ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลของความเข้มข้นของโอโซนที่มีต่อสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

1.1 สมบัติทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซน

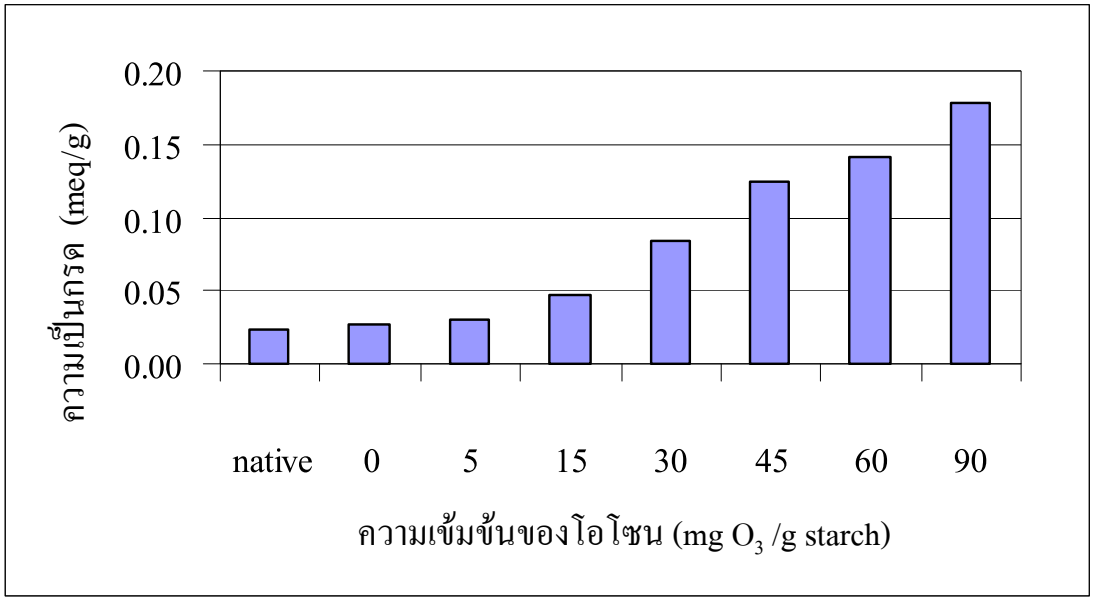
เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังไปผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 0, 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 mg O_3 /g starch หรือคิดเป็น 0, 0.017, 0.051, 0.102, 0.153, 0.204 และ 0.306 mole O_3 / mole AGU ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน

ความเข้มข้นโอโซน		สมบัติทางเคมีของแป้ง		
(mg O_3 / g starch)	(mole O_3 / mole AGU)	ค่าความเป็นกรด (meq/g)	หมู่คาร์บอนิล (ร้อยละ)	หมู่คาร์บอกซิล (ร้อยละ)
0	0.000	0.027 ^{f}	0.010 ^{d}	0.023 ^{f}
5	0.017	0.029 ^{f}	0.014 ^{d}	0.030 ^{e}
15	0.051	0.048 ^{e}	0.024 ^{d}	0.034 ^{e}
30	0.102	0.083 ^{d}	0.034 ^{c}	0.048 ^{d}
45	0.153	0.124 ^{c}	0.057 ^{b}	0.060 ^{c}
60	0.204	0.140 ^{b}	0.061 ^{b}	0.070 ^{b}
90	0.306	0.178 ^{a}	0.095 ^{a}	0.087 ^{a}

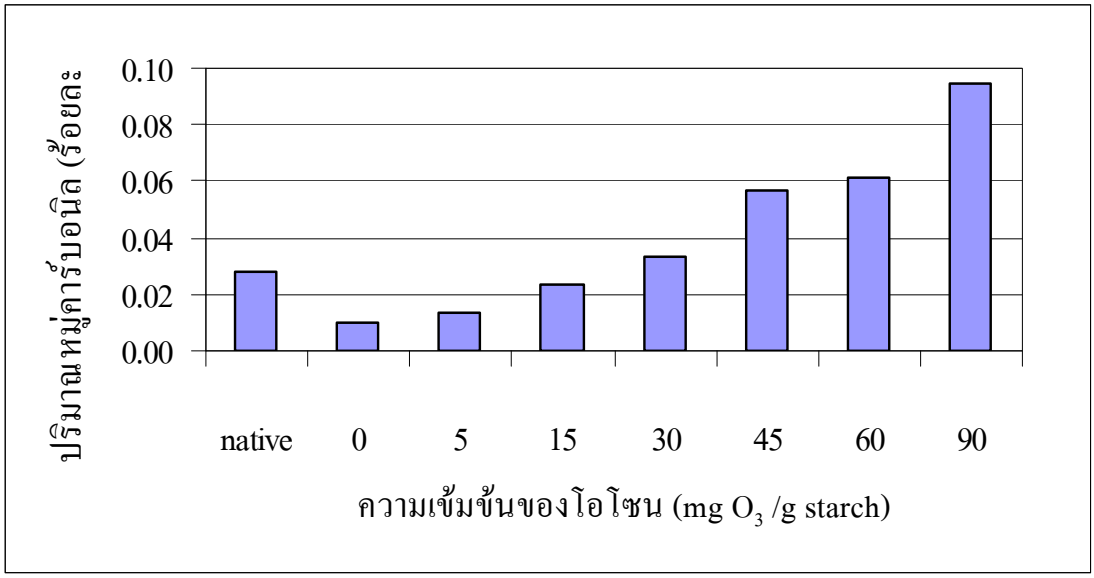
หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของแป้งพบว่าค่าความเป็นกรด (acidity) ของแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (0 mg O_3 /g starch ต่อไปจะเรียกว่า แป้งควบคุม) มีค่าความเป็นกรด เท่ากับ 0.027 meq/g ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรดของแป้งมันสำปะหลังดิบเริ่มต้น คือ 0.023 meq/g ส่วนแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 mg O_3 /g starch พบว่ามีค่าความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.029, 0.048, 0.083, 0.124, 0.140, และ 0.178 meq/g ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 9 บ่งชี้ให้เห็นว่า ในขณะที่แป้งที่ผ่านการให้โอโซน แป้งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดหมู่ที่มีความเป็นกรดเกิดขึ้น มีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งและ/หรือมีสารประกอบอื่นที่มีความเป็นกรดเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งโดยทั่วไปโอโซน เมื่อละลายน้ำจะสลายตัวเป็นออกซิเจนหรือทำปฏิกิริยากับสิ่งรอบตัวอยู่ตลอดเวลา โดยแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (radical) ต่าง ๆ ได้แก่ hydroxyl radical ($^{\bullet}OH$), $HO_3^{\bullet}$, $HO_4^{\bullet}$, และ superoxide (O_2^{-}) อนุมูลอิสระต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะมีความว่องไวมากในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ (strong oxidant) (Masten and Davies, 1994)

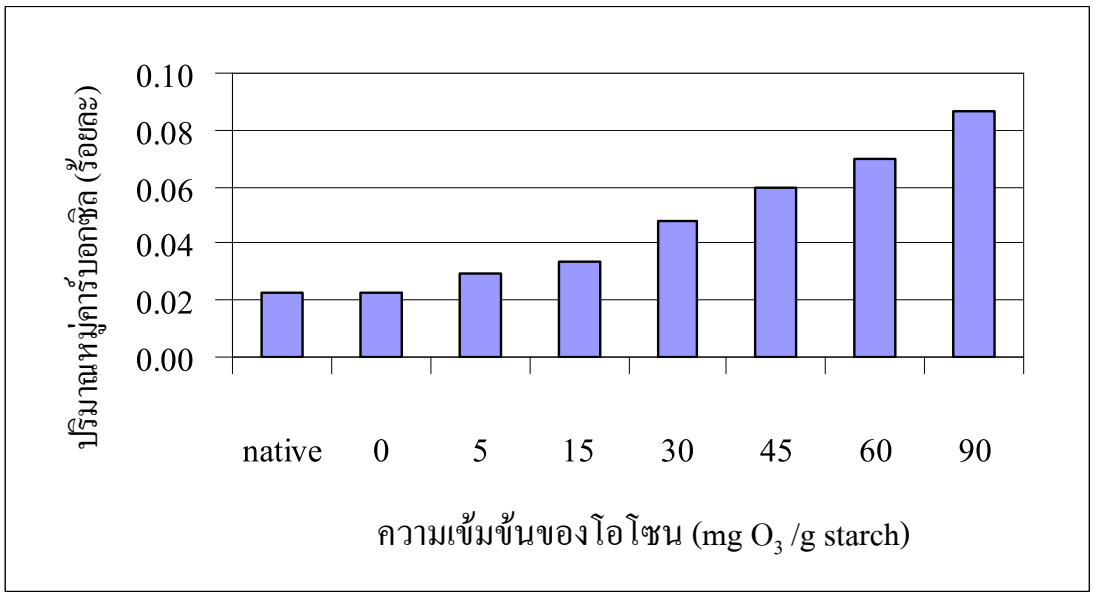


ภาพที่ 9 ค่าความเป็นกรด (acidity) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน

โอโซนเป็นสารออกซิไดซ์ สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ซึ่งโดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีได้ (Masten *et al.*, 1994) จากการการวิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอนิลของแป้ง พบว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลของแป้งควบคุมมีค่าร้อยละ 0.010 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าปริมาณหมู่คาร์บอนิลของแป้งมันสำปะหลังดิบเริ่มต้น คือร้อยละ 0.027 ทั้งนี้เป็นเพราะหมู่คาร์บอนิลถูกทำลายไปบางส่วนในขั้นตอนการเตรียมแป้งควบคุม ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมแป้งควบคุม และแป้งที่ผ่านการให้โอโซนจะมีการอบแห้งอีกครั้ง เพื่อให้ได้เป็นแป้งก่อนที่จะวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป ส่วนแป้งที่ให้โอโซนในระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 mg O_3 /g starch มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลเพิ่มมากขึ้นเป็น ร้อยละ 0.014, 0.024, 0.034, 0.057, 0.061, และ 0.095 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 10 ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลพบว่าแป้งควบคุมมีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลร้อยละ 0.023 ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณหมู่คาร์บอกซิลของแป้งมันสำปะหลังดิบเริ่มต้น คือ ร้อยละ 0.024 ส่วนแป้งที่ให้โอโซนในระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 mg O_3 /g starch มีปริมาณ หมู่คาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นเป็น 0.030, 0.034, 0.048, 0.060, 0.070, และ 0.087 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 11 ทั้งนี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยโอโซน เนื่องจากโอโซนมีสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ การเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลแป้ง ซึ่งในโมเลกุลของ AGU (Anhydrous Glucose Unit) จะมีหมู่ไฮดรอกซิล อยู่ที่คาร์บอนอะตอมที่ 2, 3 หรือ 6 ให้เป็นหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิล (Rutenberg, 1984 และ Wurzburg, 1986) ทำให้แป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น มีปริมาณหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอซิลเพิ่มขึ้นด้วย



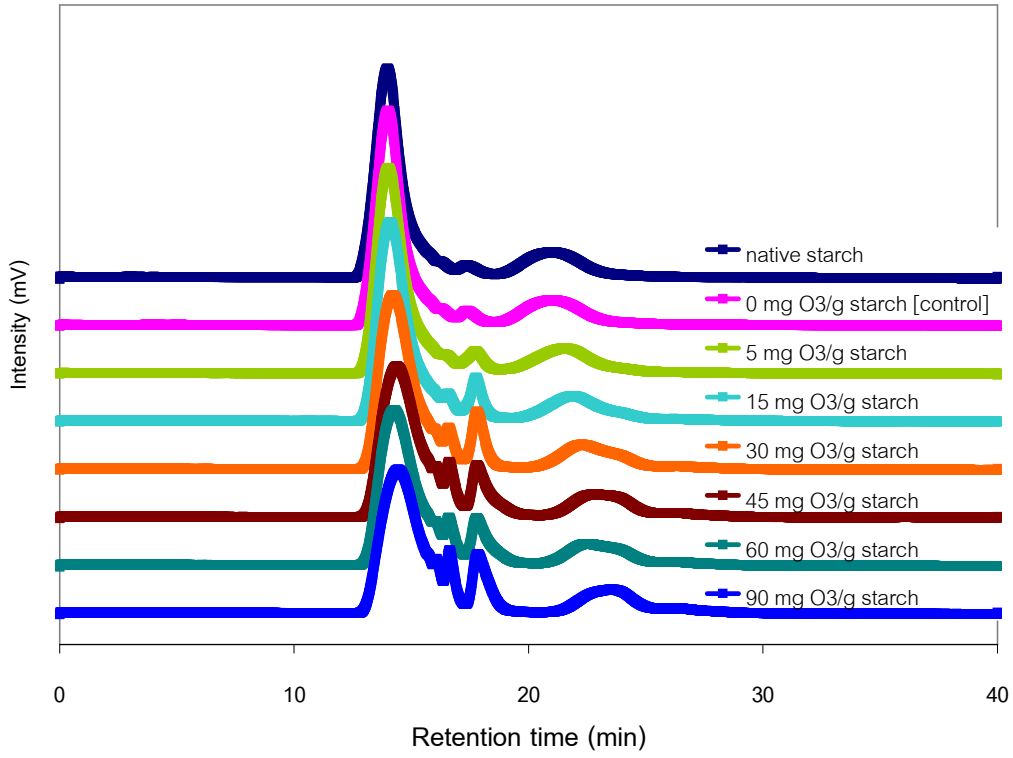
ภาพที่ 10 ปริมาณหมู่คาร์บอนิล (carbonyl content) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน



ภาพที่ 11 ปริมาณหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl content) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน

1.2 สมบัติทางโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซน

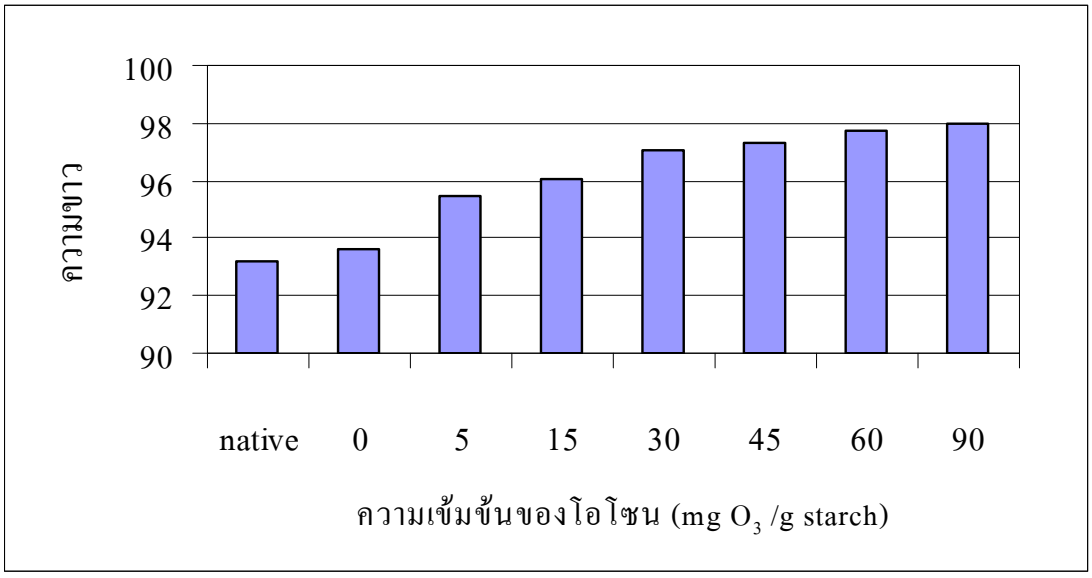
โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่ อะมิโลส และอะมิโลเพคติน โดยอะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคส ที่มีขนาดเล็กกว่า อะมิโลเพคติน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ดังนั้นในการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของแป้งจึงสามารถทำได้โดยวิธีการ gel permeation chromatography โดยโมเลกุลของอะโลเพคติน ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะถูกชะออกจากคอลัมน์ก่อนหรืออีกนัยหนึ่ง คือมี retention time น้อยกว่า โมเลกุลของอะมิโลส ที่มีขนาดเล็กกว่า สามารถวิเคราะห์โดยเครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC) (รายละเอียดการวิเคราะห์และการคำนวณแสดงในภาคผนวก) จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPSEC พบว่า การใช้โอโซนมีผลทำให้โครงสร้างในส่วนของอะมิโลเพคตินเปลี่ยนแปลง เกิดเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยเห็นได้ชัดเจนจากโครมาโตแกรม ในภาพที่ 12 เมื่อแป้งผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น จะเกิดโมเลกุลที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ระหว่างโมเลกุลอะมิโลเพคตินและอะมิโลส และอะมิโลสจะมีขนาดเล็กลง (retention time ของอะมิโลสของแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน และผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 90 mg O_3 /g starch เป็น 21.5 และ 24 นาที ตามลำดับ) ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซน ทำให้เกิดการตัดพันธะไกลซิดิกของโมเลกุลอะมิโลเพคตินและอะมิโลส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งจะส่งผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพ และความหนืดของแป้งด้วย ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 12 โครมาโตแกรมของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ เมื่อวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC)

1.3 สมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซน

เมื่อตรวจวิเคราะห์ความขาวของแป้งด้วยเครื่องวัดความขาว (KETT Digital Whiteness Meter) พบว่า การใช้โอโซนจะช่วยทำให้แป้งที่ได้มีความขาวเพิ่มขึ้น โดยความขาวของแป้งควบคุม จะมีค่าเท่ากับ 93.6 ซึ่งมีใกล้เคียงกับความขาวของแป้งมันสำปะหลังดิบเริ่มต้น คือ 93.2 Kett scale ส่วนแป้งที่ให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กันคือ 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 mg O_3/g starch จะมีค่าความขาวเพิ่มมากขึ้นเป็น 95.5, 96.0, 97.0, 97.3, 97.7, และ 98.0 Kett sacle ตามลำดับ ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 13 ทั้งนี้เป็นผลมากจากที่โอโซนมีสมบัติเป็นสารฟอกขาวประเภทออกซิไดซ์ (oxidizing bleaches) โดยโอโซนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีในมันสำปะหลัง เช่น β-carotene, lycopene เป็นต้น (Castelo Branco Carvalho, L.J.,2004) หรือสารประกอบที่เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอนไซม์บางชนิดในหัวมันสำปะหลังจะเกิดเป็นสีขึ้น เช่น scopoletin, scopolin, esculin, proanthocyanidins, catechin และ gallocatechin (Wenham, 1995) และ ทำให้โครงสร้างที่เป็นวงแหวนหรือพันธะคู่ของสารดังกล่าวแตกออกเกิดหมู่คาร์บอนิลหรือคาร์บอกซิลที่ปลายสาย (terminal end) ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่ดูดกลืนแสงขาว (visible light) จึงทำให้ไม่เกิดสี และอยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ดี (สมจิตต์ และ วรรณภา, 2544) และสามารถกำจัดออกจากแป้งในขั้นตอนการล้างน้ำได้ง่าย จึงทำให้แป้งมีความขาวมากขึ้น



ภาพที่ 13 ความขาว (whiteness) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน

ตารางที่ 3 ความขาว (whiteness) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน

ความเข้มข้นโอโซน		ความขาว
(mg O_3 / g starch)	(mole O_3 / mole AGU)	(Kett scale)
0	0.000	93.60 [d]
5	0.017	95.45 [c]
15	0.051	96.05 [c]
30	0.102	97.05 [b]
45	0.153	97.30 [ab]
60	0.204	97.75 [ab]
90	0.306	98.00 [a]

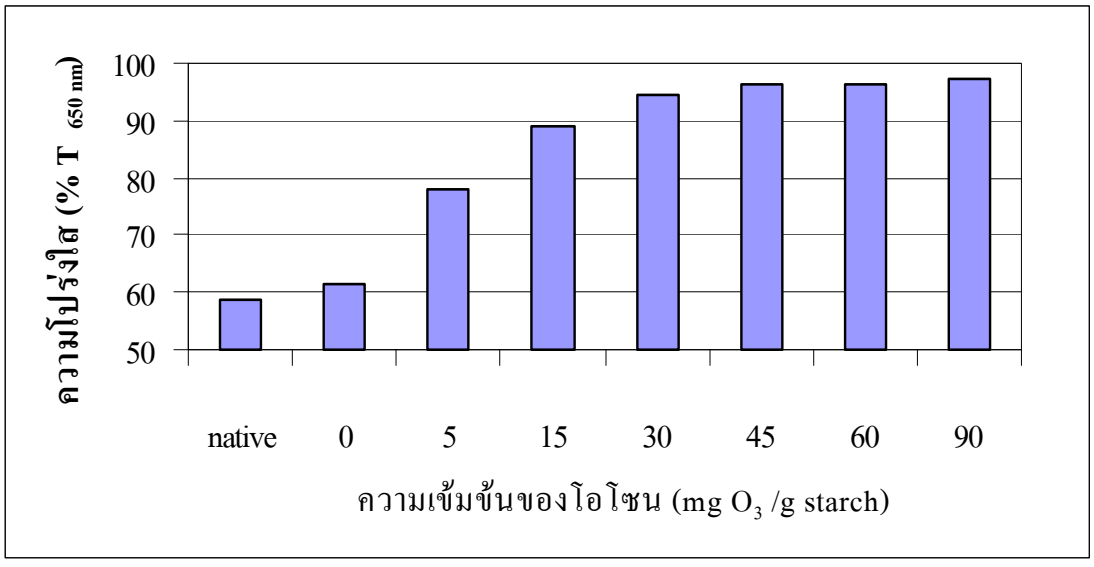
หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

เมื่อน้ำแป้งที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยสีขาวขุ่นได้รับความร้อนและแรงกล เม็ดแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ ทำให้เกิดเป็นสารละลายที่ใสและหนืดขึ้น หรือเรียกว่าแป้งเปียก (paste) จากการวิเคราะห์ความโปร่งใสของแป้งเปียก (paste clarity) โดยแสดงเป็นค่าร้อยละแสงส่องผ่านที่ 650 นาโนเมตร พบว่าค่าร้อยละแสงส่องผ่านของแป้งควบคุมเท่ากับ 61.40 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าร้อยละแสงส่องผ่านของแป้งมันสำปะหลังดิบเริ่มต้นเล็กน้อย คือ 58.50 ส่วนแป้งที่ให้โอโซนในระดับต่างๆ กัน คือ 5, 15, 30, 45, 60 และ 90 mg O_3 /g starch มีค่าร้อยละแสงส่องผ่านเพิ่มมากขึ้นเป็น 77.85, 89.00, 94.60, 96.40, 96.30, และ 97.45 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4 และภาพที่ 14 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโอโซนเป็นสารออกซิไดซ์เข้าปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลแป้งทำให้เกิดหมู่คาร์บอนิลและคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้น ทำให้แป้งละลายน้ำได้ดีขึ้นเนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) อีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการตัดพันธะไกลโคซิดิกของโมเลกุลแป้งด้วย เป็นผลทำให้สายอะมิโลสและอะมิโลเพคตินมีขนาดเล็กลง ทำให้แป้งสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้นด้วย ทำให้แป้งเปียกมีความใสขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งดิบอย่างเห็นได้ชัด (Wurzburg, 1986)

ตารางที่ 4 ความโปร่งใสของแป้งเปียก (paste clarity) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน

ความเข้มข้นโอโซน		ความโปร่งใสของแป้งเปียก
(mg O_3 / g starch)	(mole O_3 / mole AGU)	(%$T_{650\ nm}$)
0	0.000	61.40 [e]
5	0.017	77.85 [d]
15	0.051	89.05 [c]
30	0.102	94.60 [b]
45	0.153	96.40 [a]
60	0.204	96.30 [a]
90	0.306	97.45 [a]

หมายเหตุ ตัวอักษรที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)



ภาพที่ 14 ความโปร่งใสของแป้งเปียก (paste clarity) ของแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ กัน