บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาการพัฒนากระบวนการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (Parboiled glutinous rice) เสริมคุณค่าทางโภชนาการ คือ ธาตุเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน กรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีน ในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ในการทดลองทั้ง 2 ตอน ได้ผลดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาความคงตัวของสารอาหารในระบบของสารละลาย

การทดลองที่ 1.1 การศึกษาความคงตัวของสารอาหารในระบบของสารละลาย

การศึกษาในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความคงตัวระหว่างสารประกอบของสารอาหารที่ต้องการใช้เพื่อเสริมสารอาหารในข้าวเหนียวพาร์บอยล์ โดยจะพิจารณาในด้านความคงตัวของสารอาหารหลังจากที่นำมาผสมกันในรูปของสารละลาย

ในการทดลองผสมสารประกอบซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารแต่ละชนิด คือ สารประกอบ $NaFeEDTA.H_2O$, Potassium Iodate (KIO_3), Calcium Lactate Gluconate (CaLG), L-Lysine HCL และ L-Threonine ซึ่งเป็นแหล่งที่มาของธาตุเหล็ก ไอโอดีน แคลเซียม กรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีนในรูปของสารละลาย ตามลำดับ โดยเตรียมสารละลายในความเข้มข้นที่จะนำมาใช้จริง วิธีการคำนวณปริมาณสารประกอบแต่ละชนิดดังแสดงในภาคผนวก ข-1 แล้วนำมาตรวจสอบค่าปริมาณสารอาหารในสารละลายผสม ซึ่งธาตุเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ทำการตรวจวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ส่วนปริมาณกรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีนนั้นจะทำการวิเคราะห์ในรูปของ Total Nitrogen โดยใช้วิธีการหาปริมาณโปรตีนในรูปของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) แล้วนำปริมาณสารอาหารจากการวิเคราะห์ในแต่ละวิธีมาเปรียบเทียบค่าปริมาณสารอาหารจากการคำนวณ (การคำนวณปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ข-1) ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.1

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.1 การเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารระหว่างปริมาณที่ได้จากการวิเคราะห์และปริมาณจากการคำนวณ

สารอาหาร	ปริมาณ จากการวิเคราะห์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณ จากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าร้อยละ ความแตกต่าง
1. ธาตุเหล็ก	43.73±0.61	45.73	4.36
2. ธาตุแคลเซียม	1393.33±28.38	1524.16	8.58
3. ธาตุไอโอดีน	0.2956±0.01	0.3048	3.02
4. ปริมาณกรดอะมิโนไลซีน และทรีโอนีนในรูปของไนโตรเจนทั้งหมด	498.36±36.57	502.20	5.91

ผลการเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารแต่ละชนิด คือ ธาตุเหล็ก ธาตุแคลเซียม ธาตุไอโอดีน ปริมาณกรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีนในรูปของไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen) ผลของการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับปริมาณสารอาหารจากการคำนวณพบว่า ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยมีค่าร้อยละความแตกต่างอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 3.02 ถึง 8.58 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ในการตรวจวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยอ้างอิงค่าจากการกำหนดของห้องปฏิบัติการของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ที่มีค่าความแตกต่างไม่เกินร้อยละ 10 จากค่าตามทฤษฎี (Theological value)

นอกจากนี้ได้สังเกตถึงการผสมของสารประกอบต่าง ๆ โดยสังเกตและบันทึกลักษณะของสารละลายสารอาหารที่ได้จากการผสมกันของสารประกอบที่เป็นแหล่งของสารอาหารแต่ละชนิด ซึ่งผลการสังเกตแสดงดังภาพ 4.1 ถึง 4.8

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพ 4.1 ลักษณะของสารละลายผสม ณ เวลาเริ่มต้นผสม (นาทีที่ 0)

ภาพ 4.2 ลักษณะของสารละลายผสม ณ นาทีที่ 30

ภาพ 4.3 ลักษณะของสารละลายผสม ณ นาทีที่ 60 (1 ชั่วโมง)

ภาพ 4.4 ลักษณะของสารละลายผสม ณ นาทีที่ 90 (1 ชั่วโมง 30 นาที)

ภาพ 4.5 ลักษณะของสารละลายผสม ณ นาทีที่ 120 (2 ชั่วโมง)

ภาพ 4.6 ลักษณะของสารละลายผสม ณ นาทีที่ 180 (3 ชั่วโมง)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพ 4.7 ลักษณะของสารละลายผสม ณ นาทีที่ 240 (4 ชั่วโมง)

ภาพ 4.8 ลักษณะของสารละลายผสม เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง

การสังเกตการผสมกันของสารประกอบซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารแต่ละชนิดในรูปของสารละลายสารอาหารพบว่า สารประกอบแต่ละชนิดสามารถละลายได้เป็นอย่างดีและไม่มีความร้อนหรือตะกอนเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าสารประกอบแต่ละชนิดไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกันภายในช่วงระยะเวลาที่ทำการสังเกต (ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการเตรียมสารละลายผสม) ซึ่งโดยปกติแล้วจะทำการเตรียมสารละลายสารอาหารแล้วนำไปใช้ในกระบวนการเสริมสารอาหารทันที หรือภายในระยะ เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 การพัฒนากระบวนการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (Parboiled glutinous rice) เสริมคุณค่าทางโภชนาการ

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวในกระบวนการพาร์บอยล์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวที่มีผลต่อคุณภาพในการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการพาร์บอยล์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของกระบวนการพาร์บอยล์ที่มีต่อความสามารถในการดูดซึมสารอาหารของข้าวเหนียว คือ ธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน ผลการศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวในกระบวนการพาร์บอยล์ของแต่ละสิ่งทดลองแสดงดังตาราง 4.2 ถึง 4.8

ตาราง 4.2 ค่าร้อยละผลผลิตภายหลังการขัดสีของข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านกระบวนการแช่ข้าวที่อุณหภูมิและเวลาในแต่ละสิ่งทดลอง

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ปริมาณข้าวเหนียวเริ่มต้น (ข้าวเปลือก) (กิโลกรัม)	ร้อยละของเปลือกและรำข้าว	ร้อยละของข้าวเมล็ดหัก	ร้อยละของข้าวเมล็ดเต็ม
1	(1)	1.48	30.24	64.53	5.23
2	a	1.45	31.12	3.45	65.43
3	b	1.45	30.02	2.90	67.08
4	ab	1.46	31.55	13.66	54.79
5	-αa	1.43	30.95	62.16	6.89
6	+αa	1.48	31.42	14.53	54.05
7	-αb	1.47	30.89	63.08	6.03
8	+αb	1.48	31.55	3.04	65.41
9	Cp1	1.46	31.67	3.63	64.70
10	Cp2	1.44	31.29	3.82	64.89

หลังจากที่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ในแต่ละสิ่งทดลองได้ผ่านกระบวนการแช่ข้าวที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ กันแล้ว นำข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้ไปอบแห้งและพักไว้ 7 วัน แล้วทำการขัดสี ซึ่งในขั้นตอนการขัดสีนี้ได้ทำการวัดค่าปริมาณผลผลิตของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองโดยวัดในรูปของเปลือกและรำข้าว ข้าวสารเหนียวเมล็ดหัก และข้าวสารเหนียวเมล็ดเต็ม แสดงค่าเป็นค่าร้อยละดังตาราง 4.2 ซึ่งจากผลการวัดค่าปริมาณผลผลิตที่ได้พบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 จากการทดลองมีค่าร้อยละของเปลือกและรำข้าวเฉลี่ยเท่ากับ 31.07 นั่นคือ จะได้ผลผลิตเป็นข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เฉลี่ย (รวมข้าวสารเหนียวเมล็ดหักและเมล็ดเต็ม) ร้อยละ 68.93 เมื่อพิจารณาค่าร้อยละผลผลิตในแต่ละสิ่งทดลองพบว่า ในสิ่งทดลองที่ 1, 5 และ 7 จะมีค่าร้อยละของข้าวเมล็ดเต็มน้อยกว่าสิ่งทดลองอื่นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งในสิ่งทดลองที่ 1 และ 5 เป็นสิ่งทดลองที่ใช้อุณหภูมิในการแช่ข้าวที่ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส ส่วนในสิ่งทดลองที่ 7 เป็นสิ่งทดลองที่ใช้เวลาในการแช่ข้าวต่ำที่สุด คือ 1 ชั่วโมง จากข้อมูลดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าการใช้อุณหภูมิและเวลาที่ต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ในการแช่ข้าวในขั้นตอนของกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียว จะทำให้ได้ปริมาณข้าวสารเมล็ดหักมาก ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าวจึงควรเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาที่มากกว่า 60 องศาเซลเซียส และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ในกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.3 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านกระบวนการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวหลังผ่านกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	น้ำหนักข้าวเหนียวพาร์บอยล์เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังผ่านกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ (กิโลกรัม)	ปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (กิโลกรัม)
1	(1)	0.80	1.71	0.91
2	a	0.81	1.81	1.00
3	b	0.80	1.71	0.91
4	ab	0.81	1.80	0.99
5	$-\alpha$a	0.80	1.72	0.92
6	$+\alpha$a	0.82	2.01	1.19
7	$-\alpha$b	0.81	1.82	1.01
8	$+\alpha$b	0.80	1.61	0.81
9	Cp1	0.80	1.60	0.80
10	Cp2	0.80	1.60	0.80

ตาราง 4.3 แสดงปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังผ่านกระบวนการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวที่เหมาะสมในกระบวนการพาร์บอยล์และแช่สารละลายสารอาหารภายใต้กระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่า ปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวในช่วงที่ทำการศึกษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) กล่าวคือ ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองมีปริมาณการดูดซึมสารละลายที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงพิจารณาค่าเฉลี่ยของการดูดซึมสารละลาย พบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์มีค่าเฉลี่ยปริมาณการดูดซึมสารละลายเท่ากับ 0.93 ± 0.12 กิโลกรัม

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ (ค่าสีและค่าแรงเฉือน) ของข้าวเหนียวพาร์บอยล์แต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว แสดงผลดังตาราง 4.4 และ 4.5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.4 ค่าสีในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว (ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ค่าสี L	ค่าสี a	ค่าสี b
1	(1)	67.07±0.14	3.54±0.09	25.50±0.13
2	a	62.63±0.22	4.42±0.09	28.24±0.12
3	b	63.46±0.12	4.01±0.01	26.95±0.03
4	ab	58.36±0.33	4.63±0.02	27.61±0.05
5	-αa	63.16±0.17	3.78±0.06	25.34±0.23
6	+αa	55.47±0.07	4.90±0.01	25.30±0.08
7	-αb	65.62±0.04	3.93±0.03	25.75±0.15
8	+αb	61.33±0.12	4.70±0.02	27.52±0.03
9	Cp1	63.28±0.18	4.14±0.10	26.93±0.05
10	Cp2	63.48±0.06	4.18±0.05	26.50±0.05

ตาราง 4.5 ค่าสี และค่าแรงเฉือนในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว (ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ค่าแรงเฉือน (นิวตัน)	ค่าสี L	ค่าสี a	ค่าสี b
1	(1)	4.46±0.59	66.86±0.55	2.79±0.14	17.45±0.17
2	a	7.63±1.56	64.79±0.33	3.32±0.05	19.76±0.23
3	b	6.60±1.35	65.91±0.14	2.82±0.06	18.57±0.17
4	ab	5.70±0.34	62.66±0.17	3.66±0.08	19.35±0.23
5	-αa	5.84±1.03	66.30±0.14	2.79±0.10	17.77±0.19
6	+αa	4.27±0.51	62.73±0.34	3.40±0.06	19.47±0.22
7	-αb	3.35±0.68	66.82±0.03	2.82±0.04	17.49±0.07
8	+αb	4.45±0.44	64.12±0.19	3.48±0.04	18.95±0.16
9	Cp1	5.75±0.63	64.57±0.08	3.14±0.05	19.41±0.41
10	Cp2	5.10±0.60	66.09±0.03	2.66±0.01	18.71±0.13

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.4 และ 4.5 แสดงผลคุณภาพทางกายภาพของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังจากการผ่านกระบวนการการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าว โดยเมื่อพิจารณาค่าสีและค่าแรงเฉือนจากการใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่าในส่วนของค่าสี L และ a ของข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ ค่าสี L ของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังการทำให้สุก มีค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นั่นคือ อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าสีดังกล่าว ดังสมการต่อไปนี้

ค่าสี L (ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์) = $48.45 + 0.90(\text{อุณหภูมิ}) - 0.07(\text{เวลา}) - 8.76\times10^{-3}(\text{อุณหภูมิ})^2 + 1.83\times10^{-4}(\text{เวลา})^2 - 2.75\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา})$ $R^2 = 0.95$

ค่าสี a (ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์) = $2.20 + 0.01(\text{อุณหภูมิ}) + 7.30\times10^{-3}(\text{เวลา}) + 2.28\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})^2 + 1.84\times10^{-5}(\text{เวลา})^2 - 1.08\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา})$ $R^2 = 0.95$

