

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

EVALUATION OF INTERNAL CHANGE OF CENTURY

EGG UNDER HYDROSTATIC CONDITIONS



Benjawan Vanmontree

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Agriculture and Food Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(ผศ. ดร. พงศ์ศักดิ์ จิตจุเสนา)

ประธานกรรมการ

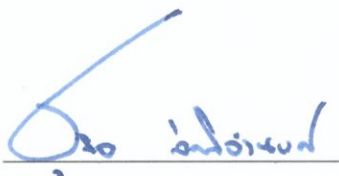


(ผศ. ดร. เทวรัตน์ ศรีอำนาจ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร. สามารถ บุญอาจ)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เบญจวรรณ วานมนตรี : การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะ
ไฮโดรสแตติก (EVALUATION OF INTERNAL CHANGE OF CENTURY EGG
UNDER HYDROSTATIC CONDITIONS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.
เทวรัตน์ ตรีอำนาจ, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตภายใต้สภาวะ
ไฮโดรสแตติกทั้งด้านความดัน และด้านสุญญากาศ ทำการผลิตไข่เยี่ยวม้าโดยแช่ในสารละลายต่าง
ภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติก 1 2 3 และ 4 บาร์ และสภาวะสุญญากาศไฮโดรสแตติก 380
และ 760 มิลลิเมตรปรอท ทำการสุ่มตัวอย่างไข่ขึ้นมาตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ
และเคมี ได้แก่ ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ความถ่วงจำเพาะ ความแข็งแรงเจลไข่ขาว ค่า pH ของไข่
แดงและไข่ขาว และลักษณะการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย ทุกๆ 2 วัน เป็น
เวลา 12 วัน ผลจากการศึกษาพบว่าภายใต้สภาวะความดันค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ค่าความ
ถ่วงจำเพาะ ค่า pH ของไข่ขาวและไข่แดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นและระยะเวลาที่แช่
ไข่ในสารละลายต่าง ส่วนความแข็งแรงเจลไข่ขาวมีแนวโน้มลดลง ลักษณะปรากฏด้านสีของไข่
พบว่าเมื่อจำนวนวันในการแช่เพิ่มขึ้น เจลไข่ขาวมีแนวโน้มเป็นสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น ส่วนการผลิตไข่
เยี่ยวม้าภายใต้สุญญากาศพบว่า ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและค่าความถ่วงจำเพาะไม่ได้รับอิทธิพล
ของระดับสุญญากาศและระยะเวลาที่แช่ในสารละลายต่าง ค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวมีแนวโน้ม
ลดลงเมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น โดยที่ระดับสุญญากาศส่งผลกระทบต่อเพียงเล็กน้อย ค่า pH ของไข่
ขาวและไข่แดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ในสารละลายต่าง โดยที่ระดับสุญญากาศ 380
มิลลิเมตรปรอททำให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงได้ต่ำกว่าที่ 760 มิลลิเมตรปรอท ด้านลักษณะปรากฏพบว่า
เมื่อจำนวนวันเพิ่มขึ้นเจลไข่ขาวมีแนวโน้มเป็นสีน้ำตาลตามเพิ่มขึ้น และมีสัดส่วนช่องอากาศในไข่
มากกว่าการใช้ความดัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของไข่เยี่ยวม้าโดยรวมพบว่าการผลิตไข่เยี่ยว
ม้าโดยการแช่สารละลายต่างเป็นระยะเวลา 6 วัน ที่ความดัน 2 บาร์ เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการ
ผลิตไข่เยี่ยวม้า

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา เบญจวรรณ วานมนตรี
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

BENJAWAN VANMONTREE : EVALUATION OF INTERNAL CHANGE
OF CENTURY EGG UNDER HYDROSTATIC CONDITIONS.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. TAWARAT TREEAMNUK, D.Eng.,

113 PP.

HYDROSTATIC/ PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES/CENTURY EGG

The objective of this research was to investigate the internal change of century egg in production process under hydrostatic pressure and vacuum conditions. The samples of duck egg that used in century egg production were immersed in alkaline solution at hydrostatic pressure of 1, 2, 3 and 4 bar, and 380 and 760 mmHg of hydrostatic vacuum. The samples of egg were selected randomly to evaluate internal change of some physical and chemical properties in term of percent of specific gravity increased, hardness of albumen, pH of albumen and yolk, and visible changing with image analysis every 2 days until 12 day. The results of studies indicate that percent of specific gravity increased, pH of albumen and yolk are increase when immersion time increases every pressure, but in contrast to the hardness of albumen. The hydrostatic pressure affects to percent of specific gravity increased clearly than hydrostatic vacuum, but in contrast of pH of albumen. The immersion time affect to change the color of albumen from transparent gel to dark brown every pressure and vacuum. The century eggs under vacuum have more internal air cell than pressure. In addition, the eggs that immersed in alkaline at 2 bars for 6 days is suitable condition for produce century egg.

School of Agricultural Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature Benjawan Vanmontree

Advisor's Signature Tawarat Treeamnuk

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนรรค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เปิดโอกาสให้ข้าพเจ้าได้เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร อีกทั้งยังช่วยอนุเคราะห์ดูแลงานเขียนวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงศักดิ์ จุลยเสน ที่กรุณาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีเนื้อหาที่สมบูรณ์ครบถ้วนเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจศึกษาต่อ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สามารถ บุญอาจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่คอยให้คำแนะนำเสนอแนะความคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการ

ท้ายนี้ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่มอบทุนการศึกษาวิจัยภายใต้โครงการ OROG รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 และ 10 ขอขอบคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหารทุกท่าน ที่ได้ชี้แนะสิ่งดีงามทั้งด้านการดำรงชีวิต การศึกษา และส่วนสำคัญที่สุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวในการเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

เบญจวรรณ วานมนตรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๓
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โครงสร้างของไขเป็ด.....	4
2.2 การตรวจสอบความสดไข.....	5
2.3 ไขเยี่ยวม้าลักษณะไขเยี่ยวม้า.....	6
2.3.1 คุณลักษณะของไขเยี่ยวม้า.....	6
2.3.2 กระบวนการผลิตไขเยี่ยวม้า.....	6
2.4 ความดันไฮโดรสแตติก.....	7
2.4.1 หน่วยของความดัน.....	8
2.4.2 การแปรรูปอาหารโดยใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure) ...	9
2.4.3 ผลของความดันไฮโดรสแตติกที่มีต่อน้ำ.....	9
2.4.4 ผลของความดันที่มีต่อเชื้อจุลินทรีย์.....	10
2.5 ถังรับความดัน.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	ชนิดของภาชนะ	10
2.5.2	ทฤษฎีการออกแบบถังรับแรงดัน	12
2.5.3	เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)	14
2.5.4	วาล์ว(Valve)	15
2.6	สมบัติทางเคมีกายภาพของอาหาร	16
2.6.1	สีของอาหาร	16
2.6.2	การวัดคุณลักษณะทางกลของอาหาร	17
2.6.3	ค่า pH.....	18
2.6.4	ปริมาณต่างหรือกรด.....	19
2.6.5	ความถ่วงจำเพาะ	20
2.6.6	การประมวลผลทางภาพถ่าย	20
3	วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	21
3.1.1	ไขเบ็ดสำหรับผลิตไขเย็บนม้า.....	21
3.1.2	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	22
3.1.3	เกลือแกง	22
3.1.4	น้ำเปล่า.....	23
3.1.5	ถังความดัน (Pressure vessel).....	23
3.1.6	ถังสุญญากาศ (Vacuum vessel).....	24
3.1.7	เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล (Vernier calipers digital).....	25
3.1.8	เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง	25
3.1.9	pH meter	26
3.1.10	บิวเรต 50 มิลลิลิตร (Buret).....	27
3.1.11	เครื่องวัดความเค็มแบบส่อง (Salinity refractometer).....	27
3.1.12	เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyzer)	28
3.1.13	เครื่องมือปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter).....	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.14	ตู้อบลมร้อน (Hot air oven).....	29
3.1.15	กล้องถ่ายภาพ.....	29
3.1.16	กล้องควบคุมแสง.....	30
3.1.17	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย	30
3.1.18	เครื่องย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digester).....	31
3.1.19	เครื่องมือหาปริมาณธาตุ Inductively couple plasma mass spectrometer (ICP-MS)	31
3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.2.1	การตรวจสอบความสดใหม่ของไข่เป็ดเบื้องต้น	32
3.2.2	การผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure)	33
3.2.3	กระบวนการแปรรูปไข่เยี่ยวม้าด้วยสภาวะสุญญากาศไฮโดรสแตติก (Hydrostatic vacuum).....	34
3.2.4	การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสารละลายต่างสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า	35
3.2.5	การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไข่เยี่ยวม้า.....	36
3.2.6	การตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวกซื้อรวมถึงห้างสรรพสินค้า	43
3.3	สถานที่ทำการทดสอบ.....	44
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	45
4.1	การออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติก (Pressure vessel hydrostatic)	45
4.2	การออกแบบถังสุญญากาศไฮโดรสแตติก (Vacuum vessel hydrostatic).....	46
4.3	การตรวจสอบความสดใหม่ของไข่เป็ดเบื้องต้น	46
4.4	การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสารละลายต่างสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า	47
4.4.1	ค่า pH ของสารละลายต่าง	47
4.4.2	ปริมาณต่างในสารละลาย	47
4.4.3	ระดับความเค็มของสารละลาย.....	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5	การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก.....	49
4.5.1	ร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไข่เยี่ยวม้า	49
4.5.2	ความถ่วงจำเพาะของไข่เยี่ยวม้า	49
4.5.3	ความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้า	50
4.5.4	วัดค่า pH ในไข่เยี่ยวม้า.....	51
4.5.5	ปริมาณด่างทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า (Total alkalinity)	52
4.5.6	ปริมาณน้ำอิสระ a_w ในไข่เยี่ยวม้า.....	54
4.5.7	ความชื้นในไข่เยี่ยวม้า	56
4.5.8	การเปลี่ยนแปลงสีของไข่เยี่ยวม้า.....	56
4.6	ลักษณะทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวก ซื้อ รวมถึงห้างสรรพสินค้า.....	60
4.6.1	ปริมาณตะกั่วในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้า.....	62
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	65
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	65
	รายการอ้างอิง	66
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ตารางผลการทดลอง	68
	ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	105
	ภาคผนวก ค. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	112
	ประวัติผู้เขียน	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	โปรแกรมย่อยตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบ ไมโครเวฟ 41
4.1	สมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่แดงไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า..... 62
4.2	ปริมาณตะกั่วที่พบในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า..... 64
4.3	ปริมาณตะกั่วที่พบในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า..... 64
ก.1	ค่าความสดใหม่ของไข่เป็ดสด Haugh units (HU) 68
ก.2	ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาส่งผลต่อ ร้อยละน้ำหนักไข่ที่เพิ่มขึ้น..... 70
ก.3	ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความ ถ่วงจำเพาะไข่ที่เพิ่มขึ้น..... 72
ก.4	ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความ แข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้า..... 74
ก.5	ค่า pH ในสารละลาย..... 76
ก.6	ผลกระทบของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่า pH ในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า..... 78
ก.7	ผลกระทบของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่า pH ในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า..... 80
ก.8	ค่าการไทเทรตสารละลายต่าง..... 82
ก.9	ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่าการ ไทเทรตต่างทั้งหมดในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า..... 84
ก.10	ผลกระทบของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่าการ ไทเทรตต่างทั้งหมดในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า..... 86
ก.11	ระดับความเค็มของสารละลายสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า..... 88
ก.12	ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาความชื้น ในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า..... 90
ก.13	ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อ ความชื้นในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า..... 92

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.14 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อ ปริมาณน้ำอิสระในไขขาวของไข่เยี่ยวม้า.....	94
ก.15 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อ สีไขขาวของไข่เยี่ยวม้า.....	96
ก.16 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อ สีไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า.....	98
ก.17 ผลต่างค่าสีไขขาวของไข่เยี่ยวม้าเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด	100
ก.18 ผลต่างค่าสีไข่แดงของไข่เยี่ยวม้าเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด.....	102



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างและองค์ประกอบของไข่เป็ด.....	4
3.1	ไข่เป็ดสำหรับผลิตไข่เยี่ยวม้า.....	21
3.2	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH).....	22
3.3	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl).....	22
3.4	น้ำเปล่า (H ₂ O).....	23
3.5	ถังความดันที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.6	ถังสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.7	เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอล (Vernier calipers digital).....	25
3.8	เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง.....	26
3.9	เครื่อง pH meter.....	26
3.10	บิวเรต 50 มิลลิลิตร (Buret).....	27
3.11	เครื่องวัดความเค็มแบบส่อง (Salinity refractometer).....	27
3.12	เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyzer).....	28
3.13	เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter).....	28
3.14	ตู้อบลมร้อน (Hot air oven).....	29
3.15	กล้องถ่ายภาพดิจิตอล Olympus รุ่น STYLUS XZ-2.....	29
3.16	กล้องควบคุมแสง.....	30
3.17	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย.....	30
3.18	เครื่องย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digester).....	31
3.19	เครื่องมือหาปริมาณธาตุ Inductively couple plasma mass spectrometer (ICP-MS).....	32
3.20	ชั่งน้ำหนักไข่เป็ดด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง.....	33
3.21	วัดความสูงไข่ขาวของไข่เป็ด.....	33
3.22	แช่ไข่เป็ดในสารละลายต่าง.....	34
3.23	การแช่ไข่ในถังสุญญากาศเพื่อผลิตไข่เยี่ยวม้า.....	35
3.24	การหาปริมาณต่างทั้งหมด.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25	การหาความถ่วงจำเพาะของไข่เป็ด37
3.26	การวิเคราะห์ต่างทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า (Total alkalinity)38
3.27	การวัดปริมาณน้ำอิสระ a_w ในไข่เยี่ยวม้า39
3.28	การหาความชื้นในไข่เยี่ยวม้า.....40
3.29	หลอดย้อยตัวอย่างของเครื่องย้อยสลายด้วยไมโครเวฟ41
3.30	บรรจุหลอดตัวอย่างในเครื่องย้อยด้วยระบบไมโครเวฟ.....42
3.31	ปรับปริมาตรตัวอย่าง42
3.32	จัดเก็บไฟล์ภาพในรูปแบบ JPEG.....43
4.1	ถึงความดันไฮโดรสแตติก (Pressure vessel hydrostatic).....44
4.2	ถึงสุญญากาศไฮโดรสแตติก (Vacuum vessel)46
4.3	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่า pH ของสารละลายต่าง47
4.4	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าปริมาณต่างในสารละลาย.....48
4.5	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าความเค็มของสารละลาย48
4.6	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไข่เยี่ยวม้า.....49
4.7	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าร้อยละความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นของไข่เยี่ยวม้า.....50
4.8	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า.....51
4.9	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่า pH ไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า.....52
4.10	ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่า pH ไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า.....52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าปริมาณต่างในไขขาวของไข่เยี่ยวม้า.....	53
4.12 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าปริมาณต่างในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า.....	54
4.13 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าปริมาณน้ำอิสระในไขขาวของไข่เยี่ยวม้า.....	55
4.14 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าปริมาณน้ำอิสระในไข่แดง.....	55
4.15 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 1 บาร์.....	56
4.16 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 2 บาร์.....	57
4.17 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 3 บาร์.....	57
4.18 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่สุญญากาศ 4 บาร์.....	58
4.19 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดันสุญญากาศ 380 มิลลิเมตรปรอท.....	58
4.20 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อ ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดันสุญญากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท.....	59
4.21 เปรียบเทียบค่าสีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวกซื้อรวมถึงห้างสรรพสินค้า.....	62
4.22 กราฟมาตรฐานตะกั่ว.....	63

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

HU	=	ค่าชกยูนิต
H	=	ความสูงของไขขาว (มิลลิเมตร)
W	=	น้ำหนักฟองไข (กรัม)
σ_1	=	ความเค้นตามแนวแกน (นิวตันต่อตารางเมตร)
σ_2	=	ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (นิวตันต่อตารางเมตร)
F	=	แรงที่กระทำ (นิวตัน)
A	=	พื้นที่สัมผัส (นิวตันต่อตารางเมตร)
P	=	ความดันภายในภาชนะ (นิวตันต่อตารางเมตร)
r	=	รัศมีภายในภาชนะ (เมตร)
t	=	ความหนาภายในภาชนะ (เมตร)
S	=	ความเค้นที่ยอมให้สูงสุดของวัสดุ (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
E	=	ประสิทธิภาพรอยต่อเชื่อม
C.A.	=	ค่าเพื่อการกัดกร่อน 3.2 มิลลิเมตร
N	=	นอร์มัลของด่างที่ใช้ในการไทเทรต
V	=	ปริมาณของด่างที่ใช้ในการไทเทรตจนถึงจุดยุติ (มิลลิลิตร)
MV	=	น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.99
W_{ad}	=	ร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น
W_i	=	น้ำหนักไขเปิดก่อนการแช่ไขในสภาวะไฮโดรสแตติก (กรัม)
W_f	=	น้ำหนักไขเปิดภายหลังแช่ไขในสภาวะไฮโดรสแตติก (กรัม)
W_p	=	น้ำหนักของไขที่ซั้งในอากาศ (กรัม)
W_b	=	น้ำและบีกเกอร์ก่อนจุ่มไข
W_T	=	น้ำและบีกเกอร์ขณะจุ่มไข
MC	=	ร้อยละของความชื้น
W_1	=	น้ำหนักเริ่มต้นของถ้วยอบแห้ง (กรัม)
W_2	=	น้ำหนักของถ้วยและไขเชื่อมมาก่อนอบแห้ง (กรัม)
W_3	=	น้ำหนักถ้วยอบแห้งและไขเชื่อมมาหลังอบแห้ง (กรัม)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

C	=	ความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างลบความเข้มข้นของตะกั่วใน แบลงค์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
D	=	แฟกเตอร์ของการเจือจาง
wt. sp.	=	น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)
ΔE	=	ค่าความแตกต่างของสี
L_p^*, a_p^*, b_p^*	=	ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ได้จากกระบวนการผลิตภายใต้ความดัน
L_0^*, a_0^*, b_0^*	=	ค่าสีของไข่เยี่ยวม้าในท้องตลาดซึ่งมีเครื่องหมายการค้า



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไข่เป็ดเป็นสินค้าการเกษตรด้านปศุสัตว์ที่ผลิตเพียงพอกับการบริโภคภายในประเทศ โดยขั้นตอนการผลิตไข่เป็ดนับตั้งแต่การเลี้ยงระดับฟาร์มจนถึงระดับผู้บริโภค ยังคงเป็นการผลิตในท้องถิ่นเป็นส่วนใหญ่มารวม ๆ แล้วประเทศไทยเลี้ยงเป็ด 157,547 ครัวเรือน ผลิตไข่เป็ดได้วันละราว ๆ 9,872,297 ล้านฟอง (กลุ่มการสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศกรมปศุสัตว์, 2555) และโดยปกติแล้ว เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างไข่เป็ดกับไข่ไก่ พบว่าไข่เป็ดมีขนาดใหญ่กว่าไข่ไก่เพียงเล็กน้อย ไข่เป็ดมีไข่แดงสีเหลืองสดกว่าไข่ไก่ สำหรับคนทำขนมอบหลายคนเลือกไข่เป็ดมากกว่า เพราะทำให้ได้เนื้อขนมที่ดีและคงรูปร่างได้ดีกว่า นอกจากนี้ไข่เป็ดยังสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ได้หลากหลายรูปแบบ บางกรรมวิธีทำให้ช่วยเก็บรักษาได้นานและใช้งานสะดวกขึ้น อาทิเช่น ไข่ผง ไข่เค็ม และไข่เยี่ยวม้า ฯลฯ

การผลิตไข่เยี่ยวม้าเป็นการถนอมอาหารอย่างหนึ่งที่คนจีนสมัยโบราณค้นพบ ไข่เยี่ยวม้าจัดเป็นอาหารหมักชนิดหนึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง Alkaline food (สุภาพ อัจฉริยศรีพงศ์, 2556) ซึ่งเกิดจากการใช้กรรมวิธีทำให้เป็นด่างสามารถใช้ไข่เป็ด ไข่ไก่ และไข่นกกระทา ผลิตได้โดยนำไข่ไปแช่หรือ หมักในส่วนผสมของ ใบชา ปูนขาว เกลือป่น จี๊ถั่ว แกลบ เมื่อไข่แดงได้ที่แล้วสามารถเก็บในที่ เย็นไว้ได้นานถึง 1 ปี คนจีนเรียกไข่ชนิดนี้ว่า Pidan ชื่อภาษาอังกฤษของไข่เยี่ยวม้าเรียกได้ดังนี้ Alkalized eggs, Fermented eggs, Pickled eggs, Chinese style, Preserved lime eggs, Chinese preserved eggs, One Hundred Year Old eggs, Thousand year old eggs และ Century eggs ในปัจจุบันไข่เยี่ยวม้าเป็นที่รู้จักกันแพร่หลายในประเทศ กรรมวิธีการผลิตสามารถแบ่งได้เป็นสามวิธี ขึ้นอยู่กับส่วนผสมได้แก่ วิธีเคลือบน้ำโคลน เคลือบผิวไข่บาง ๆ แล้วนำไปกลิ้งบนผงส่วนผสม Rolling powder วิธีพอก Coating method และวิธีแช่ Immersion method สำหรับกระบวนการแช่ในสารละลายใช้เวลาตั้งแต่ 30-60 วัน หลังจากผ่านกระบวนการแช่ในสารละลายแล้วนำไข่มาล้างผึ่งให้แห้งแล้วเคลือบผิวด้วยพาราฟินเพื่อเก็บรักษา การแปรรูปไข่เยี่ยวม้าเกิดจากการแพร่ของสารละลายผ่านเปลือกไข่และเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเนื้อไข่ โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์ร่วมกับน้ำ ส่วนผสมดังกล่าวเมื่อแทรกผ่านเปลือกไข่และเนื้อไข่เกิดการจับตัวเป็นวุ้นของไข่ขาว

การย่อยโปรตีนทำให้เกิดโพลีเปปไทด์และในที่สุดได้กรดอะมิโน การสลายโปรตีนทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ไปทำปฏิกิริยากับเหล็กในไข่แดงกลายเป็นสีน้ำตาล ส่วนที่เป็นสีน้ำตาลแบบสีชาและมีลักษณะเป็นวุ้นแข็งเพราะปฏิกิริยาระหว่างกลูโคสในไข่ขาวกับกรดอะมิโนและเม็ดสีของใบชา เปลือกไข่มีสีขาวอมเทา ลักษณะเฉพาะตัวของไข่เยี่ยวม้ามีกลิ่นฉุนคล้ายกลิ่นแอมโมเนีย สำหรับกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าเพื่อให้ได้คุณภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยในเรื่องของ ความเข้มข้น สารละลายต่าง อุณหภูมิ ความหนืดของไข่ และระดับค่า pH ในไข่ขาวไม่ควรเกิน 11.6 นอกจากนี้ การที่จะเกิดไข่เยี่ยวม้าได้เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับ การซึมผ่านของสารละลายเข้าไปยังเนื้อไข่ กล่าวคือ การใช้ความดันมีผลต่อการซึมผ่าน วิธีในการเพิ่มความดันในสารละลายโดยการอัดอากาศด้วย Centrifugal pump เข้าไปช่องว่างอากาศเหนือผิวสารละลายที่ 2 และ 4 บาร์ ส่งผลให้ความดันในสารละลายเพิ่มขึ้นเป็นการย่นระยะเวลากระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า ณัฐคนัย ตันทวิรุพห์ และ สุวรรณ หอมหวล (2554), ได้ทำการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ความดันไฮโดรสแตติกเพื่อผลิตไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 381 มิลลิเมตร ยาว 2500 มิลลิเมตร สามารถบรรจุไข่ได้ 630 ฟอง ทำการทดสอบของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 2 และ 4 บาร์ เทียบกับการดองที่ความดันบรรยากาศพบว่าสามารถลดระยะเวลาในการผลิตไข่เยี่ยวม้าจากวิธีการปกติได้ประมาณ 10 วัน สามารถทำความดันได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อระดับความดันภายในเริ่มลดอันเนื่องมาจากส่วนผสมที่เป็นของเหลวซึมผ่านเปลือกไข่สามารถควบคุมประสิทธิภาพการแพร่ผ่านของสารละลาย

อย่างไรก็ตามการเกิดการเปลี่ยนแปลงจากไข่สดไปเป็นไข่เยี่ยวม้าขึ้นอยู่กับค่า pH ที่เหมาะสมหากมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยหรือมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อคุณภาพไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาถึงอิทธิพลของความดันและระยะเวลาในการแช่ไข่เป็ดด้วยสารละลายต่างเพื่อการผลิตไข่เยี่ยวม้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อพัฒนาถึงความดันไฮโดรสแตติกให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของความดัน และระยะเวลาในการแช่ไข่ในสารละลายต่างต่อการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยวิธีการแช่ในสารละลายในระดับความดัน 1, 2, 3, 4 บาร์ และสุญญากาศ 380 และ 760 มิลลิเมตรปรอท ด้วยไข่เป็ด
- 1.3.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในทางเคมีกายภาพของไข่เยี่ยวม้า

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

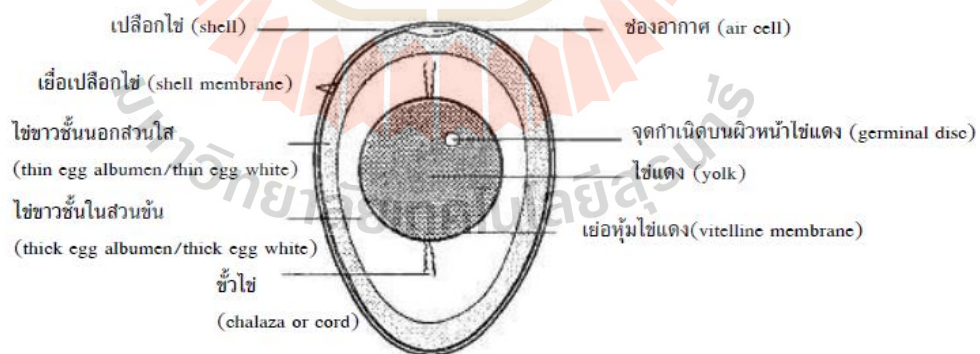
- 1.4.1 ลดระยะเวลาการผลิตไข่เยี่ยวม้าให้สั้นลงจากกระบวนการผลิตโดยการแช่แบบดั้งเดิม และสามารถนำความรู้เทคนิคด้านไฮโดรสแตติก ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไข่เยี่ยวม้า
- 1.4.2 ทราบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของไข่เป็ด

