปกล้วย ไม่มีการแตกหักของเม็ดสตาร์ชมากนัก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง พบว่าเม็ดสตาร์ชมีรูปร่างที่ไม่สมบูรณ์ ไม่เป็นรูปทรงที่ชัดเจน และมีรอยแตกและรูที่ผิวค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังมีส่วนขององค์ประกอบทางเคมีอื่นนอกจากสตาร์ชคงอยู่ เช่น โปรตีน และเส้นใยหยาบ ซึ่งแสดงดังลูกศรสีเหลือง



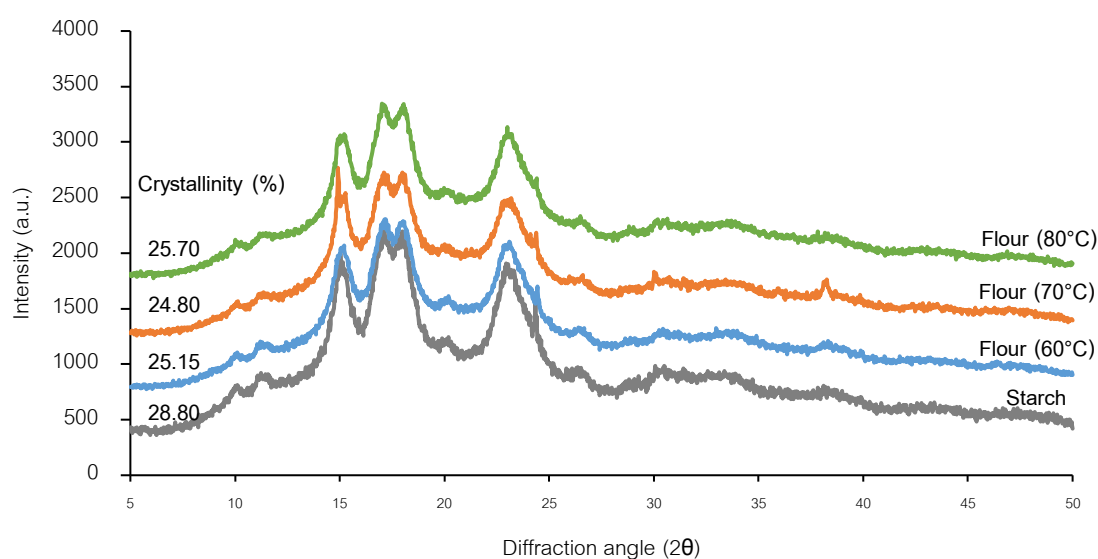
รูปที่ 4.5 รูปร่าง และพื้นผิวของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500x

4.1.6 โครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง (รูปที่ 4.6) พบว่าโครงสร้างผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งพีคที่ 5° , 10° , 11° , 15° , 17° , 18° , 24° และ 26° มุม 2θ จัดเป็นผลึกแบบ C ซึ่งเป็นรูปแบบผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังส่วนใหญ่ดังรายงานของ Grace และ Henry (2020) และ Dome และคณะ (2020)

พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังมีรูปแบบผลึกชนิด C โดยผลึกแบบ C จะประกอบไปด้วยผลึกทั้งแบบ A และ B ผสมกัน แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งพบว่ามีตำแหน่งพีคที่ 10° , 11° , 15° , 17° , 18° , 24° และ 26° มุม 2θ จัดเป็นผลึกแบบ A ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rocha และคณะ (2010) และ Wonraphatphadung และคณะ (2012) โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกอาจเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ที่ปะปนหลงเหลืออยู่ในฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ทำให้เกิดการรบกวนการวิเคราะห์จึงไม่สามารถเห็นพีคที่ชัดเจนในตำแหน่งพีคที่ 5° ได้ ในขณะที่สตาร์ชมันสำปะหลังสามารถมองเห็นพีคที่ชัดเจน

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกจากตารางที่ 4.2 พบว่าสตาร์ชมันสำปะหลังมีปริมาณผลึกร้อยละ 28.80 ± 0.57 และฟลาวร์มันสำปะหลังที่อบที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีปริมาณร้อยละผลึก 25.15 ± 0.21 , 24.80 ± 1.41 และ 25.70 ± 0.57 โดยปริมาณผลึกที่ลดลงเนื่องจากการโม้แห้งทำให้เกิดการทำลายส่วนโครงสร้างผลึก (crystalline region) บางส่วนของสตาร์ช ทำให้มีปริมาณร้อยละผลึกลดลง เนื่องจากมีการใช้แรงกลในการโม้ที่สูง และอาจเกิดจากการมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นปะปนอยู่ ทำให้ปริมาณผลึกลดลงได้เช่นกัน



รูปที่ 4.6 X-ray diffractogram ของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลึกของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

ตัวอย่าง	ร้อยละผลึก
Starch	28.80 ^a ±0.57
Flour (60°C)	25.15 ^b ±0.21
Flour (70°C)	24.80 ^b ±1.41
Flour (80°C)	25.70 ^b ±0.57

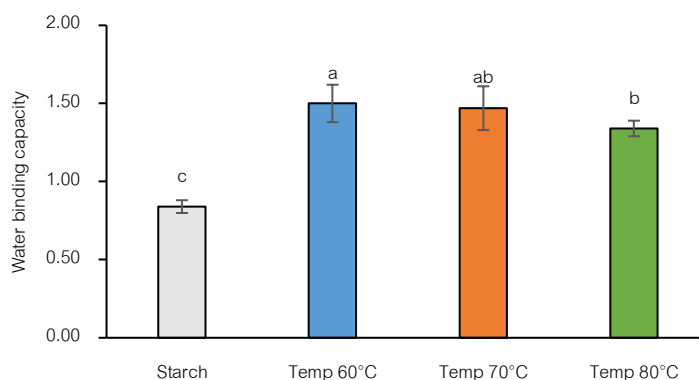
a, b, c..... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในสดมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในสดมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.1.7 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง (รูปที่ 4.7) พบว่าฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งมีความสามารถในการจับน้ำสูงกว่าสตาร์ชในทุกตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากฟลาวร์โม้แห้งได้รับแรงกลโดยตรง ทำให้มีเม็ดสตาร์ชที่เกิดความเสียหายมากกว่าสตาร์ชที่ไม่ได้ใช้น้ำซึ่งจะช่วยบรรเทาผลเสียจากแรงกลได้มากกว่า ฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเสียหายจึงมีเม็ดสตาร์ชไม่สมบูรณ์และสามารถพ่นไฮดรอกซิลได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถจับกับน้ำได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch carbohydrate) หรือเส้นใยอาหาร ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ โดยคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชจะช่วยเพิ่มความสามารถในการจับน้ำให้แก่ฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งได้ (นุชสิริ, 2556) โดยความสามารถในการจับน้ำแสดงถึงความแข็งแรงของพันธะภายในโมเลกุลสตาร์ช หากค่าความสามารถในการจับน้ำต่ำ แสดงว่าพันธะภายในสตาร์ชมีความแข็งแรงจับกันแน่น แต่ถ้ามีค่าความสามารถในการจับน้ำสูงแสดงให้เห็นว่าภายในโมเลกุลสตาร์ชจับกันอย่างหลวม ๆ (Aryee และคณะ, 2006) และเมื่อพิจารณาเฉพาะตัวอย่างฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง พบว่าฟลาวร์ที่อบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีความสามารถในการจับน้ำน้อยลง ซึ่งบ่งบอกว่าอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้น มีผลให้พันธะภายในโมเลกุลสตาร์ชจับกันแข็งแรงขึ้น ทำให้จับน้ำได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Avicara และคณะ (2010) ศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิอบแห้งของสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยพบว่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชมันสำปะหลังที่ทำแห้งโดยการตากแห้งมีค่าความสามารถในการจับน้ำสูงกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C

ทั้งนี้องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ นอกจากคาร์โบไฮเดรตในฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งมีแนวโน้มว่ามีปริมาณสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง เนื่องจากการโม้แห้งไม่มีการใช้น้ำในการสกัดสตาร์ช และกำจัดองค์ประกอบทางเคมีอื่นรวมถึงสิ่งปนเปื้อน ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีอื่นเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความสามารถในการจับน้ำแตกต่างกัน โดยโปรตีนที่อยู่ฟลาวอร์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โปรตีนที่ทำหน้าที่เก็บสะสม (storage protein) และโปรตีนที่ติดกับเม็ดสตาร์ช (starch granule-associated protein) ซึ่งในการผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังจากการโม้เปียกจะมีขั้นตอนการกำจัดส่วนโปรตีนที่ทำหน้าที่เก็บสะสมออกไปบางส่วน ทำให้โดยส่วนใหญ่จะเหลือเพียงโปรตีนที่ติดกับเม็ดสตาร์ช ในขณะที่ฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งจะยังคงมีโปรตีนทั้งสองส่วนอยู่ โดยโปรตีนในฟลาวอร์จะส่งผลต่อความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชและความสามารถในการคงรูปของเม็ดสตาร์ชได้ หากมีปริมาณโปรตีนสูงจะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความชอบน้ำน้อยลง และจับน้ำได้น้อยลง เนื่องจากปริมาณโปรตีนเป็นตัวบ่งบอกความชอบน้ำของเม็ดสตาร์ช ลิพิดในฟลาวอร์มีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ ลิพิดที่จับกับองค์ประกอบอื่น (non-starch lipids) ซึ่งถูกกำจัดได้ง่ายเมื่อใช้การโม้เปียกในการผลิตสตาร์ช ลิพิดที่จับกับฟลาวอร์ได้ (monoacyl non-starch lipids) ซึ่งลิพิดในส่วนนี้สามารถเข้าไปอยู่ในเม็ดสตาร์ชและทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเอมิโลสหรือเอมิโลเพกตินได้ ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น และจับน้ำได้น้อยลง ลิพิดส่วนสุดท้ายคือลิพิดที่เกาะกับสตาร์ช (true starch lipid) ซึ่งจะมีอยู่ทั้งในฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งและสตาร์ชโดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง โดยฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งมีปริมาณลิพิดมากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง โดยปริมาณลิพิดที่สูงจะทำให้ฟลาวอร์สามารถจับน้ำและพองตัวได้น้อยลง ผลของเส้นใยอาหารในฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งส่งผลให้ ฟลาวอร์สามารถจับน้ำและพองตัวได้ลดลงเช่นกัน โดยปริมาณเส้นใยอาหารที่สูงทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการ พองตัวได้ยากขึ้น เนื่องจากขัดขวางการขยายขนาดและการจับน้ำของเม็ดสตาร์ช

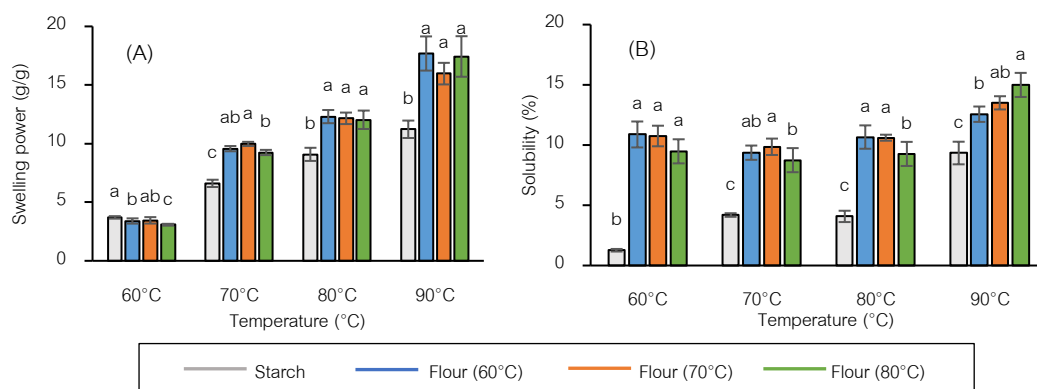


รูปที่ 4.7 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

4.1.8 กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

กำลังการพองตัวของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่อบที่อุณหภูมิแตกต่างกันเปรียบเทียบกับ สตาร์ชมันสำปะหลัง แสดงในรูปที่ 4.8 (A) กำลังการพองตัวของฟลาวรรมันขึ้นกับความสามารถในการจับน้ำของโม้เลกุลสตาร์ช ซึ่งที่อุณหภูมิ 70°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาติไนเซชัน และที่อุณหภูมิ 80 และ 90°C เป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันของฟลาวรรมันสำปะหลัง พบว่าฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งมีกำลังการพองตัวสูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากฟลาวรรที่ผ่านการโม้แห้งอาจเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช โดยมีรายงานของ Leewatchararongjareon และ Anuntagool (2016) พบว่าการโม้แห้งทำลายโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดสตาร์ช และเผยหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับกับน้ำได้มากขึ้น ทำให้ฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งมีกำลังการพองตัวมากกว่า นอกจากนี้ยังมีผลของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชที่สามารถอุ้มน้ำและแตกตัวได้ดีในน้ำ ทำให้กำลังการพองตัวของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งสูงกว่าสตาร์ช อย่างไรก็ตามภายในฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งยังมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ได้แก่ โปรตีน ลิพิด และเส้นใยอาหาร โดยปริมาณโปรตีนที่สูงมีผลในการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ปริมาณลิพิดสูงอาจทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้ยากขึ้น และเส้นใยอาหารที่สูงจะเป็นตัวบดบังการถ่ายโอนความร้อนระหว่างการให้ความร้อนและขัดขวางการขยายตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้ยาก อย่างไรก็ตามผลขององค์ประกอบทางเคมีที่ยับยั้งการพองตัวนั้นมีอิทธิพลน้อยกว่าผลจากการเกิดความเสียหายแก่เม็ดสตาร์ชเนื่องจากแรงกลจากการโม้ ทำให้กำลังการพองตัวของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง และเมื่อพิจารณาเฉพาะฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่อบที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 80 และ 90°C พบว่ากำลังการพองตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชันทำให้ฟลาวรรมันแห้งที่อบที่อุณหภูมิแตกต่างกันสามารถเกิดเจลาติไนเซชันโดยสมบูรณ์ทุกตัวอย่าง

ร้อยละการละลายแสดงดังรูปที่ 4.8 (B) พบว่าฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งมีค่าการละลายสูงกว่าสตาร์ช เนื่องจากฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งมีส่วนเม็ดสตาร์ชที่เสียหายมากกว่าสตาร์ช จึงทำให้ ฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งสามารถละลายได้ดีกว่าสตาร์ช นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชยังสามารถช่วยเพิ่มการละลายได้เช่นเดียวกัน แม้จะมีผลจากองค์ประกอบทางเคมีอื่นในฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่อาจยับยั้งการละลาย



รูปที่ 4.8 กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

4.1.9 สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง (ตารางที่ 4.3) พบว่าฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (pasting temperature) และมีความหนืดสูงสุดสูงกว่าสตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งสามารถพองตัวได้ดีกว่าสตาร์ช ซึ่งเกิดจากการโม้แห้งที่เป็นการให้แรงกลโดยตรงแก่เม็ดสตาร์ชทำให้เกิดความเสียหายแก่เม็ดสตาร์ช เผยให้เห็นหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชทำให้สามารถจับน้ำ และพองตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชซึ่งสามารถพองตัวได้ดี จึงทำให้มีความหนืดสูงขึ้น เมื่อพิจารณาฟลาวร์มันสำปะหลังที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่ามีความหนืดสูงสุดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) ซึ่งบ่งบอกความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูงและแรงเฉือน พบว่ามีค่าสูงขึ้นในตัวอย่างฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง เนื่องจากการพองตัวที่สูงขึ้นทั้งเนื่องจากความเสียหายของเม็ดสตาร์ชที่สูงจากการโม้แห้ง และการมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชสูงกว่า แสดงว่าฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งมีความสามารถในการคงทนต่อแรงเฉือนและความร้อนน้อยลง โดยเกิดจากเม็ดสตาร์ชของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งสามารถพองตัวและแตกสลายได้ดีกว่าสตาร์ช ซึ่งสอดคล้องกับผลของกำลังการพองตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีค่าสูงกว่าสตาร์ช (Abera และ Rakshit, 2003) และค่าการคืนตัว (setback) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดรีโทรเกรเดชันพบว่ามีความลดลงในตัวอย่างฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งเมื่อเทียบกับสตาร์ช เนื่องจากการฟลาวร์ที่ผ่านการโม้แห้งมีความเสียหายของเม็ดสตาร์ชสูง โดยอาจทำให้โครงสร้างของสายโซ่สตาร์ชมีขนาดสั้นลงทำให้ยากต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน นอกจากนี้ปริมาณลิพิดใน ฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่สูงกว่าจะลดการเกิดรี

โทรเกรเดชันได้เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิด ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้น้อยลง และการมีคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่สตาร์ชซึ่งจะลดการเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเช่นกัน เนื่องจากไม่สามารถจัดเรียงตัวใหม่สานเป็นโครงสร้างร่างแหได้ และยังมีผลของปริมาณเส้นใยอาหารที่อาจเกี่ยวพันขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่และเชื่อมพันธะกันของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน

4.1.10 ค่าสี ($L^* a^* b^*$) และดัชนีความขาวของฟลาวรร่มนสำปะหลังไม่แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง

ค่าสีและดัชนีความขาวของฟลาวรร่มนสำปะหลังไม่แห้งที่อบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าค่า $L^* a^* b^*$ และดัชนีความขาวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่าดัชนีความขาวสามารถคำนวณได้จากค่าสี $L^* a^* b^*$ ซึ่งเป็นลักษณะปรากฏที่สำคัญของฟลาวรร่มนสำปะหลัง โดยฟลาวรร่มนสำปะหลังไม่แห้งมีค่าดัชนีความขาวน้อยกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นผลมาจากการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูง และปริมาณโปรตีนของฟลาวรร่มนสำปะหลังไม่แห้งที่สูงกว่า โดยค่าดัชนีความขาวของฟลาวรร่มนสำปะหลังที่มีค่าลดลงเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอย่างปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) และกรดอะมิโนภายในโปรตีน ซึ่งฟลาวรร่มนสำปะหลังไม่แห้งมีปริมาณโปรตีนมากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชเนื่องจากการผลิตสตาร์ช มันสำปะหลังมีขั้นตอนการสกัดฟลาวร์โดยใช้น้ำซึ่งทำให้องค์ประกอบทางเคมีอื่น เช่น โปรตีน ถูกชะล้างทิ้งออกไป ทำให้สตาร์ชมันสำปะหลังเกือบจะไม่มีโปรตีนหลงเหลืออยู่เลย และเมื่อพิจารณาตัวอย่างฟลาวรร่มนสำปะหลังไม่แห้งพบว่าเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น ค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้มีรายงานของ Pornpraipech และคณะ (2017) ศึกษาอุณหภูมิอบแห้งที่แตกต่างกันต่อมันสำปะหลังแผ่น พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งสูงขึ้น มันสำปะหลังแผ่นมีสีที่คล้ำขึ้น เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการสลายโมเลกุลสตาร์ชหรือคาร์โบไฮเดรตทำให้ได้โมเลกุลน้ำตาลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ดีขึ้น จึงมีสีน้ำตาลมากขึ้น

ตารางที่ 4.3 สมบัติการเกิดเพสต์ของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวรรมันสำปะหลังไม่แห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

ตัวอย่าง	Pasting viscosity (cP)						
	Pasting temperature (°C)	Peak time ^{ns} (min)	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown	Final viscosity	Setback
สตาร์ชมันสำปะหลัง	71.4 ^c ±0.6	4.2±0.0	2803.3 ^b ±10.2	1256.3 ^a ±21.6	1547.0 ^b ±11.4	2204.7 ^a ±2.5	948.3 ^a ±19.9
ฟลาวรรมันสำปะหลังที่ 60°C	75.4 ^a ±0.8	4.1±0.08	3262.5 ^a ±160.4	1178.0 ^a ±78.4	2084.5 ^a ±86.7	1949.0 ^b ±116.2	771.0 ^b ±39.5
ฟลาวรรมันสำปะหลังที่ 70°C	74.4 ^b ±0.1	4.1±0.1	3157.0 ^a ±234.0	1050.5 ^b ±45.5	2106.5 ^a ±256.1	1655.8 ^c ±76.2	605.3 ^c ±34.2
ฟลาวรรมันสำปะหลังที่ 80°C	74.2 ^b ±0.4	4.1±0.1	3255.3 ^a ±31.3	1199.7 ^a ±41.9	2055.5 ^a ±70.8	1982.0 ^b ±41.9	782.3 ^b ±14.1

a, b, c..... ตัวอย่างที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสัณฐานที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสัณฐานแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.4 ค่าสี (L* a* b*) และดัชนีความขาวของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวรรมันสำปะหลังไม่แห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

ตัวอย่าง	ค่าสี		ดัชนีความขาว	
	L*	a*		b*
สตาร์ชมันสำปะหลัง	98.5 ^a ±0.1	0.2 ^a ±0.0	1.4 ^c ±0.0	97.9 ^a ±0.1
ฟลาวรรมันสำปะหลังที่ 60°C	64.9 ^b ±2.3	-1.7 ^c ±0.1	6.2 ^a ±0.3	64.3 ^b ±2.3
ฟลาวรรมันสำปะหลังที่ 70°C	63.9 ^b ±0.6	-1.6 ^c ±0.1	5.7 ^a ±0.6	63.4 ^b ±0.6
ฟลาวรรมันสำปะหลังที่ 80°C	65.6 ^b ±2.1	-1.4 ^b ±0.1	4.5 ^b ±2.1	65.2 ^b ±2.1

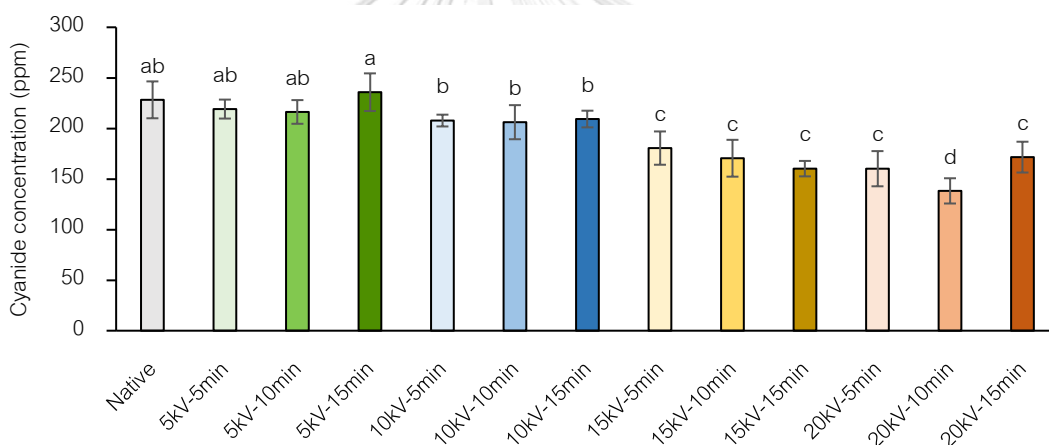
a, b, c..... ตัวอย่างที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสัณฐานที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสัณฐานแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.2 การศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้ง โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

4.2.1 ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้ง

ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้ง (รูปที่ 4.9) พบว่าปริมาณไซยาไนด์มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาสูงขึ้น และสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้สูงสุดเมื่อใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยมีความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นที่ 228.29 ppm ลดลงเหลือ 137.26 ppm คิดเป็นการลดร้อยละ 39.44



รูปที่ 4.9 ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันส์สำหรับหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

