2.4 สมบัติทางความหนืดของแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 และ 90 mg O_3/g starch

จากการตรวจวัดสมบัติทางความหนืดของแป้งที่ได้ พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในแป้งมีผลต่อการดัดแปรแป้งด้วยโอโซน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้และปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในแป้ง ดังตารางที่ 9 และภาพที่ 26 แป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม กรณีทำเป็นแป้งควบคุม (ไม่ผ่านการให้โอโซน) วัดค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ได้ 465, 441, 440, 437 และ 430 RVU ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อแป้งมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมากขึ้น และเมื่อให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) แป้งที่ได้จะมีค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 237, 315, 327, 345 และ 367 RVU ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงสุดของแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน เมื่อผ่านการให้โอโซน พบว่าแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในปริมาณสูง (200 พีพีเอ็ม) และผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงสุดของแป้งน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง (0 พีพีเอ็ม) หรือมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างที่น้อยกว่า (50, 100 และ 150 พีพีเอ็ม) โดยผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน (ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 49, 29, 26, 21 และ 15 สำหรับแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 mg O_3/g starch) แสดงให้เห็นว่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีอิทธิพลร่วมกับความเข้มข้นโอโซน ส่งผลต่อค่าความหนืดสูงสุดของแป้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้โอโซนระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโอโซนบางส่วนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนกับแป้งลดลง แต่ในลักษณะเช่นนี้จะไม่พบในกรณีที่ใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นสูง (90 mg O_3/g starch)

ตารางที่ 9 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในปริมาณต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในแป้ง (พีพีเอ็ม)	ความหนืดสูงสุด (RVU)		
	ปริมาณโอโซน (mg O_3/g starch)		
	0	15	90
0	465 ^{a,A}	237 ^{b,A} (-49)	274 ^{b,NS} (-45)
50	441 ^{a,B}	315 ^{b,B} (-29)	267 ^{b,NS} (-35)
100	440 ^{a,B}	327 ^{b,B} (-26)	268 ^{b,NS} (-39)
150	437 ^{a,BC}	345 ^{b,B} (-21)	266 ^{c,NS} (-37)
200	430 ^{a,C}	367 ^{b,B} (-15)	262 ^{c,NS} (-39)

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

2. ตัวเลขในวงเล็บหลังตัวอักษร แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

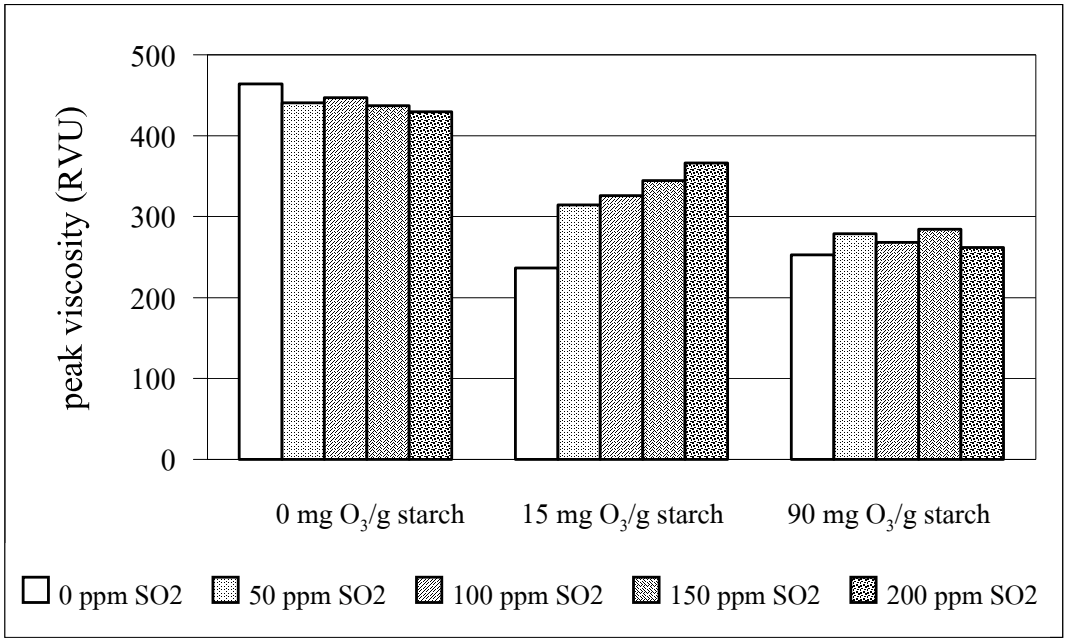
$$\text{ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (\%)} = \frac{(X_t - X_0)}{X_0} \times 100$$

โดยที่ X_t = ค่าที่วิเคราะห์ได้ของแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 หรือ 90 mg O_3/g starch

X_0 = ค่าที่วิเคราะห์ได้ของแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

ดังนั้น + = แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

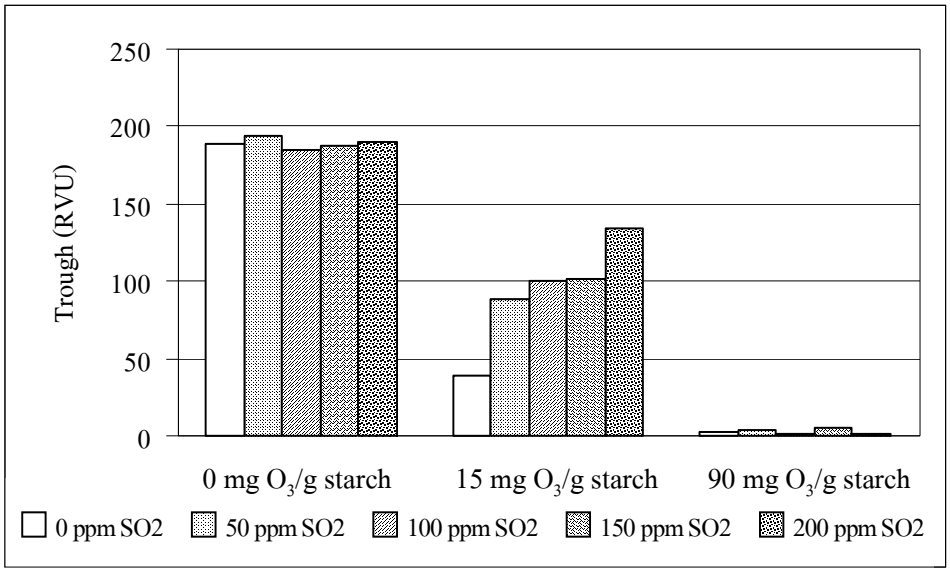
\- = แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน



ภาพที่ 26 ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของแป้งที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในปริมาณต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

สำหรับค่าความหนืดต่ำสุด (trough) เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ ดังตารางที่ 10 และภาพที่ 27 พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีผลต่อระดับการดัดแปรแป้งด้วยโอโซน แป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน กรณีทำเป็นแป้งควบคุม (ไม่ผ่านการให้โอโซน) ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของค่าความหนืดต่ำสุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 185 – 190 RVU เมื่อแป้งผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) แป้งที่ได้มีค่าความหนืดต่ำสุดเท่ากับ 40, 89, 101, 101 และ 134 RVU สำหรับแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่ำสุดของแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน เมื่อผ่านการให้โอโซน พบว่าแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในปริมาณสูง (200 พีพีเอ็ม) และผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่ำสุดของแป้งน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง (0 พีพีเอ็ม) หรือมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างที่น้อยกว่า (50, 100 และ 150 พีพีเอ็ม) โดยผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน (ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดต่ำสุดเท่ากับ 79, 54, 46, 41 และ 29 สำหรับแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 mg O_3/g starch) แสดงให้เห็นว่าปริมาณซัลเฟอร์ได

ออกไซด์ตกค้างมีอิทธิพลร่วมกับความเข้มข้นโอโซน ส่งผลต่อค่าความหนืดต่ำสุดของแป้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้โอโซนระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโอโซนบางส่วนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนกับแป้งลดลง แต่ในลักษณะเช่นนี้จะไม่พบในกรณีที่ใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นสูง (90 mg O_3/g starch) เช่นเดียวกับในกรณีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)



ภาพที่ 27 ความหนืดต่ำสุด (trough) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

ตารางที่ 10 ความหนืดต่ำสุด (trough) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในแป้ง (พีพีเอ็ม)	ความหนืดต่ำสุด (RVU)		
	ปริมาณโอโซน (mg O_3/g starch)		
	0	15	90
0	189 ^{a,NS}	40 ^{b,B} (-79)	2 ^{c,NS} (-99)
50	190 ^{a,NS}	89 ^{b,AB} (-54)	4 ^{c,NS} (-98)
100	186 ^{a,NS}	101 ^{b,A} (-46)	2 ^{c,NS} (-99)
150	187 ^{a,NS}	101 ^{b,A} (-41)	5 ^{c,NS} (-97)
200	190 ^{a,NS}	134 ^{b,A} (-29)	2 ^{c,NS} (-99)

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

2. ตัวเลขในวงเล็บหลังตัวอักษร แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (\%)} = \frac{(X_t - X_0)}{X_0} \times 100$$

โดยที่ X_t = ค่าที่วิเคราะห์ได้ของแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 หรือ 90 mg O_3/g starch

X_0 = ค่าที่วิเคราะห์ได้ของแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

ดังนั้น + = แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

\- = แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

สำหรับค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ ดังตารางที่ 11 และภาพที่ 28 พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีผลต่อระดับการดัดแปรแป้งด้วยโอโซน แป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน กรณีทำเป็นแป้งควบคุม (ไม่ผ่านการให้โอโซน) ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของค่าความหนืดสุดท้าย โดยมีค่าอยู่ในช่วง 260 – 280 RVU เมื่อแป้งผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) แป้งที่ได้มีค่าความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 64, 132, 150, 147 และ 190 RVU สำหรับแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสุดท้ายของแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน เมื่อผ่านการให้โอโซน พบว่าแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างในปริมาณสูง (200 พีพีเอ็ม) และผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) จะมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงความหนืดสุดท้ายของแป้งน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง (0 พีพีเอ็ม) หรือมีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างที่น้อยกว่า (50, 100 และ 150 พีพีเอ็ม) โดยผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน (ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 76, 51, 42, 37 และ 28 สำหรับแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 mg O_3/g starch) แสดงให้เห็นว่าปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างมีอิทธิพลร่วมกับความเข้มข้นโอโซน ส่งผลต่อค่าความหนืดสุดท้ายของแป้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้โอโซนระดับความเข้มข้นต่ำ (15 mg O_3/g starch) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโอโซนบางส่วนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของโอโซนกับแป้งลดลง แต่ในลักษณะเช่นนี้จะไม่พบในกรณีที่ใช้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นสูง (90 mg O_3/g starch) เช่นเดียวกับในกรณีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความหนืดต่ำสุด (trough)

ตารางที่ 11 ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในแป้ง (พีพีเอ็ม)	ความหนืดสุดท้าย (RVU)		
	ปริมาณโอโซน (mg O_3/g starch)		
	0	15	90
0	266 ^{a,NS}	64 ^{b,NS} (-76)	5 ^{c,NS} (-98)
50	278 ^{a,NS}	132 ^{b,NS} (-51)	7 ^{c,NS} (-97)
100	260 ^{a,NS}	150 ^{b,NS} (-42)	4 ^{c,NS} (-98)
150	258 ^{a,NS}	147 ^{b,NS} (-37)	7 ^{c,NS} (-97)
200	266 ^{a,NS}	190 ^{b,NS} (-28)	4 ^{c,NS} (-98)

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

2. ตัวเลขในวงเล็บหลังตัวอักษร แสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

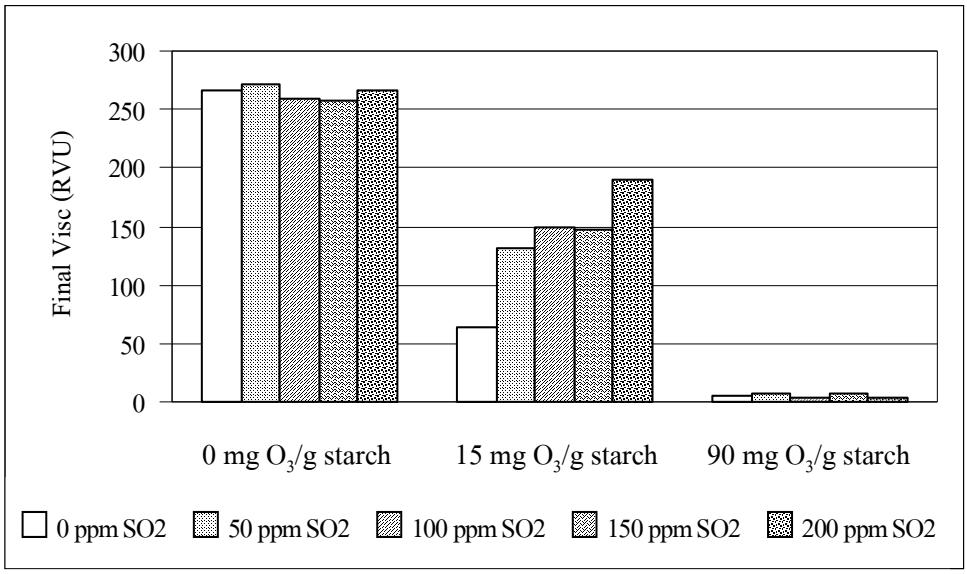
$$\text{ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง (\%)} = \frac{(X_t - X_0)}{X_0} \times 100$$

โดยที่ X_t = ค่าที่วิเคราะห์ได้ของแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 หรือ 90 mg O_3/g starch

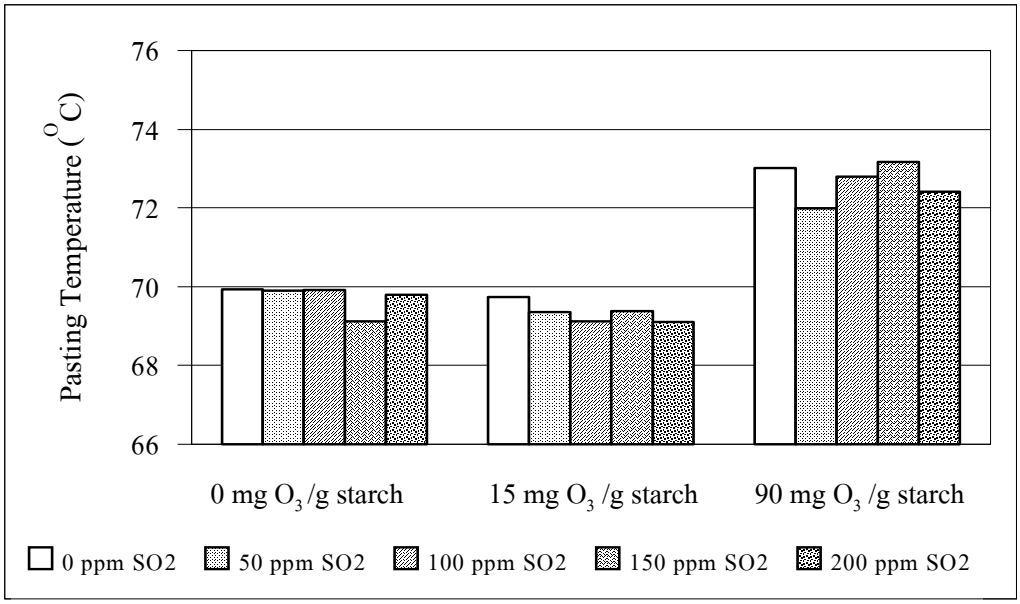
X_0 = ค่าที่วิเคราะห์ได้ของแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

ดังนั้น + = แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน

\- = แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการให้โอโซน (แป้งควบคุม) ที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างเท่ากัน



ภาพที่ 28 ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch



ภาพที่ 29 อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

ตารางที่ 12 อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ของแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างต่างๆ กัน ที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0, 15 และ 90 mg O_3/g starch

ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างในแป้ง (พีพีเอ็ม)	อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (°C) ปริมาณโอโซน (mg O_3/g starch)			ค่าเฉลี่ย
	0	15	90	
0	69.9	69.7	73.0	70.9 ^{NS}
50	69.9	69.4	72.0	70.4 ^{NS}
100	69.9	69.1	72.8	70.6 ^{NS}
150	69.1	69.4	73.2	70.6 ^{NS}
200	69.8	69.1	72.4	70.4 ^{NS}
ค่าเฉลี่ย	69.7 ^{b}	69.3 ^{b}	72.7 ^{a}	

หมายเหตุ ตัวอักษรตัวพิมพ์เล็กที่เหมือนกันในแถวเดียวกัน และตัวอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

สำหรับอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) เมื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ ดังตารางที่ 12 และภาพที่ 29 พบว่า ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้างไม่มีอิทธิพลร่วมกันกับความเข้มข้นโอโซน โดยแป้งที่มีปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ตกค้าง 0, 50, 100, 150 และ 200 พีพีเอ็ม ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ โดยในกรณีแป้งควบคุม (ไม่ผ่านการให้โอโซน) และแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 15 mg O_3/g starch มีอุณหภูมิที่แป้งเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดอยู่ในช่วง 69 – 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่แป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้น 90 mg O_3/g starch จะมีอุณหภูมิที่แป้งเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดอยู่ในช่วง 72 – 73 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอุณหภูมิที่ทำให้แป้งเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงกว่าในกรณีแป้งควบคุมและแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งที่ผ่านการให้โอโซนที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น จะต้องใช้ความร้อนมากขึ้นเพื่อใช้ในการทำให้เม็ดแป้งพองตัวเริ่มเปลี่ยนแปลงมีความหนืดเกิดขึ้น