ไข่เป็นผลผลิตอีกชนิดหนึ่งที่ได้จากสัตว์ปีกพวกไก่และเป็ด ซึ่งมีความสำคัญในแง่ที่ ไข่ เป็นอาหารของมนุษย์ ปัจจุบันมีการบริโภคไข่กันอย่างแพร่หลายทั้งการบริโภคแบบไข่สดและไข่แปรรูป เราใช้ไข่ปรุงอาหารต่าง ๆ ทั้งคาวและหวาน อาหารพวกของหวาน เช่น ขนมเค้ก ทองหยิบ ทองหยอด ฝอยทอง เม็ดขนุน ฯลฯ ส่วนของคาวก็ใช้ในการทอด ผัด อบ และต้ม เป็นต้น หากต้องการแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาที่นิยมกันมาก ได้แก่ การผลิตไข่เค็มและไข่เยี่ยวม้าจากไข่เป็ดสดวิธีดังกล่าวสามารถยืดอายุการเก็บรักษานานถึง 3 เดือน สำหรับผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตได้ต้องมีคุณลักษณะที่ดีกล่าวคือ เกิดเจลไข่เยี่ยวม้าสีน้ำตาลขอบไข่แดงสีเทาและกลางไข่แดงให้สีส้มเทา กลิ่นไม่ฉุน ดังนั้นก่อนกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าควรคำนึงถึงการคัดเลือกไข่เป็ดสด ด้วยการตรวจสอบรอยแตกร้าว ผ่านการล้างทำความสะอาดรวมถึงการตรวจวัดคุณภาพความสดของไข่โดยใช้ค่า (Haugh unit: HU) นอกจากนี้ส่วนประกอบของไข่ที่ดี (รูปที่ 2.1) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของไข่เป็ด

- เปลือกไข่ (Shell) เปลือกไข่มีลักษณะแข็ง แต่มีรูพรุน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้มีความสามารถในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์ที่จะเข้าสู่ฟองไข่ได้เมื่อเก็บรักษาไข่ในสภาพที่แห้ง และยังช่วยป้องกันการระเหยของความชื้นจากฟองไข่ สีเปลือกไข่เป็นสีขาว

- เยื่อเปลือกไข่ (Shell membrane) เยื่อเปลือกไข่มี 2 ชั้น คือเยื่อเปลือกไข่ด้านใน (Inner shell membrane) และเยื่อเปลือกไข่ด้านนอก (Outer shell membrane) เยื่อเปลือกไข่ด้านนอกจะติดอยู่กับเปลือกไข่ ส่วนเยื่อเปลือกไข่ด้านในจะติดอยู่กับไข่ขาว เยื่อเปลือกไข่ทำหน้าที่ในการป้องกันเชื้อโรคเข้าสู่ฟองไข่

- ช่องอากาศ (Air cell) โดยปกติจะพบอยู่บริเวณด้านบนของไข่ ระหว่างเยื่อหุ้มเปลือกด้านในและด้านนอก ช่องอากาศเกิดการหดตัวขององค์ประกอบภายในฟองไข่เมื่ออุณหภูมิของไข่ลดลงภายหลังจากการวางไข่ เนื่องจากมีการระเหยของความชื้น ช่องอากาศจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออายุไข่เพิ่มมากขึ้น

- ไข่ขาว (Egg white or thick albumen) ประกอบด้วยไข่ขาวชั้น (Inner firm or thick albumen) และไข่ขาวเหลว (Outer thin albumen) ไข่ขาวเหลวจะกระจายตัวอยู่รอบ ๆ ไข่ขาวชั้น ไข่ที่มีไข่ขาวชั้นและคงรูปนั้นแสดงว่าเป็นไข่ที่มีคุณภาพดี

- ไข่แดง (Yolk) มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีเยื่อบาง ๆ หุ้มอยู่รอบ ๆ สีของไข่แดงผันแปรขึ้นอยู่กับอาหารที่แม่เป็ดกิน อย่างไรก็ตามสีไข่แดงนั้นไม่มีผลต่อคุณค่าทางอาหารแต่อย่างใด

2.2 การตรวจสอบความสดไข่

การตรวจสอบคุณภาพภายในของไข่ที่แม่นยำที่สุด คือการต่อไข่ตรวจสอบ โดยการต่อไข่วางบนกระดาษ เพื่อทำการวัดความสูงไข่ขาว และค่า Haugh unit (HU) ซึ่งค่า HU นี้คำนวณได้จากสูตรที่นำเสนอโดย Haugh จากค่าความสูงของไข่ขาวชั้นและน้ำหนักของฟองไข่ (Haugh, 1973) ดังแสดงไว้ในสมการ (2.1)

$$HU = 100 \times \log(H + 7.57 - 1.7W)^{0.37} \quad (2.1)$$

เมื่อ HU	คือค่าฮกยูนิต
H	คือความสูงของไข่ขาว (มิลลิเมตร)
W	คือน้ำหนักฟองไข่ (กรัม)

โดยไข่ที่เหมาะสมต่อการบริโภคควรมีค่า HU ไม่ต่ำกว่า 60 นอกจากนี้แล้วยังสามารถวิเคราะห์สภาพของไข่แดงและไข่ขาวซึ่งสามารถแบ่งเกรดไข่ได้ โดยการเปรียบเทียบลักษณะของไข่แดงและไข่ขาว

2.3 ไช้เยี่ยวม้า

ไช้เยี่ยวม้าคือ การแปรรูปไข่เพื่อการบริโภคในรูปแบบหนึ่งของชนชาติจีนที่มีมาแต่โบราณ โดยใช้กรรมวิธีแปรรูปให้เป็นค้าง สามารถทำได้กับไข่เป็ด ไข่ไก่ โดยกรรมวิธีในการผลิตไช้เยี่ยวม้าสามารถแบ่งเป็น 3 วิธี ขึ้นอยู่กับส่วนผสมได้แก่ วิธีเคลือบ (Rolling powder) วิธีพอก (Coating method) และวิธีแช่ (Immersion method)

2.3.1 คุณลักษณะของไช้เยี่ยวม้า

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพช. 149/2546 ได้กำหนดลักษณะทั่วไปของไช้เยี่ยวม้าไว้ดังนี้ เมื่อล้างสิ่งทีเคลือบเปลือกไช้เยี่ยวม้าออกแล้ว เปลือกไข่ต้องไม่แตก ร้าว หรือบุบ ไม่พบจุดสีดำ แต่อาจมีจุดสีน้ำตาล ลักษณะภายใน ไข่ขาวต้องเป็นวุ้นใส สีน้ำตาล หรือสีเทาเข้ม อ่อนนุ่ม และมีความคงตัวหยุ่นตัวดี เมื่อผ่าไช้เยี่ยวม้าออกเป็น 2 ซีกตามยาว ขนาดของช่องอากาศภายในต้องมีขนาดไม่เกิน 1 ใน 4 ของความยาวนั้น ไข่แดงกับไข่ขาวแยกชัดเจน และแยกจากกันได้ง่าย ผิวนอกทั้งหมดของไข่แดงต้องมีสีสม่ำเสมอ กลิ่นรสที่ติดตามธรรมชาติของไช้เยี่ยวม้า ไม่มีกลิ่นฉุนของแอมโมเนียและ ปราศจากกลิ่นรสอื่นที่ไม่พึงประสงค์ นอกจากนี้จุลินทรีย์ซาลโมเนลลา ต้องไม่พบในตัวอย่าง 25 กรัม สตาฟีโลค็อกคัส ออเรียส ต้องไม่พบในตัวอย่าง 1 กรัม และคลอสทริเดียม เพอร์ฟริงเจนส์ ต้องไม่พบในตัวอย่าง 0.1 กรัม และปริมาณตะกั่วที่พบต้องไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในการผลิตไช้เยี่ยวม้า 100 ฟอง สามารถพบไช้เยี่ยวม้าไม่เป็นตามคุณลักษณะที่ต้องการ 20 ฟอง เนื่องจากไข่ที่แช่ในสารละลายค้างไม่ได้ดี (Immature) เกิดจากไข่ที่มีเปลือกหนาเกินไปทำให้การซึมผ่านของสารละลายค้างช้า หรือเกิดจากระยะเวลาในการแช่ในสารละลายค้างไม่นานพอ ทำให้ไข่ที่มีลักษณะของไข่ขาวนิ่มและมีความหนืดสูง มีสีอ่อน ไข่แดงยังเหลวมีสีส้มอมเหลือง สาเหตุดังกล่าวอาจเกิดจากการตกตะกอนของสารเคมีที่ใช้แช่ไข่ทำให้ไข่ที่อยู่ส่วนบนและส่วนล่างของภาชนะได้รับสารละลายค้างไม่เท่ากัน นอกจากนี้การแช่ไข่ในสารละลายค้างนานเกินไป (Over mature) อาจทำให้ไข่ขาวของไช้เยี่ยวม้าไม่เกิดวุ้นสีน้ำตาล แต่พบเป็นของเหลวสีน้ำตาล หรือเรียกว่าไข่ไม่แข็ง (Liquefaction) สาเหตุเกิดจากไข่เก่าเกินไป สารละลายค้างมีความเข้มข้นสูงมาก และอุณหภูมิในการแช่ไช้เยี่ยวม้าสูง ส่งผลให้ไช้เยี่ยวม้าที่ผลิตออกมามี คุณลักษณะไม่ได้ตามต้องการ เรียกว่า Watery alkalized duck egg

2.3.2 กระบวนการผลิตไช้เยี่ยวม้า

สำหรับวิธีการทำไช้เยี่ยวม้ามี 3 วิธี คือ การพอก (Coating method) โดยนำส่วนผสมที่เป็นเบสและส่วนประกอบอื่นกับดินเหนียว (Mud) และใช้พอกที่ผิวเปลือกไข่ให้หนาประมาณ 1 เซนติเมตร ก่อนจะบรรจุในภาชนะจนเป็นไช้เยี่ยวม้า การแช่ (Immersion method)

โดยนำไข่ไปแช่ในสารละลายเบสและสารปรุ้งแต่งกลิ่นรส ใช้ระยะเวลาหนึ่งก็นำมาบรรจุและเก็บ ส่วนวิธีแช่ร่วมกับการพอก (Combination method) โดยเริ่มจากนำไข่แช่ในสารละลายเบสระยะ หนึ่งแล้วนำออกมาพอกด้วยดินเหนียวที่มีส่วนผสมของเบสอีกครั้งเก็บไข่ไว้ในที่สะอาดแห้ง

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดในไข่เยี่ยวม้าระหว่างการแช่ เกิดขึ้นกับไข่เป็ดในระหว่างการทำปฏิกิริยากับเบส ไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้าจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลคล้ำ ส่วนไข่แดงจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวคล้ำ และการเติมโซเดียมไปเป็นการเพิ่มกลิ่นรสของไข่เยี่ยวม้า ไข่เยี่ยวม้าจะมีกลิ่นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และกลิ่นแอมโมเนียเพราะกรดอะมิโนที่มีโลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น ซีสทินจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ Desulphydrase และ Deaminase ด้วยเหตุนี้จึงเกิดกลิ่นที่เป็นลักษณะเฉพาะของไข่เยี่ยวม้าและการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสีของไข่แดง ไปเป็นสีเขียวคล้ำที่เกิดจากการรวมของไฮโดรเจนซัลไฟด์และเฟอร์ริกไอออนที่มีในไข่แดงกลายเป็นเฟอร์ริกซัลไฟด์เกิดเป็นสีเขียวคล้ำ และการเติม Metallic salts ไข่เยี่ยวม้าจะมีสีเขียวอ่อนหรือสีเหลืองอ่อน (พวงศักดิ์ มะโนชัย, 2542)

การเร่งกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าโดยการสร้างความดันไฮโดรสแตติกที่สารละลายโดยตรง จากการทดลองพบว่า การดองด้วยเครื่องที่สร้างเมื่อใช้ความดันสารละลายที่ 2 บาร์ และ 4 บาร์ เทียบกับการดองแบบไม่ใช้ความดัน มีผลต่อการแพร่สารละลายผ่านเปลือกไข่เข้าสู่ไข่ขาวเร็วขึ้นกล่าวคือทำให้ค่า pH สารละลายที่ใช้ดองเริ่มเข้าใกล้ 12 เมื่อเทียบกับการดองแบบไม่ใช้ความดัน ทำให้ใช้เวลาดองได้เร็วกว่าการดองแบบธรรมดาประมาณ 10 วัน ส่วนการให้ความดันต่อสารละลายที่ต่างกันคือ 2 บาร์และ 4 บาร์ จะมีผลต่อระดับ pH เฉพาะช่วงเวลาเริ่มต้นการดองจนถึง 4 วัน หลังจากนั้นจะไม่ต่างกัน โดยการดองที่ความดันของสารละลาย จนมีค่า pH ของไข่ขาวประมาณ 11 เมื่อมีการเพิ่มความดันที่สารละลายขณะดองที่ 2 บาร์ และ 4 บาร์ อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่ไข่ขาวเร็วขึ้น แต่ความดันที่สูงถึง 4 บาร์ ทำให้มีโอกาสรั่วของเปลือกไข่มากขึ้น (ณัฐฉานย์ ตันทวิรุพห์ และสุวรรณ หอมหวล, 2554)

2.4 ความดันไฮโดรสแตติก

กลศาสตร์ของน้ำ (Hydromechanics) คือ ส่วนประกอบทั้งหมดซึ่งเกี่ยวข้องกับของไหลแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ Hydrostatics และ Hydrodynamics Hydrostatics ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับสมดุลของของไหลและเกี่ยวกับแรงที่กระทำเมื่อของไหลอยู่กับที่ Hydrodynamics ส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของของไหลภายใต้แรงที่มากกระทำ

2.4.1 หน่วยของความดัน

ความดัน (Pressure) คือ แรงที่ได้จากการกระทำของของไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ความดันของของไหลที่หยุดนิ่ง ณ จุดใด ๆ จะเท่ากันทุกทิศทาง สำหรับของเหลว ความดันจะเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกอันเนื่องมาจากน้ำหนักของของเหลว ส่วนความดันของก๊าซเราอาจจะพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงความดันนั้นไม่เกิดขึ้นหากการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงไม่มากนัก

หรือเรียกว่ามีความดันเท่ากันตลอดหรือเป็นเอกกรุป (Uniform) เพราะน้ำหนักของก๊าซนั้นน้อยมาก แต่ถ้าหากว่ามีการเปลี่ยนแปลงความสูงที่มากพอสมควรก็อาจจะพิจารณาว่าความดันนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูงเพื่อให้การคำนวณถูกต้องมากยิ่งขึ้น ส่วนมิติของความดันจะเป็นมิติของแรงต่อด้วยมิติของพื้นที่ สำหรับหน่วยของความดันในหน่วยต่าง ๆ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$1 \text{ ปาสคาล (Pa)} = 1 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร (N/m}^2\text{)}$$

$$1 \text{ บาร์ (bar)} = 10^5 \text{ ปาสคาล (Pa)} = 0.1 \text{ เมกะปาสคาล (MPa)} = 100 \text{ กิโลปาสคาล (kPa)} = 1 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm}^2\text{)}$$

$$1 \text{ บรรยากาศ (atm)} = 1.01325 \text{ ปาสคาล (Pa)} = 101.325 \text{ กิโลปาสคาล (kPa)} = 1.01325 \text{ บาร์ (bars)} = 760 \text{ มิลลิเมตรปรอท (mmHg)}$$

โดยที่ระดับอัตราเร่งมาตรฐานสากล ($g = 9.807 \text{ m/s}^2$ ที่ระดับน้ำทะเลตำแหน่งเส้นรุ้ง 45 องศา) จะมีค่าความดันบรรยากาศมาตรฐานเท่ากับ 1.01325 บาร์ (bar)

การพิจารณาความดันนั้นอาจพิจารณา ได้เป็นทั้งแบบสัมบูรณ์และแบบสัมพัทธ์ ดังนั้นจึงสามารถแสดงค่าความดันได้เป็น 2 วิธีคือแสดงเป็นค่าความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure, P_{abs}) โดยเทียบกับค่าที่ไม่มี ความดันเลยหรือที่เรียกกันว่าสุญญากาศ และการแสดงค่าความดันที่เทียบกับความดันบรรยากาศขณะนั้น โดยการอ่านค่าความดันเทียบกับค่าความดันบรรยากาศยังสามารถแยกย่อยได้อีก 2 แบบคือ

1. ความดันเกจ (Gage pressure, P_{gage}) คือเป็นค่าความดันที่อ่านมาจากมาตรวัดความดันในกรณีที่เป็นความดันที่สูงกว่าความดันบรรยากาศ เนื่องจากมาตรวัดความดันส่วนใหญ่จะต้องเปรียบเทียบค่าความดันที่วัดกับค่าความดันบรรยากาศรอบ ๆ ชั่วขณะนั้น ทำให้ค่าที่อ่านออกมาได้นั้นเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความดันที่วัดและความดันบรรยากาศขณะนั้น

2. ความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure, P_{vac}) ความดันแบบนี้จะคล้ายกับความดันเกจแต่จะใช้ในกรณีที่มีความดันวัดนั้นต่ำกว่าความดันบรรยากาศเท่านั้น กรณีที่เครื่องวัดอ่านค่าความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะได้ว่า ความดันสุญญากาศ = ความดันบรรยากาศ - ความดันสัมบูรณ์หรือจาก

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad (2.2)$$

2.4.2 การแปรรูปอาหารโดยใช้ความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure)

การถนอมรักษาอาหารโดยใช้ความดันสูงมีมากกว่า 100 ปีแล้ว ซึ่งได้อธิบายการฆ่าเชื้อแบคทีเรียโดยใช้ความดันสูง งานวิจัยต่าง ๆ ที่มีการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเช่น การประยุกต์ใช้ความดันสูงในการแปรรูปและถนอมอาหารในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเริ่มใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทแฮม น้ำผลไม้ อาหารแปรรูปในภาชนะบรรจุ โดยมีการใช้ความดันในช่วง 300 - 700 เมกะปาสคาล หลักการพื้นฐาน 2 หลักการที่ใช้อธิบายผลของความดันไฮโดรสแตติกที่มีต่ออาหาร

1. หลักการไอโซสแตติกของปาสคาล (Pascal's isostatic) ซึ่งอธิบายว่าการใช้ความดันกับอาหารและผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ จะส่งผลให้อาหารและผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพถูกกระทำด้วยความดันในลักษณะที่เหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ทันที การใช้ความดันไม่ขึ้นกับปริมาตรขนาด และ รูปร่างของตัวอย่าง (Knorr, 1995)

2. หลักการของลีชาเตลิเออร์ (Le chatelier) อธิบายว่าการใช้ความดันทำให้ตัวอย่างมีสภาวะการเปลี่ยนสถานะ (Phase transition) และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ผิดปกติ นอกจากนั้นความดันยังอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการสร้างพลังงาน ผลของความดันไฮโดรสแตติกที่มีต่อผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นอยู่กับระดับความดันที่ใช้ ระยะเวลาในการอัดความดัน ค่าความเป็นกรดต่างของอาหาร ปริมาณน้ำอิสระในการอาหาร Water activity (a_w) และความเข้มข้นของเกลือ เป็นต้น

2.4.3 ผลของความดันไฮโดรสแตติกที่มีต่อน้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาหาร ผลของความดันที่มีต่อน้ำจึงมีความจำเป็นที่จะต้องได้รับการศึกษา ของเหลว เรียกว่าเป็น Incompressible fluid ความดันไฮโดรสแตติกมีผลทำให้น้ำมีปริมาตรลดลง แต่เมื่อเทียบกับก๊าซแล้วถือว่าลดลงน้อยมาก อาหารที่มีน้ำอยู่น้อยมาก และมีก๊าซอยู่เพียงเล็กน้อยการบีบอัดจะให้ผลเปรียบเสมือนกับว่าเป็นการบีบอัดน้ำ การใช้ความดันยังก่อให้เกิดการลดลงของค่าความเป็น กรด - ต่าง ของอาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกด้วย เครื่องมือที่ใช้ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารด้วยความดันสูงคล้ายคลึงกับการแปรรูปโดย

ใช้ความร้อนซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปคือ เป็นระบบแบบครึ่งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทั่วไปเครื่องมือประกอบด้วยถึงทนความดัน และเครื่องผลิตความดันสูง เมื่อนำอาหารที่วางในภาชนะบรรจุใส่ลงในถังแล้วปิดฝาด้านบนบนเครื่อง อาหารจะไม่เปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากได้รับความดันเท่ากันทุกด้านรอบเวลาที่ใช้ทั่วไปเป็นเวลาสั้น ๆ ไม่เกิน 15 นาที เมื่อได้รับความดันที่ต้องการแล้ว ระบบปั๊มจะหยุดวาล์วปิด และความดันจะคงที่โดยไม่จำเป็นต้องให้พลังงานแก่ระบบอีก (วิล รังสาทอง, 2545)

2.4.4 ผลของความดันที่มีต่อเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์มีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์ ระดับความดัน อุณหภูมิ เวลาของการอัดความดัน และส่วนประกอบของอาหาร มีความไวต่อความดันมากกว่าเซลล์ในช่วง Stationare phase แบคทีเรียแกรมบวกสามารถทนต่อความดันได้มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ Vegetative cell รวมทั้งสปอร์ของยีสต์และรา ถูกทำลายได้ที่ความดัน 200 ถึง 300 เมกกะปาสกาล (MPa) อย่างไรก็ตามสปอร์ของแบคทีเรียมีความทนทานมากและมีชีวิตรอดได้ที่ความดันสูงกว่า 1000 เมกกะปาสกาล (MPa) ไวรัสบางชนิดสามารถทนความดันสูงได้ ผลของความดันไฮโดรสแตติกมีความสำคัญเนื่องจากความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยอมให้สารผ่านเข้าออกของเซลล์เมมเบรน และทำให้เกิดการรั่วของสารภายในเซลล์ ความดันสามารถทำให้อาหารมีความเป็นกรดต่างต่ำลงได้ ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (สุภมาส ปั้นปัญญา, 2551)

2.5 ถึงรับความดัน

ภาชนะความดันผนังบางภาชนะความดันใช้กันมากในงานอุตสาหกรรม มีรูปทรงพื้นฐานง่าย ๆ เช่น ทรงกลมหรือทรงกระบอกที่มีผิวปิดหัวท้ายเป็นครึ่งทรงกลม ทรงกรวย ทรงรี หรือผิวปิดแบนเรียบ ภาชนะความดันที่ความหนาของผนัง (t) มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง (r) ถ้า r/t มีค่ามากกว่า 10 ก็จัดได้ว่าเป็นภาชนะผนังบาง หลักการในการออกแบบความหนาของผนังนั้นจะต้องใช้ความเค้นสูงสุดในเนื้อวัสดุที่ทำภาชนะมีค่าต่ำกว่าความเค้นครากของวัสดุนั้น

2.5.1 ชนิดของภาชนะ

ชนิดของภาชนะสามารถแบ่งแยกออกเป็นหลายแบบตามลักษณะต่าง ๆ ดังนี้ การใช้งานเช่น ภาชนะบรรจุเครื่องปฏิกรณ์ หม้อน้ำ เครื่องผสม และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หากจำแนกตามวัสดุโครงสร้าง เช่น ทำด้วยเหล็กกล้า เหล็กหล่อ ทองแดง พลาสติก แยกตามวิธีการสร้าง เช่น การเชื่อม การหล่อ การบัดกรี การยึดด้วยหน้าแปลน แยกตามโครงสร้างเลขาคณิต เช่น ทรงกระบอก ทรงกลม ทรงกรวย หรือผสมกัน

และเมื่อแยกตามลักษณะของภาวะ เช่นภาวะที่กระทำอาจเป็นความดันภายใน หรือความดันภายนอก แยกตามประเภทอุณหภูมิของผนัง ได้รับความร้อนและไม่ได้ความร้อน แยกตามการกระทำเกี่ยวกับการกักความร้อน ภาชนะได้รับอิทธิพลของการกักความร้อนปานกลางหรือมาก นอกจากนี้ยังสามารถแยกตามความหนาของผนังจะถือว่าเป็นผนังบางเมื่อ $d_o/d_i < 1.5$ และผนังหนาเมื่อ $d_o/d_i > 1.5$ สำหรับการแยกตามโครงสร้างเรขาคณิตสำหรับใช้ในการออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติกครั้งนี้ประกอบไปด้วย

ภาชนะทรงกระบอก

ภาชนะทรงกระบอกนิยมใช้กันมากในการผลิตเป็นภาชนะ เพราะการสร้างทำได้ง่ายและมีความแข็งแรง ภาชนะทรงกระบอกอาจวางในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้ แต่แนวตั้งมักนิยมใช้กันมากในกรณีของภาชนะผนังบางภายใต้ความดันไม่สูง การออกแบบภาชนะทรงกระบอกแนวตั้งสามารถตัดปัญหาเกี่ยวกับความเค้นดัดเนื่องจากน้ำหนักของภาชนะและของไหลภายในออกไปได้เมื่ออยู่ภายใต้ความดันจะมีความเค้นในสองแนวคือ ความเค้นแนวแกน และแนวเส้นรอบวงความเค้นแนวแกน (Longitudinal stress) เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนของทรงกระบอกจากสมการ (2.3)

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{P\pi r^2}{2\pi r t} = \frac{PD}{4t} \quad (2.3)$$

แนวเส้นรอบวง (Hoop stress) เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวเส้นรอบวงของหน้าตัดทรงกระบอกคำนวณได้จากสมการ (2.4)

$$\sigma_2 = \frac{F}{A} = \frac{P(2r)l}{2lt} = \frac{PD}{2t} \quad (2.4)$$

σ_1	คือความเค้นตามแนวแกน (นิวตันต่อตารางเมตร)
σ_2	คือความเค้นตามแนวเส้นรอบวง (นิวตันต่อตารางเมตร)
F	คือแรงที่กระทำ (นิวตัน)
A	คือพื้นที่สัมผัส (นิวตันต่อตารางเมตร)
P	คือความดันภายในภาชนะ (นิวตันต่อตารางเมตร)
r	คือรัศมีภายในภาชนะ (เมตร)
t	คือความหนาภายในภาชนะ (เมตร)

2.5.2 ทฤษฎีการออกแบบถังรับแรงดัน

การออกแบบถังรับแรงดันจะอ้างอิงเกณฑ์มาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมเครื่องกลของประเทศสหรัฐอเมริกา (American society of mechanical engineering; ASME, 1980) boiler and pressure vessel code มีลักษณะดังนี้

1. มีความดันภายในไม่เกิน 30 เมกะปาสกาล
2. ไม่ได้ใช้งานเพื่อเป็นถังทนไฟไม่ได้ใช้งานนิวเคลียร์
3. ไม่ใช่ถังที่สร้างขึ้นด้วยหมุดย้ำ
4. ไม่ใช่ถังรับแรงดันที่มีโครงสร้างซับซ้อน

ในการออกแบบถังรับแรงดันจะพิจารณาแรงกระแทก รวมถึงการกระเพื่อมหรือการขึ้นลงอย่างรวดเร็วของความดัน (Fluctuation) น้ำหนักของถังและของที่บรรจุ ภาระแรงที่เพิ่มเข้ามาของอุปกรณ์ต่าง ๆ วัสดุความร้อนที่นำมาหุ้มถัง ระบบท่อ และผลกระทบทางความร้อนใช้งานในสถานะใช้งาน รวมทั้งอาจพิจารณาถึง วัสดุที่สามารถนำมาใช้งาน และความต้านทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุ ประกอบด้วย หลักเกณฑ์ในการออกแบบถังรับแรงดัน

การหาความหนาของถัง (Thickness of vessel) ความหนาของถังมักจะหมายถึงความหนาจริงของถัง ภายหลังจากการประกอบ ซึ่งเป็นความหนาที่วัดได้จริง นอกจากนี้ยังมีความหนาอื่น ๆ อีกคือ ความหนาที่คำนวณได้ซึ่งหมายถึงความหนาที่หาได้ด้วยการใช้สูตรคำนวณ โดยไม่รวมค่าเผื่อการกัดกร่อน และความหนาที่น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงความหนาที่คำนวณได้บวกค่าเผื่อการกัดกร่อนด้วย ถือเป็นความหนาค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ในการสร้างถังรับแรงดันเกณฑ์ในการกำหนดความหนาจริงของแผ่นวัสดุที่ใช้ทำถังสำหรับส่วนที่รับแรงดันของถังรับแรงดัน และอุปกรณ์ประกอบถังสามารถกำหนดดังนี้

1. กรณีแผ่นเหล็กกล้าผสมต่ำและเหล็กกล้าคาร์บอน ความหนาต้องไม่น้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าเผื่อการกัดกร่อน
2. กรณีแผ่นเหล็กกล้าผสมมาก ความหนาต้องไม่น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตรสำหรับสถานะที่ไม่มีการกัดกร่อน และต้องไม่น้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร สำหรับสถานะที่มีการกัดกร่อน
3. กรณีแผ่นโลหะนอกตระกูลเหล็ก ความหนาต้องไม่น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตรสำหรับสถานะที่ไม่มีการกัดกร่อน และต้องไม่น้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร สำหรับสถานะที่มีการกัดกร่อน

ค่าเผื่อการกัดกร่อน (Corrosion allowances)

สำหรับถังรับแรงดันที่ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าคาร์บอน หรือเหล็กกล้าผสมต่ำ ซึ่งใช้งานกับอากาศอัดไอน้ำ หรือน้ำจะต้องบวกค่าเผื่อการกัดกร่อนเข้าไปไม่น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร

สามารถหาความหนาของถังรับแรงดันที่ตัวถังเป็นทรงกระบอกในทอมเส้นผ่านศูนย์กลางภายในได้ตามสมการ (2.5)

$$\text{ความหนาของตัวถังทรงกระบอก } t = \frac{Pr}{2SE + 0.4P} + C.A \quad (2.5)$$

ในการออกแบบต้องมีการตรวจสอบค่าความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด เมื่อตัวถังอยู่ในสภาพใหม่ สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.6)

$$p = \frac{2SEt}{r - 0.4t} \quad (2.6)$$

การตรวจสอบค่าความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด เมื่อตัวถังอยู่ในสภาพใหม่สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.7)

$$P = \frac{2SEt}{r - 0.8t} \quad (2.7)$$

การออกแบบหัวถังแบบหน้าแบนราบรูปวงกลม คำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$t = d \sqrt{\frac{0.13P}{SE}} \quad (2.8)$$

- P คือความดันออกแบบ (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
r คือรัศมีภายใน (มิลลิเมตร)
S คือความเค้นที่ยอมให้ได้สูงสุดของวัสดุ (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)
E คือประสิทธิภาพรอยต่อเชื่อม
t คือความหนาออกแบบของผนังภาชนะความดัน (มิลลิเมตร)
C.A. คือค่าเพื่อการกัดกร่อน = 3.2 มิลลิเมตร

2.5.3 เครื่องอัดอากาศ (Air compressor)

เครื่องอัดอากาศคือ เครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่อัดอากาศที่ดูดเข้ามามีความดันปกติ ให้มีความดันสูงขึ้นแล้วเก็บไว้ในถังเก็บลมอัด เพื่อนำไปใช้งานโดยการจ่ายไปตามท่อลมให้กับ เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ทำงานต่าง ๆ ต่อไปชนิดของเครื่องอัดอากาศสามารถแบ่งออกเป็น 6 ชนิด ได้แก่

1. เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบ (Piston compressor) เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด สามารถอัดอากาศได้จาก 4-300 บาร์ มีราคาถูกประสิทธิภาพดีส่งลมได้ 2-500 ลูกบาศก์เมตร/นาที่ สามารถจำแนกชนิดตามจำนวนชั้นของการอัดอากาศได้อีก เช่น ชนิดลูกสูบอัดชั้นเดียว (Single stage) ความดัน 4-10 บาร์ ชนิดลูกสูบอัดสองชั้น (Double stage) ความดัน 15-30 บาร์ ชนิดลูกสูบอัดสามชั้น (Triple stage or multistage) ความดัน 250 บาร์ ขึ้นไปซึ่งเป็นแรงดันสูง ใช้ทั้งชนิดลูกสูบอัดสามชั้น ชนิดลูกสูบอัดสี่ชั้น (Four stage) หรือชนิดลูกสูบอัดหลายชั้น (Multi-stage) เครื่องอัดอากาศชนิดลูกสูบนั่นลมอัดจะมีอุณหภูมิสูงเนื่องจากลมโค่นอัดให้มีความดันสูง จึงมีการลดอุณหภูมิของลมอัดด้วยมี 3 วิธี คือ

- ระบายความร้อนตามธรรมชาติ โดยการทำครีระบายความร้อนที่กระบอกสูบ
- ระบายความร้อนโดยใช้พัดลมระบายความร้อนอยู่ภายนอกท่อ นิยมใช้กับเครื่องอัดอากาศที่มีขนาดใหญ่
- ระบายความร้อนด้วยน้ำโดยการให้ท่อน้ำอยู่ในท่อลมทำการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการให้น้ำพาความร้อนจากอากาศไปถ่ายเทออกภายนอก

2. เครื่องอัดอากาศชนิดไดอะแฟรม (Diaphragm compressor) การทำงานคล้ายกับชนิดลูกสูบเพียงแต่ใช้แผ่นไดอะแฟรมในการดูดและอัดอากาศแทนการใช้ลูกสูบ

3. เครื่องอัดอากาศชนิดสกรู (Screw compressor) การทำงานใช้การหมุนขบกันของเพลลาที่มีลักษณะเป็นสกรู 2 เพลลา โดยตัวหนึ่งมีฟันเป็นเส้นนูนอีกตัวหนึ่งเป็นเส้นเว้า ฟันเพลลาหมุนขบเข้าหากันทำให้เกิดการอัดอากาศ

4. เครื่องอัดอากาศชนิดใบพัดเลื่อน (Sliding vane rotary compressor) การทำงานใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการทำให้ใบพัดเลื่อนเกิดการเลื่อนเข้าออกในร่องใบพัด โดยเมื่อเพลลาหมุนจนใบพัดเลื่อนออกจากร่องเกิดห้องที่มีปริมาตรหนึ่งรับอากาศเข้ามาเต็มห้อง แล้วเพลลาหมุนต่อจนใบพัดเลื่อนเข้าไปเรื่อย ๆ ปริมาตรของห้องที่รับอากาศเล็กลงแต่ปริมาณอากาศเดิม อากาศจึงถูกอัดให้มีความดันสูงขึ้น เครื่องอัดอากาศชนิดนี้หมุนเรียบ ไม่มีเสียงดัง ผลิตลมอัดได้สม่ำเสมอไม่ขาดเป็นห้วง ๆ เหมือนชนิดลูกสูบ

5. เครื่องอัดอากาศชนิดใบพัดหมุน (Root compressor) การทำงานใช้การหมุนเข้าหากันของใบพัด 2 เพลลา โดยใบพัดทั้งสองเพลลาจะรับอากาศจากทางลมเข้าแล้วกวาดลมไปด้านทาง

ลมออก แต่ปริมาตรด้านทางลมออกจะเท่ากับด้านทางลมเข้าไม่เกิดการอัดจากการลดปริมาตรเหมือนชนิดใบพัดเลื่อน แต่เกิดการอัดอากาศเนื่องจากการเพิ่มปริมาณอากาศให้กับด้านทางลมออกจนมีปริมาณและความดันที่มากพอที่เอาชนะความดันด้านทางลมออกที่มีอยู่แล้ว

6. เครื่องอัดอากาศชนิดกังหันหรือกระแสาอากาศ (Turbo compressor or flow compressor) การทำงานอาศัยหลักการใช้กังหันในการเปลี่ยนความเร็วลม (พลังงานจลน์) เป็นลมอัด (พลังงานความดัน) มี 2 ชนิด ได้แก่

- เครื่องอัดอากาศชนิดเรเดียลโฟลว์ หรือเซนตริฟิวกัล (Radial-flow or centrifugal compressor) อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในการทำให้อากาศเกิดความดัน
- เครื่องอัดอากาศชนิดแอกเซียลโฟลว์ (Axial-flow compressor)

2.5.4 วาล์ว (Valve)

วาล์วเป็นอุปกรณ์ที่ใช้บังคับการไหล ควบคุมอัตราการไหล ลด เพิ่มความดัน มีหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้ คือ เปิดและปิดกั้นการไหล ปรับระดับการไหล ป้องกันการไหลย้อนกลับ การปรับลดความดันและการระบายความดัน

1. วาล์วระบายความดัน (Relief valve) เป็นวาล์วที่ป้องกันอุณหภูมิหรือความดันของของไหลในระบบใด ๆ เมื่อถึงขีดกำหนด และวาล์วนี้จะปิดเองโดยอัตโนมัติ แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- Pop safety relief valve ใช้งานไอน้ำ ลม หรือก๊าซ สามารถตั้งความดันได้กว้าง
- Relief valve ใช้กับงานของเหลว
- Safety relief valve ใช้กับงานที่ต้องการความปลอดภัยสูง

2. บอลวาล์ว (Ball valve) ใช้เปิด-ปิด การไหลและบังคับการไหล ใช้สำหรับงานที่ต้องการเปิด-ปิด อย่างรวดเร็ว

ข้อดี

บอลวาล์วประกอบด้วยชิ้นส่วนน้อยชิ้น จึงง่ายต่อการบำรุงรักษาการเปิด-ปิดเพียงแค่ 90 องศา ทำให้เปิด-ปิดได้รวดเร็ว การไหลผ่านวาล์วที่ตรงออกไปทำให้มีความดันลดเกิดขึ้นน้อย เหมาะสมกับของไหลประเภท สเลอรีและที่มีสารแขวนลอย

ข้อจำกัด

จากลักษณะที่รูปลิ้นที่เป็นทรงกลมจึงทำให้ขนาดผิวหน้าของวาล์วมีขนาดโตกว่าวาล์วชนิดอื่น ๆ จึงต้องการช่องว่างระหว่างท่อในการติดตั้งมากกว่าในขณะที่ปิดวาล์วหลังจากการใช้งาน จะมีของไหลบางส่วนถูกเก็บกักอยู่ในช่องลิ้นวาล์วด้วย ในการออกแบบให้มีรูปแบบหลายช่อง

จำเป็นต้องลดขนาดช่องของไหลให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดท่อ ซึ่งทำให้มีความดันลดเพิ่มขึ้นในระบบ

2.6 สมบัติทางเคมีกายภาพของอาหาร

2.6.1 สีของอาหาร

เป็นสมบัติทางกายภาพของอาหาร ด้านสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (Optical properties) ที่มีผลต่อคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภค สีของอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นคุณสมบัติทางกายภาพอย่างหนึ่ง ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติเชิงเรขาคณิต คุณสมบัติทางกล คุณสมบัติทางความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากสีเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการรับรู้สัญญาณในรูปของคลื่นแสงที่ตกกระทบดวงตาของมนุษย์ซึ่งมีเซลล์รับและส่งสัญญาณผ่านไปยังสมอง และแปลลงค่าเป็นค่าสีต่าง ๆ ตามที่แต่ละบุคคลมีอยู่ในระบบความทรงจำ สีของอาหารและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นปัจจัยที่สำคัญมากที่ส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับและไม่ยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรผิดปกติไป ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับ โดยอาจไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่น เช่น กลิ่น รสชาติ หรือเนื้อสัมผัส

ความสำคัญของสีในอาหาร

สีในอาหาร มีผลต่อความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค แสดงถึงความสด ใหม่ หรือบ่งบอกการเสื่อมเสียของอาหาร สียังมีความสัมพันธ์กับคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร สีในอาหารขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดและความเข้มข้นของรงควัตถุ พันธุ์ ความแก่อ่อน สีของอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการแปรรูปอาหาร และการเก็บรักษาอาหาร เนื่องจากความร้อน เอนไซม์ การเปลี่ยนแปลง ค่า pH สารเคมี ออกซิเจน แสง นอกจากนี้ยังเกิดจาก ปฏิกิริยาต่าง ๆ ระหว่างองค์ประกอบของอาหารเอง เช่นปฏิกิริยา เมลลาร์ด (Mallard reaction) เป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ เกิดจากน้ำตาลในโปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบของอาหารเมื่อได้รับความร้อน ในการผลิตอาหารจึงมีความจำเป็นต้องรักษา และควบคุมให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีสีสม่ำเสมอ การวัดและประเมินสีในอุตสาหกรรมอาหาร จึงกระทำในขั้นตอนต่าง ๆ ตั้งแต่การรับวัตถุดิบ การคัดเลือก ระหว่างการแปรรูป ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป และระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสามารถวัดได้ในห้องปฏิบัติการและในสายการผลิต (On line measurement)

การเห็นสีของมนุษย์

การเห็นสีของวัตถุใดๆ ของมนุษย์ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light source) แสงคือรูปหนึ่งของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า แสงในช่วงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ (Visible wavelength) ความยาวคลื่นระหว่าง 400-700 นาโนเมตร แหล่งกำเนิดแสง ได้แก่ แสงอาทิตย์ แสงจันทร์ หรือแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น แสงเทียน หลอดไฟ เพื่อความเป็นมาตรฐานของการเห็นสี CIE ได้กำหนดแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน (Standard light source)

2. วัตถุ (Object) เมื่อแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ตกกระทบวัตถุที่มีรงควัตถุ ซึ่งวัตถุจะดูดซับ (Absorb) สะท้อน (Reflect) หรือส่งผ่าน (Transmit) แสงแต่ละความยาวคลื่นได้ต่างๆ แตกต่างกันไป

3. ผู้สังเกต (Observer) ตามนุษย์ มองเห็นวัตถุเป็นสีต่าง ๆ เนื่องจากแสงที่สะท้อนออกจากวัตถุ มาเข้าตา ซึ่งในตามีเซลล์รับแสง ซึ่งทำหน้าที่มองเห็นสีต่าง ๆ ตามระดับคลื่นแสงที่กระตุ้น คือ สีแดง (R) สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) แล้วประมวลผลรับรู้เป็นสีต่าง ๆ

2.6.2 การวัดคุณลักษณะทางกลของอาหาร

ลักษณะทาง Mechanical เป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อแรงที่มากระทำภายในปากขณะทำการเคี้ยว สเกลมาตรฐานของคุณลักษณะทางกายภาพประกอบไปด้วย Hardness, Fracturability, Adhesiveness, Gumminess, Viscosity และ Chewiness scales

1. Hardness scale

Hardness หมายถึง แรงที่ทำให้อาหารแตกหักหรือแยกออกจากกันโดยสมบูรณ์ เป็นแรงที่ใช้กดผลิตภัณฑ์ระหว่างฟันกราม หรือระหว่างลิ้นกับเพดานปาก

2. Fracturability scale

Fracturability หมายถึง ความเปราะบางของผลิตภัณฑ์ เป็นแรงที่ทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร่วน โดยทั่วไปจะหมายถึงผลิตภัณฑ์ที่มีค่า Hardness สูงแต่มีค่า Cohesiveness ต่ำ สเกลที่ใช้สำหรับค่า Fracturability อาจแบ่งออกได้อีก 3 ชนิดคือ

Crumbly หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานต่อแรงต่ำ (มีค่า Hardness ต่ำ) และการเสียรูปร่าง (Deformation) ก่อนที่จะแตกหักมีน้อยมาก เช่น มันฝรั่งทอดกรอบ เป็นต้น

Crunchy หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานต่อแรงค่อนข้างสูง (มีค่า Hardness ปานกลาง) และการเสียรูปร่างก่อนที่จะแตกหักมีน้อยมาก เช่น Celery stick เป็นต้น

Brittle หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานต่อแรงสูงมาก (มีค่า Hardness สูง) และการเสียรูปร่างก่อนที่จะแตกหักมีน้อยมาก เช่น Hard candy เป็นต้น

3. Viscosity scale

Viscosity หมายถึง ความข้นหนืดของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่ไหลได้ จัดเป็นการไหลต่อแรงที่มากระทำจำนวน 1 หน่วย สเกลของค่า Viscosity ในทางประสาทสัมผัส นั้นจะเริ่มจาก เหลว (Thin) หรือเป็นน้ำ (Watery) จนกระทั่งถึงข้นหนืด (Very thick)

4. Adhesiveness scale

Adhesiveness หมายถึง การเกาะติดของอาหารกับผิวสัมผัสอื่น ในการประเมินทางประสาทสัมผัสนั้น ผิวสัมผัสที่อาหารเกาะติดอยู่ก็คือปากนั่นเอง โดยเฉพาะตรงเพดานปาก เพราะฉะนั้นแรงที่ใช้แยกอาหารออกเมื่อผิวอาหาร ไปเกาะติดเพดานปากก็คือค่า Adhesiveness ของอาหารนั้น

5. Gumminess scale

Gumminess หมายถึง ลักษณะที่อาหารกึ่งแข็งแตกตัวออกจนพร้อมที่จะกลืนได้ เป็นผลจาก การมีค่า Hardness ต่ำ และ Cohesiveness สูง

6. Chewiness scale

Chewiness หมายถึง พลังงานที่ใช้ในการเคี้ยวอาหารแข็งจนสามารถกลืนลงไป ได้ เป็นผล มาจากค่า Hardness, Cohesiveness และ Springiness ของผลิตภัณฑ์ เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการเคี้ยวผลิตภัณฑ์ด้วยอัตราเร็วคงที่ จนกระทั่งสามารถกลืนผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้ คำศัพท์ที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ นุ่ม (Tender) หนึบ (Chewy) และเหนียวมาก (Tough)

7. Cohesiveness scale

Cohesiveness หมายถึง ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่สลายตัวก่อนที่จะแตกแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ในการประเมินนั้นอาจใช้สเกลจากการแตกตัว (Rupturing) และการเสียรูป (Deforming) ของผลิตภัณฑ์ เช่น มัฟฟินข้าวโพดมี Cohesiveness ต่ำ ส่วนหมากฝรั่งมีค่า Cohesiveness สูง เป็นต้น (วิไล รังสาดทอง , 2545)

2.6.3 ค่า pH

มาตรฐานของการวัดค่าความเป็นกรด – เบส การวัดค่าความเป็นกรด- เบส หรือค่า pH นั้น เป็นกิจกรรมซึ่งสามารถพบได้ทั้ง ในห้องปฏิบัติการและในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมสำหรับค่าความเป็นกรด-เบส หรือที่รู้จักกันคือ ค่า pH ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$\text{pH} = -\log\text{H}^+ \quad (2.9)$$

เมื่อ H^+ คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในหน่วย โมลต่อลิตร

ค่า pH ของสารละลายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-14 โดยที่ถ้าสารละลายมีค่า pH น้อยกว่า 7 เป็นช่วงที่สารละลายนั้นมีความเป็นกรด ตัวอย่างที่พบได้ใน ชีวิตประจำวันเช่น น้ำส้มสายชู น้ำมะนาว ในขณะที่ช่วงที่เป็นเบสจะมีค่า pH มากกว่า 7 ตัวอย่างเช่น สบู่ โซดาไฟ สำหรับสารละลายที่เป็นกลางจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ตัวอย่างเช่น น้ำกลั่น การวัดค่า pH นั้น สามารถวัดได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ค่าได้ถูกต้อง (Accuracy) ต่างกันดังนี้

1. กระดาษลิตมัส เป็นวิธีที่สามารถบอกได้เพียงว่าตัวอย่างที่เรานำมาทดสอบเป็นกรด หรือเป็นเบสเท่านั้น โดยกระดาษลิตมัสมีอยู่ 2 ชนิดคือ สีแดง และสีน้ำเงิน วิธีการทดสอบคือ นำเอากระดาษลิตมัสไปจุ่มตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยที่ถ้าตัวอย่างเป็นกรด กระดาษลิตมัสจะเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีแดง ในขณะที่ถ้าตัวอย่างเป็นเบส กระดาษลิตมัสจะเปลี่ยนสีจากแดงเป็นน้ำเงิน

2. กระดาษ pH เป็นวิธีที่สามารถบอกค่าความเป็นกรด – เบส ได้ละเอียดมากกว่ากระดาษลิตมัส เนื่องจากจะมีแถบสีให้เทียบว่าตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความเป็นกรด – เบส เท่ากับเท่าไร นอกจากกระดาษ pH ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกันคือ การใช้สารละลายที่เรียกว่า Universal indicator ซึ่งเป็นสารละลายที่จะเปลี่ยนสีเมื่อค่า pH เปลี่ยนไป เราสามารถเตรียม สารละลาย Indicator อย่างง่ายได้จาก กะหล่ำม่วง หรือ ดอกอัญชัน ได้ โดยการนำกะหล่ำม่วงหรือ ดอกอัญชันมาคั้นน้ำแล้วใช้น้ำที่คั้นเป็น Indicator

3. pH meter เป็นเครื่องมือที่มีความถูกต้องมากกว่า 2 ข้อที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว เครื่อง pH meter มีหลายแบบ เช่น แบบปากกา หรือ แบบมือถือ (Hand held pH meter) pH meter แบบนี้ยังคงมีความถูกต้องมากกว่ากระดาษ แต่ยังไม่ดีกว่าเครื่อง pH meter ซึ่งจะเหมาะกับงานในภาคสนามที่ไม่ต้องการความถูกต้องมากนัก แบบตั้งโต๊ะ ซึ่งแบบนี้จะมีความถูกต้องมากกว่าแบบปากกา หรือ แบบมือถือ สามารถวัดค่าได้ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 2 หรือ 3 (นงลักษณ์ ตั้งไพศาลกุล, 2556)

2.6.4 ปริมาณต่างหรือกรด

หลักการวิเคราะห์หาปริมาณต่างหรือกรดทั้งหมดในอาหาร เป็นการไทเทรตสารละลายอาหารตัวอย่างด้วยสารละลายต่างมาตรฐาน การที่จะตัดสินว่าจุดยุติมีสีอย่างไรนั้น อาจทำได้ค่อนข้างยาก หากในอาหารตัวอย่างมีบัฟเฟอร์ปนอยู่ด้วย หรืออาหารตัวอย่างมีสีเข้มมาก อาจแก้ไขได้โดยใช้อินดิเคเตอร์ให้มากกว่าปกติ หรือใช้น้ำกลั่นที่ปราศจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เติมลงไปในการไทเทรตอาหารให้สีจางลง หรือใช้การไทเทรตแบบ Potentiometric titration ปริมาณต่างกรดทั้งหมดในอาหารมักรายงานในรูปของต่างกรดที่มีปริมาณอยู่มากที่สุดในอาหารชนิดนั้น ๆ

2.6.5 ความถ่วงจำเพาะ

คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่น (Density) ของวัตถุต่อความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิหนึ่ง ความถ่วงจำเพาะไม่มีหน่วย และเป็นสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของวัสดุ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1 วัตถุที่มีความถ่วงจำเพาะ มากกว่าน้ำ (>1) จะจมน้ำ ส่วนวัตถุที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่า 1 หรือน้อยกว่าน้ำ จะลอยน้ำได้ ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ ความหนาแน่นของวัตถุ / ความหนาแน่นของน้ำ

2.6.6 การประมวลผลทางภาพถ่าย

การประมวลผลภาพ (Image processing) หมายถึง การนำภาพมาประมวลผลหรือคิดคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เราต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ การทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น การกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ การแบ่งส่วนของวัตถุที่เราสนใจออกจากภาพ เพื่อนำภาพวัตถุที่ได้ไปวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่าง และทิศทางการเคลื่อนของวัตถุในภาพ จากนั้นเราสามารถนำข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์ และสร้างเป็นระบบ เพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ เช่น ระบบรู้จำลายนิ้วมือเพื่อตรวจสอบว่าภาพลายนิ้วมือที่มีอยู่นั้นเป็นของผู้ใด ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบคัดแยกเกรดหรือคุณภาพของไข่เยี่ยวม้า ขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่าย นำตัวอย่างวางตรงตำแหน่งที่กำหนดในกล่องควบคุมแสง ทำการทดสอบความเข้มแสง ณ ตำแหน่งที่กำหนดจากนั้นปรับ โหมดกล้องดิจิทัล และจัดเก็บไฟล์ภาพในรูปแบบ JPEG พร้อมทั้งนำมาวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรมอิมเมจจ ในรูปฮิสโตแกรมของสีที่แสดงในระบบ RGB จากนั้นแปลงค่าสีจากระบบ RGB ไปเป็นระบบ CIELAB L^* , a^* , b^* (Color transformation) ซึ่งค่า L^* คือความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ ที่แสดงสีขาวไปจนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ ค่า a^* คือแกนสีจากสีเขียว ($-a^*$) ไปเป็นสีแดง ($+a^*$) ค่า b^* คือแกนสีจากสีน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) โดยใช้สมการ Direct model

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาในเรื่องของการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้า ภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก เพื่อลดระยะเวลาการผลิตไข่เยี่ยวม้าให้สั้นลงพร้อมทั้งให้คุณลักษณะ คล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าแบบดั้งเดิม ขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ไข่เป็ดสำหรับผลิตไข่เยี่ยวม้า

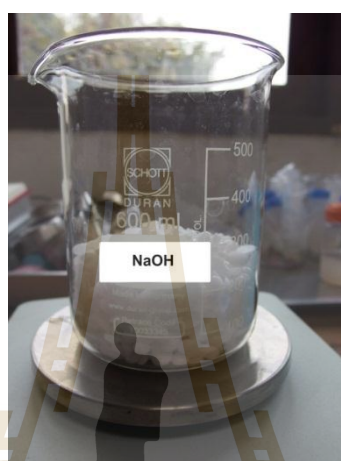
ไข่เป็ดอายุการเก็บรักษาไม่เกิน 7 วัน คัดฟองที่ไม่มีรอยตำหนิหรือรอยแตกร้าวและขนาดเท่าๆ กัน ล้างทำความสะอาดสิ่งลมให้แห้ง (รูปที่ 3.1) ไข่เป็ดที่นำมาทดลองมาจากแหล่ง ตลาดสดเทศบาลเมืองจันทบุรี (ไข่เป็ดสด) 407 ม.5 ต.ปรัใหญ่ อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000



รูปที่ 3.1 ไข่เป็ดสำหรับผลิตไข่เยี่ยวม้า

3.1.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สำหรับการผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกเลือกใช้ ชนิดเม็ด มีลักษณะสีขาว (รูปที่ 3.2) ดูดความชื้นดี ละลายน้ำเร็ว ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร จำหน่ายโดย บริษัท วิทยากร จำกัด 335/9-10 ถนนมหาดไทย ตำบลในเมือง อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัด นครราชสีมา 30000



รูปที่ 3.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.3 เกลือแกง

เกลือแกงที่ใช้ผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกเลือกใช้เกลือป่น (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

3.1.4 น้ำเปล่า

สำหรับการผลิตไข่เชื่อมมาภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกเลือกใช้น้ำประปาจากอาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 น้ำเปล่า (H_2O)

3.1.5 ถังความดัน (Pressure vessel)

ถังความดันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังแสดงใน รูปที่ 3.5 (A) Directional control valve เป็นอุปกรณ์ใช้ควบคุมการเปิดปิดจ่ายแรงดันเข้าสู่ถังความดัน (B) Pressure switch เป็นตัวควบคุมการจ่ายแรงดันเข้าสู่ตัวถังซึ่งกำหนดให้ความดันอยู่ที่ระดับ 1 2 3 และ 4 บาร์ (C) Relay เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจรโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (D) Switching แปลงไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ (E) Ball valve เป็นตัวรับลดความดัน (F) หน้าแปลนฝาปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 เซนติเมตร ความหนาหน้าแปลน 1 เซนติเมตร ทำจากสแตนเลส (G) ตะแกรงสแตนเลส ใช้สำหรับกดไข่เปิดไม่ให้ลอยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร สูง 32 เซนติเมตร และชุดปั๊มลมสำหรับเพิ่มแรงดันเข้าถัง



รูปที่ 3.5 ถังสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง

3.1.6 ถังสุญญากาศ (Vacuum vessel)

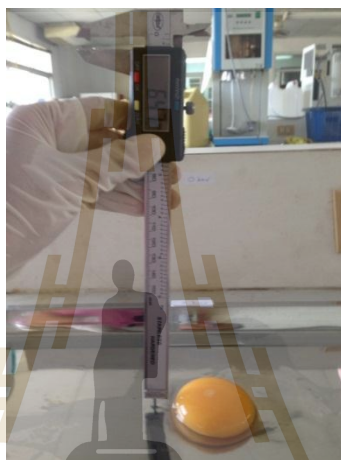
ถังสุญญากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังแสดงในรูปที่ 3.6 (A) Directional control valve เป็นอุปกรณ์ใช้ควบคุมความดันในถังสุญญากาศ (B) Vacuum switch เป็นตัวควบคุมความดันในถังสุญญากาศซึ่งกำหนดให้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 2 ระดับ คือ 380 มิลลิเมตรปรอทและ 760 มิลลิเมตรปรอท (C) Relay เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อวงจรโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (D) Switching แปลงไฟฟ้าจาก 220 โวลต์ เป็น 12 โวลต์ (E) Ball valve เป็นตัวปรับลดความดันสุญญากาศ (F) หน้าแปลนฝาปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 เซนติเมตร ความหนาหน้าแปลน 2 เซนติเมตร ทำจากแผ่นอะคริลิกใส (G) ชุดปั๊มสุญญากาศสำหรับควบคุมความดันในถังสุญญากาศ



รูปที่ 3.6 ถังสุญญากาศที่ใช้ในการทดลอง

3.1.7 เวอร์เนียคาลิปเปอร์แบบดิจิตอล (Vernier calipers digital)

เวอร์เนียคาลิปเปอร์แบบดิจิตอล ใช้สำหรับขนาดของไขเปิด มีส่วนประกอบดังนี้ ปากภายนอกที่ใช้สำหรับการวัดขนาดภายนอก และปากจับภายในสำหรับการวัดขนาดภายใน นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยตัววัดขนาดความลึก (Depth probe) สำหรับการวัดระยะลึกสเกลหลัก และเวอร์เนียแสดงในหน่วยของนิ้วและเมตรริก ยี่ห้อ STARNIC ขนาด 6 นิ้ว (0-150 มิลลิเมตร) ความละเอียด (1/100 มิลลิเมตร) ตัวเวอร์เนียทำจาก Stainless ทั้งชิ้น แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เวอร์เนียคาลิปเปอร์แบบดิจิตอล (Vernier calipers digital)

3.1.8 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง

เครื่องชั่งที่ใช้วัดน้ำหนักไขเปิดและไขเชื่อมม่า เลือกใช้เครื่องชั่ง ยี่ห้อ Sartorius ผลิตจาก ประเทศ Germany รุ่น BSA3202S-CW พิกัด 3200 กรัม กรัมอ่านละเอียด 0.01 กรัม ปรับเทียบน้ำหนัก โดยใช้ลูกตุ้มภายในเครื่อง Internal calibrate (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง

3.1.9 pH meter

เครื่องวัดความเป็นกรดเบสในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าเลือกใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น Specifications - S47-K sevenMulti^{MT} dual meter pH/conductivity (Kit version) (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 เครื่อง pH meter

3.1.10 บิวเรต 50 มิลลิลิตร (Buret)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการไทเทรตมีลักษณะเป็นหลอดแก้วที่มีขีดบอกริมาตรและมีวาล์วสำหรับเปิด-ปิด เพื่อควบคุมการปล่อยสารละลายภายในหลอดที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา จึงทำให้สามารถวัดปริมาตรสารที่ใช้ไปในการทดลองได้อย่างแม่นยำ ขนาด 50 มิลลิลิตร ยี่ห้อ PTFE (SCI) (รูปที่ 3.10)

รูปที่ 3.10 บิวเรต 50 มิลลิลิตร (Buret)

3.1.11 เครื่องวัดความเค็มแบบส่อง (Salinity Refractometer)

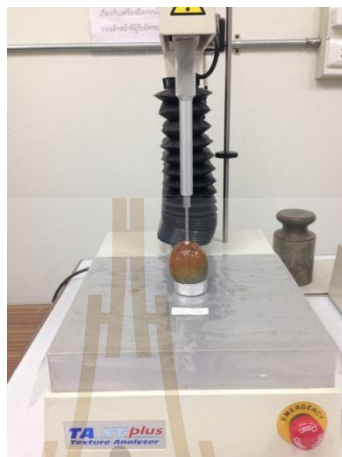
เครื่องวัดความเค็มแบบส่อง สามารถวัดค่าด้วยวิธีการหักเหแสง ใช้สำหรับวัดค่าความเค็มของสารละลายสำหรับแช่ไขเย็บว้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก เครื่องวัดความเค็มแบบส่องที่ใช้ในการทดลองนี้ยี่ห้อ Atago รุ่น Master-S28 alpha ช่วงการวัด 0.0 – 28.0 % (Sodium chloride) ความละเอียด 0.2 % (Salt) มีระบบชดเชยอุณหภูมิอัตโนมัติ (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความเค็มแบบส่อง (Salinity refractometer)

3.1.12 เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyzer)

ใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสอาหาร Texture Analyzer ยี่ห้อ Stable micro system รุ่น TA-XT plus (Chunbao Li, 2010) ด้วยหัวกด Spherical probe part No. P/0.25S (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.12 เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสอาหาร (Texture analyzer)

3.1.13 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter)

เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ Water activity meter เขียนย่อว่า a_w เป็นค่าที่แสดงระดับพลังงานของน้ำ มีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษา การเสื่อมเสีย และความปลอดภัยของอาหาร ยี่ห้อ Aqualab รุ่น Aqualab series3 (รูปที่ 3.13)



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (Water activity meter)

3.1.14 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่ใช้หาความชื้นของไข่เยี่ยวม้าเปลือกไข่ ยี่ห้อ France Etuves รุ่น XU112 ขนาดความจุ 112 ลิตร ชั้นวาง 2 ชั้น อุณหภูมิสูงสุด 300 องศาเซลเซียส แบบมีพัดลม (รูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)

3.1.15 กล้องถ่ายภาพ

กล้องถ่ายภาพดิจิทัลใช้สำหรับวัดค่าสีไข่เยี่ยวม้าด้วยระบบวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย ทำการทดสอบความเข้มแสง ณ ตำแหน่งที่กำหนดจากนั้นปรับโหมดกล้องดิจิทัล จัดเก็บไฟล์ภาพในรูปแบบ JPEG และนำมาวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย กล้องถ่ายภาพดิจิทัลเปลือกไข่ ยี่ห้อ Olympus รุ่น STYLUS XZ-2 ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น (รูปที่ 3.15)



รูปที่ 3.15 กล้องถ่ายภาพดิจิทัล Olympus รุ่น STYLUS XZ-2

3.1.16 กล้องควบคุมแสง

กล่องควบคุมระบบแสง (รูปที่ 3.16) ใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ อุณหภูมิแสง 2700 เคลวิน กำลังไฟฟ้า 24 วัตต์ ความต่างศักย์แรงดันไฟฟ้า 220-240 โวลต์ ค่าปริมาณแสงหรือฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux) 1550 ลูเมน จำนวน 2 หลอด ยึดติดบริเวณผนังภายในด้านบนของกล่อง ยี่ห้อหลอดไฟที่ใช้ทดสอบ Philips รุ่น Tornado 24 วัตต์



รูปที่ 3.16 กล่องควบคุมแสง

3.1.17 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายสามารถนำไฟล์ภาพถ่ายที่เก็บในรูปแบบ JPEG ในรูปฮีสโตแกรมของสีที่แสดงในระบบ RGB สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์สีไข่ม้วนมาภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกคือ โปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ 1.42, USA) (รูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

3.1.18 เครื่องย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digester)

เครื่องย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟสามารถย่อยตัวอย่างของแข็งและของเหลวเป็นสารละลาย สำหรับกระบวนการผลิตไข่เชื่อมมาภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกใช้ย่อยไข่ขาวและไข่แดง เครื่องย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digester) เลือกใช้ยี่ห้อ Anton paar รุ่น Multiwave 3000 (รูปที่ 3.18)



รูปที่ 3.18 เครื่องย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ (Microwave digester)

3.1.19 เครื่องมือหาปริมาณธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

เครื่องมือหาปริมาณธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS) มีลักษณะเครื่องดังแสดงในรูปที่ 3.19 สามารถวิเคราะห์ชนิดของธาตุได้ถึง 81 ชนิดในการวัดตัวอย่างหนึ่งครั้ง โดยปริมาณของธาตุในตัวอย่าง ควรอยู่ในช่วงความเข้มข้นระดับ Part per billion (ppb.) และปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่ไม่เกิน 0.2% เครื่อง ICP-MS จะประกอบด้วยระบบหลัก ๆ 2 ระบบ คือ ส่วนของ ICP (Inductively coupled plasma) ที่ธาตุในตัวอย่างจะถูกไอออไนซ์เป็นไอออนแล้วผ่านไปสู่อุปกรณ์ Quadrupole mass spectrometer ในการแยกชนิดของธาตุ ตาม Atomic mass-to-charge ratio ก่อนตรวจวัดปริมาณด้วย Electron multiplier detector



รูปที่ 3.19 เครื่องมือหาปริมาณธาตุ Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การตรวจสอบความสดใหม่ของไข่เป็ดเบื้องต้น

ไข่เป็ดสำหรับผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก ทำการตรวจคุณภาพทั้งภายนอกและภายใน คุณภาพภายนอกใช้น้ำหนัก รอยร้าวบนเปลือกไข่จะถูกคัดทิ้ง ไข่ที่เหลือจะถูกล้างทำความสะอาด โดยไข่ที่คัดจะต้องมีขนาดที่สม่ำเสมอ ในด้านคุณภาพภายใน วัดจากสีไข่แดง การกระจายตัวของไข่ขาว ความสูงไข่ขาว สำหรับตัวชี้หลักในการตรวจวัดคุณภาพความสดใหม่ของไข่เป็ดใช้ไข่ขาวเป็นเกณฑ์ตรวจวัด สามารถคัดเกรดไข่ตามหลักสากลนิยมโดยใช้ค่าฮอกกยูนิต (Haugh Unit: HU) เป็นค่าที่วัดได้จากการคำนวณน้ำหนักไข่เป็ดและความสูงของไข่ขาว

การหาความสดใหม่ของไข่เป็ดโดยวิธีการหาค่าฮอกกยูนิต (Haugh unit: HU) ดังสมการ 3.1 สุ่มไข่เป็ด จากทุกชุดการทดลอง ทำการชั่งน้ำหนักไข่เป็ดแต่ละฟองบันทึกผลดังรูปที่ 3.20 ต่อยไข่เป็ดลงบนถาดสแตนเลสพร้อมทั้งวัดความสูงของไข่ขาวและทำการจดบันทึกดังรูปที่ 3.21 เพื่อตรวจวัดคุณภาพภายใน

$$HU = 100 \times (H + 7.57 - 1.7W)^{0.37} \quad (3.1)$$

โดยที่ H ความสูงของไข่ขาว, มิลลิเมตร
W น้ำหนักฟองไข่, กรัม



รูปที่ 3.20 ชั่งน้ำหนักไข่เป็ดด้วยเครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.21 วัดความสูงไข่ขาวของไข่เป็ด

3.2.2 การผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic pressure)

นำไข่เป็ดที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้วจำนวน 60 ฟองมาทำการแช่สารละลายต่างซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 240 กรัม โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 600 กรัม น้ำเปล่า 6,000 มิลลิลิตร (ประเวทย์ ตูย์เต็มวงศ์, ปวีณา จิตปลื้ม, พรรณชينا เอี่ยมโสภณกุล และกิตติมา ขวาลรติกุล, 2544) ดังรูปที่ 3.22 ทำการเพิ่มความดันในถังโดยการอัดอากาศเหนือสารละลายให้มีความดัน 1 2 3 และ 4 บาร์ ควบคุมความดันโดยใช้วาล์วควบคุมแบบโซลินอยด์ (VXD2130-03-5 DZ1-B, SMC (Thailand) Ltd., Nakhonracharsima, Thailand) ดังรูปที่ 3.5 ที่แต่ละความดัน เมื่อครบกำหนด 2 4 6 8 10 และ 12 วัน นำไข่ออกมาทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่ขาวและไข่แดง



รูปที่ 3.22 แช่ไข่เป็ดในสารละลายต่าง

3.2.3 กระบวนการแปรรูปไข่เยี่ยวม้าด้วยสถานะสุญญากาศไฮโดรสแตติก (Vacuum Hydrostatic)

นำไข่เป็ดที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้วจำนวน 60 ฟองมาทำการแช่สารละลายต่างซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 240 กรัม โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 600 กรัม น้ำเปล่า 6,000 มิลลิลิตร (ประเวทย์ และคณะ, 2544) ทำการลดความดันในถังให้อยู่ในสถานะสุญญากาศด้วยปั๊มสุญญากาศ ควบคุมความดันในถังให้คงที่โดยใช้วาล์วควบคุมแบบโซลินอยด์ (VXD2130-03-5DZ1-B, SMC (Thailand) Ltd., Nakhonratchasima, Thailand) ทำการทดลองแช่ไข่เป็ดในสารละลายต่างที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 2 ระดับ คือ 360 มิลลิเมตรปรอท และ 760 มิลลิเมตรปรอท เมื่อครบกำหนด 2 4 6 8 10 และ 12 วัน นำไข่ออกมาทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่ขาวและไข่แดงระบบของการแช่ไข่ในถังสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 การแช่ไขในถังสุญญากาศเพื่อผลิตไขเยียวม้า

3.2.4 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสารละลายต่างสำหรับแช่ไขเยียวม้า

ระดับ pH สารละลายต่าง

ทำการวัดระดับ pH ของสารละลายต่างก่อนแช่ไขเปิด ด้วยเครื่องเครื่อง pH meter ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น Specifications - S47-K sevenMulti™ dual meter pH/conductivity (Kit version), UK และเมื่อครบกำหนดการผลิตไขเยียวม้านำสารละลายต่างมาวัดระดับ pH อีกครั้ง

ปริมาณต่างในสารละลาย

การวิเคราะห์ต่างทั้งหมด (Total alkalinity) ทำได้โดยนำสารละลายต่างก่อนการแช่ไขมาตรวจสอบจำนวน 5 มิลลิลิตร มาผสมกับน้ำกลั่นจำนวน 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการดูดตัวอย่างที่เตรียมไว้จำนวน 10 มิลลิลิตร แล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร พร้อมทั้งทำการหยด ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงไป 3 หยด จากนั้นทำการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน ไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล จนถึงจุดยุติสารละลายจะเกิดเป็นสีชมพูอ่อน ทำการบันทึกผลของปริมาณไฮโดรคลอริกที่ใช้ไป สำหรับสารละลายต่างที่ผ่านการแช่ไขเมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตไขเยียวม้าจะนำมาตรวจสอบหาปริมาณต่างดังที่กล่าวไว้ข้างต้นดังรูปที่ 3.24 พร้อมทั้งคำนวณปริมาณต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Alkalinity} = \frac{N \times V \times MV \times 100}{10 \times 1000} \quad (3.2)$$

- โดยที่ N คือนอร์มัลของค่าที่ใช้ในการไทเทรต
 V คือปริมาณของค่าที่ใช้ในการไทเทรตจนถึงจุดยุติ, มิลลิลิตร
 MV คือน้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.99
 100 คือการคิดเป็นร้อยละ
 10 คือปริมาณของไซเยวม่าที่ใช้ในการไทเทรต, มิลลิลิตร
 1000 คือการเปลี่ยน mg Equivalent เป็น กรัม Equivalent



รูปที่ 3.24 การหาปริมาณค่าทั้งหมด

ระดับความเค็มของสารละลาย

ระดับความเค็มของสารละลายตรวจสอบจาก การนำสารละลายก่อนการแช่ไซเป็ด และสารละลายภายหลังกระบวนการผลิตไซเยวม่า ทำการหยดสารละลายลงบนเครื่องวัดความเค็มแบบส่อง (Salinity Refractometer) จำนวน 2 – 3 หยด ปิดฝา Daylight plate ต่อดูค่าการวัดพร้อมทั้งจดบันทึกผล

3.2.5 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไซเยวม่า

การหาร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไซเยวม่าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างไซเป็ดก่อนการแช่สารละลายต่าง บันทึกค่าทศนิยม 2 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.20 และเมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไซเป็ดชุดเดิมซึ่งบันทึกน้ำหนักหลังแช่สารละลายเพื่อใช้คำนวณค่าดังสมการ (3.3)

$$W_{ad} = \left(\frac{W_f - W_i}{W_i} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

- โดยที่ W_{ad} คือร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น
 W_i คือน้ำหนักไข้เปิดก่อนการแช่ไข้ในสภาวะไฮโดรสแตติก, กรัม
 W_f คือน้ำหนักไข้เปิดภายหลังแช่ไข้ในสภาวะไฮโดรสแตติก, กรัม

การหาความถ่วงจำเพาะของไข้เชื่อมไม้ภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก

หาความถ่วงจำเพาะของไข้เปิดและไข้เชื่อมไม้ โดยการแทนที่น้ำ (บัณฑิต จริโม ภาส และอุดมศักดิ์ กิจทวี, 2547) ทำการชั่งน้ำหนักไข้ในอากาศแล้วบันทึกค่า จากนั้นนำไข้จุ่มลงใน บีกเกอร์ขนาด 1000 ml ภายในบรรจุน้ำเปล่า 900 ml โดยมีอุปกรณ์ช่วยพยุงไข้ไม่ให้จมนลงใน บีกเกอร์จากนั้นอ่านค่ามวลที่แทนที่น้ำแล้วจดบันทึกดังรูปที่ 3.25 เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความ ถ่วงจำเพาะดังสมการ 3.4

$$Sg = \frac{W_p}{W_T - W_b} \quad (3.4)$$

- โดยที่ W_p คือน้ำหนักของไข้ที่ชั่งในอากาศ, กรัม
 W_b คือน้ำและบีกเกอร์ก่อนจุ่มไข้
 W_T คือน้ำและบีกเกอร์ขณะจุ่มไข้



รูปที่ 3.25 การหาความถ่วงจำเพาะของไข้เปิด

การวัดความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก

นำไข่เยี่ยวม้าที่ได้จากการแช่สารละลายต่างมาทำการนึ่งด้วยไอน้ำเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นนำไป หาค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาว ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสอาหาร(Texture analyzer) รุ่น TA-XT plus (Stable micro systems, UK) ด้วยหัวกด Spherical probe part No. P/0.25S Crosshead speed 0.8 มิลลิเมตรต่อวินาที กดลงไปเป็นระยะ 70 มิลลิเมตร (Li et al., 2010) บนตัวอย่างไข่เยี่ยวม้าที่เตรียมไว้บริเวณด้านแหลมของไข่เยี่ยวม้า ทำการบันทึกค่า F_{max} เป็นค่าความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้าดังรูปที่ 3.12

การวัดค่า pH ในไข่เยี่ยวม้า

วัดความเป็นกรดเบส ทดลอง โดยนำไข่เยี่ยวม้าที่แยกไข่ขาวและไข่แดงออกจากกัน แล้วนำไปวัดค่า pH โดยใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น Specifications - S47-K sevenMulti™ dual meter pH/conductivity (Kit version), UK และจดบันทึกผลการทดลอง

การวิเคราะห์ค่าทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า (Total alkalinity)

การวิเคราะห์ค่าทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า (Total alkalinity) วิเคราะห์ด้วยการนำไข่เยี่ยวม้าแยกไข่ขาวและไข่แดงออกจากกันบดให้ละเอียดอย่างละ 5 กรัม มาผสมกับน้ำกลั่นจำนวน 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการดูดตัวอย่างที่เตรียมไว้จำนวน 10 มิลลิลิตร แล้วใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร พร้อมทั้งทำการหยดฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ลงไป 3 หยด จากนั้นทำการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มอล จนถึงจุดยุติสารละลายจะเกิดเป็นสีชมพูอ่อน (รูปที่ 3.26) ทำการบันทึกผลของปริมาณไฮโดรคลอริกที่ใช้ไป พร้อมทั้งนำค่าที่ได้มาคำนวณปริมาณค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.26 การวิเคราะห์ค่าทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า (Total alkalinity)

การหาปริมาณน้ำอิสระ a_w ในไข่เยี่ยวม้า

ทำการวัดปริมาณน้ำอิสระ a_w โดยใช้เครื่อง Water activity meter (AQUA LAB รุ่น CX3TE) ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ใส่ตัวอย่างไข่เยี่ยวม้าลงใน Sample cup ไม่เกินครึ่งของ Sample cup เปิด Warm-up เครื่องก่อนใช้งาน 30 นาที ในการวัดปริมาณน้ำอิสระของตัวอย่างนำ Sample cup วางใน Sample drawer แล้วทำการวัดโดยหมุนปุ่มมาที่ Read ซึ่งไม่ควรใส่ตัวอย่างไว้ในเครื่องนานก่อนการวัด เนื่องจากจะทำให้ Mirror สกปรกมีผลทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง ภายหลังจากเครื่องวัดอ่านค่าทำการจดบันทึก



รูปที่ 3.27 การวัดปริมาณน้ำอิสระ a_w ในไข่เยี่ยวม้า

การหาความชื้นในไข่เยี่ยวม้า

สำหรับการหาความชื้นในไข่เยี่ยวม้ากระทำได้โดยการแยกไข่ขาวและไข่แดงออกจากกันทำการชั่งน้ำหนัก Moisture can จากนั้นนำตัวอย่างไข่ขาวไข่แดงที่เตรียมไว้ใส่ Moisture can (รูปที่ 3.28) แล้วชั่งตัวอย่างที่ต้องการหาความชื้นนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่างไข่เยี่ยวม้า (AOAC, 1990) จดบันทึกผลเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นในไข่เยี่ยวม้างตามสมการ 3.5

$$MC = \left(\frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

- โดยที่ MC คือร้อยละของความชื้น
- W_1 คือน้ำหนักเริ่มต้นของถั่วอบแห้ง, กรัม
- W_2 คือน้ำหนักของถั่วและไข่เยี่ยวม้าก่อนอบแห้ง, กรัม
- W_3 คือน้ำหนักถั่วอบและไข่เยี่ยวม้าหลังอบแห้ง, กรัม



รูปที่ 3.28 การหาความชื้นในไข่เยี่ยวม้า

การหาปริมาณตะกั่วในไข่เยี่ยวม้า

ชั่งน้ำหนักไข่เยี่ยวม้าที่ทำการแยกไข่ขาวและไข่แดงออกจากกันประมาณ 0.5 กรัม ใส่ในหลอดตัวอย่างของเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยไมโครเวฟ (รูปที่ 3.29) เดิมกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 65 ลงในหลอดตัวอย่างรองจนปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ นำหลอดย่อยตัวอย่างบรรจุในเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟดังรูป 3.30 และทำการย่อยตัวอย่างด้วยโปรแกรมดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยใช้อัตราความดัน 0.3 บาร์ต่อวินาที และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส หลังจากกระบวนการย่อยสิ้นสุดลงและทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำหลอดย่อยตัวอย่างออกและถ่ายสารละลายตัวอย่างใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ดังรูป 3.31 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาโลหะหนักด้วย ICP-MS (Pettine, M., et al. 2007) โดยมีขั้นตอนการเตรียมสารละลายมาตรฐานจากสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นของตะกั่ว 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นทำการเจือจางทั้งหมด 8 ความเข้มข้นคือ 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร ขึ้นถัดมาเตรียมกรดไนตริกความเข้มข้นร้อยละ 5 ในการทดสอบเครื่องและฉีดล้าง การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างสามารถคำนวณดังสมการ (3.6)

$$Pb = \frac{C \times D \times V}{wt. sp.} \quad (3.6)$$

- โดยที่ C คือความเข้มข้นของตะกั่วในตัวอย่างลบความเข้มข้นของตะกั่วในแบลนค์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- D คือแฟกเตอร์ของการเจือจาง
- V คือปริมาตรของสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
- wt. sp. คือน้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ตารางที่ 3.1 โปรแกรมย่อยตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ

ขั้นที่	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	Ramping Time (นาที)	Holding Time (นาที)
1	1500	30	-
2	1500	-	10
3	0	-	10



รูปที่ 3.29 หลอดย่อยตัวอย่างของเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ



รูปที่ 3.30 บรรจุหลอดตัวอย่างในเครื่องย่อยด้วยระบบไมโครเวฟ



รูปที่ 3.31 ปรับปริมาณตัวอย่าง

การวัดสีโดยวิธีวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

นำตัวอย่างไข่เยี่ยวม้าวางตรงตำแหน่งที่กำหนดในกล่องควบคุมแสงดังรูปที่ 3.16 ทำการทดสอบความเข้มแสง ณ ตำแหน่งที่กำหนดจากนั้นปรับโหมดกล้องดิจิทัล (Olympus, รุ่น STYLUS XZ-2, Japan) ฟังก์ชัน Macro มีค่ารูรับแสงที่ $f = 1.8$ speed $1/2000$ ไม่มีการซูมภาพไม่ใช่แฟลช ความละเอียด 3968×2976 pixels จัดเก็บไฟล์ภาพในรูปแบบ JPEG ดังรูปที่ 3.32 และนำมาวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรมอิมเมจเจ (ImageJ 1.42q, USA) ในรูปอีสโตแกรมของสีที่แสดงในระบบ RGB ดังรูป 3.17 จากนั้นแปลงค่าสีจากระบบ RGB ไปเป็นระบบ CIELAB L^* , a^* , b^* (color transformation) ซึ่งค่า L^* คือความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ ที่แสดงสีขาวไปจนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ ค่า a^* คือแกนสีจากสีเขียว ($-a^*$) ไปเป็นสีแดง ($+a^*$) ค่า b^* คือแกนสีจากสีน้ำ

เงิน (-b*) ไปเหลือ (+b*) โดยใช้สมการ direct model ที่กำหนดโดย IEC 61966-2-1 (1999) และ International Telecommunication Union (Rec. ITU-R BT.709-5, 2002) ค่าสีที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าไข่เยี่ยวม้าที่วางจำหน่ายแบบมีเครื่องหมายการค้าในรูปของความแตกต่างค่าสีดังสมการ (3.7)

$$\Delta E = \sqrt{(L_p - L_o)^2 + (a_p - a_o)^2 + (b_p - b_o)^2} \quad (3.7)$$

โดยที่ ΔE คือค่าความแตกต่างของสี
 L_p^*, a_p^*, b_p^* คือค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ได้จากกระบวนการผลิตภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก
 L_o^*, a_o^*, b_o^* คือค่าสีของไข่เยี่ยวม้าในท้องตลาดซึ่งมีเครื่องหมายการค้า



รูปที่ 3.32 จัดเก็บไฟล์ภาพในรูปแบบ JPEG

3.2.6 การตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวกซื้อ รวมถึงห้างสรรพสินค้า

นำผลิตภัณฑ์แปรรูปไข่เยี่ยวม้าจากร้านสะดวกซื้อ รวมถึงห้างสรรพสินค้าจำนวน 4 ผลิตภัณฑ์ โดยระบุช่วงควรรบริโภคภายใน 30 วัน จำนวน 3 ผลิตภัณฑ์และแบบไม่ระบุอายุการเก็บรักษาจำนวน 1 ผลิตภัณฑ์ นำตัวอย่างไข่เยี่ยวม้าจากผลิตภัณฑ์ตามร้านสะดวกซื้อ รวมถึงห้างสรรพสินค้าจำนวน 10 ฟอง เพื่อใช้ทำการทดลอง สำหรับการหาความถ่วงจำเพาะของไข่เยี่ยวม้า

ระดับ pH ของไข่ขาวและไข่แดง การตรวจวัดความแข็งแรงเจล การหาความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ ปริมาณตะกั่ว และการวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย สามารถทำตามหัวข้อ 3.2.5

3.3 สถานที่ทำการทดสอบ

3.3.1 อาคารจักรกลเกษตร ฟาร์มมหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3.2 ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมแปรรูปอาหาร ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3 และ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



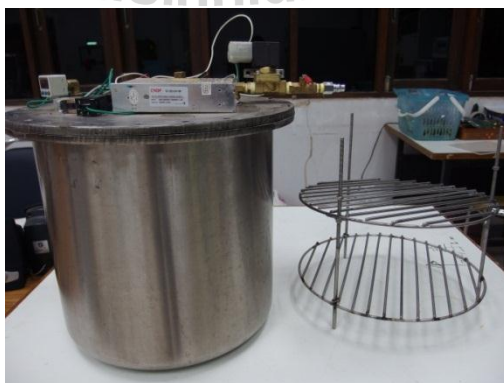
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

บทนี้เป็นการนำเสนอผลวิจัยรวมถึงการวิเคราะห์ผล ซึ่งสามารถแบ่งหัวข้อได้ดังนี้ การออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติก การตรวจสอบความสดใหม่ของไข่เป็ดเบื้องต้น การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสารละลายต่างสำหรับไข่เยี่ยวม้า การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงไข่เยี่ยวม้า และการตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวกซื้อรวมถึงห้างสรรพสินค้า โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ผลดังต่อไปนี้

4.1 ถังความดันไฮโดรสแตติก (Pressure vessel hydrostatic)

ถังความดันไฮโดรสแตติก (Pressure vessel hydrostatic) หรือ ถังความดันจัดเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ เพราะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า วัตถุประสงค์เพื่อบรรจุของเหลว สารละลาย รวมถึงการอัดอากาศ การทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศบริเวณเหนือผิวสารละลาย การออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติกประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ถังความดันไฮโดรสแตติกมีขนาดหน้าแปลนผ่าปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 เซนติเมตร หนาความจุ 36 ลิตร ความหนาหน้าแปลน 1 เซนติเมตร ชุดปะเก็นฝักันรั่วบริเวณฝาหน้าแปลนกว้าง 42 เซนติเมตร ตะแกรงสำหรับกดไข่ไม่ให้ลอยเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 เซนติเมตร และชุดอุปกรณ์ควบคุมแรงดัน (รูปที่ 4.1) หลักการทำงานตั้งโปรแกรมควบคุมระดับความดันบนหน้าปิด (Pressure switch) สำหรับควบคุมความดัน



รูปที่ 4.1 ถังความดันไฮโดรสแตติก (Pressure vessel hydrostatic)

4.2 สูญญากาศไฮโดรสแตติก(Vacuum vessel)

ถังสูญญากาศไฮโดรสแตติก (Pressure vessel hydrostatic) หรือ ถังสูญญากาศ การออกแบบถึงความดันสูญญากาศไฮโดรสแตติกประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ถังความดันหน้าแปลนฝาปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ขนาดความจุ 2.4 ลิตร ความหนาหน้าแปลน 2 เซนติเมตร ซีลยางกว้าง 34 เซนติเมตร และชุดอุปกรณ์ควบคุมสถานะสูญญากาศเหนือผิวสารละลาย (รูปที่ 4.2)



รูปที่ 4.2 ถังความดันสูญญากาศไฮโดรสแตติก (Vacuum vessel hydrostatic)

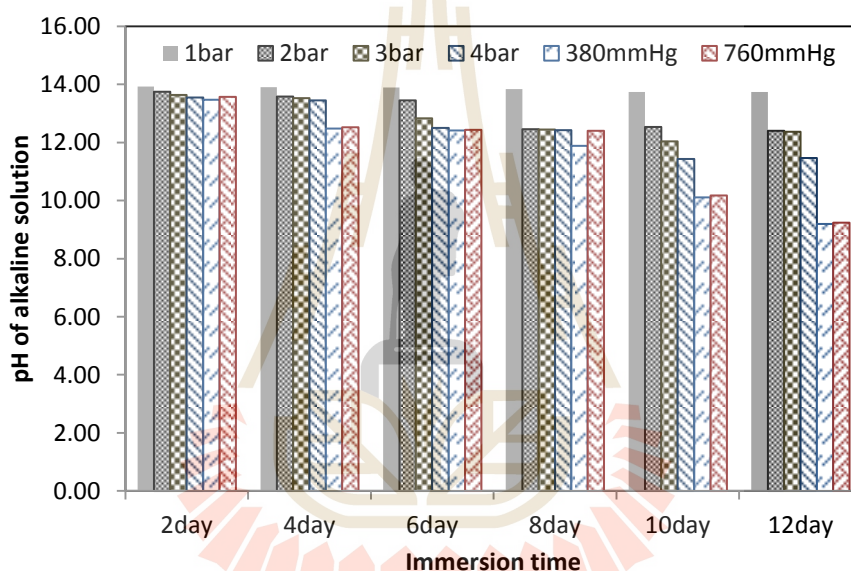
4.3 ความสดใหม่ของไขเปิด

จากการตรวจสอบความสดใหม่ของไขเปิดใช้น้ำหนัก และความสูงของไขขาวในการหาค่าออกยูนิต (HU) พบว่าน้ำหนักเฉลี่ยต่อฟอง 62.70 ± 4.29 กรัม มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากไขที่นำมาทดสอบมีการแบ่งเกณฑ์จากทางผู้ค้า โดยที่ขนาดของฟองไขมีความแตกต่างกันเช่น ทรงรี ทรงกลม ขนาดฟองใหญ่ และฟองเล็ก สำหรับความสูงของไขขาวพบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 6.04 ± 0.96 มิลลิเมตร ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากไขที่นำมาทดสอบมีระยะเวลาการเก็บรักษาสั้น ลักษณะของไขขาวยังจับกันเป็นก้อนการกระจายตัวของไขขาวมีไม่มาก ส่งผลให้ค่า (HU) มีค่าเฉลี่ย 75.28 ± 8.02 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากไขที่ใช้ทดสอบมีระยะเวลาการเก็บรักษาไม่เกิน 1 สัปดาห์จึงอยู่ในเกณฑ์ความสดใหม่ (ตารางผนวกที่ 4.1)

4.4 การเปลี่ยนแปลงสารละลายต่างสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า

4.4.1 ค่า pH ของสารละลายต่าง

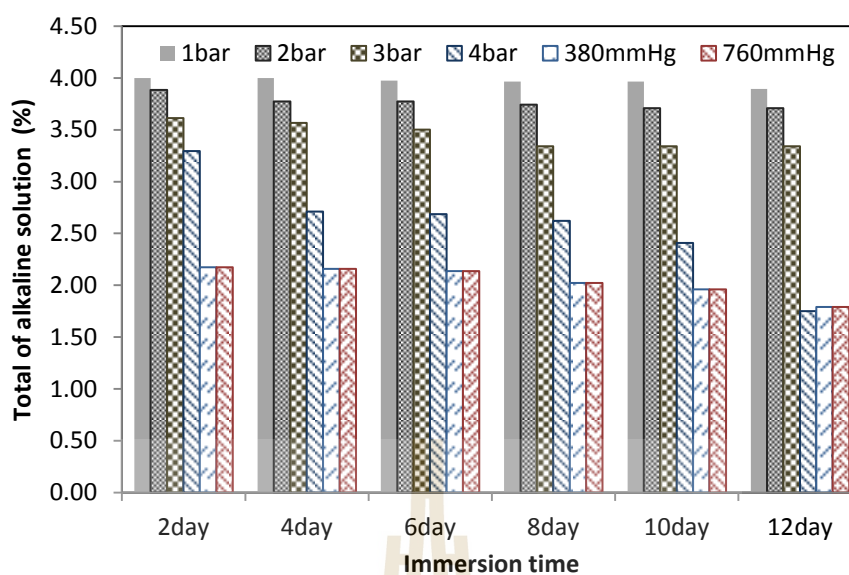
จากผลการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสารละลายต่างสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า สารละลายต่างเริ่มต้นสำหรับแช่ไข่มีค่า pH อยู่ที่ 14.00 ± 0.00 ภายหลังจากแช่ไข่พบค่า pH มีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันสูงขึ้นเพราะอิทธิพลความดันส่งผลต่อการเร่ง และแลกเปลี่ยนโมเลกุลสารละลายระหว่างเนื้อไข่ นอกจากนี้ระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่า pH มีแนวโน้มลดลง สำหรับที่สถานะความดันสุญญากาศระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นพบว่าค่า pH มีแนวโน้มลดลงได้ดีกว่าสถานะความดันสูง (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่า pH ของสารละลายต่าง

4.4.2 ปริมาณต่างในสารละลาย

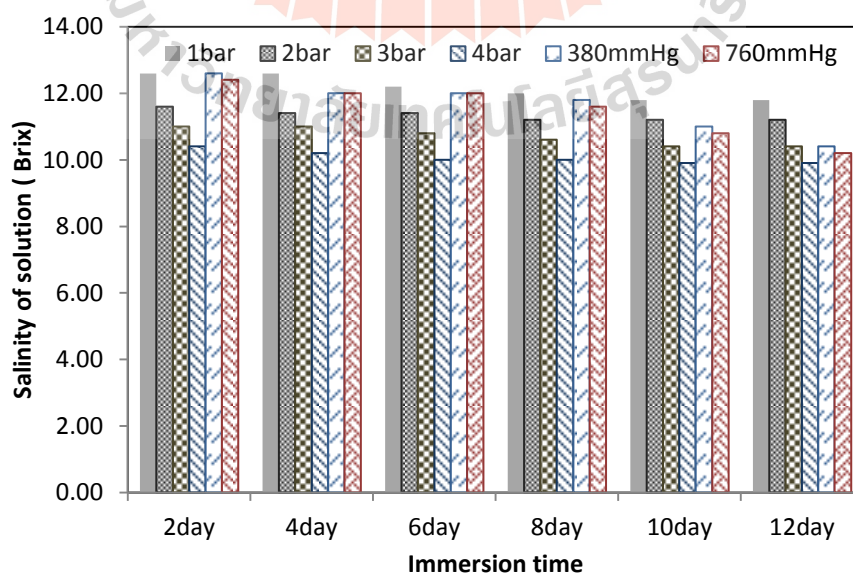
ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณต่างในสารละลายสำหรับการผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยกระบวนการไฮโดรสแตติก ปริมาณต่างเริ่มต้นอยู่ที่ร้อยละ 4 ภายหลังจากกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าสิ้นสุดลงพบว่าความดันและเวลาเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อร้อยละความเป็นต่างมีแนวโน้มลดลง คล้ายคลึงกับค่า pH (รูปที่ 4.3) โดยพบว่าที่สถานะความดันสุญญากาศมีแนวโน้มลดลงได้มากกว่าที่สถานะความดัน (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.4 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าปริมาณต่างในสารละลาย

4.4.3 ระดับความเค็มของสารละลาย

รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแตกต่างระดับความเค็มของสารละลายก่อนและหลังกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า โดยที่ค่าเริ่มต้นความเค็มของสารละลายอยู่ที่ 13.00 ± 0.00 องศาบริกซ์ เมื่อภายหลังกระบวนการผลิตสิ้นสุดลงทุกชุดการทดลองพบว่าค่าความเค็มมีแนวโน้มลดลงเมื่อความดันและระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น สำหรับภาวะสุญญากาศพบว่าระยะเวลา 2 8 10 และ 12 วัน เมื่อความดันสุญญากาศสูงขึ้นส่งผลให้ระดับความเค็มลดลง

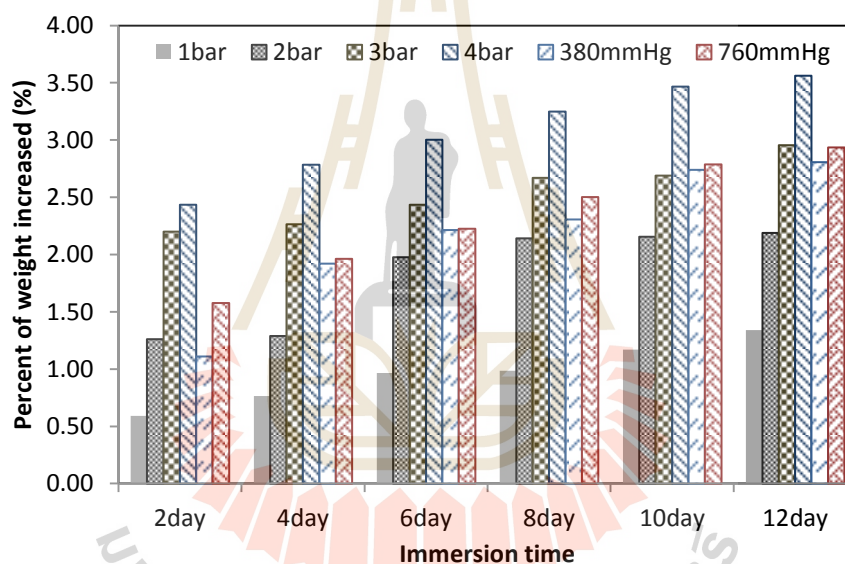


รูปที่ 4.5 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าความเค็มของสารละลาย

4.5 การเปลี่ยนแปลงของไขเยื่อหุ้มภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติก

4.5.1 ร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไขเยื่อหุ้ม

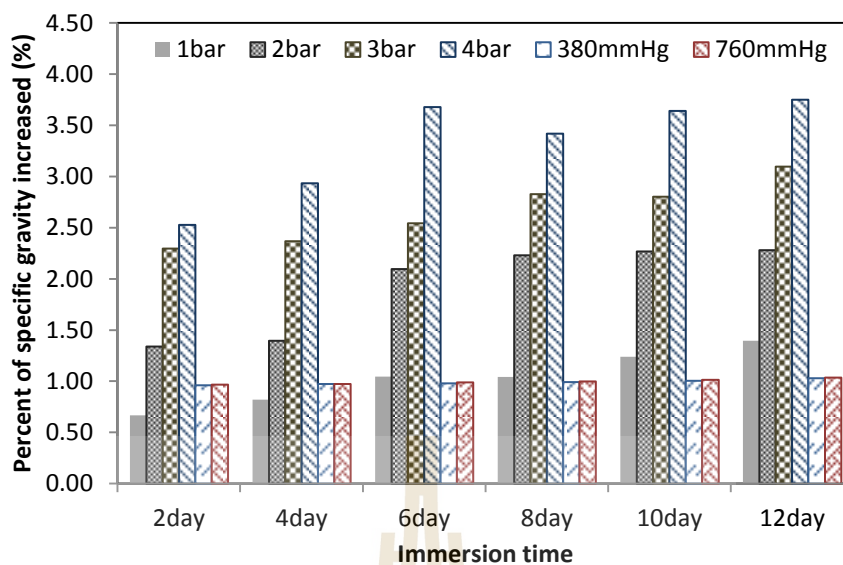
จากการศึกษาปริมาณร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตไขเยื่อหุ้ม แสดงให้เห็นว่าระดับความดันและจำนวนวันในการแช่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักไข โดยที่ปริมาตรฟองไขยังเท่าเดิม สาเหตุดังกล่าวเกิดจากพลังงานจลน์มีผลต่อการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารละลายต่างเข้าสู่เปลือกไขได้ดีขึ้น (รูปที่ 4.6) นอกจากนี้อิทธิพลของความดันสูงส่งผลให้ร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นดีกว่าสภาวะความดันสูญญากาศ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนในชุดการทดลองพบว่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางผนวกที่ 4.2) เนื่องจากความดัน ระยะเวลา ลักษณะทางกายภาพของไขเปิด รวมถึงตำแหน่งการแช่ไขเปิดแต่ละฟองแตกต่างกัน



รูปที่ 4.6 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไขเยื่อหุ้ม.

4.5.2 ความถ่วงจำเพาะของไขเยื่อหุ้ม

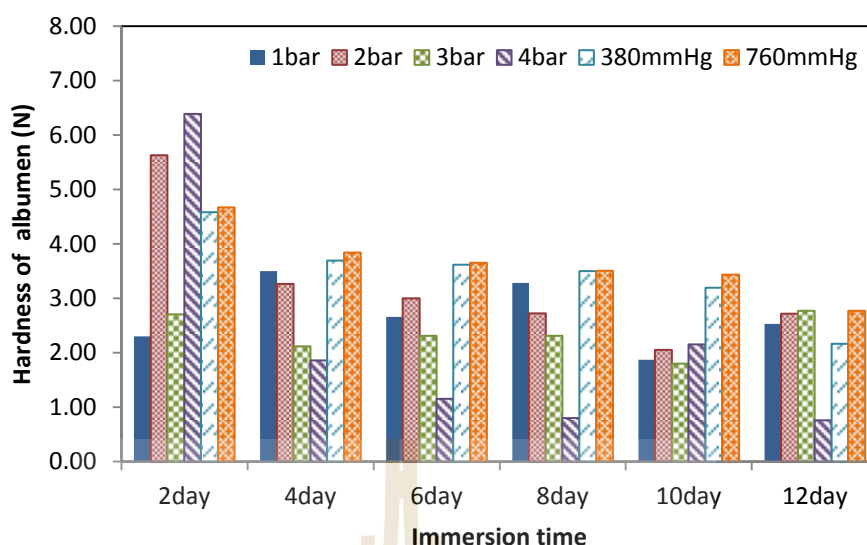
รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความถ่วงจำเพาะของไขมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความดันและระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.6) สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดการทดลองพบว่า มีความแตกต่างทางด้านสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางผนวกที่ ก.3)



รูปที่ 4.7 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าร้อยละความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นของไข่เยี่ยวม้า

4.5.3 ความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้า

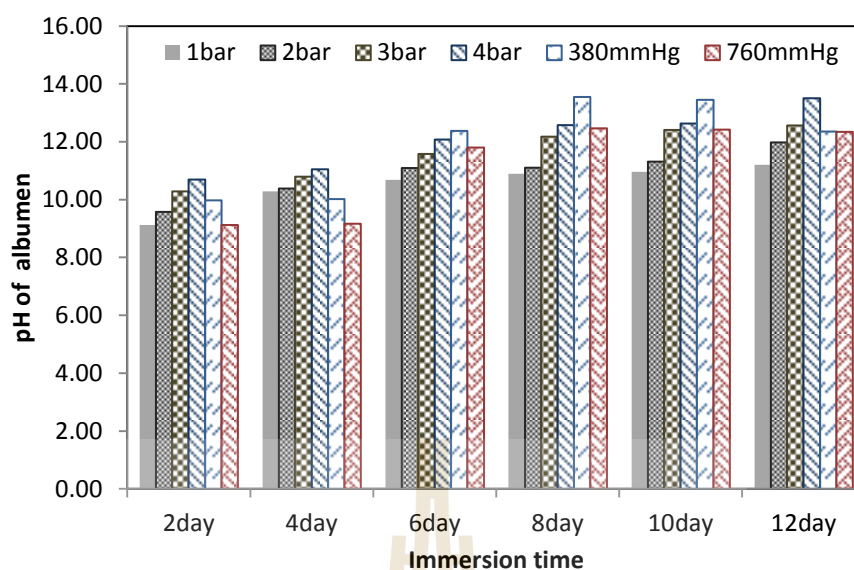
จากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้ามี่แนวโน้มลดลงที่ระดับความดัน 2 3 4 บาร์ และ 380 760 มิลลิเมตรปรอท สำหรับความดัน 1 บาร์ มีแนวโน้มลดลงในวันที่ 4 6 และ 8 ส่วนวันที่ 2 10 และ 12 ค่าความแข็งแรงเจลมีแนวโน้มลดลงแบบไม่ชัดเจน (รูปที่ 4.8) อันเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของไข่ที่ใช้ทดสอบ รวมถึงตำแหน่งการวางฟองไข่ในถังความดันไฮโดรสแตติก นอกจากนี้ระดับ pH ในไข่ขาวยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของไข่เยี่ยวม้า กล่าวคือเมื่อ pH มากกว่า 11.6 โปรตีนในไข่ขาวจะถูกทำลายกลายเป็นของเหลวไม่ก่อให้เกิดการเป็นวุ้นหรือเจลไข่เยี่ยวม้าถึงแม้ว่าจะได้รับความร้อนจากการนี้ สำหรับการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางผนวกที่ ก.4)



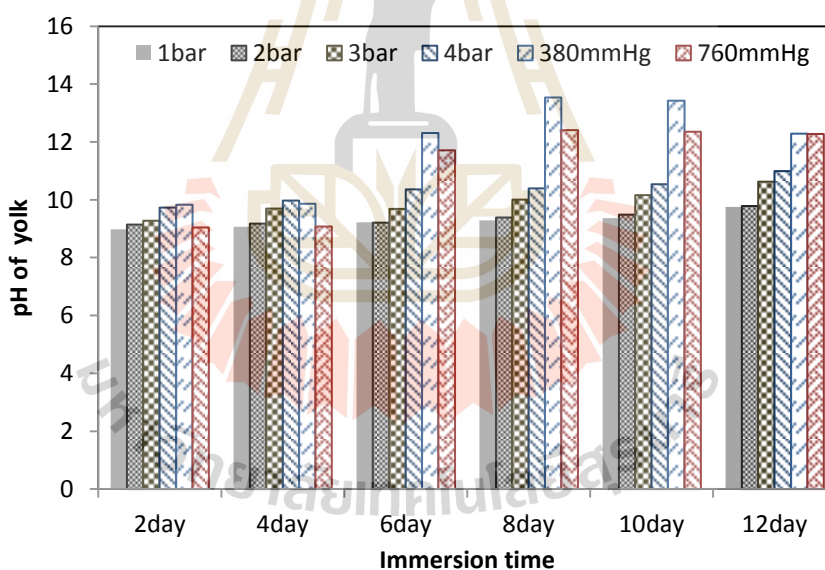
รูปที่ 4.8 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

4.5.4 วัดค่า pH ในไข่เยี่ยวม้า

จากการทดลองเมื่อวัดความเป็นกรดต่างของไข่ขาวและไข่แดงโดยใช้เครื่อง pH มิเตอร์ แสดงให้เห็นที่สภาวะความดันเดียวกันค่า pH เพิ่มขึ้นตามปริมาณวันที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาระดับความดันที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงค่า pH ที่สูงขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น โดยที่ pH ของไข่ขาวจะสูงกว่าไข่แดง (รูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10) เป็นไปตามคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าตามท้องตลาด (ตารางผนวกที่ ก.5) ค่า pH ในไข่ขาวที่มีความเหมาะสมต่อการเกิดเจลไข่เยี่ยวม้าจะอยู่ในช่วง 11.00 -11.60 หากเกินกว่านี้ไข่ขาวจะเปลี่ยนสภาพจากเจลไข่ช่วงระยะเวลาหนึ่งภายหลังจากนั้นจะเกิดการคืนสภาพกลายเป็นของเหลวเนื่องจากโปรตีนในไข่ถูกทำลาย



รูปที่ 4.9 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่า pH ไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

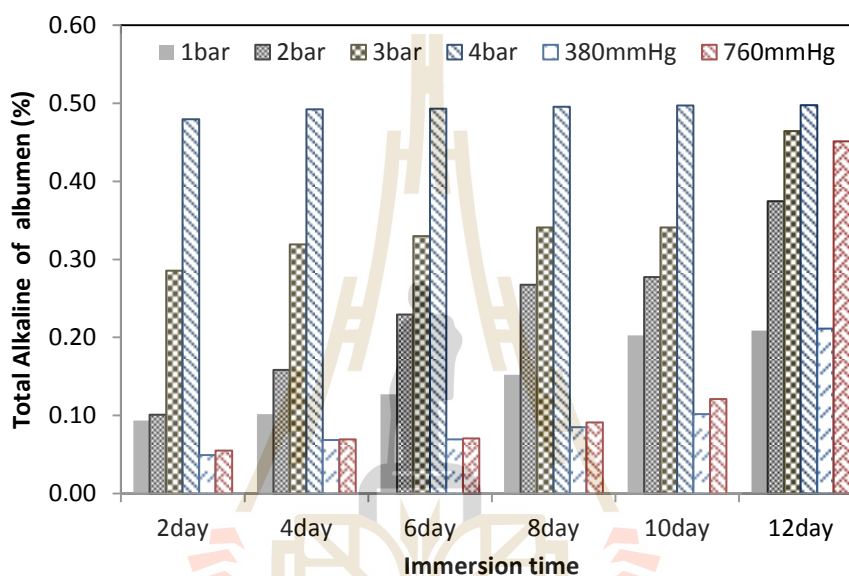


รูปที่ 4.10 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่า pH ไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า

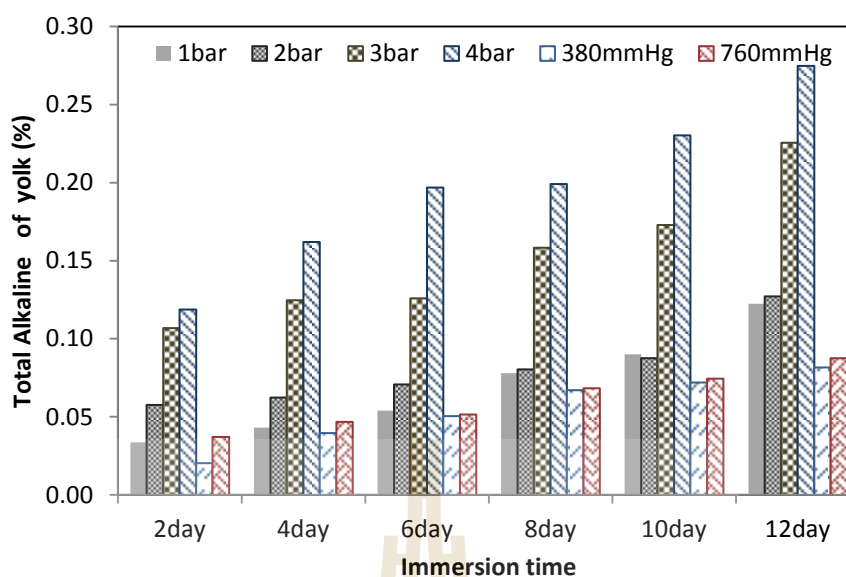
4.5.5 ปริมาณด่างทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า (Total alkalinity)

การวิเคราะห์ปริมาณด่างทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้าแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนอันได้แก่ การหาปริมาณด่างในไข่ขาวและไข่แดง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อระดับความดันสูงขึ้นมีอิทธิพลต่อร้อยละด่างทั้งหมดในไข่ขาวและไข่แดงสูงตาม (รูปที่ 4.11 และ 4.12) หากพิจารณาความ

ดันต่ำกว่าบรรยากาศมากๆ พบว่าเกิดสภาวะความดันสูญญากาศภายในถังแช่ส่งผลให้ค่าทั้งหมดสูงขึ้นตาม และเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการแช่ไขพบว่า ปริมาณค่าทั้งหมดที่มีในเนื้อไขสูงขึ้นตามจำนวนวันที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันสูงก่อให้เกิดการแพร่โมเลกุลของสารละลายต่างเข้าสู่เปลือกไข่ได้ดีกว่าการผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยสภาวะความดันต่ำกว่าบรรยากาศ และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณค่าทั้งหมดในไขขาวไขแดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ตารางผนวกที่ ก.8 และ ตารางผนวกที่ ก.9)



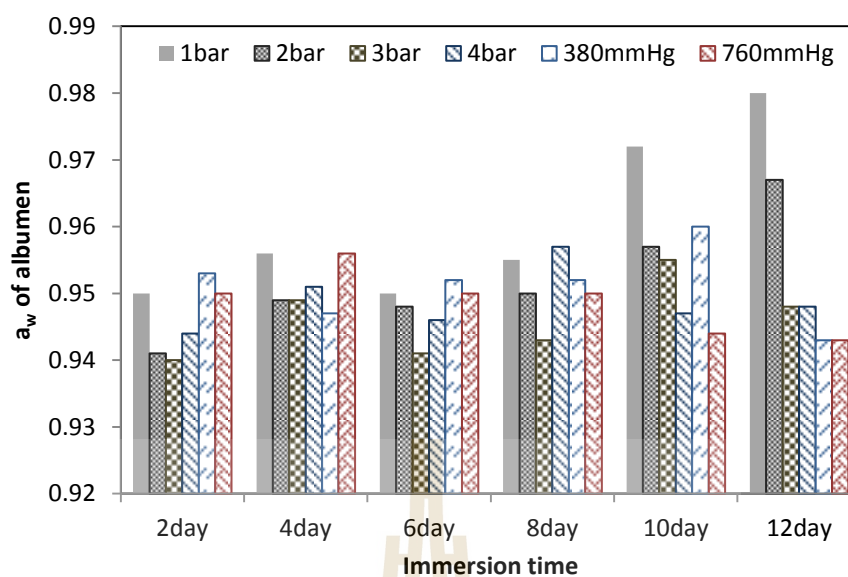
รูปที่ 4.11 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าปริมาณต่างในไขขาวของไข่เยี่ยวม้า



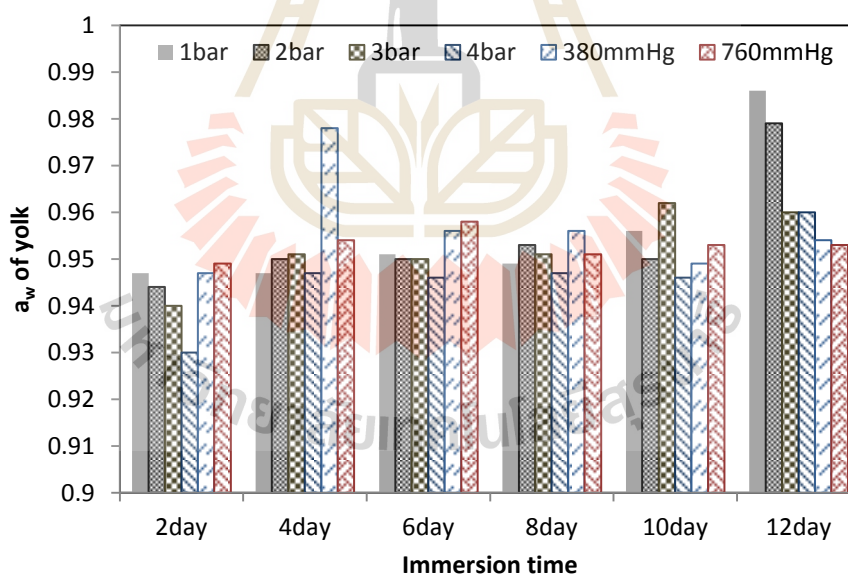
รูปที่ 4.12 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าปริมาณต่างในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า

4.5.6 ปริมาณน้ำอิสระ a_w ในไข่เยี่ยวม้า

รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงให้เห็นว่าค่า Water activity ของไข่ขาว และไข่แดงในไข่เยี่ยวม้ามียุคสูงกว่า 0.90 ซึ่งปกติราและยีสต์ส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่า Water activity ไม่เกิน 0.70 โดยปริมาณน้ำอิสระในไข่เยี่ยวม้าเป็นตัวบ่งชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต และใช้เป็นตัวกำหนดการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร อายุการเก็บรักษา จากการทดลองผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยกระบวนการไฮโดรสแตติกมีการเติมส่วนผสมของเกลือลงไปเพื่อเพิ่มรสชาติ ถนอมอาหารและที่สำคัญสามารถควบคุมปริมาณน้ำอิสระ สำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณน้ำอิสระไม่มีความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางผนวกที่ ก.17 และตารางผนวกที่ ก.18)



รูปที่ 4.13 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าปริมาณน้ำอิสระในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า



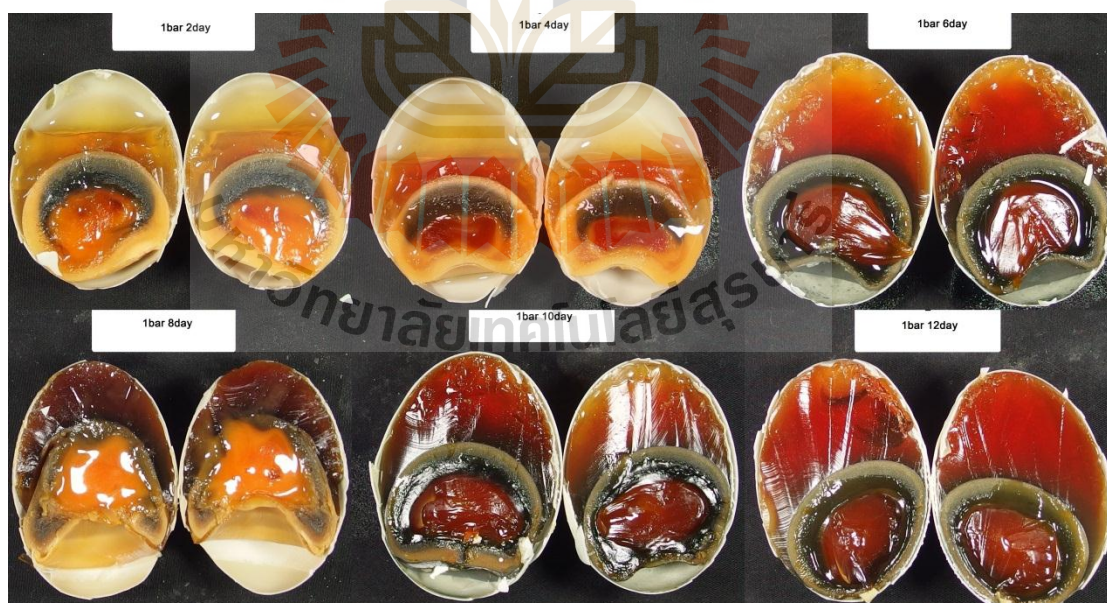
รูปที่ 4.14 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าปริมาณน้ำอิสระในไข่แดง

4.5.7 ความชื้นในไข่เยี่ยวม้า

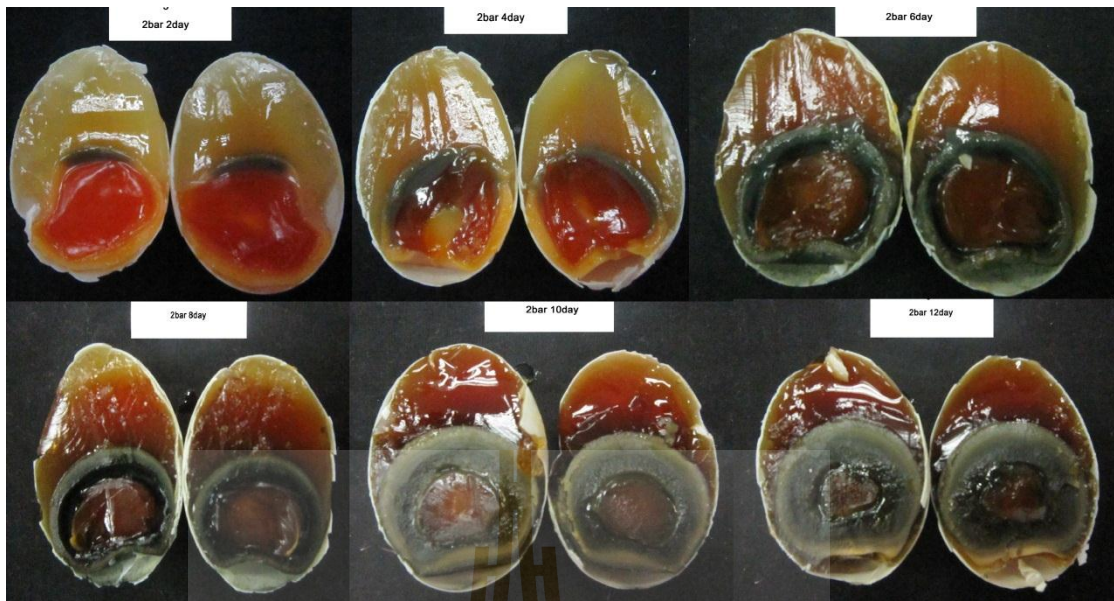
จากการทดลองพบว่าความชื้นในไข่ขาวอยู่ในช่วง 80% ไข่แดง 17% สอดคล้องกับการรายงานผล (ประเวทย์ ตูย์เต็มวงศ์, ปวีณา จิตปลื้ม พรรณชينا, เอี่ยม โสภณกุล และกิตติมา ชาวาลรติกุล, 2544) การหาความชื้นในไข่เยี่ยวม้าสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณน้ำทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้า ด้วยวิธีการแยกน้ำออกทางกายภาพโดยการอบแห้งทำให้น้ำระเหยออก เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพราะภายหลังจากกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า (ตารางผนวกที่ ก.12)

4.5.8 การเปลี่ยนแปลงสีของไข่เยี่ยวม้า

ผลจากการทดลองผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยกระบวนการไฮโดรสแตติกพบว่า ระดับความดันสูง 1 บาร์ 10 วัน ให้คุณลักษณะการเกิดเจลไข่เยี่ยวม้าโดยมีสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด (รูปที่ 4.15) ระดับความดันสูง 2 บาร์ 6 วัน และความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 380 มิลลิเมตรปรอท 8 วัน เกิดเจลไข่เยี่ยวม้าสีน้ำตาล (รูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.19) และที่ระดับความดันสูง 3 บาร์ 6 วัน ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท 6 วัน (รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.20) ขณะที่ความดันสูงระดับ 4 บาร์จะเกิดเจลไข่เยี่ยวม้าเมื่อจำนวนวันแช่ไม่เกิน 6 วัน (รูปที่ 4.18)



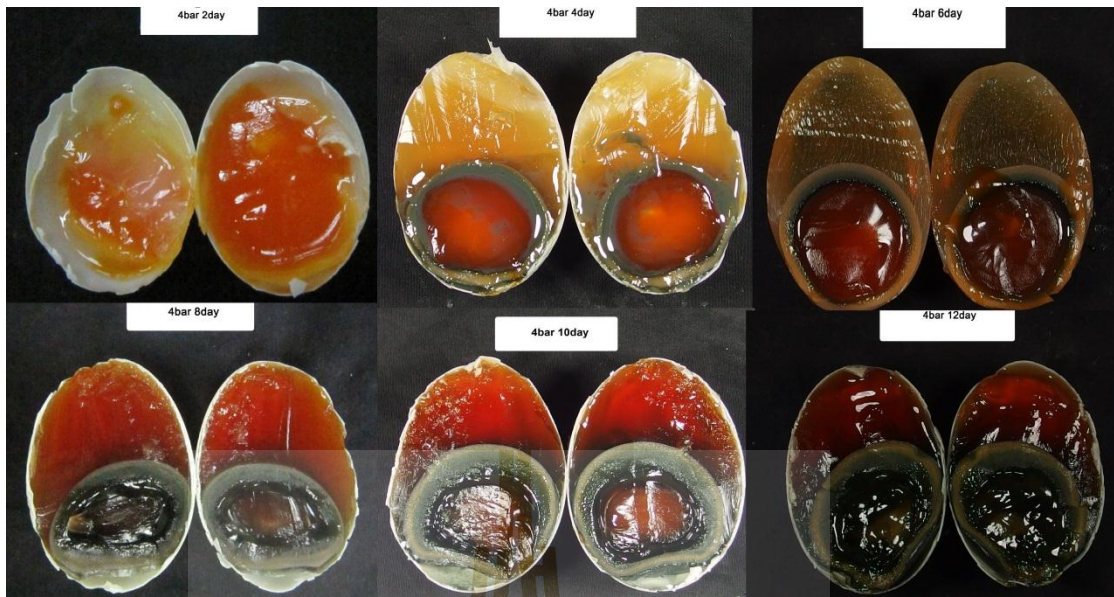
รูปที่ 4.15 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 1 บาร์



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 2 บาร์



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดัน 3 บาร์



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่
สูญญากาศ 4 บาร์



รูปที่ 4.19 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความ
ดันสูญญากาศ 380 มิลลิเมตรปรอท



รูปที่ 4.20 ผลกระทบของภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาในการแช่ต่อค่าสีของไข่เยี่ยวม้าที่ความดันสุญญากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท

สำหรับการวิเคราะห์สีด้วยวิธีเชิงภาพถ่ายที่สภาวะความดัน ณ เวลาต่างกัน แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของไข่เยี่ยวม้าโดยการเพิ่มความดันมีผลต่อการเร่งให้เกิดเจลในไข่เยี่ยวม้า ที่ความดันสูง 4 บาร์ ระยะเวลาไม่น้อยกว่า 6 วัน ส่งผลให้เกิดเจลไข่เยี่ยวม้าได้ดีลักษณะไข่ขาวมีสีเหลืองอ่อนไข่แดงบริเวณขอบด้านนอกเกิดสีเทาและมีลักษณะเป็นเจล ขณะที่กึ่งกลางไข่แดงมีสีส้มเป็นเจลหนืด (รูปที่ 4.18)

สภาวะความดันสูง 2-3 บาร์ และความดันต่ำกว่าบรรยากาศ 760 มิลลิเมตรปรอท (รูปที่ 4.16 4.17 และ 4.20) ใช้ระยะเวลาในการแช่ 6 วัน ลักษณะปรากฏที่เกิดขึ้นจะเห็นไข่ขาวมีสีเหลืองแข็งตัวเป็นเจลส่วนไข่แดงมีขอบนอกสีเหลืองภายในเกิดเจลสีส้มอ่อน

สำหรับความดันที่สภาวะ 1 บาร์ และ 380 มิลลิเมตรปรอท ใช้ระยะเวลาในการแช่ 8 วัน ซึ่งระดับความดันรวมถึงระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น ลักษณะปรากฏสีของไข่ขาวมีสีส้มคล้ายสีน้ำชาและมีบางส่วนเกิดของเหลวสีส้ม ไข่แดงขอบนอกสุดมีสีเหลืองแข็งชั้นกลางมีลักษณะสีเทาเป็นเจลและชั้นในสุดเป็นเจลสีส้ม อย่างไรก็ตามลักษณะสีที่เห็นเกิดจากการใช้

ประสาทสัมผัสทางตาของมนุษย์ในการแสดงทัศนคติ สำหรับการวิเคราะห์สีไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตด้วยกระบวนการไฮโดรสแตติกเพื่อตรวจสอบให้เห็นว่ามีความแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาดเลือกใช้วิธีเปรียบเทียบสี ในรูปฮิสโตแกรมที่แสดงในระบบ RGB จากนั้นแปลงค่าสี

จากระบบ RGB ไปเป็นระบบ CIELAB L^* , a^* , b^* (Color transformation) ซึ่งค่า L^* คือความสว่าง (Lightness) จากค่า $+L^*$ ที่แสดงสีขาวไปจนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ ค่า a^* คือแกนสีจากสีเขียว ($-a^*$) ไปเป็นสีแดง ($+a^*$) ค่า b^* คือ แกนสีจากสีน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) จากการทดลองพบว่าการวิเคราะห์สีด้วยระบบ CIELAB L^* , a^* , b^* (Color transformation) เมื่อพิจารณาผลต่างสีไข่ขาวผลิตภัณฑ์ MK1 ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 2 บาร์ 6 วัน ผลต่างอยู่ที่ 10.14 ขณะที่ไข่แดง ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 3 บาร์ 8 วัน ผลต่างอยู่ที่ 3.01 ผลต่างสีไข่ขาวผลิตภัณฑ์ MK2 ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 2 บาร์ 12 วัน ผลต่างอยู่ที่ 10.58 ขณะที่ไข่แดง ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 3 บาร์ 6 วัน ผลต่างอยู่ที่ 9.21 ผลต่างสีไข่ขาวผลิตภัณฑ์ MK3 ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 2 บาร์ 12 วัน ผลต่างอยู่ที่ 12.96 ขณะที่ไข่แดง ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 3 บาร์ 6 วัน ผลต่างอยู่ที่ 17.75 MK4 ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 2 บาร์ 6 วัน ผลต่างอยู่ที่ 6.11 ขณะที่ไข่แดง ผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 380 มิลลิเมตรปรอท 10 วัน ผลต่างอยู่ที่ 3.07 หากพิจารณาถึงผลต่างที่น้อยที่สุดของทุกชุดการทดลองพบว่า ผลต่างสีไข่ขาวผลิตภัณฑ์ MK4 มีผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 2 บาร์ 6 วัน ผลต่างอยู่ที่ 6.11 ผลต่างสีไข่แดงผลิตภัณฑ์ MK1 มีผลต่างน้อยที่สุดคือที่สภาวะ 3 บาร์ 8 วัน ผลต่างอยู่ที่ 3.01 ผลที่ได้บ่งบอกถึงคุณลักษณะทางด้านสีที่มีความคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าตามท้องตลาด (ตารางผนวกที่ ก.17)

4.6 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวกซื้อรวมถึงห้างสรรพสินค้า

ผลจากการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพทั้งภายนอกและภายในของผลิตภัณฑ์ตามร้านสะดวกซื้อรวมถึงห้างสรรพสินค้าแสดงให้เห็นว่า น้ำหนักฟองไข่เยี่ยวม้าทั้ง 4 ผลิตภัณฑ์มีผลเฉลี่ยอยู่ที่ 67.97 ± 4.00 กรัม และน้ำหนักฟองไข่ที่มากที่สุดอยู่ที่ผลิตภัณฑ์ MK4 เมื่อพิจารณาความถ่วงจำเพาะพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.03 ± 0.02 ส่วนการตรวจสอบคุณภาพภายในประกอบด้วย ค่าความแข็งแรงเจลไข่เยี่ยวม้าพบว่าผลิตภัณฑ์ MK1 มีค่าความแข็งแรงเจลสูงสุดที่ 1.28 นิวตัน และผลิตภัณฑ์ MK2 มีค่าความแข็งแรงเจลด้อยสุดที่ 0.63 สำหรับค่าเฉลี่ยความแข็งแรงเจลรวมทั้งหมดอยู่ที่ 0.96 ± 0.58 นิวตัน ระดับ pH ในไข่ขาวไข่แดงเฉลี่ยอยู่ที่ 10.10 ± 0.31 และ 10.01 ± 0.43 ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่าการที่ pH ในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้ามีค่าต่ำกว่าการแปรรูปไข่เยี่ยวม้าด้วยกระบวนการไฮโดรสแตติก เนื่องจากระยะเวลาในการเก็บรักษาที่ต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับ pH เมื่อพิจารณาปริมาณค่าทั้งหมดในไข่ขาวและไข่แดงของไข่เยี่ยวม้าจะมีผลที่ต่ำลงเช่นเดียวกัน โดยผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาดจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 0.35 ± 0.19 และ 0.33 ± 0.22 ตามลำดับ หากพิจารณาถึงความชื้นไข่ขาวในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าพบว่า ผลเฉลี่ยความชื้นกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยสภาวะความดันไฮโดรสแตติก มีค่าสูงกว่า (ตารางที่ 4.1) เนื่องจาก

ไข่เยี่ยวม้าเพิ่งสิ้นสุดกระบวนการผลิตทำให้ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเปลือกไข่น้อยกว่าไข่ในท้องตลาดที่ผลิตมานาน เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำอิสระในไข่ขาวไข่แดงแสดงให้เห็นว่าไข่เยี่ยวม้ามี่ผลเฉลยอยู่ในเกณฑ์เดียวกับกระบวนการแปรรูปไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกผลเฉลยอยู่ที่ 0.95 ± 0.01 และเมื่อพิจารณาการตรวจสอบคุณลักษณะของสีไข่เยี่ยวม้าในรูปฮิสโตแกรมที่แสดงในระบบ RGB จากนั้นแปลงค่าสีจากระบบ RGB ไปเป็นระบบ CIELAB L^* , a^* , b^* พบว่าการวิเคราะห์สีด้วยระบบ CIELAB L^* , a^* , b^* ไข่ขาวในไข่เยี่ยวม้า L^* ความสว่าง (Lightness) สูงสุดคือ ผลิตภัณฑ์ MK1 มีผล 47.49 และตัวเลขที่น้อยลงแสดงให้เห็นถึงความเข้มของสีผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้า a^* แสดงผลเป็นเฉดสีแดงโดยตัวเลขมากมีความเป็นสีแดง จากการทดลองผลิตภัณฑ์ MK1 มีค่า a^* สูงสุด 11.14 b^* ให้ความเป็นสีเหลืองโดยผลิตภัณฑ์ MK1 มีค่าสูงสุด 25.33 สำหรับไข่แดง L^* ความสว่าง (Lightness) ผลต่ำสุดคือผลิตภัณฑ์ MK1 46.87 แสดงให้เห็นถึงสีที่คล้ำขึ้น a^* ให้ความเป็นสีแดงค่ามากขึ้นแสดงถึงตำแหน่งการเกิดสีแดงผลิตภัณฑ์ MK4 มีค่ามากที่สุดคือ 21.22 $-a^*$ แสดงให้เห็นการเกิดสีเขียวมากขึ้นผลิตภัณฑ์ MK3 มีเฉดสีเขียวมากที่สุด -6.54 b^* แสดงผลการเกิดสีเหลืองโดยผลิตภัณฑ์ MK4 มีค่ามากที่สุด 43.98 (รูปที่ 4.21) และ (ตารางที่ ก.17 และ ก.18)



ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่แดงไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

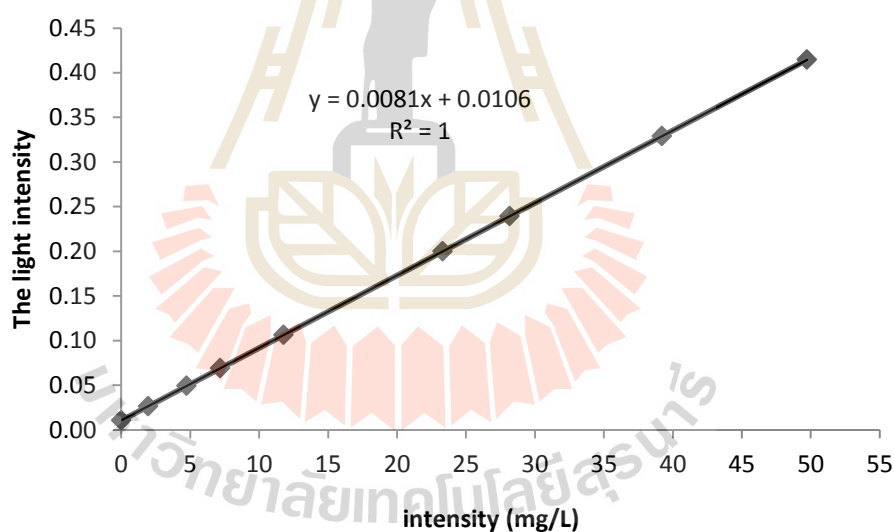
Experiment Condition	MK1	MK2	MK3	MK4	Mean±SD
Weight (g)	65.36	66.26	64.60	67.31	67.97±4.00
Sg	1.03	1.04	1.02	1.03	1.03±0.02
Hardness (N)	1.28	0.63	0.82	1.13	0.96±0.58
pH of albumen	10.07	10.27	9.97	9.93	10.10±0.31
pH of yolk	10.00	10.40	10.01	9.32	10.01±0.43
Total alkalinity of albumen (%)	0.53	0.16	0.55	0.15	0.35±0.19
Total alkalinity of yolk (%)	0.54	0.15	0.53	0.09	0.33±0.22
MC (%) of albumen	79.26	78.03	79.74	77.35	78.59±2.64
MC (%) of yolk	15.47	21.02	24.95	17.90	19.84±10.30
a _w of albumen	0.95	0.94	0.93	0.95	0.95±0.01
a _w of yolk	0.96	0.94	0.96	0.95	0.95±0.01
color L* of albumen	47.49	32.86	35.91	43.44	40.01±8.35
color a* of albumen	11.14	6.24	7.02	7.16	7.89±3.25
color b* of albumen	25.33	4.52	7.58	12.42	12.46±9.58
color L* of yolk	46.87	52.27	57.10	58.36	53.65±7.86
color a* of yolk	2.30	-1.78	-6.54	21.22	3.80±12.17
color b* of yolk	17.09	11.18	7.48	43.98	19.93±16.88



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่าสีของไข่เยี่ยวม้าตามร้านสะดวกซื้อรวมถึงห้างสรรพสินค้า

4.6.1 ปริมาณตะกั่วในผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้า

ก่อนการตรวจวัดหาปริมาณตะกั่วในไข่เยี่ยวม้า ด้วยการวิเคราะห์เทคนิค Standard addition ICP-MS โดยใช้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้นทราบค่าแน่นอน 9 ความเข้มข้น คือ 0.5, 1, 5, 10, 20, 30, 40 และ 50 ไมโครกรัมต่อลิตร เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานตะกั่วในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.22 เมื่อนำตัวอย่างไข่ขาวไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า ทำการตรวจสอบหาปริมาณตะกั่ว พบว่ามีการปนเปื้อนของสารตะกั่วในไข่ขาวไข่แดงทุกตัวอย่างที่ทำการตรวจสอบ โดยมีค่าไม่เกินกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) 2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากผลการวิเคราะห์การปนเปื้อนปริมาณตะกั่วของผลิตภัณฑ์ไข่เยี่ยวม้าตามท้องตลาดพบว่าผลิตภัณฑ์ MK2 ปนเปื้อนสูงที่สุดคือ 1.0412 และ 0.4088 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2 และ 4.3) เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยเทคนิคไฮโดรสแตติกสภาวะ 4 บาร์ 12 วัน พบปริมาณตะกั่วในไข่ขาวไข่แดง 0.0374 และ 0.6480 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าถึงแม้ในกระบวนการผลิตไม่มีการเติมสารตะกั่วเข้าไป แต่ถ้ามีการปนเปื้อนในวัตถุดิบ เช่น ไข่เป็ด แหล่งน้ำ ดินพองก็อาจจะส่งผลให้มีปริมาณตะกั่วในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.22 กราฟมาตรฐานตะกั่ว

จากผลการวิเคราะห์และทดลองแสดงให้เห็นว่า ไข่เป็ดที่ใช้ผลิตไข่เยี่ยวม้าพบปริมาณตะกั่วในไข่ขาวไข่แดง 0.0035 และ 0.0093 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ในชุดควบคุมที่สภาวะ 4 บาร์ 12 วัน สารละลายและน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตตรวจพบปริมาณสารตะกั่ว 0.0017 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นที่มาของสารตะกั่วจากการตรวจพบอาจมีสิ่งปนเปื้อนตาม

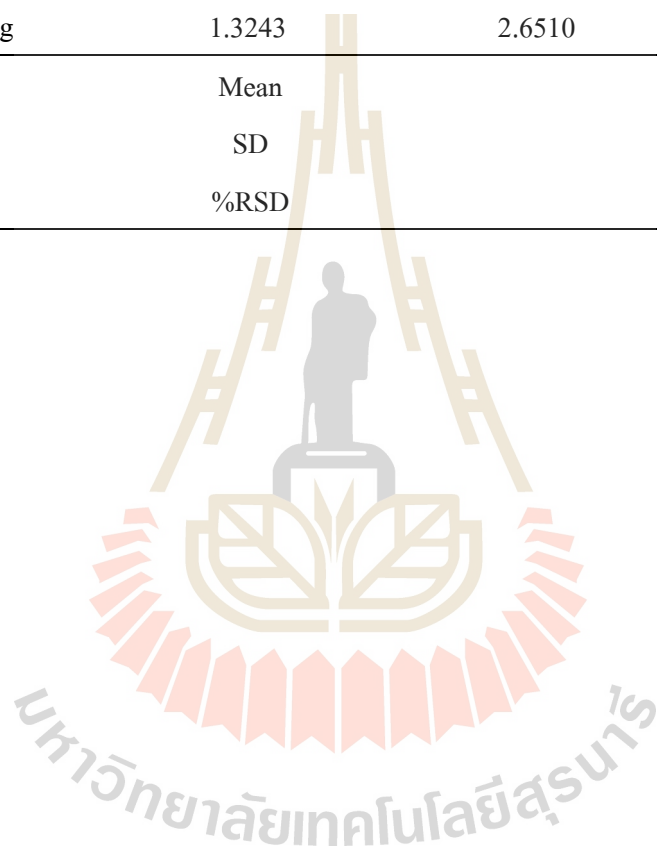
ธรรมชาติ เหตุผลในการตรวจวัดปริมาณตะกั่วในไข่เยี่ยวม้า เนื่องจากผู้ผลิตบางรายเติมสารตะกั่วส่งผลต่อการเกิดเจลและคงรูปได้ดีในไข่เยี่ยวม้า สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณสิ่งปนเปื้อนของสารตะกั่วที่ระดับความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ (%RSD) สามารถยอมรับได้โดยผลการวิเคราะห์อยู่ในระดับหนึ่งในล้านส่วน มิลลิกรัมต่อลิตร ควรมีค่า (%RSD) อยู่ในช่วง 1-10 % (สวรินทร์ สนิะวิวัฒน์ และนนุช เมธียนต์พิริยะ, 2555)

ตารางที่ 4.2 ปริมาณตะกั่วที่พบในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

Experiment Condition	Weight (g)	The reading from the standard curve. (mg l^{-1})	Lead content (mg kg^{-1})
MK1	0.6810	2.4210	0.0990
MK2	0.5328	8.6590	1.0412
MK3	0.6798	2.0690	0.0587
MK4	0.7992	2.2690	0.0695
4bar12day	0.5500	4.1190	0.0374
duck egg	0.6991	1.5890	0.0035
Mean			0.2182
SD			0.4045
%RSD			1.8535

ตารางที่ 4.3 ปริมาณตะกั่วที่พบในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า

Experiment Condition	Weight (g)	The reading from the standard curve. (mg l ⁻¹)	Lead content (mg kg ⁻¹)
MK1	0.7586	2.6380	0.0175
MK2	0.8053	5.7720	0.4088
MK3	1.2217	1.3350	0.0942
MK4	0.8842	2.1660	0.0567
4bar12day	0.5300	8.2520	0.6480
duck egg	1.3243	2.6510	0.0093
	Mean		0.1465
	SD		0.3068
	%RSD		2.0941



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกพบว่า ความดันและระยะเวลาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของไข่

โดยไข่ที่ใช้ทดลองจะทำการหาค่าความสดใหม่ก่อนการผลิตไข่เยี่ยวม้าด้วยกระบวนการไฮโดรสแตติกเพื่อคัดเลือกไข่ที่ดีที่สุด โดยชุดการทดลองคุณภาพไข่จะอยู่ที่ระดับชั้นเอเอ จนถึงระดับชั้นเอ เนื้อไข่ขาวยังไม่มีการกระจายตัวมากนัก สำหรับการตรวจวัดคุณภาพไข่เยี่ยวม้าพบว่า ค่าร้อยละของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่า pH เพิ่มขึ้นตามความดันและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงเจลไข่ขาวมีแนวโน้มลดลง เจลไข่ขาวมีสีน้ำตาลเข้มขึ้นที่ทุกความดัน เมื่อระยะเวลาในการแช่เพิ่มขึ้น สำหรับความชื้นและปริมาณน้ำอิสระที่ตรวจสอบพบว่า อยู่ในเกณฑ์เดียวกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด ในส่วนของการตรวจวัดปริมาณตะกั่วพบทุกผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนเล็กน้อยโดยมีค่าไม่เกินกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไข่เยี่ยวม้าภายใต้ความดันคือ 2 บาร์ 6 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าภายใต้สภาวะไฮโดรสแตติกการใช้ความดันสูงมากๆ ส่งผลเสียต่อคุณภาพภายในไข่เยี่ยวม้าทำให้เชื้อเซลล์ไข่แดงแตกก่อให้เกิดคุณลักษณะที่ไม่เหมาะสม จากชุดการทดลองดังกล่าวความดันที่ 2 บาร์ มีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้ามากที่สุด

รายการอ้างอิง

- กลุ่มการสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศกรมปศุสัตว์ [ออนไลน์]. 2555. เข้าถึงจาก:
<http://www.dld.go.th>
- ณัฐดนัย ตันทวิรุพห์ และสุวรรณ หอมหวล. 2554. “การออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับเร่งกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้าในระดับอุตสาหกรรม.” วารสารวิทยาศาสตร์กำแพงแสน 9,1: 27-40.
- นงลักษณ์ ตั้งไพศาลกุล. 3 พฤศจิกายน 2556. มาตรฐานของการวัดค่าความเป็นกรด-เบส [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก:http://www.nimt.or.th/nimt/upload/contentfile/sys-lab_magazine-387-395.pdf
- ประเวทย์ ต้อยเต็มวงศ์, ปวีณา จิตปลื้ม, พรรณชญา เอี่ยมโสภณกุล, กิตติมา ชวาลรติกุล. 2544. การผลิตไข่เยี่ยวม้าโดยการใช้ความดันไฮโดรสแตติก. ปัญหาพิเศษ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 3 หน้า.
- บัณฑิต จริโมภาส และอุดมศักดิ์ กิจทวี. 2547. ระบบเครื่องมือวัดหาความถ่วงจำเพาะและปริมาตรผลไม้อัตโนมัติ. วารสารวิทยาศาสตร์กำแพงแสน, ปีที่ 2(3), 137-143.
- พยุงค์กี้ มะโนชัย.(2542). “การผลิตไข่เยี่ยวม้าโดยไม่ใช้โลหะหนัก.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ชาติ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุภาพ อัจฉริยศรีพงศ์. 25 ตุลาคม 2556. ไข่เยี่ยวม้า [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: http://www.tistr.or.th/t/publication/page_area_show_bc.asp?i1=64&i2=9
- สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 27 พฤศจิกายน 2556. ไข่เป็ด [ออนไลน์]. เข้าถึงจาก: http://www.acfs.go.th/standard/download/DUC_K_EGG.pdf
- วิไล รังสาดทอง. 2545. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ. 401 น.
- ศุภมาส ปั้นปัญญา. 2551. “การออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติกและการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปฝรั่ง.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหาร ชาติ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- สารินทร์ สีนะวิวัฒน์, และนนุช เมธิยนต์พิริยะ. 2555. การศึกษาเปรียบเทียบวิธีเตรียมตัวอย่างข้าวเพื่อทดสอบสารหนูอินทรีย์. วารสารวิชาการกรมวิทยาศาสตร์บริการ 1(1), 110-121.
- AOAC, 1990. **Official Methods of Analysis, 15th ed.** Association of Analytical Chemists, Washington, DC.
- Haugh, R.R. 1973. **The haugh unit for measuring egg quality.** US. Egg Poult. Mag. 43:522-555, 572-573.
- IEC 61966-2-1. 1999. **Multimedia systems and equipment–Colour measurements and management–Part 2-1:Colour management–Default RGB color space–sRGB’.** International Electrotechnical Commission, Geneva, 51p.
- Knorr, D. 1995. **Hydrosttic pressure treatment of food : microbiology,** New Methods of Food Preservation (G.W. Gould, ed.), Blackie Academic and Professional, New York, 159.
- Pettine, M.,et al., **Dissolved inorganic carbon effect in the determination of arsenic and chromium in mineral waters by inductively coupled plasma-mass spectrometry.** Analytica Chimica Acta, 2007. 599: p. 191-198.



ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก.1 ค่าความสดใหม่ของไข่เป็ดสด Haugh units (HU)

Pressure (bar)	Time (day)	Average weight (g)	Average height (mm)	Average HU
1	2	55.35 ^a	6.12 ^a	79.11 ^a
	4	52.53 ^a	5.34 ^a	74.41 ^a
	6	65.82 ^{bcd}	5.86 ^a	73.43 ^a
	8	59.50 ^{bc}	6.63 ^a	81.21 ^a
	10	60.28 ^{bc}	6.60 ^a	80.75 ^a
	12	60.87 ^{bc}	5.92 ^a	75.73 ^a
2	2	64.90 ^{bcd}	6.70 ^a	80.02 ^a
	4	64.04 ^{bcd}	5.82 ^a	73.78 ^a
	6	62.00 ^{bc}	6.00 ^a	75.94 ^a
	8	66.39 ^{cd}	5.89 ^a	73.52 ^a
	10	62.78 ^{bcd}	5.94 ^a	75.18 ^a
	12	65.53 ^{bcd}	6.64 ^a	79.40 ^a
3	2	63.31 ^{bcd}	5.68 ^a	72.90 ^a
	4	60.59 ^{bc}	6.35 ^a	78.95 ^a
	6	65.40 ^{bcd}	6.54 ^a	78.70 ^a
	8	62.66 ^{bcd}	6.32 ^a	78.04 ^a
	10	64.14 ^{bcd}	5.73 ^a	73.02 ^a
	12	65.53 ^{bcd}	6.57 ^a	78.89 ^a
4	2	60.60 ^{bc}	6.64 ^a	80.94 ^a
	4	65.48 ^{bcd}	5.62 ^a	71.59 ^a
	6	64.85 ^{bcd}	5.57 ^a	71.44 ^a
	8	65.59 ^{bcd}	5.98 ^a	74.46 ^a
	10	64.59 ^{bcd}	6.53 ^a	78.91 ^a
	12	61.95 ^{bc}	5.71 ^a	73.70 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.1 ค่าความสดใหม่ของไข่เป็ดสด Haugh units (HU) (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average weight (g)	Average height (mm)	Average HU
380	2	61.06 ^{bc}	6.67 ^a	81.02 ^a
	4	69.87 ^d	5.53 ^a	69.18 ^a
	6	63.62 ^{bcd}	5.77 ^a	73.56 ^a
	8	58.65 ^b	6.65 ^a	81.66 ^a
	10	61.91 ^{bc}	6.17 ^a	77.23 ^a
	12	58.99 ^{bc}	5.17 ^a	70.37 ^a
760	2	64.74 ^{bcd}	4.98 ^a	66.27 ^a
	4	65.19 ^{bcd}	5.82 ^a	73.34 ^a
	6	62.59 ^{bcd}	5.61 ^a	72.63 ^a
	8	59.03 ^{bc}	5.74 ^a	75.00 ^a
	10	61.81 ^{bc}	6.11 ^a	76.78 ^a
	12	61.00 ^{bc}	6.37 ^a	78.93 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.2 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อร้อยละน้ำหนักไข่ที่เพิ่มขึ้น

Pressure (bar)	Time (day)	Average weight increased (%)
1	2	0.59 ^a
	4	0.77 ^a
	6	0.97 ^a
	8	0.99 ^{ab}
	10	1.17 ^b
	12	1.34 ^{bc}
2	2	1.26 ^{bc}
	4	1.29 ^{bc}
	6	1.98 ^e
	8	2.14 ^{ef}
	10	2.16 ^{ef}
	12	2.19 ^{ef}
3	2	2.20 ^{ef}
	4	2.27 ^{efg}
	6	2.44 ^{fghi}
	8	2.67 ^{ghij}
	10	2.69 ^{hij}
	12	2.96 ^{jk}
4	2	2.43 ^{fghi}
	4	2.78 ^{ij}
	6	3.00 ^{jk}
	8	3.25 ^{kl}
	10	3.47 ^l
	12	3.56 ^l

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.2 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อร้อยละน้ำหนักไขที่เพิ่มขึ้น
(ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average weight increased (%)
380	2	1.11 ^{ab}
	4	1.92 ^{de}
	6	2.21 ^{ef}
	8	2.31 ^{efgh}
	10	2.74 ^{ij}
	12	2.81 ^{ij}
760	2	1.58 ^{cd}
	4	1.96 ^c
	6	2.23 ^{ef}
	8	2.50 ^{fghi}
	10	2.79 ^{ij}
	12	2.94 ^{jk}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.3 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความถ่วงจำเพาะไข่ที่เพิ่มขึ้น

Pressure (bar)	Time (day)	Average specific gravity increased (%)
1	2	0.67 ^a
	4	0.82 ^a
	6	1.04
	8	1.04 ^b
	10	1.24 ^c
	12	1.40 ^d
2	2	1.34 ^{cd}
	4	1.39 ^d
	6	2.10 ^e
	8	2.23 ^f
	10	2.27 ^{fg}
	12	2.28 ^{fg}
3	2	2.30 ^{fg}
	4	2.37 ^g
	6	2.54 ^h
	8	2.83 ⁱ
	10	2.80 ⁱ
	12	3.10 ^k
4	2	2.53 ^h
	4	2.93 ^j
	6	3.68 ^m
	8	3.42 ^l
	10	3.64 ^m
	12	3.75 ^m

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.3 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความถ่วงจำเพาะไข่ที่เพิ่มขึ้น (ต่อ๗)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average specific gravity increased (%)
380	2	0.96 ^b
	4	0.97 ^b
	6	0.98 ^b
	8	0.99 ^b
	10	1.01 ^b
	12	1.03 ^b
760	2	0.97 ^b
	4	0.97 ^b
	6	0.99 ^b
	8	1.00 ^b
	10	1.01 ^b
	12	1.04 ^b

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.4 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average Hardness of albumen (N)
1	2	2.30 ^{jk}
	4	3.50 ^{efghi}
	6	2.66 ^{bcd}
	8	3.28 ^{defg}
	10	1.87 ^{abc}
	12	2.53 ^{cdef}
2	2	5.63
	4	3.27 ^{defg}
	6	3.00 ^{cdefg}
	8	2.72 ^{cdefg}
	10	2.05 ^{bcd}
	12	2.72 ^{cdefg}
3	2	2.71 ^{cdefg}
	4	2.12 ^{bcd}
	6	2.31 ^{bcd}
	8	2.31 ^{bcd}
	10	1.80 ^{abc}
	12	2.77 ^{cdefg}
4	2	6.39 ^k
	4	1.86 ^{abc}
	6	1.15 ^{ab}
	8	0.80 ^a
	10	2.16 ^{bcd}
	12	0.76 ^a

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.4 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความแข็งแรงเจลของไข่เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average Hardness of albumen (N)
380	2	4.58 ^{hij}
	4	3.69 ^{fgi}
	6	3.62 ^{fgi}
	8	3.50 ^{efghi}
	10	3.20 ^{defg}
	12	2.17 ^{bcd}
760	2	4.67 ^{ij}
	4	3.84 ^{ghi}
	6	3.65 ^{fgi}
	8	3.51 ^{efghi}
	10	3.44 ^{efgh}
	12	2.77 ^{cdefg}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.5 ค่า pH ในสารละลาย

Pressure (bar)	Time (day)	Initial alkaline solution	Terminate alkaline solution
1	2	14.00	13.93
	4	14.00	13.91
	6	14.00	13.89
	8	14.00	13.84
	10	14.00	13.74
	12	14.00	13.74
2	2	14.00	13.75
	4	14.00	13.59
	6	14.00	13.45
	8	14.00	12.46
	10	14.00	12.54
	12	14.00	12.40
3	2	14.00	13.64
	4	14.00	13.53
	6	14.00	12.84
	8	14.00	12.45
	10	14.00	12.04
	12	14.00	12.37
4	2	14.00	13.55
	4	14.00	13.45
	6	14.00	12.50
	8	14.00	12.43
	10	14.00	11.44
	12	14.00	11.47

ตารางผนวกที่ ก.5 ค่า pH ในสารละลาย (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Initial alkaline solution	Terminate alkaline solution
380	2	14.00	13.47
	4	14.00	12.48
	6	14.00	12.42
	8	14.00	11.89
	10	14.00	10.11
	12	14.00	9.20
760	2	14.00	13.57
	4	14.00	12.53
	6	14.00	12.44
	8	14.00	12.41
	10	14.00	10.18
	12	14.00	9.24

ตารางผนวกที่ ก.6 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่า pH ในไข่ขาวของไข่
เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average pH of albumen
1	2	9.12 ^a
	4	10.28 ^d
	6	10.68
	8	10.89 ^f
	10	10.96 ^g
	12	11.20 ^g
2	2	9.58 ^b
	4	10.38 ^d
	6	11.09 ^g
	8	11.10 ^h
	10	11.31 ⁱ
	12	11.98 ^l
3	2	10.29
	4	10.79 ^c
	6	11.58 ^j
	8	12.18 ^m
	10	12.42 ^{nop}
	12	12.56 ^{dnop}
4	2	10.69 ^e
	4	11.05 ^g
	6	12.08 ^l
	8	12.58 ^{pq}
	10	12.63 ^q
	12	13.50 ^{rs}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.6 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่า pH ในไข่ขาวของไข่
เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average pH of albumen
380	2	9.12 ^a
	4	9.97 ^c
	6	11.80 ^k
	8	12.35 ⁿ
	10	12.42 ^{nop}
	12	13.45 ^r
760	2	9.16 ^a
	4	10.02 ^c
	6	12.34 ⁿ
	8	12.38 ^{no}
	10	12.47 ^{op}
	12	13.55 ^s

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.7 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่า pH ในไข่แดงของไข่
เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average pH of yolk
1	2	8.98 ^b
	4	9.07 ^a
	6	9.22 ^b
	8	9.29 ^{de}
	10	9.37 ^f
	12	9.75 ^g
2	2	9.15 ^b
	4	9.18 ^c
	6	9.21 ^{cd}
	8	9.39 ^{ef}
	10	9.49 ^f
	12	9.79 ^g
3	2	9.28 ^{de}
	4	9.70 ^g
	6	9.69 ^g
	8	10.01 ⁱ
	10	10.16 ^j
	12	10.63 ^l
4	2	9.73 ^g
	4	9.98 ⁱ
	6	10.36 ^k
	8	10.39 ^k
	10	10.54
	12	10.99 ^m

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.7 ผลกระทบของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่า pH ในไข่แดงของไข่
เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average pH of yolk
380	2	9.04 ^a
	4	9.83 ^h
	6	11.71 ⁿ
	8	12.29 ^o
	10	12.35 ^{op}
	12	13.43 ^q
760	2	9.08 ^{ab}
	4	9.87 ^h
	6	12.28 ^o
	8	12.31 ^o
	10	12.41 ^p
	12	13.53 ^r

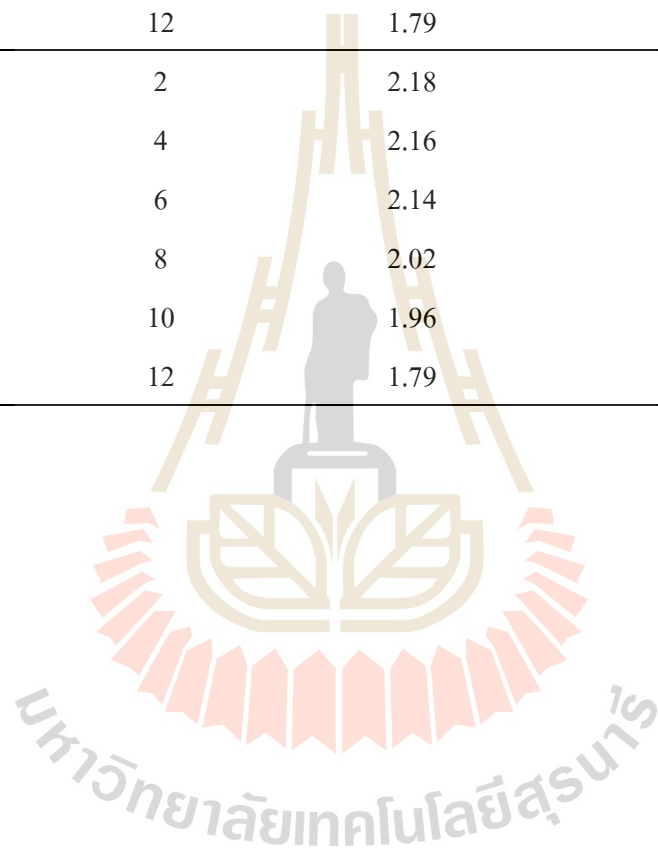
ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.8 ค่าการไทเทรตสารละลายต่าง

Pressure (bar)	Time (day)	Initial alkaline solution	Terminate alkaline solution
1	2	4.00	0.70
	4	4.00	0.60
	6	3.98	1.41
	8	3.97	8.67
	10	3.97	0.81
	12	3.90	2.67
2	2	3.89	2.88
	4	3.78	5.93
	6	3.78	5.93
	8	3.74	12.61
	10	3.71	7.76
	12	3.71	7.76
3	2	3.62	19.25
	4	3.57	20.18
	6	3.50	27.85
	8	3.34	41.87
	10	3.34	43.54
	12	3.34	37.32
4	2	3.30	39.32
	4	2.71	70.21
	6	2.69	64.58
	8	2.62	73.17
	10	2.41	69.10
	12	1.75	49.32

ตารางผนวกที่ ก.8 ค่าการไทเทรตสารละลายต่าง (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Initial alkaline solution	Terminate alkaline solution
380	2	2.18	-9.93
	4	2.16	26.30
	6	2.14	13.48
	8	2.02	9.09
	10	1.96	21.22
	12	1.79	16.07
760	2	2.18	41.54
	4	2.16	30.37
	6	2.14	65.54
	8	2.02	83.79
	10	1.96	89.80
	12	1.79	22.32



ตารางผนวกที่ ก.9 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่าการไทเทรตต่างทั้งหมด
ในไขขาวของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average titration of albumen
1	2	0.09 ^a
	4	0.10 ^{abc}
	6	0.13 ^{abc}
	8	0.15 ^{cd}
	10	0.20 ^{de}
	12	0.21 ^{de}
2	2	0.10 ^{abc}
	4	0.16 ^{cd}
	6	0.23 ^{ef}
	8	0.27 ^{fg}
	10	0.28 ^{fgh}
	12	0.37 ^j
3	2	0.29 ^{fghi}
	4	0.32 ^{ghij}
	6	0.33 ^{hij}
	8	0.34 ^{ij}
	10	0.34 ^{ij}
	12	0.46 ^k
4	2	0.48 ^k
	4	0.49 ^k
	6	0.49 ^k
	8	0.50 ^k
	10	0.50 ^k
	12	0.50 ^k

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.9 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่าการไทเทรตต่างทั้งหมด
ในไขขาวของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average titration of albumen
380	2	0.05 ^a
	4	0.07 ^{ab}
	6	0.07 ^{ab}
	8	0.09 ^{ab}
	10	0.10 ^{abc}
	12	0.21 ^{de}
760	2	0.06 ^a
	4	0.07 ^{ab}
	6	0.07 ^{ab}
	8	0.09 ^{ab}
	10	0.12 ^{bc}
	12	0.45 ^k

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.10 ผลกระทบของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่าการไทเทรตต่าง
ทั้งหมดในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average titration of yolk
1	2	0.03 ^{bc}
	4	0.04 ^{ab}
	6	0.05 ^{bc}
	8	0.08 ^{abcdef}
	10	0.09 ^{abcdef}
	12	0.12 ^{cdefg}
2	2	0.06 ^{abcdef}
	4	0.06 ^{abcdef}
	6	0.07 ^{abcdef}
	8	0.08 ^{abcdef}
	10	0.09 ^{abcdef}
	12	0.13 ^{efg}
3	2	0.11 ^{bcdefg}
	4	0.12 ^{defg}
	6	0.13 ^{fg}
	8	0.16 ^{gh}
	10	0.17 ^{ghi}
	12	0.23 ^{hij}
4	2	0.12 ^{cdefg}
	4	0.16 ^{gh}
	6	0.20 ^{hi}
	8	0.20 ^{hi}
	10	0.23 ^{ij}
	12	0.27 ^j

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.10 ผลกระทบของความดันไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อค่าการไทเทรตต่าง
ทั้งหมดในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average titration of yolk
380	2	0.02 ^a
	4	0.04 ^{ab}
	6	0.05 ^{abcd}
	8	0.07 ^{abcdef}
	10	0.07 ^{abcdef}
	12	0.08 ^{abcdef}
760	2	0.04 ^{ab}
	4	0.05 ^{abc}
	6	0.05 ^{abcde}
	8	0.07 ^{abcdef}
	10	0.07 ^{abcdef}
	12	0.09 ^{abcdef}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.11 ระดับความเค็มของสารละลายสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Initial Salinity of the alkaline solution	Terminate Salinity of the alkaline solution
1	2	12.60	3.17
	4	12.60	3.17
	6	12.60	3.17
	8	12.40	4.84
	10	12.20	6.56
	12	12.00	8.33
2	2	12.00	8.33
	4	12.00	8.33
	6	12.00	8.33
	8	12.00	8.33
	10	11.80	10.17
	12	11.80	10.17
3	2	11.80	10.17
	4	11.60	12.07
	6	11.60	12.07
	8	11.40	14.04
	10	11.40	14.04
	12	11.20	16.07
4	2	11.20	16.07
	4	11.20	16.07
	6	11.00	18.18
	8	11.00	18.18
	10	11.00	18.18
	12	10.80	20.37

ตารางผนวกที่ ก.11 ระดับความเค็มของสารละลายสำหรับแช่ไข่เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Initial Salinity of the alkaline solution	Terminate Salinity of the alkaline solution
380	2	10.80	20.37
	4	10.60	22.64
	6	10.40	25.00
	8	10.40	25.00
	10	10.40	25.00
	12	10.40	25.00
	760	2	10.20
4		10.20	27.45
6		10.00	30.00
8		10.00	30.00
10		9.90	31.31
12		9.90	31.31

ตารางผนวกที่ ก.12 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความชื้นในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average moisture content of albumen
1	2	81.79 ^{bc}
	4	82.14 ^{cde}
	6	84.57 ^{df}
	8	89.03 ^f
	10	82.02 ^{cde}
	12	65.48 ^a
2	2	83.06 ^{cde}
	4	80.58 ^{cd}
	6	84.54 ^{cdef}
	8	81.79 ^{cde}
	10	83.70 ^{cdef}
	12	71.81 ^b
3	2	87.22 ^{ef}
	4	86.70 ^{def}
	6	80.37 ^c
	8	82.81 ^{cde}
	10	67.73 ^{ab}
	12	68.63 ^{ab}
4	2	66.22 ^a
	4	84.52 ^{cdef}
	6	63.40 ^a
	8	84.11 ^{cdef}
	10	81.43 ^{cde}
	12	83.70 ^{cdef}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.12 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความชื้นในไข่ขาวของไข่
เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average moisture content of albumen
380	2	82.57 ^{cde}
	4	82.45 ^{cde}
	6	83.10 ^{cde}
	8	79.91 ^c
	10	79.69 ^c
	12	79.84 ^c
760	2	83.87 ^{cdef}
	4	84.00 ^{cdef}
	6	82.49 ^{cde}
	8	82.63 ^{cde}
	10	81.72 ^{cde}
	12	83.25 ^{cdef}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.13 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความชื้นในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average moisture content of yolk
1	2	19.87 ^{efghij}
	4	14.70 ^{cdefgh}
	6	16.49 ^{defghi}
	8	25.95 ^{jkm}
	10	10.64 ^{abcd}
	12	17.34 ^{defghi}
2	2	17.14 ^{defghi}
	4	16.76 ^{defghi}
	6	16.71 ^{defghi}
	8	19.09 ^{efghij}
	10	39.93 ⁿ
	12	38.29 ⁿ
3	2	17.73 ^{defghi}
	4	19.73 ^{efghij}
	6	18.60 ^{efghi}
	8	12.47 ^{abcdef}
	10	18.34 ^{efghi}
	12	21.68 ^{hijkm}
4	2	22.56 ^{ijklm}
	4	20.63 ^{ghij}
	6	28.40 ^m
	8	27.34 ^{klm}
	10	27.84 ^m
	12	25.86 ^{ijklm}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.13 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อความชื้นในไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average moisture content of yolk
380	2	5.69 ^a
	4	13.27 ^{bcdefg}
	6	18.70 ^{efghi}
	8	16.33 ^{defghi}
	10	12.07 ^{abcde}
	12	13.82 ^{cdefg}
760	2	7.62 ^{abc}
	4	8.10 ^{abc}
	6	7.95 ^{abc}
	8	10.75 ^{abcd}
	10	9.06 ^{abc}
	12	6.35 ^{ab}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ตารางผนวกที่ ก.14 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อปริมาณน้ำอิสระในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average water activity of albumen
1	2	0.95 ^{fghij}
	4	0.96 ^{cdefgh}
	6	0.95 ^{fghij}
	8	0.96 ^{ikm}
	10	0.97 ^{abcd}
	12	0.98 ^{defghi}
2	2	0.94 ^{defghi}
	4	0.95 ^{defghi}
	6	0.95 ^{defghi}
	8	0.95 ^{efghij}
	10	0.96 ⁿ
	12	0.97 ⁿ
3	2	0.94 ^{defghi}
	4	0.95 ^{fghij}
	6	0.94 ^{efghi}
	8	0.94 ^{abcdef}
	10	0.96 ^{efghi}
	12	0.95 ^{hijklm}
4	2	0.94 ^{ijklm}
	4	0.95 ^{ghijk}
	6	0.95 ^m
	8	0.96 ^{km}
	10	0.95 ^m
	12	0.95 ^{ikm}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.14 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อปริมาณน้ำอิสระในไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average water activity of albumen
380	2	0.95 ^a
	4	0.95 ^{bcdefg}
	6	0.95 ^{efghi}
	8	0.95 ^{defghi}
	10	0.96 ^{abcde}
	12	0.94 ^{cdefg}
760	2	0.95 ^{abc}
	4	0.96 ^{abc}
	6	0.95 ^{abc}
	8	0.95 ^{abcd}
	10	0.94 ^{abc}
	12	0.94 ^{ab}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.15 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อสีไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average L*	Average a*	Average b*
1	2	51.19 ^{ab}	15.92 ^{ab}	35.88 ^{ab}
	4	48.33 ^{mnghi}	17.40 ^f	36.48 ^k
	6	42.07	7.71 ^{ab}	18.01 ^{ab}
	8	56.67 ^{fgh}	10.96 ^{ijklm}	37.42 ^{efg}
	10	42.82 ^{hij}	8.26 ^{klm}	21.41 ^{efg}
	12	38.83 ^{hij}	11.15 ^{lm}	18.71 ^{defg}
2	2	36.39 ^{ijk}	25.65 ^{ab}	32.90 ^{efg}
	4	24.95 ^{jk}	8.78 ^{ab}	15.99 ^{cdef}
	6	21.26 ^{ghi}	0.99 ^{bcde}	8.86 ^{abcd}
	8	23.23 ^{efghgh}	-1.00 ^{ef}	6.51 ^{abcdef}
	10	30.63 ^{efgh}	-1.76 ^{efgh}	8.92 ^{ab}
	12	31.12 ^{cde}	-2.37 ^{defg}	9.46 ^a
3	2	56.29 ^o	49.40 ^{cdef}	52.95 ^{jk}
	4	39.72 ^{kl}	15.57 ^{ghij}	22.48 ^{gh}
	6	44.55 ^{hij}	3.43 ^{lm}	14.17 ^{gh}
	8	44.59 ^{hi}	4.97 ^m	16.71 ^{gh}
	10	26.73 ^{bcd}	-2.95 ^{klm}	5.05 ^{abcdef}
	12	25.62 ^{bcd}	-2.25 ^{ijkl}	3.03 ^{abcde}
4	2	41.66 ^{kl}	31.91 ^a	44.04 ^{fg}
	4	36.38 ^{bc}	23.29	28.88 ^{abc}
	6	34.09 ^{lmn}	14.02 ^{abcd}	21.00 ^{hi}
	8	32.19 ^{bc}	-3.55 ^{abcd}	5.90 ^{abc}
	10	25.63 ^{cde}	0.77 ^{klm}	9.27 ^{cdef}
	12	11.64 ^b	-0.93 ^{klm}	7.85 ^{abc}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางผนวกที่ ก.15 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อสีไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average L*	Average a*	Average b*
380	2	65.95 ^a	56.39 ^{fghi}	62.28 ^a
	4	59.08 ^{no}	35.75 ^{abc}	53.42 ^{hij}
	6	62.82 ^{mno}	21.92 ^{defgh}	51.69 ^{ijk}
	8	58.01 ^{deflmn}	19.08 ^{fghi}	44.44 ^{jk}
	10	57.07 ^{hij}	12.34 ^{klm}	42.59 ^{gh}
	12	51.23 ^{cdef}	15.94 ^{klm}	39.39 ^{fg}
760	2	51.95 ^{cdef}	34.05 ^{hijk}	46.90 ^{bcdef}
	4	58.57 ^{no}	25.45 ^{abc}	49.84 ^{hij}
	6	58.63 ^{mngh}	7.69 ^{ef}	34.48 ^{ijk}
	8	42.35 ^{gghi}	17.06 ^f	27.67 ^{abcd}
	10	41.80 ^{lm}	6.27 ^{lm}	18.69 ^{ijk}
	12	58.13 ^{hij}	11.05 ^{lm}	37.00 ^{fg}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.16 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อสีไข่แดงของไข่เยี่ยวม้า

Pressure (bar)	Time (day)	Average L*	Average a*	Average b*
1	2	68.08 ^a	10.71 ^a	49.93 ^{gh}
	4	64.79 ^{ij}	16.15 ^{fgh}	55.87 ^{hijk}
	6	44.13 ^{bc}	34.63 ^{fgh}	36.37 ^{de}
	8	40.40 ^{jk}	23.33 ^{bcdefg}	31.96 ^{ghij}
	10	44.28 ^{hi}	24.92 ^{abcdef}	31.55 ^{ef}
	12	45.36 ^{fgh}	27.78 ^{bcdefg}	30.26 ^{def}
2	2	50.06 ^{efgh}	3.51 ^{hijkl}	31.93 ^{gh}
	4	51.81 ^{bcd}	3.15 ^{abcdef}	27.84 ^{cde}
	6	42.52 ^b	9.41 ^{abc}	22.22 ^{abcd}
	8	38.16 ^{bc}	15.69 ^{ab}	24.29 ^{abc}
	10	37.55 ^{bcdef}	14.00 ^a	17.52 ^{abcd}
	12	32.16 ^{bcdef}	12.25 ^a	15.98 ^{abcd}
3	2	72.62 ^{jk}	11.04	52.99 ^{lmn}
	4	54.51 ^{fgh}	17.83 ^{defgh}	38.23 ^{ef}
	6	44.48 ^{hi}	29.06 ^{abcd}	38.67 ^{bcde}
	8	43.78 ^{hi}	29.37 ^{abcde}	37.75 ^{cde}
	10	29.12 ^{bcd}	25.38 ^a	24.58 ^{ab}
	12	28.91 ^{bcd}	22.41 ^a	23.43 ^a
4	2	54.12 ^{ghi}	1.01 ^{ijk}	33.02 ^{ijklm}
	4	61.18 ^{efgh}	7.31 ^{ghij}	44.08 ^f
	6	27.00 ^{defgh}	7.27 ^{defgh}	20.42 ^{ef}
	8	31.48 ^{cdefg}	25.76 ^a	28.14 ^{abc}
	10	22.23 ^{bcd}	25.10 ^{abc}	20.40 ^{abcd}
	12	14.10 ^a	16.76 ^{ab}	15.55 ^{abc}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตารางผนวกที่ ก.16 ผลกระทบของสภาวะไฮโดรสแตติกและระยะเวลาต่อสีไขแดงของไข่เยี่ยวม้า
(ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	Average L*	Average a*	Average b*
380	2	68.76 ^k	5.89 ^l	45.48 ⁿ
	4	66.83 ^{jk}	13.45 ^k	51.26 ^{mn}
	6	61.18 ^k	17.06 ^{ghi}	53.28 ^{lm}
	8	44.37 ^{jk}	24.52 ^{fgh}	37.70 ^{ijklm}
	10	33.65 ^{jk}	25.72 ^{cdefg}	32.60 ^{bijkl}
	12	33.45 ^{ij}	19.92 ^{defgh}	26.26 ^{hijk}
760	2	68.87 ^{ij}	5.38 ^{jk}	44.93 ^{klm}
	4	62.55 ^{jk}	15.09 ^{hijk}	51.84 ^{gklm}
	6	35.72 ^{jk}	16.72 ^{abcdef}	21.54 ^{ghi}
	8	59.24 ^{ghi}	26.83 ^{efgh}	52.42 ^{fg}
	10	44.71 ^{ghi}	28.06 ^{abcde}	33.36 ^{def}
	12	32.53 ^{jk}	16.06 ^{bcdefg}	19.66 ^{ghij}

ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก.17 ผลต่างค่าสีไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้าเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด

Pressure (bar)	Time (day)	MK1	MK2	MK3	MK4
1	2	32.09	57.65	53.31	44.84
	4	35.46	61.28	57.01	49.10
	6	26.17	44.13	40.73	36.45
	8	15.58	33.20	29.68	25.59
	10	15.45	34.79	31.07	26.11
	12	17.48	35.82	32.17	27.31
2	2	10.41	32.47	28.38	20.82
	4	9.42	30.20	26.04	17.84
	6	6.11	20.42	16.24	10.14
	8	10.43	22.55	18.97	15.67
	10	12.96	15.85	12.26	10.56
	12	17.99	12.96	10.58	13.17
3	2	37.37	62.87	58.53	49.93
	4	16.14	41.71	37.45	29.93
	6	22.54	42.69	39.06	34.19
	8	22.37	41.93	38.36	33.69
	10	23.25	27.97	25.93	26.35
	12	21.81	25.19	23.18	23.98
4	2	14.34	35.94	31.86	23.86
	4	23.53	48.66	44.39	36.13
	6	21.42	16.98	15.63	18.58
	8	21.86	30.67	28.17	27.28
	10	29.28	26.85	26.05	29.15
	12	35.24	24.16	25.18	31.34

ตารางผนวกที่ ก.17 ผลต่างค่าสีไข่ขาวของไข่เยี่ยวม้าเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	MK1	MK2	MK3	MK4
380	2	29.77	54.47	50.16	41.46
	4	32.43	58.23	53.90	45.60
	6	31.69	57.42	53.18	45.51
	8	18.49	39.59	35.85	30.67
	10	21.37	34.19	31.32	29.23
	12	16.58	25.69	22.83	21.47
760	2	29.58	54.14	49.84	41.11
	4	30.74	56.56	52.28	44.38
	6	13.56	20.19	17.00	15.47
	8	33.44	58.44	54.29	47.19
	10	18.93	38.06	34.42	29.60
	12	16.74	18.05	15.47	16.07

ตารางผนวกที่ ก.18 ผลต่างค่าสีไข่แดงของไข่เยี่ยวม้าที่เทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด

Pressure (bar)	Time (day)	MK1	MK2	MK3	MK4
1	2	12.92	36.73	30.58	22.47
	4	8.49	41.83	35.82	27.72
	6	34.47	23.57	15.09	6.51
	8	13.54	34.64	29.82	23.23
	10	31.25	25.13	16.86	7.35
	12	34.30	28.14	19.66	11.27
2	2	24.98	46.15	38.22	28.92
	4	45.91	37.10	28.94	22.67
	6	55.66	37.20	30.35	27.23
	8	56.75	34.90	28.54	26.56
	10	51.16	27.50	20.88	19.21
	12	50.82	26.95	20.35	18.72
3	2	28.49	72.04	66.41	58.72
	4	29.70	32.15	23.92	14.94
	6	38.45	17.75	9.21	4.29
	8	35.67	19.68	11.20	3.01
	10	56.55	31.25	25.40	24.65
	12	58.31	32.65	27.00	26.48
4	2	19.05	55.37	48.23	39.16
	4	26.96	42.39	34.32	25.14
	6	34.80	34.05	25.53	16.98
	8	53.39	25.71	19.95	20.11
	10	52.69	32.91	25.96	23.04
	12	63.68	46.38	39.90	36.87

ตารางผนวกที่ 4.18 ผลต่างค่าสีไข่แดงของไข่เยี่ยวม้าเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด (ต่อ)

Pressure (mmHg)	Time (day)	MK1	MK2	MK3	MK4
380	2	39.23	83.80	78.96	71.83
	4	16.08	62.40	57.20	49.69
	6	8.27	52.78	48.48	41.83
	8	3.07	44.92	40.00	32.90
	10	10.09	39.82	35.08	28.29
	12	10.70	39.51	33.50	25.40
760	2	13.51	56.81	50.77	42.63
	4	5.92	53.04	48.02	40.67
	6	17.85	30.49	26.35	20.87
	8	23.86	34.59	26.79	17.52
	10	34.69	23.23	14.74	5.94
	12	13.64	34.31	29.79	23.57



ภาคนวค ข

ตัวอย่างการคำนวณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างการคำนวณ

1 การตรวจสอบความสดใหม่ของไข่เป็ดเบื้องต้น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาความสดใหม่ของไข่เป็ดเบื้องต้นที่ความดัน 1 บาร์ 2 วัน (ตารางผนวกที่ 4.1)

$$HU = 100 \times \log(H + 7.57 - 1.7 W)^{0.37}$$

$$HU = 100 \times \log(6.12 + 7.57 - (1.7 \times 55.35))^{0.37}$$

$$HU = 79.11$$

2 การหาร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไข่เป็ดเบื้องต้นความดัน 1 บาร์ 2 วัน (ตารางผนวกที่ 4.2)

$$W_{ad} = \left(\frac{W_f - W_i}{W_i} \right) \times 100$$

$$W_{ad} = \left(\frac{60.86 - 60.50}{60.50} \right) \times 100$$

$$W_{ad} = 0.59$$

3 การหาความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้น

ใช้ตัวอย่างการคำนวณหาความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มขึ้นของไข่เป็ดเบื้องต้นความดัน 1 บาร์ 2 วัน (ตารางผนวกที่ 4.3)

$$S_g = \left(\frac{S_{g_f} - S_{g_i}}{S_{g_i}} \right) \times 100$$

$$S_g = \left(\frac{1.043 - 1.036}{1.036} \right) \times 100$$

$$S_g = 0.67$$

4 การวิเคราะห์ด่างทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้า

ใช้ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์ด่างทั้งหมดในไข่เยี่ยวม้าความดัน 1 บาร์ 2 วัน (ตารางผนวกที่ 4.9)

$$\text{Alkalinity} = \frac{N \times V \times MV \times 100}{10 \times 1000}$$

$$\text{Alkalinity} = \left(\frac{0.78 \times 0.1 \times 39.99 \times 100}{10 \times 1000} \right) \times 3$$

$$\text{Alkalinity} = 0.09$$

5 การหาความชื้นในไข่เยี่ยวม้า

ใช้ตัวอย่างการคำนวณวิเคราะห์หาความชื้นในไข่เยี่ยวม้าความดัน 1 บาร์ 2 วัน (ตารางผนวกที่ 4.12)

$$MC = \left(\frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \right) \times 100$$

$$MC = \left(\frac{45.15 - 20.80}{45.15 - 15.38} \right) \times 100$$

$$MC = 81.79$$

6 การหาปริมาณตะกั่วในไข่เยี่ยวม้า

ใช้ตัวอย่างการหาปริมาณตะกั่วในไข่เยี่ยวม้าความดัน 4 บาร์ 12 วัน (ตารางที่ 4.2)

$$Pb = \frac{C \times D \times V}{wt. sp.}$$

$$Pb = \frac{\left(\frac{0.26 \times 3.13 \times 25}{0.55} \right)}{1000}$$

$$Pb = 0.037$$

7 การวัดสีโดยวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายของไข่เยี่ยวม้า

ใช้ตัวอย่างการวัดสีโดยวิเคราะห์เชิงภาพถ่ายของไข่เยี่ยวม้าความดัน 4 บาร์ 2 วัน เทียบกับ MK1 (ตารางผนวกที่ ก.17)

$$\Delta E = \sqrt{(L_p^* - L_0^*)^2 + (a_p^* - a_0^*)^2 + (b_p^* - b_0^*)^2}$$

$$\Delta E = \sqrt{(32.18 - 8.64)^2 + (7.16 - (-0.93))^2 + (12.42 - 7.83)^2}$$

$$\Delta E = 32.09$$

8 การออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติก

ถังความดันไฮโดรสแตติก (Hydrostatic vessel system in the experiment) หรือ ถังความดันจัดเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ เพราะช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไข่เยี่ยวม้า ดังนั้นการออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติกผนังบางโดยมากมีลักษณะเป็นทรงกลม ทรงรี และทรงกระบอก วัตถุประสงค์เพื่อบรรจุของเหลว สารละลาย รวมถึงการอัดอากาศ การทำให้เกิดสภาวะสุญญากาศ บริเวณเหนือผิวสารละลาย การออกแบบถังความดันไฮโดรสแตติกประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ถังความดันไฮโดรสแตติกขนาด 36 ลิตร

ถังทรงกระบอกทำจากสแตนเลส 304

ค่าความเค้นที่จุดคราก (S) 6,2100 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร

ค่าประสิทธิภาพรอยต่อเชื่อม (E) 0.82

ค่ากัศร่อน (C.A) 0.32 เซนติเมตร

ทรงกระบอกมีรัศมีภายใน (r) 18 เซนติเมตร

ความดันออกแบบ (P) 5 บาร์

ความดันออกแบบ (P) 50 นิวตันต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาออกแบบของผนังภาชนะความดันเซนติเมตร

ความหนาของส่วนทรงกระบอก

$$t = \frac{Pr}{2SE + 0.4P} + C.A$$

$$t = \frac{50 \times 18}{2 \times 6,2100 \times 0.82 + 0.4 \times 50} + 0.32$$

$$t = 0.33$$

และตรวจสอบความดันสูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{r + 0.4t}$$

$$P = \frac{2 \times 6,2100 \times 0.82 \times 0.33}{18 - 0.4 \times 0.33}$$

$$P = 1,880.93$$

ความเค้นตามแนวยาว

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{P(2r)l}{2tl} = \frac{Pr}{t}$$

$$\sigma_c = \frac{50 \times 18}{0.33}$$

$$\sigma_c = 2,727.27$$

ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = \frac{P\pi r^2}{2\pi r t} = \frac{Pr}{2t}$$

$$\sigma_1 = \frac{50 \times 18}{2 \times 0.33}$$

$$\sigma_1 = 1,363.4$$

ความหนาของรอยเชื่อมภาชนะความดันทรงกระบอก

$$t = \frac{Pr}{\eta\sigma_c}$$

$$t = \frac{50 \times 18}{0.82 \times 2,727.27}$$

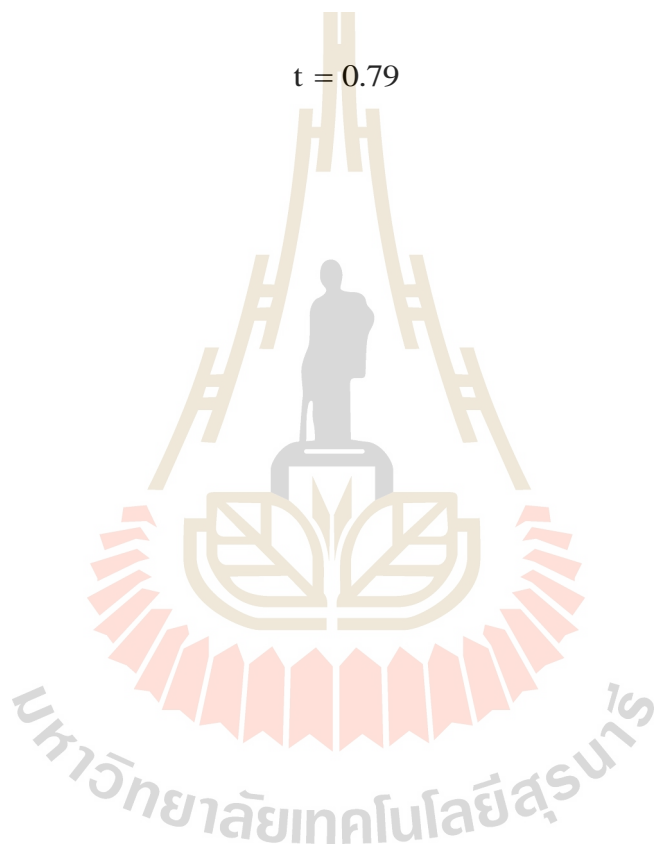
$$t = 0.40$$

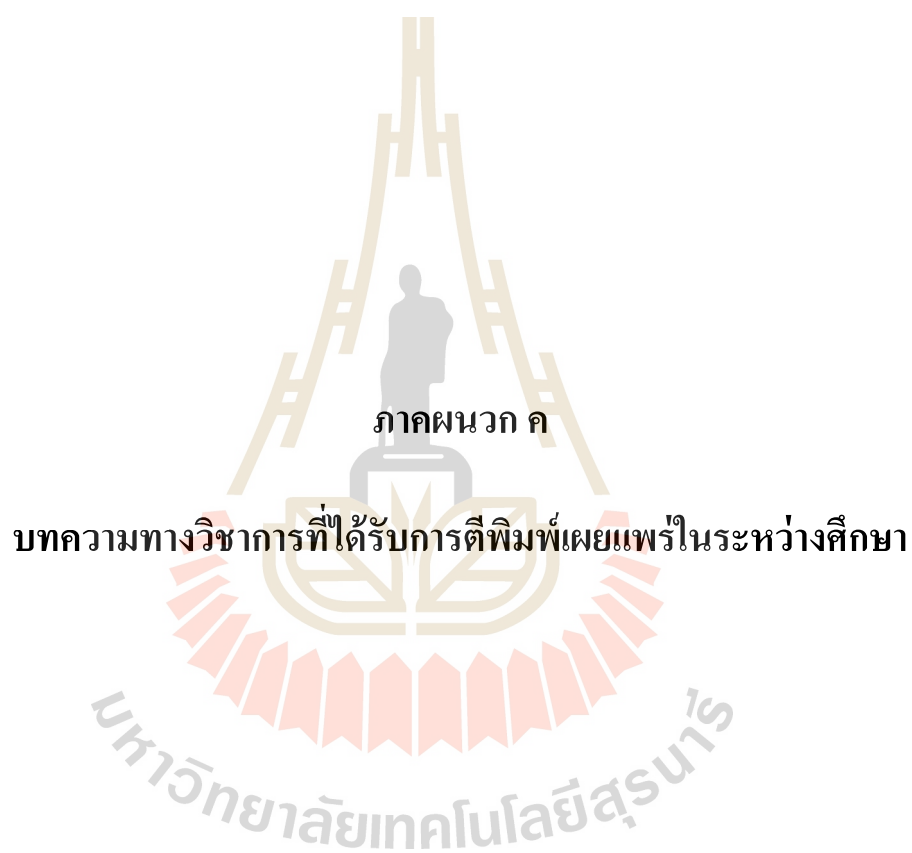
2. หน้าแปลนถึงความดันไฮโดรสแตติกความหนาของหน้าแปลน

$$t = d \sqrt{\frac{0.13P}{SE}} + C.A$$

$$t = 42 \sqrt{\frac{0.13 \times 50}{6,2100 \times 0.82}} + 0.32$$

$$t = 0.79$$





รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตรีอำรรค, เกียรติศักดิ์ ใจโต, นาฏชนก ปรางปรุ. (2557). อิทธิพลของสถานะไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของไข่เป็ด. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 และระดับนานาชาติครั้งที่ 7. อุตสาหกรรมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2558). การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตภายใต้สถานะความดันสูงเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16 และระดับนานาชาติครั้งที่ 8. อุตสาหกรรมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตรีอำรรค. (2559). ความเสี่ยงของผู้บริโภคในการรับสารตะกั่วจากไข่เยี่ยวม้า. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 และระดับนานาชาติครั้งที่ 9. อุตสาหกรรมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

Benjawan Vanmontree, Tawarat Treamnuk, Kaittisak Jaito, Nartchanok Prangpru “Effect of Hydrostatic Pressure and Vacuum on characteristics of century egg.”, IC FEB 2017 will be held during April 24-26, 2017, Kuala Lumpur.

เบญจวรรณ วานมนตรี, เทวรัตน์ ตรีอำรรค, กระวี ตรีอำรรค.(2560). อิทธิพลของความดันต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่เยี่ยวม้า. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, ปีที่ 23(2), 36-43.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวเบญจวรรณ วานมนตรี เกิดเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2531 ที่โรงพยาบาลวังสะพุง อำเภอวังสะพุง จังหวัดเลย เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนบ้านวังสะพุง ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนศรีสงครามวิทยา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนเลยพิทยาคม และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ.2554 ปี พ.ศ.2555 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 14 และระดับนานาชาติครั้งที่ 6 2556 เรื่องการอบแห้งโจ๊กข้าวกล้องงอกกึ่งสำเร็จรูปด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 15 และระดับนานาชาติครั้งที่ 7 2557 เรื่องอิทธิพลของสภาวะไฮโดรสแตติกต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของไข่เป็ด

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 16 และระดับนานาชาติครั้งที่ 8 2558 เรื่องการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงภายในไข่เยี่ยวม้าที่ผลิตภายใต้สภาวะความดันสูงเทียบกับผลิตภัณฑ์ตามท้องตลาด

ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 17 และระดับนานาชาติครั้งที่ 9 2559 ความเสี่ยงของผู้บริโภคในการรับสารตะกั่วจากไข่เยี่ยวม้า