การลดลงของไซยาไนด์เมื่อได้รับพลาสมาเกิดขึ้นเนื่องจากการดิวชันของแก๊สด้วยไฟฟ้าจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (reactive species) เช่น $O\cdot$, $\cdot OH$, $N\cdot$, $HO_2\cdot$, N_2^* , N^* , OH^- , O_2^- , O^- , O_2^+ , N_2^+ , N^+ , และ O^+ เป็นต้น (Sarangapani และคณะ, 2017) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ โดยมีรายงานของ Valsero และคณะ (2013) ศึกษาการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำโดยใช้พลาสมาแบบดิวชันข้ามฉนวน และใช้ฮีเลียมเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา พบว่าสามารถกำจัดไซยาไนด์ได้ร้อยละ 99 เมื่อมีความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 1 ppm โดยอนุมูลอิสระ ได้แก่ H_2O_2 , $\cdot OH$ และ O_3 สามารถทำปฏิกิริยากับ CN^- โดยอนุมูลอิสระจะสามารถทำให้เกิดการแยกหรือแทนที่พันธะ

สามที่เสถียรของไซยาไนด์ ($C\equiv N$) เกิดสารประกอบ ได้แก่ OCN^- , NO_2^- , $HO-C\equiv N$, $O=C\equiv N$ และ $\bullet OOC(O)NH_2$ ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ได้แก่ NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , N_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} และสารประกอบสบู่ (saponified compounds) ทำให้ความเป็นพิษลดลง

นอกจากนี้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างการให้พลาสมาสามารถทำให้เกิดการกัดผิวของวัสดุ โดยผิวของเม็ดสตาร์ชที่ถูกกัดจะทำให้เกิดการระเหยของโมเลกุลที่ระเหยได้ที่อยู่ที่ผิว (Thirumdas และคณะ, 2017) โดยการกัดผิวของพลาสมาจะเกิดจากกระบวนการสปัตเตอริง (sputtering) ซึ่งเป็นการปล่อยให้ผิวหน้าของของแข็งถูกระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานจลน์จนอะตอมที่ผิวของของแข็งหลุดออกเนื่องจากการชนระหว่างสสารและอนุภาคพลังงาน (Adnano-tek, 2020) หรือเกิดจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งการกัดผิวสามารถทำให้โมเลกุลที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเคลื่อนที่มาที่ผิวได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้การกัดผิวอาจทำให้ไฮโดรเจนไซยาไนด์ที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชเคลื่อนที่มาที่ผิวได้ และเกิดการระเหยออกไปในที่สุด ส่งผลให้ปริมาณของไซยาไนด์ลดลงได้เช่นกัน

ปริมาณน้ำในตัวอย่างมีผลต่อการลดลงของไซยาไนด์เช่นกัน โดยมีรายงานของ Sarangapani และคณะ (2016) กล่าวว่าอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นระหว่างการให้พลาสมาที่สำคัญคือ ไฮดรอกซิลซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่เสถียร อยู่ได้นาน และทำให้เกิดออกซิเดชันได้สูง โดยไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยากับน้ำในตัวอย่าง ทำให้เกิดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) แล้วจะกลายเป็นอนุมูลไฮดรอกซิล ($\bullet OH$) เพื่อให้เกิดการสลายไฮโดรเจนไซยาไนด์ต่อไป มีรายงานว่าไฮดรอกซิลสามารถใช้บำบัดไซยาไนด์ในน้ำเสียได้ (Nava และคณะ, 2003) ซึ่งพบว่าไฮดรอกซิลสามารถออกซิไดซ์ไซยาไนด์ได้สมบูรณ์ โดยปฏิกิริยาการสลายไซยาไนด์เป็นไปตามสมการที่ 4.1 และ 4.2



อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณของไซยาไนด์ที่ลดลงเมื่อให้พลาสมา พบว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าและเวลาในการให้พลาสมามีผลให้ไซยาไนด์มีแนวโน้มที่ลดลง แต่ในตัวอย่างพลาพลาสม่าสำหรับหลังที่ให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ พบว่าที่เวลาในการให้พลาสมา 10 นาที มีปริมาณไซยาไนด์ลดลงสูงกว่าที่เวลา 15 นาที ซึ่งอาจเกิดจากที่เวลาในการให้พลาสมาสูงขึ้นทำให้การเคลื่อนที่ของแก๊สเป็นไปตามการกระจายของ Maxwellian น้อยลง โดยการกระจายของ Maxwellian เป็นผลมาจากทฤษฎีจลน์ของแก๊สที่กล่าวว่าแก๊สหรืออิเล็กตรอนที่มีจำนวนที่เหมาะสมและมีความเร็วที่เหมาะสม จะทำให้เกิดโมเมนตัมการชนกันที่ดีที่สุด ทำให้ได้พลังงานสูงสุด แต่ถ้าทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของการกระจายของ Maxwellian เช่น มีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าหรือเวลาที่ทำให้

พลาสมามากเกินไป ซึ่งมีผลให้แก๊สแตกตัวมากขึ้น มีจำนวนอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น และมีความเร็วสูงขึ้น ทำให้ไอเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงชนกันแบบไร้ทิศทางมากขึ้นส่งผลให้โอกาสในการชนกันน้อยลง ทำให้พลังงานของอนุภาคลิเธียมลดลง เป็นผลให้มิออนูมิลิเธียมไปทำปฏิกิริยากับไฮยาไนด์ลดลง ส่งผลให้ปริมาณไฮยาไนด์ของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 15 นาที มีปริมาณไฮยาไนด์สูงกว่าที่เวลา 10 นาที

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา (ตารางที่ 4.5) พบว่าแรงดันไฟฟ้า และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาส่งผลต่อปริมาณไฮยาไนด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเวลาที่ใช้ในการให้พลาสมาไม่ส่งผลต่อปริมาณไฮยาไนด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้แรงดันไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่ออนุภาคลิเธียมที่เกิดขึ้น โดยหากระดับแรงดันไฟฟ้าสูง จะทำให้อนุภาคลิเธียมเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้มิออนูมิลิเธียมเข้าทำปฏิกิริยากับไฮยาไนด์ได้เร็ว ส่งผลให้การกำจัดไฮยาไนด์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ตารางที่ 4.5 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณไฮยาไนด์ของฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง

Sources	P-value
ปริมาณไฮยาไนด์ (ppm)	
แรงดันไฟฟ้า	0.000*
เวลา	0.060 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.041*

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

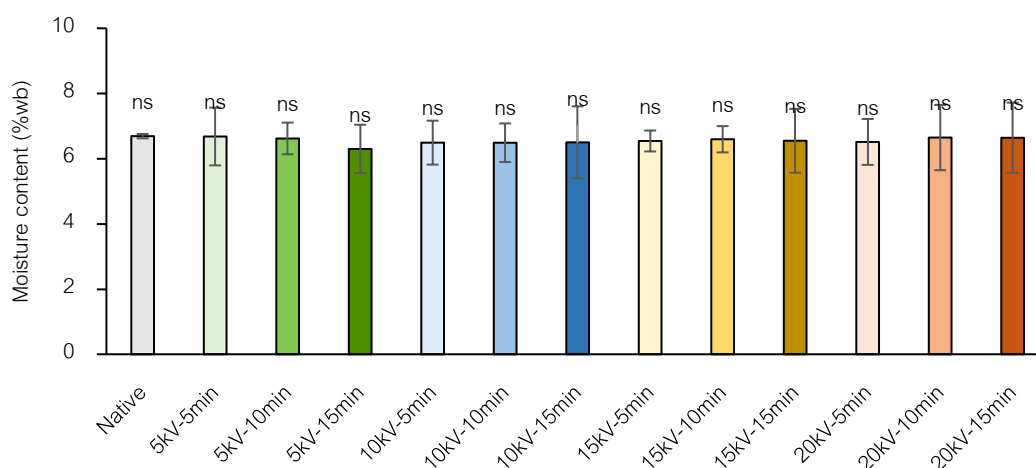
^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2.2 ปริมาณความชื้นของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง

ปริมาณความชื้นของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าฟลาร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมามีความชื้นไม่แตกต่างกับฟลาร์มันสำปะหลังปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากความแรงของแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการให้พลาสมาไม่สูง

เพียงพอให้เกิดความร้อนจนทำให้น้ำที่อยู่ภายในฟลาร์สามารถระเหยออกไปได้ จึงทำให้มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกับฟลาร์มันสำปะหลังที่ไม่ได้ให้พลาสมา

พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา พบว่าแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่มีผลต่อความชื้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.6)



รูปที่ 4.10 ปริมาณความชื้นของฟลาร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณความชื้นของฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

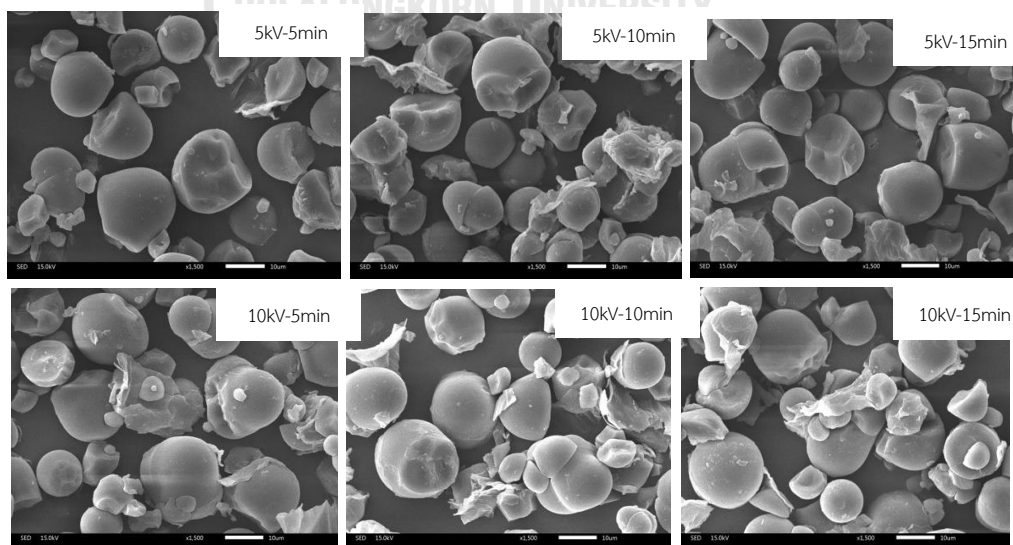
Sources	P-value
	ปริมาณความชื้น (%wb)
แรงดันไฟฟ้า	0.996 ^{ns}
เวลา	0.973 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	1.000 ^{ns}

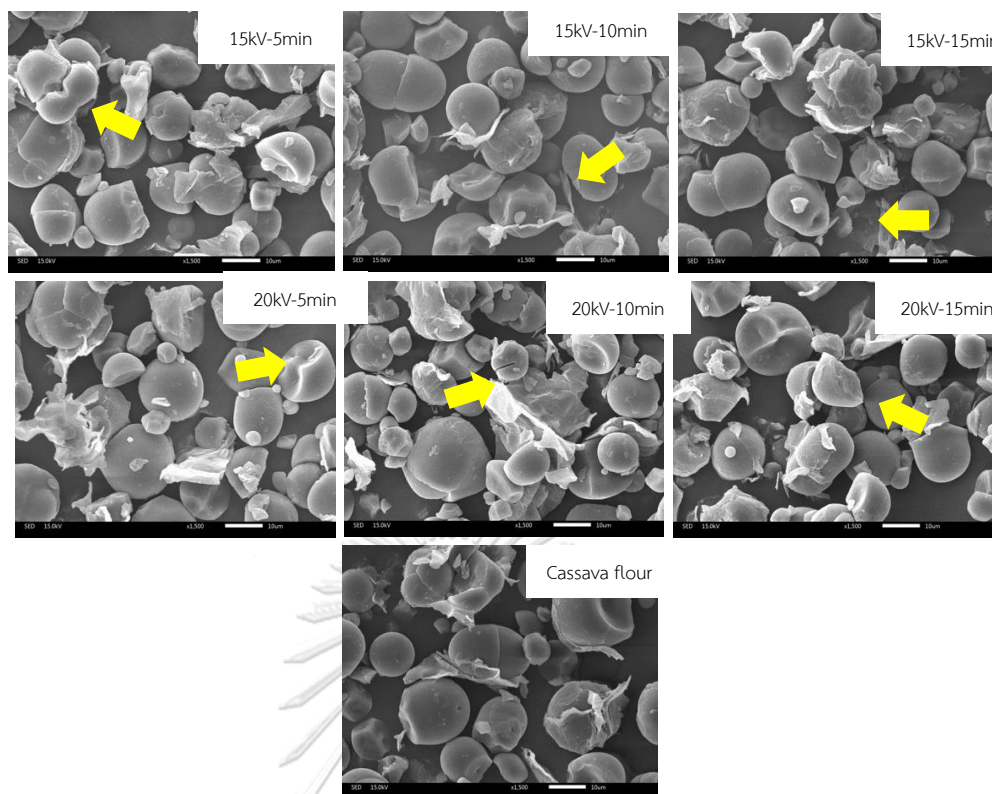
* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้ง

ลักษณะของรูปร่าง และพื้นผิวของฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งแสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเม็ดสตาร์ชในตัวอย่างฟลาวอร์มันสำปะหลังปกติมีการแตกหักบางส่วนเนื่องมาจากการโม้แห้ง และพบว่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงโดยเฉพาะที่ 15 และ 20 กิโลโวลต์ มีส่วนของเม็ดสตาร์ชในตัวอย่างฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ผ่านพลาสมาที่เกิดรอยแตกมากขึ้น มีรูเกิดขึ้นที่ผิวสตาร์ช (ลูกศรสีเหลืองในรูปที่ 4.11) ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการกัดผิวของพลาสมา ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Lii และคณะ (2003) พบว่าเม็ดสตาร์ชที่ผ่านการให้พลาสมาแบบโคโรนาดิจิทัลเกิดการรอยแตกขึ้นเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเกิดจากการกัดผิวโดยอนุภาคนิวตรอนของพลาสมา หรือเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยความเสียหายของสตาร์ชจากการกัดผิวของพลาสมา ขึ้นกับขนาดของเม็ดสตาร์ชและพันธุ์ของพืช โดยเม็ดสตาร์ชที่เกิดความเสียหายโดยเกิดรูและรอยแตกมากที่สุดคือสตาร์ชจากข้าวโพดข้าวเหนียวและมันฝรั่ง นอกจากนี้ Lii และคณะ (2002a) พบว่าการให้พลาสมาที่ความดันต่ำแก่สตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว ทำให้รูปร่างที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนไป มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ และพบรูบนผิวของเม็ดสตาร์ช สันนิษฐานว่าเป็นผลจากอนุภาคนิวตรอนจากพลาสมาสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลบนผิวสตาร์ช ในงานวิจัยของ Deeyai และคณะ (2010) ทำการให้พลาสมาแบบ ดิจิทัลจําฉนวนแก่สตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้อาร์กอนเป็นแหล่งกำเนิดพลาสมา พบว่าโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชสูญเสียความเป็นระเบียบ และทำให้โมเลกุลสตาร์ชดูเหมือนเกิดการหลอมรวมและเชื่อมต่อกันระหว่างโมเลกุล





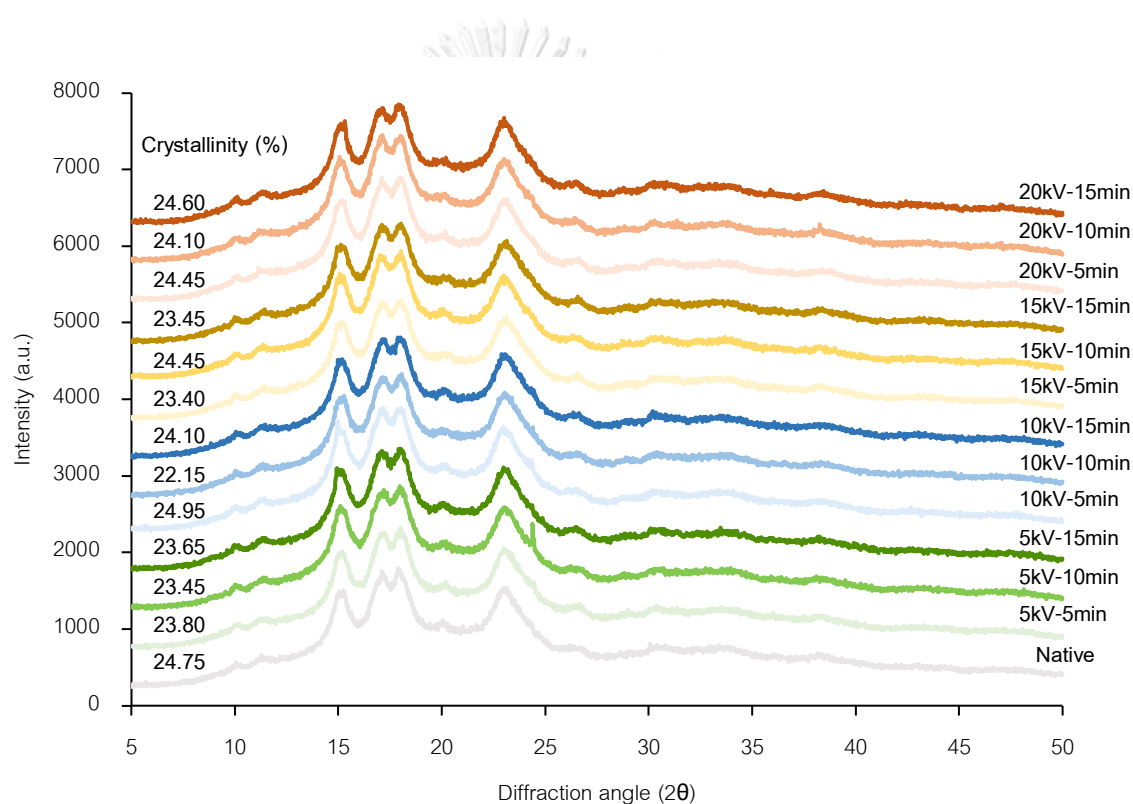
รูปที่ 4.11 รูปร่าง และพื้นผิวของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500x

4.2.4 โครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้ง

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความเป็นผลึกภายในฟลาวร์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้ง แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าโครงสร้างผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ให้พลาสมาและฟลาวร์มันสำปะหลังปกติมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมีพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 10° , 11° , 15° , 17° , 18° , 24° และ 26° มุม 2θ จัดเป็นผลึกแบบ A ทั้งนี้รูปแบบผลึกที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังให้พลาสมาแสดงให้เห็นว่าพลาสมาไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลัง และเมื่อพิจารณาปริมาณร้อยละผลึกซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 22.15 ± 0.78 ถึง 24.95 ± 0.35 (ตารางที่ 4.7) พบว่าปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมามีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังปกติ โดยการลดลงของปริมาณผลึกอาจเกิดจากโมเลกุลน้ำภายในโครงสร้างผลึกของสตาร์ชที่ถูกสลายได้ง่ายโดยอิเล็กตรอนที่มาจาก

อนุมูลอิสระ ทำให้เกิดการสลายโมเลกุลน้ำไปเป็นอนุมูลไฮดรอกซิลซึ่งทำให้ความเป็นผลึกลดลง (Laovachirasuwan และคณะ, 2010) ในงานวิจัยของ Bhat และ Karim (2009) พบว่าปริมาณผลึกของสตาร์ชลดลงเมื่อมีการฉายรังสีแกมมา โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ช โดยอนุภาคพลังงานสูงที่เกิดจากการให้รังสีจะทำให้เกิดการสลายกิ่งก้านสายแอมิโลเพกติน ซึ่งให้ผลคล้ายกับการให้พลาสมา

อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณผลึกของฟลาวัวร์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่ส่งผลต่อปริมาณผลึกอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่อันตรกิริยาของแรงดันไฟฟ้าและเวลามีผลต่อปริมาณผลึกอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 4.12 X-ray diffractogram ของฟลาวัวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวัวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลึกของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ร้อยละผลึก
Native	24.75 ^{ab} ±0.35
5kV-5min	23.80 ^{abc} ±0.14
5kV-10min	23.45 ^c ±0.21
5kV-15min	23.65 ^{bc} ±0.49
10kV-5min	24.95 ^a ±0.35
10kV-10min	22.15 ^d ±0.78
10kV-15min	24.10 ^{abc} ±0.42
15kV-5min	23.40 ^c ±0.00
15kV-10min	24.45 ^{abc} ±1.06
15kV-15min	23.45 ^c ±0.21
20kV-5min	24.45 ^{abc} ±0.35
20kV-10min	24.10 ^{abc} ±0.85
20kV-15min	24.60 ^{abc} ±0.28

a, b, c..... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสดมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสดมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีความนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.8 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อร้อยละผลึกของฟลาวรรีมันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

Sources	P-value
	ร้อยละผลึก
แรงดันไฟฟ้า	0.107 ^{ns}
เวลา	0.099 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.008*

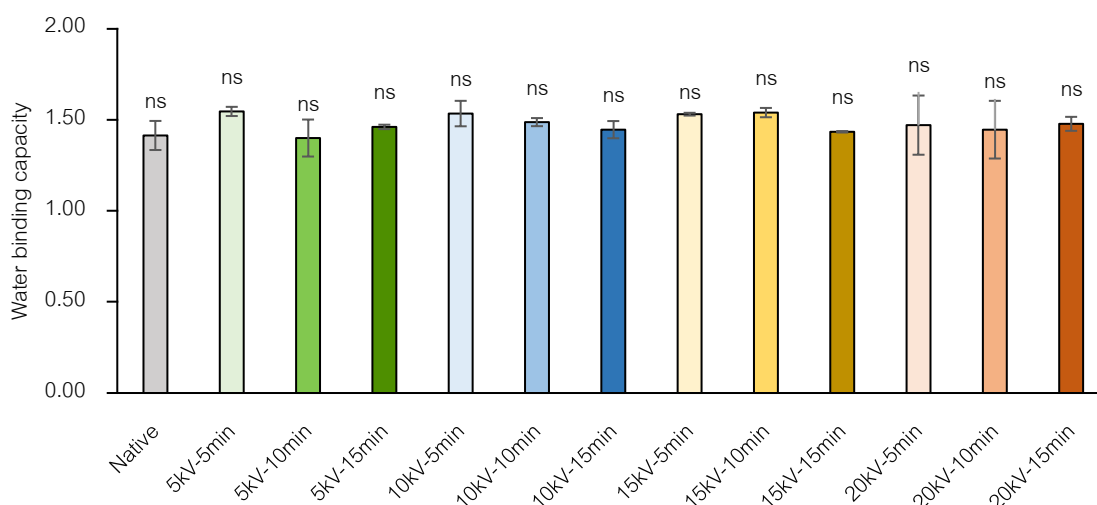
* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2.5 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรันสำปะหลังโม้แห้ง

ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรันสำปะหลังโม้แห้ง (รูปที่ 4.13) พบว่าความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรันสำปะหลังที่ให้พลาสมาไม่แตกต่างกับฟลาวรรันสำปะหลังปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาและฟลาวรรันสำปะหลังปกติอยู่ในช่วง 1.40 ± 0.10 ถึง 1.55 ± 0.03 ทั้งนี้ความสามารถในการจับน้ำไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) อาจเกิดจากระดับความแรงของแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้เมื่อให้พลาสมาอาจไม่มากพอให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรันสำปะหลัง โดยมีรายงานของ Banura และคณะ (2018) ศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพดและมันสำปะหลังด้วยพลาสมาที่ความถี่คลื่นวิทยุที่ความดันต่ำ (low pressure radio frequency plasma) พบว่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชข้าวโพดและมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเมื่อให้พลาสมา ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization) ของสายโซ่กิ่งของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินทำให้เกิดเป็นโมเลกุลน้ำตาล เช่น กลูโคส มอลโตส ซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำไว้มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการจับน้ำมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีผลจากการกัณผิวของพลาสมาซึ่งเกิดจากอนุภาคน้ำอิสระ โดยการกัณผิวของพลาสมาสามารถเพิ่มความชอบน้ำ (hydrophilicity) ให้แก่ผิวของเม็ดสตาร์ช ทำให้ความสามารถในการจับน้ำเพิ่มขึ้น

พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา พบว่าแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่มีผลต่อความสามารถในการจับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) (ตารางที่ 4.9)



รูปที่ 4.13 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.9 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

Sources	P-value
แรงดันไฟฟ้า	0.622 ^{ns}
เวลา	0.053 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.254 ^{ns}

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

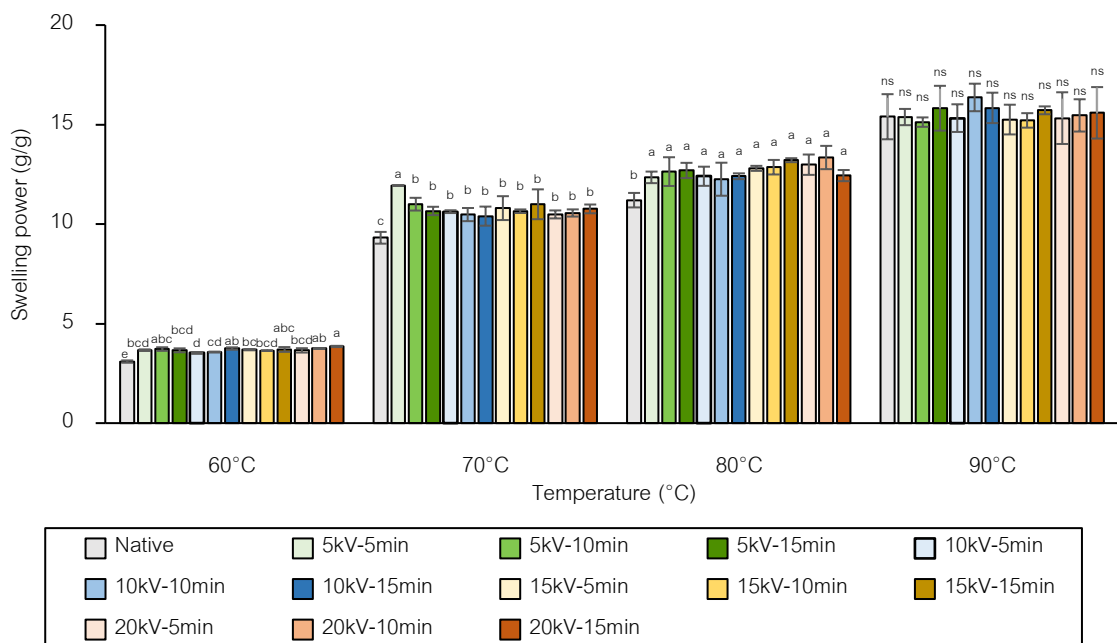
^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2.6 กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้ง

กำลังการพองตัวของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่ากำลังการพองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนสารละลายแขวนลอยของฟลาวรรีม้น โดยที่อุณหภูมิ 60°C มีกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นสูงสุดจาก 3.09±0.06 ถึง 3.85±0.03 กรัม/กรัม

ที่อุณหภูมิ 70°C มีกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นสูงสุดจาก 9.31 ± 0.30 ถึง 11.94 ± 0.02 กรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 80°C มีกำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นสูงสุดจาก 11.20 ± 0.36 ถึง 13.35 ± 0.59 กรัม/กรัม และที่อุณหภูมิ 90°C มีกำลังการพองตัวใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วง 15.12 ± 0.24 ถึง 16.36 ± 0.69 กรัม/กรัม

อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่สารละลายแขวนลอยของฟลาวร์ที่ 60, 70 และ 80°C พบว่าฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมา มีกำลังการพองตัวสูงกว่าฟลาวร์มันสำปะหลังปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากการเกิด ดีพอลิเมอไรเซชันของสตาร์ชที่ทำให้เกิดเป็นน้ำตาลโมเลกุลที่เล็กลงซึ่งสามารถจับน้ำได้มากขึ้น และทำให้กำลังการพองตัวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกัดผิวของพลาสมาที่ทำให้เกิดรอยแตกและรูที่ผิวเม็ดสตาร์ช ซึ่งจะทำให้เกิดการเผยแพร่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับกับน้ำได้มากขึ้น ทำให้ ฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมา มีกำลังการพองตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังปกติ (Banura และคณะ, 2018) นอกจากนี้การกัดผิวยังเป็นการเพิ่มพลังงานที่ผิวของเม็ดสตาร์ชส่งผลให้ความชอบน้ำ (hydrophilicity) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการต้มสารละลายแขวนลอยของฟลาวร์ที่อุณหภูมิสูง 90°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงเพียงพอจะทำให้สารละลายแขวนลอยของฟลาวร์เกิดเจลาติไนเซชันโดยสมบูรณ์ พบว่ากำลังการพองตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมาและฟลาวร์มันสำปะหลังปกติมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



รูปที่ 4.14 กำลังการพองตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา (ตารางที่ 4.10) พบว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 70°C อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าและเวลามีผลต่อกำล้างการฟองตัวอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 และ 90°C พบว่าอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาส่งผลให้กำล้างการฟองตัวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.10 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อกำล้างการฟองตัวของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

Sources	P-value			
	กำล้างการฟองตัว (g/g)			
	60°C	70°C	80°C	90°C
แรงดันไฟฟ้า	0.030*	0.025*	0.118 ^{ns}	0.756 ^{ns}
เวลา	0.024*	0.246 ^{ns}	0.830 ^{ns}	0.591 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.126 ^{ns}	0.134 ^{ns}	0.534 ^{ns}	0.913 ^{ns}

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

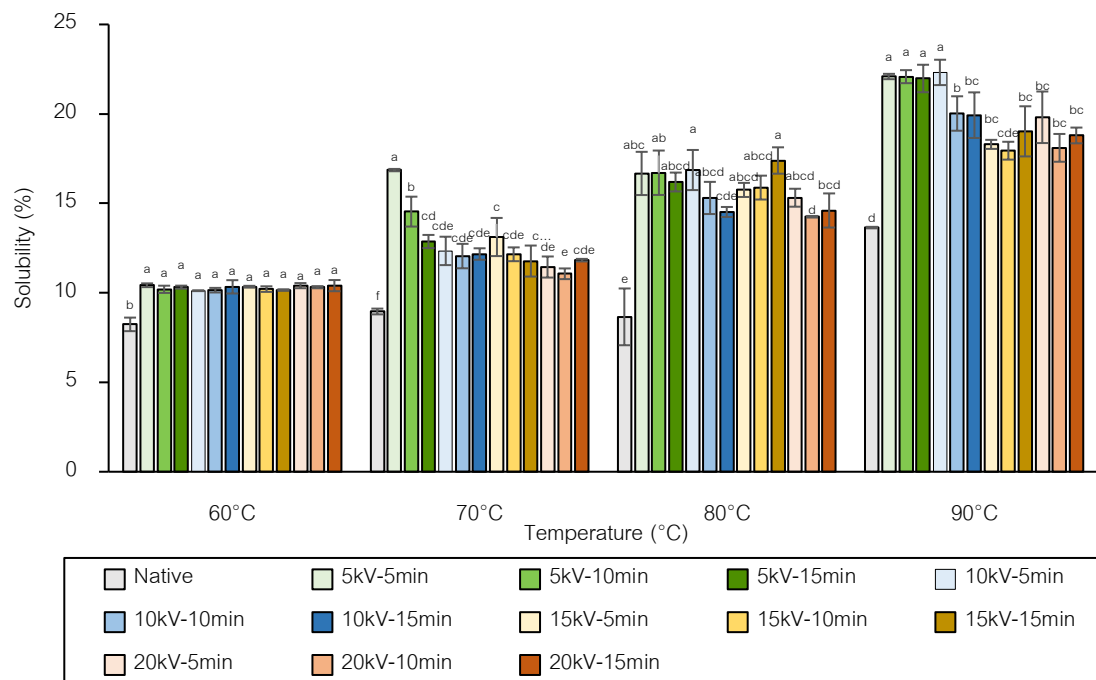
^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ร้อยละการละลายของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม่แห้งแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าร้อยละการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้พลาสมาอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิ 60°C มีร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นสูงสุดจากร้อยละ 8.24±0.38 ถึง 10.42±0.10 ที่อุณหภูมิ 70°C มีร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นสูงสุดจากร้อยละ 8.96±0.16 ถึง 16.86±0.06 ที่อุณหภูมิ 80°C มีร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นสูงสุดจากร้อยละ 8.66±1.59 ถึง 17.40±0.74 และที่อุณหภูมิ 90°C มีร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นสูงสุดจากร้อยละ 13.65±0.04 ถึง 22.32±0.71 โดยร้อยละการละลายที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ให้พลาสมา เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดดีพอลิเมอร์เซชันของสตาร์ซ์ที่ทำให้เกิดโมเลกุลน้ำตาลที่มีขนาดเล็กลงทำให้สามารถละลายได้ง่ายขึ้น ในการกัดผิวของพลาสมาสามารถช่วยเพิ่มพื้นผิวและเผยหมู่ไฮดรอกซิลให้สามารถจับกับน้ำและละลายได้ง่ายขึ้น (Banura และคณะ, 2018) นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ เช่น โพรตีน โดยในงานวิจัยของ Bahrami และคณะ (2016) ศึกษาการดัดแปรฟลาวร์ข้าวสาลี โดยพบว่ากำล้างการให้พลาสมาไม่ส่งผลต่อปริมาณ

โปรตีนอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่มีแนวโน้มว่าสัดส่วนของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีสัดส่วนเพิ่มสูงขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของโปรตีนแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งเกิดจากการให้พลาสมา

เมื่อเปรียบเทียบเฉพาะตัวอย่างฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมา พบว่าฟลาวอร์ที่ให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นมีร้อยละการละลายลดลงที่อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่สารละลายแขวนลอยของฟลาวอร์ 70, 80 และ 90°C สันนิษฐานว่าอาจเกิดการเชื่อมข้ามของโมเลกุลสตาร์ชโดยมีงานวิจัยของ Zou และคณะ (2004) พบว่าสตาร์ชสามารถเกิดการเชื่อมข้ามเมื่อมีการให้พลาสมาแบบโกลว์ดีจาร์จ โดยกลไกการเชื่อมข้ามเกิดจากปลายรีดิวซ์ของพอลิแซ็กคาไรด์สองสาย (C-OH) และเกิดการเชื่อม C-O-C ใหม่ระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองสาย ทำให้เกิดการเชื่อมข้ามและเกิดการหลุดออกของโมเลกุลน้ำ จึงเห็นได้ว่าการละลายมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า แต่ยังคงมีการละลายสูงกว่า ฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งปกติ

พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา (ตารางที่ 4.11) พบว่าที่อุณหภูมิ 60°C อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่ส่งผลต่อร้อยละการละลายอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ที่อุณหภูมิ 70°C อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาส่งผลต่อร้อยละการละลายอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และที่อุณหภูมิ 80 และ 90°C อิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าส่งผลต่อร้อยละการละลายอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



รูปที่ 4.15 ร้อยละการละลายของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.11 ทริพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อร้อยละการละลายของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

Sources	P-value			
	ร้อยละการละลาย (%)			
	60°C	70°C	80°C	90°C
แรงดันไฟฟ้า	0.360 ^{ns}	0.000*	0.008*	0.000*
เวลา	0.467 ^{ns}	0.003*	0.312 ^{ns}	0.073 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.748 ^{ns}	0.008*	0.103 ^{ns}	0.264 ^{ns}

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2.7 สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้ง

สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้ง (ตารางที่ 4.12) พบว่าฟลาร์วอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมา มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงกว่าฟลาร์วอร์มันสำปะหลังปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยสันนิษฐานว่าในการให้พลาสมาทำให้เกิดกลไกแตกต่างกัน ได้แก่ ดีพอลิเมอไรเซชัน การเชื่อมข้าม และการกัดผิว โดยอนุมูลอิสระจากพลาสมา ซึ่งที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าต่ำในช่วง 5 ถึง 10 กิโลโวลต์ มีแนวโน้มที่สามารถเกิดการเชื่อมข้ามได้มากกว่าการเกิดดีพอลิเมอไรเซชัน และในช่วงแรงดันไฟฟ้าสูง 15 ถึง 20 กิโลโวลต์ มีแนวโน้มว่าเกิดการดีพอลิเมอไรเซชันมากกว่าการเชื่อมข้าม ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมข้ามที่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชได้ แต่เมื่อให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น การแยกพันธะไกลโคซิดิกของโมเลกุลสตาร์ชโดยดีพอลิเมอไรเซชันสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่าเนื่องจากได้รับพลังงานสูงขึ้นและการมีพื้นที่จำกัดในการเกิดการเชื่อมข้ามที่ผิวของเม็ดสตาร์ช (Chaiwat และคณะ, 2016) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการเชื่อมข้ามของโมเลกุลสตาร์ชโดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดพลาสมาจะทำอันตรกิริยากับโมเลกุลสตาร์ชเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมข้าม (Morent และคณะ, 2011) และเมื่อพิจารณาเฉพาะตัวอย่างที่ผ่านการให้พลาสมา พบว่าเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากที่แรงดันไฟฟ้าสูงมีแนวโน้มที่จะเกิดดีพอลิเมอไรเซชันมากกว่าการเชื่อมข้าม มีรายงานของ Bie และคณะ (2016) ศึกษาผลของพลาสมาโดยใช้แก๊สฮีเลียมต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของฟลาร์วอร์มันสำปะหลัง พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงขึ้นเมื่อให้พลาสมาเนื่องจากเกิดการเชื่อมข้ามของสายโซ่สตาร์ช

พิจารณาเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยฟลาร์วอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมา มีเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดสูงกว่าฟลาร์วอร์มันสำปะหลังปกติ บ่งบอกได้ว่าฟลาร์วอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมา มีความคงทนต่อความร้อนและแรงเฉือนมากขึ้น

ฟลาร์วอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมา มีความหนืดสูงสุดลดลงเมื่อเทียบกับฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้งปกติ และในตัวอย่างฟลาร์วอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยความหนืดสูงสุดที่ลดลงเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดดีพอลิเมอไรเซชันเมื่อให้พลาสมา โดยงานวิจัยของ Lii และคณะ (2002b) ศึกษาการให้พลาสมาแก่สตาร์ชมันฝรั่งพบว่ามีความหนืดลดลงเนื่องจากการเกิดดีพอลิเมอไรเซชัน โดยอนุมูลอิสระ เช่น ไฮดรอกซิล และไอโซน

สามารถแยกพันธะระหว่าง C2 และ C3 และพันธะไกลโคซิดิกระหว่างโมเลกุลสตาร์ชนำไปสู่การเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Thirumdas และคณะ 2017) นอกจากนี้การกระจายขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชยังส่งผลต่อความหนืดเช่นกัน โดยฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาจะเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้ขนาดอนุภาคของเม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง หรือเกิดเป็นน้ำตาลโมเลกุลที่เล็กลง ส่งผลให้ขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอและมีการกระจายของขนาดอนุภาคสูงขึ้นซึ่งเป็นผลให้ความหนืดลดลงเนื่องจากโมเลกุลที่มีขนาดอนุภาคเล็กสามารถเข้าไปแทรกเติมเต็มภายในช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งเป็นการลดอิทธิพลของโมเลกุลที่ขนาดอนุภาคที่เล็กต่อความหนืด ให้ความหนืดโดยรวมของสารละลายลดลง

เมื่อพิจารณาความหนืดต่ำสุด พบว่าฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมามีความหนืดต่ำสุดลดลง และเมื่อพิจารณาเฉพาะตัวอย่างฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมาพบว่าความหนืดต่ำสุดมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าและเวลาในการให้พลาสมา ซึ่งส่งผลให้ค่า breakdown หรือผลต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุด ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนและความร้อนมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมาสามารถทนต่อแรงเฉือนและความร้อนได้ดีกว่าฟลาวร์มันสำปะหลังปกติ สอดคล้องกับผลของเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดที่มีค่าเพิ่มขึ้น

ความหนืดสุดท้ายของฟลาวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมามีค่าลดลงเมื่อเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังปกติ ส่งผลให้ค่าการคืนตัว (setback) ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดรีโทรเกรเดชันของฟลาวร์มันสำปะหลังมีค่าลดลง โดยฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมามีค่าการคืนตัวน้อยกว่าฟลาวร์มันสำปะหลังปกติเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวของสายโซ่ตรงของโมเลกุลสตาร์ช โดยเมื่อพิจารณา ฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำมีค่าการคืนตัวต่ำกว่าที่แรงดันไฟฟ้าสูง เนื่องจากในช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำ 5 ถึง 10 กิโลโวลต์ มีแนวโน้มในการเกิดการเชื่อมข้ามมากกว่า ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้โมเลกุลสตาร์ชที่ขนาดใหญ่ขึ้นมีโอกาสเกิดรีโทรเกรเดชันที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่แรงดันไฟฟ้าสูงช่วง 15 ถึง 20 กิโลโวลต์ ที่มีโอกาสเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้ความยาวของโมเลกุลสตาร์ชสายตรงสั้นลง อย่างไรก็ตามกลไกเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลสตาร์ชส่งผลให้ค่าการคืนตัวลดลงเมื่อเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังปกติที่ไม่ได้ให้พลาสมา

ตารางที่ 4.12 สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวอร์มินสำหรับแป้งและฟลาวอร์มินสำหรับแป้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	Pasting			Pasting viscosity (cP)				
	temperature (°C)	Peak time (min)	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown ^{ns}	Final viscosity	Setback	
Native	74.0 ^d ±0.6	4.1 ^c ±0.2	3262.0 ^a ±49.5	1199.0 ^a ±49.5	2063.0±99.0	1987.5 ^a ±31.8	788.5 ^a ±17.7	
5kV-5min	75.2 ^{abc} ±0.1	4.4 ^{ab} ±0.0	2324.0 ^b ±94.8	544.5 ^d ±19.1	1779.5±75.7	727.5 ^d ±17.7	183.0 ^e ±1.4	
5kV-10min	75.1 ^{abc} ±0.0	4.4 ^{ab} ±0.0	2361.5 ^b ±65.8	556.5 ^{cd} ±23.3	1805.0±42.4	752.0 ^d ±32.5	195.5 ^e ±9.2	
5kV-15min	76.0 ^a ±0.0	4.5 ^a ±0.0	2357.0 ^b ±59.4	549.0 ^d ±15.6	1808.0±43.8	737.5 ^d ±7.8	188.5 ^e ±7.8	
10kV-5min	75.3 ^{abc} ±0.1	4.4 ^{ab} ±0.0	2351.0 ^b ±58.0	575.5 ^{bcd} ±23.3	1775.5±34.6	782.5 ^{cd} ±20.5	207.0 ^{cde} ±2.8	
10kV-10min	74.8 ^{bcd} ±0.5	4.4 ^{ab} ±0.0	2349.0 ^b ±87.7	564.0 ^{cd} ±9.9	1785.0±77.8	777.5 ^{cd} ±20.5	213.5 ^{bcd} ±30.4	
10kV-15min	75.6 ^{ab} ±0.6	4.4 ^{ab} ±0.0	2311.5 ^b ±26.2	564.0 ^{cd} ±12.7	1747.5±13.4	766.5 ^{cd} ±13.4	202.5 ^{de} ±0.7	
15kV-5min	74.8 ^{bcd} ±0.6	4.4 ^{ab} ±0.0	2364.0 ^b ±120.2	612.0 ^{bcd} ±17.0	1752.0±103.2	855.0 ^{bc} ±26.9	243.0 ^{bcd} ±9.9	
15kV-10min	4.8 ^{bcd} ±0.6	4.4 ^{ab} ±0.0	2359.5 ^b ±71.4	611.0 ^{bcd} ±1.4	1748.5±70.0	860.0 ^{bc} ±14.1	249.0 ^{bc} ±12.7	
15kV-15min	74.8 ^{bcd} ±0.6	4.4 ^{ab} ±0.0	2379.0 ^b ±56.6	607.0 ^{bcd} ±9.9	1772.0±66.5	851.0 ^{bc} ±7.1	244.0 ^{bcd} ±2.8	
20kV-5min	74.8 ^{bcd} ±0.5	4.4 ^{ab} ±0.0	2317.5 ^b ±12.0	600.0 ^{bcd} ±15.6	1717.5±27.6	822.0 ^{bcd} ±53.7	222.0 ^{bcd} ±38.2	
20kV-10min	74.8 ^{bcd} ±0.5	4.4 ^{ab} ±0.0	2372.0 ^b ±123.0	640.0 ^b ±42.4	1732.0±80.6	893.0 ^b ±56.6	253.0 ^b ±14.1	
20kV-15min	74.3 ^{cd} ±0.1	4.3 ^b ±0.0	2434.0 ^b ±264.5	627.5 ^{bc} ±71.4	1806.5±193.0	884.5 ^b ±103.9	257.0 ^b ±32.5	

a, b, c, ... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสตรัมหมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสตรัมมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าส่งผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาตินเซชัน เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัวอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อิทธิพลของเวลาและอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่ส่งผลต่อสมบัติการเกิดเพสต์อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.13 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อสมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวัวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่าง

Sources	P-value						
	Pasting Temperature (°C)	Peak time (min)	Peak viscosity	Trough viscosity	Pasting viscosity (cP) Breakdown	Final viscosity	Setback
แรงดันไฟฟ้า	0.027*	0.007*	0.922 ^{ns}	0.002*	0.780 ^{ns}	0.000*	0.000*
เวลา	0.388 ^{ns}	0.274 ^{ns}	0.838 ^{ns}	0.782 ^{ns}	0.803 ^{ns}	0.527 ^{ns}	0.336 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.295 ^{ns}	0.405 ^{ns}	0.971 ^{ns}	0.900 ^{ns}	0.960 ^{ns}	0.824 ^{ns}	0.810 ^{ns}

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.2.8 ค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของฟลาวัวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์มันสำปะหลังไม่แห้ง

ค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของฟลาวัวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์มันสำปะหลังไม่แห้งแสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่าค่า L^* a^* และ b^* ซึ่งแสดงถึงความสว่าง ความเป็นสีแดง และความเป็นสีเหลืองตามลำดับ และค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างฟลาวัวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมาและฟลาวัวร์มันสำปะหลังปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าที่ระดับความแรงของพลาสมาที่ศึกษาไม่ส่งผลต่อดัชนีความขาวซึ่งเป็นลักษณะปรากฏที่สำคัญของฟลาวัวร์มันสำปะหลัง อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา พบว่าอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่ส่งผลต่อค่าสี L^* a^* b^* และดัชนีความขาวอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.14 ค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของฟลาวาร์มันส์สำหรับปลาทูน่าแช่แข็งและฟลาวาร์มันส์สำหรับปลาทูน่าแช่แข็งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ค่าสี			ดัชนีความขาว ^{ns}
	L^* ^{ns}	a^* ^{ns}	b^* ^{ns}	
Native	64.4±1.0	-1.3±0.1	4.4±0.7	64.1±0.9
5kV-5min	67.5±4.2	-0.6±0.8	6.8±3.8	66.6±3.3
5kV-10min	65.0±0.0	-1.0±0.0	3.8±0.0	64.8±0.0
5kV-15min	64.5±0.0	-1.0±0.0	4.0±0.0	64.3±0.0
10kV-5min	65.6±0.0	-1.0±0.0	4.1±0.0	65.3±0.0
10kV-10min	64.9±0.0	-1.0±0.0	3.8±0.0	64.7±0.0
10kV-15min	66.3±0.1	-1.1±0.1	4.0±0.1	66.0±0.1
15kV-5min	64.3±0.0	-1.0±0.0	3.7±0.0	64.1±0.0
15kV-10min	66.9±0.1	-1.1±0.0	4.2±0.0	66.6±0.1
15kV-15min	64.2±0.0	-1.0±0.0	3.8±0.0	63.9±0.0
20kV-5min	64.1±0.1	-1.0±0.0	3.6±0.0	63.9±0.1
20kV-10min	64.4±0.0	-1.1±0.0	3.6±0.0	64.2±0.0
20kV-15min	65.9±0.1	-1.1±0.0	4.0±0.0	65.6±0.1

a, b, c..... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสดมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสดมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.15 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของฟลาวาร์มันส์สำหรับปลาทูน่าแช่แข็งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

Sources	P-value			
	L^* ^{ns}	a^* ^{ns}	b^* ^{ns}	ดัชนีความขาว
แรงดันไฟฟ้า	0.583	0.606	0.324	0.534 ^{ns}
เวลา	0.967	0.520	0.426	0.988 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า × เวลา	0.061	0.495	0.301	0.029*

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้นของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง แรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไฮยาไนต์ในฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

4.3.1 จลนศาสตร์การลดลงของไฮยาไนต์ในฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

จลนศาสตร์การลดลงของไฮยาไนต์ในฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าการลดลงของไฮยาไนต์ที่ระดับความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้นและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการให้พลาสมาเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง โดยเมื่อเปรียบเทียบอัตราการลดลงของไฮยาไนต์ (k) ที่ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้นเท่ากัน พบว่าเมื่อระดับแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราการลดลงจะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยที่ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 232.60 ppm สามารถลดปริมาณไฮยาไนต์ได้สูงสุดเหลือ 199.47 ± 16.34 , 160.24 ± 7.63 และ 138.26 ± 12.47 ppm ที่ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 143.18 ppm สามารถลดปริมาณไฮยาไนต์ได้สูงสุดเหลือ 122.59 ± 4.96 , 93.87 ± 9.26 และ 81.50 ± 2.59 ppm ที่ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 69.16 ppm สามารถลดปริมาณไฮยาไนต์ได้สูงสุดเหลือ 54.09 ± 0.99 , 52.37 ± 3.03 และ 52.28 ± 1.28 ppm เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 232.60 และ 143.18 ppm ปริมาณไฮยาไนต์มีการลดลงเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการลดลงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเกิดจากการเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าเป็นการเพิ่มความแรงของพลาสมาทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้มากและเร็วขึ้น ทำให้มีอนุมูลอิสระที่พร้อมจะทำปฏิกิริยากับไฮยาไนต์เพื่อเปลี่ยนไฮยาไนต์ไปเป็น NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , N_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} และสารประกอบสบู่ ที่มีความเป็นพิษน้อยลงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดไฮยาไนต์สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการลดลงที่สูงขึ้นเช่นกัน แต่ที่ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 69.16 ppm มีปริมาณไฮยาไนต์ที่ลดลงใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้า ส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการลดลงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณไฮยาไนต์เริ่มต้นที่น้อยเกินไปทำให้โอกาสในการทำปฏิกิริยากันระหว่างอนุมูลอิสระและไฮยาไนต์ลดลงตามไปด้วย จึงทำให้ปริมาณไฮยาไนต์ลดลงใกล้เคียงกันแม้จะเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าก็ตาม

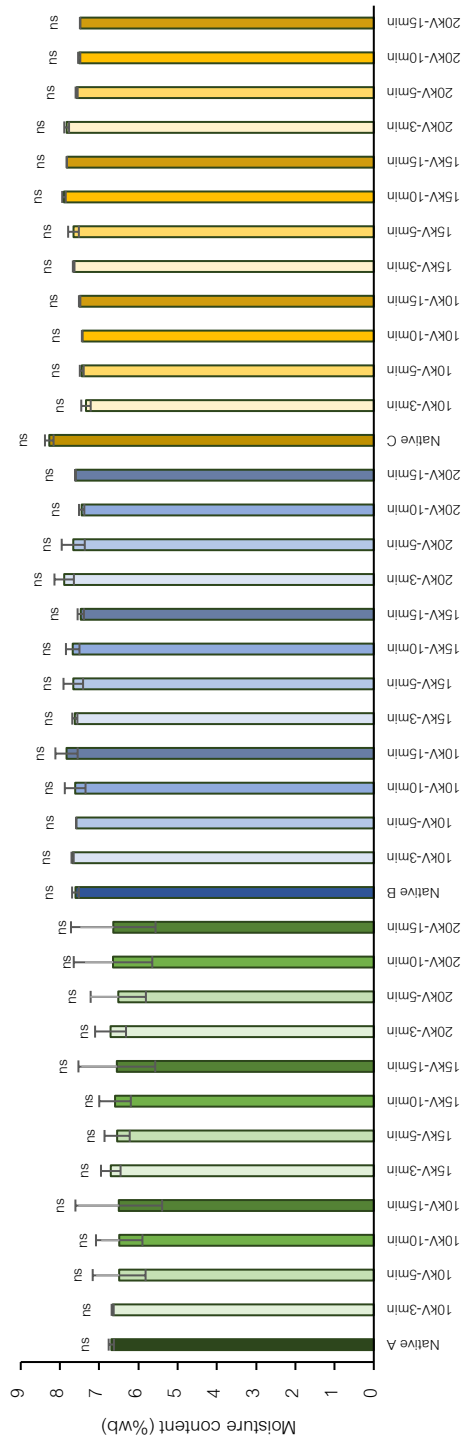
พิจารณาอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น และแรงดันไฟฟ้า (ตารางที่ 4.17) พบว่าอิทธิพลของความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น แรงดันไฟฟ้า และอันตรกิริยาระหว่าง

ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นและแรงดันไฟฟ้า ส่งผลต่อค่าคงที่อัตราการลดลงของไซยาไนด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

4.3.2 ปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

ปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่าปริมาณความชื้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทุกตัวอย่าง ($p \leq 0.05$) เนื่องจากความแรงของแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการให้พลาสมาไม่สูงเพียงพอให้เกิดความร้อนจนทำให้น้ำที่อยู่ภายในฟลาวรรีม้นสามารถระเหยออกไปได้ จึงทำให้มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกับฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ไม่ได้ให้พลาสมา ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า และเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้ง

อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณความชื้น ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า และเวลา โดยพบว่าอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้า เวลา และอันตรกิริยาระหว่างแรงดันไฟฟ้าและเวลาไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) แต่ฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผลิตจากวัตถุดิบมันสำปะหลังที่ได้รับในเวลาแตกต่างกันมีความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นต่างกัน มีปริมาณความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.18)



รูปที่ 4.16 ปริมาณความชื้นของพลารัมน์สำหรับสภาวะแห้งไม่แห้งและพลารัมน์สำหรับความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.16 ค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณไฮโดรเจนของพลารัมน์สำหรับสภาวะแห้งไม่แห้งที่มีความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ความชื้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนในพลารัมน์สำหรับสภาวะแห้ง (ppm)	232.60	143.18	69.16 ^{ns}
	k (ppm.min ⁻¹)	R ²	k (ppm.min ⁻¹)	R ²
10 kV	-0.0119 ^{Ab} ±0.0029	0.748-0.884	-0.0116 ^{Ab} ±0.0004	0.846-0.895
15 kV	-0.0290 ^{Bb} ±0.0001	0.883-0.917	-0.0372 ^{Cb} ±0.0045	0.825-0.917
20 kV ^{ns}	-0.0349 ^b ±0.0057	0.646-0.821	-0.0453 ^b ±0.0028	0.734-0.751
				-0.0207 ^B ±0.0005
				-0.0206 ^A ±0.0001
				-0.0204±0.0034

- A, B, C.....ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละแถวหมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- a, b, c.....ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสตรัมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละแถวและสตรัมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ค่า k เป็นบวก สำหรับปฏิกริยาอันดับที่หนึ่ง หมายความว่า ปริมาณไฮยาไนด์เพิ่มขึ้น
- ค่า k เป็นลบ สำหรับปฏิกริยาอันดับที่หนึ่ง หมายความว่า ปริมาณไฮยาไนด์ลดลง

ตารางที่ 4.17 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อค่าคงที่อัตราการลดลงของไฮยาไนด์ของฟลาโวนอยด์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลังงานที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

Sources	P-value
ความเข้มข้นไฮยาไนด์	0.001*
แรงดันไฟฟ้า	0.000*
ความเข้มข้นไฮยาไนด์ x แรงดันไฟฟ้า	0.000*

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p ≤ 0.05)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p > 0.05)

ตารางที่ 4.18 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษาต่อปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน

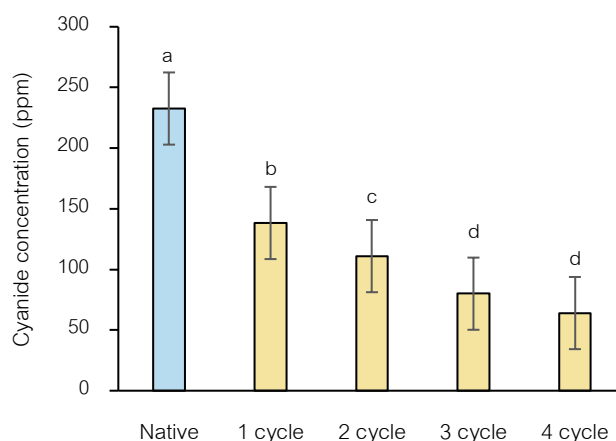
Sources	P-value
	ปริมาณความชื้น (%wb)
แรงดันไฟฟ้า	0.667 ^{ns}
เวลา	0.889 ^{ns}
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.964 ^{ns}
ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น	0.000*

* ที่กำกับที่ P-value แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

^{ns} ที่กำกับที่ P-value แสดงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.3.3 ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่แตกต่างกัน

ปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าปริมาณไซยาไนด์มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเพิ่มจำนวนรอบในการให้พลาสมา และปริมาณไซยาไนด์จะเริ่มคงที่เมื่อให้พลาสมาตั้งแต่รอบที่ 3 ขึ้นไป โดยในตัวอย่าง ฟลาวรรีม้นสำปะหลังมีไซยาไนด์เริ่มต้น 232.60 ppm และเมื่อให้พลาสมาจะลดลงเหลือ 138.26 ± 12.47 , 110.94 ± 4.31 , 79.96 ± 4.68 และ 64.00 ± 0.05 ppm เมื่อให้พลาสมา 1, 2, 3 และ 4 รอบ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดระหว่างการให้พลาสมาสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไซยาไนด์ เพื่อเปลี่ยนให้ไซยาไนด์กลายเป็นสารประกอบที่มีความเป็นพิษลดลง ได้แก่ NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , N_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} และสารประกอบสูง เป็นต้น โดยการให้พลาสมาในรอบที่ 3 และ 4 พบว่าปริมาณการลดลงของไซยาไนด์มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ทั้งนี้มีแนวโน้มว่าที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นน้อย ประสิทธิภาพการกำจัดไซยาไนด์จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากโอกาสของการทำปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระจากพลาสมากับไซยาไนด์จะน้อยลงตามไปด้วย ทำให้ปริมาณไซยาไนด์ที่ลดลงในรอบที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับการให้พลาสมาในรอบที่ 4 และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

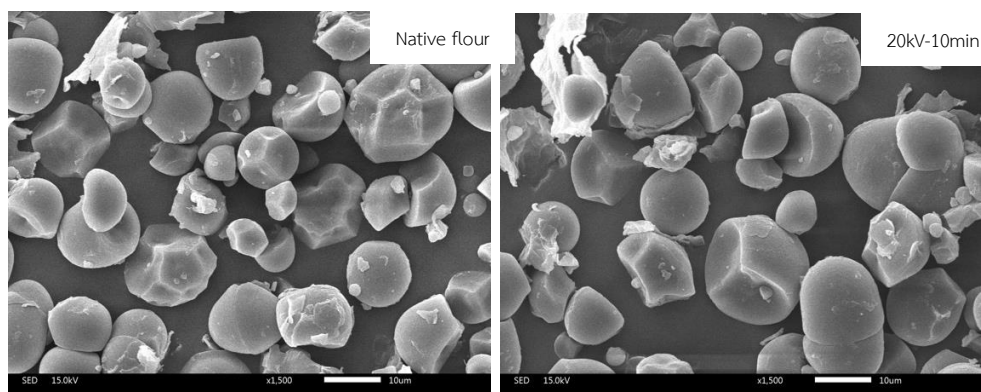


รูปที่ 4.17 ปริมาณไซยาไนด์ของพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งและพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่แตกต่างกัน

4.3.4 สมบัติทางเคมีและกายภาพของพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งและพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

4.3.4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งและพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

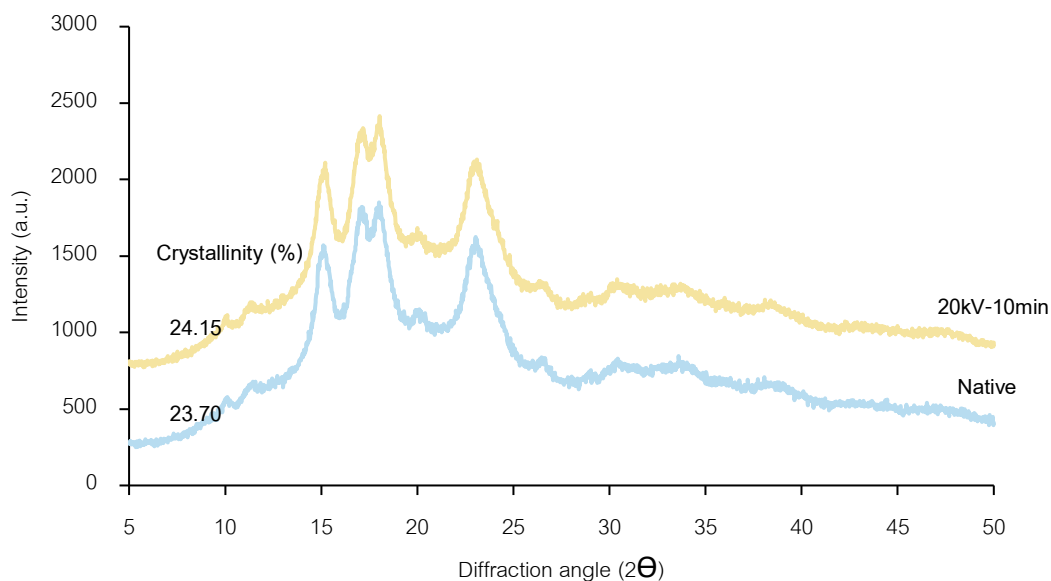
ลักษณะรูปร่าง และพื้นผิวของพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งและพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที พบว่ามีส่วนของรอยแตกและรูเกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้น และเม็ดสตาร์ชมีลักษณะของรูปร่างที่ไม่ชัดเจน มีการเสียหายของเม็ดสตาร์ชมาก ซึ่งการเกิดรอยแตกและรูล้วนเป็นผลมาจากการกัดผิวของพลาสมา ทั้งนี้การผลิตพลาว์มันสำปะหลังที่ใช้ในการศึกษาทำโดยใช้วิธีไม่แห้งที่ทำให้เกิดการเสียหายของเม็ดสตาร์ชมาก และมีการเสียรูปร่างอยู่แล้ว (รูปที่ 4.18)



รูปที่ 4.18 รูปร่าง และพื้นผิวของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1500x

4.3.4.2 โครงสร้างผลึก และปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความเป็นผลึกภายในฟลาวร์ของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าโครงสร้างผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ให้พลาสมาและฟลาวร์มันสำปะหลังปกติมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยมีพีคที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 10° , 11° , 15° , 17° , 18° , 24° และ 26° มุม 2θ จัดเป็นผลึกแบบ A ทั้งนี้รูปแบบผลึกที่ไม่เปลี่ยนแปลงหลังให้พลาสมาแสดงให้เห็นว่าพลาสมาไม่ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลัง และเมื่อพิจารณาปริมาณร้อยละผลึกดังตารางที่ 4.19 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 23.70 ± 0.28 ถึง 24.15 ± 0.07 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)



รูปที่ 4.19 X-ray diffractogram ของฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งและฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

ตารางที่ 4.19 ร้อยละผลึกของฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งและฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	ร้อยละผลึก ^{ns}
Native	23.70±0.28
10kV-10min	24.15±0.07

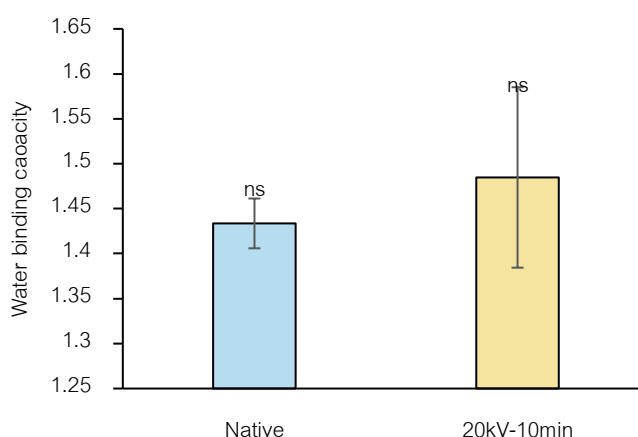
a, b, c..... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสดมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสดมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.3.4.3 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งและฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งและฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที แสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าความสามารถในการจับน้ำไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ระหว่างตัวอย่างฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาและฟลาวรร่วมน้ำสำหรับแม่แห้งปกติ เนื่องจากระดับความแรงของแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ใช้เมื่อให้พลาสมาอาจไม่มากพอให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการ

จับน้ำของฟลาวรรีม้นสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเรื่องการการศึกษามวลของแรงดันไฟฟ้า และเวลาต่อปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ



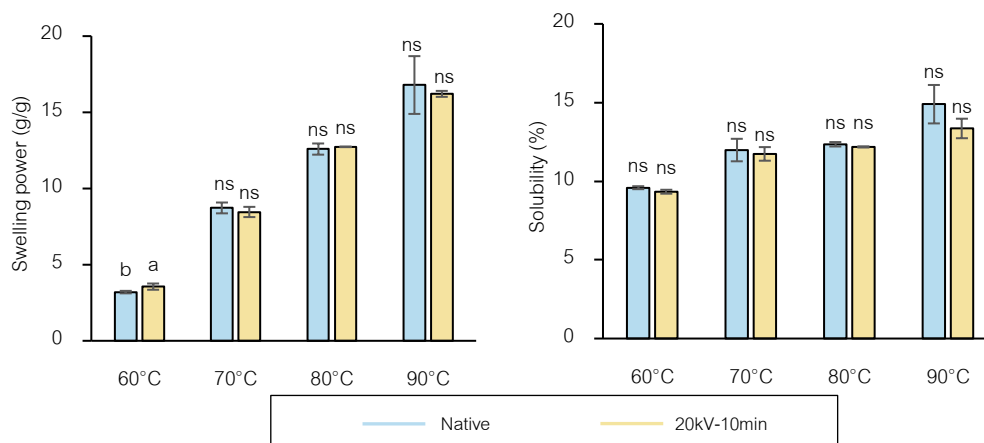
รูปที่ 4.20 ความสามารถในการจับน้ำของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

4.3.4.4 กำลัการพองตัวและร้อยละการละลายของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

กำลัการพองตัวของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที (รูปที่ 4.21) พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่สารละลายแขวนลอยของฟลาวร์ที่ 60°C ฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมามีกำลัการพองตัวมากกว่า ฟลาวรรีม้นสำปะหลังปกติ เนื่องจากการฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมา โมเลกุลของสตาร์อาจเกิดดีพอลิเมอไรเซชันทำให้สามารถพองตัวได้มากขึ้นแม้จะใช้อุณหภูมิที่ต่ำ นอกจากนี้ยังมีผลด้านการกัดผิวของพลาสมาที่ทำให้เกิดรอยแตกและรูบนผิวเม็ดสตาร์ซึ่งทำให้สามารถพองตัวได้ดีขึ้น แต่ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนสารละลายแขวนลอยของฟลาวร์สูงขึ้นอย่างที 70, 80 และ 90°C พบว่าฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ให้พลาสมามีกำลัการพองตัวไม่แตกต่างกับฟลาวรรีม้นสำปะหลังปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการเจลาติไนเซชันสมบูรณ์ในตัวอย่างทั้งสอง

ร้อยละการละลายของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที (รูปที่ 4.21) พบว่าฟลาวรรีม้นสำปะหลังและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ให้พลาสมามีร้อยละการละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p > 0.05$) ที่ทุกอุณหภูมิการให้ความร้อนแก่สารละลายแขวนลอยของฟลาวัวร์ ซึ่งอาจเกิดจากการเกิดดีพอลิเมอร์เซชันที่ไม่มากเพียงพอให้เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.21 กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายของฟลาวัวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวัวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

4.3.4.5 สมบัติการเกิดเฟสค์ของฟลาวัวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวัวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

สมบัติการเกิดเฟสค์ของฟลาวัวร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวัวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที แสดงในตารางที่ 4.20 โดยพบว่าอุณหภูมิและเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดของฟลาวัวร์มันสำปะหลังทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับกำลังการพองตัวและร้อยละการละลายที่มีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างฟลาวัวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมาและฟลาวัวร์มันสำปะหลังปกติ โดยมีรายงานว่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายที่มากขึ้นสามารถลดอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันได้

ความหนืดสูงสุดของฟลาวัวร์มันสำปะหลังลดลงเมื่อให้พลาสมาเปรียบเทียบกับฟลาวัวร์มันสำปะหลังปกติ โดยอาจเกิดจากดีพอลิเมอร์เซชันของโมเลกุลสตาร์ชที่ถูกเหนี่ยวนำโดยอนุมูลอิสระจากพลาสมา หรือเกิดจากสัดส่วนของปริมาณโปรตีนที่มีการเปลี่ยนแปลงดังรายงานของ Bahrani และคณะ (2016) พบว่าการเชื่อมข้ามเป็นการยับยั้งการพองตัวส่งผลให้ความหนืดลดลง

ความหนืดต่ำสุดของฟลาวัวร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมามีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับฟลาวัวร์มันสำปะหลังปกติ และมีผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุดหรือค่า breakdown ไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาความหนืดสุดท้าย พบว่าความหนืดสุดท้ายมีการลดลงเมื่อให้พลาสติก แต่ไม่ส่งผลต่อค่าการคืนตัวหรือ setback ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดรีโทรเกรเดชัน โดยค่าการคืนตัวระหว่างตัวอย่างพลาสติกทั้งสองชนิดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

4.3.4.6 ค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของพลาสติกน้ำมันสำปะหลังไม่แห้งและพลาสติกน้ำมันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

ค่าสี (L^* a^* b^*) และดัชนีความขาวของพลาสติกน้ำมันสำปะหลังไม่แห้งและพลาสติกน้ำมันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที แสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าค่า L^* และ b^* ซึ่งแสดงถึงความสว่างและความเป็นสีเหลืองของพลาสติกที่ผ่านการให้พลาสติกมีการลดลง แต่ค่า a^* ซึ่งแสดงถึงความเข้มสีแดงไม่แตกต่างกันระหว่างตัวอย่างพลาสติกทั้งสองชนิด ทั้งนี้ค่าดัชนีความขาวของพลาสติกน้ำมันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสติกพบว่ามีการลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพลาสติกน้ำมันสำปะหลังปกติ เนื่องจากการให้พลาสติกสามารถทำให้เกิดความร้อนที่อุณหภูมิไม่เกิน 40°C แต่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ในพลาสติกน้ำมันสำปะหลัง ส่งผลให้เกิดสีที่คล้ำขึ้นและมีค่าดัชนีความขาวลดลง

ตารางที่ 4.20 สมบัติการเกิดเพสต์ของฟลาวอร์มินสำหรับแป้งและฟลาวอร์มินสำหรับแป้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