ค่าสี L (ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก) = $63.38 + 0.20(\text{อุณหภูมิ}) - 2.16\times10^{-3}(\text{เวลา}) - 1.95\times10^{-3}(\text{อุณหภูมิ})^2 + 4.72\times10^{-4}(\text{เวลา})^2 - 4.92\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา})$ $R^2 = 0.94$

หมายเหตุ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
เวลา มีหน่วยเป็นนาที

ทั้งนี้ค่าอื่น ๆ นอกเหนือจากที่กล่าวข้างต้น อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะสีของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ระหว่างข้าวสารและข้าวสุก พบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกมีความขาวกว่าข้าวสาร สังเกตได้จากค่าเฉลี่ยสี L ที่เพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยสี a และ b มีค่าลดลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.6 ปริมาณธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน ในตัวอย่างข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว (ต่อ 100 กรัม)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	เหล็ก (มิลลิกรัม)	แคลเซียม (มิลลิกรัม)	ไอโอดีน (ไมโครกรัม)
1	(1)	5.05±0.07	133.53±11.23	26.48±0.90
2	a	4.02±0.22	100.85±2.76	26.23±0.99
3	b	4.16±0.21	130.73±4.10	33.40±1.61
4	ab	5.02±0.09	122.83±3.71	32.73±4.77
5	-αa	4.54±0.15	148.43±5.30	35.92±2.44
6	+αa	6.11±0.13	170.60±6.09	48.68±0.97
7	-αb	4.14±0.17	124.80±4.84	22.29±0.08
8	+αb	3.73±0.07	133.37±4.66	20.54±1.94
9	Cp1	4.03±0.03	139.27±6.27	25.05±3.72
10	Cp2	4.00±0.10	138.90±2.44	29.15±1.37

ตาราง 4.7 ปริมาณความชื้น โปรตีน และไฟเตท ในตัวอย่างข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว (ต่อ 100 กรัม)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ความชื้น (กรัม)	โปรตีน (กรัม)	ไฟเตท (มิลลิกรัม)
1	(1)	8.46±0.07	6.41±0.09	278.94±25.22
2	a	8.53±0.16	6.34±0.11	209.13±21.06
3	b	8.30±0.12	6.21±0.19	211.47±35.68
4	ab	9.94±0.06	6.70±0.25	248.53±8.84
5	-αa	9.07±0.03	6.71±0.45	311.14±16.66
6	+αa	9.38±0.03	6.84±0.30	301.88±7.78
7	-αb	9.03±0.26	6.60±0.23	301.20±26.58
8	+αb	8.45±0.06	6.42±0.79	158.03±11.89
9	Cp1	9.43±0.04	6.47±0.34	205.50±3.89
10	Cp2	8.05±0.04	6.71±0.70	199.26±19.33

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากตารางแสดงปริมาณธาตุเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ความชื้น โปรตีน และไฟเตทในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าว (ตาราง 4.6 ถึง 4.7) ซึ่งเป็นตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านกระบวนการเสริมธาตุอาหารคือธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน เมื่อพิจารณาปริมาณแร่ธาตุ ความชื้น โปรตีน และไฟเตท จากการใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่า ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์แต่ละสิ่งทดลองมีค่าปริมาณธาตุเหล็กและไอโอดีนที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นั่นคือ อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าปริมาณแร่ธาตุดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าปริมาณธาตุเหล็กและไอโอดีนได้ดังสมการต่อไปนี้

ปริมาณธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)

$$= 20.62 - 0.47(\text{อุณหภูมิ}) - 0.05(\text{เวลา}) + 3.31\times10^{-3}(\text{อุณหภูมิ})^2 + 7.87\times10^{-5}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา}) \qquad R^2 = 0.83$$

ปริมาณธาตุไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม)

$$= 104.24 - 4.44(\text{อุณหภูมิ}) + 0.79(\text{เวลา}) + 0.04(\text{อุณหภูมิ})^2 - 2.92\times10^{-3}(\text{เวลา})^2 - 1.75\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา}) \qquad R^2 = 0.94$$

หมายเหตุ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
เวลา มีหน่วยเป็นนาที

ส่วนธาตุแคลเซียม ความชื้น โปรตีน และไฟเตท อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.8 ค่าคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว (ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก) โดยแบบประเมินความชอบ 7-Point hedonic scale

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ความชอบโดยรวม	ลักษณะของเมล็ดข้าว	สี	กลิ่น	รสชาติ
1	(1)	3.75±1.25	2.70±1.34	4.50±1.10	4.80±1.24	4.40±1.27
2	a	6.15±0.93	6.55±0.60	4.95±1.10	4.80±0.95	5.50±0.89
3	b	6.25±0.97	5.80±1.01	5.25±0.91	5.15±0.93	4.90±1.07
4	ab	4.90±1.17	5.55±1.32	4.45±1.28	4.90±1.02	4.95±1.36
5	-αa	4.30±1.17	3.00±1.17	4.40±1.27	4.55±1.05	4.25±1.33
6	+αa	4.90±1.12	5.00±1.03	4.10±1.21	4.60±1.05	4.30±1.08
7	-αb	4.10±1.48	2.85±1.04	4.75±1.29	4.85±0.93	4.80±1.06
8	+αb	5.50±1.15	6.15±0.93	4.75±1.07	4.90±0.79	5.05±1.10
9	Cp1	5.60±0.99	5.80±1.11	5.10±1.25	5.00±1.17	5.15±1.31
10	Cp2	5.00±1.08	4.70±1.13	5.05±1.19	5.20±1.15	5.20±1.44

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ลักษณะเนื้อสัมผัส	ความนุ่ม	ความเหนียว	ความรู้สึกหลังกลืน
1	(1)	3.60±1.10	4.95±1.32	3.70±1.38	4.25±1.62
2	a	5.50±1.10	5.65±0.99	5.00±1.26	5.45±0.83
3	b	5.15±0.99	5.65±1.04	5.25±1.12	5.25±0.85
4	ab	5.10±1.21	5.65±1.14	5.20±1.28	4.75±1.16
5	-αa	4.35±1.18	4.85±1.23	3.90±1.48	4.15±1.04
6	+αa	5.10±1.41	5.20±1.67	4.60±1.64	4.80±1.20
7	-αb	4.30±1.42	4.85±1.66	4.40±1.73	4.90±1.02
8	+αb	5.70±1.22	5.40±1.54	5.35±1.35	5.35±1.04
9	Cp1	5.45±1.28	5.70±1.34	5.45±1.36	5.60±1.23
10	Cp2	4.95±1.05	5.30±1.38	4.85±1.23	5.25±1.12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.8 แสดงค่าคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภคในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวที่ผ่านการทำให้สุกแล้ว เมื่อพิจารณาค่าคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะจากการใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่า ค่าคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะเนื้อสัมผัส ความเหนียว และความรู้สึกหลังกลืนของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังการทำให้สุก มีค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นั่นคือ อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าคะแนนความชอบในคุณลักษณะดังกล่าว โดยสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าคะแนนความชอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสได้ดังสมการคะแนนความชอบต่อไปนี้

คะแนนความชอบด้านลักษณะเนื้อสัมผัส $= -8.54 + 0.27(\text{อุณหภูมิ}) + 0.07(\text{เวลา}) - 1.22\times10^{-3}(\text{อุณหภูมิ})^2 - 5.90\times10^{-5}(\text{เวลา})^2 - 8.12\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา})$ $R^2 = 0.92$

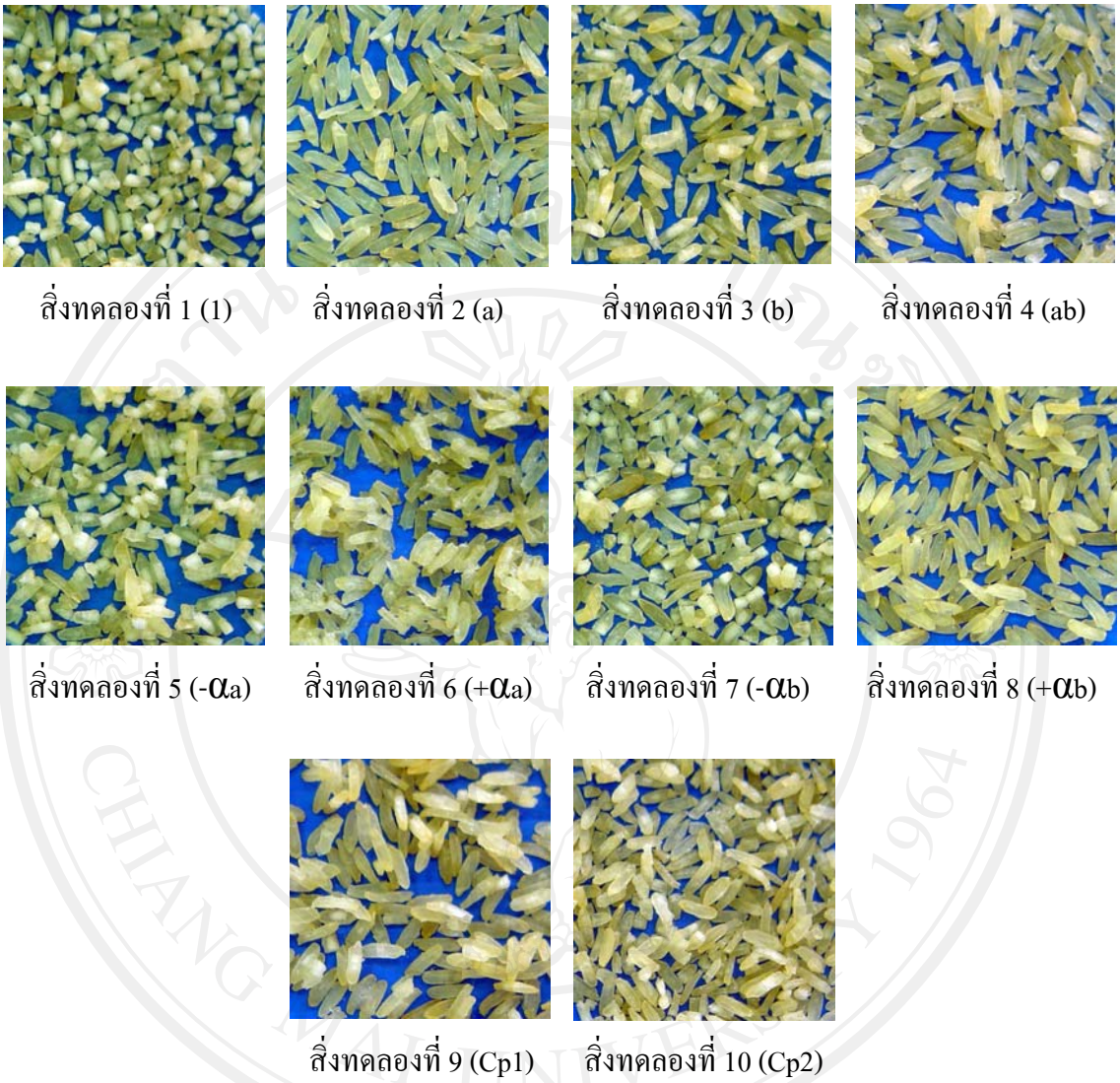
คะแนนความชอบด้านความเหนียว $= -8.92 + 0.32(\text{อุณหภูมิ}) + 0.05(\text{เวลา}) - 1.97\times10^{-3}(\text{อุณหภูมิ})^2 - 4.51\times10^{-5}(\text{เวลา})^2 - 5.63\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา})$ $R^2 = 0.91$

คะแนนความชอบด้านความรู้สึกหลังกลืน $= -9.80 + 0.37(\text{อุณหภูมิ}) + 0.06(\text{เวลา}) - 2.22\times10^{-3}(\text{อุณหภูมิ})^2 - 6.60\times10^{-5}(\text{เวลา})^2 - 7.08\times10^{-4}(\text{อุณหภูมิ})(\text{เวลา})$ $R^2 = 0.95$

หมายเหตุ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
เวลา มีหน่วยเป็นนาที

ส่วนค่าคะแนนความชอบในคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสอื่น ๆ อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

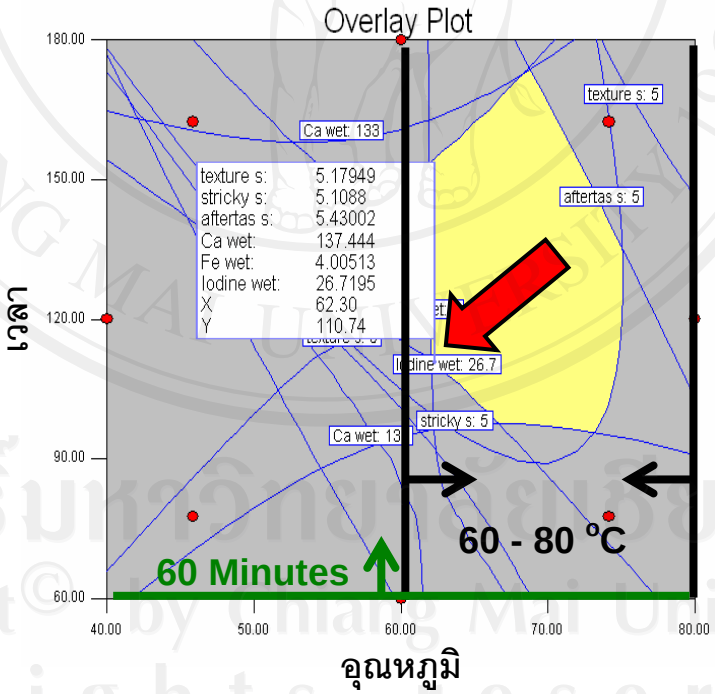


ภาพ 4.9 ลักษณะของข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการทดลองที่ 2.1

ภาพ 4.9 แสดงลักษณะของข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้จากการทดลองพบว่า ข้าวเหนียวที่ผ่านการพาร์บอยล์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส (สิ่งทดลองที่ 1, 3 และ 5) หรือผ่านการแช่ที่เวลาต่ำกว่า 60 นาที (สิ่งทดลองที่ 7) ลักษณะเมล็ดข้าวที่ได้จะหักและแตกเป็นส่วนใหญ่ ได้ข้าวสารเมล็ดเต็มค่อนข้างน้อย (เพียงร้อยละ 5 ถึง 6) ซึ่งส่งผลให้ข้าวมีมูลค่าลดลงเนื่องจากข้าวเมล็ดหักตามท้องตลาดจะมีราคาที่ถูกกว่าข้าวเมล็ดเต็ม และหากใช้อุณหภูมิในการพาร์บอยล์ที่สูงกว่าหรือเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส (สิ่งทดลองที่ 6) จะส่งผลทำให้ข้าวจะสุกจนเกินไป ทำให้จับตัวกันเป็นก้อนเมื่อผ่านการแช่สารละลายสารอาหาร ซึ่งส่งผลให้ลักษณะเมล็ดข้าวที่ได้ไม่สวยงาม นอกจากนี้ยังอาจส่งผลต่อการยอมรับและการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภคอีกด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการทดลองที่ได้กล่าวมาในข้างต้น (ตาราง 4.2 ถึง 4.8 และภาพ 4.9) นำมาผ่านการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม Design-Expert แล้วคัดเลือกเฉพาะค่าตอบสนองที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เพื่อนำไปทำการหาสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) สำหรับกระบวนการพาร์บอยล์โดยวิธีการสร้างพื้นที่ตอบสนอง (Response surface methodology) ของค่าตอบสนองที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในแผนการทดลองตอนนี้ได้แก่ ปริมาณธาตุเหล็ก ปริมาณธาตุไอโอดีน ความชอบทางด้านลักษณะเนื้อสัมผัส ความนุ่ม และความเหนียว สำหรับค่าที่ใช้กำหนดระดับในการหาสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดเป็นดังนี้ ช่วงอุณหภูมิมีค่าระหว่าง 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส เวลาในการแช่ข้าวมากกว่า 60 นาที ปริมาณธาตุเหล็กมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4 มิลลิกรัม ปริมาณธาตุไอโอดีนมากกว่าหรือเท่ากับ 26.76 ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ (เทียบเท่าปริมาณร้อยละ 35 ของความต้องการต่อวันของแต่ละธาตุอาหาร) ส่วนผลการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสจะกำหนดที่ระดับคะแนนมากกว่าหรือเท่ากับ 5 ผลการหาสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดโดยวิธีการสร้างพื้นที่ตอบสนองแสดงดังภาพ 4.10



ภาพ 4.10 กระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวในกระบวนการพาร์บอยล์ของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในการหาสภาวะของกระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) ได้ทำการคัดเลือกสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียว (ดังศรสีแดงชี้) คือ ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 110 นาที โดยนำสภาวะการผลิตนี้ไปใช้ในการทดลองการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในขั้นตอนกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศต่อไป

สภาวะของกระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) ที่เลือกนำมาใช้การศึกษานั้น สามารถทำนายค่าตอบสนองต่าง ๆ จากโปรแกรมทางสถิติ Design-Expert ได้ดังนี้ คือ ปริมาณเหล็กและแคลเซียมเท่ากับ 4.00 และ 137.30 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณไอโอดีนเท่ากับ 26.75 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณความชื้นและโปรตีนเท่ากับ 8.75 และ 6.59 กรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณไฟเตทเท่ากับ 208.68 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม คุณภาพทางด้านกายภาพ คือ ในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ มีค่าสี L, a และ b เท่ากับ 63.60, 4.17 และ 26.70 ตามลำดับ ส่วนในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก มีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 5.39 นิวตัน ค่าสี L, a และ b เท่ากับ 65.36, 2.91 และ 19.07 ตามลำดับ ส่วนคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสจากการประเมินโดยผู้บริโภคในด้านความชอบรวม ลักษณะเมล็ดข้าว สีเมล็ดข้าว กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส ความนุ่ม ความเหนียว และความรู้สึกหลังกลืน มีค่าคะแนนเท่ากับ 5.26, 5.18, 5.05, 5.08, 5.19, 5.16, 5.48, 5.10 และ 5.42 ตามลำดับ (จากคะแนนเต็มเท่ากับ 7)

เนื่องจากในการทดลองได้ใช้น้ำบริโภคในการเตรียมสารละลายสารอาหารจึงได้ทำการตรวจวัดหาปริมาณแร่ธาตุในน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายด้วย ซึ่งแสดงผลไว้ดังตาราง 4.9

ตาราง 4.9 ปริมาณแร่ธาตุในน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายสารอาหาร

ชนิดแร่ธาตุ	ปริมาณในน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลายสารอาหาร
เหล็ก (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.01±0.01
แคลเซียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.43±0.18
ไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อลิตร)	1.07±0.29

ผลการตรวจวัดปริมาณแร่ธาตุในน้ำที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย พบว่า ปริมาณแร่ธาตุแต่ละชนิดคือ ธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน มีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปว่าไม่น่าจะมีผลกระทบในการทดลองการเสริมสารอาหารในข้าวเหนียวพาร์บอยล์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงผลความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศที่มีต่อความสามารถในการดูดซึมสารอาหารของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ คือ ธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน ผลความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศในแต่ละสิ่งทดลองแสดงดังตาราง 4.10 ถึง 4.15 ตามลำดับ

การทดลองที่ 2.1 จะได้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียว โดยใช้สภาวะนี้ในการเตรียมตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ไว้ใช้ให้เพียงพอสำหรับการทดลองที่ 2.2 และ 2.3 โดยนำข้าวที่ผ่านกระบวนการพาร์บอยล์ที่เหมาะสมไปอบแห้ง พักไว้เป็นเวลา 7 วัน แล้วทำการขัดสี ซึ่งในขั้นตอนการขัดสีนี้ได้ทำการวัดค่าปริมาณผลผลิตของข้าวเหนียวพาร์บอยล์เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.1 โดยวัดในรูปของเปลือกและรำข้าว ข้าวสารเหนียวเมล็ดหักและข้าวสารเหนียวเมล็ดเต็ม ผลที่ได้พบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 จากการทดลองมีค่าร้อยละของเปลือกและรำข้าวเฉลี่ยเท่ากับ 28.93 ค่าร้อยละของข้าวสารเหนียวเมล็ดหักเท่ากับ 2.32 และค่าร้อยละของข้าวสารเหนียวเมล็ดเต็มเท่ากับ 68.75 มีค่าผลผลิตเป็นข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เฉลี่ย (รวมข้าวสารเหนียวเมล็ดหักและเมล็ดเต็ม) เท่ากับร้อยละ 71.07 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีมากกว่าค่าผลผลิตข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เฉลี่ยจากการทดลองที่ 2.1 เล็กน้อย และผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้อุณหภูมิและเวลาในกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียวจากการทดลองที่ 2.1 เป็นสภาวะที่เหมาะสม มีค่าร้อยละของข้าวสารเหนียวเมล็ดหักค่อนข้างน้อย

ผลของปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังจากผ่านกระบวนการการศึกษาผลความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศแสดงดังตาราง 4.10

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.10 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านกระบวนการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวหลังผ่านกระบวนการแทรกซึมภายสุญญากาศ

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	น้ำหนักข้าวเหนียวพาร์บอยล์เริ่มต้น (กิโลกรัม)	น้ำหนักข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังผ่านกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ (กิโลกรัม)	ปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (กิโลกรัม)
1	(1)	0.80	1.70	0.90
2	a	0.80	1.71	0.91
3	b	0.82	1.64	0.82
4	ab	0.81	1.72	0.91
5	$-\alpha$a	0.80	1.61	0.81
6	$+\alpha$a	0.80	1.82	1.02
7	$-\alpha$b	0.81	1.82	1.01
8	$+\alpha$b	0.80	1.42	0.62
9	Cp1	0.80	1.71	0.91
10	Cp2	0.81	1.71	0.90

ตาราง 4.10 แสดงปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังผ่านกระบวนการศึกษาผลความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ เมื่อพิจารณาปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่า ปริมาณการดูดซึมสารละลายของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ไม่มีความสัมพันธ์กับความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในช่วงที่ทำการศึกษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) กล่าวคือ ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองมีปริมาณการดูดซึมสารละลายที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงพิจารณาค่าเฉลี่ยของการดูดซึมสารละลาย โดยพบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์มีค่าเฉลี่ยปริมาณการดูดซึมสารละลายเท่ากับ 0.88±0.11 กิโลกรัม

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ (ค่าสีและค่าแรงเฉือน) ของข้าวเหนียวพาร์บอยล์แต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวเหนียว แสดงผลดังตาราง 4.11 และ 4.12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.11 ค่าสีในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ค่าสี L	ค่าสี a	ค่าสี b
1	(1)	61.78±0.18	4.31±0.07	27.64±0.07
2	a	62.95±0.10	4.55±0.04	27.86±0.02
3	b	62.88±0.02	4.27±0.08	27.10±0.10
4	ab	61.24±0.08	4.24±0.01	26.86±0.02
5	-αa	63.31±0.10	4.35±0.01	27.39±0.04
6	+αa	63.40±0.25	4.43±0.06	27.34±0.03
7	-αb	63.44±0.10	4.29±0.05	27.62±0.08
8	+αb	61.87±0.04	4.42±0.03	27.15±0.10
9	Cp1	61.68±0.28	4.42±0.07	27.17±0.08
10	Cp2	62.73±0.07	4.43±0.07	27.38±0.14

ตาราง 4.12 ค่าสี และค่าแรงเฉือนในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ค่าแรงเฉือน (นิวตัน)	ค่าสี L	ค่าสี a	ค่าสี b
1	(1)	8.38±1.36	65.23±0.06	3.35±0.11	20.14±0.39
2	a	5.95±0.75	65.60±0.16	3.22±0.14	19.33±0.14
3	b	6.59±0.87	65.91±0.06	3.08±0.09	18.81±0.18
4	ab	7.16±0.25	64.87±0.31	3.35±0.10	19.18±0.32
5	-αa	7.72±1.51	65.32±0.21	3.25±0.05	20.09±0.30
6	+αa	9.35±1.16	65.04±0.12	3.00±0.04	21.06±0.16
7	-αb	11.75±1.76	64.51±0.31	3.29±0.17	21.95±0.50
8	+αb	8.02±1.07	64.86±0.06	3.12±0.08	20.44±0.12
9	Cp1	12.62±2.42	64.80±0.15	3.51±0.10	20.68±0.12
10	Cp2	9.02±1.08	65.05±0.11	3.07±0.05	19.92±0.35

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.11 และ 4.12 แสดงผลคุณภาพทางกายภาพของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังจากการผ่านกระบวนการศึกษาผลความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ โดยเมื่อพิจารณาค่าสีและค่าแรงเฉือนจากการใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่า ความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ภายในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) และเมื่อพิจารณาลักษณะสีของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ระหว่างข้าวสารและข้าวสุก พบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกมีสีขาวกว่าข้าวสาร สังเกตได้จากค่าเฉลี่ยสี L ที่เพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยสี a และ b มีค่าลดลง

ตาราง 4.13 ปริมาณธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีนในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ต่อ 100 กรัม)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	เหล็ก (มิลลิกรัม)	แคลเซียม (มิลลิกรัม)	ไอโอดีน (ไมโครกรัม)
1	(1)	2.69±0.05	109.33±0.58	23.07±3.84
2	a	2.94±0.16	119.00±1.41	24.96±3.01
3	b	3.09±0.11	137.33±9.61	27.87±3.05
4	ab	3.12±0.06	143.33±2.08	31.61±3.07
5	$-\alpha$a	2.94±0.11	129.33±1.53	29.44±2.89
6	$+\alpha$a	2.92±0.09	129.67±4.04	26.77±0.93
7	$-\alpha$b	2.73±0.13	95.67±7.37	24.47±1.05
8	$+\alpha$b	3.22±0.15	150.00±4.36	35.90±1.70
9	Cp1	2.75±0.16	120.33±1.53	25.72±4.64
10	Cp2	2.78±0.10	134.00±3.61	23.18±0.66

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.14 ปริมาณความชื้น โปรตีน และไฟเตทในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ต่อ 100 กรัม)

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ความชื้น (กรัม)	โปรตีน (กรัม)	ไฟเตท (มิลลิกรัม)
1	(1)	6.65±0.07	6.52±0.09	222.16±12.69
2	a	7.12±0.04	6.43±0.26	214.40±23.88
3	b	6.49±0.06	6.94±0.24	198.70±14.08
4	ab	6.87±0.16	6.53±0.49	198.05±14.20
5	$-\alpha$a	6.94±0.10	6.63±0.27	219.55±17.74
6	$+\alpha$a	6.24±0.21	6.51±0.15	191.11±17.52
7	$-\alpha$b	6.37±0.99	6.52±0.06	188.41±2.62
8	$+\alpha$b	7.44±0.09	6.49±0.25	156.04±0.74
9	Cp1	8.07±0.01	6.58±1.22	167.14±4.36
10	Cp2	8.29±0.08	6.47±0.17	156.82±25.16

จากตารางแสดงปริมาณธาตุเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ความชื้น โปรตีน และไฟเตทในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในการศึกษาผลความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ตาราง 4.13 ถึง 4.14) ซึ่งเป็นตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านกระบวนการเสริมธาตุอาหารคือธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณแร่ธาตุ ความชื้น โปรตีน และไฟเตท โดยการใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้น พบว่า ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์แต่ละสิ่งทดลองมีค่าปริมาณธาตุเหล็กและแคลเซียมที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นั่นคือ ความเป็นสุญญากาศและเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ภายในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อปริมาณแร่ธาตุดังกล่าว ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าปริมาณธาตุเหล็กและแคลเซียมได้ดังสมการต่อไปนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ปริมาณ = 3.86 – 0.63(ความเป็นสุญญากาศ) – 0.09(เวลา) + 1.89(ความเป็นสุญญากาศ)^2
ธาตุเหล็ก + 2.14x10^{-3}(เวลา)^2 – 0.04 (ความเป็นสุญญากาศ)(เวลา) R^2= 0.95

(มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)

ปริมาณ = 18.61 – 4.08(ความเป็นสุญญากาศ) + 4.86(เวลา) + 31.94(ความเป็นสุญญากาศ)^2
ธาตุแคลเซียม – 0.04(เวลา)^2 – 0.61(ความเป็นสุญญากาศ)(เวลา) R^2= 0.92

(มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)

หมายเหตุ ความเป็นสุญญากาศ มีหน่วยเป็นบาร์ และแทนค่าโดยไม่คิดเครื่องหมายลบ (–)
เวลา มีหน่วยเป็นนาที

ส่วนธาตุไอโอดีน ความชื้น โปรตีน และไฟเตท อุณหภูมิและเวลาในการแช่ข้าวภายในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.15 ค่าคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก) โดยแบบประเมินความชอบ 7-Point hedonic scale

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ความชอบโดยรวม	ลักษณะของเมล็ดข้าว	สี	กลิ่น	รสชาติ
1	(1)	5.35±0.99	6.15±0.67	5.45±0.94	5.30±1.13	5.25±1.21
2	a	5.20±1.28	6.05±0.60	5.50±1.05	5.40±0.99	5.15±1.04
3	b	5.25±1.33	5.50±0.95	5.40±0.94	5.05±0.60	4.70±0.92
4	ab	5.20±0.89	5.45±0.94	5.20±1.01	5.05±0.76	5.15±1.04
5	-αa	5.20±0.89	5.60±0.82	4.85±0.93	5.15±0.67	4.80±0.77
6	+αa	5.70±0.98	5.80±0.83	5.25±1.16	5.00±0.97	5.10±0.91
7	-αb	5.45±1.00	6.25±0.85	5.35±1.35	5.35±1.90	5.00±0.73
8	+αb	4.90±0.97	5.30±1.03	5.30±1.22	5.00±1.21	4.55±0.83
9	Cp1	4.95±0.69	5.50±1.00	4.95±1.36	4.45±1.15	4.85±1.27
10	Cp2	5.40±1.35	5.55±1.28	5.35±1.46	5.05±1.28	4.80±1.20

สิ่งทดลอง	รหัสปัจจัย	ลักษณะเนื้อสัมผัส	ความนุ่ม	ความเหนียว	ความรู้สึกหลังกลืน
1	(1)	5.30±1.22	5.60±0.94	5.05±0.94	5.30±1.08
2	a	5.15±1.23	5.30±1.49	5.15±1.57	5.25±0.97
3	b	5.05±1.36	5.20±1.51	4.85±1.46	5.20±1.24
4	ab	5.10±1.21	5.15±0.99	4.90±1.07	5.20±0.89
5	-αa	5.30±1.17	5.30±1.22	5.10±1.12	5.15±0.99
6	+αa	5.60±0.88	5.85±0.99	5.35±1.23	5.35±0.99
7	-αb	5.55±1.10	5.45±1.10	5.65±1.31	5.35±0.88
8	+αb	4.85±0.75	5.20±0.95	4.70±1.34	4.70±1.17
9	Cp1	5.30±0.80	5.65±1.31	5.15±1.14	4.80±1.24
10	Cp2	5.35±1.09	5.75±0.91	5.30±1.26	5.20±1.11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.15 แสดงค่าคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภคในตัวอย่างข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาที่เหมาะสมในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ซึ่งผ่านการทำให้สุกแล้ว เมื่อพิจารณาค่าคะแนนความชอบในแต่ละคุณลักษณะโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Design-Expert วิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงเส้นพบว่า ค่าคะแนนความชอบจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณของเมล็ดข้าวของข้าวเหนียวพาร์บอยล์หลังการทำให้สุก มีค่าที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นั่นคือความเป็นสุญญากาศและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ภายในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อค่าคะแนนความชอบในคุณลักษณะดังกล่าว โดยสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อค่าคะแนนความชอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสได้ดังสมการคะแนนความชอบต่อไปนี้

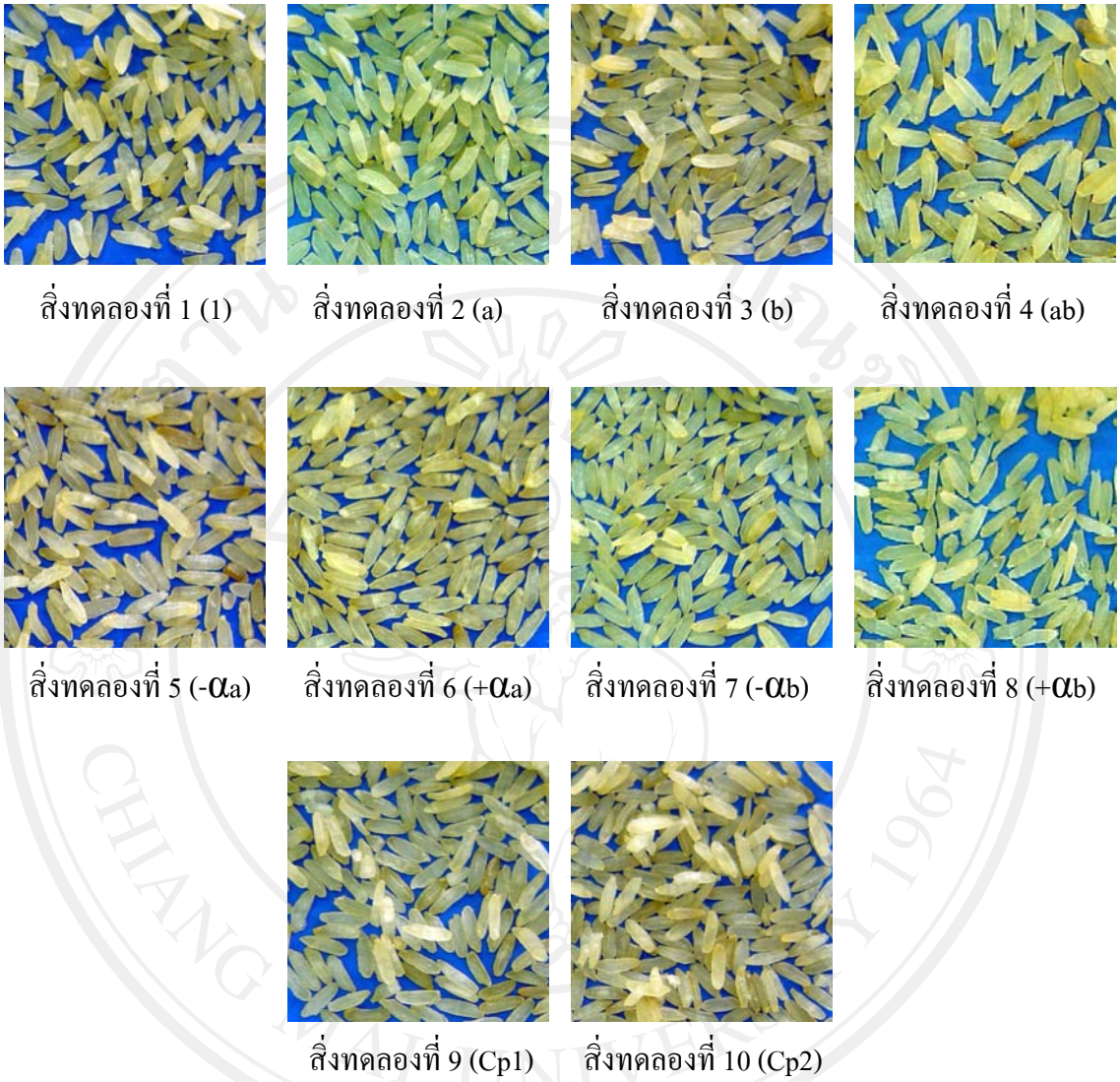
คะแนนความชอบด้านลักษณะของเมล็ดข้าว

$$= 10.01 - 2.39(\text{ความเป็นสุญญากาศ}) - 0.22(\text{เวลา}) + 2.22(\text{ความเป็นสุญญากาศ})^2 + 2.75\times10^{-3}(\text{เวลา})^2 + 8.33\times10^{-3}(\text{ความเป็นสุญญากาศ})(\text{เวลา}) \qquad R^2 = 0.97$$

หมายเหตุ ความเป็นสุญญากาศ มีหน่วยเป็นบาร์ และแทนค่าโดยไม่คิดเครื่องหมายลบ (–)
เวลา มีหน่วยเป็นนาที

ส่วนค่าคะแนนความชอบในคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสอื่น ๆ ความเป็นสุญญากาศและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ภายในช่วงที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

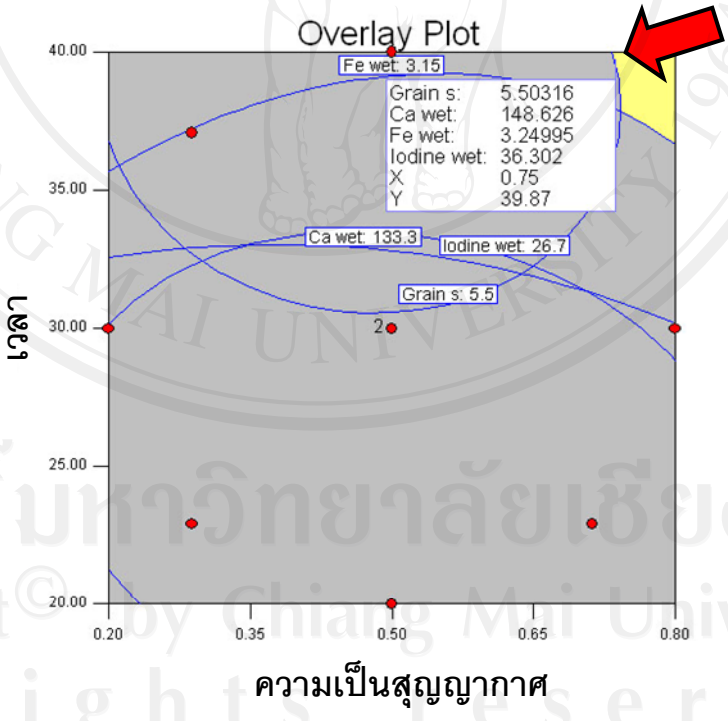


ภาพ 4.11 ลักษณะของข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในแต่ละสิ่งทดลองจากการทดลองที่ 2.2

ภาพ 4.11 แสดงลักษณะของข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้จากการทดลองที่ 2.2 ซึ่งเป็นข้าวเหนียวซึ่งผ่านสภาวะการนำสภาพพาร์บอยล์ที่ได้จากการทดลอง 2.1 แล้วนำไปผ่านกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศในแต่ละสิ่งทดลอง พบว่า ลักษณะเมล็ดข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน โดยเมล็ดข้าวจะไม่เกาะติดกันเป็นก้อน มีความร่วน และยังคงรูปร่างของเมล็ดข้าวได้โดยพบเมล็ดที่เละหรือบิดเบี้ยวน้อยมาก และยังมีปริมาณข้าวเมล็ดหักน้อยซึ่งเป็นผลจากการใช้สภาวะกระบวนการพาร์บอยล์ที่เหมาะสม และการที่เมล็ดข้าวที่ได้มีความคงรูปร่างของเมล็ดข้าวไว้ได้โดยไม่เกาะติดกันเป็นก้อน จึงน่าจะส่งผลดีต่อการยอมรับของผู้บริโภคได้ส่วนหนึ่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น (ตาราง 4.10 ถึง 4.15 และภาพ 4.11) โดยผ่านการวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม Design-Expert แล้วคัดเลือกเฉพาะค่าตอบสนองที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นำไปทำการหาสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) สำหรับกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศโดยวิธีการสร้างพื้นที่ตอบสนอง (Response surface methodology) ค่าตอบสนองที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในแผนการทดลองนี้ ได้แก่ ปริมาณธาตุเหล็ก ปริมาณธาตุแคลเซียม และความชอบทางด้านลักษณะเมล็ดข้าว สำหรับค่าที่ใช้กำหนดระดับในการหาสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดเป็นดังนี้ ปริมาณธาตุเหล็กใช้ค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3.15 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ ปริมาณธาตุแคลเซียมมากกว่าหรือเท่ากับ 133.3 ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ (เทียบเท่าปริมาณร้อยละ 35 ของความต้องการต่อวันเฉพาะธาตุแคลเซียม) ส่วนผลการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสจะกำหนดที่ระดับคะแนนมากกว่าหรือเท่ากับ 5.5 ผลการหาสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดโดยวิธีการสร้างพื้นที่ตอบสนองแสดงดังภาพ 4.12



ภาพ 4.12 กระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) สำหรับการศึกษาผลของความเป็นสุญญากาศและเวลาในการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศของข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในการหาสภาวะของกระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) ได้ทำการคัดเลือกสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศกับข้าวเหนียวพาร์บอยล์ (ดังศรสีแดงชี้) คือ ความเป็นสุญญากาศที่ -0.75 บาร์ เป็นเวลานาน 40 นาที โดยจะนำสภาวะนี้ไปใช้ในการทดลองที่ 2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการพาร์บอยล์และกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศที่เหมาะสมในการเสริมกรดอะมิโนกับข้าวเหนียวพาร์บอยล์ต่อไป

สภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุด (Optimization) ที่ได้เลือกนำมาใช้การศึกษานั้น สามารถทำนายค่าตอบสนองต่าง ๆ จากโปรแกรมทางสถิติ Design-Expert ได้ดังนี้ คือ ปริมาณเหล็กและแคลเซียมเท่ากับ 3.25 และ 148.63 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณไอโอดีนเท่ากับ 35.05 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ปริมาณความชื้นและโปรตีนเท่ากับ 8.24 และ 6.45 กรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณไฟเตทเท่ากับ 196.02 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม คุณภาพทางด้านกายภาพ คือ ในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ มีค่าสี L, a และ b เท่ากับ 61.24, 4.25 และ 26.89 ตามลำดับ ส่วนในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก มีค่าแรงเฉือนเท่ากับ 7.18 นิวตัน ค่าสี L, a และ b เท่ากับ 64.66, 3.23 และ 20.08 ตามลำดับ ส่วนคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสจากการประเมินโดยผู้บริโภคในด้านความชอบรวม ลักษณะเมล็ดข้าว สีเมล็ดข้าว กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส ความนุ่ม ความเหนียว และความรู้สึกหลังกลืน มีค่าคะแนนเท่ากับ 5.29, 5.51, 5.27, 5.14, 5.15, 5.10, 5.23, 4.80 และ 5.15 ตามลำดับ (จากคะแนนเต็มเท่ากับ 7)

ผลการทดลองที่ 2.2 จะสังเกตว่าค่าปริมาณธาตุเหล็กที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่างข้าวสารพาร์บอยล์มีค่าน้อยลงจากการทดลองที่ 2.1 โดยมีค่าเฉลี่ยปริมาณธาตุเหล็กเท่ากับ 2.92 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการคือ 4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (ร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน) ในขณะที่ค่าปริมาณธาตุแคลเซียมและไอโอดีนมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ ซึ่งจะมีค่ามากขึ้นน้อยลงในแต่ละสิ่งทดลองตามปกติ สำหรับในกรณีของปริมาณธาตุเหล็กจะพบว่าค่าที่ได้จะมีการเบี่ยงเบนในทำนองเดียวกัน แต่เมื่อสังเกตปริมาณที่วิเคราะห์ได้จะน้อยกว่าปริมาณที่ได้เสริมเข้าไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองนี้เป็นการทดลองที่ได้ทำการผันแปรสภาวะความเป็นสุญญากาศและเวลาในการแช่ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ จึงส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนสารระหว่างภายในเมล็ดข้าวและสารละลายที่แช่ข้าว โดยการแช่ข้าวภายใต้ระบบการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศจะทำให้สารอาหารในสารละลายแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวซึ่งจะไปแทนที่น้ำและอากาศ เมื่อพิจารณาถึงสารประกอบที่เป็นแหล่งของสารอาหารแต่ละชนิดคือ ธาตุเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน พบว่า สารประกอบโซเดียมไอร์รอนอีดีทีเอที่เป็นแหล่งของธาตุเหล็กจะมีค่ามวลโมเลกุลที่สูงที่สุดและยังมีค่าการละลายน้อยที่สุดเมื่อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เปรียบเทียบกับสารประกอบแคลเซียมแลคเตท กลูโคเนทและสารประกอบโพแทสเซียมไอโอเดต ซึ่งเป็นแหล่งของธาตุแคลเซียมและไอโอดีนตามลำดับ จากการที่สารประกอบโซเดียมไอร์รอนอีดีทีเอมีมวลโมเลกุลที่มากกว่า น่าจะส่งผลให้ความสามารถในการแทรกตัวเข้าไปสู่รูพรุนของเมล็ดข้าวมีน้อยกว่าสารประกอบแคลเซียมแลคเตท กลูโคเนทและสารประกอบโพแทสเซียมไอโอเดตซึ่งมีมวลโมเลกุลน้อยกว่า และการที่สารประกอบทั้งสองชนิดนี้มีค่าการละลายมากกว่าน่าจะส่งผลให้โมเลกุลมีการแตกตัวในน้ำและสามารถกระจายตัวในน้ำได้ดี ทำให้สามารถแทรกเข้าไปตามรูพรุนของเมล็ดข้าวได้ในสัดส่วนที่มากกว่าสารประกอบโซเดียมไอร์รอนอีดีทีเอ และส่งผลให้สารประกอบโซเดียมไอร์รอนอีดีทีเอแทรกตัวเข้าไปในสัดส่วนที่น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2.1 ซึ่งควบคุมสภาวะการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศไว้คงที่ นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยปริมาณการดูดซึมสารละลายในการทดลองนี้ก็ลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองที่ 2.1 ซึ่งจะส่งผลให้สารอาหารต่าง ๆ แทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวได้น้อยลงตามไปด้วย จากเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถกล่าวได้ว่าการผันแปรระดับความเป็นสุญญากาศและเวลาในการแช่ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศจะส่งผลต่อปริมาณธาตุเหล็กในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์มากกว่าธาตุแคลเซียมและไอโอดีน และการผันแปรดังกล่าวยังส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารมากกว่าขั้นตอนการศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการพาร์บอยล์ข้าวเหนียว (การทดลองที่ 2.1) อีกด้วย นอกจากนี้ความคลาดเคลื่อนในการทดลองก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่อาจจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลองดังกล่าวได้เช่นกัน

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาสำหรับกรณีที่ปริมาณธาตุเหล็กเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้ (2.92 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) มีค่าน้อยกว่าปริมาณที่ต้องการในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ (4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 25 จึงได้ทำการคำนวณปริมาณธาตุเหล็กที่จะเสริมในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ใหม่ โดยจะเสริมเพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับปริมาณเดิม (จากการทดลองที่ 2.1) เพื่อเป็นการทดแทนปริมาณธาตุเหล็กที่ลดลงและเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์มีค่าปริมาณธาตุเหล็กตามเป้าหมายที่กำหนดไว้คือ 4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม การคำนวณปริมาณธาตุเหล็กที่ต้องการจะเสริมในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในรูปของสารละลายสารอาหารแสดงดังภาคผนวก ข-2 ส่วนปริมาณธาตุแคลเซียมและไอโอดีนจะยังคงใช้ปริมาณเท่าเดิมตามการทดลองที่ 2.1

นอกจากนี้ เมื่อนำเอาข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์จากสภาวะกระบวนการผลิตที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 ที่ยังไม่ได้เสริมสารอาหารไปตรวจวัดค่าปริมาณกรดอะมิโนในข้าวตามวิธีของ AOAC (2005) พบว่า ในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์มีปริมาณกรดอะมิโนไลซีนเท่ากับ 153.22±12.90 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และมีปริมาณกรดอะมิโนทรีโอนีนเท่ากับ 36.95±2.26 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (จากการตรวจวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการกลางตรวจสอบผลิตภัณฑ์เกษตร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

และอาหาร (LCFA) สำนักงานสาขาเชียงใหม่) ซึ่งจากค่าปริมาณกรดอะมิโนที่วิเคราะห์ได้ทำให้ทราบว่าตัวอย่างข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีปริมาณกรดอะมิโนแล้วส่วนหนึ่ง ดังนั้นจึงได้ทำการคำนวณปริมาณกรดอะมิโนที่จะเสริมในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ในรูปของสารละลายสารอาหารใหม่แสดงดังภาคผนวก ข-2

การทดลองที่ 2.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการพาร์บอยล์และกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศที่เหมาะสมในการเสริมกรดอะมิโนในข้าวเหนียวพาร์บอยล์

การทดลองที่ 2.1 และ 2.2 นั้นทำให้ทราบถึงกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมคุณค่าทางโภชนาการ โดยในกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียวได้เลือกใช้อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการแช่ข้าวนาน 110 นาที ส่วนในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศสำหรับข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ ได้เลือกใช้ระดับความเป็นสุญญากาศที่ -0.75 บาร์ และใช้เวลาในการแช่ข้าวนาน 40 นาที จากสภาวะดังกล่าวได้นำมาประยุกต์เสริมสารอาหารเพิ่มอีก 2 ชนิด คือ กรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีน ซึ่งจะทำการเสริมในรูปแบบสารละลายเพิ่มเข้าไปในสารละลายธาตุอาหารเดิม (ประกอบไปด้วยเหล็ก แคลเซียม และไอโอดีน) โดยมีระดับปริมาณสารอาหารที่ใช้แต่ละชนิดดังตารางภาคผนวกที่ ข-3 ซึ่งกระบวนการผลิตนี้จะได้เป็นผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน

ผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน จากการทดลองที่ 2.3 ได้นำไปตรวจวิเคราะห์ค่าคุณภาพในด้านต่าง ๆ ซึ่งแสดงผลดังตาราง 4.16 ถึง 4.22

ตาราง 4.16 ค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน

ค่าสังเกต	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้
ปริมาณการดูดซึมสารละลาย (กิโลกรัม)	0.89±0.05
คุณภาพด้านกายภาพ	
ค่าสี L	63.41±0.23
ค่าสี a	5.02±0.04
ค่าสี b	24.29±0.14

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.16 ค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน (ต่อ)

ค่าสังเกต	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้
คุณภาพด้านเคมีและโภชนาการ	
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	4.24±0.06
ธาตุแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	138.49±0.49
ธาตุไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม)	33.31±0.63
กรดอะมิโนไลซีน (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	175.33±0.50*
กรดอะมิโนทรีโอนีน (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	89.04±3.49*
ความชื้น (กรัมต่อ 100 กรัม)	7.56±0.02
ค่าน้ำที่เป็นประโยชน์ (ค่า a_w)	0.32±0.02
เถ้า (กรัมต่อ 100 กรัม)	0.97±0.01
โปรตีน (กรัมต่อ 100 กรัม)	7.92±0.10
ไขมัน (กรัมต่อ 100 กรัม)	0.82±0.03
คาร์โบไฮเดรต (กรัมต่อ 100 กรัม)	82.73
พลังงาน (กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม)	369.98
ไฟเตท (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	168.74±3.50

หมายเหตุ * ตรวจวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการกลางตรวจสอบผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร (LCFA) สำนักงานสาขาเชียงใหม่

ตาราง 4.16 แสดงค่าคุณภาพในด้านต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ในด้านค่าปริมาณการดูดซึมสารละลายพบว่า ในการทดลองนี้ข้าวเหนียวพาร์บอยล์มีปริมาณการดูดซึมสารละลายเท่ากับ 0.89±0.05 กิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับการทดลองที่ 2.2 เมื่อพิจารณาในส่วนของสารอาหารต่าง ๆ ที่ได้มีการเสริมพบว่า ธาตุเหล็กในผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์มีปริมาณเท่ากับ 4.24 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการในผลิตภัณฑ์แล้ว (4 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม หรือร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน) ปริมาณธาตุเหล็กที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มสารประกอบที่เป็นแหล่งของธาตุเหล็กในสารละลายสารอาหารที่ได้ทำการปรับปรุงใหม่เพื่อใช้การทดลองนี้ ส่วนธาตุแคลเซียมและไอโอดีนมีปริมาณเท่ากับ 138.49 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และ 33.31 ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ (133.30 มิลลิกรัม และ 26.76 ไมโครกรัม ต่อ 100 กรัม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน) ในข้าวเหนียวพาร์บอยล์โดยมีปริมาณที่เป็นไปในทำนองเดียวกันกับการทดลองในตอนต้น ส่วนปริมาณกรดอะมิโนในผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์พบว่า มีปริมาณกรดอะมิโนไลซีนเท่ากับ 175.33 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งมีปริมาณมากกว่าปริมาณที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ (151.10 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม หรือร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน) สำหรับกรดอะมิโนทรีโอนีนมีปริมาณเท่ากับ 89.04 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งคิดเป็นประมาณร้อยละ 70 ของปริมาณที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ (127.63 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม หรือร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน)

จากผลการวิเคราะห์ในส่วนของกรดอะมิโนจะเห็นได้ว่าการเสริมกรดอะมิโนไลซีนในข้าวเหนียวพาร์บอยล์จะให้ผลดีกว่าการเสริมกรดอะมิโนทรีโอนีน โดยเปรียบเทียบจากปริมาณที่เสริมเข้าไปเพื่อให้ได้เท่ากับปริมาณเป้าหมายที่ตั้งไว้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ไลซีนเป็นกรดอะมิโนที่มีขั้วและมีประจุ (พรงาม, 2545) และมีปริมาณในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์มากกว่าทรีโอนีนประมาณ 4 เท่า (ในข้าวสารเหนียวพาร์บอลย์ปกติมีปริมาณกรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีนเท่ากับ 153.22 มิลลิกรัม และ 36.95 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ) จึงทำให้โมเลกุลของไลซีนในเมล็ดข้าวและไลซีนในสารละลายเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันได้มากกว่า ทำให้ไลซีนในสารละลายสามารถจับตัวกับไลซีนที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวได้ดี อีกทั้งสารประกอบแอล-ไลซีน ไฮโดรคลอไรด์ ซึ่งเป็นแหล่งของไลซีนมีค่าการละลายที่สูง (HiMedia Laboratories Pvt. Ltd., 2006a) จึงทำให้ไลซีนสามารถกระจายตัวในสารละลายได้ดี สำหรับกรดอะมิโนทรีโอนีนนั้นมีประสิทธิภาพในการเสริมได้น้อยกว่าไลซีน โดยมีปริมาณในผลิตภัณฑ์คิดเป็นร้อยละ 70 ของปริมาณที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่กรดอะมิโนทรีโอนีนเป็นกรดอะมิโนที่มีขั้วแต่ไม่มีประจุ (พรงาม, 2545) มีปริมาณในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่น้อยกว่าไลซีนและโซ่ข้างหรือหมู่ R ก็สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี (นิธิยา, 2545) ส่งผลให้โมเลกุลของทรีโอนีนยึดเกาะตัวกับโมเลกุลของน้ำมากกว่าโมเลกุลของทรีโอนีนในเมล็ดข้าว ทำให้ปริมาณทรีโอนีนในเมล็ดข้าวมีต่ำกว่าที่คาดหมายไว้ และการที่ไลซีนและธาตุอาหารชนิดอื่น ๆ ที่สามารถแทรกซึมและเกาะตัวกับเมล็ดข้าวได้ดี น่าส่งมีผลให้เกิดการขัดขวางการแทรกซึมของทรีโอนีนเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนภายในเมล็ดข้าว ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณสารอาหารต่าง ๆ มีปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ (มีค่าร้อยละความแตกต่างน้อยไม่ถึงร้อยละ 10) หากต้องการให้มีปริมาณกรดอะมิโนทรีโอนีนในผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการอาจมีแนวทางหนึ่งคือการเสริมสารประกอบที่เป็นแหล่งของกรดอะมิโนทรีโอนีนเพิ่มเติมอีกร้อยละ 30 จากปริมาณที่เสริมแต่เดิม (ตารางภาคผนวกที่ ข-3) โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงสภาวะกระบวนการผลิต สำหรับกรดอะมิโนทรีโอนีนในผลิตภัณฑ์นี้มีปริมาณเท่ากับ 89.04 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่ง คิดเทียบเป็นปริมาณเท่ากับร้อยละ 25 ของความต้องการในแต่ละวัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.17 ค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ที่ผ่านการนึ่งให้สุกแล้ว

ค่าสังเกต	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้
คุณภาพด้านกายภาพ	
ค่าสี L	65.49±0.31
ค่าสี a	3.62±0.03
ค่าสี b	19.48±0.30
แรงเฉือน (นิวตัน)	10.45±1.61
คุณภาพด้านเคมีและโภชนาการ	
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	1.97±0.02
ธาตุแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	66.90±0.96
ธาตุไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม)	15.14±0.73
ปริมาณน้ำ (กรัมต่อ 100 กรัม)	53.52±0.01
เถ้า (กรัมต่อ 100 กรัม)	0.05±0.01
โปรตีน (กรัมต่อ 100 กรัม)	4.18±0.20
ไขมัน (กรัมต่อ 100 กรัม)	0.29±0.01
คาร์โบไฮเดรต (กรัมต่อ 100 กรัม)	41.96
พลังงาน (กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม)	187.17
ไฟเตท (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	118.26±7.33
คุณภาพด้านประสาทสัมผัส (ประเมินโดยแบบทดสอบ 7-Point hedonic scale)	
คะแนนความชอบโดยรวม	5.90±1.12
คะแนนความชอบด้านลักษณะของเมล็ดข้าว	5.80±1.06
คะแนนความชอบด้านสี	4.85±1.09
คะแนนความชอบด้านกลิ่น	5.25±1.16
คะแนนความชอบด้านกลิ่นรส	5.60±0.94
คะแนนความชอบด้านลักษณะเนื้อสัมผัสโดยรวม	5.50±1.43
คะแนนความชอบด้านความนุ่ม	5.95±0.83
คะแนนความชอบด้านความเหนียว	5.55±1.28
คะแนนความชอบด้านความรู้สึกหลังกลืน	5.40±0.94

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก. **ข.**

ภาพ 4.13 ลักษณะของข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้จากการทดลองที่ 2.3
(ภาพ **ก**. คือ ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ ภาพ **ข**. คือ ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการนึ่งให้สุก)

เมื่อพิจารณาในด้านของคุณภาพทางกายภาพจากตาราง 4.16 และ 4.17 ร่วมกับภาพ 4.13 ซึ่งแสดงถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ได้ พบว่า ข้าวเหนียวพาร์บอยล์จะมีสีของเมล็ดข้าวค่อนข้างออกไปทางสีเหลืองทั้งข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์และข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก แต่ในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกจะมีความขาวสว่างมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าสี L, a และ b ที่วัดได้ โดยค่าสี L ในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกจะมีค่ามากกว่าข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ ส่วนค่าสี a และ b ในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกจะมีค่าน้อยกว่าข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ การที่ข้าวสารพาร์บอยล์มีสีค่อนข้างเหลืองเนื่องมากจากขั้นตอนกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียว สีเหลืองของเปลือกข้าวได้ละลายน้ำและแทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าวที่อยู่ภายในเปลือก ทำให้เมล็ดข้าวภายในมีสีเหลือง แต่หลังจากการทำให้สุก สีเหลืองจะจางลงเนื่องมาจากในขั้นตอนการนึ่งข้าวได้นำข้าวไปแช่น้ำก่อนแล้วจึงนำไปนึ่ง เมล็ดข้าวจะดูดซับน้ำเข้าไปเป็นผลให้สีเหลืองภายในเมล็ดข้าวเจือจางลง

สำหรับคุณภาพทางด้านเคมีและโภชนาการในด้านคุณค่าทางอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเหนียวสุกทั่วไปซึ่งมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 5.71, 0 และ 51.43 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ โดยมีค่าพลังงานรวมเท่ากับ 228.26 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม (รุจิรา, 2547) พบว่าในปริมาณการบริโภคที่เท่ากัน ผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีนจะให้โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และค่าพลังงานที่ต่ำกว่า โดยเฉพาะค่าพลังงานจะได้รับน้อยกว่าข้าวเหนียวปกติร้อยละ 18 ซึ่งน่าจะเหมาะกับผู้บริโภคที่ชอบบริโภคข้าวเหนียวแต่กลัวอ้วนหรือเป็นโรคเบาหวานเพราะจะได้รับคาร์โบไฮเดรตและพลังงานที่น้อยกว่า สอดคล้องกับรายงานของ อัมพิกา และคณะ (2547) ซึ่งกล่าวว่าการรับประทานข้าวเหนียวพาร์บอยล์มีผลช่วยให้ระดับน้ำตาลและอินซูลินในผู้ป่วยเบาหวานลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการรับประทานข้าวเหนียวปกติ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ด้านค่าคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสซึ่งประเมินโดยผู้บริโภคโดยใช้แบบทดสอบชนิด 7-Point hedonic scale (คะแนนเต็มเท่ากับ 7) ในผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับในผลิตภัณฑ์ในระดับความชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง (ช่วงคะแนน 5 ถึง 6) ในทุก ๆ คุณลักษณะ ยกเว้นความชอบในด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคมีรู้สึกเฉย ๆ ถึงชอบเล็กน้อย (ช่วงคะแนน 4 ถึง 5) ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่สีของผลิตภัณฑ์ออกไปทางสีเหลืองอ่อน ไม่ขาวเหมือนข้าวปกติ จึงทำให้มีค่าคะแนนในการยอมรับลดลง และจากการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสโดยผู้บริโภคทำให้ทราบว่าผู้บริโภคมีความชอบในตัวผลิตภัณฑ์ในระดับที่ค่อนไปทางชอบปานกลาง และผู้บริโภคยังได้ให้ความเห็นว่าข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกมีสีและลักษณะทางเนื้อสัมผัสที่คล้ายคลึงกับข้าวกล้อง มีความนุ่มกว่าข้าวกล้องแต่มีความเหนียวที่น้อยกว่า ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน มีภาพลักษณ์คล้ายคลึงกับข้าวกล้องซึ่งอาจจัดได้ว่าเป็นอาหารเพื่อสุขภาพในมุมมองของผู้บริโภค

สำหรับการเปรียบเทียบเพื่อให้ทราบถึงปริมาณการสูญเสียแร่ธาตุต่าง ๆ ภายหลังจากที่นำข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์มานึ่งให้สุกนั้น จะใช้วิธีการคำนวณเปรียบเทียบในรูปของน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นการคำนวณเปรียบเทียบเป็นสัดส่วนของปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่เหลืออยู่ในตัวอย่างแห้งโดยหักค่าปริมาณความชื้นออกจากตัวอย่างนั้น ๆ ผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ดังตาราง 4.18

ตาราง 4.18 การเปรียบเทียบปริมาณแร่ธาตุระหว่างข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์และข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการนึ่งให้สุก (วิธีการนึ่งแบบปกติ) ในรูปของน้ำหนักแห้ง

แร่ธาตุ	ปริมาณในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์	ปริมาณในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก	ร้อยละของการสูญเสีย
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	4.66±0.06	4.23±0.03	9.23
ธาตุแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	154.89±4.27	143.87±2.06	7.11
ธาตุไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม)	36.03±0.63	34.38±1.57	4.58

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.18 จะเห็นได้ว่ามีการสูญเสียของแร่ธาตุระหว่างกระบวนการนึ่งข้าวสารพาร์บอยล์ให้สุก (วิธีการนึ่งแบบปกติ) โดยธาตุเหล็กมีค่าร้อยละของการสูญเสียสูงที่สุด คือ ร้อยละ 9.23 รองลงมาคือธาตุแคลเซียมและธาตุไอโอดีน ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยของร้อยละการสูญเสียแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดนี้ในระหว่างกระบวนการทำให้ข้าวพาร์บอยล์สุกอยู่ที่ร้อยละ 6.97 (หรือประมาณร้อยละ 7)

จากกรณีที่ค่าร้อยละของการสูญเสียแร่ธาตุระหว่างกระบวนการนึ่งข้าวสารพาร์บอยล์ให้สุกนั้นมีค่าประมาณร้อยละ 7 การรับประทานข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกโดยกระบวนการนึ่งนี้อาจทำให้ร่างกายได้รับสารอาหารในปริมาณที่น้อยกว่าที่ได้กำหนดไว้ สำหรับวิธีการนึ่งข้าวเหนียวแบบปกติที่ใช้ตลอดในการวิจัยนี้ได้นำเอาวิธีการนึ่งข้าวเหนียวของมูลนิธิข้าวไทย (2549) มาประยุกต์ใช้ คือ ทำการแช่ข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการเสริมสารอาหารในน้ำเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้อัตราส่วนข้าว ต่อ น้ำ คือ 1 ต่อ 0.8 จากนั้นนำข้าวเหนียวพาร์บอยล์ห่อด้วยผ้าขาวบาง นึ่งด้วยไอน้ำในลังถึงเป็นเวลา 20 นาที จึงยกออกจากลังถึง วิธีการนึ่งนี้ทำให้สารอาหารบางส่วนได้สูญเสียออกไปในระหว่างกระบวนการนึ่ง ซึ่งเสาวนีย์ (2544) ได้กล่าวว่าแร่ธาตุส่วนใหญ่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการหุงต้ม แต่มักละลายออกมาในน้ำที่ใช้หุงต้ม จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ศึกษาหาวิธีการนึ่งหรือการทำข้าวเหนียวพาร์บอยล์ให้สุกด้วยวิธีการที่เหมาะสมกว่าเดิม เพื่อจะได้สามารถคงคุณค่าของสารอาหารในข้าวเหนียวพาร์บอยล์ไว้ให้ได้มากที่สุด โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบการนึ่งข้าวเหนียวแบบปกติกับวิธีการนึ่งที่ได้พัฒนาและปรับปรุงขึ้นในการวิจัยนี้

สำหรับวิธีการนึ่งข้าวเหนียวที่ได้ปรับปรุงขึ้น จะมีวิธีการนึ่งคล้ายกับวิธีการนึ่งข้าวเหนียวแบบปกติ กล่าวคือ นำข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมสารอาหารใส่ในถ้วยสแตนเลส แล้วแช่ด้วยน้ำเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้อัตราส่วนข้าว ต่อ น้ำ คือ 1 ต่อ 0.8 จากนั้นนำข้าวเหนียวพาร์บอยล์พร้อมทั้งถ้วยสแตนเลสไปนึ่งด้วยไอน้ำในลังถึงเป็นเวลา 20 นาที จึงยกออกจากลังถึง (วิธีการนี้จะคล้ายคลึงกับการหุงข้าวเจ้า)จากนั้นนำข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุกที่ได้จากการนึ่งหรือการทำให้สุกทั้งสองวิธีไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณสารอาหารแล้วเปรียบเทียบกับปริมาณสารอาหารในข้าวสารเหนียวก่อนนึ่งหรือการทำให้สุกในรูปของน้ำหนักแห้ง ดังแสดงผลในตาราง 4.19

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.19 การเปรียบเทียบปริมาณแร่ธาตุระหว่างข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์และข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการทำให้สุกในรูปของน้ำหนักแห้งโดยใช้วิธีการนึ่งสุกที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่

แร่ธาตุ	ปริมาณในข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์	ปริมาณในข้าวเหนียวพาร์บอยล์สุก	ร้อยละของการสูญเสีย
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	4.66±0.06	4.58±0.06	1.72
ธาตุแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	154.89±4.27	149.82±0.53	3.27
ธาตุไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม)	36.03±0.63	35.34±0.67	1.92

ตาราง 4.19 แสดงถึงค่าร้อยละการสูญเสียของแร่ธาตุระหว่างกระบวนการนึ่งข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ให้สุกโดยใช้วิธีการทำให้สุกที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ โดยธาตุแคลเซียมมีค่าร้อยละของการสูญเสียสูงที่สุด คือ ร้อยละ 3.27 รองลงมาคือธาตุไอโอดีนและธาตุเหล็ก ตามลำดับ โดยค่าเฉลี่ยของร้อยละการสูญเสียแร่ธาตุทั้ง 3 ชนิดในระหว่างกระบวนการทำให้ข้าวพาร์บอยล์สุกมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.30

เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทำข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ให้สุกแบบเดิมกับวิธีที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ จะเห็นได้ว่าวิธีที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ส่งผลให้การสูญเสียของแร่ธาตุระหว่างกระบวนการทำข้าวสารพาร์บอยล์ให้สุกมีค่าที่ลดลงอย่างชัดเจน (ค่าเฉลี่ยร้อยละการสูญเสียเดิมเท่ากับ 6.97 ลดเหลือเพียงร้อยละ 2.30) และข้าวเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการทำให้สุกด้วยวิธีที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่นี้ ได้นำไปประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส ซึ่งประเมินโดยผู้บริโภคโดยใช้แบบทดสอบชนิด 7-Point hedonic scale (คะแนนเต็มเท่ากับ 7) แสดงผลดังตาราง 4.20

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.20 การเปรียบเทียบค่าคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ที่ผ่านการนึ่งให้สุกโดยวิธีเดิมและวิธีการนึ่งที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่

คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์	ค่าคะแนนความชอบ	
	ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านวิธีการนึ่งแบบเดิม	ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านวิธีการนึ่งที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่
ความชอบโดยรวม	5.90±1.12^{ns}	5.89±1.02^{ns}
ลักษณะของเมล็ดข้าว	5.80±1.06^{ns}	5.87±1.10^{ns}
สี	4.85±1.09^{ns}	4.88±0.92^{ns}
กลิ่น	5.25±1.16^{ns}	5.12±1.11^{ns}
กลิ่นรส	5.60±0.94^{ns}	5.57±0.80^{ns}
ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยรวม	5.50±1.43^{ns}	5.55±1.27^{ns}
ความนุ่ม	5.95±0.83^{ns}	5.98±0.62^{ns}
ความเหนียว	5.55±1.28^{ns}	5.60±1.01^{ns}
ความรู้สึกหลังกลืน	5.40±0.94^{ns}	5.33±0.82^{ns}

หมายเหตุ ตัวอักษร ns (non-significant) ที่กำกับค่าของข้อมูลในแนวนอนของแต่ละคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์แสดงถึงความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของข้อมูล ($P>0.05$)

ในการเปรียบเทียบค่าคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการนึ่งให้สุกโดยวิธีการเดิมและวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ (ตาราง 4.20) พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับในผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ซึ่งทำให้สุกด้วยวิธีการเดิมและวิธีการที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แสดงว่าวิธีการทำข้าวเหนียวพาร์บอยล์ให้สุกที่ได้ปรับปรุงขึ้นใหม่ไม่ส่งผลต่อค่าคุณลักษณะต่าง ๆ จากการประเมินโดยผู้บริโภค นั่นคือ สามารถเปลี่ยนวิธีการทำข้าวเหนียวพาร์บอยล์ให้สุกจากวิธีเดิมเป็นวิธีที่ได้ปรับปรุงใหม่ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการยอมรับของผู้บริโภค

ตารางที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารต่าง ๆ ระหว่างผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ที่ได้พัฒนาขึ้น กับข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 ที่จำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด และข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ซึ่งผ่านการพาร์บอยล์ที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 50 นาที

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 4.21 การเปรียบเทียบปริมาณสารอาหารต่าง ๆ ในข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 แต่ละประเภท

สารอาหาร	ข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6	ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6	ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน
ธาตุเหล็ก (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	0.05±0.04	0.30±0.01 เพิ่มขึ้นร้อยละ 500.00	4.24±0.06 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1313.00
ธาตุแคลเซียม (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	2.30±0.20	5.11±0.27 เพิ่มขึ้นร้อยละ 122.17	138.49±0.49 เพิ่มขึ้นร้อยละ 2610.17
ธาตุไอโอดีน (ไมโครกรัมต่อ 100 กรัม)	1.93±0.14	3.00±0.46 เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.44	36.03±0.63 เพิ่มขึ้นร้อยละ 1101.00
กรดอะมิโนไลซีน* (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	446.12±68.50	153.22±12.90 ลดลงร้อยละ 65.65	175.33±0.50 เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.43
กรดอะมิโนทรีโอนีน* (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	58.90±5.81	36.95±2.26 ลดลงร้อยละ 37.27	89.04±3.49 เพิ่มขึ้นร้อยละ 140.97

หมายเหตุ * ตรวจวิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการกลางตรวจสอบผลิตภัณฑ์เกษตรและอาหาร (LCFA) สำนักงานสาขาเชียงใหม่

ในตารางการเปรียบเทียบสารอาหารจากในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 (ตาราง 4.21) แต่ละประเภทพบว่า ในผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน จะมีค่าปริมาณสารอาหารแต่ละชนิดยกเว้นกรดอะมิโนไลซีนสูงที่สุด สำหรับข้าวสารเหนียวที่ผ่านการพาร์บอยล์ปกติแต่ไม่ได้มีการเสริมสารอาหาร มีปริมาณแร่ธาตุที่สูงกว่าข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 ซึ่งเป็นข้าวสารปกติตามท้องตลาดทั่วไปแต่มีปริมาณกรดอะมิโนที่ต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาแนวโน้มปริมาณสารอาหารต่าง ๆ จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของแร่ธาตุและกลุ่มของกรดอะมิโน ในกลุ่มของแร่ธาตุพบว่าปริมาณแร่ธาตุมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 และผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านการเสริมสารอาหาร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในด้านสมบัติบางประการของแร่ธาตุแต่ละชนิดพบว่าเหล็กและแคลเซียมเมื่อละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนให้ประจุบวกจะสามารถแทรกซึมและเกาะตัวกับเมล็ดข้าวได้ดีกว่าไอโอดีนซึ่งเมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวเป็นไอออน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ให้ประจุลบ (รานี, 2549) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโมเลกุลของธาตุพบว่า ไอโอดีนมีมวลโมเลกุลมากที่สุด รองลงมาคือเหล็กและแคลเซียมตามลำดับ (รานี, 2549) จากลักษณะดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าธาตุที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนเชิงลบและมีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่จะให้ประสิทธิภาพในการเสริมสารอาหารในข้าวเหนียวพาร์บอยล์ได้น้อยกว่าธาตุที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนเชิงบวก

สำหรับแนวโน้มในกลุ่มของกรดอะมิโนพบว่า กรดอะมิโนมีปริมาณลดลงเมื่อผ่านการพาร์บอยล์และจะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการเสริมสารอาหาร ทั้งนี้เนื่องมาจากในโมเลกุลของกรดอะมิโนไลซีนและทรีโอนีนที่โซ่ข้างหรือหมู่ R มีขั้วหรือมีประจุ (พรงาม, 2545) ซึ่งทำให้กรดอะมิโนดังกล่าวละลายปนมากับน้ำที่ใช้ในกระบวนการพาร์บอยล์ได้ นอกจากนี้การที่ไลซีนเป็นกรดอะมิโนที่มีขนาดใหญ่ มวลโมเลกุลมาก (รัชฎา, 2544) ทำให้ไลซีนในเมล็ดข้าวมีโอกาสที่จะเกิดพันธะและแรงดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำได้มาก ทำให้ไลซีนจากเมล็ดข้าวละลายปนมากับน้ำในการพาร์บอยล์มีผลทำให้ปริมาณไลซีนในข้าวหลังจากผ่านการพาร์บอยล์ลดลง ส่วนกรดอะมิโนทรีโอนีนนั้นแม้จะมีขนาดที่เล็กและมวลโมเลกุลน้อยกว่าไลซีน (รัชฎา,2544) แต่โซ่ข้างหรือหมู่ R สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี (นิธิยา, 2545) ทำให้ทรีโอนีนมีโอกาสที่จะละลายปนมากับน้ำในระหว่างการพาร์บอยล์เช่นเดียวกับไลซีน ปริมาณทรีโอนีนในข้าวหลังจากผ่านการพาร์บอยล์จึงลดลง สำหรับกลไกในการเคลื่อนที่ของสารอาหารอาจมีผลมาจากปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย ซึ่งผู้ที่สนใจสามารถนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปในอนาคตจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น

จากแนวโน้มดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่าการพาร์บอยล์มีผลทำให้ปริมาณแร่ธาตุเพิ่มขึ้นแต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลทำให้ปริมาณกรดอะมิโนลดลง นอกจากนี้อาจสามารถกล่าวได้ว่าในการเสริมสารอาหารในข้าวเหนียวพาร์บอยล์ การเสริมแร่ธาตุจะให้ผลดีและมีประสิทธิภาพมากกว่าการเสริมด้วยกรดอะมิโน สังเกตได้จากในผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านการเสริมสารอาหารมีปริมาณแร่ธาตุแต่ละชนิดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนมากกว่ากรดอะมิโนซึ่งเพิ่มในสัดส่วนที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาในส่วนของการเสริมกรดอะมิโนจะเห็นว่าการเสริมกรดอะมิโนไลซีนให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเสริมกรดอะมิโนทรีโอนีน โดยจากตาราง 4.21 เห็นได้ว่าทรีโอนีนมีอัตราการเพิ่มที่มากกว่าไลซีนหลายเท่า แต่ปริมาณทรีโอนีนในผลิตภัณฑ์ก็ยังไม่ได้ตรงตามปริมาณเป้าหมายที่ต้องการ (127.63 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม) โดยเมื่อคิดเทียบกับปริมาณความต้องการในแต่ละวันพบว่าปริมาณกรดอะมิโนทรีโอนีนในผลิตภัณฑ์มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 25 ของความต้องการในแต่ละวัน ในขณะที่ปริมาณสารอาหารอื่น ๆ ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณที่เท่ากับหรือมากกว่าร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน

อย่างไรก็ตาม สำหรับรายละเอียดเค้าโครงปริมาณกรดอะมิโนในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 แต่ละประเภทตามที่ได้กล่าวในตาราง 4.21 นั้น ได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมธาตุเหล็กโดยวิธีการเคลือบจากงานวิจัยของไพโรจน์และคณะ (2549) พบว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ในงานวิจัยนี้มีค่าปริมาณธาตุเหล็กเท่ากับ 4.24 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งมากกว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมธาตุเหล็กโดยวิธีการเคลือบที่มีปริมาณธาตุเหล็กเท่ากับ 0.97 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม อย่างเห็นได้ชัด (มีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้น ร้อยละ 337.11) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการเสริมสารอาหารที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการเสริมธาตุเหล็กให้กับข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ได้ดีกว่าวิธีการเคลือบจากงานวิจัยของไพโรจน์และคณะ (2549)

ตาราง 4.22 การเปรียบเทียบปริมาณไฟเตทในข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 แต่ละประเภท

การวิเคราะห์	**ข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6**	**ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6**	**ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน**
ไฟเตท (มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม)	32.05±0.13	232.97±7.17	168.74±3.50
อัตราส่วนไฟเตทต่อเหล็ก*	54.19	65.66	3.36
อัตราส่วนไฟเตทต่อแคลเซียม**	0.85	2.77	0.07

หมายเหตุ * $\frac{\text{(มิลลิกรัมของไฟเตท / น้ำหนักโมเลกุลของไฟเตท = 660)}}{\text{(มิลลิกรัมของแคลเซียม / น้ำหนักอะตอมของแคลเซียม = 40.1)}}$

** $\frac{\text{(มิลลิกรัมของไฟเตท / น้ำหนักโมเลกุลของไฟเตท = 660)}}{\text{(มิลลิกรัมของเหล็ก / น้ำหนักอะตอมของเหล็ก = 55.8)}}$

ตาราง 4.22 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณไฟเตทและสัดส่วนของปริมาณไฟเตทต่อธาตุเหล็กและแคลเซียมในข้าวเหนียวพันธุ์กข 6 แต่ละประเภท พบว่า ปริมาณไฟเตทในข้าวสารเหนียวที่ผ่านการพาร์บอยล์ปกติแต่ไม่ได้มีการเสริมสารอาหารมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือผลิตภัณฑ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน และ ข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 ส่วนค่าอัตราส่วนไฟเตทต่อธาตุเหล็กและอัตราส่วนไฟเตทต่อธาตุแคลเซียมในข้าวเหนียวแต่ละประเภท พบว่า ข้าวแต่ละชนิดมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวที่แตกต่างกัน

จากรายงานของ Ma *et al*. (2007) และ Perlas and Gibson (2005) ได้กล่าวว่า การดูดซึมของเหล็กจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฟเตทต่อเหล็กมีค่าน้อยกว่า 1 และการดูดซึมของแคลเซียมจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อ อัตราส่วนไฟเตทต่อแคลเซียม มีค่าน้อยกว่า 0.24 นั่นคือ ยิ่งค่าอัตราส่วนไฟเตทต่อธาตุอาหารนั้น ๆ มีค่าน้อย จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของร่างกายที่จะดูดซึมธาตุอาหารดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.22 จะเห็นว่าข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ปกติ มีค่าอัตราส่วนไฟเตทต่อเหล็กและอัตราส่วนไฟเตทต่อแคลเซียม เท่ากับ 54.19 และ 0.85 ตามลำดับ ข้าวสารเหนียวที่ผ่านการพาร์บอยล์ปกติแต่ไม่ได้มีการเสริมสารอาหารมีค่าอัตราส่วนไฟเตทต่อเหล็กและอัตราส่วนไฟเตทต่อแคลเซียม เท่ากับ 65.66 และ 2.77 ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ที่ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน มีค่าอัตราส่วนไฟเตทต่อเหล็กและอัตราส่วนไฟเตทต่อแคลเซียม เท่ากับ 3.36 และ 0.07 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนไฟเตทต่อเหล็กและอัตราส่วนไฟเตทต่อแคลเซียมในผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เสริมสารอาหารที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าน้อยกว่าข้าวสารเหนียวปกติและข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ปกติที่ไม่ได้มีการเสริมสารอาหารอย่างชัดเจน จากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านกระบวนการเสริมสารอาหารทำให้ความสามารถในการดูดซึมธาตุเหล็กและธาตุแคลเซียมของร่างกายมีประสิทธิภาพมากกว่าข้าวปกติที่ไม่ได้ผ่านการเสริมสารอาหารอย่างเห็นได้ชัด

ลักษณะของข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 แต่ละประเภทที่ได้กล่าวถึงข้างต้นดังแสดงในภาพ 4.14

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ก. **ข.** **ค.**

ภาพ 4.14 ลักษณะของข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 แต่ละประเภท
(ภาพ **ก**. คือ ข้าวสารเหนียวปกติ ภาพ **ข**. คือ ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ไม่ได้มีการเสริมสารอาหาร ภาพ **ค**. คือข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์ที่ผ่านการเสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน)

ภาพ 4.14 แสดงให้เห็นถึงลักษณะข้าวสารเหนียวพันธุ์ กข 6 แต่ละประเภท ซึ่งจะสังเกตว่าข้าวที่ผ่านการพาร์บอยล์จะมีลักษณะเมล็ดที่ใสและมีสีค่อนข้างเหลืองกว่าข้าวปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนกระบวนการพาร์บอยล์ข้าวเหนียวที่เกิดการเจลาติไนซ์ และสีเหลืองของเปลือกข้าวได้ละลายน้ำและแทรกซึมเข้าสู่เมล็ดข้าว ทำให้เมล็ดข้าวภายในมีสีเหลืองดังกล่าว

ภาพ 4.15 ผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ซึ่งบรรจุภายในถุงลามิเนต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพ 4.15 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีนที่พัฒนาได้ และเก็บรักษาแบบสุญญากาศในถุงลามิเนตโดยมีปริมาณการบรรจุเท่ากับ 262.44 กรัม และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการทำให้สุกแล้วจะได้เป็นข้าวสารพาร์บอยล์สุกน้ำหนักประมาณ 450 กรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เท่ากับปริมาณข้าวเหนียวสุกที่คนไทยบริโภคต่อคนต่อวัน (สำนักมาตรฐานสินค้าและระบบคุณภาพ สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2549) โดยหากรับประทานข้าวสารเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ทั้งหมดในปริมาณที่บรรจุนี้ภายในหนึ่งวัน จะทำให้ร่างกายได้รับสารอาหารต่าง ๆ คิดเป็นอย่างน้อยร้อยละ 35 ของความต้องการในแต่ละวัน ยกเว้น กรดอะมิโนทรีโอนีนซึ่งจะได้รับในปริมาณร้อยละ 25 เมื่อคิดเทียบกับปริมาณของความต้องการในแต่ละวัน แต่ให้พลังงานแก่ร่างกายน้อยกว่าข้าวเหนียวปกติทั่วไปร้อยละ 18

สำหรับต้นทุนในการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีนมีวิธีการคำนวณดังนี้

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวเหนียวพาร์บอยล์พันธุ์ กข 6 ต่อกระบวนการผลิตเท่ากับ 800 กรัม ซึ่งเทียบเป็นข้าวเมล็ดเต็มเท่ากับร้อยละ 68.75 ดังนั้นคิดเป็นข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ชนิดข้าวเปลือกเท่ากับ (800*100)/68.75 = 1,163.64 กรัม โดยวัตถุดิบอื่น ๆ คำนวณต้นทุนได้ดังตาราง 4.23

ตาราง 4.23 การคำนวณต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน

วัตถุดิบที่ใช้	ต้นทุนต่อกิโลกรัม (บาท)	จำนวนที่ใช้ในกระบวนการผลิต (กรัม)	ต้นทุนต่อกระบวนการผลิต (บาท)
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ชนิดข้าวเปลือก	8.00	1,163.64	9.31
โซเดียมไอร์รอนอีดีทีเอ	9,920.00	0.6010	5.96
แคลเซียมแลคเตท กลูโคเนท	240.00	19.2020	4.61
โพแทสเซียมไอโอเดต	12,120.00	0.008218	0.10
แอล-ไลซีน ไฮโดรคลอไรด์	8,840.00	0.3892	3.44
แอล-ทรีโอนีน	78,000.00	1.7423	135.90
น้ำบริโภค	0.50	1,600.00	0.80
รวมต้นทุนต่อผลิตภัณฑ์ 800 กรัม			**160.12**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากการคำนวณต้นทุนในการผลิตต่อผลิตภัณฑ์ 800 กรัม จะเท่ากับ 160.12 บาท สำหรับขนาดบรรจุของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดไว้ คือ 262.44 กรัม ดังนั้น ต้นทุนต่อผลิตภัณฑ์ 262.44 กรัม เท่ากับ (160.12*262.44)/800 = 52.53 บาท สำหรับถุงบรรจุผลิตภัณฑ์จะใช้ถุงลามิเนต ราคาถุงละ 0.70 บาท ดังนั้น รวมเป็นต้นทุนของผลิตภัณฑ์ข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน เท่ากับ 52.53+0.70 = 53.23 บาท โดยต้นทุนของผลิตภัณฑ์นี้ส่วนใหญ่มาจากราคาของวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของกรดอะมิโนทรีโอนีน (แอล-ทรีโอนีน) อีกทั้งประสิทธิภาพในการเสริมกรดอะมิโนทีโอนีนจากการศึกษามีประสิทธิภาพต่ำที่สุด (เสริมได้เพียงร้อยละ 25 ของปริมาณความต้องการในแต่ละวัน จากเป้าหมายที่ร้อยละ 35) แนวทางหนึ่งที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีต้นทุนที่ลดลงคือการไม่เสริมกรดอะมิโนทรีโอนีน โดยคงเหลือเพียงการเสริมสารอาหาร 4 ชนิด ซึ่งมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีต้นทุนเหลือเพียง 8.65 บาท ต่อขนาดบรรจุ 262.44 กรัม จากเดิม 53.23 บาท

กรณีต้นทุนที่เกิดจากอุปกรณ์และเครื่องมือในการผลิตยังไม่ได้นำมาคำนวณเนื่องจากเป็นการผลิตในระดับการทดลอง การผลิตต่อครั้งทำในปริมาณที่ไม่มาก ทำให้ต้นทุนจากอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ มีราคาเฉลี่ยต่อหน่วยค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นการคิดค่าใช้จ่ายต่อระยะเวลาที่ใช้ไม่ได้คิดต่อปริมาณการผลิต หากต้องการลดต้นทุนในส่วนนี้จะต้องทำการผลิตต่อครั้งให้มากขึ้น จะทำให้ต้นทุนส่วนนี้ลดลงเมื่อนำมาเฉลี่ยต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ ต้นทุนที่เกิดจากอุปกรณ์และเครื่องมือในการผลิตต่อกระบวนการผลิต 1 ครั้ง แสดงไว้ดังตาราง 4.24

ตาราง 4.24 ต้นทุนจากอุปกรณ์และเครื่องมือในการผลิตข้าวเหนียวพาร์บอยล์เสริมเหล็ก แคลเซียม ไอโอดีน ไลซีน และทรีโอนีน ต่อกระบวนการผลิต 1 ครั้ง

อุปกรณ์และเครื่องมือ	ต้นทุนต่อชั่วโมง (บาท)	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)	ต้นทุนต่อกระบวนการผลิต (บาท)
เตาแก๊ส (ค่าแก๊ส)	16.07	110	29.47
ตู้อบลมร้อน (ค่าไฟฟ้า)	32.14	300	160.70
เครื่องสีข้าว (ค่าไฟฟ้า)	18.45	20	6.15
หม้อนึ่ง Retort (ค่าไฟฟ้าและค่าผลิตไอน้ำ)	286.96	12	57.39
เครื่องแช่ข้าวในกระบวนการแทรกซึมภายใต้สุญญากาศ (ค่าไฟฟ้า)	36.90	40	24.60
รวมต้นทุนต่อกระบวนการผลิต 1 ครั้ง			**278.31**

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved