

การเตรียมและศึกษาสมบัติของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยโอโซน

Preparation and Properties Studies of Ozonized Cassava Starch

คำนำ

โอโซน (O_3) เป็นก๊าซที่ไม่เสถียร จะสลายตัวเป็นออกซิเจน (O_2) หรือทำปฏิกิริยากับสิ่งรอบตัวตลอดเวลา จัดเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อ สามารถย่อยสลายสี กลิ่น ก๊าซพิษ และสารเคมีได้ และไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (สุทธิเวช, 2540 และสุรพล, 2543) และยังได้รับการรับรองว่าเป็นสารที่ใช้ได้อย่างปลอดภัย (GRAS: Generally Recognized as Safe) จากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (USFDA) ในปี พ.ศ. 2525 ด้วย (สุรพล, 2543 และสิริพร, 2544) จากสมบัติดังกล่าว ทำให้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์ของโอโซนทั้งในด้านการฆ่าเชื้อ (Ishizaki, 1987) การกำจัดสี (Sozanska, 1991, Moodley *et al.*, 1999, วราภรณ์, 2540, และสุเมธ, 2541) และการกำจัดสารพิษ เพื่อใช้แทนสารออกซิไดซ์ที่ใช้ทั่วไปเช่น คลอรีน ไฮโปคลอไรท์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น เนื่องจากสารดังกล่าวก่อให้เกิดสารตกค้างซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม หากไม่มีการกำจัดที่ถูกต้อง

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจและเป็นแหล่งแป้งที่สำคัญของประเทศไทย หัวมันสำปะหลังโดยประมาณร้อยละ 50 ที่ผลิตได้ในประเทศจะถูกนำมาแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลัง กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในประเทศไทย โดยทั่วไปกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะเริ่มจากการทำความสะอาดหัวมัน ส่งเข้าเครื่องสับและเครื่องโม่ จากนั้นเข้าเครื่องสกัดแป้งโดยใช้น้ำเป็นตัวสกัดแป้ง และมีการใช้น้ำกำมะถันเพื่อช่วยฟอกแป้งให้ขาว ทำลายเชื้อจุลินทรีย์เพื่อลดการสูญเสียของแป้งและช่วยลดการอุดตันของผ้ากรองในเครื่องสกัดแป้ง เนื่องจากยางเมือกในหัวมันสำปะหลัง จากนั้นน้ำแป้งจะถูกส่งเข้าเครื่องแยกกากและทำให้เข้มข้นขึ้น และเข้าเครื่องสลัดน้ำก่อนนำไปทำแห้ง ทั้งนี้การใช้น้ำกำมะถันจะทำให้มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในแป้ง โดยจะแตกต่างกันตามกระบวนการผลิต แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ประมาณ 30 – 200 mg /g starch ซัลเฟอร์ไดออกไซด์นี้จะส่งผลต่อสมบัติของแป้งและการนำแป้งไปใช้ (Sriroth *et al.*, 1998)

ด้วยสมบัติที่เป็นพอลิเมอร์ของแป้ง จึงได้มีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงสมบัติของอาหาร และยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมยา เป็นต้น แต่เนื่องจากแป้งมีสมบัติเฉพาะตัว การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าวให้เกิดประสิทธิผล อาจต้องมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติบางอย่างด้วยการดัดแปร (Modification) ซึ่งสามารถทำได้โดยกระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางเทคโนโลยีชีวภาพ (BeMiller, 1997) ในปัจจุบันพบว่า การดัดแปรทางเคมีเป็นวิธีที่มีการผลิตในเชิงการค้ามากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสามารถผลิตแป้งที่มีคุณภาพได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ เช่น แป้งย่อยด้วยกรด แป้งคลอสลิง แป้งเอสเทอร์ แป้งออกซิไดซ์ เป็นต้น

แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งดัดแปรทางเคมีชนิดหนึ่ง ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้สารออกซิไดซ์ ซึ่งทางการค้านิยมใช้โซเดียมไฮโปคลอไรท์ ทำให้ได้แป้งเปียกที่มีความหนืดต่ำ เมื่อเย็นตัวลงจะได้เจลและฟิล์มใส เนื่องจากมีอัตราการกินตัวต่ำ อันเนื่องมาจากหมู่คาร์บอกซิลและหมู่คาร์บอนิล ที่เกิดขึ้นจากการเกิดออกซิเดชันของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลแป้ง ด้วยสมบัตินี้จึงเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมกระดาษและอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อใช้เพิ่มความแข็งแรงกับผลิตภัณฑ์ โดยใช้เคลือบผิวหน้าให้เรียบและแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม การดัดแปรแป้งทางเคมียังมีข้อจำกัดเรื่องสารเคมีตกค้างทั้งในแป้งและในของเสียจากกระบวนการผลิต ซึ่งจะต้องควบคุมให้อยู่ในมาตรฐานด้านความปลอดภัย ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการดัดแปรที่สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าว จึงมีความสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมแป้ง

การวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาถึงการนำโอโซนมาใช้ในการปรับปรุงและ/หรือดัดแปรสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง โดยจะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนในสภาพแขวนลอย และเปรียบเทียบกับแป้งออกซิไดซ์ทางการค้าซึ่งดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี รวมไปถึงการศึกษาผลของคุณภาพแป้งมันสำปะหลังที่นำมาผ่านการให้โอโซน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีการดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของความเข้มข้นโอโซน ในการใช้โอโซน (Ozonation) เพื่อการดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง ที่มีต่อสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลัง
2. ศึกษาผลของคุณภาพแป้งมันสำปะหลังที่นำมาผ่านการให้โอโซน ได้แก่ ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในแป้งต่อสมบัติต่าง ๆ ของแป้ง
3. เปรียบเทียบความสามารถในการเกิดออกซิเดชันและสมบัติของแป้งดัดแปรด้วยโอโซน กับแป้งออกซิไดซ์ทางการค้าที่ดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี

การตรวจเอกสาร

1. โอโซน (Ozone)

โอโซน คือรูปแบบหนึ่งของออกซิเจน ปกติออกซิเจนหนึ่งโมเลกุลจะมี 2 อะตอม (O_2) เมื่ออยู่ในรูปของโอโซนหนึ่งโมเลกุลจะมี 3 อะตอม (O_3) ซึ่งมีสมบัติพิเศษกว่าออกซิเจนปกติ โอโซนได้ถูกพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1840 โดย ดร.คริสเตียน ฟรีดริช เซินไบน์ (Dr. Christian Friedrich Schonbein) นักเคมีชาวเยอรมัน โดยตั้งชื่อเป็นภาษากรีกว่า “Ozein” ที่แปลว่า “ดม” (สุรพล, 2543)

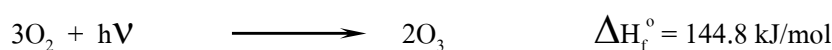
ชั้นบรรยากาศของโลกที่ระดับความสูง 20 – 40 กิโลเมตรเหนือพื้นโลกที่เรียกว่า ชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ปกคลุมด้วยชั้นโอโซน ซึ่งมีประมาณ 5 – 10 พีพีเอ็ม (ส่วนในล้านส่วน) ช่วยป้องกันรังสีจากภายนอกโลก โดยเฉพาะรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์ ในช่วงความยาวคลื่น 290 – 390 นาโนเมตร ไม่ให้ตกกระทบผิวโลกมากเกินไปจนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้โอโซนยังพบได้ในธรรมชาติบนพื้นโลก โดยเฉพาะบริเวณชายทะเล และบนยอดภูเขาซึ่งมีปริมาณเพียง 0.01 – 0.05 พีพีเอ็ม โดยเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับรังสีอัลตราไวโอเลตจากแสงอาทิตย์หรือจากสายฟ้าแลบในขณะฝนตก เนื่องจากโอโซนมีเสถียรภาพต่ำ จึงสลายตัวเป็นก๊าซออกซิเจนได้ง่าย แต่ปริมาณเพียงเล็กน้อยนี้สามารถทำให้มลพิษที่มีอยู่ในอากาศถูกทำลายจนหมด จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่อากาศในบริเวณนี้มีความบริสุทธิ์และสดชื่นมากกว่าอากาศในเมืองใหญ่ซึ่งมีมลพิษค่อนข้างสูง (สุรพล, 2543)

สมบัติเด่นของโอโซน คือเป็นก๊าซที่มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว สามารถรับรู้ได้ถึงความเข้มข้นต่ำในอากาศประมาณ 0.01 พีพีเอ็ม สามารถมองเห็นเป็นมีสีน้ำเงินเข้มได้ที่ความเข้มข้นสูงหลายพันส่วนในล้านส่วน เป็นก๊าซที่ไม่เสถียร จะสลายตัวเป็นออกซิเจนหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งรอบตัวอยู่ตลอดเวลา มีสถานะเป็นก๊าซที่อุณหภูมิบรรยากาศ มีสถานะเป็นของเหลว (จุดเดือด) ที่ -112 องศาเซลเซียส (มีสีน้ำเงินเข้ม) และมีสถานะเป็นของแข็งหรือแข็งตัว (จุดหลอมเหลวหรือจุดเยือกแข็ง) ที่ -251 องศาเซลเซียส สามารถละลายน้ำได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจน เป็นก๊าซที่มีพลังงานในการออกซิเดชัน (oxidation potential) สูง (2.07 V) ซึ่งสูงกว่าคลอรีน (1.36 V) 1.52 เท่า มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วกว่าคลอรีน 3,125 เท่า สามารถย่อยสลายสี กลิ่น ก๊าซพิษ และสารเคมีได้ดี (สุรพล, 2543)

1.1 การผลิตโอโซน

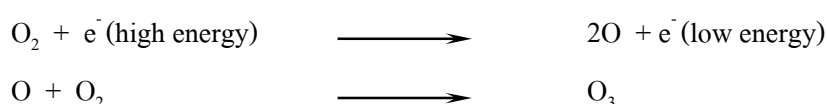
ก๊าซโอโซนสามารถผลิตขึ้นได้จากก๊าซออกซิเจนในระดับความเข้มข้นสูง คือ ร้อยละ 0.25 – 6 โดยน้ำหนักในบรรยากาศออกซิเจน การผลิตโอโซนในอุตสาหกรรมจะต้องเป็นระบบปิด มีการสร้างและปล่อยโอโซนในจุดที่ต้องการใช้งาน (สุทธิเวช, 2540) โดยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1.1.1 Ultraviolet method เป็นการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตร ลงบนออกซิเจน โมเลกุลออกซิเจน (O_2) จะรับพลังงานจากแสงอัลตราไวโอเล็ตและเปลี่ยนเป็นโอโซน (O_3) ดังสมการ



โดยวิธีนี้โอโซนที่ผลิตได้มีความเข้มข้นสูงสุดเพียงร้อยละ 0.25 – 0.3 โดยน้ำหนัก

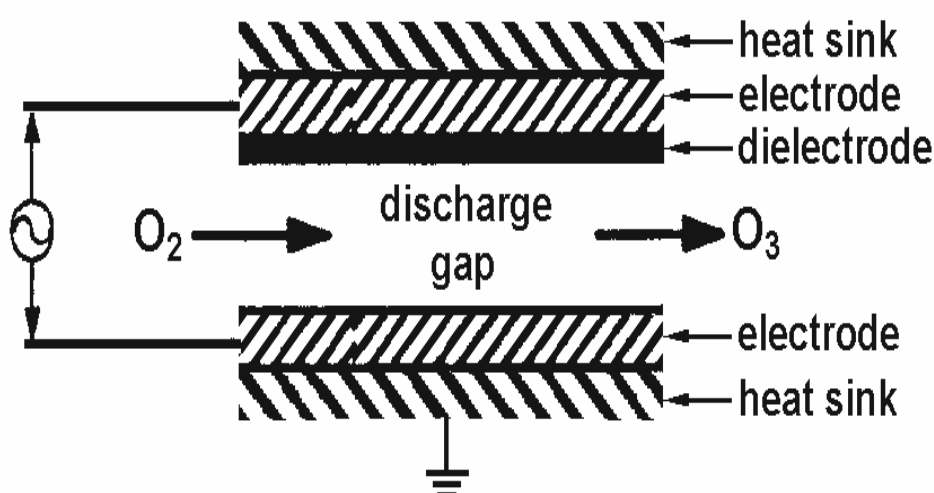
1.1.2 Corona electric discharge method เป็นวิธีที่ใช้ผลิตโอโซนมีความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก โดยอาศัยการฉายลำแสงอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง (6 – 7 อิเล็กตรอนโวลต์) ลงบนออกซิเจน ทำให้โมเลกุลออกซิเจนแตกออกเป็น 2 อะตอมออกซิเจน จากนั้นแต่ละอะตอมออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนอีกหนึ่งโมเลกุลเปลี่ยนเป็นโอโซน ดังสมการ



การเกิดอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงเป็นผลมาจากเครื่องถ่ายประจุโคโรนา (corona discharge) โดยใช้ขั้วไฟฟ้า (electrode) 2 แท่งวางขนานกัน ด้านหนึ่งของขั้วไฟฟ้าแท่งหนึ่งจะเคลือบด้วยสารไดอิเล็กตริก (dielectric material) ซึ่งทำด้วยแก้ว หรือวัสดุเซรามิก และขั้วไฟฟ้าอีกแท่งหนึ่งต่อเข้ากับสายดิน (ground) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าสลับลงบนขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้าแท่งหนึ่งไปยังอีกแท่งหนึ่ง ขณะเดียวกัน ก๊าซออกซิเจนจะไหลผ่านตรงช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งเมื่อก๊าซออกซิเจนได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโอโซน (แสดงในภาพที่ 1)

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้า จะทำให้เกิดความร้อนสูง ซึ่งมีผลต่อการสลายตัวของโอโซน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อแท่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองเข้ากับแผ่นกระจายความร้อน (heat sink) ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิของแท่งขั้วไฟฟ้าลง

ความเข้มข้นของโอโซนที่ออกจากเครื่องผลิตโอโซน โดยทั่วไปจะมีความเข้มข้น อยู่ที่ร้อยละ 1 – 10 โดยน้ำหนัก ถ้าให้ออกซิเจนแทนอากาศจะทำให้ได้โอโซนที่มีคุณภาพดีกว่า นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆ ที่ช่วยเพิ่มคุณภาพของโอโซน คือ การทำให้ออกซิเจนหรืออากาศเป้งก่อนที่จะเข้าเครื่องผลิตโอโซน การทำให้เย็น และการเพิ่มความดันบรรยากาศเล็กน้อย

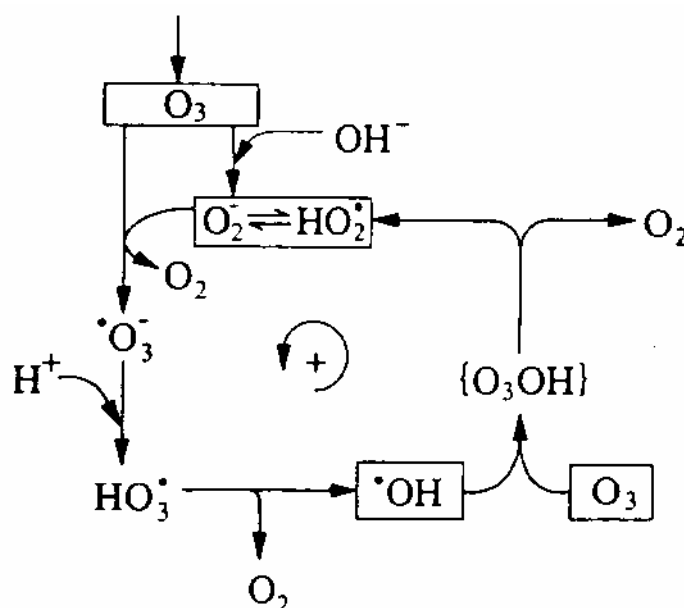


ภาพที่ 1 รูปแบบเครื่องผลิตโอโซน โดย corona electric discharge

ที่มา: ดัดแปลงจาก Byrd Jr. and Knoernschild (1992) และสุทธิเวช (2540)

1.2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซน

โอโซนเป็นก๊าซที่ไม่เสถียร จะสลายตัวเป็นออกซิเจนหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งรอบตัวอยู่ตลอดเวลา โดยแตกตัวให้อนุมูล (radical) ต่าง ๆ ได้แก่ hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$), $\text{HO}_3\cdot$, $\text{HO}_4\cdot$, และ superoxide (O_2^-) ดังแสดงในภาพที่ 2 อนุมูลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (strong oxidant) (Masten and Davies, 1994)



ก) ในน้ำบริสุทธิ์

ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนในน้ำ

หมายเหตุ O_3 คือ โอโซน, O_2 คือ ออกซิเจน, OH^- คือ hydroxide ion, H^+ คือ Hydrogen ion, O_2^- คือ superoxide, $\text{HO}_2\cdot$ คือ hydroperoxyl radical, O_3^- คือ ozonide radical, $\text{HO}_3\cdot$ และ $\{\text{O}_3\text{OH}\}$ หรือ $\text{HO}_4\cdot$ คือ อินเตอร์มีเดียต และ $\cdot\text{OH}$ คือ hydroxyl radical

ที่มา: Masten and Davies (1994)

ในแหล่งน้ำธรรมชาติ กลไกการสลายตัวของโอโซนจะซับซ้อนกว่าในน้ำบริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะในน้ำธรรมชาติจะมีสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งอาจเป็นตัวก่อ (initiator) เช่น ฟอर्मेट (COOCH_3), HO_2^- , Fe^{2+} และ hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) เป็นต้น หรือเป็นตัว promotor เช่น ฟอर्मेट (COOCH_3), และ primary alcohol เป็นต้น หรืออาจเป็นตัวยับยั้ง (inhibitor) เช่น คาร์บอเนต, ไบคาร์บอเนต, และ tertiary alcohol จากการสลายตัวของโอโซน เป็นต้น และยังมีอนุมูล hydroxide ion เป็นตัว promotor ของการสลายตัวของโอโซน ครึ่งชีวิต (half life) ของโอโซนจึงค่อนข้างสั้นในสภาพที่เป็นค่า โดยที่ pH 10 ครึ่งชีวิตของโอโซนในน้ำบริสุทธิ์ประมาณ 30 นาที สารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติที่เป็นตัวทำลายโอโซน (scavenger) สามารถทำปฏิกิริยากับ hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) ดังนั้นจึงหยุดปฏิกิริยาของ radical chain reaction ที่ส่งผลให้เกิด hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) และสารประกอบอินทรีย์ในธรรมชาติยังเป็นตัว initiator และตัว promotor ของปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนด้วย (Masten and Davies, 1994)

ส่วนกลไกการสลายตัวของโอโซนโดยใช้แสง มีนักวิทยาศาสตร์ได้ตรวจสอบและพบว่าโอโซนจะสลายตัวเกิดเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หลังจากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะทำปฏิกิริยาต่อไปโดย direct photolysis หรือ conjugate base ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็น hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) (Masten and Davies, 1994)

1.3 ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารประกอบอินทรีย์

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับสารประกอบอินทรีย์ หรือที่เรียกว่า โอโซนไลซิส (ozonolysis) แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1.3.1 Direct attack โดยโมเลกุลของโอโซนโดยตรง เกิดโดย electrophilic หรือ dipolar cyclo addition ดังปฏิกิริยาในภาพที่ 3

สำหรับสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสารนี้ไม่มี หมู่นิวคลีโอไฟล์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยากับไอโซนก่อนข้างเข้า ปฏิกิริยาระหว่างไอโซนกับโพลีแซคคาไรด์ เริ่มแรกเกิดขึ้นโดยการแตกของพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) ตามด้วยการออกซิเดชันหมู่แอลกอฮอล์ของโมโนแซคคาไรด์อิสระ สุดท้ายได้เป็นอัลดีไฮด์และกรดที่เป็นโซ่ยาว (aliphatic acid) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นทั้งปฏิกิริยาของโมเลกุลไอโซนเองและปฏิกิริยาของ hydroxyl radicals โดยเฉพาะถ้ามี radical scavengers (Masten *et al.*, 1994)

1.4 ความเป็นพิษของไอโซน

แม้ว่าไอโซนจะมีประโยชน์มากมาย แต่ไอโซนจัดเป็นสารพิษซึ่งสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ได้ องค์การอนามัยและความปลอดภัยแห่งชาติ (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้กำหนดปริมาณของไอโซนในอากาศต้องไม่เกิน 0.1 พีพีเอ็ม ปริมาณต่ำสุดของไอโซนที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้คือ 0.01 ถึง 0.02 พีพีเอ็ม เมื่อได้รับไอโซนตั้งแต่ 0.1 ถึง 1 พีพีเอ็ม เป็นเวลานาน 8 นาที จะทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ คอแห้ง และแสบตา ถ้าได้สัมผัสกับไอโซนมากกว่า 1 พีพีเอ็ม จะทำให้เกิดอาการคล้ายโรคหืด เจ็บคอ ไอ และหัวใจเต้นแรง อาการจะรุนแรงขึ้นเมื่อปริมาณของไอโซนมากกว่า 100 พีพีเอ็ม ทำให้เกิดโรคน้ำท่วมปอด โรคผิวหนัง โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจและอาจถึงตายได้ จากการทดลองโดยให้หนูทดลองได้สัมผัสกับไอโซนในปริมาณ 2.4 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าร้อยละ 20 ของหนูทดลองตาย อย่างไรก็ตาม ยังไม่เคยมีรายงานเกี่ยวกับสาเหตุการตายเนื่องมาการใช้ไอโซนเลย ข้อดีและข้อเสียของไอโซนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของโอโซน

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เป็นสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างกว้างขวาง	1. ต้นทุนอุปกรณ์มีราคาสูง
2. ฆ่าเชื้อโรคได้อย่างรวดเร็ว	2. ต้องติดตั้งอยู่กับที่
3. ลดปัญหากลิ่นและรส	3. Reactivity สูง แต่ Selectivity ต่ำ
4. กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ	4. ความสามารถในการละลายต่ำ ที่อุณหภูมิ สูง
5. เพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำ	5. บำรุงรักษายาก
6. มีศักยภาพในการเป็นสารออกซิไดซ์ที่ดี	6. โอโซนที่ตกค้างอยู่ไม่สามารถเก็บไว้ในน้ำได้
7. ลดค่า Biological Oxygen Demand (BOD) และ Chemical Oxygen Demand (COD)	
8. ใช้ความเข้มข้นต่ำก็เพียงพอในการบำบัด สารอินทรีย์	
9. ไม่สร้างสารประกอบที่เป็นพิษให้กับน้ำที่ บำบัด	
10. ไม่เกิดปัญหาเกี่ยวกับการขนถ่ายสารเคมี	

ที่มา: Evans (1972)

1.5 งานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ประโยชน์จากโอโซน

Ishizaki *et al.* (1987) ศึกษาการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ โดยพบว่าโอโซนเข้าไปในเยื่อหุ้มเซลล์ และทำปฏิกิริยากับ Cytoplasmic substances และ cDNA ก็อาจถูกย่อยสลายด้วย จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เซลล์ตาย

Gilbert (1988) กล่าวถึงการทำ pretreatment โดยใช้โอโซนกับ humic acids ทำให้เกิดการศึกษาถึงผลของกระบวนการโอโซนเนชันในด้านความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ของผลผลิตจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในรูปของการกำจัด COD, DOC, การลดลงของค่าการดูดกลืนรังสียูวี และปริมาณการใช้โอโซน ซึ่งพบว่าการใช้โอโซนทำให้ค่า COD ลดลงร้อยละ 50 – 60 DOC ลดลงร้อยละ 30 ทำให้กลายเป็นผลผลิตที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ ($BOD_5/COD = 0.4$) สามารถกำจัดสีและค่า UV/DOC ลดลงจาก 4 เป็น $0.8 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยต้องใช้โอโซน $3.4 - 4 \text{ mg/mg DOC}$ เริ่มต้น ผลงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงผลผลิตจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ humic acid

สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีสัมพันธ์กับปริมาณโอโซนที่สูง (3.4 – 4 mg O₃/ mg DOC เริ่มต้น) ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับสารประกอบอะโรมาติกอื่น ๆ

Sozanska (1991) นำโอโซนมาใช้ในการบำบัดน้ำจากโรงบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพซึ่งมาจากโรงงานผลิตกระดาษ พบว่าน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดมาแล้วโดยการตกตะกอนด้วยสารส้มหรือปูนขาว แล้วนำมาบำบัดอีกครั้งด้วยโอโซน จะช่วยกำจัดสีออกจากน้ำเสียได้ดีกว่าการใช้โอโซน จะช่วยกำจัดสีออกจากน้ำเสียได้ดีกว่าการใช้โอโซนเพียงอย่างเดียว และยังลดค่า COD ลงถึงร้อยละ 50

Preis *et al.* (1995) ได้ทำการทดลองกำจัดสารฟีนอลโดยใช้โอโซน พบว่าเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดต่ำ (pH) ทำให้ปริมาณโอโซนที่ต้องใช้ออกซิไดซ์ฟีนอลลดต่ำลง การประยุกต์ใช้แสงยูวีร่วมกับโอโซนพบว่าไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการออกซิไดซ์ฟีนอลได้ ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสารฟีนอลและโอโซนดูดกลืนแสงยูวีได้เท่าเทียมกัน จึงทำให้แสงยูวีไม่เกิดประโยชน์ในการทำให้อโอโซนแตกตัวเป็นอนุมูล (radical) ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับโอโซนและแสงยูวี ซึ่งพบว่าไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารฟีนอลเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับโอโซนก็ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารฟีนอล ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนสามารถออกซิไดซ์สารฟีนอลโดยตรง การเติมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือแสงยูวีทำให้อโอโซนแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (free radical) ต่างๆ จึงไม่จำเป็นในกรณีโอโซนออกซิไดซ์สารฟีนอล

Liakou *et al.* (1997) ศึกษาการทำ pretreatment โดยโอโซนเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยสีย้อม Azo (Orange II) จากอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากน้ำเสียนี้นี้มีสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน ซึ่งมีค่า BOD/COD ที่ต่ำ (น้อยกว่า 0.1) ทำให้เกิดปัญหาอุปสรรคในการบำบัดด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพโดยทั่วไป จึงได้ทำการศึกษาการออกซิไดซ์สีย้อมด้วยโอโซนไปเป็นสารประกอบที่สามารถย่อยสลายได้ (เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของสีย้อม) ซึ่งผลที่ได้คือ ลดค่า COD และทำให้เกิด intermediate ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อันได้แก่ oxalate, formate, และ benzenesulfonate

Hostachy *et al.* (1997) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษกราฟท์ (kraft) เพื่อลดมลพิษในน้ำทิ้ง พบว่า สามารถกำจัดค่า COD ได้ร้อยละ 60 และการบำบัดด้วยโอโซนทำให้ COD บางส่วนเปลี่ยนไปเป็น BOD

Alfajara *et al.* (1999) ศึกษาการทำโอโซนเนชันในน้ำเสียจากโรงกลั่น เพื่อกำจัด organic matter และ decolorization (กำจัดสีของ polymeric pigment ที่เรียกว่า melanoidins) อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการทดลองสามารถกำจัด COD ได้ร้อยละ 16 กำจัดสีได้ร้อยละ 80 เพิ่มค่า BOD/COD ได้ร้อยละ 40 (จาก 0.3 เป็น 0.5) และลดมวลโมเลกุลของ melanoidins ได้ร้อยละ 10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโอโซนมีผลโดยตรงในการกำจัดสี และพัฒนาการย่อยสลายทางชีวภาพ จึงเสนอว่าควรใช้เป็นขั้นตอนการปรับสภาพน้ำเสีย (treatment step) ก่อนเข้ากระบวนการย่อยแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) ในระบบบำบัดน้ำเสียนี้ และนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียประเภทอื่น

Moodley *et al.* (1999) แสดงให้เห็นว่าโอโซนสามารถใช้กำจัดสีในสารละลายจากโรงงานน้ำตาลได้ โดยการทำลายเม็ดสี และสารที่ก่อให้เกิดสีในสารละลายน้ำตาลด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้โอโซนยังช่วยทำลายแบคทีเรีย ยีสต์และเชื้อราในน้ำตาลอีกด้วย

วรารณ (2540) ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมด้วยโอโซน พบว่า ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโอโซนจะมีประสิทธิภาพในการลดสี COD และ pH ของน้ำเสีย แต่จะเพิ่ม ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (SS) และ BOD ของน้ำเสีย

สุเมธ (2541) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีในน้ำกากส่าด้วยโอโซน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และสีเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราการใช้โอโซนสูงขึ้นและเวลาเก็บกักยาวนานขึ้น แต่จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก เมื่อมีเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเหล็กออกไซด์ทำให้เกิด hydroxyl free radical ซึ่งมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์สูงกว่าโอโซน

เนติยา (2544) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นด้วยกระบวนการ โอโซนเนชัน พบว่าที่ภาวะที่เหมาะสมที่สุด สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ได้ร้อยละ 75 และลด BOD ได้ร้อยละ 62 ทำให้สารอินทรีย์สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น

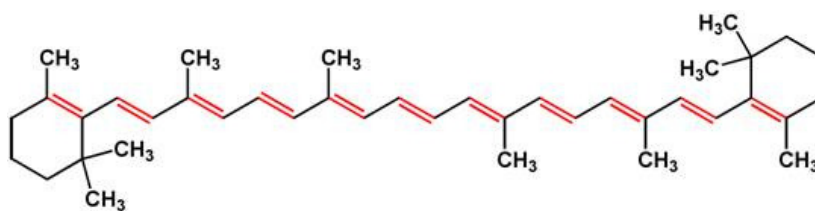
2. แป้งมันสำปะหลัง

2.1 สมบัติพื้นฐานของแป้งมันสำปะหลัง

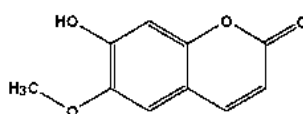
มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดในประเทศบราซิล มีชื่อสามัญหลายชื่อด้วยกัน คือ cassava, tapioca หรือ manioc เป็นต้น มันสำปะหลังมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* Crantz จัดเป็นพืชที่มีการเพาะปลูกมากกว่า 80 ประเทศในเขตร้อนชื้น ส่วนประกอบส่วนใหญ่คือแป้งซึ่งจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่ง แต่มีปริมาณโปรตีนและไขมันน้อยมาก (ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง, 2537) แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานสูงและนิยมนำไปใช้ในการประกอบอาหาร และสามารถใช้กากที่เหลือเป็นอาหารสัตว์ได้ รวมทั้งนำไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ไม่ใช่อาหารด้วย โดยสมบัติพื้นฐานของแป้งมันสำปะหลังมีดังนี้ (Balogopalan, 1988)

สีและลักษณะที่ปรากฏ

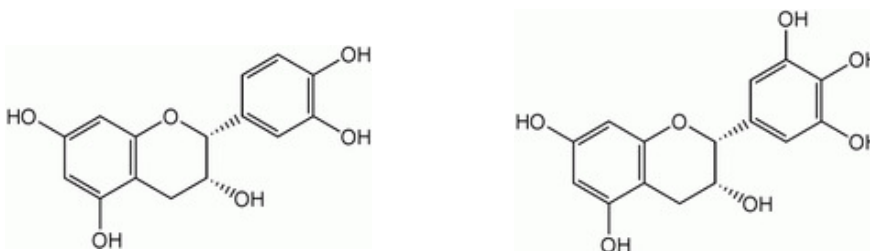
สีที่เกิดขึ้นในหัวแป้งมันสำปะหลังสด เกิดจากสารประกอบที่ทำให้เกิดสี เช่น β -carotene, lycopene เป็นต้น (Castelo Branco Carvalho, L.J., 2004) หรือสารประกอบที่เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอนไซม์บางชนิดในหัวมันสำปะหลังจะเกิดเป็นสีขึ้น เช่น scopoletin, scopolin, esculin, proanthocyanidins, catechin และ gallocatechin (Wenham, 1995) ซึ่งสารประกอบดังกล่าวจะมีโครงสร้างเป็นพันธะคู่หรือเป็นวงแหวนอะโรมาติก ดังภาพที่ 5 โครงสร้างดังกล่าวมีสมบัติสามารถดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นได้แล้วสะท้อนแสงที่ไม่สามารถดูดกลืน เกิดเป็นสีที่ตาคนมองเห็น (สมจิตต์ และวรรณภา, 2544) ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงต้องมีการล้างน้ำแป้งให้สะอาดและมีการใช้น้ำกำมะถันช่วยในการสกัดแป้งและเป็นการช่วยเพิ่มความขาวให้แป้งด้วย ทำให้แป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านกระบวนการสกัดเป็นแป้งจะมีสีขาวมาก การลดลงของความขาวของสีแป้งจึงส่งผลต่อคุณภาพและราคา โดยปกติวิธีที่ใช้ในการพิจารณาสี อาจใช้วิธีที่ง่าย โดยเป็นวิธีการที่กำหนดขึ้นเองหรืออาศัยการสังเกตสีที่เห็น หรืออาจใช้เครื่องมือวัดที่อาศัยหลักการสะท้อนของแสง โดยเปรียบเทียบแป้งตัวอย่างกับชุดมาตรฐาน



β -carotene (Holmes-Farley, 2006)



Scololetin (Anonymous, 2005)



Epicatechin และ Epigallocatechin (Anonymous, 2006)

ภาพที่ 5 ตัวอย่างสารประกอบฟีนอล (phenolic compound) ที่มีในหัวมันสำปะหลังสด
ที่มา: ดัดแปลงจาก Anonymous (2005), Anonymous (2006) และ Holmes-Farley (2006)

การวัดค่าความเป็นกรดต่าง

ค่าความเป็นกรดต่างของแป้งมันสำปะหลังจะมีค่า 6.3 – 6.5 และในสารละลายแป้งก็จะมีค่าความเป็นกรดต่างคล้ายกัน มีหลายหน่วยงานที่ได้ระบุความจำเพาะของค่าความเป็นกรดต่างไว้แตกต่างกัน เช่น The Indian Standard Institution (TSI) ได้กำหนดค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 4.7 – 7.0 เหมาะสำหรับใช้เป็นแป้งรับประทาน และ The U.S. standards ได้พิจารณาว่าแป้งที่มีกรดดีที่สุดควรจะมีค่าความเป็นกรดต่างในช่วง 4.5 – 6.5 และแป้งแต่ละเกรดก็จะมีค่าความเป็นกรดต่างที่แตกต่างกัน

ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง

ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งสามารถตรวจสอบได้โดยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะมีขนาดในช่วง 5 – 40 ไมโครเมตร เม็ดแป้งที่มีขนาดใหญ่จะมีขนาดในช่วง 25 – 35 ไมโครเมตร ส่วนเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กจะมีขนาดในช่วง 5 – 15 ไมโครเมตร เม็ดแป้งของแป้งมันสำปะหลังจะมีรูปร่างแตกต่างกัน ส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ มีปลายด้านหนึ่งเป็นแบบปลายตัดคล้ายปากแตร (truncated end) และผิวตรงส่วนที่เป็นปลายตัดมีลักษณะเว้าเข้าข้างใน บางเม็ดมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่เสมอกัน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2521) เมื่อส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscopy; SEM) จะแสดงให้เห็นลักษณะรอบ ๆ เม็ดแป้งด้านหนึ่งมีพื้นผิวที่แบนราบเรียบ บริเวณส่วนกลางของเม็ดแป้งมีหลุมรูปกรวยเล็ก ๆ และจะสังเกตเห็น eccentric hilum อย่างชัดเจน เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (polarized light) เม็ดแป้งจะแสดงความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ และเห็นเป็นรอยรูปกากบาท (cross pattern) เรียกสมบัตินี้ว่า birefringence เมื่อตรวจสอบภายใต้แสงโพลาไรซ์

ปริมาณอะมิโลส

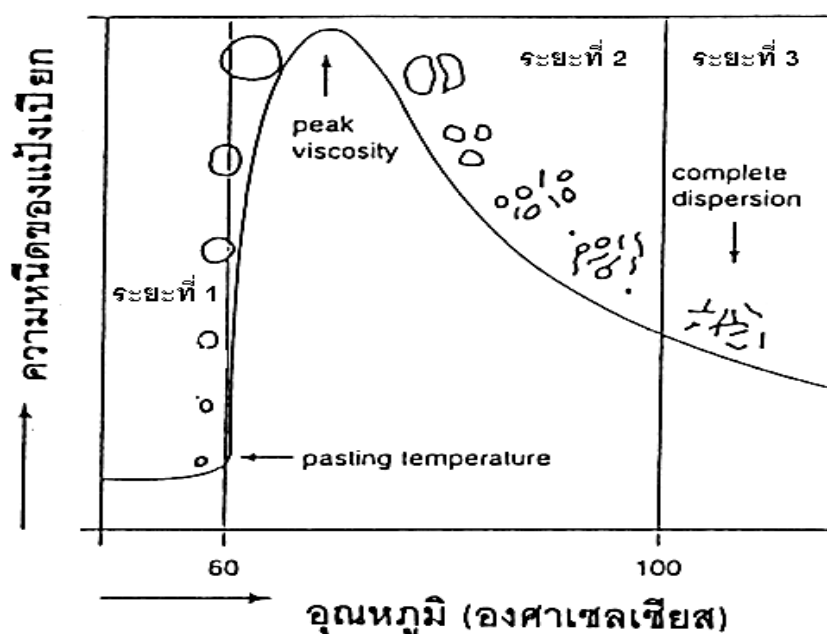
แป้งแต่ละชนิดจะมีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน โดยในแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะมิโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 16 – 18 (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543) และยังพบว่าในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลและความยาวของสายอะมิโลสต่างกันด้วย โดยโมเลกุลของอะมิโลสในแป้งมันสำปะหลังมีความยาวเฉลี่ย 2,600 ซึ่งสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลี (200 – 1,200) โดยแป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการคืนตัวลดลง (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543) ทำให้แป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มในการคืนตัว (retrogradation) ต่ำกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลี

2.2 การเปลี่ยนแปลงสถานะความหนืดของแป้ง (Phase transition)

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเป็นสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์ของแป้ง (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

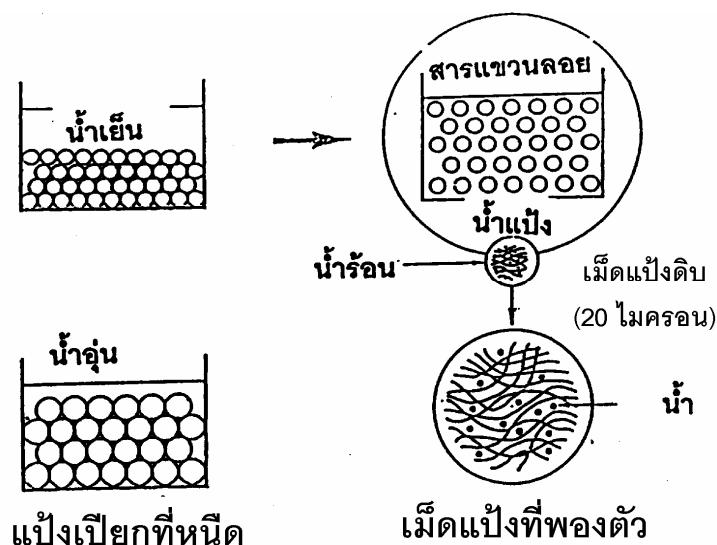
2.2.1 เจลาติไนเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) เป็นจำนวนมาก จึงทำให้เม็ดแป้งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปโครงสร้างร่างแห micelles ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก (Leach *et al.*, 1959) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้น้ำเข้าไปในโมเลกุลแป้งและเกิดการพองตัวของเม็ดแป้งขึ้น



ภาพที่ 6 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา: กล้านรงค์ และเกื้อกุล (2543)



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในระหว่างการหุงต้ม

ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2543)

การทำปฏิกิริยากับน้ำของแป้งแบ่งเป็น 3 ระยะ ดังภาพที่ 6 ในระยะแรกเมื่ออยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย ความหนืดจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและสมบัติ birefringence ซึ่งสังเกตได้โดยส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงโพลาไรซ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของแป้งจะเริ่มถูกทำลาย น้ำจะแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดแป้งในส่วนอณูฐานก่อน ทำให้เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำได้เพิ่มขึ้น เกิดการบวมของเม็ดแป้งและลักษณะ birefringence จะลดลง เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจนถึงอุณหภูมิวิกฤติ (pasting temperature) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง จะเข้าสู่ระยะที่สอง เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่าง micelles ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนในส่วนที่เป็นผลึกถูกทำลาย โดยลักษณะเกลียวม้วน (double helices) จะคลายตัวลง จนกระทั่งเม็ดแป้งถูกทำลายเกือบจะสมบูรณ์ เม็ดแป้งจะดูดน้ำมากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ ดังภาพที่ 7 อะมิโลสจะถูกชะออกจากเม็ดแป้ง ทำให้ส่วนผสมของน้ำแป้งมีความหนืดและใสเพิ่มขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลืออยู่น้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้คือ การสุกและการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง อุณหภูมิที่เม็ดแป้งเริ่มมีความหนืดเรียกว่า pasting temperature เม็ดแป้งจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสมบัติ birefringence จะหายไป เม็ดแป้งจะมีการพองตัวสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของเม็ดแป้งสูงขึ้น เมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวสูงสุดที่จุด peak viscosity แล้ว เม็ดแป้งจะเริ่มแตกออก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจะ

ทำให้เม็ดแป้งเริ่มเข้าสู่ระยะที่สาม คือ รูปร่างของเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน มีการแตกตัวของเม็ดแป้งอย่างสมบูรณ์ (complete dispersion) การละลายของแป้งจะสูงขึ้น ทำให้ความหนืดลดลง

การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งจะแตกต่างกันไปในแป้งแต่ละชนิดขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ เช่น สัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ปริมาณไขมัน รวมทั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในเม็ดแป้ง (Wurzburg, 1986) และเนื่องจากการจัดเรียงตัวกันของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ เม็ดแป้งที่มีขนาดต่างกันอยู่รวมกันจึงทำให้ไม่เกิดเจลาตินในเซชันที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 8 ถึง 12 องศาเซลเซียส

2.2.2 รีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกในที่สุด โมเลกุลของอะมิโลสจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้สารละลายแป้งเย็นลง โมเลกุลที่เป็นเส้นตรงที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอะมิโลส เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นเจล (gel) เหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก การเกิดเจลจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีอะมิโลส และการจับตัวเป็นเจล (gelation) จะเกิดขึ้นเมื่อมีการคั่นตัวอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการคั่นตัวอย่างช้า ๆ หรือมีความเข้มข้นของแป้งต่ำจะไม่เกิดเจล แต่จะเกิดการรวมตัวกันตกตะกอน (precipitate) ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคั่นตัว หรือ setback การเกิดเจลของแป้งสุกเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงและทิ้งเวลาไว้นานขึ้น ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและความหนืดกลับเพิ่มขึ้นใหม่ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการคั่นตัวมีหลายประการได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแป้ง ปริมาณและขนาดของอะมิโลสและอะมิโลเพคติน รวมทั้งองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง (Swinkels, 1985)

สมบัติด้านความหนืดมีความสำคัญในแง่การใช้แป้งทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารให้ความหนืดและให้เนื้อสัมผัสในอาหาร ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษในขั้นตอน sizing และ coating และใช้ในอุตสาหกรรมกาว เป็นต้น (Zobel, 1984) การติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมีเครื่องมือหลายชนิดที่ใช้ในการวัดความหนืด ซึ่งมีทั้งแบบปรับอุณหภูมิไม่ได้ เช่น Brookfield viscometer, Capillary viscometer และ Rheometer ซึ่งจะวัดค่าที่อุณหภูมิหนึ่งๆ เท่านั้น และเครื่องมือแบบปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ เช่น Rapid Visco Analyser และ Brabender viscoamylograph เครื่องมือลักษณะนี้มีความสำคัญในการศึกษาทั้งลักษณะของกราฟความหนืดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้กับน้ำแป้ง ทำให้ทราบอุณหภูมิที่เกิดเจลาติไนเซชัน ค่าความหนืดที่จุดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายเมื่อสารละลายแป้งเกิดการคืนตัวได้

3. แป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch)

ในการใช้ประโยชน์แป้งดิบในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้น พบว่า สมบัติบางประการของแป้งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์บางประเภท จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติ การดัดแปรแป้งจึงมีวัตถุประสงค์หลักในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแป้งให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ทั้งนี้คุณสมบัติที่เปลี่ยนไปจะขึ้นกับวิธีการดัดแปร เพื่อให้คุณสมบัติของแป้งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น เพื่อให้ความหนืดของแป้งลดลง เพื่อให้แป้งมีเสถียรภาพของการกระจายตัวในน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในการเกิดเจลาติไนเซชัน เพื่อเพิ่มความคงตัวภายใต้สภาวะการแช่แข็ง และการคืนตัว เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส และเพื่อเป็นการเติมหมู่เคมีที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง (BeMiller *et al.*, 1997) ซึ่งตามนิยามของมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 นั้น แป้งดัดแปร (modified starch) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (starch) มาปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือ เอนไซม์ และ/หรือสารเคมี เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ซึ่งต่าง ๆ จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535)

แป้งดัดแปรมีมากมายหลายชนิด โดยจะขึ้นกับสารเคมีและกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งแป้งดัดแปรแต่ละชนิดนั้นจะมีสมบัติเฉพาะตัว การดัดแปรแป้งนั้นมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทและหลายรูปแบบ ในที่นี้ขอแบ่งกลุ่มตาม BeMiller (1997) ที่เสนอดังนี้

3.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical Modification) เป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติของแป้งโดยให้แป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมี แบ่งออกเป็น

3.1.1 การเกิดอนุพันธ์ (derivatization) การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostarch substitution) ทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน (etherification)

3.1.2 การลดขนาดของโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning)

3.1.3 เด็กซ์ตริไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization / transglycosylation) โดยใช้ความร้อนหรือความร้อนกับกรด

3.1.4 ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization)

3.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification) เป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติของแป้งโดยใช้ความร้อนหรือแรงกล แบ่งออกเป็น

3.2.1 แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งจนผ่านขั้นตอนเจลาติไนเซชันแล้วทำแห้งทันที ทำให้แป้งชนิดนี้สามารถละลายน้ำเย็นได้

3.2.2 แป้งละลายน้ำเย็น (granule-cold-water-soluble-starch:GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่ละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเจลาติไนเซชัน

3.2.3 การลดขนาดของเม็ดแป้งโดยทางกล (ball milling treatment)

3.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นการเปลี่ยนสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

แป้งออกซิไดซ์เป็นแป้งดัดแปรที่เตรียมโดยวิธีออกซิเดชัน (oxidation) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้สมบัติทางเคมี โครงสร้างและขนาดของโมเลกุลแป้งเปลี่ยนแปลงไป ได้แป้งดัดแปรที่เรียกว่าแป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch) หรือ ออกซิสตาร์ช (oxystarch) แต่ถ้าใช้ไฮโปคลอไรท์เป็นสารออกซิไดซ์จะเรียกว่า คลอรีเนตสตาร์ช (chlorinated starch) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่แอลดีไฮด์ หมู่คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล และมีการตัดโมเลกุลแป้ง ทำให้เกิดการกำจัดสีและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้แป้งมีความขาวเพิ่มขึ้น แป้งออกซิไดซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารจะต้องทำปฏิกิริยากับคลอรีนในรูปของโซเดียมไฮโปคลอไรท์ไม่เกินร้อยละ 5.5 และมีกลุ่มคาร์บอกซิลไม่เกินร้อยละ 1.1 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535)

สมบัติของแป้งออกซิไดซ์ มีลักษณะเป็นประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลอะมิโลส ทำให้อัตราการคืนตัวของแป้งเปียกลดลง (Wurzburg, 1986) แป้งเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลง ทำให้สามารถใช้แป้งเปียกที่มีความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ โดยแป้งเปียกสารละลาย และฟิล์มที่ได้จะมีความใสมากขึ้น เจลที่ได้มีความคงตัวสูง เม็ดแป้งขาวขึ้น กลิ่นดีขึ้น และมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการฟอกสีของสารออกซิไดซ์จะละลายส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ออกจากแป้ง

แป้งเปียกของแป้งออกซิไดซ์มีสมบัติเหมาะสมในการทำมาฝรังและลูกอม ซึ่งมีอายุการเก็บที่นานกว่าผลิตภัณฑ์จากแป้งย่อยด้วยกรดเนื่องจากมีความเสถียรในสภาวะที่มีน้ำตาล และความต้านทานต่อการหดตัวของแป้งออกซิไดซ์ แป้งออกซิไดซ์ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน มีความแข็ง และใสมากขึ้น มีแนวโน้มในการหดตัวหรือแตกน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งที่ย่อยด้วยกรดหรือจากแป้งดิบ มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่าเนื่องจากสมบัติการชอบน้ำของหมู่คาร์บอกซิลที่เกิดระหว่างการออกซิเดชัน

แป้งออกซิไดซ์สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม ชุปกึ่งสำเร็จรูป หรืออาหารประเภทของเหลวที่ต้องการความข้น เช่น น้ำสลัด มายองเนส เป็นต้น นอกจากนี้แป้งออกซิไดซ์ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาศโดยใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาศ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาศ เคลือบผิวหน้ากระดาศให้เรียบและแทรกซึมเข้าในช่องว่างของเยื่อกระดาศสำหรับกันหมักซึม และในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อใช้สำหรับเคลือบเส้นใย

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ให้เส้นด้ายลื่นและมีความยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ก่อสร้าง เช่น ฝาค้าง ฉนวน กระเบื้อง (Wurzburg, 1986) การผลิตแป้งออกซิไดซ์ทางการค้า นิยมใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารออกซิไดซ์ ซึ่งเตรียมได้โดยเติมแก๊สคลอรีนอย่างช้าๆ ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เย็น ดังปฏิกิริยา

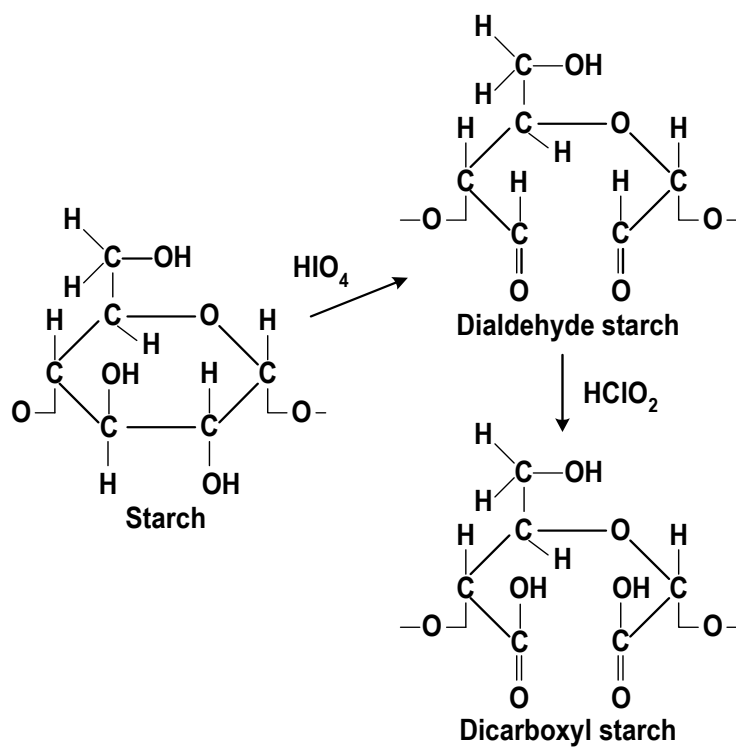


sodium hydroxide + chlorine $\rightarrow$ sodium chloride + sodium hypochlorite + water + heat

ในการผลิตต้องควบคุมความร้อนจากปฏิกิริยาให้ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส สารละลายไฮโปคลอไรต์ที่ผลิตเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์แป้งโดยทั่วไปจะมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 5-10 และมีความเป็นเบสเพียงเล็กน้อย (Rutenberg, 1984)

การผลิตแป้งออกซิไดซ์ ทำได้โดยเติมสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ลงในสารละลายแป้งที่มีความเข้มข้น $18^\circ\text{--}24^\circ \text{Be}'$ (ประมาณร้อยละ 33-44 น้ำหนักแป้งแห้ง) ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ที่ใช้วัดเป็น % available chlorine ต่อน้ำหนักแป้ง โดยทั่วไป % available chlorine ในแป้งสูงสุดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะไม่เกินร้อยละ 5-6 หลังจากเติมสารละลายไฮโปคลอไรต์และทำปฏิกิริยาจนถึงจุดที่ต้องการแล้ว ปรับ pH ของสารละลายแป้งให้เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย (pH 6.0-6.5) กำจัดไฮโปคลอไรต์ที่เกินโดยเติมสารรีดิวซ์ เช่น ไบซัลไฟท์ (bisulfite) (Wurzburg, 1986 และ Rutenberg, 1984) หลังจากนั้นล้างสารละลายแป้งและกำจัดน้ำออกจากสารละลายโดยใช้ vacuum filter หรือ centrifuge ทำให้แห้งใน hot-air dryer จนได้ความชื้นที่สมดุล

เมื่อพิจารณาโครงสร้างอะมิโลเพคตินของแป้งซึ่งมีพันธะทั้งแบบ (1,6) และแบบ (1,4) จะเห็นได้ว่า หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่ 6 ของตำแหน่งกิ่งจะไม่เกิดปฏิกิริยาเนื่องจากมีพันธะแบบ (1,6) แต่ในโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงเกิดปฏิกิริยาได้เนื่องจากมีเพียงพันธะแบบ (1,4) เท่านั้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในอะมิโลเพคตินส่วนมากจะเกิดที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 ในการผลิตแป้งออกซิไดซ์ทางการค้าจะควบคุมให้มี pH 7 – 8 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ/หรือคาร์บอนตำแหน่งที่ 3 จะเปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอนิล และเมื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อพันธะระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 จะแตกออกได้เป็น dialdehyde starch ดังภาพที่ 8 จากนั้นให้ทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรต์ที่เป็นด่างจะทำให้พันธะระหว่างหมู่กลูโคไพราโนส (glucopyranose) แตกออก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับแป้งได้เป็น dicarboxyl starch



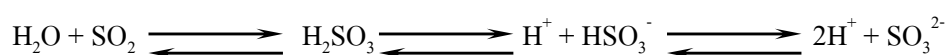
ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาการเกิด dialdehyde starch และ dicarboxyl starch

ที่มา: Knight (1969)

4. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง

ในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีการใช้น้ำกำมะถันในขั้นตอนการสกัดแป้ง โดยน้ำกำมะถันจะช่วยกำจัดเมือกที่ไปอุดตันแผ่นกรอง ป้องกันการสูญเสียแป้งเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของจุลินทรีย์ และช่วยฟอกสีแป้งให้ขาวขึ้น น้ำกำมะถันที่ใช้ได้จากการเผากำมะถันก้อน (brimstone) ในเตาเผาทำให้ได้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลอยตัวขึ้นสูงตามท่อที่ต่อจากเตาเผา จากนั้นจะพ่นน้ำสวนทางลงมาได้เป็นน้ำกำมะถัน แล้วปล่อยเข้าสู่กระบวนการผลิตแป้งต่อไป (สิทธิโชค, 2541)

การใช้วิธีการเผากำมะถันก้อนในปัจจุบันนี้พบว่ามีข้อเสียคือ ไม่สามารถควบคุมปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำให้มีผลต่อคุณภาพของแป้งที่ได้ และไอของกำมะถันยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพและก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้สารของซัลไฟท์ที่นำมาใช้ในอาหารตามเอกสาร Food Chemical Codex ได้แก่ โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ (sodium metabisulphite, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), โซเดียมซัลไฟท์ (sodium sulphite, Na_2SO_3) และโพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟท์ (potassium metabisulphite, $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$), โพแทสเซียมซัลไฟท์ (sodium sulphite, K_2SO_3) หรือในรูปของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จึงเป็นทางเลือกใหม่ในการเตรียมน้ำกำมะถัน ซึ่งเกลือของซัลไฟท์เหล่านี้เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้กรดซัลฟูรัส (H_2SO_3), ไบซัลไฟท์ไอออน (HSO_3^-) และ ซัลไฟท์ไอออน (SO_3^{2-}) (วินัส, 2545)



การนำมาใช้ในอุตสาหกรรมมีจุดประสงค์ต่าง ๆ กัน ได้แก่ ใช้ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์, ใช้เป็นสารกันหืน (antioxidant) เนื่องจากสมบัติการเป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน, ใช้ยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่ได้เกิดจากเอนไซม์ในอาหาร (inhibit non-enzymic browning), ใช้ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และใช้ในการฟอกสี ทำให้สีขาวขึ้น (วินัส, 2545)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

หัวมันสำปะหลังสดพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50
แป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งออกซิไดซ์ทางการค้า

2. สารเคมี

โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์

3. เครื่องมือ

เครื่องวัด pH (Horiba F-23, Japan)
เครื่องผลิตโอโซน (RXO-15, ozonair, USA)
เครื่องผลิตออกซิเจน (AS-12, ozonair, USA)
เครื่องวัดความหนืด Rapid Visco Analyser (RVA 4D, Newport Scientific, Australia)
เครื่องวัดความขาว (KETT Digital Whiteness Meter Model C-100)
เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Genesys 5, USA)
เครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography (Shimadzu, Japan)
เครื่อง Sonicator (Vibra cell™, Sonica&Materials Inc. USA)
เครื่อง Ultrasonic (Sigma 2K 15, Germany)
ตู้อบไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิ (Mettert UM 500, Germany)
อ่างน้ำไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิ
อ่างน้ำไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิแบบแช่ (Polyscience, USA)
เครื่องชั่งลมปราศไฟฟ้า
มอเตอร์กวนพร้อมใบพัด
เครื่องตีปั่น

เครื่องบดอาหาร (Moulinex, Blend'n Mix, France)

ตะแกรงร่อนเบอร์ 170 เมช (90 ไมโครเมตร)

Magnetic stirrer พร้อม Magnetic bar

ชุดกรอง suction และกระดาษกรองเบอร์ 1

ชุดเครื่องแก้ววิเคราะห์เซลล์เฟอร์ไดออกไซด์

เครื่องแก้วชนิดต่าง ๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์

วิธีการ

1. การศึกษาผลของความเข้มข้นของโอโซนที่มีต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

1.1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง

ล้างหัวมันสำปะหลังสดให้สะอาด ปอกเปลือก และหั่นตามยาวเป็นแผ่นหนา แล้วชุบฝอยด้วยเครื่องชุบมะพร้าวไฟฟ้า ผสมน้ำในอัตราส่วนเนื้อมันชุบฝอย 1 กิโลกรัมต่อน้ำ 2 ลิตร คั้นเอาน้ำแป้งด้วยผ้าขาวบาง แล้วล้างกากมันด้วยน้ำปริมาตรเท่ากับที่ใช้ช่วงแรก เทน้ำแป้งที่กรองได้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 170 เมช รวมน้ำแป้งทั้งหมด ปล่อยให้ น้ำแป้งตกตะกอน จากนั้นเทสารละลายส่วนบนทิ้ง ล้างตะกอนแป้งด้วยน้ำสะอาด ปล่อยให้ตกตะกอนอีกครั้ง จากนั้นเทสารละลายส่วนบนทิ้ง ชุบแป้งหมาด (cake) นำไปอบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดและร่อนผ่านตะแกรงเก็บไว้ทำการทดลองต่อไป

1.2 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซน

เตรียมน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง (20 Be') นำน้ำแป้งที่เตรียมไว้ไปผ่านการให้โอโซนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน ด้วยเครื่องผลิตโอโซน รุ่น RXO-15, ozonair, USA ซึ่งต่อกับเครื่องผลิตออกซิเจน รุ่น AS-12, ozonair, USA ด้วยการให้ระยะเวลาการให้โอโซนต่าง ๆ กันคือ 0, 2, 5, 10, 15, 20 และ 30 นาที ซึ่งคิดเป็นปริมาณโอโซนที่ให้กับแป้งเท่ากับ 0, 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 มิลลิกรัมต่อกรัมแป้งแห้ง ตามลำดับ (ปรับเครื่องผลิตโอโซนให้มีปริมาณการผลิตและอัตราการไหลของโอโซนสูงสุด เท่ากับ 28 กรัมต่อชั่วโมง และ 5 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ) และปรับ pH เป็น 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 5% กรองน้ำแป้งผ่านกระดาษกรอง

เบอร์ 1 ด้วยชุดกรอง suction ล้างแป้งหาคด้วยน้ำกลั่นแล้วกรอง 2 รอบ นำแป้งหาคไปอบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง บดด้วยเครื่องบดอาหารและร่อนผ่านตะแกรงเก็บไว้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของแป้งต่อไป

2. การศึกษาผลของปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติต่างๆ ของแป้งที่ผ่านการให้อิโชน

2.1 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่าง ๆ กัน

ทำการสกัดแป้งเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 1.1 โดยใช้สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ในการสกัดแป้งและล้างตะกอนแป้ง โดยใช้ความเข้มข้นแตกต่างกันไปตามปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง (0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม) โดยตรวจสอบปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในแป้งด้วยวิธีกลั่น ตามวิธีวิเคราะห์ของ AOAC (1990)

2.2 การเตรียมแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างนำมาผ่านการให้อิโชน

นำแป้งที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.1 ทำการคัดแปรแป้งด้วยอิโชนตามหัวข้อที่ 1.2 ที่ความเข้มข้นของอิโชนเท่ากับ 0, 15 และ 90 mg O₃ /g starch นำแป้งที่ได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของแป้ง

3. การเปรียบเทียบสมบัติของแป้งคัดแปรด้วยอิโชนกับแป้งออกซิไดซ์ทางการค้า

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งออกซิไดซ์ทางการค้า เปรียบเทียบกับแป้งที่ผ่านการให้อิโชนในหัวข้อที่ 1.2

4. การวิเคราะห์สมบัติของแป้ง

4.1 ความชื้น (Moisture)

ตามวิธีการของ มอก. 52-2516 ซึ่งตัวอย่างในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอน อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วคำนวณหาน้ำหนักที่หายไปคิดเป็นร้อยละเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น

4.2 ความขาว (Whiteness)

โดยเครื่องวัดความขาว (KETT Digital Whiteness Meter Model C-100)

4.3 ความหนืด (Paste Viscosity)

โดยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ตามวิธีการของ Newport Scientific. Pty, Ltd. (1995) เตรียมแป้งที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 9 โดยน้ำหนักแห้ง เครื่อง RVA จะอ่านและบันทึกค่าต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิที่ทำให้แป้งพองตัว (pasting temperature), ความหนืดเมื่อแป้งพองตัวสูงสุด (peak viscosity), ความหนืดเมื่อแป้งเย็นตัว (trough), ความหนืดเมื่อแป้งยุบตัว (breakdown), ความหนืดเมื่อแป้งคืนตัว (setback) และความหนืดเมื่อแป้งคงตัว (final viscosity)

4.4 ความโปร่งใสของแป้งเปียก (Paste clarity)

ดัดแปลงจากวิธีของ Stuart และคณะ (1989) เตรียมแป้งเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักแห้ง ทำให้เจลาตินไนซ์โดยสมบรูณ์ วัดค่าร้อยละแสงส่องผ่าน ที่ 650 นาโนเมตร (% Light transmittance at 650 nm)

4.5 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group content)

ตามวิธีของ Kuakpetoon and Wang (2001) เตรียมน้ำแป้งไปเจลาติไนซ์ให้สมบูรณ์ ปรับ pH เท่ากับ 3.2 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วเติมสารละลายไฮดรอกซิลามีน แล้วไปเขย่าในอ่างน้ำอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง แล้วไตรเทรทกลับด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จุดยุติอยู่ที่ pH 3.2 คำนวณปริมาณหมู่คาร์บอนิลจากปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ทำปฏิกิริยากับสารไฮดรอกซิลามีนที่เหลือมากเกินไปจากการไปทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล

4.6 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group content)

ดัดแปลงจากวิธีของ ISO 11214:1996(E) และ Kuakpetoon และ Wang (2001) เตรียมน้ำแป้งให้มีหมู่คาร์บอกซิลในรูป COOH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นล้างกรดไฮโดรคลอริกให้หมดตรวจสอบโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท นำไปทำให้เกิดเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ แล้วไตรเทรทขณะร้อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คำนวณปริมาณหมู่คาร์บอกซิลจากปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป

4.7 ความเป็นกรด (Acidity)

ดัดแปลงจากวิธีของ Smith (1967) ไตรเทรทสารละลายแป้งเปียกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คำนวณความเป็นกรดจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับกรดในแป้งเปียก

4.8 โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบภายในเม็ดแป้ง

วิเคราะห์โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของแป้ง โดยเครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography ตามวิธีของ Govindasamy และคณะ (1992) ใช้หลักการความสามารถในการแพร่ผ่านของโมเลกุลภายในวัฏจักรในคอลัมน์ โดยโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะถูกชะออกมา ก่อนโมเลกุลขนาดเล็ก ขนาดของโมเลกุลดังกล่าวคำนวณได้จากระยะเวลาที่องค์ประกอบถูกชะออกจากคอลัมน์ (retention time)

5. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยวิธีการทางสถิติ

การทดลองหัวข้อที่ 1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design, CRD) การทดลองหัวข้อที่ 2 วางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลโดยสุ่มตลอด (Completely Randomized Factorial Design) และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

6. สถานที่ทำการวิจัย

6.1 ห้องปฏิบัติการของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6.2 ห้องปฏิบัติการของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีทางเอนไซม์และการจัดการของเสีย สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

7. ระยะเวลาการวิจัย

ระยะเวลาเริ่มตั้งแต่ต้นเดือนมกราคม 2545 สิ้นสุดปลายเดือนกุมภาพันธ์ 2547