ตัวอย่าง	Pasting viscosity (cP)					Setback ^{ns}	
	Pasting Temperature ^{ns} (°C)	Peak time ^{ns} (min)	Peak viscosity	Trough viscosity	Breakdown ^{ns}		Final viscosity
Native	75.5±0.6	4.3±0.0	2899.0 ^a ±52.3	1319.0 ^a ±52.3	1580.0±33.9	1786.5 ^a ±4.9	467.5±13.4
20kV-10min	75.6±0.5	4.4±0.0	2595.5 ^b ±24.7	1099.5 ^b ±24.7	1496.0±32.5	1540.0 ^b ±12.7	440.5±20.5

a, b, c, ... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสตมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสตมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.21 ค่าสี (L* a* b*) และดัชนีความขาวของฟลาวอร์มินสำหรับแป้งและฟลาวอร์มินสำหรับแป้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

ตัวอย่าง	Color value		Whiteness index	
	L*	a* ^{ns} b*		
Native	65.49 ^a ±0.01	-1.00±0.03	6.66 ^a ±0.04	64.84 ^a ±0.01
20kV-10min	64.10 ^b ±0.13	-0.92±0.03	6.17 ^b ±0.02	63.56 ^b ±0.13

a, b, c, ... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละสตมภ์หมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละสตมภ์มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.3.4.7 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที (ตารางที่ 4.22) พบว่าปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ มีค่าไม่แตกต่างกันระหว่างฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ให้พลาสมากับ ฟลาวอร์มันสำปะหลังปกติ แต่ฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมามีปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นและคาร์โบไฮเดรตลดลงเมื่อเทียบกับฟลาวอร์มันสำปะหลังปกติ โดยเถ้าหมายถึงส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่ภายหลังจากเผาไหม้ ซึ่งอาจเกิดจากฟลาวอร์ที่ผ่านการให้พลาสมาซึ่งทำให้เกิดการดีพอลิเมอไรเซชันและการกัดผิวขึ้น ทำให้มีส่วนขององค์ประกอบทางเคมีที่ถูกตัดให้เปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณแร่ธาตุเพิ่มขึ้น และมีส่วนของคาร์โบไฮเดรตลดลง โดยมีรายงานของ Thirumdas และคณะ (2016) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์ข้าวบาสมตี (basmati rice) ที่ผ่านการให้พลาสมาแบบโกลว์ดิจชาร์จ พบว่าฟลาวอร์ข้าวบาสมตีที่ผ่านการให้พลาสมาที่กำลังไฟฟ้าสูงชันมีปริมาณความชื้นลดลง และมีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น โดยความชื้นที่ลดลงอาจเกิดจากโมเลกุลของน้ำที่ถูกเหนี่ยวนำให้เปลี่ยนไปเป็นอนุมูลอิสระของออกซิเจน (reactive oxygen species) นอกจากนี้ การกัดผิวจากพลาสมาอาจทำให้เกิดการระเหยของความชื้นบริเวณพื้นผิว ทำให้มีปริมาณความชื้นลดลง ในงานวิจัยของ Chen และคณะ (2014) พบว่าการให้พลาสมาไม่ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้อง

รูปที่ 4.22 องค์ประกอบทางเคมีของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

องค์ประกอบทางเคมี (g/100g wet basis)	Native cassava flour	20kV-10min
ความชื้น ^{ns}	6.82±0.07	7.02±0.01
โปรตีน ^{ns}	2.49±0.04	2.47±0.09
เถ้า	1.47 ^b ±0.03	1.60 ^a ±0.00
ไขมัน ^{ns}	0.72±0.00	0.62±0.04
เส้นใยหยาบ ^{ns}	0.67±0.03	0.83±0.11
คาร์โบไฮเดรต	88.50 ^a ±0.00	88.29 ^b ±0.03

a, b, c..... ตัวอักษรที่กำกับค่าเฉลี่ยแตกต่างกันในแต่ละแถวหมายความว่าค่าเฉลี่ยที่รายงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

^{ns} ค่าเฉลี่ยที่รายงานในแต่ละแถวมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งเปรียบเทียบกับพลาว์มันสำปะหลังไม่เปียกทางการค้า พบว่าการอบแห้งส่งผลให้ปริมาณไซยาไนด์สูงขึ้นในช่วง 0 ถึง 40 นาที และลดลงในช่วง 40 ถึง 240 นาที แต่มีค่าคงที่อัตราการลดลงของไซยาไนด์ที่อุณหภูมิอบแห้งทั้ง 3 ระดับ ได้แก่ 60, 70 และ 80°C ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในช่วง 60 ถึง 80°C ไม่ส่งผลต่อการลดลงของไซยาไนด์ในมันสำปะหลังระหว่างการอบแห้ง แต่การใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ โดยอุณหภูมิอบแห้งที่ 80°C สามารถลดค่ากิจกรรมของน้ำในมันสำปะหลังให้ต่ำกว่า 0.6 ได้ที่เวลา 100 นาที ในขณะที่อุณหภูมิอบแห้งที่ 60 และ 70°C สามารถลดค่ากิจกรรมของน้ำให้ต่ำกว่า 0.6 ที่เวลา 180 นาที

การศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้ง โดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ พบว่าการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังได้สูงที่สุด โดยมีร้อยละการลดลงเท่ากับ 39.44 แสดงให้เห็นว่าการใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังได้จริงและมีประสิทธิภาพปานกลาง แต่อย่างไรก็ตามพลาสมายังไม่สามารถลดปริมาณไซยาไนด์ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการบริโภคได้ เมื่อพิจารณาผลด้านคุณภาพของพลาว์มันสำปะหลังพบว่าพลาสมาสามารถใช้ในการตัดแปรพลาว์มันสำปะหลังได้ โดยสามารถลดความหนืดของพลาว์มันสำปะหลัง และทำให้ พลาว์มันสำปะหลังทนทานต่อความร้อนและแรงเฉือนได้มากขึ้น เหมาะแก่การนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

การศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นของพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้ง แรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลังไม่แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศพบว่าเมื่อใช้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่สูงที่ 20 กิโลโวลต์ มีค่าอัตราการลดลงของไซยาไนด์สูงที่สุด เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของไซยาไนด์อยู่ในช่วง 143.18 ถึง 232.60 ppm แต่เมื่อความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นต่ำที่ 69.16 ppm พบว่าระดับของแรงดันไฟฟ้าไม่มีผลต่อค่าคงที่อัตราการลดลงของไซยาไนด์ กล่าวคือที่ระดับความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นสูง ระดับของแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อการลดลงของไซยาไนด์ แต่ที่ความเข้มข้นต่ำ ระดับแรงไฟฟ้าไม่มีผลต่อการลดลงของไซยาไนด์ในพลาว์มันสำปะหลัง โดยเมื่อทดลองศึกษาการลดลงของไซยาไนด์เมื่อให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 1 ถึง 4 รอบ พบว่าในรอบที่ 3 และ 4 ของการให้พลาสมามีปริมาณ

ไซยาไนด์ที่เหลืออยู่ในฟลาวรรีมน์สำปะหลังไม่แตกต่างกัน จึงเป็นข้อสรุปได้ว่าที่ความเข้มข้นไซยาไนด์ เริ่มต้นต่ำกว่าประมาณ 80 ppm ปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวรรีมน์สำปะหลังสามารถลดลงได้อย่างจำกัด

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการอบแห้งมันสำปะหลังต่อการลดลงของไซยาไนด์ โดยในขั้นตอนการเตรียม มันสำปะหลัง หากเปลี่ยนจากวิธีการหั่นเป็นชิ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสไปเป็นการบดให้ละเอียดก่อน นำไปอบแห้งแทน อาจสามารถช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การอบแห้งโดยใช้ตู้อบ ลมร้อนที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุดที่ 80°C ทั้งนี้หากสามารถปรับอุณหภูมิที่ใช้ ในการอบแห้งได้สูงขึ้นจนถึง 90 หรือ 100°C อาจสามารถทำให้ระเหยน้ำได้เร็วขึ้น สามารถลด ระยะเวลาในการผลิตได้ นอกจากนี้อาจลดปริมาณไซยาไนด์ในมันสำปะหลังได้เพิ่มมากขึ้น

การศึกษาสภาวะของพลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่เหมาะสมต่อการลดปริมาณไซยาไนด์ในฟ ลาวรรีมน์สำปะหลัง มีข้อจำกัดคือไม่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงกว่า 20 กิโลโวลต์ได้ โดยมีแนวโน้ม ว่าหากสามารถปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้นอาจสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้สูงขึ้น นอกจากนี้ในการ ทดลองเป็นการนำตัวอย่างมาอัดแก๊สลงในบรรจุภัณฑ์ ทำให้มีแก๊สที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลาสมาอย่าง จำกัด ส่งผลให้เมื่อมีการให้กระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตพลาสมาจึงมีอนุภาคลิเธียมที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ ตัวอย่างได้จำกัดตามไปด้วย หากสามารถปรับการทดลองเป็นแบบต่อเนื่องโดยมีการอัดแก๊สเข้า ภายในตัวอย่างอย่างต่อเนื่องอาจช่วยให้ประสิทธิภาพในการลดปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวรรีมน์ สำปะหลังสูงขึ้น หรืออาจมีการปรับความชื้นของตัวอย่างแป้ง โดยการเพิ่มความชื้นหรือปริมาณน้ำใน แป้งจะช่วยให้มีอนุภาคลิเธียมเกิดขึ้นได้มากขึ้นเนื่องจากน้ำในตัวอย่างสามารถถูกสลายไปเป็นอนุภาคลิเธียม ได้ นอกจากนี้บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองสามารถใส่ตัวอย่างได้อย่างจำกัดที่ 5 กรัม ทำให้มีกำลัง การผลิตต่ำ

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

- กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. 2564. Fact sheet ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : https://www.ditp.go.th/ditp_web6_1/article_sub_view.php?filename=contents_attach/759834/759834.pdf&title=759834&cate=1469&d=0. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2565.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. เทคโนโลยีของฟลาวัวร์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 303 น.
- โครงการอนุรักษ์พันธุพืช. ไม่ปรากฏ. มันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.natres.psu.ac.th/FNR/vfsouthern/index.php/2013-10-26-10-11-55/9-uncategorised/151-2014-01-25-07-33-50>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม 2564.
- ธีรวรรณ บุญวรรณ. 2558. พิสิกส์ของพลาสมา. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์ Science CMU Printing Service. 291 น.
- นุชสิริ เลิศวุฒิโสภณ. 2556. โยอาหารและสุขภาพ. *ธรรมศาสตร์เวชสาร* 13(4): 530-540.
- มหาวิทยาลัยมหิดล. 2559. ความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้นกับเวลา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry2/kinetics/conc_and_time.htm. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2565.
- วิลาสินี วุฒิศรสถล. 2541. การเคลือบฟิล์มบางแบบสปีดเทอริง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/262_MT10_75.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2565.
- สังคมฟลาวัวร์มันสำปะหลัง. ไม่ปรากฏ. มันสำปะหลังและการนำไปใช้. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/4/1/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม 2563.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=17866>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม 2563.
- สถาบันอาหาร. 2559. อุตสาหกรรมมันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-detail.php?id=24>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม 2563.

- สุทธิณี สีสังข์. 2563. คุณสมบัติของฟลาวัวร์ที่มีผลต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20200722153849_1_file.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม 2564.
- สมาคมโรงงานผู้ผลิตมันสำปะหลัง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. 2564. สถิติการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง และฟลาวัวร์มันสำปะหลัง ปี 2564. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.nettathai.org/index.php/2012-01-18-08-26-18.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2565.
- สยามเคมี. ไม่ปรากฏ. ไฮยาไนด์และพิไซไฮยาไนด์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.siamchemi.com/ไฮยาไนด์/>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม 2563.
- สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2557. มาตรฐานโคเด็กซ์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.foodfti.com/มาตรฐานโคเด็กซ์/5492b062fc1a14a01d0004ed>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 27 ธันวาคม 2563.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2562. การผลิตฟลาวัวร์มันสำปะหลังไฮยาไนด์ต่อจากพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2019/20191223-15-62-cassava-low-cyanide-v2.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 กรกฎาคม 2564.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2563. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร มันสำปะหลัง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <https://www.oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดมันสำปะหลัง/TH-TH>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2565.
- Abera, S., & Rakshit, S.K. 2003. Comparison of physicochemical and functional properties of cassava starch extracted from fresh roots and dry chips. *Starch/Stärke* 55: 287-296.
- Adnano-tek. UHV Magnetron sputtering system (MDS). [Online]. Source: <https://www.adnano-tek.com/magnetron-sputtering-deposition-msd.html>. Retrieved January 31, 2022.
- Ai, J., & Jane, J. 2015. Gelatinization and rheological properties of starch. *Starch/Stärke* 67: 213-224.
- Alay, S.C., Tobon, F.O., Carneiro, T.F., Steel, C.J., & Meireles, M.A. 2016. Polymer modification from semi-defatted annatto seeds using hot pressurized water and supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids* 129: 48-55.

- Allrecipes. 2563. What is cassava and how do you use it. [Online]. Source: <https://www.allrecipes.com/article/what-is-cassava>. Retrieved July 14, 2021.
- AOAC. (2000). *Official Methods of Analysis*. 17th Ed. Association of Official Analysis Chemists. Washington D.C.
- Aryee, F.N.A., Oduro, I., Ellis, W.O., & Afuakwa, J.J. 2006. The physicochemical properties of flour samples from the roots of 31 varieties of cassava. *Food Control* 17: 916-922.
- Aviara, N.A., Igbeka, J.C., & Nwokocha, L.M. 2010. Effect of drying temperature on physicochemical properties of cassava starch. *International Agrophysics* 24: 219-225.
- Bahrami, N., Bayliss, D., Chope, G., Penson, S., Pehinec, T., & Fisk, I.D. 2016. Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality. *Food chemistry* 202: 247-253.
- Banura, S., Thirumdas, R., Kaur, A., Deshmukh, R.R., & Annapure, U.S. 2018. Modification of starch using low pressure radio frequency air plasma. *Food Science and Technology* 89: 719-724.
- Bhat, R., & Karim, A.A. 2009. Influence of gamma-radiation on the nutritional and functional qualities of lotus seed flour. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 57: 9524-9531.
- Bie, P., Li, X., Xie, F., Chen, L., Zhang, B., & Li, L. 2016. Supramolecular structure and thermal behavior of cassava starch treated by oxygen and helium glow-plasmas. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 34: 336-343.
- Bowers, J. 1992. *Food theory and applications*. New York: Macmillan publishing company.
- Breuninger, W., Piyachomkwan, K., & Sriroth, K. 2009. Tapioca/Cassava starch: Production and use. *Chemistry and Technology* 3: 541-568.
- Buleon, A., Colonna, P., Planclot., & Ball, S. 1998. Starch granules: structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules* 23: 85-112.
- Cardoso, A.P., Mirione, E., Ernesto, M., Massaza, F., Cliff, J., Haque, M.R., Bradbury, J.H., 2005. Processing of cassava roots to remove cyanogens. *Journal of Food Composition and Analysis* 18: 451-460.

- Chaiwat, W., Wongsagonsup, R., Tangpanichyanon, N., Jariyaporn, T., Deeyai, P., Suphantharika, M., Fuongfuchat, A., Nisoa, M., & Dangtip, S. 2016. Argon plasma treatment of tapioca starch using a semi-continuous downer reactor. *Food Bioprocess Technologies* 9: 1125-1134.
- Chavalparit, O., & Ongwandee, M. 2009. Clean technology for the tapioca starch industry in Thailand. *Journal of Cleaner Production* 17: 105-110.
- Chen, H.H., Chen, Y., & Chang, C.H. 2012. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice. *Food Chemistry* 135: 74-79.
- Cooke, R.D. 1978. An enzymatic assay for the total cyanide content of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 29: 345-352.
- Deeyai, P., Jitsomboonmit, P., Soonthonchaikul, W., Suphatharika, M., & Dangtip S. 2010. Effect of atmospheric argon plasma on morphology of tapioca starch granule. *The Journal of The Microscopy Society of Thailand* 24: 112-116.
- Dome, K., Podgorbunskikh, E., Bychkov, A., & Lomovsky, O. 2020. Changes in the crystallinity degree of starch having different types of crystal structure after mechanical pretreatment. *Polymer* 12: 641-653.
- Ekezie, F., Sun, D., & Cheng, J. 2017. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in Food Science and Technology* 69: 46-58.
- FAO/WHO (Food and Agriculture Organization/World Health Organization), 1991. Joint FAO/WHO Food Standards Programme. Co34. Dex Alimentarius Commission XII. FAO, Rome, Italy. Supplement 4.
- Gao, S., Liu, H., Sun, L., Liu, N., Wang, J., Huang, Y., & Wang, M. 2019. The effects of dielectric barrier discharge plasma on physicochemical and digestion properties of starch. *International Journal of Biological Macromolecules* 138: 819-830.
- Ginting, E., & Widodo, Y. 2013. Cyanide reduction in cassava root products through processing and selection of cultivars in relation to food safety. *Buletin Palawija* 25: 27-36.

- Grace, N.C.F., & Henry, C.J., 2020. The physicochemical characterization of unconventional starches and flours used in Asia. *Foods* 9: 182-194.
- Haase, N.U., Mintus, T., & Detmold, W. 1995. Viscosity measurement of potato starch paste with Rapid Visco Analyzer. *Starch/Stärke* 47(4): 123-126.
- Hojnik, N., Cvelbar, U., Kalcher, G.T., Walsh, J.L., & Krizaj, I. 2017. Mycotoxin decontamination of food: cold atmospheric pressure plasma versus “classic” decontamination. *Toxins* 9: 151-170.
- Kis, M., Milosevic, S., Vulic, A., Herceg, Z., Vukusic, T., & Pleadin, J., 2020. Efficacy of low pressure DBD plasma in the reduction of T-2 and HT-2 toxin in oat flour. *Food Chemistry* 316: 126372.
- Koua, B.K., Koffi, P.M.E., Gbaha, P., & Toure, S. 2014. Thermodynamic analysis of sorption isotherms of cassava (*Manihot esculenta*). *Journal of Food Science and Technology* 51(9): 1711-1723.
- Laovachirasuwana, P., Peerapattanaa, J., Srijesdarukb, V., Chitropasa, P., & Otsukac, M. 2010. The physicochemical properties of a spray dried glutinous rice starch biopolymer. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 78: 30-35.
- Leewatchararongjareon, J., & Anuntagool, J. 2016. Effects of dry-milling and wet-milling on chemical, physical and gelatinization properties of rice flour. *Rice Science* 23(5): 274-281.
- Liaotrakoon, W., & Liaotrakoon, V. 2019. Effect of milling methods on physicochemical, pasting properties and syneresis of water chestnut (*Trapa bispinosa*) flour. *Thai Journal of Science and Technology* 9(2): 251-264.
- Lii, C.Y., Liao C.D., Stobinski, L., & Tomasik, P. 2002a. Behaviour of granular starches in low-pressure glow plasma. *Carbohydrate Polymers* 49(4): 499-507.
- Lii, C.Y., Liao C.D., Stobinski, L., & Tomasik, P. 2002b. Effects of hydrogen, oxygen, and ammonia low-pressure glow plasma on granular starches. *Carbohydrate Polymers* 49(4): 449-456.
- Lii, C.Y., Liao C.D., Stobinski, L., & Tomasik, P. 2003. Effect of corona discharges on granular starches. *Journal of Food Agriculture and Environment* 1(2): 143-149.

- Maaruf, G.A., Cheman, Y.B., Asbi, B.A., Junainah, A.H., & Kenedy, J.F. 2001. Effect of water content on gelatinization temperature of sago starch. *Carbohydrate Polymers* 46: 331-337.
- Medcalf, D.C., & Gilles, K.A. 1965. Wheat starches: I. Comparison of physicochemical properties. *Cereal Chem* 42: 558-568.
- Mimapan, S., Yooyen, A., Metharatanukul, B., & Inudom, S. 2016. Determination of cyanide in cattle whole blood by microdiffusion spectrophotometric method. *Journal of Mahanakorn Veterinary Medicine* 11(2): 115-139.
- Morent, R., Geyter N., Desmet, T., Dubruel, P., & Leys, C. 2011. Plasma surface modification of biodegradable polymers: A review. *Plasma Process Polymer* 8: 171-190.
- Muhlbauer, W., & Muller, J. 2020. *Drying Atlas*. New York: Woodhead Publishing. 446 pages.
- Nava, F., Uribe, A., & Perez, R. 2003. Use of ozone in the treatment of cyanide containing effluents. *The European Journal of Mineral Processing and Environment Protection* 3(3): 316-323.
- Newport scientific. 2007. *Rapid visco analyzer series 4 (RVA-4) installation and operation manual*. (n.p.).
- Oates, C.G. 1997. Towards and understanding of starch granule structure and hydrolysis. *Trends in Food Science and Technology* 8: 375-382.
- Oyeyinka, S.A., Oyeyinka, A.T., Kayode, R.M., Olagunju, O.F., Karim, R., & Joseph, J.K. 2017. A review on the functionality and potential applications of bitter yam starch. *Food Science and Technology* 18(3): 364-375.
- Pankaj, S., Wan, Z., & Keener, K. 2018. Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods* 7(1): 4-25.
- Park, C.S., Kang, C.S., Cheong, Y.K., Jung, W., & Woo, S.H. 2010. Influence of puroindoline genotypes on grain characteristics, physico-chemical properties of flour and end-use quality of Korean wheats. *Breeding Science* 60: 233-242.
- Phan, K.T.K., Phan, H.T., Boonyawan, D., Intipunya, P., Brennan, C.S., Regenstein, J.M., & Phimolsiripol, Y. 2018. Non-thermal plasma for elimination of pesticide

- residues in mango. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 48: 164-171.
- Phillips, O.G., & Williams, P.A. 2000. *Handbook of hydrocolloids*. New York: Woodhead Publish Limited.
- Pornpraipech, P., Khusakul, M., Singklin, R., Sarabhorn, P., & Areeprasert, C. 2017. Effect of temperature and shape on drying performance of cassava chips. *Agriculture and Natural Resources* 51: 402-409.
- Rahman, N.A, Mohamad, N.Z., & Fern, W.V. xxxx. The fraction of soluble starch that contribute to staling amylose or amylopectin. [Online]. Source: <https://futurefoodchemist.weebly.com/amylose-or-amylopectin.html>. 21 July 2021.
- Rocha, T.D.S., Carneiro, A.P.A., & Franco, C.M.L. 2010. Effect of enzymatic hydrolysis on some physicochemical properties of root and tuber granular starches. *Food Science Technology* 30(2): 544-551.
- Rogers, D.J., & Appan, S.G. 1971. What's so great about cassava. *World Farming* 3(6): 13-32.
- Rosling, H. 1994. Measuring effects in humans of dietary cyanide exposure from cassava. *Acta Hort* 375: 271–283.
- Sakuanrungsirikul, S., Wongwarat, T., Theerakulpisut, P., & Sarawat P. 2007. Optimal condition for free cyanide determination in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Thai Agricultural Research Journal* 25(2): 157-165.
- Sarangapani, C., Misra, N.N., Milosavljevic, V., Bourke, P., O'Regan, F., & Cullen, P.J. 2016. Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma. *Journal of Water Processing Engineering* 9: 225-232.
- Sarangapani, C., O'Toole, G., Cullen, P.J., & Bourke, P. 2017. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. *Innovation Food Science and Emerging Technologies* 44: 235-241.
- Sarangapani, C., Scally, L., Gulan, M., & Cullen, P.J. 2020. Dissipation of pesticide residues on grapes and strawberries using plasma-activated water. *Food and Bioprocess Technology* 13: 1728-1741.

- Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches. *Methods in Carbohydrate Chemistry* 4: 106-108
- Swinkels, J.J.M. 1985. Composition and properties of commercial native starches. *Starch/Stärke* 37: 1-5.
- Szabo, E.A., Jansson, E., Miles, D., Hambridge, T., Stanley, G., Baines, J., & Brent, P. 2010. Chapter 24 - Responding to Incidents of Low Level Chemical Contamination in Food. *Ensuring Global Food Safety*: 411-437.
- Thirumdas, R., Deshmukh, R.R., & Annapure, U.S. 2016. Effect of low temperature plasma on the functional properties of basmati rice flour. *Food Science and Technology* 53(6): 2742-2751.
- Thirumdas, R., Kadam, D., & Annapure, U.S. 2017. Cold plasma: an alternative technology for the starch modification. *Food Biophysics* 12: 129-139.
- Valsero, M., Molina, R., Schikora, H., Muller, M., & Bayona, J. 2013. Removal of cyanide from water by means of plasma discharge technology. *Water Research* 47: 1701-1707.
- Wonraphatphadung, T., Sutthiparinyanont, S., & Chitropas, P. 2012. Physicochemical properties of tapioca starch modified by alcoholic-alkali treated technique. *Graduate Research Conference Khon Kaen University*: 838-847.
- Zou, J.J., Liu, C.J., & Eliasson, B. 2004. Modification of starch by glow discharge plasma. *Carbohydrate Polymer* 55: 23-26.

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์ทางเคมีและกายภาพ

ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ (Cooke, 1978)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Centrifuge (Hettich zentrifugen, D-78532, Germany)
2. เครื่อง Vortex (CTL, CTL-107, Japan)
3. เครื่อง pH meter (Mettler Toledo, Switzerland)
4. เครื่อง Shaking water bath (Julabo, SW23, Germany)
5. เครื่อง Spectrometer (Thermo Spectronic, Genesys 10 UV, USA)
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument, SI-234, Germany)

สารเคมี

1. Phosphoric acid
2. Trisodium phosphate
3. Sodium hydroxide
4. Ethanol 95%
5. Bispyrazolone
6. 3-methyl-1-phenol-5-pyrazine
7. Chloramine-T
8. Potassium cyanide

การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4.0

ผสม Phosphoric acid 0.1 M และ Trisodium phosphate 0.1 M และปรับ pH ด้วย Sodium hydroxide 1.0 M

การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 6.0

ผสม Phosphoric acid 0.1 M และ Trisodium phosphate 0.1 M และปรับ pH ด้วย Sodium hydroxide 1.0 M

การเตรียมสารละลายสกัด pH 5.0

ผสม Phosphoric acid 0.1 M และ Ethanol 95% ในอัตราส่วน 3 ต่อ 1 และปรับ pH ด้วย Sodium hydroxide 1.0 M

การเตรียม Pyridine/Pyrazolone

ผสม Bispyrazolone 0.2 กรัม และ 3-methyl-1-phenol-5-pyrazine 1 กรัม ในสารละลาย pyrimidine 200 มิลลิลิตร

การเตรียม Chloramine-T 0.5%

ผสม chloramine-T 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลาย KCN

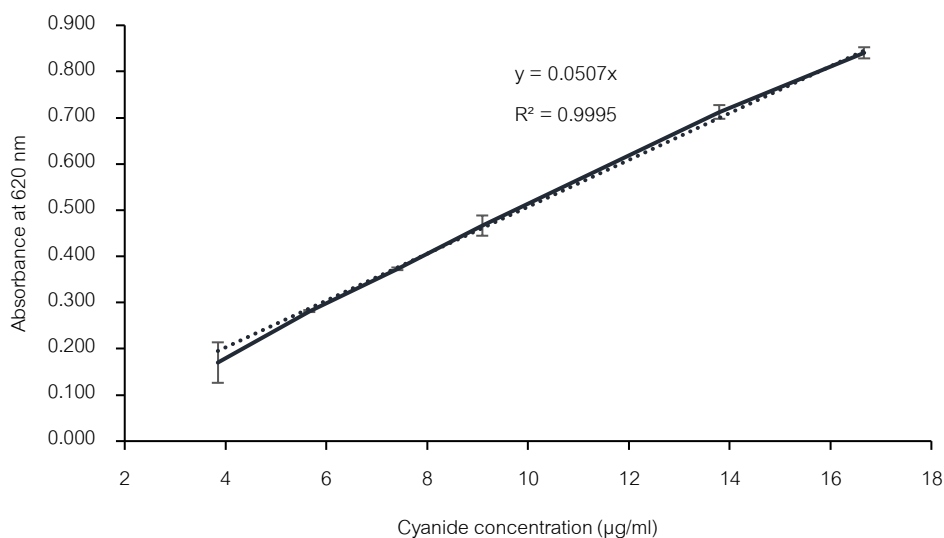
ผสม KCN 250 $\mu\text{g/ml}$ ในสารละลาย Sodium hydroxide 0.2 M

การสร้างกราฟมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลาย KCN นำไปเจือจางในบัฟเฟอร์ pH 6.0 โดยเตรียมความเข้มข้นทั้งหมด 6 ระดับ ดังตารางที่ ก.1
2. ปิเปตสารละลาย KCN ในแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร
3. เติมบัฟเฟอร์ pH 4.0 ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร นำไป vortex
4. เติม chloramine-T ความเข้มข้น 0.5% ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 5 นาที
5. เติม pyridine/pyrazolone ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร แล้ววางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 นาที
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้ spectrometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร และสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของไซยาไนด์ ดังแสดงในรูปที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ความเข้มข้นของไซยาไนด์และค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร

[KCN], $\mu\text{g/ml}$	[CN], $\mu\text{g/ml}$	Absorbance at 620 nm
9.615	3.846	0.170
14.151	5.660	0.282
18.519	7.407	0.373
22.727	9.091	0.467
34.483	13.793	0.713
41.667	16.667	0.841



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณไซยาไนด์

การหาปริมาณไฮโดรเจนไซยาไนด์ในตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียด 0.3 กรัม ใส่ในหลอด centrifuge แล้วเติมสารละลายที่ใช้สกัดปริมาตร 1.0 มิลลิลิตร แล้วนำไป vortex
2. นำไปปั่นใน Shaking water bath ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 60 นาที และสั่นที่ 120 รอบต่อนาที (rpm)
3. นำไปปั่นเหวี่ยงโดยเครื่อง centrifuge ที่ 9000 g อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 15 นาที แล้ว pipette สารละลายส่วนใสปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง
4. เติมบัฟเฟอร์ pH 4.0 ปริมาตร 3.9 มิลลิลิตร นำไป vortex
5. เติม chloramine-T ความเข้มข้น 0.5% ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 5 นาที
6. เติม pyridine/pyrazolone ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร แล้ววางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 นาที
7. วัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้ spectrometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณไซยาไนด์

การคำนวณ

$$\text{ความเข้มข้นไซยาไนด์ (ppm)} = \frac{\text{ปริมาตรสารสกัด (ml)} \times \text{ค่าการดูดกลืนแสง} \times 10}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น HCN 1 } \mu\text{g} \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

ก.2 ค่ากิจกรรมของน้ำ

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดค่ากิจกรรมของน้ำ (AquaLab Series 3, Decagon, USA)

วิธีการทดลอง

1. บดตัวอย่างให้ละเอียด ปริมาณ 2 กรัม
2. นำใส่ในที่ใส่ตัวอย่างของเครื่องวัดกิจกรรมของน้ำ
3. บันทึกค่ากิจกรรมของน้ำและอุณหภูมิของตัวอย่างที่แสดงบนหน้าจอของเครื่อง

ก.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) (Model IT5R, JEOL Co., Ltd. Japan)

วิธีการทดลอง

1. วางตัวอย่างลงบนแผ่นอะลูมิเนียมโดยใช้สองเทปติดทั้งสองด้าน และเคลือบด้วยทอง
2. นำเข้าเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

ก.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชในน้ำมันสำปะหลัง (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง X-ray diffractometer (Model D8 Discover, Bruker AXS, Germany)

วิธีการทดลอง

1. วางตัวอย่างฟลาว์ลงบนเพลตใส่ตัวอย่าง
2. ใส่ตัวอย่างในเครื่อง X-ray diffractometer
3. ตั้งสภาวะของเครื่องเพื่อวิเคราะห์ดังตารางที่ ก.2

4. เปรียบเทียบลักษณะผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อระบุชนิดของผลึกโดยใช้ diffractogram (2θ , d-spacing and intensity) จากวิธีของ Zobel (1964)
5. คำนวณร้อยละปริมาณผลึก

การคำนวณ

$$\% \text{ปริมาณผลึก} = \frac{\text{พื้นที่ส่วนผลึก}}{\text{พื้นที่ทั้งหมด}} \times 100$$

ตารางที่ ก.2 สภาวะของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer

Target	Cu
Voltage	40 kV
Current	40 mA
Angle (2θ)	5-50 degree
Step	0.0229 degree
Step time	197 sec
Detector	VANTEC-1 Detector (Super Speed Deteactor)

ก.5 ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) ตามวิธีของ Medcalf และ Gilles (1965)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Shaking water bath (Julabo, SW23, Germany)
2. เครื่อง Centrifuge (Hettich zentrifugen, D-78532, Germany)
3. เครื่อง Vortex (CTL, CTL-107, Japan)
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument, SI-234, Germany)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร
2. นำหลอดไปเขย่าใน shaking water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C เป็นเวลา 30 นาที

3. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 9000 g เป็นเวลา 15 นาที
4. และคำนวณค่าความสามารถในการจับน้ำ

การคำนวณ

$$\text{ความสามารถในการจับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนฟลาวร์} - \text{น้ำหนักตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

ก.6 กำลังการพองตัว และการละลาย ตามวิธีของ Schoch (1964)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Shaking water bath (Julabo, SW23, Germany)
2. เครื่อง Centrifuge (Hettich zentrifugen, D-78532, Germany)
3. เครื่อง Vortex (CTL, CTL-107, Japan)
4. ตู้อบลมร้อน (Memmert, DO 6062, Germany)
5. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument, SI-234, Germany)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร
2. นำไปต้มใน shaking water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 60, 70, 80 และ 90°C โดยเขย่าตลอดเวลา เป็นเวลา 30 นาที
3. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 9000 g เป็นเวลา 15 นาที
4. ชั่งน้ำหนักตะกอนฟลาวร์ นำสารละลายส่วนใสไปอบแห้งที่ 105°C แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก คำนวณกำลังการพองตัว และการละลาย

การคำนวณ

$$\text{กำลังการพองตัว (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนฟลาวร์}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง} \times [(100 - \text{ร้อยละการละลาย})/100]}$$

$$\text{ร้อยละการละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสารละลายส่วนใสหลังอบแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

ก.7 สมบัติการเกิดเพสต์ (Pasting properties) ตามวิธีของ Haase และคณะ (1995)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Rapid visco analyzer (RVA) (Newport Scientific, RVA-4, Australia)
2. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument, SI-234, Germany)

วิธีการทดลอง

1. ผสมตัวอย่างฟลาวัวร์ 3 กรัม (ฟลาวัวร์มีความชื้น 14%) และน้ำกลั่น 25 กรัม ใน canister
2. นำตัวอย่างที่เตรียมแล้ววิเคราะห์โดยเครื่อง RVA ทันที โดยใช้ testing profile ดังตารางที่ ก.3
3. วัดค่าพารามิเตอร์ทางความหนืด ได้แก่ peak, trough, final, breakdown และ setback viscosity โดยมีหน่วยคือ centipoise (cP) โดยใช้ ThermoLine software version 3.11

ตารางที่ ก.3 Testing profile สำหรับวิเคราะห์สมบัติการเกิดเพสต์โดยใช้ Rapid visco analyzer

Stage	Temperature/Speed	Time
1	50°C	0 min, 0 sec
2	960 rpm	0 min, 0 sec
3	160 rpm	0 min, 0 sec
Stage	Temperature/Speed	Time
4	50°C	1 min, 0 sec
5	95°C	4 min, 42 sec
6	95°C	7 min, 12 sec
7	50°C	11 min, 0 sec
End of test		13 min, 0 sec
Time between readings		4 sec

ก.8 ค่าสี (L* a* b*)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. Chroma meter (Konica Minolta model CR-400, Osaka, Japan)

วิธีการทดลอง

1. วางตัวอย่างลงบนที่ใส่ตัวอย่าง ปิดกระจกเลนส์
2. วัดค่าสี และบันทึกค่าตามพารามิเตอร์เหล่านี้

L* แสดง ความสว่าง (100 ขาว, 0 ดำ)

a* แสดง ความเป็นสีแดง และความเป็นสีเขียว (ค่าบวกแสดงสีแดง, ค่าลบแสดงสีเขียว)

b* แสดง ความเป็นสีเหลือง และความเป็นสีน้ำเงิน (ค่าบวกแสดงสีเหลือง, ค่าลบแสดงสีน้ำเงิน)

3. คำนวณค่าดัชนีความขาว (whiteness index)

การคำนวณ

$$\text{ดัชนีความขาว} = \sqrt{(100-L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$$

ก.9 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ถ้วยอลูมิเนียม
2. ตู้อบลมร้อน (Memmert, DO 6062, Germany)
3. โถแก้วดูดความชื้น (desiccator)
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Denver Instrument, SI-234, Germany)

วิธีการทดลอง

1. อบถ้วยอลูมิเนียมด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ แล้วจึงนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของถ้วยอลูมิเนียม
2. ชั่งตัวอย่าง 3 กรัม ลงในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน บันทึกน้ำหนักของตัวอย่าง

- นำตัวอย่างเข้าอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ แล้วจึงนำมาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}}$$

ก.10 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AOAC, 2000) (คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรม การเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่อง Kjeldahl digestion unit
2. เครื่อง Kjeldahl distillation unit
3. เครื่อง Scrubber

สารเคมี

1. Kjeldahl catalyst: 9 part of potassium sulphate (K_2SO_4) with 1 part of copper sulphate ($CuSO_4$)
2. Sulfuric acid (H_2SO_4)
3. Sodium hydroxide pallet ($NaOH$)
4. Hydrochloric acid (HCl)
5. Boric acid (H_3BO_3)
6. Methyl red
7. Methylene blue

การเตรียมสารละลาย $NaOH$ 35%

ละลาย sodium hydroxide pallet ปริมาณ 35 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลาย HCl 0.1 M

เติม hydrochloric acid ความเข้มข้น 37% ปริมาณ 0.82 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลาย H_3BO_3 4%

ละลาย boric acid ปริมาณ 4 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

การเตรียมอินดิเคเตอร์

1. ละลาย methyl red ปริมาณ 0.04 กรัม ใน ethanol 95% แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 20 มิลลิลิตร
2. ละลาย methylene blue ปริมาณ 0.02 กรัม ใน ethanol 95% แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 10 มิลลิลิตร
3. ผสมสารละลาย methyl red และ methylene blue ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างปริมาณ 0.5 ถึง 1 กรัม ลงในหลอดย่อย
2. เติม Kjeldahl catalyst และสารละลาย conc. H_2SO_4 20 มิลลิลิตร
3. นำหลอดย่อยใส่ในชุดเครื่องย่อยที่ประกอบไปด้วย Kjeldahl digestion unit และ scrubber ย่อยจนตัวอย่างมีสีน้ำตาลใส
4. ทิ้งไว้ให้เย็นและเติมน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร
5. นำตัวอย่างในหลอดย่อยไปกลั่นด้วย Kjeldahl digestion unit โดยเติมสารละลาย NaOH 35% ปริมาตร 60-70 มิลลิลิตร กลั่นตัวอย่างใส่ในสารละลาย H_3BO_3 4% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่เติมอินดิเคเตอร์แล้ว
6. นำสารละลาย H_3BO_3 ที่ผ่านการกลั่นแล้วไปไทเทรตด้วยสารละลาย HCl 0.1 M

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละปริมาณไนโตรเจน} = (\text{ml HCl} - \text{ml blank}) \times 0.1 \times 14.007 \times \frac{100}{\text{mg sample}}$$

$$\text{ร้อยละปริมาณโปรตีน} = \text{ร้อยละปริมาณไนโตรเจน} \times \text{conversion factor}$$

$$\text{Conversion factor} = 5.95$$

ก.11 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2000) (คณะกรรมการธรรมชาติและอุตสาหกรรม
การเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. Crucible
2. โถดูดความชื้น
3. ตู้อบลมร้อน
4. Hot plate stirrer
5. Muffle Furnace
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิธีการทดลอง

1. เเผา crucible ด้วย furnace ที่อุณหภูมิ 550°C ซ้ำมคืนจนแน่ใจว่าปราศจากสิ่งปนเปื้อน
2. ทิ้ง crucible ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
3. ชั่งตัวอย่าง 3-5 กรัม ใส่ใน crucible แล้วให้ความร้อนด้วย hot plate จนตัวอย่างไม่มีควันออกมาอีก
4. นำไปเผาใน furnace ด้วยอุณหภูมิ 550°C จนตัวอย่างเปลี่ยนเป็นสีขาวและชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา}} \times 100$$

ก.12 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2000) (คณะกรรมการธรรมชาติและอุตสาหกรรม
การเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. Extraction thimble
2. ตู้อบลมร้อน

3. เครื่อง Soxhlet extractor
4. เครื่อง Rotary Evaporator
5. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง

สารเคมี

1. Petroleum ether

วิธีการทดลอง

1. อบขวดก้นกลมสำหรับชูดกลั่นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่าง 3-5 กรัม ใน extraction thimble และนำไปใส่ในชุด Soxhlet
3. เติม petroleum ether 250 มิลลิลิตร ในขวดก้นกลมสำหรับชูดกลั่น
4. ประกอบชุดกลั่น Soxhlet และให้ความร้อนโดยที่ petroleum ether หยดจาก condenser ในอัตรา 150 หยดต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
5. ระเหย petroleum ether ออกจากไขมันด้วย rotary evaporator
6. นำขวดก้นกลมไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักของไขมันที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}} \times 100$$

ก.13 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ (AOAC, 2000) (คณะทรัพยากรธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. โถดูดความชื้น
2. ตู้อบลมร้อน
3. เครื่อง Furnace
4. Whatman No.54 filter paper

5. เครื่อง Vacuum pump
6. เครื่องซั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

สารเคมี

1. Sulfuric acid (H_2SO_4)
2. Sodium hydroxide pallet (NaOH)
3. Hydrochloric acid (HCl)
4. Ethanol

การเตรียมสารละลาย H_2SO_4 1.25%

เติมสารละลาย conc. sulfuric acid 2.55 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้เป็น 200 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลาย NaOH 5%

เติม sodium hydroxide pallet 5 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

การเตรียมสารละลาย HCl 1%

เติมสารละลาย hydrochloric acid ความเข้มข้น 37% ปริมาณ 2.7 กรัม ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร

วิธีการทดลอง

1. ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ในภาชนะ บันทึกรหัสน้ำหนักที่แน่นอน
2. เติมสารละลาย H_2SO_4 1.25% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แล้วต้มเป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้ระหว่างต้มต้องรักษาปริมาตรของสารละลายไว้โดยการเติมน้ำกลั่นต้มเดือด
3. นำส่วนผสมมารองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.54 โดยใช้ปั๊มลมช่วย
4. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นจนไม่มีความเป็นกรดอีกต่อไป
5. นำตัวอย่างใส่ภาชนะเดิมแล้วเติมสารละลาย NaOH 5% ปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนปริมาตรของสารละลายเป็น 200 มิลลิลิตร
6. ต้มเป็นเวลา 30 นาที ทั้งนี้ระหว่างต้มต้องรักษาปริมาตรของสารละลายไว้โดยการเติมน้ำกลั่นต้มเดือด
7. นำส่วนผสมมารองผ่านกระดาษกรอง Whatman NO.54 โดยใช้ปั๊มลมช่วย
8. ล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่นแล้วจึงชะด้วยสารละลาย HCl 1% แล้วจึงล้างต่อจนไม่มีความเป็นกรดอีกต่อไป

9. ล้างตัวอย่างด้วย ethyl alcohol 95%
10. นำตัวอย่างใส่ถาดอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
11. นำตัวอย่างที่อบแล้วไปเผาด้วย furnace ที่อุณหภูมิ 550°C จนได้เถ้าสีขาว

การคำนวณ

น้ำหนักของเส้นใย = น้ำหนักของกากก่อนเผา - น้ำหนักของเถ้าหลังเผา

$$\text{ร้อยละของเส้นใย} = \frac{\text{น้ำหนักของเส้นใย}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}} \times 100$$

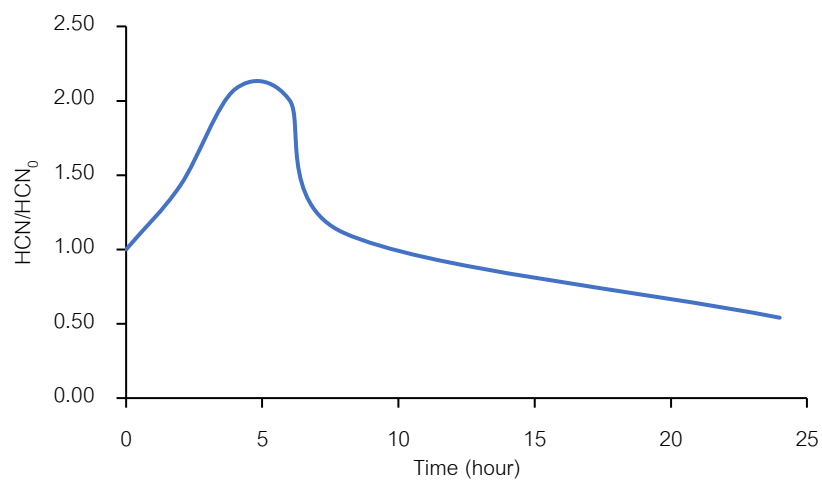
ก.14 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (AOAC, 2000) (คณะกรรมการธรรมชาติและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)

การคำนวณ

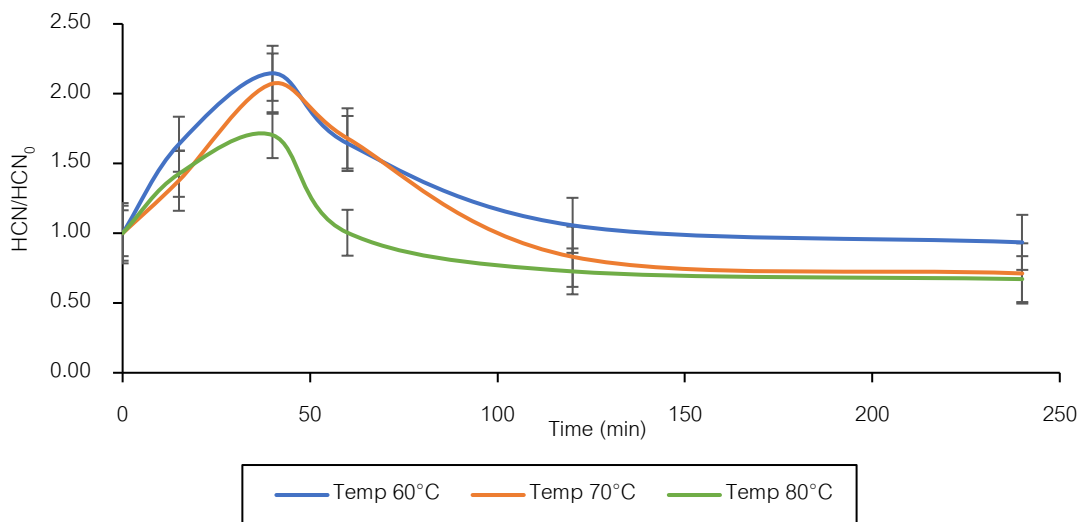
$$\text{ร้อยละคาร์โบไฮเดรต} = 100 - \% (\text{โปรตีน} + \text{เถ้า} + \text{ไขมัน} + \text{เส้นใย} + \text{ความชื้น})$$

ภาคผนวก ข

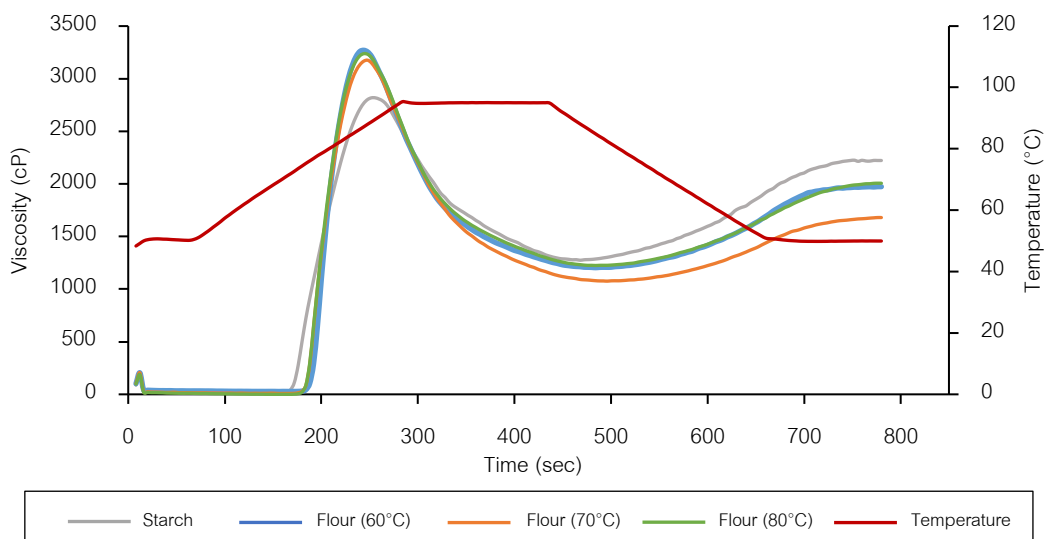
ผลการทดลองเพิ่มเติม



รูปที่ ข.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณไซยาไนด์ในน้ำมันสำปะหลังสตรระหว่างการวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



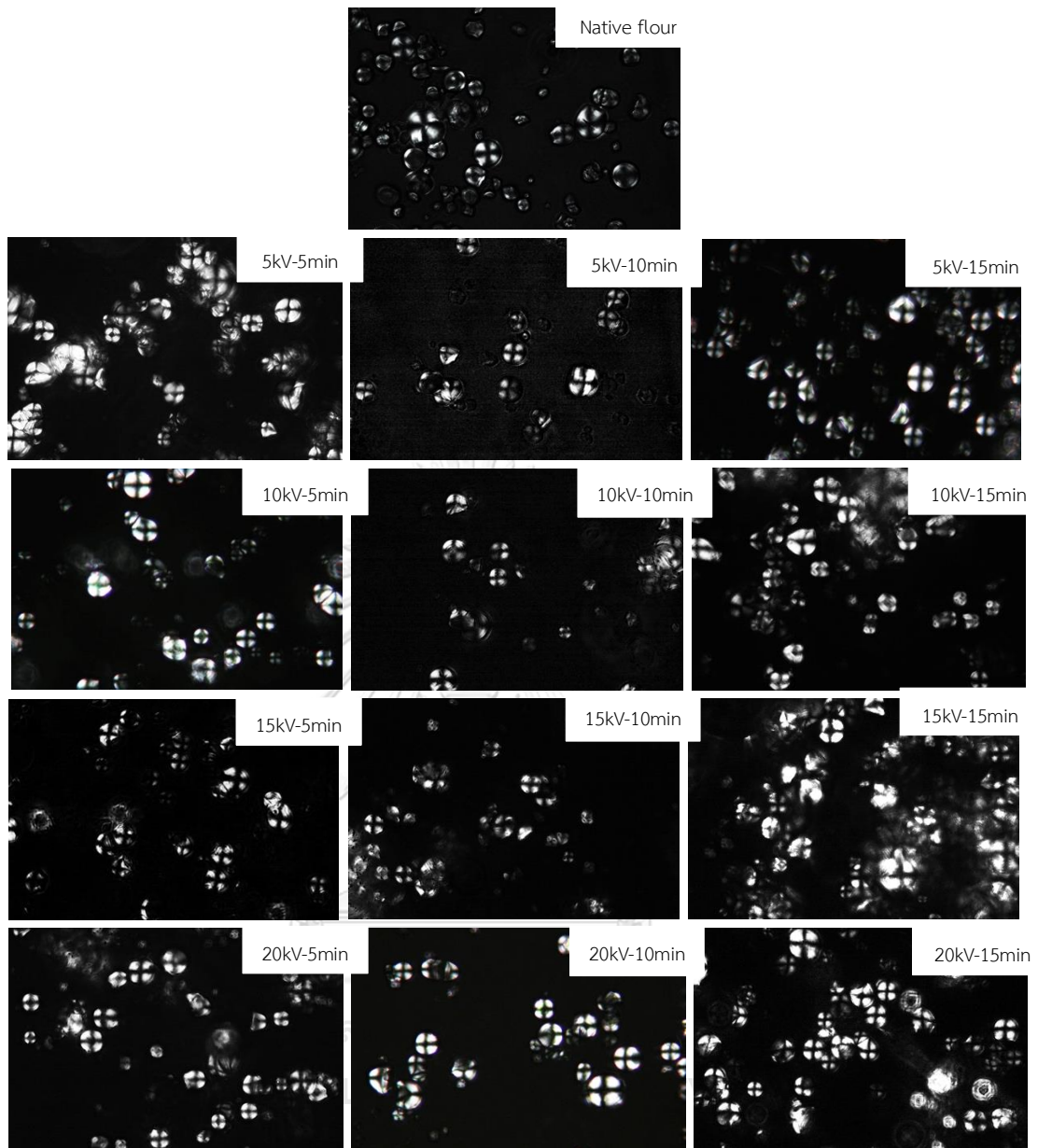
รูปที่ ข.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไซยาไนด์ในน้ำมันสำปะหลังระหว่างกรอบแห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)



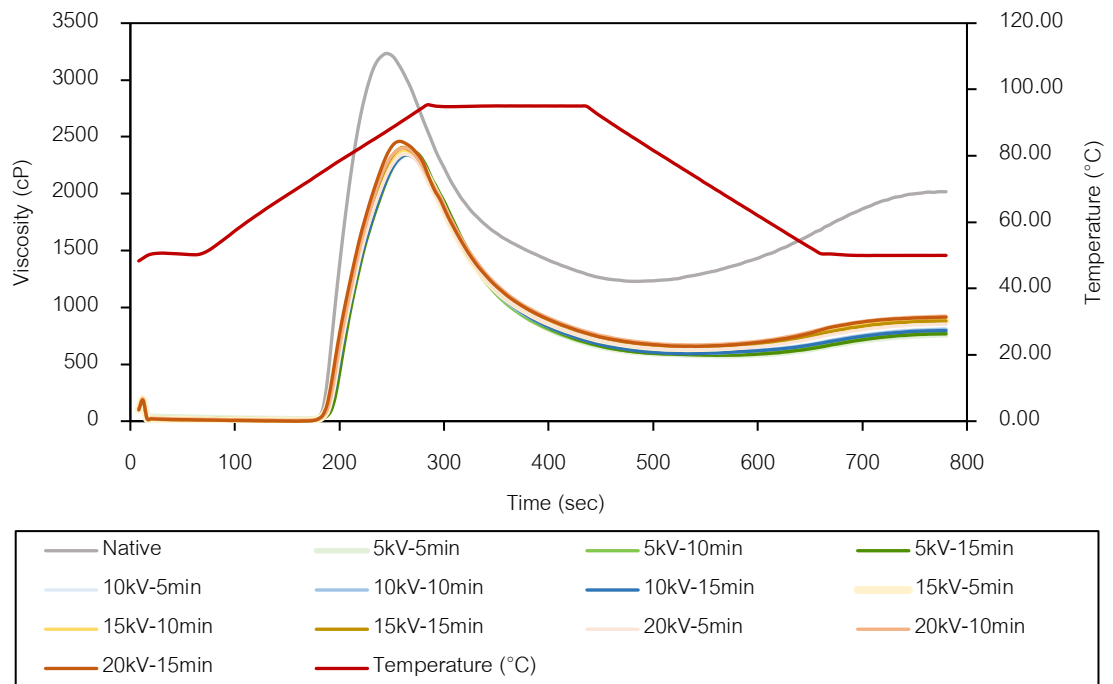
รูปที่ ข.3 กราฟการเกิดเพสต์ของสตาร์ชมันสำปะหลังและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ (60, 70 และ 80°C)

ตารางที่ ข.1 การเปรียบเทียบปริมาณไซยาไนด์อิสระและไซยาโนเจนิกไกลโคไซด์ที่มีอยู่ในฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

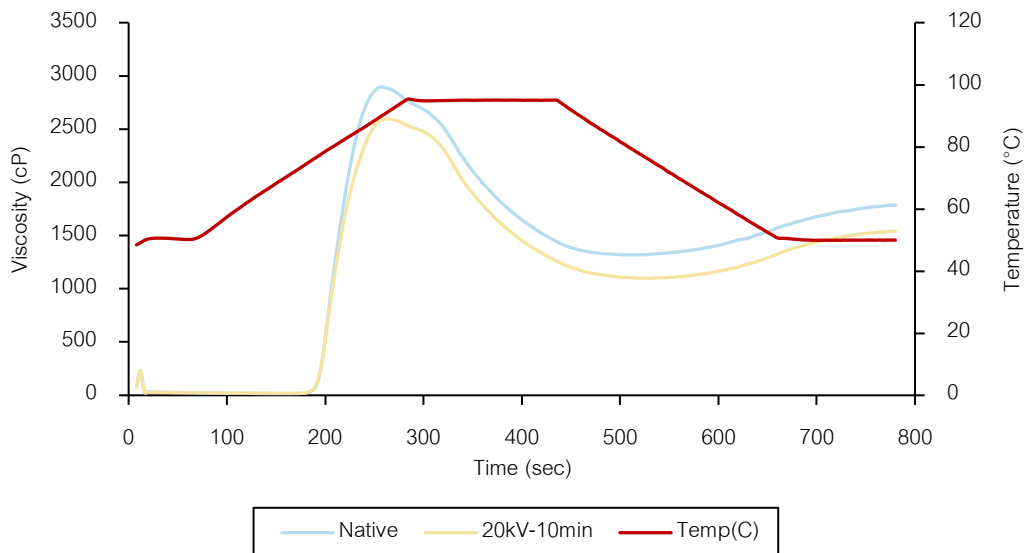
สภาวะการทดลอง			%Moisture content	Free cyanide (ppm)	Bound cyanide (ppm)
การศึกษาการอบแห้ง	70°C	rep 3	6.63	194.38	113.65
	80°C	rep 1	6.72	118.02	147.96
	80°C	rep 3	7.38	302.47	216.69
การศึกษาการใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อน	Flour A: 80°C		6.69	228.29	297.41
	5kV-5min	rep 2	7.31	214.11	359.04
	5kV-10min	rep 1	6.28	207.47	345.03
	5kV-10min	rep 2	6.96	225.11	348.77
	5kV-15min	rep 2	6.82	248.12	327.52
	20kV-5min	rep 1	6.02	163.56	351.85



รูปที่ ข.4 ลักษณะไปรีฟรินเจนซ์ของฟลาวร์มันส์ำปะหลังม่แห่งและฟลาวร์มันส์ำปะหลังม่แห่งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำล้งขยาย 1000x



รูปที่ ข.5 กราฟการเกิดเพสต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้า (5, 10, 15 และ 20 กิโลโวลต์) และเวลา (5, 10 และ 15 นาที) แตกต่างกัน



รูปที่ ข.6 กราฟการเกิดเพสต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ค.1 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิในการอบแห้งต่อการลดลงของไซยาไนด์ในพลาว์น้ำมันสำปะหลังไม่แห้งเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังไม่เปียกทางการค้า

ตารางที่ ค.1.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ในช่วงเวลา 0-40 นาที ของการอบแห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	4.013×10^{-5}	2	2.006×10^{-5}	0.238	0.795
Error	0.001	6	8.434×10^{-5}		
Total	0.001	8			

ตารางที่ ค.1.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ในช่วงเวลา 40-240 นาที ของการอบแห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	3.536×10^{-6}	2	1.768×10^{-6}	0.471	0.646
Error	2.251×10^{-5}	6	3.752×10^{-6}		
Total	2.605×10^{-5}	8			

ตารางที่ ค.1.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนไซยาไนด์ที่เหลือหลังการอบแห้งต่อไซยาไนด์เริ่มต้นของงพลาว์น้ำมันสำปะหลังไม่แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	0.245	2	0.122	2.615	0.106
Error	0.702	15	0.47		
Total	0.947	17			

ตารางที่ ค.1.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	25.090	3	8.363	116.564	0.000
Error	0.287	4	0.072		
Total	25.377	7			

ตารางที่ ค.1.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
70	6.4732		
80	7.0463		
60		8.3934	
ตัวอย่างควบคุม			11.0639

ตารางที่ ค.1.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลึกของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	20.084	3	6.695	9.973	0.025
Error	2.685	4	0.671		
Total	22.769	7			

ตารางที่ ค.1.7 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันสำปะหลัง
โม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's
multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
70	24.8000	
60	25.1500	
80	25.7000	
ตัวอย่างควบคุม		28.8000

ตารางที่ ค.1.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันสำปะหลัง
โม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่น
ร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	0.849	3	0.283	44.879	0.000
Error	0.050	8	0.006		
Total	0.900	11			

ตารางที่ ค.1.9 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มัน
สำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง ด้วยวิธี
Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	0.8397		
80		1.3418	
70		1.4722	1.4722
60			1.5009

ตารางที่ ค.1.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไส้หม้อแห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับไส้หม้อแห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	0.597	3	0.199	10.592	0.004
Error	0.150	8	0.019		
Total	0.748	11			

ตารางที่ ค.1.11 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไส้หม้อแห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับไส้หม้อแห้งด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
80	3.0767		
60		3.4000	
70		3.4533	3.4533
ตัวอย่างควบคุม			3.7033

ตารางที่ ค.1.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไส้หม้อแห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับไส้หม้อแห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	20.858	3	6.953	128.533	0.000
Error	0.433	8	0.054		
Total	21.290	11			

ตารางที่ ค.1.13 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	6.6100		
80		9.2433	
60		9.5700	9.5700
70			9.9733

ตารางที่ ค.1.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	21.469	3	7.156	20.406	0.000
Error	2.806	8	0.351		
Total	24.275	11			

ตารางที่ ค.1.15 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	9.0833	
80		12.0333
70		12.1567
60		12.3033

ตารางที่ ค.1.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไส้หมี่แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับไส้หมี่แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	81.067	3	27.022	17.860	0.001
Error	12.104	8	1.513		
Total	93.170	11			

ตารางที่ ค.1.17 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไส้หมี่แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับไส้หมี่แห้งด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	11.2233	
70		15.9733
80		17.4333
60		17.6900

ตารางที่ ค.1.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไส้หมี่แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับไส้หมี่แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	189.940	3	63.313	105.262	0.000
Error	4.812	8	0.601		
Total	194.752	11			

ตารางที่ ค.1.19 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	1.2700	
80		9.4833
70		10.7500
60		10.8800

ตารางที่ ค.1.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	61.070	3	20.357	89.202	0.000
Error	1.826	8	0.228		
Total	62.895	11			

ตารางที่ ค.1.21 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	4.1933		
80		8.7467	
60		9.3667	9.3667
70			9.8567

ตารางที่ ค.1.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันน์สำหรับไม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันน์สำหรับไม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	87.611	3	29.204	61.973	0.000
Error	3.770	8	0.471		
Total	91.381	11			

ตารางที่ ค.1.23 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันน์สำหรับไม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันน์สำหรับไม้แห้งด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	4.0767		
80		9.2667	
70			10.6133
60			10.6633

ตารางที่ ค.1.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาวร์มันน์สำหรับไม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันน์สำหรับไม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	51.453	3	17.151	20.724	0.000
Error	6.621	8	0.828		
Total	58.074	11			

ตารางที่ ค.1.25 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 90°C ของ พลาวิคมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	9.3400		
60		12.5633	
70		13.5000	13.5000
80			14.9900

ตารางที่ ค.1.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของพลาวิคมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	36.421	3	12.140	44.569	0.000
Error	3.269	12	0.272		
Total	39.690	15			

ตารางที่ ค.1.27 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของ พลาวิคมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	71.32		
80		74.19	
70		74.43	
60			75.36

ตารางที่ ค.1.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	0.069	3	0.023	3.373	0.055
Error	0.082	12	0.007		
Total	0.151	15			

ตารางที่ ค.1.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดสูงสุดของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	565626.187	3	188542.062	9.245	0.002
Error	244734.750	12	20394.563		
Total	810360.937	15			

ตารางที่ ค.1.29 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนืดสูงสุดของฟลาวรรมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	2801.50	
70		3157.00
80		3255.25
60		3262.50

ตารางที่ ค.1.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดต่ำสุดของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	88141.687	3	29380.562	11.368	0.001
Error	31014.750	12	2584.563		
Total	119156.437	15			

ตารางที่ ค.1.31 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนืดต่ำสุดของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
70	1050.50	
60		1178.00
80		1199.75
ตัวอย่างควบคุม		1252.50

ตารางที่ ค.1.32 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุดของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	858034.750	3	286011.583	14.632	0.000
Error	234567.000	12	19547.250		
Total	1092601.75	15			

ตารางที่ ค.1.33 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยผลต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุดของ ฟลาวร์มันส์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับแม่พิมพ์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	1549.00	
80		2055.50
60		2084.50
70		2106.50

ตารางที่ ค.1.34 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดสุดท้ายของฟลาวร์มันส์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับแม่พิมพ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	609950.250	3	203316.750	38.601	0.000
Error	63205.500	12	5267.125		
Total	673155.750	15			

ตารางที่ ค.1.35 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนืดสุดท้ายของฟลาวร์มันส์สำหรับแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับแม่พิมพ์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
70	1655.75		
60		1949.00	
80		1982.00	
ตัวอย่างควบคุม			2204.75

ตารางที่ ค.1.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าการคืนตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	241089.187	3	80363.062	98.906	0.000
Error	9750.250	12	812.521		
Total	250839.438	15			

ตารางที่ ค.1.37 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าการคืนตัวของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลัง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
70	605.25		
60		771.00	
80		782.25	
ตัวอย่างควบคุม			952.25

ตารางที่ ค.1.38 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสว่าง (L*) ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	2561.851	3	853.950	329.756	0.000
Error	20.717	8	2.590		
Total	2582.568	11			

ตารางที่ ค.1.39 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าความสว่าง (L^*) ของฟลาวร์มันน์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันน์สำหรับผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
70	63.9267	
60	64.9000	
80	65.5533	
ตัวอย่างควบคุม		98.5100

ตารางที่ ค.1.40 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของฟลาวร์มันน์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันน์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	7.171	3	2.390	175.005	0.000
Error	0.109	8	0.014		
Total	7.280	11			

ตารางที่ ค.1.41 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของฟลาวร์มันน์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันน์สำหรับผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
60	-1.7067		
70	-1.6233		
80		-1.3633	
ตัวอย่างควบคุม			0.1967

ตารางที่ ค.1.42 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของฟลาวอร์มันสำหรับปะหลังโม้แห่งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำหรับปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	42.117	3	14.039	80.858	0.000
Error	1.389	8	0.174		
Total	43.506	11			

ตารางที่ ค.1.43 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของฟลาวอร์มันสำหรับปะหลังโม้แห่งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำหรับปะหลัง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	1.3600		
80		4.4833	
70			5.7067
60			6.1567

ตารางที่ ค.1.44 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีความขาวของฟลาวอร์มันสำหรับปะหลังโม้แห่งที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันสำหรับปะหลังที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	2547.219	3	849.073	349.322	0.000
Error	19.445	8	2.431		
Total	2566.664	11			

ตารางที่ ค.1.45 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความขาวของฟลาวร์มันส์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิการอบแห้งแตกต่างกันเปรียบเทียบกับสตาร์ชมันส์สำหรับผลิตภัณฑ์ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	Subset	
	1	2
70	63.4382	
60	64.3194	
80	65.2307	
ตัวอย่างควบคุม		97.9442

ค.2 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการศึกษาผลของแรงดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวร์มันส์สำหรับผลิตภัณฑ์โดยใช้พลาสติกที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ค.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวร์มันส์สำหรับผลิตภัณฑ์ผ่านการให้พลาสติกที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	35358.211	3	11786.070	61.279	0.000
เวลา	1169.121	2	584.561	3.039	0.060
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	2869.903	6	478.317	2.487	0.041
Error	6924.028	36	192.334		
Total	46321.263	47			

ตารางที่ ค.2.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไฮยาโนคของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
20kV-10min	138.2575			
20kV-5min		160.1875		
15kV-15min		160.2350		
15kV-10min		170.5275		
20kV-15min		171.6250		
15kV-5min		180.5575		
10kV-10min			206.1725	
10kV-5min			207.7775	
10kV-15min			209.3025	
5kV-10min			216.2925	216.2925
5kV-5min			219.1375	219.1375
ตัวอย่างควบคุม			228.2875	228.2875
5kV-15min				235.8500

ตารางที่ ค.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.037	3	0.012	0.020	0.996
เวลา	0.034	2	0.017	0.027	0.973
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.161	6	0.027	0.043	1.000
Error	7.484	12	0.624		
Total	7.717	23			

ตารางที่ ค.2.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	2.091	3	2.523	2.523	0.107
เวลา	1.561	2	2.825	2.825	0.099
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	8.472	6	5.112	5.112	0.008
Error	3.315	12	0.276		
Total	15.440	23			

ตารางที่ ค.2.5 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณผลึกของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
10kV-10min	22.1500			
15kV-5min		23.4000		
5kV-10min		23.4500		
15kV-15min		23.4500		
5kV-15min		23.65000	23.6500	
5kV-5min		23.8000	23.8000	23.8000
10kV-15min		24.1000	24.1000	24.1000
20kV-10min		24.1000	24.1000	24.1000
15kV-10min		24.4500	24.4500	24.4500
20kV-5min		24.4500	24.4500	24.4500
20kV-15min		24.6000	24.6000	24.6000
ตัวอย่างควบคุม			24.7500	24.7500
10kV-5min				24.9500

ตารางที่ ค.2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการจับน้ำของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังโม้แห่งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังโม้แห่งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.011	3	0.004	0.596	0.622
เวลา	0.038	2	0.019	3.180	0.053
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.050	6	0.008	1.368	0.254
Error	0.218	36	0.006		
Total	0.317	47			

ตารางที่ ค.2.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการฟองตัวที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังโม้แห่งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังโม้แห่งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.057	3	0.019	4.200	0.030
เวลา	0.047	2	0.023	5.163	0.024
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.057	6	0.010	2.123	0.126
Error	0.054	12	0.005		
Total	0.215	23			

ตารางที่ ค.2.8 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับ ฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset				
	1	2	3	4	5
ตัวอย่าง	3.0929				
ควบคุม					
10kV-5min		3.5233			
10kV-10min		3.5721	3.5721		
15kV-10min		3.6442	3.6442	3.6442	
20kV-5min		3.6556	3.6556	3.6556	
5kV-15min		3.6573	3.6573	3.6573	
5kV-5min		3.6666	3.6666	3.6666	
15kV-5min			3.6900	3.6900	
15kV-15min			3.7015	3.7015	3.7015
5kV-10min			3.7220	3.7220	3.7220
20kV-10min				3.7468	3.7468
10kV-15min				3.7484	3.7484
20kV-15min					3.8536

ตารางที่ ค.2.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	1.718	3	0.573	4.446	0.025
เวลา	0.406	2	0.203	1.578	0.246
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	1.597	6	0.266	2.067	0.134
Error	1.546	12	0.129		
Total	5.268	23			

ตารางที่ ค.2.10 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับ ฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	9.3128		
10kV-15min		10.4005	
10kV-10min		10.4790	
20kV-5min		10.4871	
20kV-10min		10.5595	
10kV-5min		10.6258	
15kV-10min		10.6487	
5kV-15min		10.6613	
20kV-15min		10.7644	
15kV-5min		10.8035	
15kV-15min		10.9966	
5kV-10min		11.0017	
5kV-5min			11.9376

ตารางที่ ค.2.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	1.528	3	0.509	2.411	0.118
เวลา	0.080	2	0.040	0.189	0.830
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	1.122	6	0.187	0.886	0.534
Error	2.534	12	0.211		
Total	5.264	23			

ตารางที่ ค.2.12 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับ ฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	11.2027	
10kV-10min		12.2554
5kV-5min		12.3492
10kV-15min		12.4043
10kV-5min		12.4046
20kV-15min		12.4378
5kV-10min		12.6385
5kV-15min		12.6958
15kV-5min		12.8014
15kV-10min		12.8593
20kV-5min		12.9855
15kV-15min		13.2119
20kV-10min		13.3463

ตารางที่ ค.2.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.775	3	0.258	0.399	0.756
เวลา	0.713	2	0.356	0.550	0.591
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	1.252	6	0.209	0.322	0.913
Error	7.778	12	0.648		
Total	10.518	23			

ตารางที่ ค.2.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.107	3	0.036	1.176	0.360
เวลา	0.049	2	0.025	0.813	0.467
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.104	6	0.017	0.569	0.748
Error	0.365	12	0.030		
Total	0.625	23			

ตารางที่ ค.2.15 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset	
	1	2
ตัวอย่างควบคุม	8.2363	
10kV-5min		10.1188
10kV-10min		10.1484
15kV-15min		10.1559
5kV-10min		10.1965
15kV-10min		10.2084
20kV-10min		10.3143
5kV-15min		10.3168
10kV-15min		10.3349
15kV-5min		10.3417
20kV-5min		10.4012
20kV-15min		10.4020
5kV-5min		10.4231

ตารางที่ ค.2.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	37.117	3	12.372	32.884	0.000
เวลา	7.219	2	3.610	9.594	0.003
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	11.442	6	1.907	5.068	0.008
Error	4.515	12	0.376		
Total	60.294	23			

ตารางที่ ค.2.17 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset					
	1	2	3	4	5	6
ตัวอย่างควบคุม	8.9572					
20kV-10min		11.0648				
20kV-5min		11.4430	11.4430			
15kV-15min		11.7757	11.7757	11.7757		
20kV-15min		11.8250	11.8250	11.8250		
10kV-10min		12.0549	12.0549	12.0549		
15kV-10min		12.1542	12.1542	12.1542		
10kV-15min		12.1686	12.1686	12.1686		
10kV-5min		12.3432	12.3432	12.3432		
5kV-15min			12.8685	12.8685		
15kV-5min				13.1197		
5kV-10min					14.5385	
5kV-5min						16.8605

ตารางที่ ค.2.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	12.228	3	4.076	6.330	0.008
เวลา	1.656	2	0.828	1.286	0.312
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	8.890	6	1.482	2.301	0.103
Error	7.727	12	0.644		
Total	30.501	23			

ตารางที่ ค.2.19 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สถานะการทดลอง	Subset				
	1	2	3	4	5
ตัวอย่างควบคุม	8.6574				
20kV-10min		14.2517			
10kV-15min		14.5190	14.5190		
20kV-15min		14.6027	14.6027	14.6027	
10kV-10min		15.3023	15.3023	15.3023	15.3023
20kV-5min		15.3150	15.3150	15.3150	15.3150
15kV-5min		15.7519	15.7519	15.7519	15.7519
15kV-10min		15.8821	15.8821	15.8821	15.8821
5kV-15min		16.1939	16.1939	16.1939	16.1939
5kV-5min			16.6732	16.6732	16.6732
5kV-10min				16.7114	16.7114
10kV-5min					16.8641
15kV-15min					17.3952

ตารางที่ ค.2.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	50.794	3	16.931	22.708	0.000
เวลา	4.889	2	2.445	3.279	0.073
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	6.630	6	1.105	1.482	0.264
Error	8.947	12	0.746		
Total	71.260	23			

ตารางที่ ค.2.21 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
ตัวอย่างควบคุม	13.6465			
15kV-10min		17.9438		
20kV-10min		18.1027	18.1027	
15kV-5min		18.2973	18.2973	
20kV-15min		18.7964	18.7964	
15kV-15min		19.0256	19.0256	
20kV-5min		19.8120	19.8120	
10kV-15min		19.9292	19.9292	
10kV-10min			20.0229	
5kV-15min				21.9797
5kV-10min				22.0825
5kV-5min				22.0902
10kV-5min				22.3194

ตารางที่ ค.2.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	2.474	3	0.825	4.333	0.027
เวลา	0.391	2	0.195	1.026	0.388
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	1.586	6	0.264	1.389	0.295
Error	2.284	12	0.190		
Total	6.734	23			

ตารางที่ ค.2.23 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชันของ ฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
ตัวอย่างควบคุม	73.9500			
20kV-15min	74.3250	74.3250		
10kV-10min	74.7500	74.7500	74.7500	
15kV-15min	74.7750	74.7750	74.7750	
20kV-10min	74.7750	74.7750	74.7750	
15kV-10min	74.8000	74.8000	74.8000	
20kV-5min	74.8000	74.8000	74.8000	
15kV-5min	74.8250	74.8250	74.8250	
5kV-10min		75.1250	75.1250	75.1250
5kV-5min		75.2000	75.2000	75.2000
10kV-5min		75.2500	75.2500	75.2500
10kV-15min			75.5750	75.5750
5kV-15min				76.0250

ตารางที่ ค.2.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชันของฟลาวรร่มันสำหรับแม่พิมพ์ที่มีการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรร่มันสำหรับแม่พิมพ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.032	3	0.011	6.701	0.007
เวลา	0.005	2	0.002	1.443	0.274
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.011	6	0.002	1.123	0.405
Error	0.019	12	0.002		
Total	0.066	23			

ตารางที่ ค.2.25 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชันของฟลาวรร่มันสำหรับแม่พิมพ์ที่มีการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับ ฟลาวรร่มันสำหรับแม่พิมพ์ โดยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset		
	1	2	3
ตัวอย่างควบคุม	4.0650		
20kV-15min		4.3000	
15kV-10min		4.3650	4.3650
15kV-15min		4.3650	4.3650
20kV-10min		4.3650	4.3650
10kV-15min		4.4000	4.4000
15kV-5min		4.4000	4.4000
20kV-5min		4.4000	4.4000
5kV-5min		4.4350	4.4350
5kV-10min		4.4350	4.4350
10kV-5min		4.4350	4.4350
10kV-10min		4.4350	4.4350
5kV-15min			4.4700

ตารางที่ ค.2.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดสูงสุดของฟลาว์น้ำมันสำหรับหม้อแปลงที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์น้ำมันสำหรับหม้อแปลงที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	5398.000	3	1799.333	0.158	0.922
เวลา	4082.583	2	2041.292	0.179	0.838
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	13582.750	6	2263.792	0.199	0.971
Error	136536.000	12	11378.000		
Total	159599.333	23			

ตารางที่ ค.2.27 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนืดสูงสุดของฟลาว์น้ำมันสำหรับหม้อแปลงที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์น้ำมันสำหรับหม้อแปลงแห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset	
	1	2
10kV-15min	2311.5000	
20kV-5min	2317.5000	
5kV-5min	2324.0000	
10kV-10min	2349.0000	
10kV-5min	2351.0000	
5kV-15min	2357.0000	
15kV-10min	2359.5000	
5kV-10min	2361.5000	
15kV-5min	2364.0000	
20kV-10min	2372.0000	
15kV-15min	2379.0000	
20kV-15min	2434.0000	
ตัวอย่างควบคุม		3262.0000

ตารางที่ ค.2.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดต่ำสุดของฟลาว์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	21145.500	3	7048.500	8.917	0.002
เวลา	396.083	2	198.042	0.251	0.782
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	1630.250	6	271.708	0.344	0.900
Error	9486.000	12	790.500		
Total	32657.833	23			

ตารางที่ ค.2.29 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนืดต่ำสุดของฟลาว์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
5kV-5min	544.5000			
5kV-15min	549.0000			
5kV-10min	556.5000	556.5000		
10kV-10min	564.0000	564.0000		
10kV-15min	564.0000	564.0000		
10kV-5min	575.5000	575.5000	575.5000	
20kV-5min	600.0000	600.0000	600.0000	
15kV-15min	607.0000	607.0000	607.0000	
15kV-10min	611.0000	611.0000	611.0000	
15kV-5min	612.0000	612.0000	612.0000	
20kV-15min		627.5000	627.5000	
20kV-10min			640.0000	
ตัวอย่างควบคุม				1199.0000

ตารางที่ ค.2.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุดของฟลาว์ร์มันส์สำหรับหลังโม้แห่งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับ ฟลาว์ร์มันส์สำหรับหลังโม้แห่งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	7401.500	3	2467.167	0.364	0.780
เวลา	3023.083	2	1511.542	0.223	0.803
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	9242.250	6	1540.375	0.227	0.960
Error	81377.000	12	6781.417		
Total	101043.833	23			

ตารางที่ ค.2.31 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดสุดท้ายของฟลาว์ร์มันส์สำหรับหลังโม้แห่งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์ร์มันส์สำหรับหลังโม้แห่งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	68851.500	3	22950.500	13.555	0.000
เวลา	2287.583	2	1143.792	0.676	0.527
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	4681.750	6	780.292	0.461	0.824
Error	20317.000	12	1693.083		
Total	96137.833	23			

ตารางที่ ค.2.32 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความหนืดสุดท้ายของฟลาว์มันส์สำหรับปลั๊กไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์มันส์สำหรับปลั๊กไม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
5kV-5min	727.5000			
5kV-15min	737.5000			
5kV-10min	752.0000			
10kV-15min	766.5000	766.5000		
10kV-10min	777.5000	777.5000		
10kV-5min	782.5000	782.5000		
20kV-5min	822.0000	822.0000	822.0000	
15kV-15min		851.0000	851.0000	
15kV-5min		855.0000	855.0000	
15kV-10min		860.0000	860.0000	
20kV-15min			884.5000	
20kV-10min			893.0000	
ตัวอย่างควบคุม				1987.5000

ตารางที่ ค.2.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการคืนตัวของฟลาว์มันส์สำหรับปลั๊กไม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาว์มันส์สำหรับปลั๊กไม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	13931.333	3	4643.778	13.712	0.000
เวลา	811.000	2	405.500	1.197	0.336
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	977.667	6	162.944	0.481	0.810
Error	4064.000	12	338.667		
Total	19784.000	23			

ตารางที่ ค.2.34 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยการคืนตัวของฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset				
	1	2	3	4	5
5kV-5min	183.0000				
5kV-15min	188.5000				
5kV-10min	195.5000				
10kV-15min	202.5000	202.5000			
10kV-5min	207.0000	207.0000	207.0000		
10kV-10min	213.5000	213.5000	213.5000	213.5000	
20kV-5min	222.0000	222.0000	222.0000	222.0000	
15kV-5min		243.0000	243.0000	243.0000	
15kV-15min		244.0000	244.0000	244.0000	
15kV-10min			249.0000	249.0000	
20kV-10min				253.0000	
20kV-15min				257.0000	
ตัวอย่างควบคุม					788.5000

ตารางที่ ค.2.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสว่าง (L^*) ของฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาร์วอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	3.014	3	1.005	0.679	0.582
เวลา	0.101	2	0.050	0.034	0.967
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	24.802	6	4.134	2.794	0.061
Error	17.756	12	1.480		
Total	45.673	23			

ตารางที่ ค.2.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเป็นสีแดง (a*) ของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.449	3	0.150	0.637	0.606
เวลา	0.324	2	0.162	0.690	0.520
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	1.342	6	0.224	0.952	0.495
Error	2.819	12	0.235		
Total	4.934	23			

ตารางที่ ค.2.37 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	4.534	3	1.511	1.286	0.324
เวลา	2.154	2	1.077	0.916	0.426
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	9.682	6	1.614	1.373	0.301
Error	14.104	12	1.175		
Total	30.474	23			

ตารางที่ ค.2.38 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีความขาวของฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่มีผ่านการให้พลาสมาที่ระดับแรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟลาวรรีมันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความชื้นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	2.166	3	0.722	0.768	0.534
เวลา	0.022	2	0.011	0.012	0.988
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	20.020	6	3.337	3.548	0.029
Error	11.286	12	0.941		
Total	33.494	23			

ค.3 การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับการศึกษาผลของความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้ง แรงแดันไฟฟ้า และเวลา ต่อปริมาณไซยาไนด์ในฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งโดยใช้พลาสมาที่ไม่ใช้ความร้อนที่ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ ค.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ระดับความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นและแรงแดันไฟฟ้าแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
ความเข้มข้นไซยาไนด์	0.000	2	0.000	19.586	0.001
แรงแดันไฟฟ้า	0.001	2	0.001	64.320	0.000
ความเข้มข้นไซยาไนด์× แรงแดันไฟฟ้า	0.001	4	0.000	18.201	0.000
Error	8.063×10^{-5}	9	8.959×10^{-6}		
Total	0.002	17			

ตารางที่ ค.3.2 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ระดับความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นและแรงแดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset				
	1	2	3	4	5
143ppm-20kV	-0.045250				
143ppm-15kV		-0.037150			
233ppm-20kV		-0.034850	-0.034850		
233ppm-15kV			-0.028950		
69ppm-10kV				-0.020650	
69ppm-15kV				-0.020600	
69ppm-20kV				-0.020400	
233ppm-10kV					-0.011850
143ppm-10kV					-0.011600

ตารางที่ ค.3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น	0.000	2	5.314×10^{-5}	18.053	0.021
Error	8.830×10^{-6}	3	2.943×10^{-6}		
Total	0.000	5			

ตารางที่ ค.3.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นแตกต่างกัน ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset	
	1	2
69.16 ppm	-0.0207	
232.60 ppm		-0.0119
143.18 ppm		-0.0116

ตารางที่ ค.3.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ที่ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้นแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
ความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น	0.000	2	0.000	20.678	0.018
Error	1.987×10^{-5}	3	6.623×10^{-6}		
Total	0.000	5			

ตารางที่ ค.3.6 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ที่ความเข้มข้นไฮยาไนด์เริ่มต้นแตกต่างกัน ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset		
	1	2	3
143.18 ppm	-0.0372		
232.60 ppm		-0.0290	
69.16 ppm			-0.0206

ตารางที่ ค.3.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ ที่ความเข้มข้นไฮยาไนด์เริ่มต้นแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
ความเข้มข้นไฮยาไนด์เริ่มต้น	0.000	2	7.211×10^{-5}	4.505	0.125
Error	4.801×10^{-5}	3	1.600×10^{-5}		
Total	0.000	5			

ตารางที่ ค.3.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮยาไนด์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเข้มข้นไฮยาไนด์เริ่มต้น 232.60 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.001	2	0.000	20.774	0.017
Error	4.121×10^{-5}	3	1.374×10^{-5}		
Total	0.001	5			

ตารางที่ ค.3.9 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮยาไนต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโมแห่งที่ระดับความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 232.60 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset	
	1	2
20kV	-0.0349	
15kV	-0.0290	
10kV		-0.0119

ตารางที่ ค.3.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮยาไนต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโมแห่งที่ระดับความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 143.18 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.001	2	0.001	66.983	0.003
Error	2.763×10^{-5}	3	9.210×10^{-6}		
Total	0.001	5			

ตารางที่ ค.3.11 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไฮยาไนต์ของฟลาวร์มันสำปะหลังโมแห่งที่ระดับความเข้มข้นไฮยาไนต์เริ่มต้น 143.18 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset	
	1	2
20kV	-0.0453	
15kV	-0.0372	
10kV		-0.0116

ตารางที่ ค.3.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าคงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงของไซยาไนด์ของฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ระดับความเข้มข้นไซยาไนด์เริ่มต้น 69.16 ppm ที่แรงดันไฟฟ้าแตกต่างกัน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	7.000×10^{-8}	2	3.500×10^{-8}	0.009	0.991
Error	1.179×10^{-5}	3	3.928×10^{-6}		
Total	1.186×10^{-5}	5			

ตารางที่ ค.3.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้ง ฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกัน และผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้าและเวลาแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
แรงดันไฟฟ้า	0.150	2	0.075	0.409	0.667
เวลา	0.115	3	0.038	0.209	0.889
ความเข้มข้นไซยาไนด์	17.105	2	8.553	46.797	0.000
แรงดันไฟฟ้า×เวลา	0.252	6	0.042	0.230	0.964
Error	6.579	36	0.183		
Total	24.889	71			

ตารางที่ ค.3.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไซยาไนด์ของฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้ง และ ฟลาวอร์มันสำปะหลังโม้แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
จำนวนรอบ	35401.252	4	8850.313	206.232	0.000
Error	214.572	5	42.914		
Total	35615.824	9			

ตารางที่ ค.3.15 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณไฮยาไนด์ของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที และมีจำนวนรอบการให้พลาสมาที่แตกต่างกัน ด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สภาวะการทดลอง	Subset			
	1	2	3	4
4 รอบ	64.0050			
3 รอบ	79.9650			
2 รอบ		110.9450		
1 รอบ			138.2600	
ฟลาวอร์มันสำปะหลัง ปกติ				232.6050

ตารางที่ ค.3.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณผลึกของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.202	1	0.202	4.765	0.161
Error	0.085	2	0.042		
Total	0.287	3			

ตารางที่ ค.3.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสามารถในการจับน้ำของฟลาวอร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาวอร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.004	1	0.004	0.724	0.443
Error	0.022	4	0.005		
Total	0.025	5			

ตารางที่ ค.3.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งและฟลาวร์มันส์สำหรับไม้ผ่านการให้พลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.129	1	0.129	37.531	0.026
Error	0.007	2	0.003		
Total	0.136	3			

ตารางที่ ค.3.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งและฟลาวร์มันส์สำหรับไม้ผ่านการให้พลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.070	1	0.070	1.085	0.407
Error	0.130	2	0.065		
Total	0.200	3			

ตารางที่ ค.3.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาวร์มันส์สำหรับไม้แห้งและฟลาวร์มันส์สำหรับไม้ผ่านการให้พลาสติกที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.021	1	0.021	0.243	0.671
Error	0.175	2	0.087		
Total	0.196	3			

ตารางที่ ค.3.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาวร์มันน์ สำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันน์สำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.337	1	0.337	0.166	0.723
Error	4.064	2	2.032		
Total	4.401	3			

ตารางที่ ค.3.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 60°C ของฟลาวร์มันน์ สำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันน์สำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.065	1	0.065	14.311	0.063
Error	0.009	2	0.005		
Total	0.074	3			

ตารางที่ ค.3.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายอุณหภูมิ 70°C ของฟลาวร์มันน์ สำปะหลังโม้แห้งและฟลาวร์มันน์สำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.060	1	0.060	0.218	0.687
Error	0.550	2	0.275		
Total	0.609	3			

ตารางที่ ค.3.24 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 80°C ของฟลาร์มัน สำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.028	1	0.028	0.252	0.665
Error	0.223	2	0.112		
Total	0.251	3			

ตารางที่ ค.3.25 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 90°C ของฟลาร์มัน สำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	2.379	1	2.379	3.028	0.224
Error	1.571	2	0.786		
Total	3.950	3			

ตารางที่ ค.3.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดเจลาคีโนเซชันของฟลาร์มัน สำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.002	1	0.002	0.008	0.938
Error	0.643	2	0.321		
Total	0.645	3			

ตารางที่ ค.3.27 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเวลาที่ใช้ในการเกิดเจลาติโนเซชันของฟลาวรรมันสำหรับปลั๊กไม้แห้งและฟลาวรรมันสำหรับปลั๊กที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.004	1	0.004	1.988	0.294
Error	0.004	2	0.002		
Total	0.008	3			

ตารางที่ ค.3.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดสูงสุดของฟลาวรรมันสำหรับปลั๊กไม้แห้งและ ฟลาวรรมันสำหรับปลั๊กที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	92112.250	1	92112.250	54.984	0.018
Error	3350.500	2	1675.250		
Total	95462.750	3			

ตารางที่ ค.3.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดต่ำสุดของฟลาวรรมันสำหรับปลั๊กไม้แห้งและ ฟลาวรรมันสำหรับปลั๊กที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	48180.250	1	48180.250	241.808	0.004
Error	398.500	2	199.250		
Total	48578.750	3			

ตารางที่ ค.3.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุดของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	7056.000	1	7056.000	6.386	0.127
Error	2210.000	2	1105.000		
Total	9266.000	3			

ตารางที่ ค.3.31 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนืดสุดท้ายของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	60762.250	1	60762.250	651.606	0.002
Error	186.500	2	93.250		
Total	60948.750	3			

ตารางที่ ค.3.32 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการคืนตัวของฟลาร์มันสำปะหลังโม้แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	729.000	1	729.000	2.426	0.260
Error	601.000	2	300.500		
Total	1330.000	3			

ตารางที่ ค.3.33 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความสว่าง (L^*) ของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม้แห้ง และฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	1.946	1	1.946	213.263	0.005
Error	0.018	2	0.009		
Total	1.964	3			

ตารางที่ ค.3.34 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม้แห้งและฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.006	1	0.006	8.000	0.106
Error	0.002	2	0.001		
Total	0.008	3			

ตารางที่ ค.3.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม้แห้งและฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.245	1	0.245	217.800	0.005
Error	0.002	2	0.001		
Total	0.247	3			

ตารางที่ ค.3.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีความขาวของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม้แห้ง และ ฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	1.626	1	1.626	200.077	0.005
Error	0.016	2	0.008		
Total	1.642	3			

ตารางที่ ค.3.37 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณความชื้นของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม้แห้ง และ ฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.040	1	0.040	15.385	0.059
Error	0.005	2	0.003		
Total	0.045	3			

ตารางที่ ค.3.38 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณโปรตีนของฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังไม้แห้งและ ฟลาวร์มันส์สำหรับปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.001	1	0.001	0.122	0.760
Error	0.010	2	0.005		
Total	0.011	3			

ตารางที่ ค.3.39 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเถ้าของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.018	1	0.018	042.882	0.023
Error	0.001	2	0.000		
Total	0.019	3			

ตารางที่ ค.3.40 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณไขมันของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.009	1	0.009	9.757	0.089
Error	0.002	2	0.001		
Total	0.011	3			

ตารางที่ ค.3.41 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเส้นใยหยาบของฟลาวรรีม้นสำปะหลังโม้แห้งและฟลาวรรีม้นสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.024	1	0.024	3.988	0.184
Error	0.012	2	0.006		
Total	0.036	3			

ตารางที่ ค.3.42 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณคาร์โบไฮเดรตของฟลาร์มันสำปะหลังไม่แห้งและฟลาร์มันสำปะหลังที่ผ่านการให้พลาสมาที่แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ เป็นเวลา 10 นาที ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Source	SS	df	MS	F	sig
สภาวะการทดลอง	0.044	1	0.044	110.250	0.009
Error	0.001	2	0.000		
Total	0.045	3			



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิมพ์ภัค ทวีวงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	31 ตุลาคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2562 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	403/116 ซ.จรัญสนิทวงศ์ 33 ถ.จรัญสนิทวงศ์ แขวงบางขุนศรี เขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร 10700
ผลงานตีพิมพ์	the 60th Kasersart University Annual Conference
รางวัลที่ได้รับ	-



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY