

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งกะบุง

5.1.1 กระบวนการทำแห้งแผ่นกะบุงสดเพื่อผลิตแป้งกะบุงแบบแห้ง

5.1.1.1 การแช่แผ่นกะบุงขนาด 0.1 เซนติเมตรในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ระดับความเข้มข้นและเวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.2 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะลดระยะเวลาแช่แผ่นกะบุง โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ 800 พีพีเอ็ม ระยะเวลาแช่ประมาณ 50 นาทีสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของแผ่นกะบุง แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ 1400 พีพีเอ็ม จะใช้เวลาแช่เพียง 5 นาที ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากเอนไซม์เป็นการสร้างสีจากการออกซิไดส์สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) การทำงานของไบซัลไฟต์ (HSO_3^-) ที่ไปหยุดการเกิดสีน้ำตาลนั้น อาจเป็นผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปลดปริมาณออกซิเจน หรือสารนี้ไปทำปฏิกิริยากับควิโนหรือสารที่ได้จากปฏิกิริยา polyphenol oxidation จึงป้องกันการเกิดสีน้ำตาลได้ (35) จากการทดสอบทางสถิติพบว่า ทั้งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และระยะเวลาแช่มีผลยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของแผ่นกะบุงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยติดตามสีของแผ่นกะบุงแห้งที่มีความเข้มข้นสุดท้ายร้อยละ 8-10 เนื่องจากการติดตาม polyphenol oxidase (PPO) activity นั้นไม่สะดวก และพบปัญหา กล่าวคือ กลูโคแมนแนนในเนื้อกะบุงจะเกิดการพองตัวเป็นเจลเคลือบผิวของแผ่นกะบุงโดยจะเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อระยะเวลาแช่เพิ่มขึ้น เจลที่เกิดขึ้นจะขวางกั้นการทำงานของไบซัลไฟต์ในการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล แม้จะแช่แผ่นกะบุงในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 1400 พีพีเอ็มเป็นเวลา 50 นาที เมื่อตรวจสอบ polyphenol oxidase (PPO) activity (โดยล้างเจลบริเวณผิวของแผ่นกะบุงออกก่อนหยดสารละลาย catechol) พบว่าหลังหยดสารละลาย catechol 6 นาที ยังคงเกิดสีน้ำตาลบนแผ่นกะบุง ดังนั้นการติดตามหาภาวะที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของแผ่นกะบุงจึงประเมินจากแผ่นกะบุงแห้งที่มีความเข้มข้นสุดท้ายร้อยละ 8-10 ซึ่งพบว่า ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ใช้สารละลายโซเดียม

เมตาไบซัลไฟต์ 1400 พีพีเอ็ม ระยะเวลาแช่ 5 นาที โดยความร้อนจะมีผลต่อเอนไซม์เนื่องจากการให้ความร้อนแก่ phenolase ในช่วงเวลาสั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะทำให้เอนไซม์สูญเสียออกติวิตี (activity) (37) ดังนั้นการใช้สารเคมีและความร้อนจึงสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้ดียิ่งขึ้น

จากการสังเกตแผ่นกะบกแห้งเมื่อใช้ภาวะดังกล่าวนี้ พบว่า แผ่นกะบกมีสีน้ำตาลออกเหลือง เนื่องจากใช้เวลาแช่แผ่นกะบกนานเกินไป ดังนั้นจึงได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้ความเข้มข้นของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ที่ 1400 พีพีเอ็ม แต่ระยะเวลาแช่ 1 และ 5 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า การแช่แผ่นกะบกขนาด 0.1 เซนติเมตร เพียง 1 นาที ก็เพียงพอในการยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล แผ่นกะบกแห้งมีสีน้ำตาลอ่อน (เหมือนหัวกะบกสดเริ่มต้น) และยังลดปัญหาการเกิดเจล ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 1400 พีพีเอ็ม ระยะเวลาแช่ 1 นาที ในการเตรียมแผ่นกะบกก่อนอบแห้ง

5.1.1.2 การเลือกขนาดแป้งกะบกที่ได้จากการบดแผ่นกะบกแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8-10 ด้วย pin mill ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า แป้งกะบกแต่ละขนาดจะมีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขนาดของแป้งกะบกที่ให้ปริมาณกลูโคแมนแนนจากมากไปน้อย เป็นดังนี้คือ ขนาด 36-50, 51-100, 26-35, ใหญ่กว่า 25, 101-200 และ 201-325 เมช ให้ร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนต่อน้ำหนักแป้งกะบกแห้งตามลำดับคือ 66.21, 55.61, 53.74, 51.14, 12.88 และ 1.38 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนในแป้งกะบกแต่ละขนาดโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่า แป้งขนาด 36-50 เมช มีปริมาณกลูโคแมนแนนสูงสุด และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากแป้งขนาด 51-100 เมช ส่วนแป้งขนาด 51-100, 26-35 และใหญ่กว่า 25 เมช มีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาร้อยละของปริมาณแป้งกะบกขนาดต่างๆ (ส่วนของแป้งที่ค้างอยู่บนตะแกรงร่อนขนาดนั้นๆ) ควบคู่กันไป พบว่า แป้งที่แยกได้ส่วนใหญ่มีขนาด 36-50 เมช รองลงมาคือ ขนาด 51-100 และ 26-35 เมช ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อบดแผ่นกะบกแห้งด้วย pin mill แล้ว จะเลือกใช้แป้งขนาด 25-100 เมช โดยจะบดแป้งขนาดใหญ่กว่า 25 ถึง 35 เมชอีกครั้ง ซึ่งสามารถลดขนาดแป้งอยู่ในช่วง 36-50 เมช แป้งกะบกที่ใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไปจึงมีขนาด 36-100 เมช ส่วนแป้งที่มีขนาดเล็กกว่า 100 เมชไม่เหมาะในการใช้ประโยชน์ เนื่องจากมีส่วนของสารเจือปนและฝุ่นปนอยู่มาก

5.1.1.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งแผ่นกะบุงสด

5.1.1.3.1 การตากแดดแผ่นกะบุงแห้งขนาด 0.1 เซนติเมตร หลังแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 1400 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 1 นาที จนกระทั่งได้แผ่นกะบุงแห้งที่มีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 9.24 เมื่อใช้เวลาตากแดดประมาณ 5-6 ชั่วโมง แผ่นกะบุงมีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนประมาณ 77.20 การตากแดดเป็นวิธีการทำแห้งที่ง่ายและประหยัด เกษตรกรสามารถทำได้ แต่วิธีนี้จะใช้ระยะเวลาทำแห้งนานกว่าการใช้ตู้อบและใช้พื้นที่มาก

5.1.1.3.2 การอบแห้งแผ่นกะบุงขนาด 0.1 เซนติเมตรหลังแช่ในสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ 1400 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและระยะเวลาอบแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ระยะเวลาในการอบแห้งจนแผ่นกะบุงมีความชื้นสุดท้ายร้อยละ 8-10 ที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียสได้ 75, 100 และ 166 นาที ตามลำดับ จากการทดสอบทางสถิติ พบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ไม่ทำให้แบ่งที่ได้มีความสามารถในการพองตัวและร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นการเลือกภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งแผ่นกะบุงจึงพิจารณาระยะเวลาที่ใช้อบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ การอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 75 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลานานกว่าคือ 100 นาที แต่เมื่อพิจารณาแผ่นกะบุงแห้งที่ได้พบว่า การใช้อุณหภูมิมอบแห้งที่ 90 องศาเซลเซียสจะได้แผ่นกะบุงแห้งที่มีสีคล้ำกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิมอบแห้งที่ 70 องศาเซลเซียส ระยะเวลารอบแห้ง 100 นาที จะได้แผ่นกะบุงแห้งที่มีปริมาณกลูโคแมนแนนร้อยละ 80 ผลผลิตที่ได้ร้อยละ 15.1

5.1.2 การผลิตแป้งกะบุงแบบเปียก

5.1.2.1 การทดลองผลิตแป้งกะบุงโดยแปรความเข้มข้นของเอซิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.3-4.4 พบว่า เมื่อแปรความเข้มข้นของเอซิลแอลกอฮอล์จะทำให้ได้แป้งที่มีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนน และความสามารถในการพองตัวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของเอซิลแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นดังนี้ คือร้อยละ 50, 60, 70 และ 40 โดยปริมาตร จะได้แป้งที่มีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนต่อน้ำหนักแป้งกะบุงแห้งจากมากไปน้อย คือ 87.98, 87.13, 86.35 และ 77.56 และแป้งมีความสามารถในการพองตัวต่อน้ำหนักแป้งกะบุงแห้งจากมากไปน้อยคือ 72.19, 67.81, 66.93 และ 42.06

ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณกลูโคแมนแนน และความสามารถในการพองตัวของแป้งกะบุงโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณกลูโคแมนแนน และความสามารถในการพองตัวของแป้งกะบุง เมื่อแปรความเข้มข้นของเอธิลแอลกอฮอล์เป็นร้อยละ 50, 60 และ 70 โดยปริมาตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ที่ 5 เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าการใช้เอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยที่ความเข้มข้นนี้สารละลายจะมีส่วนของน้ำมากกว่าส่วนของแอลกอฮอล์ เนื่องจากน้ำเป็นโมเลกุลมีขั้ว (polar molecule) และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน (38) ดังนั้นเอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยปริมาตร จึงยังมีความมีขั้วค่อนข้างสูง ในระหว่างกระบวนการผลิต กลูโคแมนแนนจึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้เกิดการพองตัวเล็กน้อย การพองตัวนี้เจลรอบนอกของกลูโคแมนแนนจะดูดซับสารเจือปนไว้ทำให้ยากแก่การกำจัด แป้งที่ได้จึงมีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนต่ำ มีสีน้ำตาล และสมบัติการรวมกับน้ำลดลง ส่งผลให้แป้งมีความสามารถในการพองตัวต่ำลงด้วย โดยความสามารถในการพองตัวมีความสัมพันธ์กับร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนในแป้งกะบุง กล่าวคือ แป้งที่มีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนสูง มักมีความสามารถในการพองตัวสูง ส่วนแป้งที่มีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนต่ำจะมีความสามารถในการพองตัวต่ำเช่นกัน

การใช้เอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 50 โดยปริมาตรขึ้นไปสามารถลดปัญหาการพองตัวของกลูโคแมนแนน เนื่องจากที่ความเข้มข้นนี้ โมเลกุลของน้ำจะสร้างพันธะไฮโดรเจน กับแอลกอฮอล์จนหมด ได้สารละลายที่ไม่มีขั้ว กลูโคแมนแนนไม่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำจึงไม่เกิดการพองตัว ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิตจึงสามารถกำจัดสารเจือปนที่ติดบริเวณผิวของกลูโคแมนแนนได้สะดวก โดยที่ความเข้มข้นของเอธิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 50 นี้ จะได้แป้งสีขาว, มีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนน และความสามารถในการพองตัวสูงสุดและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับการใช้เอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 60-70 นอกจากนั้นการใช้เอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 60 ขึ้นไป ยังทำให้แป้งที่ได้มีสีออกเทาอีกด้วย ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งกะบุงแบบเปียกคือใช้เอธิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายและยังได้แป้งที่มีคุณภาพดี ผลผลิตที่ได้ประมาณร้อยละ 12.5

5.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำแป้งกะบุงบรสิทุธิ์

5.2.1 การหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการไดแอลลิซิสสารละลายแป้งกะบุงความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยแปรรยะเวลาดั้งแต่ 0 ถึง 96 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการไดแอลลิซิสเพิ่มขึ้น แป้งกะบุงบรสิทุธิ์จะมีร้อยละของปริมาณเถ้าลดลง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การไดแอลลิซิสเป็นการทำสารให้บรสิทุธิ์วิธีการหนึ่งโดยอาศัย หลักการแยกอนุผลซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กออกจากสารอื่น ๆ ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (39) ดังนั้นกลูโคแมนแนนซึ่งเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ จึงไม่สามารถลอดผ่านเยื่อเลือกผ่านได้ ส่วนสารเจือปนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กสามารถลอดผ่านได้ จึงได้แป้งกะบุงบรสิทุธิ์ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยร้อยละของปริมาณเถ้าที่ตรวจพบในแป้งกะบุงบรสิทุธิ์ที่ได้เมื่อใช้ระยะเวลาในการไดแอลลิซิสเป็น 72 และ 96 ชั่วโมง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาไดแอลลิซิสสารละลายแป้งกะบุงความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ก่อนการทำแห้ง

5.2.2 การหาภาวะที่เหมาะสมในการทำแห้งสารละลายแป้งกะบุงบรสิทุธิ์ โดยแปรรการทำแห้งด้วย vacuum dryer และ freeze dryer ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า เมื่อนำสารละลายแป้งกะบุงความเข้มข้นร้อยละ 5 หลังไดแอลลิซิสในน้ำกลั่น เป็นเวลา 72 ชั่วโมง มาทำแห้งโดยใช้ vacuum dryer ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดันสูญญากาศ 30 ปอนด์/ตารางนิ้ว จะได้แป้งกะบุงบรสิทุธิ์ลักษณะเป็นแผ่นบางใสคล้ายพลาสติก ละลายน้ำเล็กน้อย ต่างจากผลงานของ Sugiyama และคณะ (18) ซึ่งรายงานไว้ว่า แป้งกะบุงบรสิทุธิ์จะมีลักษณะคล้ายฝ้าย สีขาว ละลายน้ำได้ดี และสามารถเกิดเจลได้ การละลายน้ำเป็นสมบัติที่ควรคำนึงถึงอย่างมากในการทำแป้งกะบุงบรสิทุธิ์ การใช้ภาวะที่รุนแรงเกินไปจะมีผลต่อโครงสร้างของกลูโคแมนแนนทำให้การละลายน้ำลดลง เช่น การตกตะกอนกลูโคแมนแนนด้วยแอลกอฮอล์ หรือการทำแป้งกะบุงบรสิทุธิ์โดยใช้สารละลายเฟลิ่ง ดังนั้นแป้งกะบุงบรสิทุธิ์ที่ได้จากการทำแห้งด้วย vacuum dryer มีการละลายน้ำต่ำ อาจเป็นผลมาจากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น วิธีการนี้จึงไม่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาการทำแห้งสารละลายแป้งกะบุงบรสิทุธิ์ด้วย freeze dryer โดยตั้งอุณหภูมิต่ำสุดของการแช่เยือกแข็งเป็น -40 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในขั้นตอนการแช่แข็งประมาณ $2-2\frac{1}{2}$ ชั่วโมง สารละลายแป้งกะบุงจะมีอุณหภูมิเยือกแข็งอยู่ในช่วง -32 ถึง -38 องศาเซลเซียส ใช้อุณหภูมิการระเหิดที่ 32 องศาเซลเซียส พบว่า แป้งที่ได้มีลักษณะคล้ายฝ้ายสีขาว ละลายน้ำได้ดี สามารถเกิดเจลได้ และมีปริมาณกลูโคแมนแนนอยู่ถึงร้อยละ 98.86 ซึ่งมี

สมบัติต่างๆ สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Sugiyama และคณะ ดังนั้น ภาวะที่เหมาะสมในการทำ
แห้งสารละลายแป้งกะบุงบริสุทธิ์ จึงควรเลือกใช้ freeze dryer

5.3 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งกะบุงที่ผลิตได้ พบว่า แป้งกะบุงมีองค์
ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับแป้งที่ผลิตขายทางการค้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งกะบุงผลิตแบบเปียก
จะมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกับแป้งที่ผลิตขายโดยบริษัท Mannan Food ดังแสดงในตารางที่
4.11 โดยมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ กลูโคแมนแนน ซึ่งจัดเป็นอาหารเส้นใย
ชนิดหนึ่ง ดังนั้นจึงตรวจสอบปริมาณกลูโคแมนแนนในแป้งกะบุงด้วยวิธีการหาอาหารเส้นใยดัดแปลง
จากวิธีตาม AOAC 1990-985.29 (29) แป้งกะบุงที่ผลิตได้ทั้งแบบแห้งและแบบเปียกจะมีปริมาณ
กลูโคแมนแนนมากกว่าร้อยละ 80 ขึ้นไป นอกจากนี้การทดสอบเพื่อยืนยันว่าองค์ประกอบหลักใน
แป้งกะบุงคือ กลูโคแมนแนน สามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เนื่องจาก
จากกลูโคแมนแนนเป็นสารประเภทพอลิแซ็กคาไรด์มีองค์ประกอบเป็นกลูโคส เชื่อมต่อกับแมนโนส
ด้วยพันธะบีตา (1,4) ไกลโคซิดิก ดังนั้นจะตรวจพบพีค ของ บีตา-คอนนิקרั้น (บีตา-
กลูโคซิดิก และ บีตา-แมนโนซิดิก) ที่ 890 เซนติเมตร⁻¹ และพีคของส่วนที่เป็นแมนโนซิด
ที่ 870 เซนติเมตร⁻¹ เมื่อส่งตัวอย่างแป้งกะบุงที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมที่ศูนย์
เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า ลักษณะเส้นสเปกตรัมที่
ได้เหมือนกับเส้นสเปกตรัมของกลูโคแมนแนนมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.8-4.9
ดังนั้นแสดงว่า แป้งกะบุงมีองค์ประกอบหลักคือ กลูโคแมนแนน

การศึกษาองค์ประกอบของกลูโคแมนแนนโดยนำแป้งกะบุงไปย่อยอย่างสมบูรณ์ด้วยกรด
(1N H₂SO₄, reflux 24 ชั่วโมง) แล้ววิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้โครมาโทกราฟีแบบ
กระดาษเทียบกับสารละลายกลูโคสและแมนโนสมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่า
ไฮโดรไลเซต (hydrolyzate) ที่ได้จากการย่อยกลูโคแมนแนนอย่างสมบูรณ์ด้วยกรด
โดยทำ 3 ซ้ำ จะได้ 2 จุด มีค่า R_f เป็น 0.54 และ 0.61 ซึ่งตรงกับค่า R_f ของสารละลาย
กลูโคสและแมนโนสมาตรฐาน ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างของกลูโคแมนแนนประกอบด้วย
กลูโคสและแมนโนส

การหาสมบัติและองค์ประกอบบางประการได้แก่ ปริมาณความชื้น, ความสามารถในการ
การพองตัว, ปริมาณกลูโคแมนแนน และปริมาณกรดออกซาลิกและแคลเซียมออกซาลेट เป็นต้น

ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า แป้งกะบุงแบบแห้งและแบบเปียก จะมีปริมาณความชื้นอยู่ร้อยละ 9.7 และ 8.3 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ที่ใช้กำหนด specification ของสารประเภทกัม เช่น โลคัส บีน กัม และ กัว กัม โดยกำหนด หน้าที่สูงสุดเฉลี่ยระหว่างการอบแห้งไม่เกินร้อยละ 10-15 (22) และยิ่งใกล้เคียงกับปริมาณความชื้นในแป้งกะบุงที่ผลิตขายทางการค้า ดังแสดงใน ตารางที่ 4.11 แป้งกะบุงแบบเปียกจะมีคุณภาพดีกว่าแป้งกะบุงแบบแห้ง เนื่องจากมีร้อยละของ ปริมาณกลูโคแมนแนนและความสามารถในการพองตัวสูงกว่า ส่วนกรดออกซาลิกและแคลเซียม ออกซาเลท จะพบในแป้งกะบุงแบบแห้งและแบบเปียกเพียงร้อยละ 1.44 และ 0.02 ตามลำดับ เนื่องจาก กรดออกซาลิกและแคลเซียมออกซาเลทสามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้ (40) ดังนั้นจึงถูกกำจัดไปในระหว่างกระบวนการผลิต เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสารปนเปื้อน ได้แก่ สารหนู และตะกั่ว โดยกองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ กรมวิทยาศาสตร์บริการ พบว่า ไม่พบสารปนเปื้อน ดังกล่าวในแป้งกะบุงที่ผลิตได้ จึงมั่นใจได้ว่า แป้งกะบุงมีความปลอดภัยสูง

ในกระบวนการผลิตแป้งกะบุง มีการใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาการ เกิดสีน้ำตาล เมื่อวิเคราะห์ปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ตกค้างโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ พบ ว่า เมื่อใช้สารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ในการผลิตแป้งกะบุงแบบแห้ง 1400 พีพีเอ็ม และ ใช้โซเดียมซัลไฟต์ในการผลิตแป้งกะบุงแบบเปียก 200 พีพีเอ็ม จะตรวจพบปริมาณซัลเฟอร์ไดออก ซิดตกค้างเป็น 241 และ 57 พีพีเอ็ม ตามลำดับ โดยปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่อนุญาตให้ ใช้แตกต่างกันตามชนิดอาหาร ในกรณีที่เป็นอาหารที่ใช้บริโภคโดยตรงปริมาณจะต้องไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ปริมาณสูงสุดในไวน้ำจะอยู่ในช่วงระหว่าง 200-250 มิลลิกรัม/ลิตร, น้ำผลไม้ เครื่องดื่ม กำหนดไว้ 350 พีพีเอ็ม และในผลไม้แห้ง 2,000 พีพีเอ็ม (37)

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการพองตัวของแป้งกะบุง ดังแสดงในตาราง ที่ 4.14 และรูปที่ 4.10 พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อการพองตัวของแป้ง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิ หึ่ง (32), 50, 60, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส แป้งจะมีความสามารถในการ พองตัวเป็น 34.27, 53.01, 59.27, 63.55, 72.39 และ 80.99 ตามลำดับ เนื่องจาก กลูโคแมนแนนประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่เป็นสายพันกัน ดังนั้นเมื่อรวมกับน้ำโมเลกุลรอบนอก จะดูดซับน้ำแล้วค่อยๆ พองตัวให้สารละลายที่มีลักษณะหนืดขึ้น (1) กรณีที่มีผลของความร้อนมาเกี่ยวข้อง ความร้อนจะมีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของกลูโคแมนแนนอ่อนตัวลง โมเลกุล ของน้ำจึงแทรกเข้าสู่โครงสร้างได้เร็วขึ้นและสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของกลูโคแมนแนน

ทำให้แป้งพองตัวได้เร็วขึ้น (34)

การศึกษาความสามารถในการเกิดเจลของแป้งกะบึกเมื่อแปร pH ของสารละลายแป้งกะบึกตั้งแต่ 9 ถึง 12 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่า สารละลายแป้งกะบึกความเข้มข้นร้อยละ 2 มีค่า pH 6.85 (control) โดยที่ pH นี้ สารละลายมีลักษณะขุ่นหนืด เมื่อปรับ pH ของสารละลายแป้งกะบึกโดยใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 จนมี pH 9 แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จะได้เจลที่มีลักษณะนิ่มมาก ไม่สามารถวัดค่า gel strength โดยใช้เครื่อง texturometer ได้ การปรับ pH ของสารละลายแป้งกะบึกจะค่อยๆ เติมสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์และกวนอย่างรวดเร็วเพื่อให้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กระจายอย่างสม่ำเสมอ เมื่อปรับ pH ของสารละลายแป้งกะบึกเป็น 10 และ 11 หลังจากให้ความร้อนจะได้เจลคงรูป มีความหยุ่น วัดค่า gel strength ได้ 3.6 และ 9.8 นิวตันตามลำดับ โดยที่ pH 11 จะได้เจลที่มีค่า gel strength สูงสุดเนื่องจากต่างจะไปดึงหมู่ที่เป็นกรด เช่น acetyl, acetate ออกจากโครงสร้างของกลูโคแมนแนน ทำให้บริเวณนั้นยึดจับกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นร่างแหตาข่าย จึงเกิดเจลได้ (11) แต่เมื่อปรับให้สารละลายแป้งกะบึกมี pH สูงเกินไปคือ มี pH 12 พบว่า เกิดการจับตัวเป็นก้อนๆ แทนที่จะรวมกันเป็นเจลก้อนเดียวกันทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สารละลายแป้งกะบึกมี pH เพิ่มขึ้น สารละลายจะมีความหนืดสูง ทำให้การกวนอย่างรวดเร็วเพื่อกระจายสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ให้สม่ำเสมอเป็นไปได้ยากและไม่สะดวก จึงมีผลทำให้แต่ละบริเวณของสารละลายแป้งกะบึกมีค่า pH แตกต่างกันไปซึ่งหมายความว่า จะมีปริมาณต่างแตกต่างกันด้วย ดังนั้นบริเวณที่มี pH สูงเกินไปต่างจะมีผลอย่างรุนแรงต่อโครงสร้างของกลูโคแมนแนนทำให้เกิดการจับตัวเป็นเจล แยกออกจากส่วนอื่นในสารละลายแป้งกะบึก จึงสรุปได้ว่า pH ของสารละลายแป้งกะบึก มีผลต่อการเกิดเจลของกลูโคแมนแนน โดยสารละลายแป้งกะบึก pH 11 หลังจากให้ความร้อน จะให้เจลคงรูป มีความหยุ่น จะมีค่า gel strength สูงสุดคือ 9.8 นิวตัน

การศึกษาค่าความหนืดของสารละลายแป้งกะบึกความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer โดยใช้ spindle no. 6 ความเร็ว 100 รอบ/นาที ได้ผลแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า สารละลายแป้งกะบึกจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 7 ชั่วโมงแล้วสารละลายจะมีความหนืดสูงสุดและคงที่ระยะเวลานึง สารละลายแป้งกะบึกแบบเปียกจะมีค่าความหนืดสูงกว่าและเสถียรภาพดีกว่าสารละลาย

แป้งกะบุงแบบแห้ง เมื่อใช้ความเข้มข้นเท่ากันโดยค่าความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งกะบุงแบบเปียกและแบบแห้งความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็น 3,895 และ 1,860 cps. ตามลำดับ

การผลิตแป้งกะบุงทั้งแบบแห้งและแบบเปียกพบว่า แป้งทั้ง 2 วิธีมีองค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณกลูโคแมนแนน และความสามารถในการพองตัวแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงควรกำหนดเกณฑ์ระดับคุณภาพของแป้งกะบุง แม้องค์ประกอบหลักของแป้งกะบุงคือ กลูโคแมนแนน ซึ่งจัดเป็นสารประเภทกัมชนิดหนึ่งแต่สารตัวนี้ยังไม่มีการบรรจุลงในหนังสือเกี่ยวกับสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์หรือกัม ดังนั้นการกำหนดเกณฑ์ของกลูโคแมนแนนในงานวิจัยนี้ จึงอาศัยเกณฑ์ Food Chemicals Codex Specification ของไลคัล บิน กัม และ กัว กัม เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นกาแลคโตแมนแนน ซึ่งใกล้เคียงกับกลูโคแมนแนน (22) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ร่วมกับองค์ประกอบทางเคมีของแป้งที่ผลิตขายทางการค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 5.1 Food Chemicals Codex Specification ของไลคัล บิน กัม และ กัว กัม

องค์ประกอบ	ร้อยละขององค์ประกอบ	
	ไลคัล บิน กัม	กัว กัม
กาแลคโตแมนแนน	ไม่น้อยกว่า 73.0	ไม่น้อยกว่า 66
น้ำหนักที่สูญเสียระหว่างการอบแห้ง	ไม่เกิน 10-14	ไม่เกิน 15
โปรตีน	8	ไม่เกิน 10
ปริมาณเถ้า	ไม่เกิน 1.2	ไม่เกิน 1.5
โลหะหนัก (as Pb)	ไม่เกิน 20 พีพีเอ็ม	ไม่เกิน 20 พีพีเอ็ม
สารหนู	ไม่เกิน 3 พีพีเอ็ม	ไม่เกิน 3 พีพีเอ็ม
ตะกั่ว	ไม่เกิน 10 พีพีเอ็ม	ไม่เกิน 10 พีพีเอ็ม
แป้ง (starch)	ไม่พบ	ไม่พบ

ดังนั้นแป้งกะบุงเกรดระดับทางอาหาร จึงควรมีข้อกำหนดดังต่อไปนี้

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
กลูโคแมนแนน	ไม่น้อยกว่า 75
น้ำหนักที่สูญเสียระหว่างการอบแห้ง	ไม่เกิน 8-10
โปรตีน	ไม่เกิน 2.7
ปริมาณเถ้า	ไม่เกิน 1.5
โลหะหนัก	ไม่เกิน 20 พีพีเอ็ม
สารหนู	ไม่เกิน 3 พีพีเอ็ม
ตะกั่ว	ไม่เกิน 10 พีพีเอ็ม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ไม่เกิน 100 พีพีเอ็ม
แป้ง (starch)	ไม่พบ

แป้งกะบุงผลิตแบบเปียกซึ่งมี specification ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ จึงสามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ได้

5.4 การทดลองนำแป้งกะบุงที่ผลิตได้ไปทำเฮลลี เลือกใช้แป้งกะบุงผลิตแบบเปียกเนื่องจากมีร้อยละของปริมาณกลูโคแมนแนนและความสามารถในการพองตัวสูงกว่าแป้งกะบุงแบบแห้ง โดยทั่วไปแล้ว กลูโคแมนแนนไม่สามารถเกิดเจลโดยตัวมันเองได้ ต้องใช้ด่าง หรือชนแทน กัม ช่วย การใช้ด่างต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษ (21) งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ชนแทน กัม เพื่อช่วยในการเกิดเจลของกลูโคแมนแนน โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาณแป้งกะบุงและชนแทน กัม ที่เหมาะสมในการทำเฮลลี ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.16-4.18 พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งกะบุง จะไม่ทำให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสในทุกๆ ด้านของเฮลลีแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่การเพิ่มปริมาณชนแทน กัม มีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบทางด้านลักษณะปรากฏ, ลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับรวมของเฮลลีจากแป้งกะบุง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ยกเว้นคะแนนการยอมรับทางด้านกลิ่นรสซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ก. ลักษณะปรากฏ จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.19 พบว่า ปริมาณแซนแทน กัม มีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะปรากฏของเฮลลิมี่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทน กัม จะทำให้เฮลลิมี่ลักษณะคงรูป มีความหยุ่นและมีคะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะปรากฏเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคะแนนลักษณะปรากฏโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่าการใช้ปริมาณแซนแทน กัม 0.2 และ 0.3 กรัม ทำให้คะแนนการยอมรับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การใช้ปริมาณแซนแทน กัม 0.3 กรัม จะได้เฮลลิมี่ที่มีลักษณะคงรูป มีความหยุ่น และไม่เยิ้มน้ำ เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบมากที่สุด

ข. ลักษณะเนื้อสัมผัส จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.20 พบว่า ปริมาณแซนแทน กัม มีผลทำให้คะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทน กัม จะทำให้เฮลลิมี่คะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคะแนนลักษณะเนื้อสัมผัสโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่า การใช้ปริมาณแซนแทน กัม 0.2 และ 0.3 กรัม ทำให้คะแนนการยอมรับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การใช้ปริมาณแซนแทน กัม 0.2 กรัม จะได้เฮลลิมี่ที่มีคะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัสสูงสุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความหยุ่นพอเหมาะ ไม่เหนียวเกินไป เป็นที่พอใจของผู้ทดสอบมากกว่าเมื่อใช้ปริมาณ แซนแทน กัม 0.3 กรัม และยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายอีกด้วย

ค. การยอมรับรวม จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.21 พบว่า ปริมาณแซนแทน กัม มีผลทำให้คะแนนการยอมรับรวมของเฮลลิมี่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเมื่อปริมาณแซนแทน กัม เพิ่มขึ้น จะทำให้เฮลลิมี่คะแนนการยอมรับรวมเพิ่มขึ้น การใช้ปริมาณแซนแทน กัม 0.3 กรัม จะได้เฮลลิมี่ที่มีคะแนนการยอมรับรวมสูงสุด แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของคะแนนการยอมรับรวมโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test พบว่า การใช้ปริมาณแซนแทน กัม 0.2 และ 0.3 กรัม ไม่ทำให้คะแนนการยอมรับรวมของเฮลลิมี่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างแป้งกะบุงและแซนแทน กัม ที่เหมาะสมในการทำเฮลลิมี่ คือ 0.5:0.2 ได้เฮลลิมี่ที่มีลักษณะคงรูป มีความหยุ่น ไม่เยิ้มน้ำ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงปลอม โดยได้คะแนนการยอมรับรวมเฉลี่ย 7.941 คะแนนและผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเจลาตินผงสำเร็จรูป มอก 802-2531 (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข)

ซึ่งกำหนดไว้ว่า ผลลัพธ์ที่ตรวจสอบโดยวิธีให้คะแนนแล้วต้องได้คะแนนรวมเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 3 คะแนน (หรือ 7.5 คะแนนจาก 10 คะแนน) และไม่มีลักษณะใดได้คะแนนเฉลี่ยน้อยกว่า 1 คะแนน (หรือ 2.5 คะแนนจาก 10 คะแนน)

การวัดค่า gel strength ของเฮลลีเมื่อแปรอัตราส่วนระหว่างแป้งกะบูกและแซนแทน กัม ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.17 พบว่า เฮลลีที่ได้จากแต่ละอัตราส่วนจะมีค่า gel strength แตกต่างกันไป โดยเมื่อปริมาณแซนแทน กัม เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่า gel strength เพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ระหว่าง ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส และค่า gel strength พบว่า ค่า r^2 (coefficient of determination) เป็น 0.97 ซึ่งสูงกว่า 0.70 แสดงว่า ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส และค่า gel strength มีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา โดยมีสมการเป็น $y = 3.85 + 0.99x - 0.05x^2$

การเปรียบเทียบเฮลลีจากแป้งกะบูก กับเฮลลีจากเจลาติน ดังแสดงในตารางที่ 4.23 พบว่า เฮลลีจากแป้งกะบูกจะขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) คงรูป มีความหยุ่น ไม่เ็นน้ำ แม้จะปล่อยไว้นานก็ตาม ส่วนเฮลลีจากเจลาตินจะขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 8-10 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้องจะเริ่มเ็นน้ำ ความหยุ่นลดลง และไม่คงรูป และเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เฮลลีจะเ็นเป็นน้ำ ซึ่งไม่พบปัญหาดังกล่าวกับเฮลลีจากแป้งกะบูก