

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

สารนิพนธ์
ของ
สุพัตตา โนทะนะ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา
พฤษภาคม 2552

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

สารนิพนธ์
ของ
สุพัฒตา โนทะนะ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา

พฤษภาคม 2552

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

บทคัดย่อ
ของ
สุพัตมา โนทะนะ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา
พฤษภาคม 2552

สุพัฒตา โนทะนะ. (2552). การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก
สารนิพนธ์ กศ.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
เฟื่องลดา วีระสัย, Ph.D.

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของไข่ รวมถึงความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ความหนาแน่น ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และบัลค์มอดุลัสด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก โดยแช่ไข่ในน้ำเกลือที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน พบว่าสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบขึ้นอยู่กับระดับความเค็มและเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ การเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือมีค่ามากที่สุดที่เวลา 21 วัน การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือมีค่ามากที่สุดที่เวลา 7 วัน การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือ มีค่าใกล้เคียงกัน ที่เวลา 7 วัน และ 21 วัน แต่มากกว่าที่เวลา 14 วัน กรณีของไข่เค็มต้ม ที่ระดับความเค็มเท่ากัน สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับเวลาที่แช่ไข่ในน้ำเกลือ การแพร่ของเกลือเข้าไปในไข่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเกลือ โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงจะมีอัตราการแพร่สูง พบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น $y = 0.4x + 507$ ($R^2 = 0.9787$) ของความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ และความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น $y = 6.8x + 1429$ ($R^2 = 0.8658$) ของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็มดิบ โดยสรุปเทคนิคอัลตราโซนิกสามารถใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นและความเค็มของไข่เค็มดิบได้ ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไข่และอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลในการแข็งตัวในไข่เค็มต่อไป

ULTRASONIC INVESTIGATION ON PHYSICAL PROPERTIES OF SALTED EGGS

AN ABSTRACT
BY
SUPATTA NOTANA

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Education Degree in Science Education
at Srinakharinwirot University
May 2009

Supatta Notana. (2009). *Ultrasonic Investigation on Physical Properties of Salted Eggs*.

Master's Project, M.Ed. (Science Education). Bangkok: Graduate School,

Srinakharinwirot University. Project Advisor: Assist.Prof.Fuanglada Veerasai, Ph.D.

Studied on the physical properties, including ultrasonic velocity, density, specific acoustic impedance and bulk modulus of salting egg by ultrasonic investigation, the salted eggs were obtained by salting for 7, 14 and 21 days in 50%, 75% and 100% salinity. The physical properties of raw salting egg were depended on both salinity level and salting time. The highest increasing in ultrasonic velocity per percent salinity was found at 21 days, while the highest increasing in density per percent salinity was found at 7 days. The increasing in specific acoustic impedance and bulk modulus per percent salinity were similar for 7 and 21 salting days but higher than that of 14 salting days. For boiled salted egg at the same salinity level, the physical properties were inversely proportional to salting time. The higher diffusion rate through egg shell was expected for the higher salinity level. The linear relationship of the density against the ultrasonic velocity of raw salted egg, and ultrasonic velocity against amount of salt in salted egg were as $y = 0.4x + 507$ ($R^2 = 0.9787$) and $y = 6.8x + 1429$ ($R^2 = 0.8658$), respectively. In conclusion, the ultrasonic techniques is applicable for investigating the density and saltiness of raw egg, which are basic information for further studies on salt diffusion and on the salinity influent on sol-gel transition of salting egg.

อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตร และคณะกรรมการ
สอบได้พิจารณาสารนิพนธ์ เรื่อง การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิค
อัลตราโซนิก ของ สุพัฒา โนทะนะ ฉบับนี้แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา ของมหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒได้

อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)

ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตร

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)

.....กรรมการสอบสารนิพนธ์
(ดร.สมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ)

.....กรรมการสอบสารนิพนธ์
(ดร.วเรศ วีระสัย)

อนุมัติให้รับสารนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร มากตุ่น)
วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2552

ประกาศคุณูปการ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับพระมหากรุณาธิคุณจากสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระมหากรุณาธิคุณในพระองค์ที่ทรงมีพระมหากรุณาธิคุณดำริโครงการส่งเสริมคุณภาพการศึกษาโรงเรียนในถิ่นทุรกันดาร พื้นที่อำเภอปอแก้ว และอำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดน่าน อันเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาครูในถิ่นทุรกันดาร ให้ได้รับการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา ซึ่งนับเป็นเกียรติอันสูงสุดที่ข้าพเจ้าได้รับโอกาสอันดียิ่งนี้ และจะได้นำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาผู้เรียนและชุมชนต่อไป

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย ประธานควบคุมสารนิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการแก้ปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ อันเกิดขึ้นในงานวิจัย และการเขียนสารนิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วเรศ วีระสัย และดร.สมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ ในการเป็นกรรมการสอบปากเปล่าสารนิพนธ์ ตลอดจนการให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อให้สารนิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ(สสวท.) ที่สนับสนุนทุนการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ ให้ความเมตตาเอาใจใส่ และให้ข้อแนะนำในการเรียนและการทำวิจัย แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี และขอขอบคุณคุณณัฐนพ นิลกำจร พนักงานวิทยาศาสตร์4 ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง และคุณเสริมสุข รัตเร่ง พนักงานวิทยาศาสตร์4 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเคราะห์และช่วยเหลือผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ผู้วิจัยขอโน้มระลึกถึงพระคุณบิดา มารดา ที่ได้อบรมสั่งสอน เลี้ยงดู ให้โอกาสทางการศึกษาที่ดี และขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวนาม ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สุพัฒตา โนทะนะ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
สมมุติฐานในการวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
เอกสารในงานวิจัย.....	5
ไข่และโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่.....	5
โครงสร้างทั่วไปและองค์ประกอบทางเคมีของไข่.....	7
เกลือ.....	18
คลื่นอัลตราโซนิกและสมบัติทางกายภาพ.....	23
การเกิดเจล.....	32
การแพร่และกฎการแพร่ของฟิค.....	36
ไข่เค็ม.....	37
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	44
ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	44
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	44
วิธีดำเนินการวิจัย.....	46
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
ผลการศึกษาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่.....	52
ผลการศึกษาลักษณะไข่ขาวและไข่แดงของไข่ต้ม.....	59
ผลการศึกษาลักษณะไข่ขาวและไข่แดงของไข่เค็ม.....	62
ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก.....	65

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ผลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบ.....	72
ผลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้ม.....	82
การเปรียบเทียบความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของ ไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม.....	88
ผลการตรวจสอบความเค็มของไข่ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก.....	92
ผลการศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือที่ระดับความเค็มต่างๆ.....	96
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	97
สรุปผลการวิจัย.....	97
ข้อเสนอแนะ.....	100
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก.....	107
ภาคผนวก ข.....	114
ภาคผนวก ค.....	116
ภาคผนวก ง.....	119
ภาคผนวก จ.....	122
ประวัติผู้ทำสารนิพนธ์.....	124

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	องค์ประกอบทางเคมีของไข่.....	7
2	ส่วนประกอบสำคัญของไข่ของสัตว์ปีกต่างๆ.....	8
3	องค์ประกอบต่างๆของเปลือกไข่.....	11
4	สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่.....	13
5	น้ำหนักมาตรฐานของไข่ไก่ในสหรัฐอเมริกา.....	14
6	คุณค่าทางโภชนาการของไข่เป็ดและไข่ไก่ (ใน 100 กรัมของไข่สด).....	16
7	อุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของไข่.....	35
8	โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ดิบที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด.....	53
9	โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ดิบที่ได้จากการคำนวณ.....	53
10	โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ต้มที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด.....	54
11	โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ต้มที่ได้จากการคำนวณ.....	54
12	โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่เค็มที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด.....	55
13	โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่เค็มที่ได้จากการคำนวณ.....	56
14	เปรียบเทียบโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ดิบ ไข่ต้ม และไข่เค็ม.....	57
15	ค่าสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือ (บ่อหลวง 1A).....	65
16	ค่าสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือ (บ่อหลวง 2A).....	66
17	ผลของระดับความเค็มของน้ำเกลือที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ ของไข่เค็มดิบ.....	72
18	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของไข่เค็มกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ.....	74
19	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มกับเวลา ที่แช่ในน้ำเกลือ.....	76
20	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มกับเวลา ที่แช่ในน้ำเกลือ.....	80
21	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ.....	81
22	ผลของระดับความเค็มของน้ำเกลือที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ ของไข่เค็มต้ม.....	82
23	ปริมาณเกลือและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน.....	94

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 รูปทรงโพเรท รูปทรงออบเลท และรูปทรงของไข่	5
2 แกนหลักและแกนรองของรูปทรงไข่.....	6
3 เปลือกไข่ผ่าตามด้านข้าง.....	9
4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเยื่อหุ้มไข่ไก่.....	10
5 ส่วนประกอบของไข่.....	12
6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือเฉลี่ยของไข่แดงเค็มที่ผ่านการดองในน้ำเกลือความเข้มข้นต่าง ๆ.....	20
7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดง.....	21
8 ลักษณะของคลื่นตามยาว.....	25
9 ลักษณะของคลื่นตามขวาง.....	25
10 การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงดึง.....	29
11 การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงเฉือน.....	30
12 วัตถุเปลี่ยนปริมาตรโดยไม่เปลี่ยนรูปทรง เมื่อได้รับแรงดันจากภายนอก.....	31
13 ไข่เป็ดที่ใช้ในการทำการวิจัย.....	45
14 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์.....	45
15 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ.....	45
16 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก.....	45
17 ออสซิลโลสโคป.....	45
18 อ่างใส่สารตัวอย่าง.....	46
19 ทรานส์ดิวเซอร์.....	46
20 ขวดพิกานอิมิตเตอร์.....	46
21 เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง.....	46
22 ชุดทดลองหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ.....	47
23 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ.....	48
24 ชุดทดลองหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้ม.....	49
25 ขนาดของไข่ขาวที่นำมาทำวิจัย.....	50
26 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้ม.....	50
27 การเปรียบเทียบน้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่ดิบ ไข่ต้ม และไข่เค็ม.....	58

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
28 ลักษณะของไข่ขาวและไข่แดงของไข่ต้ม.....	59
29 ลักษณะของไข่เค็มดิบที่ตองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาตองเค็ม 7 วัน.....	62
30 ลักษณะของไข่เค็มดิบที่ตองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาตองเค็ม 14 วัน.....	62
31 ลักษณะของไข่เค็มดิบที่ตองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาตองเค็ม 21 วัน.....	62
32 ลักษณะของไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อน(30 นาที) ที่ตองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ(จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาตองเค็ม 7 วัน.....	63
33 ลักษณะของไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อน(30 นาที) ที่ตองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ(จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาตองเค็ม 14 วัน.....	63
34 ลักษณะของไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อน(30 นาที) ที่ตองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ(จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาตองเค็ม 21 วัน.....	63
35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเค็มของน้ำเกลือจากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง 2A.....	67
36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับความเค็มของน้ำเกลือ จากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง 2A.....	68
37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและความหนาแน่นของ น้ำเกลือบ่อหลวง1A และบ่อหลวง 2A.....	69
38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับความเค็มของน้ำเกลือ จากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง 2A.....	70
39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับความเค็มของน้ำเกลือจากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง 2A.....	71
40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไข่เค็มดิบกับความเค็มของน้ำเกลือ.....	73
41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบกับความเค็ม ของน้ำเกลือ.....	75
42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของ ไข่เค็มดิบ.....	77

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของ ไข่เค็มดิบที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ตามลำดับ.....	78
44 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบกับความเค็ม ของน้ำเกลือ.....	79
45 ความสัมพันธ์ระหว่างบัลคมอดูลัสของไข่เค็มดิบกับความเค็มของน้ำเกลือ.....	80
46 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไข่เค็มต้มกับความเค็มของน้ำเกลือ.....	83
47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มกับ ความเค็มของน้ำเกลือ.....	84
48 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ของไข่เค็มต้มที่ระดับความเค็ม 50% 75% 100%.....	85
49 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มต้มกับ ความเค็มของน้ำเกลือ.....	86
50 ความสัมพันธ์ระหว่างบัลคมอดูลัสของไข่เค็มต้มกับความเค็มของน้ำเกลือ.....	87
51 เปรียบเทียบความหนาแน่นของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม.....	88
52 เปรียบเทียบความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม.....	89
53 เปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม.....	90
54 เปรียบเทียบค่าบัลคมอดูลัสของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม.....	91
55 การเพิ่มขึ้นของปริมาณเกลือในไข่เค็มกับเวลา.....	92
56 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดงขณะแช่ในน้ำเกลือเป็น เวลา 24 สัปดาห์.....	93
57 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบกับปริมาณ เกลือในไข่ขาวของไข่เค็ม ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน (จากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ.....	94
58 ความสัมพันธ์ระหว่างการแพร่ของน้ำเกลือที่ระดับความเค็มต่างๆกับเวลา.....	96

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ไข่เป็นอาหารอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญ บริโภคง่าย และมีราคาไม่แพง ไข่ที่มีการนำมาบริโภคได้แก่ ไข่ไก่ ไข่เป็ด ไข่ห่าน ไข่นกกระทา และไข่เต่า เป็นต้น สามารถนำมาบริโภคสด หรือทำเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆได้แก่ ไข่เค็ม ไข่เยี่ยวม้า ไข่ผง เป็นต้น (วรรณวิบูลย์ กาญจนกุญชร. 2543) หรือนำไปแปรรูปเป็นขนมหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกมากมาย ผลิตภัณฑ์เหล่านี้นอกจากช่วยเพิ่มมูลค่าของไข่แล้วยังเป็นการยืดอายุการเก็บรักษาไข่ไว้ได้อีกด้วยการใช้ไข่เป็นส่วนผสมในอาหารและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ของคนไทยมีทั้งการใช้ไข่รวม (ทั้งไข่แดงและไข่ขาว) ไข่แดงหรือไข่ขาวเพียงอย่างเดียว ในประเทศไทยไข่เป็ดนำมาใช้ในการทำขนมทองหยิบ ทองหยอด หรือฝอยทอง ซึ่งจะใช้ไข่แดงจากไข่เป็ดในการผลิต

ไข่เค็ม เป็นผลิตภัณฑ์จากไข่อีกชนิดหนึ่งที่รู้จักกันมาตั้งแต่สมัยโบราณ ไข่เค็มเป็นผลิตภัณฑ์พื้นเมืองของประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่ได้จากการบวนการถนอมอาหารโดยใช้เกลือ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาไข่ไว้ได้นานขึ้น โดยทั่วไปสามารถผลิตได้ 2 วิธีดังนี้ (เข็มทอง นิมจินดา. 2538; วรรณวิบูลย์ กาญจนกุญชร. 2543; Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999) การแช่ในน้ำเกลือ เป็นการแช่ไข่ทั้งฟองลงในสารละลายเกลือเข้มข้น 18 – 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 – 4 สัปดาห์ ไข่เค็มที่ได้สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นาน 12 – 14 สัปดาห์ และการพอกดิน เป็นการพอกไข่ด้วยส่วนผสมของดินเหนียว ขี้เถ้ากลบ และเกลือเป็นเวลา 4 – 6 สัปดาห์ ในประเทศไทย ไข่เค็มไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี และไข่เค็มลพบุรี จังหวัดลพบุรี เป็นไข่เค็มที่มีชื่อเสียง ซึ่งทำการผลิตไข่เค็มโดยใช้วิธีนี้เช่นกัน โดยใช้ดินจอมปลวกผสมเกลือและดินสอพองผสมเกลือ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ตามท้องถิ่นในการผลิตไข่เค็ม ผลิตภัณฑ์ไข่เค็มที่ได้สามารถบริโภคได้ทั้งฟอง หรือแยกเฉพาะส่วนของไข่แดงมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารชนิดอื่นๆ เช่น บะจ่าง ขนมไหว้พระจันทร์ ขนมเปี๊ยะ ขนมโมจิ และซาลาเปา เป็นต้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอัลตราโซนิกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในแวดวงอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากมาย ซึ่งประโยชน์ที่สำคัญและนิยมกันมากก็คือนำมาใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย แทนที่การตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่ต้องทำลายชิ้นงาน โดยที่คลื่นอัลตราโซนิกจะไม่ทำลายวัสดุตัวกลางนั้นให้เกิดความเสียหาย เนื่องด้วยคลื่นอัลตราโซนิก มีความยาวของคลื่นสั้น มีขนาดความถี่สูง ทำให้ลำของคลื่นมีขนาดแคบ จึงสามารถส่งคลื่นเข้าไปยังวัสดุตัวกลางได้ง่าย ชิ้นงานที่ทดสอบจึงไม่ถูก

ทำลายไปหลังการทดสอบ เครื่องมือที่ใช้ทดสอบมีขนาดเล็กไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการนำไปใช้ และ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกมีความเชื่อถือได้สูง

งานวิจัยนี้ได้นำคลื่นอัลตราโซนิกมาประยุกต์ใช้ในการวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ของไข่เค็ม เพื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็ม ซึ่งค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็น พารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่บอกถึงสมบัติของตัวกลางชนิดนั้น เมื่อความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงไป เล็กน้อยก็อาจจะทำให้สมบัติของตัวกลางชนิดนั้นมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถใช้เป็นดัชนี ตรวจสอบคุณภาพที่สำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ กระบวนการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพทำได้ หลายวิธี เทคนิคอัลตราโซนิกเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจสอบได้

เกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ เป็นผลิตภัณฑ์ชุมชนที่สามารถผลิตขึ้นได้ในพื้นที่อำเภอ บ่อเกลือ จังหวัดน่าน เหตุเพราะอำเภอบ่อเกลือเป็นที่ตั้งของบ่อเกลือสินเธาว์ ซึ่งมีทั้งหมด จำนวน 9 บ่อ แต่ในปัจจุบันมีบ่อที่ยังคงทำการผลิตเกลือเพียง 4 บ่อเท่านั้น คือ บ่อเกลือบ้านบ่อหลวงมี จำนวน 2 บ่อ บ่อเกลือบ้านบ่อหยวก 1 บ่อ และบ่อนาน 1 บ่อ โดยมีชาวเขาเผ่าถิ่นที่อยู่ในพื้นที่ที่มี บ่อเกลือเป็นผู้ผลิต เพื่อการบริโภคภายในหมู่บ้าน ซึ่งเกลือบ่อเป็นเกลือที่มีกระบวนการผลิตโดยการ ตักน้ำจากบ่อน้ำใต้ดิน และนำขึ้นมาให้ความร้อนโดยการต้ม จนน้ำระเหยออกไปเหลือแต่ผลึกเกลือ แล้วตักขึ้นมาใส่ตะกร้าเพื่อให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำไปบรรจุถุง เพื่อรอการจำหน่าย

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ต้องการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตรา โซนิก โดยเลือกศึกษาไข่เป็ด เนื่องจากไข่เป็ดได้รับความนิยมในการนำมาทำไข่เค็ม เพราะไข่ขาว ชั้นของไข่เป็ดมีความหนาแน่นมากเมื่อเทียบกับไข่ชนิดอื่น ไข่แดงมีไขมันมาก ทำให้ไข่เค็มที่ได้มีลักษณะ ของไข่ขาวอยู่ตัวไม่ยุ่ย และน้ำเกลือที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นน้ำเกลือจากเกลือสินเธาว์ที่ผลิตได้เอง ในพื้นที่อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน การศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือและไข่เค็ม น่าจะเป็น ข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ชุมชนของคนในพื้นที่ได้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก
3. เพื่อศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100%

ความสำคัญของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีความสำคัญดังนี้

1. เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคอัลตราโซนิกเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็ม
2. ทราบโครงสร้างทางเรขาคณิตเฉพาะของไข่
3. ทราบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็ม

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างของไข่ดิบ ไข่ต้ม (5 10 15 20 และ 25 นาที) และไข่เค็มที่มีกรรมวิธีการผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ดังนี้ น้ำหนัก พื้นที่ผิว ปริมาตร ความหนาแน่น ความแข็งตัว และความยืดหยุ่นของไข่ขาว
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือและไข่ ดังนี้ ความหนาแน่น ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และบัลค์มอดุลัส ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก
3. ศึกษาผลของระดับความเค็มของน้ำเกลือ คือ 50% 75% และ 100 % , เวลาที่ได้รับความร้อน (5 10 15 20 และ 25 นาที) และเวลาที่ได้รับความเค็ม (7 วัน 14 วัน และ 21 วัน) ต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ไข่ดิบ หมายถึง ไข่เปิดสด
2. ไข่ต้ม หมายถึง ไข่เปิดที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 10 15 20 และ 25 นาที
3. ไข่เค็มดิบ หมายถึง ไข่เปิดสดที่แช่ในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน
4. ไข่เค็มต้ม หมายถึง ไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
5. เกลือ หมายถึง เกลือสินเธาว์ที่ผลิตจากน้ำเกลือบ่อ ในเขตอำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน
6. ระดับความเค็มของน้ำเกลือ 100% หมายถึง เกลือ 36 กรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร
7. ระดับความเค็มของน้ำเกลือ 75 % หมายถึง น้ำเกลือ 100% จำนวน 75 มิลลิลิตรต่อน้ำ 25 มิลลิลิตร

8. ระดับความเค็มของน้ำเกลือ 50 % หมายถึง น้ำเกลือ 100% จำนวน 50 มิลลิลิตรต่อ น้ำ 50 มิลลิลิตร

7. สมบัติทางกายภาพ หมายถึง ความหนาแน่น ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัส

สมมุติฐานในการวิจัย

1. ระดับความเค็มของน้ำเกลือและเวลาให้ความร้อนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่
2. การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตัวกลาง
3. เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถใช้ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่ได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 เอกสารในงานวิจัย

2.1.1 ไข่และโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่

2.1.2 โครงสร้างทั่วไปและองค์ประกอบทางเคมีของไข่

2.1.3 เปลือก

2.1.4 คลื่นอัลตราโซนิกและสมบัติทางกายภาพ

2.1.5 การเกิดเจล

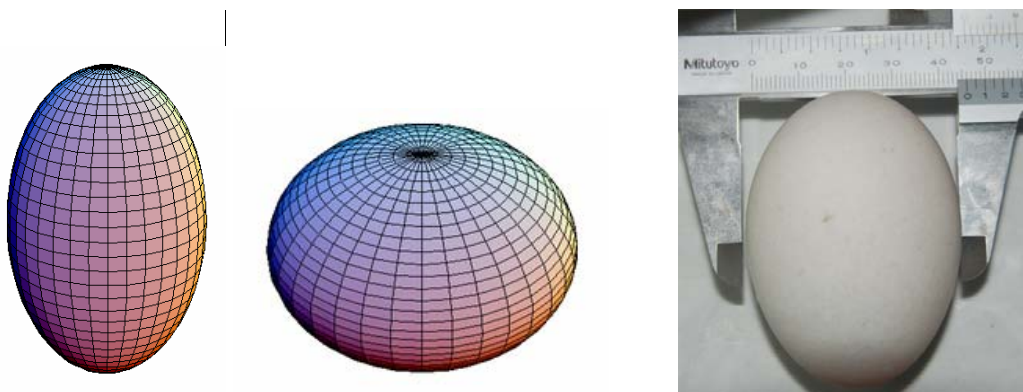
2.1.6 การแพร่และกฎการแพร่ของฟิค

2.1.7 ไข่เค็ม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารในงานวิจัย

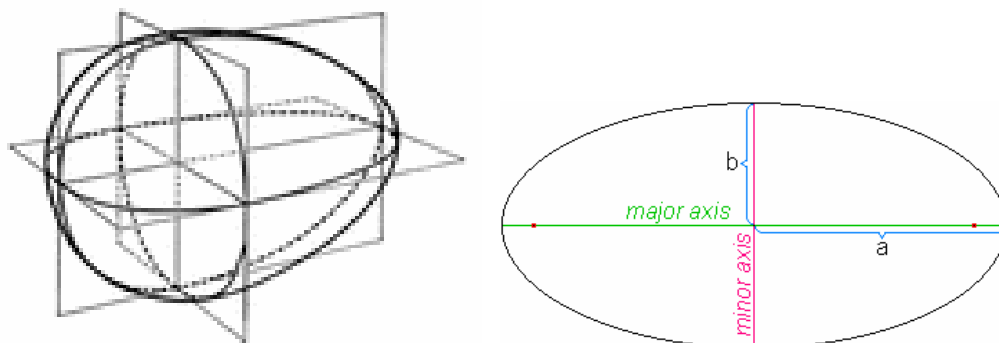
2.1.1 ไข่และโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่



ภาพประกอบ 1 รูปทรงโพรเลท (ซ้ายมือ) รูปทรงอบเลท (กลาง) และรูปทรงไข่ (ขวามือ)

ที่มา : สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2552, จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>

ไข่ มีรูปร่างเป็นแบบ ovate และมีรูปทรงเรขาคณิตเป็นแบบกึ่งรูปทรงกลมโพรเลท และกึ่งรูปทรงกลมออบเลท โดยทั้งสองรูปทรงมาเชื่อมกัน และมีแกนสมมาตรหลักของแกนหมุนร่วมกันที่จุดศูนย์กลางของไข่ ไข่จึงมีลักษณะเป็นรูปวงรีที่หมุนรอบแกนหลัก ดังแสดงในภาพประกอบ 1 และภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แกนหลักและแกนรองของรูปทรงไข่

ที่มา : สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2552, <http://th.wikipedia.org/wiki/>

สมการคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายรูปทรงของไข่ คือ

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ a คือ ครึ่งหนึ่งของแกนหลักของวงรี

b คือ ครึ่งหนึ่งของแกนรองของวงรี

c คือ ความยาวเชิงซั้ว (แกน Z)

เมื่อ $a = b = c$ วัตถุจะมีรูปทรงกลม

เมื่อ $a = b > c$ วัตถุจะมีรูปทรงออบเลท

เมื่อ $a = b < c$ วัตถุจะมีรูปทรงโพรเลท

ปริมาตรและพื้นที่ผิวของไข่ (ที่มา : สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2552, จาก <http://th.wikipedia.org/wiki/>)

ปริมาตรของไข่หาได้จากสมการ

$$V = \frac{4}{3}\pi ab^2 \dots\dots\dots(2)$$

พื้นที่ผิวของไข่หาได้จากสมการ

$$A = 2\pi b^2 + 2\pi \frac{ab}{e^{\sin^{-1}e}} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ a คือ ครึ่งหนึ่งของแกนหลักของวงรี

b คือ ครึ่งหนึ่งของแกนรองของวงรี

e คือ $\sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$

2.1.2 โครงสร้างทั่วไปและองค์ประกอบทางเคมีของไข่

ไข่ประกอบด้วยโครงสร้าง 3 ส่วนหลักๆ คือ เปลือกไข่อ้อยละ 11 ไข่ขาวอ้อยละ 58 และ ไข่แดงอ้อยละ 31 ในแต่ละส่วนมีองค์ประกอบทางเคมี ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 องค์ประกอบทางเคมีของไข่

ส่วนประกอบ ของไข่	แต่ละส่วน	โปรตีน (ร้อยละ)	คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	น้ำ (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)
ไข่ขาว	58.0	9.7–10.6	0.4–0.9	0.03	88.0	0.5–0.6
ไข่แดง	31.0	15.7–16.6	0.2–1.0	31.8–35.5	48.0	1.1
เปลือกไข่	11.0	1.0	–	–	1.0	–
ทั้งหมด	100.0	12.8–13.4	0.3–1.0	10.5–11.8	0.8–1.0	65.5–75.0

ที่มา: สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2522)

2.1.2.1 เปลือกไข่

เปลือกไข่เป็นส่วนประกอบสำคัญของไข่ของสัตว์ปีกต่างๆ รวมไปถึงเปิดและไก่ ซึ่ง สุวรรณ เกษตรสุวรรณ (2522) ได้แสดงโครงสร้างของไข่ทั้งฟอง และสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ ไข่ขาว ไข่แดง เปลือกไข่ ซึ่งมีสัดส่วนใกล้เคียงกันในทุกๆ ฟองดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ส่วนประกอบสำคัญของไข่ของสัตว์ปีกต่างๆ

ชนิด	น้ำหนัก(g)	ไข่ขาว(%)	ไข่แดง(%)	เปลือกไข่(%)
ไข่ห่าน	200	52.5	35.1	12.4
ไข่เป็ด	80	52.6	35.4	12.0
ไข่ไก่	68	55.8	21.9	12.3
ไข่นกพิราบ	17	74.0	17.9	8.1

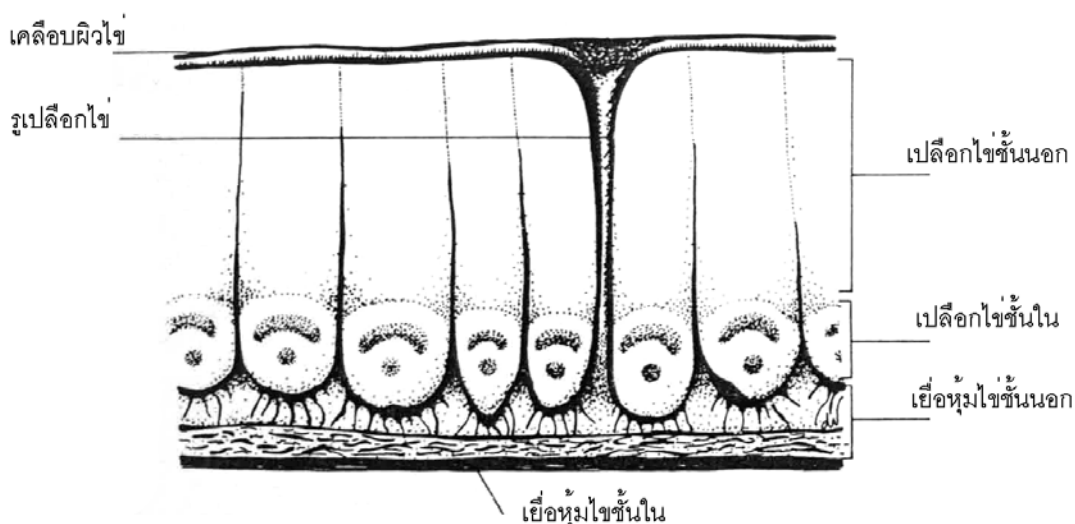
ที่มา: สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2522)

อาจประมาณได้ว่าไข่ฟองหนึ่งๆ จะมีสัดส่วนของเปลือกไข่เป็นร้อยละ 12 – 13 ของน้ำหนักเปียก และร้อยละ 9 – 11 สำหรับน้ำหนักแห้ง

เปลือกไข่มีหน้าที่รับน้ำหนักกดทับจากตัวแม่ไก่หรือแม่เป็ดขณะกกไข่ มีความบางพอให้ลูกไก่สามารถเจาะผ่านจากเปลือกได้ ต้องมีความโปร่งพอที่จะให้ลูกไก่ได้ออกหายใจ และมีสมบัติในการป้องกันจุลินทรีย์ไม่ให้เข้าไปในไข่ได้ ไข่ที่ออกมาใหม่ๆ เปลือกไข่จะค่อนข้างโปร่งแสง ต่อมาจะค่อยๆ ขุ่นและทึบแสงลง ถ้าใช้เครื่องส่องไข่ส่องดูจะเห็นมีลักษณะตามที่แสงผ่านเป็นจุดเล็กๆ บริเวณใต้เปลือกทั้งนี้เนื่องจากการรวมตัวของโปรตีนจนเป็นชั้นหรือเป็นแผ่นๆ ซึ่งจะทำให้หน้าที่ย่อยเก็บรักษาความชื้นและยังเป็นส่วนที่แสงส่องผ่านได้สะดวกกว่าส่วนอื่นๆ (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. 2522)

โครงสร้างของเปลือกไข่

เปลือกไข่มีลักษณะโค้งติดกับเยื่อหุ้มไข่และโค้งลดหลั่นกันเป็นรัศมีจากศูนย์กลางด้วยการเรียงตัวของผลึกธาตุปูน ซึ่งแบ่งเป็น 2 พวก พวกหนึ่งเป็นอินทรีย์สารทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเซลล์ เป็นโปรตีนแบบเดียวกับพังผืดกระดูก ที่ประสานโครงยึดกันมีประมาณ 1/5 ของโครงสร้างเปลือกไข่ พวกที่สองเป็นส่วนประกอบของอินทรีย์สารต่างๆ มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตมีอยู่มากที่ด้านนอกเคลือบคลุมเป็นเนื้อพื้นของเปลือก (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. 2522)



ภาพประกอบ 3 เปลือกใบผ่าตามด้านข้าง

ที่มา: สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2522)

ส่วนประกอบของเปลือกใบสามารถแบ่งเป็นชั้นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

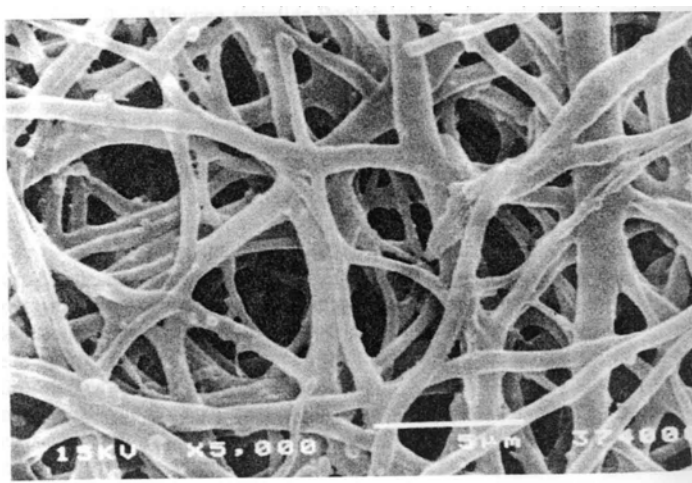
1. เคลือบผิวใบ ประกอบด้วยโปรตีนเป็นหลักเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของเปลือกใบทั้งหมด มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน มีหน้าที่ป้องกันการสูญเสียน้ำ การผ่านเข้าไปในใบของเชื้อจุลินทรีย์ และมีคุณสมบัติให้ก๊าซผ่านเข้าออกได้ เคลือบผิวใบสามารถหลุดออกได้ง่ายโดยการล้างน้ำหรือแช่ในสารละลายกรด

2. รูเปลือกใบ เป็นรูเปิดบริเวณผิวเปลือกใบมีลักษณะเป็นรูปร่างต่าง ๆ เชื่อมโยงจากภายนอกผิวใบ เข้าไปต่อเชื่อมกับช่องอากาศที่เปลือกชั้นใน ขนาดของรูเปลือกใบมีตั้งแต่ 10 – 30 ไมครอน โดยธรรมชาติที่เปลือกใบจะมีอยู่ประมาณ 7,500 รูต่อเปลือกใบหนึ่งฟอง พบว่าใบเปิดมีจำนวนรูต่อตารางเซนติเมตรมากกว่าของใบปิด (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. 2522)

3. เปลือกชั้นนอก เปลือกชั้นนอกมีความหนา 2 ใน 3 ของเปลือกใบทั้งหมด อยู่ติดกับเปลือกชั้นในประกอบด้วยผลึกแคลไซต์เล็กๆ นานาเป็นหลักและจะมีผลึกแคลเซียมฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบรองลงมา เปลือกชั้นนอกนี้จะให้ความเป็นรูปทรงและความแข็งแรงแก่เปลือกใบ โดยความแน่นและแข็งแรงจะมีมากที่ผิวด้านนอกเพราะมีลักษณะเป็นผลึกอยู่แน่น นอกจากนี้มีรูเล็กๆ จำนวนมากเชื่อมโยงจากเปลือกชั้นในมาเปิดที่ชั้นนี้เป็นรูพรุนแบบฟองน้ำแต่แข็งแรงมากอยู่ด้วย

4. เปลือกไขชั้นใน เป็นชั้นที่บางของเปลือกคือ 1/3 ของความหนาของเปลือกไข อยู่ติดกับเยื่อหุ้มไขชั้นนอก ประกอบด้วยปุ่มพื้นหยาบ ๆ จำนวนมาก ปุ่มเหล่านี้ผิวนอกเป็นชั้นเดียวอยู่ติดกับเยื่อหุ้มไข ปลายปุ่มผายออกไปเปิดที่เยื่อหุ้มไขชั้นในเป็นทางผ่านของอากาศให้กระจายไปทั่วเปลือกชั้นนี้ ปุ่มพื้นเปลือกประกอบด้วยเกลือแร่ที่ไม่เป็นผลึกกระจายอยู่รอบผิวพื้นโปรตีนของเปลือก

5. เยื่อหุ้มไข เยื่อหุ้มไขประกอบด้วยเส้นใยทอประสานกันเป็นตาข่ายจำนวนมาก แบ่งเป็น 2 ชั้น ได้แก่ เยื่อชั้นในล้อมรอบไขขาวส่วนนอกและเยื่อชั้นนอกอยู่ระหว่างเยื่อชั้นในกับเปลือกที่ด้านป้านของเปลือกไขเนื้อเยื่อทั้งสองแยกออกจากกันเป็นช่องอากาศของไขความหนาของชั้นเยื่อหุ้มไขทั้งหมดประมาณ 0.07 – 0.11 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเยื่อหุ้มไขไก่

ที่มา: สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2522)

สุวรรณ เกษตรสุวรรณ (2529) ได้แสดงองค์ประกอบทางเคมีต่างๆของเปลือกไข่ ได้แก่ องค์ประกอบส่วนที่เป็นน้ำร้อยละ 1.6 และองค์ประกอบที่เป็นวัตถุแห้งร้อยละ 98.4 ซึ่งองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในเปลือกไข่ แสดงในตาราง 3

ตาราง 3 องค์ประกอบต่างๆของเปลือกไข่

ชนิดองค์ประกอบ	ปริมาณ (%)	หมายเหตุ
น้ำ	1.6	
วัตถุแห้ง	98.4	- อินทรีย์วัตถุ 3.3% เกือบทั้งหมดเป็นโปรตีน มีไลโปตีนน้อยมาก - อนินทรีย์วัตถุ 95.1%
รวม	100	

ที่มา : สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2529)

2.1.2.2 ไข่ขาว

สาเหตุที่เรียกว่าไข่ขาวเนื่องจากเวลาแข็งตัวจะเป็นสีขาว ปริมาณไข่ขาวมีประมาณร้อยละ 58 ของเนื้อไข่ทั้งฟอง ไข่ขาวมีสีเหลืองอ่อน เนื่องจากสีของโอโวเฟลวิน และบางครั้งพบว่ามีสีชมพูหรือสีเขียวย่อน เนื่องจากอาหารบางชนิดที่ใช้เลี้ยงไก่

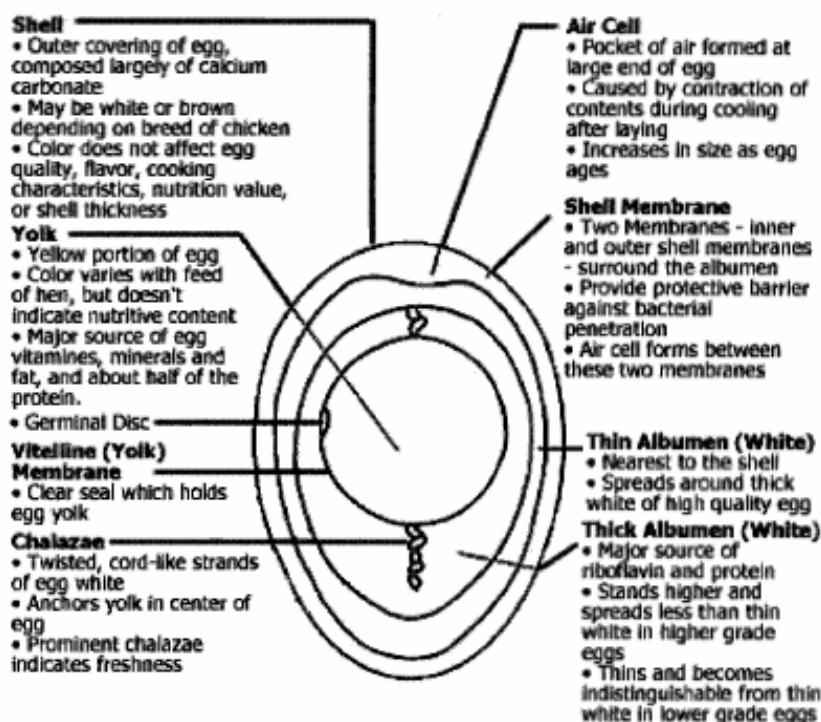
ส่วนประกอบของไข่ขาว

1. **เยื่อข้าวไข่แดง** เป็นส่วนของไข่ขาวชั้นที่มาห่อหุ้มไข่แดงอยู่ชิดกับเยื่อหุ้มไข่แดง และขมวดเป็นเกลียวอยู่ที่หัวท้ายตามแกนยาวของไข่แดง น้ำหนักของเยื่อข้าวไข่แดงในไข่ฟองหนึ่งจะหนักไม่ถึง 1 กรัม เฉพาะน้ำหนักของตัวข้าวไข่แดงทั้ง 2 ข้าง นี้ประมาณ 0.15 กรัม โดยที่ข้าวไข่แดงจะเป็นสายของไข่ขาวชั้นที่ยื่นออกมาจากส่วนไข่ขาวชั้น มีลักษณะบิดเป็นเกลียวยื่นไปทางด้านป้าน และด้านแหลมของไข่ ข้าวที่อยู่ทางด้านแหลมเรียกว่า choacal chalaza ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวและใหญ่กว่าของด้านป้านที่เรียกว่า infundibular chalaza ทำหน้าที่ช่วยยึดไม่ให้ไข่แดงเคลื่อนที่ไปมาจากตำแหน่งเดิม เมื่อเก็บไข่ไว้นานขึ้น ส่วนนี้จะเกิดการอ่อนตัวลงทำให้ไข่แดงเคลื่อนที่ได้มากขึ้น

2. **ไข่ขาวเหลวชั้นใน** เป็นส่วนของไข่ขาวที่ค่อนข้างเหลวใส อยู่ชั้นรอบนอก มีประมาณร้อยละ 16.8 ของไข่ขาวทั้งหมด ภายในชั้นนี้ไม่มีเส้นใยมิวซินอยู่เลยเป็นชั้นที่เยื่อข้าวไข่แดงโยงดึงไข่แดงให้ลอยอยู่ตรงกลางฟองไข่

3. ไข่ขาวชั้น อยู่ถัดไข่ขาวใสชั้นนอกออกมาเป็นชั้นหรือถุงไข่ขาวชั้นที่ห่อหุ้มไข่แดงกับไข่ขาวใสตอนใน ความชื้นของตัวมันจะช่วยประคองไข่แดง และน้ำไข่ขาวใสตอนในให้แขวนลอยอยู่ และพ้นอันตรายจากการกระทบกระทั่ง ไข่ขาวส่วนนี้มีปริมาณร้อยละ 57.3 ของไข่ขาวทั้งหมด เส้นใยมิวซินของชั้นนี้เป็นส่วนประกอบสำคัญของไข่ขาวชั้น และไปเชื่อมยึดกับเยื่อหุ้มไข่ชั้นในที่ด้านป้านกับด้านแหลมของฟองไข่ ไข่ขาวชั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นใยชั้นๆ ที่รวมกับส่วนที่เป็นของเหลวทำให้ดูขุ่นขึ้น เส้นใยเหล่านี้ด้านนอกที่ติดกับไข่ขาวเหลวชั้นนอกเป็นเส้นใยยาวอยู่กันอย่างหนาแน่น ถ้าใช้ความร้อน หรือย้อมสีไข่ขาวชั้น จะเห็นเป็นชั้นๆ ได้ด้วยตาเปล่า ถ้าใช้กล้องขยายจะเห็นแต่ละชั้นนั้นประสานกันอย่างซับซ้อนห่างกันชั้นละประมาณ 10 มิลลิเมตร

4. ไข่ขาวใสชั้นนอก หรือน้ำค้างไข่จะอยู่รอบๆ ด้านข้างของไข่ขาวส่วนชั้น เว้นแต่ที่ตรงหัวและท้ายของไข่ มีลักษณะเหลวใส อยู่เป็นชั้นบางๆ ติดเยื่อเปลือกไข่ มีปริมาณร้อยละ 23.2 ของไข่ขาวทั้งหมด โดยส่วนประกอบของไข่ขาวใสชั้นนอกนี้จะเหมือนกับไข่ขาวใสชั้นใน แต่มีเส้นใยมิวซินบ้างเล็กน้อย ใช้ประโยชน์เป็นตัวเชื่อมประสานน้ำเชื้อในการผสมพันธุ์เทียม และช่วยในการขึ้นฟูของขนม (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. 2529)



ภาพประกอบ 5 ส่วนประกอบของไข่

ที่มา : วรพินิต ลิ้มปภาส. (2547: 13); อ้างอิงจาก CMC food. (2002)

ส่วนประกอบในไข่ขาว ส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำมีประมาณร้อยละ 84 – 89 และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดประมาณร้อยละ 11 – 13 โดยมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบหลักประมาณร้อยละ 9.7 – 10.6 มีไขมันประมาณร้อยละ 0.3 และมีคาร์โบไฮเดรตที่อยู่อย่างอิสระประมาณร้อยละ 0.4 ของไข่ขาว ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นกลูโคสถึงร้อยละ 98 และส่วนคาร์โบไฮเดรตที่จับอยู่กับโปรตีนได้แก่ ไกลโคโปรตีน ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของแมนโนสและกาแลคโตส มีประมาณร้อยละ 0.5 ของไข่ขาว

โปรตีนไข่ขาว

ไข่ขาวเป็นระบบโปรตีนที่ประกอบด้วยเส้นใยโอโวมิวซินละลายอยู่ในสารละลายเอเคเวียสของโกลบูลาร์โปรตีนหลายชนิด ส่วนประกอบของโปรตีนในชั้นในไข่ขาวใสและไข่ขาวชั้นต่างกันเฉพาะที่ปริมาณของโอโวมิวซิน โปรตีนที่สำคัญของไข่ขาวสามารถแยกลำดับส่วนด้วยแอมโมเนียมซัลเฟต และทำให้บริสุทธิ์โดยใช้เทคนิคของ ion exchange สำหรับโปรตีนแต่ละชนิดที่แยกได้จากไข่ขาว พบว่ามีสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไข่ขาวจากไข่ไก่

ชนิดโปรตีน	สมบัติเชิงหน้าที่
โอวัลบูมิน	ช่วยในการจับตัวเป็นก้อน
โอโวทรานส์เฟอร์รินส์	สามารถจับอนุมูลโลหะได้ (chelating agent)
โอโวมิวคอยด์	ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน
โอโวมิวซิน	เป็นสารช่วยในการเกิดฟอง
ไลโซไซม์	ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแกรมลบ
อะวิดิน	สามารถจับไบโอติน และแบคทีเรียได้
โอโวโกลบูลิน	เป็นสารช่วยในการขึ้นฟูในผลิตภัณฑ์ขนมอบ
โอโวอินฮิบิเตอร์	ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน และโคโมทริปซิน
โอโวฟลาโวโปรตีน	สามารถจับไรโบฟลาวิน

2.1.2.3 ไข่แดง

ไข่แดงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของไข่ เพราะเป็นจุดตั้งต้นของการเจริญเติบโตของตัวอ่อน โดยทั่วไปไข่แดงจะมีสีเหลืองอ่อนไปจนถึงสีส้มแดง ขึ้นอยู่กับอาหารที่ใช้เลี้ยง ในไข่แดงจะเห็นลักษณะเป็นวงๆ ของชั้นไข่แดงเข้มสลับกับชั้นไข่แดงสีอ่อน ซึ่งมีความหนาไม่เท่ากัน โดยชั้นสีอ่อนบางกว่า มีความหนาประมาณ 0.25 – 0.4 มิลลิเมตร ชั้นสีเข้มหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร (นุชรี เบญจานุวัตร. 2529) และมีปริมาณเม็ดสีต่างกัน นอกจากนี้ในชั้นไข่แดงสีเข้มยังมีปริมาณน้ำน้อยกว่า แต่มีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่าชั้นไข่แดงสีอ่อน (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. 2516) ที่กึ่งกลางของไข่แดงจะมีสีอ่อนเรียกว่า “แกนไข่แดง” มีอยู่ร้อยละ 0.5 ของไข่แดงทั้งฟอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร มีลักษณะคล้ายเยื่อหุ้มไข่แดงแต่ค่อนข้างเหลว เมื่อต้มสุกจะแข็งตัวเต็มที่เหมือนไข่แดงส่วนอื่น ไข่แดงจะถูกห่อหุ้มด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่า “เยื่อหุ้มไข่แดง” มีความหนาประมาณ 0.024 มิลลิเมตร ประกอบด้วยเจลาติน มีลักษณะอ่อนนุ่ม (นุชรี เบญจานุวัตร. 2529) เยื่อนี้จะยอมให้น้ำและสารตัวอื่นๆ ที่ละลายได้เช่น ฟอสฟาไทด์และไขมันที่ละลายได้ในแอลกอฮอล์ซึมผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้โปรตีนบางชนิด เช่น โอโวไวเทลลินซึมผ่านได้ เยื่อหุ้มไข่แดงจะยอมให้น้ำซึมผ่านออกจากไข่ได้ แต่จะขัดขวางไม่ให้น้ำผ่านเข้ามาในไข่แดง ในทางตรงกันข้ามเยื่อนี้จะยอมให้เกลือซึมผ่านเข้าไปในไข่แดง แต่จะขัดขวางไม่ให้เกลือซึมผ่านออกมาจากไข่แดง

การจัดระดับคุณภาพของไข่

การจัดระดับคุณภาพไข่นั้นอาจทำได้ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ จัดตามขนาดและจัดตามลักษณะคุณภาพ

การจัดตามขนาด เป็นการแบ่งตามขนาดหรือน้ำหนักไข่ สุวรรณ เกษตรสุวรรณ (2529) กล่าวถึงการจัดมาตรฐานไข่ไก่ในสหรัฐอเมริกาไว้ ดังตาราง 5

ตาราง 5 น้ำหนักมาตรฐานของไข่ไก่ในสหรัฐอเมริกา

ขนาด	น้ำหนักอย่างน้อย(ออนซ์/โหล)	น้ำหนัก(กรัม/ฟอง)
ไข่ใหญ่พิเศษ	30	77.7
ไข่ใหญ่มาก	27	69.9
ไข่ใหญ่	24	62.2
ไข่ขนาดกลาง	21	54.4
ไข่เล็ก	19	46.6
ไข่จิ๋ว	15	38.9

ที่มา : สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2529)

การจัดตามลักษณะคุณภาพ ซึ่งจะพิจารณาจัดเกรดตามคุณภาพที่สำคัญ ดังนี้

1. คุณภาพภายนอก พิจารณาจากรูปร่างของไข่ กล่าวคือ ไข่รูปทรงปกติควรมีปลายด้านหนึ่งป้าน และข้างหนึ่งแหลมมน ผิวเปลือกค่อย ๆ ลาดมาทางด้านแหลม เปลือกเกลี้ยง ไม่สกปรก และแตกร้าวหรือมีรอยขีดบนเปลือก ซึ่งจะทำให้เปลือกแตกได้ง่าย

2. คุณภาพภายในซึ่งตรวจโดยวิธีส่องไฟ ใช้แสงไฟประมาณ 60 วัตต์ขึ้นไป เมื่อส่องใต้ฟองไข่จะทำให้เห็นคุณภาพภายในฟองไข่ได้ คุณภาพที่พิจารณา คือ ตำแหน่งและขนาดของช่องอากาศ ตำแหน่งและเงาไข่แดง ความหนาแน่นของไข่ขาว จุดเลือดและจุดเนื้อในไข่

3. คุณภาพเมื่อต่อยไข่ออกดู วิธีนี้ใช้การสุมตัวอย่างไข่มาตรวจเพื่อเป็นการยืนยันคุณภาพของไข่แต่ละเกรด ผู้ตรวจจะต่อยไข่ใส่ภาชนะที่แบนเพื่อดูการกระจายของไข่ขาว และความหนูนึ่งของไข่แดง มีการดมกลืนเพื่อตรวจหาความผิดปกติของการดูดซับกลืนและการเน่าเสีย ไข่ที่มีคุณภาพดีควรมีไข่แดงที่นูนตั้ง ไข่ขาวเกาะตัวไม่กระจายแผ่กว้าง และมีกลิ่นตามธรรมชาติของไข่ บางครั้งอาจทำการตรวจวัดความสูงของไข่ขาวหรือไข่แดง โดยใช้เครื่องมือ เช่น ฮอฟฟ์เกจ (Haugh gage) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับวัดคุณภาพภายในของไข่ ค่าที่ได้จะเป็นค่าสำเร็จแสดงเป็นฮอฟฟ์ยูนิต (Haugh Unit) มีสเกลตั้งแต่ 0 – 100 สามารถใช้ในการแบ่งระดับคุณภาพของไข่ได้ โดยไข่ที่มีคุณภาพดีจะมีค่าฮอฟฟ์ยูนิตอยู่ระหว่าง 72 – 100 เครื่องฮอฟฟ์เกจนั้นประกอบด้วยไมโครมิเตอร์ที่มีขาหยั่ง 3 ขา แผ่นกระจกเรียบ ทำการวัดโดยการชั่งไข่ให้ทราบน้ำหนักต่อ 1 โหล หมุนเลื่อนขอบหน้าปัดตามน้ำหนักไข่ที่ชั่งได้ ต่อยไข่อ้อย ๆ เทลงบนกระจก แล้วยกฮอฟฟ์เกจวางลงไปให้ปลายไมโครมิเตอร์อยู่ส่วนบนของไข่ขาว ห่างจากไข่แดงออกมา $\frac{3}{8}$ นิ้ว หรือกึ่งกลางระหว่างไข่แดงกับขอบไข่ขาวชั้น ค่อย ๆ หมุนปุ่มเลื่อนปลายไมโครมิเตอร์ลงไปจนพอดีจรดกับผิวไข่ขาว อ่านค่าเป็นฮอฟฟ์ยูนิตจากหน้าปัดได้ทันที โดยไข่ใหม่จะมีไข่ขาวชั้นหนา ค่าฮอฟฟ์ยูนิตที่ได้ก็จะสูง ส่วนไข่เก่าไข่ขาวจะอ่อนและแบนกว่า ดังนั้นค่าฮอฟฟ์ยูนิตที่ได้จึงต่ำกว่า (สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. 2529)

4. คุณภาพเมื่อไข่สุก ซึ่งใช้การสุมตัวอย่างมาตรวจเช่นเดียวกับข้อ 3 โดยนำไข่มาต้มหรือทอด และพิจารณาดำแหน่งของไข่แดง ไข่ที่ดีควรมีไข่แดงอยู่กลางฟอง

คุณค่าทางโภชนาการของไข่

ไข่เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีสารอาหารหลายชนิด บริโภคง่ายและมีราคาไม่แพง คุณค่าทางโภชนาการของไข่มีรายละเอียดดังนี้

1. โปรตีน ไข่เป็นแหล่งของโปรตีนคุณภาพสูง มีกรดอะมิโนจำเป็นในปริมาณสูง และร่างกายสามารถนำไปใช้ได้หมด จึงถือว่าโปรตีนในไข่เป็นโปรตีนที่มีคุณค่าทางชีววิทยาสูงสุด (Biological value = 100) และถูกใช้เป็นตัวมาตรฐานสำหรับการวัดคุณภาพของโปรตีนในอาหารชนิดอื่นๆ (เข้มทอง นิมจินดา. 2538)
2. ไขมัน ไขมันส่วนใหญ่ในไข่อยู่ในไข่แดง ซึ่งอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ฟอสโฟลิปิด และคอเลสเตอรอลซึ่งพบในปริมาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอาหารโปรตีนชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ไข่ยังเป็นแหล่งของกรดไขมันไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะโอเลอิก
3. คาร์โบไฮเดรต มีเพียงปริมาณเล็กน้อยในไข่โดยอยู่ในรูปของน้ำตาลกลูโคสและไกลโคโปรตีน
4. แร่ธาตุ แร่ธาตุที่พบมากในไข่ ได้แก่ ธาตุเหล็ก ฟอสฟอรัส และ Trace element แร่ธาตุที่พบในไข่มีปริมาณแตกต่างกันไปฤดูกาล สภาพแวดล้อม อาหาร และอายุของสัตว์ปีก
5. วิตามิน ในไข่มีวิตามินหลายชนิด ยกเว้นวิตามินซี ได้แก่ วิตามินเอ ดี อี เค และกลุ่มวิตามินบีรวมถึงวิตามินบี 12 ไข่เป็นแหล่งของวิตามินเอ และวิตามินดีซึ่งพบมากในไข่แดง โดยเฉพาะวิตามินดีมีมากเป็นอันดับ 2 รองจากน้ำมันตับปลา (เข้มทอง นิมจินดา. 2538; วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ. 2543)

ตาราง 6 คุณค่าทางโภชนาการของไข่เป็ดและไข่ไก่ (ใน 100 กรัมของไข่สด)

	ไข่เป็ด	ไข่ไก่
พลังงาน (kcal)	185	158
น้ำ (g)	74.57	70.83
โปรตีน (g)	12.81	12.14
ไขมัน (g)	13.77	11.15
เกลือแร่		
แคลเซียม (mg)	64	56
เหล็ก (mg)	3.85	2.09
แมกนีเซียม (mg)	16	12
ฟอสฟอรัส (mg)	220	180
โพแทสเซียม (mg)	222	130

ตาราง 6 (ต่อ)

	ไข่เป็ด	ไข่ไก่
โซเดียม (mg)	146	138
สังกะสี (mg)	1.41	1.44
วิตามิน		
Thiamin (mg)	0.156	0.087
Riboflavin (mg)	0.404	0.301
Niacin (mg)	0.200	0.062
บี 6 (mg)	0.25	0.12
บี 12 (mg)	5.395	1.541
เอ (IU)	1328	520
ไขมัน		
Total saturated (g)	3.68	3.35
Total monounsaturated (g)	6.52	4.46
Total polyunsaturated (g)	1.22	1.45
Cholesterol (mg)	884	548
กรดอะมิโน		
Lysine (g)	0.951	0.820
Methionine (g)	0.576	0.392
Cystine (g)	0.285	0.289
Lysine (g)	0.951	0.820

ที่มา : วรพินิต ลิ้มปภาส. (2547: 21 – 22); อ้างอิงจาก Metzger Farms. (2002)

2.1.3 เกลือ

เกลือเป็นสารที่ประกอบด้วยโซเดียมร้อยละ 39.39 และ คลอไรด์ร้อยละ 60.61 มีรูปร่างเป็นผลึกรูปลูกบาศก์สีขาว มีความถ่วงจำเพาะ 2.164 มีความแข็ง 2.5 ดัชนีหักเห 1.544 จุดเดือด 1,413 องศาเซลเซียส จุดความชื้นจากอากาศได้ประมาณร้อยละ 1.5

เกลือ ละลายน้ำได้เพียง 35.7 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร สารละลายที่มีตัวถูกละลายอยู่มากที่สุดจนไม่สามารถละลายได้อีกแล้ว ณ อุณหภูมิที่กำหนดให้ เรียกว่า สารละลายอิ่มตัว ความเค็มของน้ำเกลือมีค่า 100 เปอร์เซนต์ เมื่อวัดจากสารละลายเกลืออิ่มตัว

การแพร่ของเกลือเข้าไปในอาหาร มี 3 ขั้นตอนใหญ่ ๆ (เสาวภา ยวุฒโฒ. 2538)

1. สภาวะออสโมติก เมื่ออาหารถูกแช่อยู่ในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นของเกลือภายนอกมากกว่า เป็นสาเหตุให้เกิดแรงดันออสโมติก ดึงน้ำออกจากอาหาร ในขั้นนี้อาหารมีน้ำหนักลดลง เช่น ในการผลิตเนยแข็ง เมื่อแช่เนยแข็งลงในน้ำเกลือ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) จากน้ำเกลือเข้าสู่เนยแข็ง เนื่องจากเกิดความแตกต่างของความดันออสโมติก ระหว่างส่วนสารละลายในเนยแข็งกับในน้ำเกลือ น้ำในเนยแข็งแพร่ออกจากเนยแข็งเพื่อรักษาสมดุลออสโมติก ในการผลิตไข่แดงเค็มโดยดองไข่แดงในน้ำเกลือความเข้มข้น 10 15 และ 20 เปอร์เซนต์น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าในช่วง 8 ชั่วโมงแรกของการดอง ไข่แดงมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการแพร่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากความเข้มข้นของเกลือระหว่างไข่แดงกับน้ำเกลือมีความแตกต่างกันมากในช่วงแรกของกระบวนการผลิต (Thanh. 1998)

2. การเปลี่ยนคุณสมบัติของโปรตีน ขณะที่น้ำแพร่ออกจากอาหาร เป็นสาเหตุให้เกลือซึมเข้าไปในอาหารเรื่อยๆ จนกระทั่งความเข้มข้นของเกลือถึงจุดๆหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสียสภาพและตกตะกอนของโปรตีน ทำให้อาหารเริ่มเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (อาทิเช่น การเปลี่ยนสีของอาหารเนื่องจากการจับตัวกันของโปรตีน เป็นต้น)

3. สภาวะสมดุล เมื่อความเข้มข้นของเกลือในอาหารเท่ากับในน้ำเกลือ อาหารมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักของเกลือเข้าไปแทนที่น้ำในอาหาร การแพร่ของเกลือในเนื้อปลาเป็นตัวอย่างที่ดีในการแสดงให้เห็นถึงการแพร่ของเกลือในวัสดุอาหารโดยที่กระบวนการแพร่สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ คือระยะที่ 1 ความดันออสโมติกในน้ำเกลือสูงกว่าในเนื้อปลามาก ทำให้เกลือแพร่เข้าเนื้อปลาอย่างรวดเร็ว พร้อมๆกับการแพร่ของน้ำออกจากเนื้อปลาซึ่งเกิดขึ้นด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่า ทำให้ปลา มีน้ำหนักลดลง ในระยะที่ 2 ของการแพร่ เป็นระยะที่อัตราการแพร่ของเกลือเท่ากับอัตราการแพร่ออกของน้ำจากเนื้อปลา ความเข้มข้นของเกลือที่บริเวณชั้นนอกของเนื้อปลาเท่ากับในน้ำเกลือ การแพร่ของเกลือและน้ำจึงยุติลง แต่เกิดการแพร่ของเกลือจากบริเวณชั้นนอกเข้าสู่ชั้นของเนื้อปลาแทน จนกระทั่งความเข้มข้นของเกลือบริเวณชั้นนอกของเนื้อปลาลดลง จึงเกิดการแพร่ของเกลือจากน้ำเกลืออีกครั้งหนึ่ง ระยะที่ 3 ปลา กลับมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีกครั้ง เนื่องจากปลา มีความเข้มข้นของเกลือเท่ากันทุกส่วน และเท่ากับในน้ำเกลือ ปลาเกิดการหดตัว

ทึบแสง และมีรสเค็มจัด ถ้ามีการหมักปลาต่อไปอีก เนื้อปลาเกิดการพองตัว ทำให้เกลือจากน้ำเกลือสามารถแพร่เข้าเนื้อปลาได้อีก ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนสภาพของน้ำไม่อิสระเป็นน้ำอิสระ หรืออาจเกิดจากการจับของเกลือกกับโปรตีน ทำให้ความเข้มข้นของเกลือในเนื้อปลาลดลง จึงเกิดการแพร่ของเกลือเข้าเนื้อปลาโดยไม่มีการสูญเสีย

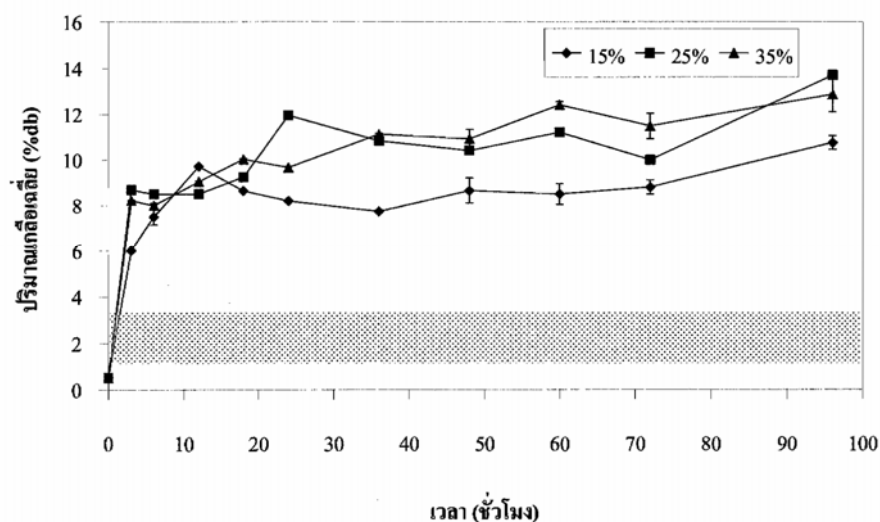
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแพร่ของเกลือในอาหาร

1. ชนิดของอาหาร อาหารแต่ละชนิดมีองค์ประกอบแตกต่างกัน เช่น ความชื้น และโครงสร้าง เช่น ความหนาของเปลือก ความพรุน และสารเคลือบผิว เป็นต้น จึงมีผลต่อความยากง่ายในการซึมเข้าไปในอาหารของเกลือ
2. ขนาดและรูปร่างของชิ้นอาหาร ในอาหารที่มีพื้นที่ผิวมาก การแพร่ของเกลือมีอัตราสูง
3. อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นตัวกำหนดอัตราการแพร่ของเกลือ เมื่ออุณหภูมิสูงเกลือสามารถแพร่เข้าไปในกล้ามเนื้อสัตว์ได้เร็ว เนื่องจากอุณหภูมิช่วยเร่งปฏิกิริยา ทำให้อากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์แพร่ออกมานอกเซลล์ได้รวดเร็ว เกลือจึงแพร่เข้าไปแทนที่ได้รวดเร็วขึ้น (เสาวภา ยุกวุฒโฒ. 2538) ในการผลิตไข่แดงเค็ม ในช่วงอุณหภูมิสูง (40 – 60 องศาเซลเซียส) อัตราการแพร่ของเกลือเข้าไข่แดงเกิดขึ้นเร็วกว่าการผลิตไข่แดงเค็มในช่วงอุณหภูมิต่ำ (0 – 10 องศาเซลเซียส) และเกิดการเปลี่ยนแปลงของไข่แดงเร็วกว่าด้วยเช่นกัน (Thanh. 1998)
4. ความเข้มข้นของเกลือ ในอาหารที่ใช้เกลือความเข้มข้นสูง การแพร่ของเกลือมีอัตราสูง เนื่องจากเกิดกระบวนการออสโมไลซิส และการสูญเสียน้ำได้อย่างรวดเร็ว (เสาวภา ยุกวุฒโฒ. 2538) ในการผลิตไข่แดงเค็มด้วยน้ำเกลือความเข้มข้น 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าการดองไข่แดงเค็มในน้ำเกลือความเข้มข้น 20 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร มีอัตราการแพร่ของเกลือเร็วกว่าการดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 15 และ 10 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ (Thanh. 1998)
5. ความบริสุทธิ์ของเกลือ เกลือที่มีความบริสุทธิ์สูงมีอัตราการแพร่สูงกว่าเกลือที่มีแร่ธาตุอื่นปนอยู่ เสาวภา ยุกวุฒโฒ (2538) พบว่า การผลิตไข่เค็มโดยใช้เกลือทะเลซึ่งมีปริมาณโซเดียมคลอไรด์สูง ใช้ระยะเวลาในการผลิตสั้นกว่าการผลิตไข่เค็มโดยใช้เกลือสินเธาว์
6. การกวน การกวนช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของเกลือได้ โดยช่วยลดหรือกำจัดชั้นของเหลวบริเวณผิวหน้าของอาหาร ซึ่งอาจมีความเข้มข้นของเกลือน้อยกว่าตำแหน่งอื่นๆ
7. อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับสารละลาย ในระหว่างการแช่น้ำเกลือ น้ำเกลือมีความเข้มข้นลดลง เป็นสาเหตุให้อัตราการแพร่ของเกลือและน้ำลดลง ดังนั้นควรใช้อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับสารละลายที่มากเกินไป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเกลือหรือเกิดน้อยที่สุด

การแพร่ของเกลือเข้าไปในไข่

การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดงของไข่เค็มที่แช่ในน้ำเกลือ

วรพินิต ลิ้มปภาส (2547) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณของเกลือในไข่แดงเค็มที่แช่ในน้ำเกลือที่มีความเข้มข้น 15 25 และ 35 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร เป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง พบว่าไข่แดงเค็มมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้น ยังคงมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่า 3 ชั่วโมงแรก โดยไข่แดงเค็มที่ดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 25 และ 35 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร มีการแพร่ของเกลือใกล้เคียงกัน และมีการแพร่ของเกลือเร็วกว่าไข่แดงเค็มที่ดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณเกลือเฉลี่ยของไข่แดงเค็มที่ผลิตอยู่ในช่วง 8 – 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ดังแสดงในภาพประกอบ 6



หมายเหตุ แถบ shaded แทนช่วงปริมาณเกลือของไข่แดงเค็มที่มีขายตามตลาดทั่วไป

%db = %Dry weight basis

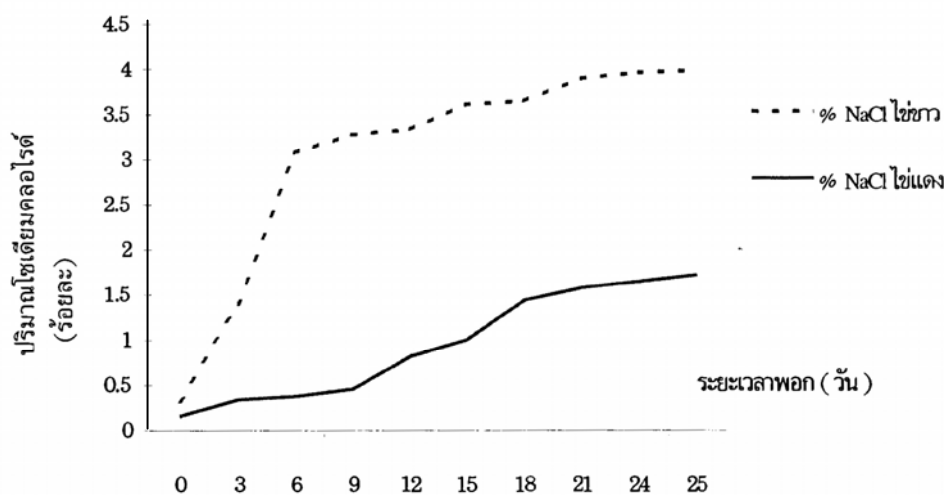
ภาพประกอบ 6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือเฉลี่ยของไข่แดงเค็มที่ผ่านการดองในน้ำเกลือความเข้มข้นต่างๆ

ที่มา : วรพินิต ลิ้มปภาส. (2547: 42)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดงของไข่เค็มพอก

ผลการศึกษาของชมภู ยิ้มโต (2543) พบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือในไข่ขาว ตั้งแต่วันแรกจนการพอกครบ 25 วัน พบว่า ในช่วงระยะเวลาการพอก เกลือจะซึมเข้าไปในไข่ขาว เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในช่วง 6 วันแรก เกลือจะมีอัตราการแทรกซึมเข้าไปในไข่ขาวได้เร็ว เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของเกลือในไข่กับเยื่อฟางขาวที่ใช้พอกมาก หลังจากวันที่ 21 ไป ปริมาณเกลือในไข่ขาวจะเริ่มคงที่ (ดังภาพประกอบ 7) เนื่องจากเป็นช่วงที่เกลือซึมเข้าไปจนถึงจุดสมดุลแล้ว ความเข้มข้นของเกลือข้างนอกเท่ากับเกลือข้างในไข่ ทำให้ปริมาณเกลือในไข่ขาวคงที่ มีลักษณะเช่นเดียวกับการแทรกซึมของเกลือเข้าไปในไข่แดง คือ ปริมาณเกลือจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการพอกนานขึ้น หลังจากวันที่ 21 ไปแล้ว ปริมาณเกลือในไข่แดงยังคงเพิ่มขึ้นทั้งที่ถึงจุดสมดุลแล้ว ทั้งนี้เพราะในไข่ขาวมีความเข้มข้นของเกลือสูงกว่าไข่แดง เกลือจึงแพร่ซึมผ่านจากไข่ขาวไปยังไข่แดง ทำให้ปริมาณเกลือในไข่แดงยังคงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 7

การแทรกซึมของเกลือเข้าไปในไข่ พบว่าในไข่ขาวจะมีปริมาณเกลือมากกว่าไข่แดง เนื่องจากส่วนของไข่ขาวเป็นส่วนที่ใกล้ชิดกับเยื่อฟางขาวที่พอกไข่ เกลือจึงซึมเข้าไปในไข่ขาวได้เร็วกว่าไข่แดง และในไข่ขาวมีปริมาณความชื้นสูงกว่าไข่แดง ปริมาณความชื้นจะเป็นตัวกลางให้เกลือเคลื่อนที่ได้เร็ว



ภาพประกอบ 7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดง

ที่มา : ชมภู ยิ้มโต. (2543: 67 – 68)

จากผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดง สามารถนำมาคำนวณหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือในไข่ขาว ไข่แดงกับระยะเวลาการพอกไข่ โดยกำหนดให้จำนวนวันที่พอกไข่เป็นตัวแปรอิสระ ปริมาณเกลือในไข่ขาว ไข่แดง เป็นตัวแปรตาม ได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} y_1 &= 1.4607 + 0.1194x & R^2 &= 0.7381 \\ y_2 &= 0.0540 + 0.0676x & R^2 &= 0.9651 \end{aligned}$$

เมื่อ x = จำนวนวันในการพอกไข่
 y_1 = ปริมาณเกลือในไข่ขาว (ร้อยละ)
 y_2 = ปริมาณเกลือในไข่แดง (ร้อยละ)

สมการถดถอยทั้ง 2 สมการ สมการแรก $y_1 = 1.4607 + 0.1194x$ ซึ่งสมการนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือในไข่ขาวกับจำนวนวันในการพอกไข่ได้ร้อยละ 85.91 แสดงว่าปริมาณเกลือในไข่ขาวมีความสัมพันธ์กับจำนวนวันในการพอกไข่เป็นเส้นตรง สมการที่สอง $y_2 = 0.0540 + 0.0676x$ ซึ่งสมการนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเกลือในไข่แดงกับจำนวนวันในการพอกไข่ได้ร้อยละ 98.24 แสดงว่าปริมาณเกลือในไข่แดงมีความสัมพันธ์กับจำนวนวันในการพอกไข่เป็นเส้นตรง จากสมการทั้งสองพบว่า เมื่อพอกไข่นานขึ้นเกลือจะซึมเข้าไปในไข่ได้มากขึ้น ปริมาณเกลือจึงสูงขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการกำหนดระยะเวลาในการพอกไข่ เพื่อนำไปประกอบอาหารเป็นไข่เค็มเจียว ไข่เค็มดาว และไข่เค็มต้มได้

2.1.4 คลื่นอัลตราโซนิกและสมบัติทางกายภาพ

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกลชนิดหนึ่งที่ใช้ตัวกลางในการส่งผ่านพลังงาน เช่นเดียวกับคลื่นเสียง แต่มีความถี่สูงกว่าคลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยิน คือ มีความถี่มากกว่า 20,000 เฮิรตซ์ เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีสมบัติทางกายภาพต่างกันจะพบว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานอัลตราโซนิกของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

สมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่สำคัญและสามารถหาได้จากเทคนิคอัลตราโซนิก ได้แก่ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ บัลค์มอดุลัส และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงาน เป็นต้น โดยสมบัติดังที่กล่าวมานี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดัน และความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก

คลื่นอัลตราโซนิกโดยทั่วไปสร้างมาจากอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล ทำให้เกิดการสั่นกลับไปมาจนก่อให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิก หรือในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้กลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องมือนี้เรียกว่าอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ ทรานส์ดิวเซอร์มีหลายชนิด เช่น เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งสามารถแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล โดยมีความถี่ของการสั่นพ้องอยู่ค่าหนึ่ง อัลตราโซนิกจะเกิดขึ้นเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปที่แผ่นอิเล็กโทรด ที่ผิวหน้าของผลึกโมเลกุลจะยืดหรือหดขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

ทรานส์ดิวเซอร์และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ทรานส์ดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่สั่นสะเทือนทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิก แล้วคลื่นจะส่งผ่านพลังงานไปในตัวกลาง และมีทรานส์ดิวเซอร์อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่รับคลื่นอัลตราโซนิก หรือ ทรานส์ดิวเซอร์อาจทำหน้าที่ทั้งส่งและรับคลื่นอัลตราโซนิกในเครื่องเดียวกัน

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ทางด้านอัลตราโซนิกจะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า กระบวนการแปลงพลังงานนี้เรียกว่า ทรานส์ดักชัน (Transduction)

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในด้านอัลตราโซนิกมีสมบัติ คือจะมีปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก สารเซรามิกเป็นสารที่มีคุณสมบัตินี้จึงสามารถนำมาใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์ และที่ใช้กันแพร่หลาย คือ ควอตซ์ แบเรียม ตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต สารเหล่านี้เมื่อนำมาใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์ จะมีสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า มีค่าความจุในหน่วยไมโครฟารัด โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์คล้ายกับตัวเก็บประจุ คือมีอิเล็กโทรดที่อยู่สองข้างถูกแยกโดยช่องที่มีสารเซรามิกอยู่ เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ทำมาจากวัสดุที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกซึ่งปรากฏการณ์นี้พบและศึกษาครั้งแรก โดยปีแอร์ คิวรี (Pierre Curie) ใน ค.ศ. 1880 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติในผลึกของสารบางชนิดที่เป็นอสมมาตร เช่น ผลึกควอตซ์ เกลือโรเชลล์ แร่ทัวร์มาลีน

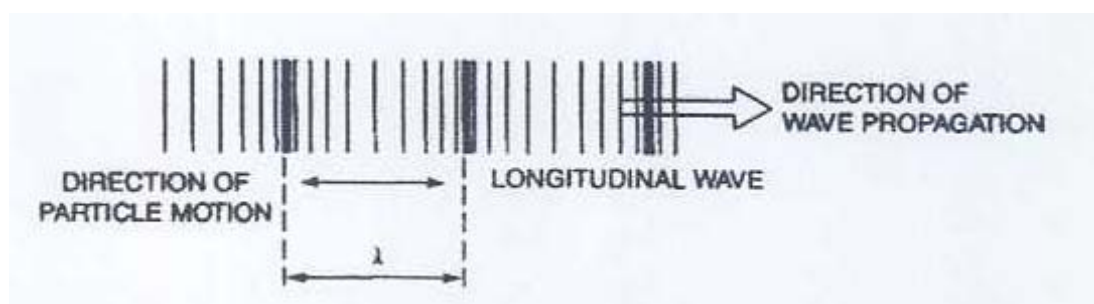
ลิเทียมซัลเฟต แคดเมียมซัลไฟด์ และซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น เมื่อให้ความเค้นเชิงกลกระทำแก่ผลึกที่เป็นอสมมาตรจะมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนผิว ถ้าความเค้นเชิงกลเป็นความเค้นอัดประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวของผลึก ด้านหนึ่งจะเป็นบวก อีกด้านหนึ่งจะเป็นลบ ถ้าความเค้นเชิงกลถูกแปลงเป็นการสั่นเชิงไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าเพียโซอิเล็กทริกโดยตรง ถ้าเป็นกระบวนการผกผัน การสั่นเชิงไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นการสั่นเชิงกลจะเรียกว่า เพียโซอิเล็กทริกผกผัน

เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปกับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ ที่สัมผัสตัวกลางชนิดต่างๆ เช่น น้ำ เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์จะเกิดการสั่นสะท้อนเป็นคลื่นอัลตราโซนิกที่มีการอัดและการขยายสลับกันแผ่กระจายในตัวกลาง กล่าวคือ ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในทรานส์ดิวเซอร์ทำให้ทรานส์ดิวเซอร์เพียโซอิเล็กทริกขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณพื้นผิวหน้าของทรานส์ดิวเซอร์ไปกดของเหลวที่อยู่ติดกัน ทำให้ความดันและความหนาแน่นของตัวกลางเพิ่มขึ้น การชนกันของโมเลกุลในบริเวณนั้นจะส่งผ่านไปยังโมเลกุลที่ข้างเคียง ขณะที่บริเวณเดิมกลับมาอยู่ในสภาพเดิม การส่งผ่านจะส่งต่อไปเรื่อยๆ ตัวกลางที่มีสภาพอัดได้ต่ำ เช่น เหล็ก การกดผ่านจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่ง รวดเร็วมาก จึงมีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกสูง ประมาณ 6,000 เมตรต่อวินาที แต่ตัวกลางที่มีสภาพอัดได้สูง ความเร็วอัลตราโซนิกจะมีค่าต่ำ เช่น น้ำ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ประมาณ 1,540 เมตรต่อวินาที

ความถี่ของคลื่นที่ทรานส์ดิวเซอร์สร้างจะขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลและลักษณะรูปร่างของทรานส์ดิวเซอร์ ตัวอย่างเช่น เซรามิกแท่งเหลี่ยมแบนจะมีความถี่ของการสั่นพ้องได้ 3 อย่าง คือ การยืดและหดตามความหนา ตามความยาวและตามความกว้างแต่ถ้าเป็นแผ่นกลมจะสามารถยืดและหดได้ตามความหนาและรัศมี แต่อย่างไรก็ตามเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในทรานส์ดิวเซอร์จะยืดและหดในแนวไหนก็ได้ซึ่งขึ้นกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้

ความเร็วของคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

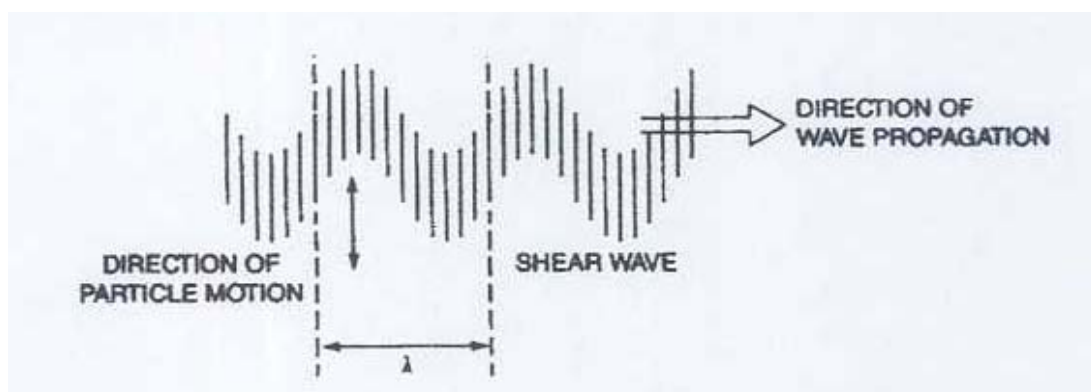
จากลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลาง โดยพิจารณาแบบจำลองการยืดเหี่ยวกันของอนุภาคตัวกลาง จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นตัวกลางที่มีสถานะเป็นก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง พบว่าทิศทางการสั่นของอนุภาคจะอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการแพร่ของคลื่น เรียกคลื่นชนิดนี้ว่าคลื่นตามยาว แสดงได้ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ลักษณะของคลื่นตามยาว

ซึ่งจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่ไปกลับผ่านจุดสมดุลของอนุภาคต่อวินาที ก็คือขนาดของความถี่ของคลื่นเสียง (f) และ ขนาดของความยาวคลื่น (λ) ก็คือระยะห่างระหว่างระนาบของการส่งพลังงาน โดยค่าความเร็วของคลื่นเสียง (c) ที่เคลื่อนที่ในตัวกลางจะเป็นผลคูณระหว่างค่าความถี่และความยาวคลื่น ($c = f\lambda$)

ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง นอกจากคลื่นตามยาวแล้ว ยังมีคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้ คือ คลื่นตามขวาง คลื่นชนิดนี้จะมีแนวการสั่นของอนุภาคอยู่ในแนวตามขวาง ตั้งฉากกับทิศทางการแพร่ของคลื่น มีลักษณะแสดงดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 ลักษณะของคลื่นตามขวาง

ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวาง พลังงานที่ใช้ถ่ายทอดไปยังอนุภาคข้างเคียงจะมีค่าต่ำกว่าคลื่นตามยาว ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามขวางจึงต่ำกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว สำหรับในตัวกลางชนิดเดียวกันความเร็วคลื่นตามขวาง จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของคลื่นตามยาว

ความเร็วเสียงของคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างชนิดกันย่อมมีความเร็วเสียงที่เคลื่อนที่ในแต่ละตัวกลางแตกต่างกันด้วย ซึ่งความเร็วของคลื่นเสียงในแต่ละตัวกลางไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติค่าความยืดหยุ่น และค่าความหนาแน่น (ρ) ของตัวกลางนั้น ดังสมการ

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ	β	คือ บัลค์มอดุลัสของตัวกลาง (N/m^2)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง (kg/m^3)
	c	คือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (m/s)

จากสมการ (4) β และ ρ เป็นปริมาณที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของของเหลว ซึ่งไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่แน่นอนได้ ดังนั้น จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นเสียงกับตัวแปรทั้งสองในรูปสมการที่แน่นอนได้เช่นกัน แต่สามารถหาความเร็วคลื่นของของเหลวได้โดยการทดลอง

เมื่อมีแรงกระทำในตัวกลางทำให้อนุภาคในตัวกลางมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความดันภายในของของเหลว นั้น ค่าอัตราส่วนระหว่างความดันในตัวกลางกับความเร็วของอนุภาคในตัวกลาง เรียกว่า **ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (Specific Impedance)** เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Z = \frac{P}{u} \quad \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อ	Z	คือ อิมพีแดนซ์ของเสียงหรือความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของเสียง ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
	P	คือ ความดัน (N/m^2)
	u	คือ ความเร็วของอนุภาค (m/s)

สำหรับคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ในของเหลว การกระจัดของอนุภาคเป็น

$$\xi = A \sin(kt - \omega t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

และมีความดันกับความเร็วของอนุภาคเป็น

$$P = -k\rho c^2 A \cos(kt - \omega t) \quad \dots\dots\dots(7)$$

และ
$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\omega A \cos(kt - \omega t) \quad \dots\dots\dots(8)$$

แทนค่าความดันและความเร็วอนุภาคในสมการ (5) จะได้ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะเป็น

$$Z = \pm \rho c \quad \dots\dots\dots(9)$$

เครื่องหมายบวกในสมการ (9) ขึ้นกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นว่าเคลื่อนที่ไปทางใด และผลคูณของ ρc เป็นค่าที่มีความสำคัญในการบอกถึงสมบัติของตัวกลางได้ดีกว่าค่า ρ หรือ c เพียงค่าใดค่าหนึ่ง และเรียกค่า ρc ว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของตัวกลาง ซึ่งจะแสดงถึงสมบัติต้านทานเสียง (acoustic impedance) แปรผันตรงกับค่าความเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุและความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง ดังนั้นเมื่อมีปัจจัยใดๆมากระทำต่อวัตถุตัวกลางแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนความหนาแน่น คลื่นเสียงในตัวกลางนั้นๆจะมีความเร็วเปลี่ยนไป โดยค่าอิมพีแดนซ์ของเสียงในแต่ละตัวกลางมีผลต่อการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงผ่านวัสดุตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง

สำหรับในตัวกลางที่มีสถานะเป็นของแข็งตัวแทนที่ใช้บอกถึงค่าสมบัติยืดหยุ่นของวัสดุ เรียกว่า ค่าคงที่ยืดหยุ่น หรือ ค่าคงที่สตีฟเฟิส ค่าคงที่นี้จะแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียด

แรงภายนอกที่มากระทำกับตัวกลางของแข็งที่มีรูปทรงแน่นอน โดยทั่วไปพอจะแบ่งได้เป็นสองชนิดด้วยกัน คือ

1. แรงที่กระทำกับอนุภาคของตัวกลางทั้งหมด ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกันกับขนาดปริมาตรของตัวกลางที่แรงมากระทำ เช่น แรงดึงดูดของโลก ซึ่งแรงชนิดนี้จะกระทำกับอนุภาคทุกๆ ตัวที่ประกอบกันขึ้นเป็นตัวกลาง
2. แรงที่กระทำที่ผิวของตัวกลางซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของตัวกลางที่แรงมากระทำ ความเค้นถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของแรงชนิดที่ 2 ซึ่งสามารถจำกัดความได้ว่า เป็นแรงที่กระทำ (F) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของตัวกลางของแข็ง (A) โดยความเค้นเป็นปริมาณที่มีหน่วยในระบบเอสไอเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

กรณีที่ตัวกลางที่มีค่าสมบัติยืดหยุ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างขนาดและปริมาตรเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ โดยทั่วไปแล้วพอจะแบ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงได้เป็น 3 แบบ คือ

1. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวตามยาวของตัวกลาง
2. การเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวตามขวางของตัวกลาง
3. การเปลี่ยนแปลงขนาดปริมาตรแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งมักจะเกิดกับตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ

โดยการเปลี่ยนแปลงในสองแบบแรกส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นในตัวกลางที่เป็นของแข็ง และการเปลี่ยนแปลงในแบบที่สามส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นในตัวกลางที่เป็นของเหลวและก๊าซ ความเครียดเป็นอัตราส่วนของความยาว จึงเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย

อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด เรียกว่า โมดูลัสของความยืดหยุ่น

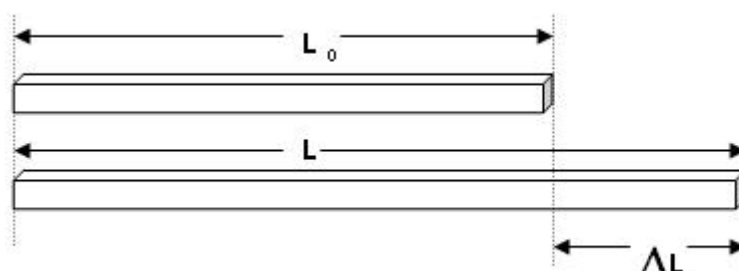
มอดูลัสของความยืดหยุ่น

มอดูลัสของความยืดหยุ่นมีหลายประเภท เช่น มอดูลัสของยัง (Young's Modulus) มอดูลัสเฉือน (Shear Modulus) และบัลค์มอดูลัส (Bulk Modulus)

มอดูลัสของยัง คือ มอดูลัสความยืดหยุ่นของการยืดหรือหด ให้นิยามคือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นตามยาวต่อความเครียดดึง เขียนในรูปสมการ คือ

$$Y = \frac{F \cdot L_0}{\Delta L \cdot A} \dots\dots\dots(10)$$

เมื่อ	Y	คือ มอดูลัสของยัง (N/m^2)
	F	คือ แรงที่กระทำกับวัตถุในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ (N)
	A	คือ พื้นที่ของวัตถุ (m^2)
	ΔL	คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป (m)
	L_0	คือ ความยาวเดิมของวัตถุ (m)



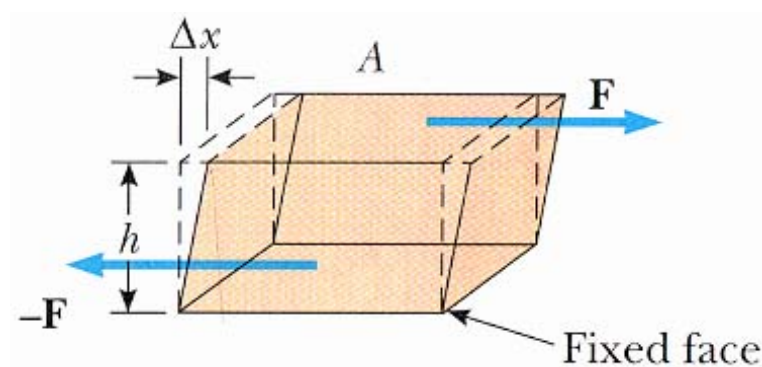
ภาพประกอบ 10 การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงดึง

ที่มา : Serway A.R. *Physics For Science and Engineering with Modern Physics*.
5th ed. Florida: Saunders College: 2000.

มอดุลัสเฉือน คือ มอดุลัสที่เกิดจากการผิดรูปของวัตถุที่อยู่ภายใต้ความเค้นเฉือน
 นิยาม ความเค้นเฉือน คือ แรงในแนวสัมผัสกับผิวของวัตถุต่อพื้นที่ที่แรงนั้นกระทำ เขียนในรูป
 สมการ คือ

$$G = \frac{F \cdot h}{\Delta x \cdot A} \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ	G	คือ มอดุลัสเฉือน (N/m^2)
	F	คือ แรงที่กระทำกับวัตถุในแนวนอนกับพื้นที่ (N)
	A	คือ พื้นที่ของวัตถุ (m^2)
	Δx	คือ ระยะที่วัตถุเอียงไปจากแนวเดิม (m)
	h	คือ ความสูงของวัตถุ (m)



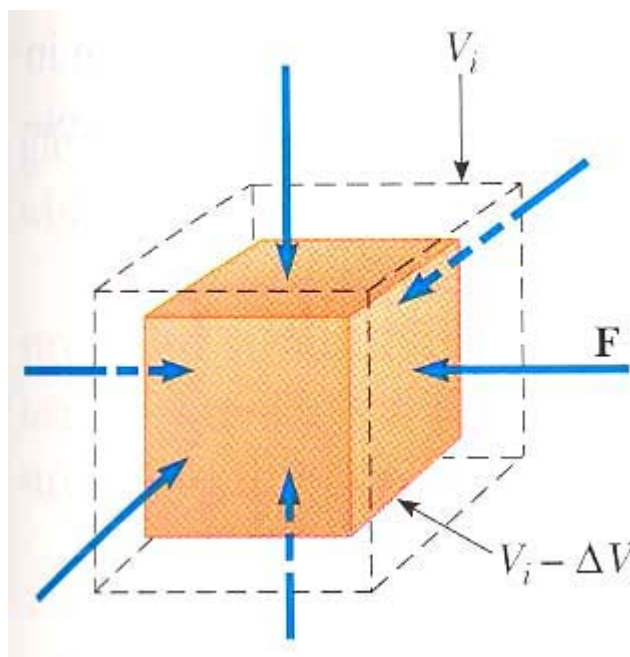
ภาพประกอบ 11 การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงเฉือน

ที่มา : Serway A.R. *Physics For Science and Engineering with Modern Physics*.
 5th ed. Florida: Saunders College. 2000.

ในกรณีที่วัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือก้อน แรงที่กระทำจากภายนอก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ให้นิยามของบัลค์มอดุลัส คืออัตราส่วนของความเค้นเชิงปริมาตรต่อความเครียดเชิงปริมาตร เขียนในรูปสมการ คือ

$$\beta = \frac{\Delta P}{-\Delta V/V} \dots\dots\dots(12)$$

เมื่อ	β	คือ บัลค์มอดุลัส (N/m^2)
	ΔP	คือ ความเค้นเชิงปริมาตรที่กระทำกับวัตถุ (N/m^2)
	ΔV	คือ ปริมาตรที่เปลี่ยนไป (m^3)
	V	คือ ปริมาตรเดิมของตัวกลางก่อนที่จะถูกบีบอัด (m^3)



ภาพประกอบ 12 วัตถุเปลี่ยนปริมาตรโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง เมื่อได้รับแรงดันจากภายนอก

ที่มา : Serway A.R. *Physics For Science and Engineering with Modern Physics*.
5th ed. Florida: Saunders College. 2000.

2.1.5 การเกิดเจล (Gelation)

การเกิดเจล คือ การจับกันอย่างเป็นระเบียบของโปรตีน ซึ่งอาจเสียหรือไม่เสียสภาพ เกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โครงสร้างที่เป็นระเบียบนี้เป็นสมดุลระหว่างปฏิสัมพันธ์ของโพลิเมอร์ – โพลิเมอร์ และโพลิเมอร์ – ตัวทำละลาย และแรงดูด – แรงแผลก ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจล ได้แก่ ความเข้มข้นของโปรตีน ค่าความเป็นกรด – ด่าง เกลือ น้ำตาล ไขมัน อุณหภูมิ และความดัน นอกจากนี้ ขนาด รูปร่าง และการจัดตัวของโปรตีน มีผลต่อพฤติกรรมการไหล คุณภาพทางประสาทสัมผัส ความสามารถในการอุ้มน้ำ และสมบัติของเจล

กลไกการเกิดเจลของโปรตีน โดยทั่วไปมี 2 ขั้นตอน คือ การเปลี่ยนคุณสมบัติของโปรตีน และกระบวนการรวมตัวของโปรตีน

การเปลี่ยนคุณสมบัติของโปรตีน (Denaturation process) โมเลกุลของโปรตีนยืดตัวออกโดยพันธะที่เคยมีอยู่ในธรรมชาติได้แตกตัวออกบางส่วน

การรวมตัวของโปรตีน (Aggregation process) โมเลกุลของโปรตีนที่คลายตัวเข้ามาจับตัวกันโดยมีพันธะใน 3 ทิศทาง อัตราการรวมตัวของโปรตีนเกิดขึ้นได้ช้าหากแรงดึงดูดระหว่างโปรตีนที่คลายตัวน้อย ทำให้ได้เจลที่มีความขุ่นน้อย มีความเป็นระเบียบมาก มีการหดตัวของเจลและบีบของเหลวออกมาน้อยกว่าเจลที่เกิดการรวมตัวเร็ว การใช้อุณหภูมิสูงทำให้โมเลกุลยืดออกได้มาก เมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลที่ยืดตัวออกจับตัวกันอย่างช้าๆ โดยใช้พันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก (ณรงค์ นิยมวิทย์. 2538)

การเกิดเจลหรือการตกตะกอนของโปรตีนไข่

โปรตีนในไข่ซึ่งเป็นโกลบูลาโปรตีน เช่น โอวาลบูมินในไข่ขาว ส่วนไข่แดง โปรตีนที่มีบทบาทสำคัญในการเกิดเจล คือ ไลโปโปรตีนความหนาแน่นต่ำ เมื่อได้รับความร้อนโปรตีนในไข่เกิดการคลายเกลียว เปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้ส่วนที่เป็นพันธะไฮโดรโฟบิกซึ่งอยู่ภายใน เปิดออกสู่ภายนอก (Weijers. 2003) ทำให้สูญเสียความสามารถในการละลายและความขุ่นหนืดไป มีการสร้างพันธะไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจน และพันธะไดซัลไฟด์ เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติอุ้มน้ำไว้ภายใน เกิดการเปลี่ยนจากของเหลวเป็นของแข็งหรือกึ่งแข็ง (เสาวภา ยั่ววุฑฒ. 2538)

การเกิดเจลของโปรตีนไข่แดง (ณฐมล จินดาพรรณ. 2549: 16 – 17)

เจลเกิดขึ้นจากการคลายตัวบางส่วนของโปรตีนและพัฒนาไปเป็นสายโพลีเปปไทด์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาที่จำเพาะ เพื่อสร้างโครงร่างตาข่ายสามมิติการเกิดเจลของโปรตีนโดยทั่วไปต้องทำให้โปรตีนคลายตัวบางส่วน โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างชั้นที่สองเพียงเล็กน้อย การคลายตัวบางส่วนของโปรตีนสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ความร้อน กรด ด่าง และยูเรีย ฯลฯ กระบวนการเกิดเจลขึ้นอยู่กับการสร้างโครงร่างตาข่ายสามมิติของโปรตีน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนกับโปรตีน และโปรตีนกับตัวทำละลายอันได้แก่ น้ำ ปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิด

เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโปรตีนสูงๆ เพราะการสัมผัสระหว่างโมเลกุลมีมาก การเกิดเจลของโปรตีนเป็นผลของปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลด้วยแรงทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก และพันธะไฮโดรโฟบิก แรงแวนเดอร์วาลส์ และ covalent disulfide bonds ทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติของเส้นใยโปรตีน พันธะข้ามเชื่อมเหล่านี้ เป็นปัจจัยที่พบว่า ทำให้โครงสร้างของเจลโปรตีนมีลักษณะที่แข็งแรง ยึดหยุ่นเป็นธรรมชาติ

การเกิดเจล เป็นสมบัติในการทำหน้าที่ของไข่แดงที่เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการไหล และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น เค้ก ครีม ลูกกวาด รวมทั้งการยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ไข่แดงเหลว และซอสที่มีส่วนผสมของไข่ที่มีการฆ่าเชื้อด้วยวิธีการพาสเจอร์ไรส์เซชันหรือสเตอริไรส์เซชัน เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ซึ่งจะทำให้โปรตีนในไข่แดงเสียสภาพบางส่วน และเกิดเจล ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์สูญเสียสมบัติการไหล แต่ทั้งนี้การเกิดเจลอาจมีความจำเป็นในผลิตภัณฑ์บางประเภท เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากไข่แดงไม่ใช่สารละลายโปรตีนบริสุทธิ์ แต่มีอนุภาคกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ LDL micelles และ HDL granules ในขณะที่ neutral triglycerides ถูกซ่อนไว้ภายในอนุภาคเหล่านั้น ทำให้โปรตีนปกคลุมผิวของอนุภาค ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

การเกิดเจลของไข่แดง คือ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคโมเลกุลโปรตีนที่คงตัว (LDL micelles และ HDL granules) ด้วยความร้อนซึ่งการที่โมเลกุลโปรตีนที่มีความเสถียรที่ผิวหน้า เกิดการเสียสภาพบางส่วน จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคโปรตีน เนื่องจากแรงดึงดูดทางกายภาพจนกระทั่งได้โครงร่างตาข่ายระหว่างอนุภาคโปรตีนที่แข็งแรงและยึดหยุ่น นอกจากนี้พบว่า ความหนืดปรากฏของไข่แดงเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 68 องศาเซลเซียส จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในระหว่าง 4 นาที แรกและจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่าง 4 ถึง 8 นาที ก่อนที่จะเริ่มลดลงอีกครั้ง แสดงว่าในช่วงแรกของการให้ความร้อน เป็นเวลาสำหรับทำให้ apoprotein (LDLs) ที่เป็นองค์ประกอบของพลาสมาในไข่แดงสูญเสียเสถียรภาพเดิม และเกิดการคลายตัวก่อนที่มันจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันโดยพันธะไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์ เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ความเข้มข้นวิกฤตของโปรตีน ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอีก (มากกว่า 7 นาที) สารแขวนลอยของไข่แดงจะเกิดเจล ซึ่งมีลักษณะข้นมากเกินกว่าจะกระจายในสารละลายเหลวได้อีก จึงเกิดการตกตะกอนขึ้นงานวิจัยบางฉบับแสดงให้เห็นว่า การให้ความร้อนในระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย อาจทำให้โครงสร้างโมเลกุลของอนุภาคสูญเสียเสถียรภาพ ดังนั้นเมื่อละลายไข่แดงในน้ำจะมี physical force เกิดขึ้นเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลโปรตีนและจะเกิด weak gel structure ขึ้นทันทีที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากพันธะไฮโดรโฟบิกและพันธะไฮโดรเจน ลักษณะเช่นนี้คล้ายกับโปรตีนไข่แดงเข้มข้นที่ได้จากการสกัดไขมัน และเมื่อระบบได้รับความร้อนจะพัฒนาเป็นโครงสร้างของเจลที่แท้จริงขึ้นจากการเกิด covalent disulfide bonds ในระหว่างการเสียสภาพบางส่วนขณะได้รับความร้อน อีกทั้งเรพบว่าการเก็บรักษาไข่แดงโดยการแช่แข็ง และตามด้วยการละลายน้ำแข็งเป็นสาเหตุทำให้ไข่แดงเกิดเจล คาดว่าเป็นเพราะ lowdensity lipoprotein (LDL) มีความหนืดเพิ่มขึ้นและการละลายลดลง

ผลของ pH และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเจลไข่ขาว

เสาวคนธ์ วงศาสุลักษณ์ และคณะ (2548) ได้ศึกษาผลของ pH และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเจลไข่ขาว โดยเตรียมสารละลายไข่ขาวจากไข่ขาวผงให้มีโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรในน้ำกลั่น และเติมโซเดียมคลอไรด์ 25 mM นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างน้ำร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ปลอยทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ปรับค่า pH ให้เท่ากับที่กำหนดไว้ ได้แก่ 8 9 10 และ 11 และเติมโซเดียมคลอไรด์จนมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สุดท้ายเป็น 50 100 150 และ 200 mM เทสารละลายลงในหลอดอคริลิกซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 มิลลิเมตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทำให้เย็นและนำไปวัดคุณสมบัติเชิงกลและรายงานเป็นค่า Young's modulus, Stress at 40% deformation, Hardness I, Hardness II, % Elasticity และ % Cohesiveness โดยใช้เครื่อง Instron Universal Testing Machine (Model 4301, Instron, England) พบว่าการปรับเปลี่ยน pH และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์จะทำให้ได้เจลที่มีคุณลักษณะความแข็งแรงและความยืดหยุ่นแตกต่างกัน เจลที่เตรียมที่ pH และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ต่ำจะมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นต่ำกว่าเจลที่ pH และความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูง

จงและเจง (Jong; & Jeong. 1998: 686 – 690) ได้ศึกษาการเกิดเจลของไข่ขาวด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก โดยทำการตรวจวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่ขาวและโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของไข่ขาว คือ โอวัลบูมิน คอนอัลบูมิน และ โอโวมิวคอยล์ ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 10 – 80 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ พบว่า กระบวนการเกิดเจลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยการเกิดเจลของไข่ขาว โอวัลบูมิน และ คอนอัลบูมิน อยู่ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ไม่พบการเกิดเจล ของโอโวมิวคอยล์ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาจากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้พบว่า เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถใช้ตรวจสอบกระบวนการเกิดเจล และสามารถประยุกต์ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในไข่ขาวได้

ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเจลของไข่

การเกิดเจลของโปรตีนในไข่สามารถเกิดขึ้นได้ในสภาวะต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิ กลิ่น น้ำตาล กรด เบส และแรงทางกล เช่น การคน การกวน เป็นต้น (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538; นิธิยา รัตนพานนท์. 2545)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลของโปรตีนมากที่สุด เนื่องจากกระบวนการเกิดเจลเป็นกระบวนการดูดความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพียง 1 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดเจลเพิ่มขึ้น 191 เท่า ไข่ขาวและไข่แดงเริ่มเกิดเจลที่อุณหภูมิ 62 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเกิดเจลอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 65 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนเกลือและค่า pH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของโปรตีน

ตาราง 7 อุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของไข่

อุณหภูมิ (°C)	การเปลี่ยนแปลงของไข่
57	ไข่ขาวบางส่วนเริ่มแข็งตัว พอสังเกตได้แต่ต้องใช้เวลานาน
58	ไข่ขาวเริ่มเปลี่ยนสีจากสีขาวใสเป็นสีขาวขุ่น
60 ขึ้นไป	ไข่ขาวเริ่มแข็งตัว สังเกตเห็นได้ชัดเจน
60.3	จุดแข็งตัวของไข่ขาวใสชั้นใน
61	จุดแข็งตัวของไข่ขาวชั้นชั้นกลาง
61.5	จุดแข็งตัวของไข่ขาวในชั้นนอก
62	ไข่ขาวเริ่มแข็งตัว
65	ไข่ขาวแข็งตัวและหยุดไหล ไข่แดงเริ่มแข็งตัว
70	ไข่ขาวเป็นก้อนค่อนข้างแน่น แต่ยังอ่อนนุ่มคล้ายเยลลี่
	ไข่แดงแข็งตัวและหยุดไหล มีความหนืดเพิ่มขึ้น
70 ขึ้นไป	ไข่ขาวเป็นก้อนแข็งตัว ไข่แดงสุกหดตัวและเหนียว

2.1.6 การแพร่และกฎการแพร่ของฟิค

การแพร่ (Diffusion) เป็นปรากฏการณ์การพามวลสารเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแบบไม่จำกัดทิศทาง (random) จากบริเวณที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณมวลสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นหรือปริมาณมวลต่ำ

กฎการแพร่ของฟิค

ปกติอัตราเร็วในการแพร่ของสารที่เคลื่อนที่ไปที่จุดใดในทิศทางใด ก็จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความเข้มข้นที่จุดนั้นกับจุดเดิมในทิศทางนั้นๆ และ อัตราเร็วของการแพร่ (diffusion rate) จะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารกับระยะทางที่แพร่ (concentration gradient) ดังสมการต่อไปนี้

$$J_{Ax} = -D_A \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad \text{----- (13)}$$

เมื่อ J_{Ax} = molar flux ของสาร A ในทิศทาง x ($\text{mol} / \text{cm}^2 \text{ s}$)
 C_A = molar concentration ของสาร A (mol / cm^3)
 D_A = diffusion coefficient หรือ diffusivity ของสาร A (cm^2 / s)

สมการ (13) นี้เรียกว่า Fick's first law of diffusion ซึ่งกำหนดให้ สาร A แพร่ในทิศทางที่ความเข้มข้นของสาร A ลดลง

ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่

1. อุณหภูมิ ในขณะที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของสารมีพลังงานจลน์มากขึ้น ทำให้โมเลกุลเหล่านี้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำ การแพร่จึงเกิดขึ้นได้เร็ว
2. ความแตกต่างของความเข้มข้น ถ้าหากมีความเข้มข้นของสาร 2 บริเวณแตกต่างกันมาก จะทำให้การแพร่เกิดขึ้นได้เร็วขึ้นด้วย
3. ขนาดของโมเลกุลสาร สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะเกิดการแพร่ได้เร็วกว่าสารโมเลกุลใหญ่
4. ความเข้มข้นและชนิดของสารตัวกลาง สารตัวกลางที่มีความเข้มข้นมากจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวกลางมาก ทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ไปได้ยาก แต่ถ้าหากสารตัวกลางมีความเข้มข้นน้อย โมเลกุลของสารก็จะเคลื่อนที่ได้ดีทำให้การแพร่เกิดขึ้นเร็วด้วย

5. ความดัน การเพิ่มความดันช่วยให้โมเลกุลหรืออออนของสารเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น
6. สิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารจะเป็นอุปสรรคขัดขวางทำให้การแพร่เกิดได้ช้าลง
7. การดูดติดของสารอื่น ถ้าโมเลกุลหรืออออนของสารที่แพร่ถูกดูดติดด้วยองค์ประกอบของสารต่างๆ จะทำให้ความสามารถในการแพร่ลดลง

2.1.7 ไข่เค็ม

ไข่เค็มเป็นผลิตภัณฑ์จากไข่อีกชนิดหนึ่งที่รู้จักกันมาตั้งแต่สมัยโบราณ ไข่เค็มเป็นผลิตภัณฑ์พื้นเมืองของประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่ได้จากการบวนการถนอมอาหารโดยใช้เกลือเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาไข่ไว้ได้นานขึ้น

กระบวนการผลิตไข่เค็ม โดยทั่วไปสามารถผลิตได้ 2 วิธี ดังนี้ (เข็มทอง นิมจินดา. 2538; วรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ. 2543; Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999)

การแช่ในน้ำเกลือ เป็นการแช่ไข่ทั้งฟองลงในสารละลายเกลือเข้มข้น 18 – 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 – 4 สัปดาห์ ไข่เค็มที่ได้สามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นาน 12 – 14 สัปดาห์

การพอกดิน เป็นการพอกไข่ด้วยส่วนผสมของดินเหนียว ขี้เถ้าแกลบ และเกลือ เป็นเวลา 4 – 6 สัปดาห์ ในประเทศไทย ไข่เค็มไชยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี และไข่เค็มลพบุรี จังหวัดลพบุรี เป็นไข่เค็มที่มีชื่อเสียง ซึ่งทำการผลิตไข่เค็มโดยใช้วิธีนี้เช่นกัน โดยใช้ดินจอมปลวกผสมเกลือ และดินสอพองผสมเกลือ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่หาได้ตามท้องถิ่นในการผลิตไข่เค็ม ตามลำดับ (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538) ศึกษาการพัฒนาดินสำเร็จรูปในการผลิตไข่เค็ม พบว่าดินที่ใช้ในการพอกไข่เค็มควรเป็นดินเนื้อละเอียด คลุกเคล้าเข้ากับเกลือได้ดี มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูง เพื่อให้เกลือซึมเข้าไข่ได้ดีตลอดระยะเวลาการพอก

การเปลี่ยนแปลงของไข่เค็ม ในระหว่างการผลิตไข่เค็มตามวิธีปกติ ไข่เกิดการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. ความชื้น ในระหว่างการดองเกลือ ไข่เค็มมีปริมาณความชื้นลดลง (Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999) การลดลงของปริมาณความชื้นเป็นผลจากความแตกต่างของความดันออสโมติก ระหว่างไข่แดงกับไข่ขาว ทำให้ความชื้นจากไข่แดงแพร่ออกสู่ไข่ขาวแล้วจึงแพร่ผ่านเปลือกไข่ออกสู่ด้านนอก จากความแตกต่างของขนาดรู และโครงสร้างของเปลือกไข่เปิดกับไข่ไก่ จึงทำให้ไข่เปิดมีความชื้นลดลงเร็วกว่าไข่ไก่ (Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999) พบว่าหากดองไข่เค็มเป็นเวลานานเกินกว่าเวลาที่เหมาะสม ไข่แดงมีความชื้นกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ขณะที่ไข่ขาวยังคงมีความชื้นลดลง ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่เยื่อหุ้มไข่แดงเกิดการอ่อนตัว ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ เนื่องจากไข่ขาวมีปริมาณเกลือสูงมากทำให้ความชื้นจากไข่ขาวแพร่เข้ามาในไข่แดงได้

2. ปริมาณเกล็ด ไข่เค็มมีปริมาณเกล็ดเพิ่มตลอดระยะเวลาการดอง ไข่ขาวมีปริมาณเกล็ดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการดองและมีปริมาณเกล็ดมากกว่าไข่แดง เนื่องจากไข่ขาวอยู่ใกล้กับสารละลายเกล็ดมากกว่าไข่แดง อีกทั้งไข่ขาวมีความชื้นสูงจึงเป็นตัวกลางให้สารละลายได้เป็นอย่างดี หลังจากนั้นเกล็ดในไข่ขาวเริ่มมีปริมาณคงที่ เนื่องจากเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลขณะที่ปริมาณเกล็ดในไข่แดงยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากยังคงมีความแตกต่างของความเข้มข้นเกล็ดในไข่ขาวกับไข่แดง (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538; Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999)

3. น้ำหนัก ไข่เค็มมีน้ำหนักลดลงตลอดระยะเวลาการดอง (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538) พบว่าไข่เค็มมีน้ำหนักคงที่เมื่อเกล็ดในไข่เข้าสู่จุดสมดุลแล้ว การลดลงของน้ำหนักไข่เค็มเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณเกล็ด และการลดลงของความชื้นในไข่ (Lai; et al. 1999)

4. การเป็นมันเยิ้ม ไข่แดงเค็มเกิดการเป็นมันเยิ้มเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการดอง ปริมาณการเป็นมันเยิ้มของไข่แดงสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นในไข่แดง ไข่แดงมีโอกาสเกิดการเป็นมันเยิ้มได้มากเมื่อมีความชื้นต่ำ โดยเป็นผลเนื่องจากไขมันในไข่แดงซึ่งส่วนใหญ่เป็นไลโคโปรตีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density lipoprotein) เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999) ไลและคณะ (Lai; et al. 1999) พบว่า เมื่อดองไข่เค็มเป็นเวลานาน การเป็นมันเยิ้มของไข่แดงมีปริมาณลดลง อาจเนื่องจากการอ่อนตัวของเยื่อหุ้มไข่แดง

5. สี การเปลี่ยนแปลงสีของไข่ขาว พบว่าไข่ขาวมีสีขาวเพิ่มขึ้น (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538) และทึบแสงมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากเกล็ดที่เข้าไปในไข่ขาว ส่วนไข่แดงพบว่าไข่แดงเค็มมีสีแดงเข้มขึ้น โดยทั่วไปไข่แดงเค็มมีสีแดงเข้มกว่าไข่แดงปกติ ซึ่งอาจเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของเม็ดสี เนื่องจากการลดลงของความชื้นในไข่แดง (Chi; & Tseng. 1998) และการเพิ่มขึ้นของไขมันอิสระ (Lai; et al. 1999)

6. เนื้อสัมผัส ไข่ขาวมีเนื้อสัมผัสนุ่มขึ้น (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538) ขณะที่ไข่แดงมีความแข็งเพิ่มขึ้น มีเนื้อสัมผัสหยาบขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากการลดลงของความชื้นในไข่แดง (Chi; & Tseng. 1998)

ลักษณะและคุณภาพของไข่เค็ม

ลักษณะภายใน และภายนอกของไข่เค็มมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคโดยลักษณะที่ผู้บริโภคยอมรับขึ้นอยู่กับวัฒนธรรมการบริโภคไข่เค็มในแต่ละพื้นที่ ลักษณะภายนอกและลักษณะภายในของไข่เค็มที่ดี ควรมีลักษณะดังนี้

ลักษณะภายนอก ไข่เค็มจะมีลักษณะภายนอกเหมือนไข่สด คือเปลือกไข่มีสีขาวขุ่น ไม่มีรอยแตกร้าว เห็นเป็นเงากลมสีดำบนเปลือกไข่ ซึ่งเป็นส่วนของไข่แดง แต่ถ้าเป็นไข่เค็มที่ต้มในน้ำที่ใส่สารส้มเล็กน้อย บนเปลือกไข่จะสากและมีผงคล้ายแป้งมีสีขาวนวลเคลือบอยู่ ลักษณะภายนอกของไข่เค็มที่ดี เปลือกต้องไม่มีการเน่าเสียหรือแตกร้าว

ลักษณะภายใน เมื่อเป็นไข่ดิบ ไข่ขาวจะเหลวและมีสีขาวขุ่น ส่วนไข่แดงจะเป็นก้อนกลมแข็ง มีสีแดง และมีกลิ่นเค็มของเกลือ เนื่องจากเกลือที่ซึมเข้าไป ไปดึงน้ำออกจากโปรตีนไข่ขาว ทำให้โปรตีนไข่ขาวเกิดการเสียสภาพเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ไข่ขาวจึงมีความหนืดลดลง (เสาวภา ยุกวุฒิกุล. 2538) ส่วนไข่แดงมีลักษณะเป็นก้อนกลมแข็ง มีความหนืดสูง มีสีส้มแดงเข้ม เมื่อผ่านการให้ความร้อน ไข่ขาวมีสีทึบ มีเนื้อนุ่ม ในขณะที่ส่วนไข่แดง มีเนื้อสัมผัสที่คงตัวและมีเนื้อหยาบ มีส่วนของน้ำมันเยิ้มออกมา ไข่เค็มที่ดีนั้น ไข่ขาวจะมีเนื้อละเอียด มีรสเค็มปานกลาง ส่วนไข่แดงมีสีส้มแดงเข้ม เป็นน้ำมันเยิ้ม และมีรสเค็มเล็กน้อย เปรียบเทียบลักษณะของไข่ไก่และไข่เป็ดเค็ม พบว่าไข่เค็มจากไข่เป็ดจะให้ลักษณะตามที่ต้องการมากที่สุด คือ มีสีส้ม เป็นมันเยิ้ม และมีเนื้อสัมผัสหยาบ (Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999) ในขณะที่ไข่ไก่เค็มมีสีส้มอ่อนกว่า และไม่เกิดลักษณะการเป็นมันเยิ้มเหมือนในไข่เป็ด อีกทั้งมีแนวโน้มในการเกิดวงซัลไฟด์สีดำนากกว่า จึงเป็นเหตุผลให้ไข่เป็ดเค็มได้รับความนิยมมากกว่าไข่ไก่เค็ม (ชมภู ยิ้มโต. 2543)

2. 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่

พากเนลลีและคณะ (Paganelli; et al. 1974: 319 – 325) ได้ศึกษาโครงสร้างของไข่เป็ดพบว่า น้ำหนักของไข่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวและความหนาแน่นของไข่ดั่งสมการ (14) และ (16) ปริมาตรของไข่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของไข่ดั่งสมการ (15) และพบว่าน้ำหนักของไข่มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของเปลือกไข่ ปริมาตรของเปลือกไข่ และความหนาแน่นของเปลือกไข่ ดั่งสมการ (17) – (19)

$$A = 4.835W^{0.662} \dots\dots\dots(14)$$

$$A = 4.951V^{0.666} \dots\dots\dots(15)$$

$$\rho = 1.038W^{0.006} \dots\dots\dots(16)$$

$$W_{sh} = 4.82 \times 10^{-2} W^{1.132} \dots\dots\dots(17)$$

$$V_{sh} = 2.48 \times 10^{-2} W^{1.118} \dots\dots\dots(18)$$

$$\rho_{sh} = 1.945W^{0.014} \dots\dots\dots(19)$$

เมื่อ	W	คือ น้ำหนักของไข่ (g)
	A	คือ พื้นที่ผิวของไข่ (cm ²)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของไข่ (g/cm ³)
	V	คือ ปริมาตรของไข่ (cm ³)
	W_{sh}	คือ น้ำหนักของเปลือกไข่ (g)
	V_{sh}	คือ ปริมาตรของเปลือกไข่ (cm ³)
	ρ_{sh}	คือ ความหนาแน่นของเปลือกไข่ (g/cm ³)

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างของไข่เค็ม ธรรมรัตน์ แก้วมณี (2009) พบว่า โครงสร้างของไข่เปิดประกอบด้วยเปลือกไข่ร้อยละ 10.87 ไข่ขาวร้อยละ 54.73 และไข่แดงร้อยละ 33.94 และจากการนำไข่เปิดมาดองเค็มในน้ำเกลือ 14 วัน พบว่าปริมาณของเกลือที่ผ่านเข้าไปในไข่ แปรตามสัดส่วนของไข่ขาว และลดลงตามสัดส่วนของไข่แดง ความชื้นของไข่ขาว และไข่แดงลดลงตามปริมาณของน้ำเกลือที่แทรกซึมผ่านเข้าไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้น องค์ประกอบที่เป็นโปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆทั้งชั้นในและชั้นนอกของไข่แดง ด้านนอกของไข่แดงบางส่วนพบไขมันไตรกลีเซอไรด์และฟอสโฟลิปิดโดยไขมันสองตัวนี้จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยระหว่างทำการดองเค็มแต่่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในไข่แดง ความแข็งตัวของไข่แดงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ดองในน้ำเกลือ การเกิดเจลเพิ่มขึ้นในขณะที่มันรวมตัวกัน แต่ในขณะที่มันคลายตัวออกจากกัน การเกิดเจลค่อยๆลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของน้ำเกลือ และจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่ากรานูลของไข่แดงเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม มีโปรตีนและไขมัน กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในไข่แดงของไข่เค็ม จากการปรับโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ชี้ให้เห็นว่า มีการสูญเสียน้ำและการเปลี่ยนแปลงของไขมันทั่วทั้งไข่แดงในระหว่างที่ดองเค็ม

อิทธิพลของสภาวะในการดองเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของไข่ วรพินิต ลิ้มปภาส (2547) ได้ศึกษาการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตไข่แดงเค็ม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถผลิตไข่แดงเค็มที่มีลักษณะตามที่ผู้บริโภคยอมรับได้ในระยะเวลาที่สั้นที่สุด และเสนอแบบจำลองสมมติฐานการเปลี่ยนแปลงการเกิดไข่แดงเค็มจากการดองเฉพาะส่วนไข่แดง โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเกลือ อุณหภูมิ และความดันต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือ เนื้อสัมผัส และปริมาณความชื้นของไข่แดงเค็ม และใช้ไข่แดงเค็มที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปเป็นมาตรฐานในการยอมรับ ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่แดงเค็มโดยวิธีดองเฉพาะส่วนไข่แดง คือ การดองที่ความดันบรรยากาศในน้ำเกลือความเข้มข้น 35 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยไข่แดงเค็มที่ได้มีคุณภาพและลักษณะใกล้เคียงกับไข่แดงเค็มที่ขายตามตลาดทั่วไปมากที่สุด

การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

ประภาษ มุลนา (2547: 74 – 75) ได้วัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และค่าความหนาแน่นของคอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ที่มีปริมาณไขมัน และปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 60 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่า ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด มีค่าลดลง เมื่อปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณานมพาสเจอร์ไรส์แต่ละชนิด ค่าบัลค์มอดุลัสมีค่าแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบค่าบัลค์มอดุลัสที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่า มีค่าแปรผันกับปริมาณไขมัน และมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณแคลเซียม

จงและเจง (Jong; & Jeong. 1998: 686 – 690) ได้ศึกษาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับการเกิดเจลของไข่ขาว โดยทำการตรวจวัดความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่ขาว และโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของไข่ขาว คือ โอวัลบูมิน คอนอัลบูมิน และโอโวมิวคอยล์ ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิรตซ์ ในช่วงอุณหภูมิ 10 – 80 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิคพัลส์สะท้อนกลับ พบว่า กระบวนการเกิดเจลขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ โดยการเกิดเจลของไข่ขาว โอวัลบูมิน และคอนอัลบูมิน อยู่ที่อุณหภูมิ 60 70 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แต่ไม่พบการเกิดเจลของโอโวมิวคอยล์ ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา จากการศึกษาในครั้งนี้ทำให้พบว่า เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถใช้ตรวจสอบกระบวนการเกิดเจล และสามารถประยุกต์ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในไข่ขาวได้

ดิกคินสันและแม็คคลีแมน (Dickinson; & McClements. 1995: 191–192) ทำการทดลองหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในสารตัวอย่างที่เป็นคอลลอยด์ชนิดอิมัลชัน (ของเหลวละลายในของเหลว) คือ น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ พบว่า ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกจะมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำมันดอกทานตะวันเพิ่มขึ้น และมีลักษณะเชิงเส้น

โพวี (Povey. 1996) ได้ใช้เทคนิคอัลตราโซนิกตรวจจับโปรตีนในไข่ขาวเพื่อทำนายอายุของไข่ขาว เขาพบว่าอายุของโปรตีนเป็นตัวบ่งบอกอายุของไข่ขาว การลดกลไกการสูญเสียในไข่ทำได้โดยการเก็บไข่ไว้ที่อุณหภูมิต่ำๆ และในไข่สดจะพบว่าไข่ขาวจะหนา และหุ้มเกาะติดอยู่กับไข่แดง ถ้าไข่หมดอายุไข่ขาวจะไม่เกาะติดกับไข่แดง แม้ไข่ที่อายุมากๆ จะผลิตไข่ที่มีความหนาของไข่ขาวน้อย แต่จะได้ไข่ที่มีขนาดฟองใหญ่

สมบัติทางความร้อนและการนำไฟฟ้าของน้ำเกลือ

ศุภชัย ชุ่มใจ (2551) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารละลายเกลือสินเธาว์ที่ระดับความเค็มต่างๆ จากจังหวัดน่าน พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นขึ้นกับอุณหภูมิห้อง และสภาพแวดล้อม ซึ่งที่จุดเดือดของน้ำกลั่นเป็นไปตามกฎข้อที่ศูนย์ อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายเกลือมีความแปรปรวนสูง จุดเดือดของสารละลายเกลือเพิ่มขึ้นกับระดับความเค็มตามสมบัติคอลลิเกทีฟของสารละลาย และเนื่องจากความดันบรรยากาศที่แตกต่างกันมีผลต่อจุดเดือดของสารละลายเกลือ จุดเดือดที่ระดับน้ำทะเลสูงกว่าจุดเดือดที่ 760 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลทุกระดับความเค็ม การนำไฟฟ้าของสารละลายเกลือขึ้นอยู่กับระดับความเค็ม หรือปริมาณไอออนในสารละลายเกลือ ที่ระดับความเค็มน้อยมีค่าความต้านทานสูง กระแสไหลผ่านได้น้อย ทำให้การนำไฟฟ้าได้ไม่ดี

การแพร่ของน้ำเกลือผ่านเปลือกไข่

เชนและคณะ (Chen; et al. 1999) ได้ศึกษาการแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านเปลือกไข่ โดยมุ่งเน้นที่การดำเนินการ และเครื่องมือที่ใช้ เพื่ออธิบายผลของการวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านเปลือกไข่ ทำการทดลองโดยศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายในสองทิศทางคือ จากภายในสู่ภายนอกเปลือกไข่ และจากภายนอกสู่ภายในเปลือกไข่ ทั้งกรณีที่มีและไม่มีเยื่อหุ้มเปลือกไข่ชั้นใน ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์แปรผันตามเวลา อุณหภูมิมีผลต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลาย และพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในสองทิศทาง คือ จากภายในสู่ภายนอกเปลือกไข่ มีค่าสูงกว่าการแพร่จากภายนอกสู่ภายในเปลือกไข่ และในเปลือกไข่ที่ไม่มีเยื่อหุ้มเปลือกไข่ชั้นในมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าเปลือกไข่ที่มีเยื่อหุ้ม ประมาณ 5 เท่า แสดงให้เห็นว่าเยื่อหุ้มเปลือกไข่ชั้นในคือตัวต้านทานสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ และในการศึกษาครั้งนี้พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ผ่านเปลือกไข่มีค่าอยู่ระหว่าง $1 \times 10^{-14} - 1 \times 10^{-12}$ ตารางเมตรต่อวินาที

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

1. ไข่ดิบ
2. ไข่ต้ม
3. ไข่เค็มดิบ
4. ไข่เค็มต้ม

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง (Mettler PJ 300)
2. นาฬิกาจับเวลา
3. ปีกเกอร์
4. ช้อนตัก
5. กระบอกตวงสาร
6. ถ้วยยูเรกา
7. ขวดพิกานอมิเตอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร
8. แผ่นร้อน (Hot plate)
9. เวอร์เนียร์คาลิเปอร์
10. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Humidity/Thermometer Digicon DP-77)
11. เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก รุ่น Spike1000 PR ยี่ห้อ Par Scientific ความถี่ 10 kHz
12. Digital Storage Oscilloscope รุ่น GDS-1000 Series ความถี่ 25 MHz
13. อ่างใสสารตัวอย่าง
14. อัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ 2 ตัว ได้แก่
 - 14.1 ตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก
 - 14.2 ตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 13 ไข่เป็ดที่ใช้ในการทำการวิจัย



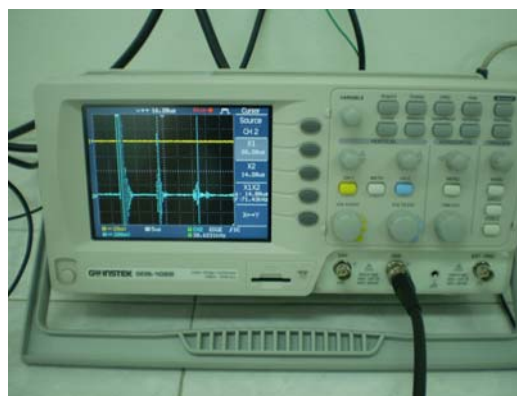
ภาพประกอบ 14 เวอร์เนียคาลิปเปอร์



ภาพประกอบ 15 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ



ภาพประกอบ 16 เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 17 ออสซิลโลสโคป



ภาพประกอบ 18 อ่างใส่สารตัวอย่าง



ภาพประกอบ 19 ทรานส์ดิวเซอร์



ภาพประกอบ 20 ขวดพิกานมิเตอร์



ภาพประกอบ 21 เครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง

3.3. วิธีดำเนินการวิจัย

ตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่

1. คัดเลือกไข่ที่มีขนาดเท่าๆกัน โดยจัดไข่ออกเป็น 8 กลุ่มๆละ 3 ฟอง
2. นำไข่ที่คัดเลือกไว้มาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัล
3. หาความกว้าง และความยาวของไข่โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์
4. หาความหนาแน่นของไข่โดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ
5. คำนวณหาพื้นที่ผิว ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่ ตามสมการที่ 14 – 16
6. ทำการทดลอง ตามข้อ 1 – 5 ซ้ำ อีกครั้ง โดยเปลี่ยนจากไข่ดิบ เป็นไข่ต้ม และไข่เค็มตามลำดับ
7. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้ค่าสถิติ คือ ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

8. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวด้วยแผนแบบ CRD และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Scheffé ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
9. เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัด และการคำนวณตามทฤษฎีของปากเนลลีและคณะ (Paganelli; et al. 1974: 319 – 325)
10. ศึกษาลักษณะของไข่ขาว และไข่แดงของไข่ต้ม ที่ได้รับความร้อนในช่วงเวลา 5 10 15 20 และ 25 นาที
11. ศึกษาลักษณะของไข่ขาว และไข่แดงของไข่เค็มที่ต้องเค็มในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน โดยศึกษาทั้งลักษณะของไข่เค็มดิบ และไข่เค็มต้ม

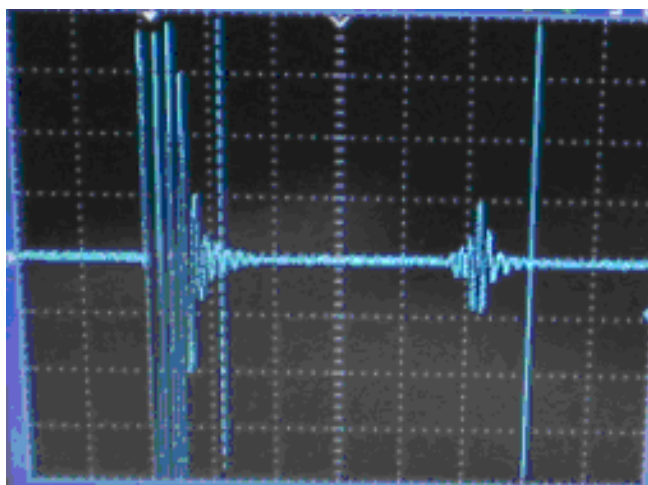
ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่โดยเทคนิคอัลตราโซนิก

การทดลองหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ



ภาพประกอบ 22 ชุดทดลองหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบใช้ช่องสัญญาณที่ 1 ปรับ sec/div ที่ $10 \mu\text{s}$ และ volt/div ที่ 0.1 โวลต์ ปรับความถี่เครื่องกำเนิดคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกที่ 4 – 5 kHz

1. ติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่ง ให้ผิวหน้าของทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งอยู่ที่ตำแหน่งตรงและขนานกับทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ ติดตั้งโดยสอดตัวทรานส์ดิวเซอร์แต่ละตัวเข้าทางด้านข้างของอ่างใส่สารตัวอย่าง
2. ต่อสายส่งจากตัวส่งเข้ากับเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก
3. ต่อสายรับจากตัวรับเข้ากับออสซิลโลสโคป ใช้ช่องสัญญาณที่ 1 ปรับ sec/div ที่ 10 μ s และ volt/div ที่ 0.1 โวลต์
4. เทไขใส่อ่างใส่สารตัวอย่าง
5. เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อกระตุ้นให้ทรานส์ดิวเซอร์สร้างคลื่นอัลตราโซนิก
6. วัดอุณหภูมิของของไขขณะทำการทดลอง
7. ปรับระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งกับทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ (d) ห่างกันที่ระยะ 3 เซนติเมตร
8. เมื่อหน้าจอออสซิลโลสโคปปรากฏคลื่นอัลตราโซนิก ให้วางเคอร์เซอร์ตัวแรกไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของคลื่นขบวนแรก และวางเคอร์เซอร์ตัวที่สองไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของคลื่นขบวนที่สอง จะได้ค่า ΔT (Time Duration) ซึ่งอ่านจากหน้าจอออสซิลโลสโคป บันทึกผลการทดลอง
9. คำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข
10. หาค่าความหนาแน่นของไขโดยใช้ขวดพิกาโนมิเตอร์
11. คำนวณหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข ตามสมการ (9)
12. คำนวณหาค่าบัลค์มอดุลัสของไข ตามสมการ (4)
13. ทำการทดลองตามข้อ 1 – 12 ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนจากไขดิบ เป็นไขเค็มที่แช่น้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ตามลำดับ



ภาพประกอบ 23 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกของไขเค็มดิบ

การทดลองหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้ม

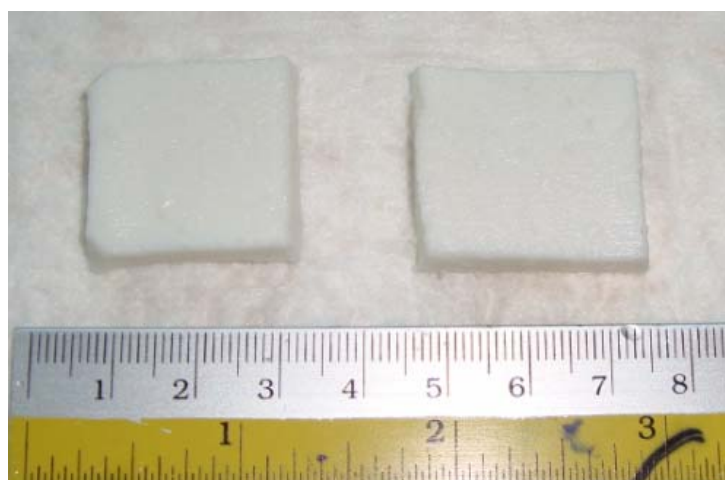


ภาพประกอบ 24 ชุดทดลองหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มใช้ช่องสัญญาณที่ 1 ปรับ sec/div ที่ $10\ \mu\text{s}$ และ volt/div ที่ 0.1 โวลต์ ปรับความถี่เครื่องกำเนิดคลื่นสัญญาณอัลตราโซนิกที่ 8 – 9 kHz

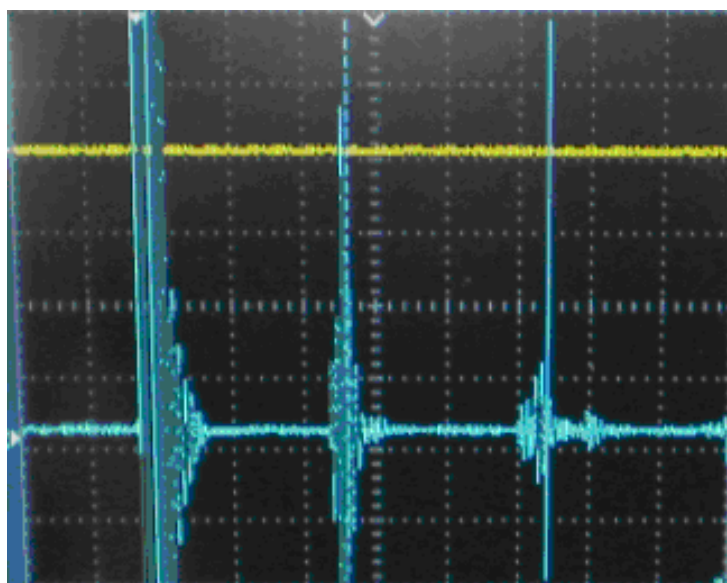
ขั้นตอนการทดลองวัดความเร็วคลื่นเสียงของไข่เค็มต้ม

1. ติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์แบบตัวส่งและตัวรับตัวเดียวกันเข้ากับขาตั้งที่ใช้จับยึดอุปกรณ์การทดลอง เพื่อความสะดวกในการวัด ดังภาพประกอบ 24
2. ต่อสายทรานส์ดิวเซอร์เข้ากับเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก
3. ต่อสายจากเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเข้ากับออสซิลโลสโคป ใช้ช่องสัญญาณที่ 1 ปรับ sec/div ที่ $10\ \mu\text{s}$ และ volt/div ที่ 0.1 โวลต์
4. เตรียมไข่ที่จะนำมาวัดหาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกโดยใช้เครื่องสไลด์ไข่ ซึ่งจะสามารถสไลด์ไข่ได้ที่ความหนาประมาณ 5.95 มิลลิเมตร
5. ตัดไข่ให้เป็นรูปทรงขนาดประมาณ 2.30×2.35 เซนติเมตร พอดีกับหัวทรานส์ดิวเซอร์ที่จะทำการวัด
6. ทาเจลที่หัวทรานส์ดิวเซอร์เพื่อช่วยส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปในตัวกลางของแข็ง
7. วางไข่ที่เตรียมไว้บนหัวทรานส์ดิวเซอร์
8. เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อกระตุ้นให้ทรานส์ดิวเซอร์สร้างคลื่นอัลตราโซนิก
9. เมื่อหน้าจอออสซิลโลสโคปปรากฏคลื่นอัลตราโซนิก ให้วางเคอร์เซอร์ตัวแรกไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของคลื่นขบวนแรก และวางเคอร์เซอร์ตัวที่สองไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของคลื่นขบวนที่สอง จะได้ค่า ΔT (Time Duration) ซึ่งอ่านจากหน้าจอออสซิลโลสโคป บันทึกผลการทดลอง
10. คำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่

11. หาความหนาแน่นของไข่จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตร
12. คำนวณหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่ ตามสมการ (9)
13. คำนวณหาค่าบัลค์มอดุลัสของไข่ ตามสมการ (4)
14. ทำการทดลองตามข้อ 1 – 13 ซ้ำอีกครั้ง โดยเปลี่ยนจากไข่ต้ม เป็นไข่เค็มต้มที่แช่น้ำเกลือ 50% 75% และ 100% เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ตามลำดับ



ภาพประกอบ 25 ขนาดของไข่ขาวที่นำมาทำวิจัย



ภาพประกอบ 26 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้ม

ตอนที่ 3 การศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือที่ระดับความเค็มต่าง ๆ

1. แช่ไขในน้ำเกลือที่มีระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% เป็นเวลา 96 ชั่วโมง โดย
ดองที่อุณหภูมิปกติ (22 – 27 องศาเซลเซียส)
2. วัดความเค็มของน้ำเกลือโดยใช้เครื่องมือวัดความเค็ม (แสดงดังภาคผนวก จ)
ที่ระยะเวลา 0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 42 48 54
60 72 84 และ 96 ชั่วโมง
3. คำนวณหาปริมาณน้ำเกลือที่แพร่ผ่านเข้าไปในไข่เค็ม

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่โดยอิทธิพลของความเค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือ ส่วนที่สามเป็นการศึกษาผลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่ และส่วนที่สี่เป็นการศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการศึกษาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่

4.1.1 ผลการศึกษาลักษณะภายนอกของไข่

ผลการศึกษาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ โดยการใช้เครื่องมือวัด และการคำนวณตามทฤษฎีของปากเนลลีและคณะ (Paganelli; Olszowka; & Ar. 1974: 319 – 325) โดยศึกษาลักษณะภายนอกของไข่ คือ น้ำหนัก ความกว้าง ความยาว พื้นที่ผิว ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่ดิบ ไข่ต้ม และไข่เค็ม จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้ค่าสถิติคือ ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม SPSS โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวด้วยแผนแบบ CRD และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Scheffé ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งได้ผลดังนี้

ตาราง 8 โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ดิบที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด

ไข่	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น ^a (g/cm ³)
1	65.98±2.02	44.83±0.96	59.29±1.37	60.00±0.50	1.10±0.01
2	67.84±0.50	40.76±0.43	60.03±1.32	63.50±0.50	1.07±0.01
3	66.88±2.16	44.69±1.10	60.09±1.69	61.00±0.25	1.10±0.01
4	67.15±0.36	44.87±0.89	60.79±2.06	62.50±0.75	1.07±0.01
5	67.19±1.55	44.69±0.39	61.46±0.65	62.50±0.50	1.07±0.01
6	67.59±2.17	44.73±0.59	61.72±0.88	63.50±0.25	1.06±0.01
7	67.28±1.74	44.89±0.91	60.58±1.31	63.00±0.50	1.07±0.01
8	67.26±1.45	45.02±0.08	60.84±1.25	62.50±0.50	1.08±0.01
เฉลี่ย	67.15±0.55	44.31±1.44	60.60±0.79	62.31±1.22	1.08±0.01

หมายเหตุ ^aความหนาแน่น = มวล/ปริมาตร

จำนวนซ้ำของข้อมูล : n = 9

ตาราง 9 โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ดิบที่ได้จากการคำนวณ

ไข่	พื้นที่ผิว ^a (cm ²)	ปริมาตร ^b (cm ³)	ความหนาแน่น ^c (g/cm ³)
1	77.40±1.56	62.06±1.89	1.06±0.00
2	78.89±0.39	63.83±0.47	1.06±0.00
3	78.17±1.66	62.97±2.02	1.06±0.00
4	78.34±0.51	63.15±0.61	1.06±0.00
5	78.35±1.20	63.25±1.45	1.06±0.00
6	78.72±1.67	63.56±2.03	1.06±0.00
7	78.41±1.34	63.31±1.63	1.06±0.00
8	78.41±1.12	63.25±1.36	1.07±0.00
เฉลี่ย	78.34±0.44	63.17±0.52	1.06±0.00

หมายเหตุ ^aพื้นที่ผิว : $A = 4.835W^{0.662}$ ^bปริมาตร : $A = 4.951V^{0.666}$ ^cความหนาแน่น : $\rho = 1.038W^{0.006}$

ตาราง 10 โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่มุ่ที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด

เวลา (นาทีก)	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น ^a (g/cm ³)
5	65.93±1.92	44.30±0.23	58.60±0.02	61.50±1.80	1.07±0.01
10	67.67±0.55	45.15±0.05	57.45±0.05	63.50±1.62	1.07±0.01
15	65.78±2.68	45.00±0.15	58.70±0.07	61.50±2.00	1.07±0.01
20	66.56±0.71	45.50±0.17	56.90±0.07	62.50±0.86	1.06±0.01
25	66.63±1.30	44.30±0.35	61.00±0.15	62.50±1.44	1.07±0.01

หมายเหตุ ^a ความหนาแน่น = มวล/ปริมาตร

จำนวนซ้ำของข้อมูล: n = 9

ตาราง 11 โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่มุ่ที่ได้จากการคำนวณ

เวลา (นาทีก)	พื้นที่ผิว ^b (cm ²)	ปริมาตร ^c (cm ³)	ความหนาแน่น ^d (g/cm ³)
5	77.45±1.70	62.04±2.05	1.06±0.00
10	78.70±1.25	63.67±1.51	1.07±0.00
15	77.27±2.07	61.91±2.50	1.06±0.00
20	77.80±0.55	62.63±0.67	1.06±0.00
25	77.98±1.20	62.70±1.20	1.06±0.00

หมายเหตุ ^b พื้นที่ผิว: $A = 4.835W^{0.662}$

^c ปริมาตร: $A = 4.951V^{0.666}$

^d ความหนาแน่น: $\rho = 1.038W^{0.006}$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Scheffé พบว่า ค่าของน้ำหนัก ความกว้าง ความยาว ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่มุ่ที่ใช้เวลาในการต้ม 5 10 15 20 และ 25 นาทีก ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$)

ตาราง 12 โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่เค็มที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด

เวลา (วัน)	ความเค็ม (%)	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ปริมาตร (cm ³)	ความ หนาแน่น ^a (g/cm ³)
7	50	67.81±6.00	44.66±1.22	60.68±1.84	63.80± 5.44	1.06± 0.02
	75	69.22±6.52	44.40±1.51	63.35±1.95	65.70± 5.69	1.06± 0.02
	100	67.33±7.83	44.55±2.53	61.11±1.12	63.60± 7.17	1.06± 0.02
14	50	66.72±3.16	44.65±0.94	60.93±1.83	62.90± 2.82	1.06± 0.01
	75	67.21±5.28	44.67±1.42	59.89±2.36	62.70± 5.67	1.07± 0.02
	100	66.93±5.70	44.94±0.59	58.79±3.55	63.50± 4.47	1.06± 0.02
21	50	72.37±6.17	45.51±1.04	63.24±3.27	68.00± 6.25	1.06± 0.01
	75	72.74±6.11	45.53±0.54	63.04±4.13	68.10± 5.65	1.07± 0.01
	100	73.02±7.68	45.62±1.02	64.84±7.97	68.40± 6.47	1.07± 0.02

หมายเหตุ ^a ความหนาแน่น = มวล/ปริมาตร

จำนวนซ้ำของข้อมูล : n = 15

ตาราง 13 โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่เค็มที่ได้จากการคำนวณ

เวลา (วัน)	ความเค็ม (%)	พื้นที่ผิว ^a (cm ²)	ปริมาตร ^b (cm ³)	ความหนาแน่น ^c (g/cm ³)
7	50	78.78±4.66	63.80±5.62	1.07±0.00
	75	79.86±4.98	65.13±6.19	1.07±0.00
	100	78.37±6.08	63.35±7.32	1.07±0.00
14	50	77.97±2.45	62.78±2.96	1.06±0.00
	75	78.33±4.07	63.24±4.94	1.07±0.00
	100	78.11±4.41	62.98±5.33	1.06±0.00
21	50	82.25±4.64	68.07±5.77	1.07±0.00
	75	82.53±4.57	68.41±5.71	1.07±0.00
	100	82.71±5.78	68.67±7.18	1.07±0.00
หมายเหตุ		^a พื้นที่ผิว :	$A = 4.835W^{0.662}$	
		^b ปริมาตร :	$A = 4.951V^{0.666}$	
		^c ความหนาแน่น :	$\rho = 1.038W^{0.006}$	

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Scheffé พบว่า ที่เวลา 7 วัน และ 14 วัน ค่าของน้ำหนัก ความกว้าง ปริมาตรของไข่ ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) แต่ที่เวลา 21 วัน แตกต่างกัน ($p < 0.05$) ความยาวของไข่ ที่เวลา 14 วัน และ 21 วัน แตกต่างกัน ($p < 0.05$) ความหนาแน่นของไข่ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$)

ตาราง 14 เปรียบเทียบโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่ดิบ ไข่ต้ม และไข่เค็ม

ไข่	น้ำหนัก (g)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	พื้นที่ผิว ^a (cm ²)	ปริมาตร ^b (cm ³)	ความหนาแน่น ^c (g/cm ³)
ไข่ดิบ	67.15±0.55	44.31±1.44	60.60±0.79	78.34±0.44	63.17±0.52	1.06±0.00
ไข่ต้ม	66.51±0.75	44.85±0.53	58.53±1.58	77.84±0.56	62.59±0.70	1.06±0.00
ไข่เค็มดิบ ^d	69.26±2.69	44.95±0.48	61.76±1.95	77.97±2.04	65.16±2.51	1.07±0.00
ไข่เค็มต้ม ^e	63.20±2.25	44.33±0.68	60.16±0.54	75.24±0.56	63.06±2.17	1.03±0.00

หมายเหตุ ^aพื้นที่ผิว : $A = 4.835W^{0.662}$

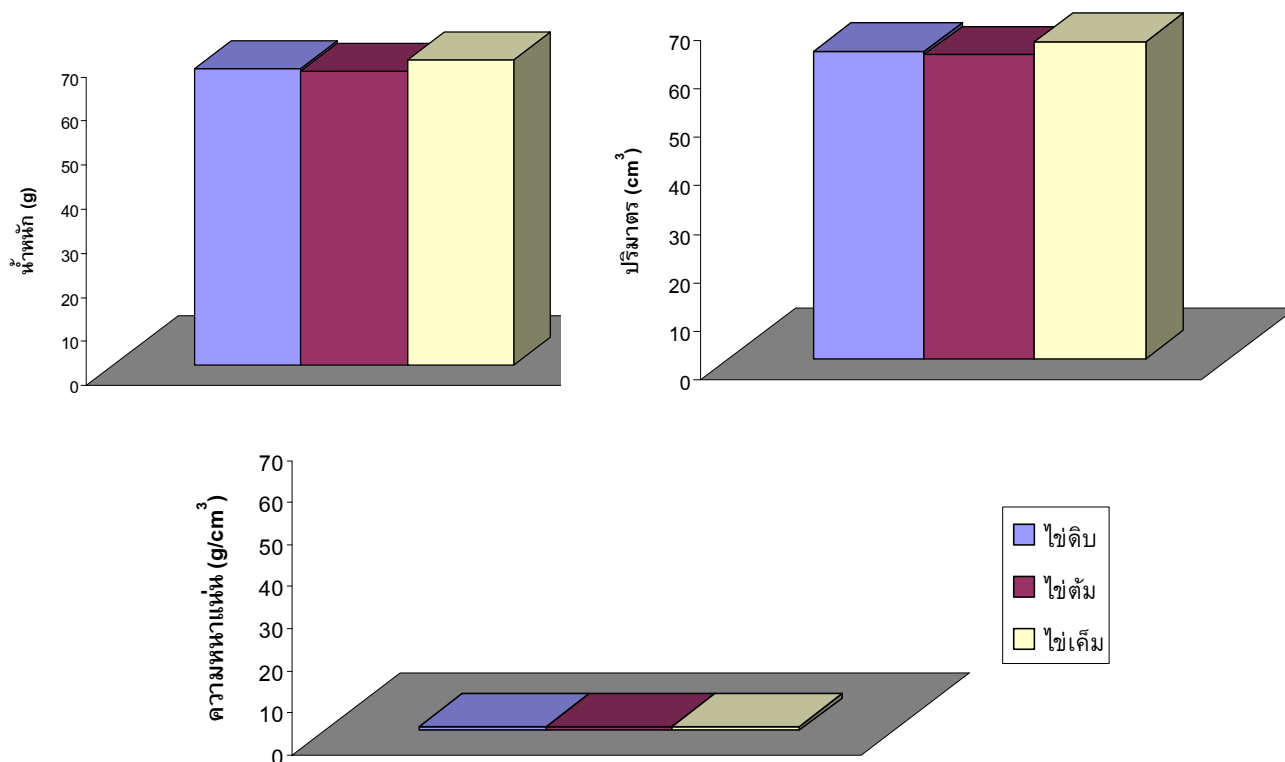
^bปริมาตร : $A = 4.951V^{0.666}$

^cความหนาแน่น : $\rho = 1.038W^{0.006}$

^dไข่เค็มที่ผลิตเอง

^eไข่เค็มที่มีขายตามท้องตลาด

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Scheffé พบว่า น้ำหนัก ความกว้าง ความยาว พื้นที่ผิว ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่ดิบ ไข่ต้ม และไข่เค็ม ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) อาจเนื่องมาจากผู้วิจัยได้คัดเลือกขนาดของไข่ที่จะนำมาทดลองด้วยสายตาก่อนแล้ว

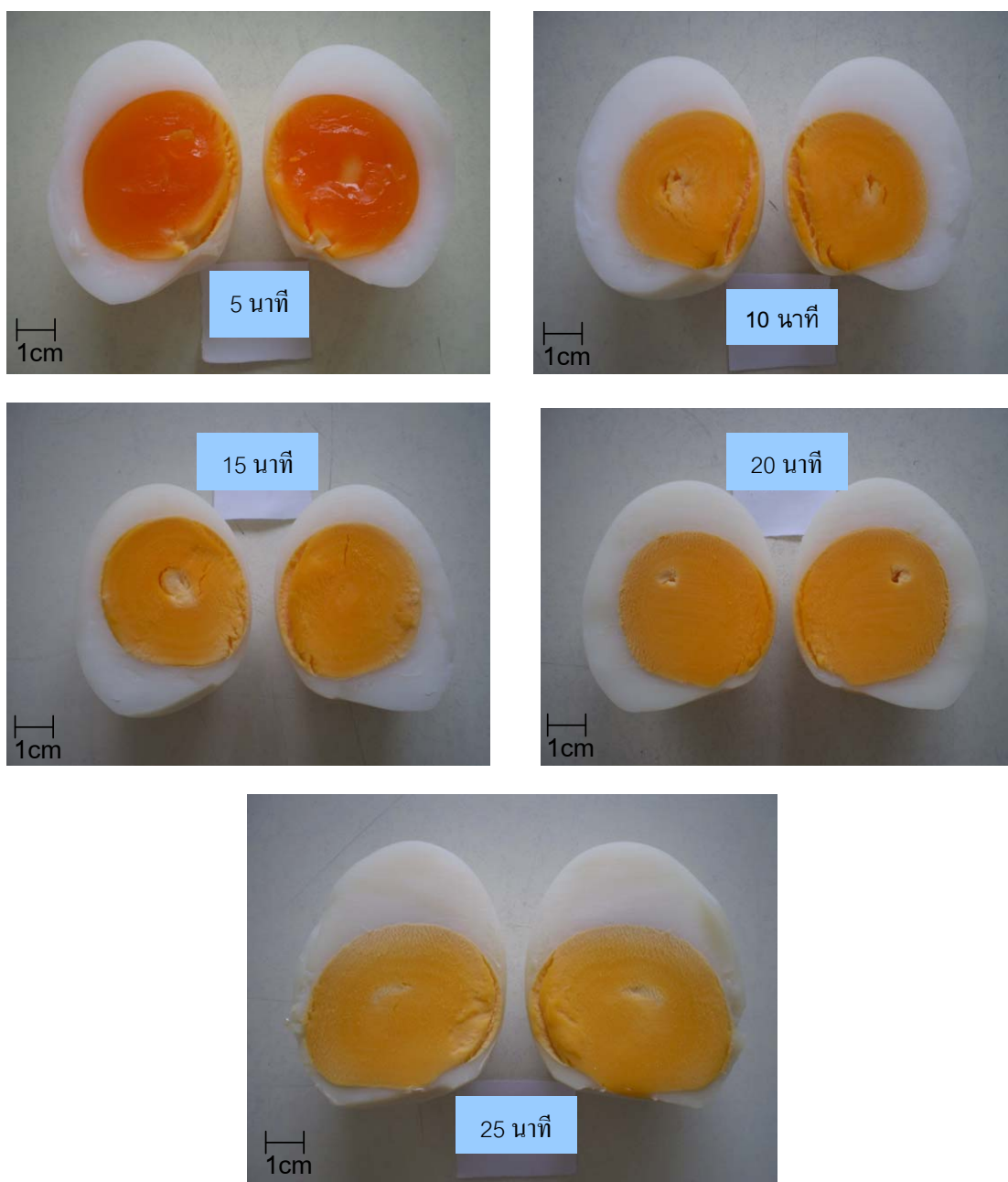


ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบน้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของไช้ดิบ ไช้ต้ม และไช้เค็ม

จากตาราง 8 – 14 แสดงให้เห็นว่าปริมาตร และความหนาแน่นของไช้ดิบ ไช้ต้ม และไช้เค็ม ที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัด และการคำนวณตามทฤษฎีของปากเนลลี (Paganelli; Olszowka; & Ar. 1974: 319 – 325) มีค่าใกล้เคียงกัน และมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของไช้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเราสามารถหาพื้นที่ผิว ปริมาตร และความหนาแน่นของไช้ได้จากการที่เราทราบค่าน้ำหนักของไช้เพียงอย่างเดียว โดยการคำนวณตามสมการ (14) – (16)

4.1.2 ผลการศึกษาลักษณะไข่ขาวและไข่แดงของไข่ต้ม

ศึกษาโดยการต้มไข่ในน้ำเดือด(อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 5 10 15 20 และ 25 นาที พบว่า ไข่ต้มมีลักษณะของไข่ขาวและไข่แดง ปรากฏดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ลักษณะของไข่ขาวและไข่แดงของไข่ต้ม

จากภาพประกอบ 28 พบว่า การให้ความร้อนกับไข่จะทำให้ไข่เปลี่ยนสภาพเป็นเจลและแข็งตัวเป็นผลมาจากโปรตีนเปลี่ยนแปลง โดยการเกิดเจลนั้นเกิดจากโมเลกุลของโปรตีนเกิดพันธะเคมีต่อกันระหว่างเกลียวของโปรตีนเกิดเป็นร่างแหแข็งตัวขึ้นจากเป็นของเหลว ส่วนการแข็งตัวนั้นโปรตีนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งโดยไม่มีรูปแบบเฉพาะ เช่น การต้มหรือทอดไข่

การแข็งตัวของไข่เกิดขึ้นเนื่องจากโปรตีนเปลี่ยนคุณสมบัติจากที่ละลายน้ำได้เป็นไม่ละลายน้ำ เมื่อเป็นไข่สดจะมีลักษณะเหลว แต่เมื่อไข่ได้รับความร้อน ความสามารถในการละลายของโปรตีนในไข่ขาวจะลดลง เกลียวของโปรตีนจะเริ่มคลายตัว เกิดพันธะไฮโดรโฟบิก พันธะไฮโดรเจน และพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุล ทำให้โปรตีนไม่ละลายน้ำ แต่โอบอุ้มน้ำไว้ในตาข่ายของโปรตีนเปลี่ยนเป็นลักษณะข้นเหลว และถ้าได้รับความร้อนสูง จะยิ่งทำให้โปรตีนแข็งตัวมากขึ้น (นุชรี เบญจานุวัตร. 2529) ปัจจัยที่ทำให้โปรตีนของไข่แข็งตัวมีหลายปัจจัยได้แก่ ความร้อน เกลือ กรด และน้ำตาล เป็นต้น เมื่อไข่ได้รับความร้อน ส่วนของไข่ขาวจะเริ่มแข็งตัว มีลักษณะเป็นเจล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเริ่มเปลี่ยนจากลักษณะใสไม่มีสีเป็นสีขาวที่อุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส และแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส การแข็งตัวของไข่ขาวเนื่องมาจากโปรตีน โอวโคนาลูมินและโอวออลูมิน เปลี่ยนคุณสมบัติไปเมื่อได้รับความร้อน โปรตีนในไข่แดงต้องการอุณหภูมิในการแข็งตัวสูงกว่าโปรตีนในไข่ขาวเล็กน้อย โดยมีระยะเริ่มหนืดขึ้นที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสและที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ไข่แดงจะแข็งตัวทั้งหมดและหยุดไหล (Romanoff; & Romanoff. 1994) ขณะที่โปรตีนไข่แดงแข็งตัวจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของสีเหมือนในไข่ขาว จึงเป็นการยากที่จะกำหนดว่าไข่แดงเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิเท่าไร ส่วนปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการแข็งตัวของไข่นั้น เอ. แอล. โรมานอฟ และ เอ. เจ. โรมานอฟ (Romanoff; & Romanoff. 1994) ได้รายงานว่าการแข็งตัวของโปรตีนไข่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของเกลือ เกลือบางความเข้มข้นจะทำให้โปรตีนไข่แข็งตัว แต่บางความเข้มข้นไม่ทำให้โปรตีนไข่แข็งตัว การเติมเกลือลงในไข่ขาวจะทำให้โปรตีนไข่แข็งตัวเร็วขึ้น แต่การเติมน้ำตาลลงในไข่จะทำให้โปรตีนไข่แข็งตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าไข่ที่ไม่ได้เติมน้ำตาล

สีของไข่ขาวและไข่แดง พบว่า เมื่อไข่ได้รับความร้อน ไข่ขาวมีสีขาว เนื้อสัมผัสนุ่มแน่น มีลักษณะยืดหยุ่น มีกลิ่นคาวไข่ ไข่แดงมีสีส้มเหลือง เนื้อสัมผัสนิ่ม (ชมภู ยัมโต. 2543: 63 – 66) ไข่แดงจะเริ่มเปลี่ยนสีจากด้านนอกเข้าไปด้านใน และบริเวณตรงกลางของไข่แดงจะมีสีอ่อนเป็นวงเล็กๆอยู่ ซึ่งเรียกว่า แกนไข่แดง

ในการต้มไข่จะเกิดการเปลี่ยนสี เนื่องจากมีการปล่อย Hydrogen sulfide (H_2S) จากโปรตีนของไข่ขาวไปรวมกับเหล็กจากไข่แดงเกิดเป็น ferrous sulfide คือ การเกิดวงแหวนสีเขียวรอบไข่แดงที่ติดกับไข่ขาว เนื่องจากไข่แดงและไข่ขาวมีธาตุเหล็กและกำมะถันเป็นองค์ประกอบ กำมะถันมีส่วนประกอบของ Cystine และ Methionine เมื่อต้มไข่เป็นเวลานานจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในไข่ขาว ซึ่งแก๊สนี้จะรวมตัวกับเหล็กในไข่แดงเกิดเป็นสารเฟอร์รัสซัลไฟด์ ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มไข่

เวลาที่ใช้ต้มไข่จะทำให้ไข่ขาวและไข่แดงแข็งตัวมากน้อยต่างกัน เวลา 5 นาที ไข่ขาวแข็งเล็กน้อย ไข่แดงเหลวข้นเหมือนยางมะตูม 10 นาที ไข่ขาวแข็งตัว ไข่แดงแข็งตัวแต่ยังไม่เปลี่ยนสี 15 นาที ไข่ขาวแข็งตัว ไข่แดงแข็งตัว และเกิด iron sulfide ที่ผิวของไข่ ซึ่งถ้าทำให้เย็นโดยเร็ว วงแหวนสีเขียวคล้ำอาจเกิดน้อยหรือไม่มีเลย แต่ถ้าต้มไข่นาน 30 นาที ไม่ว่าจะทำให้เย็นลงเร็วขนาดไหนก็ไม่สามารถทำให้วงแหวนสีเขียวรอบไข่แดงจางหายไปได้ ทั้งนี้เพราะว่าในไข่แดงมีทั้งเหล็กและซัลเฟอร์ในปริมาณมากพอควรสามารถทำให้เกิดเฟอร์รัสซัลไฟด์ได้ (รัชณี ตันตะพานิชกุล. 2544)

4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะไข่ขาวและไข่แดงของไข่เค็ม

ศึกษาโดยการนำไข่มาดองเค็มที่ระดับความเค็มของน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% และใช้เวลาในการดอง 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน จากนั้นศึกษาลักษณะของไข่ขาวและไข่แดงทั้งที่เป็นไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม พบลักษณะของไข่ขาวและไข่แดงปรากฏดังภาพประกอบ 29 – 34



ภาพประกอบ 29 ลักษณะของไข่เค็มดิบที่ดองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาดองเค็ม 7 วัน



ภาพประกอบ 30 ลักษณะของไข่เค็มดิบที่ดองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาดองเค็ม 14 วัน



ภาพประกอบ 31 ลักษณะของไข่เค็มดิบที่ดองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาดองเค็ม 21 วัน

จากภาพประกอบ 29 – 31 พบว่า ในไข่เค็มดิบ ไข่ขาวจะเหลวและมีสีขาวขุ่น ส่วนไข่แดงจะเป็นก้อนกลมแข็ง มีสีแดง และมีกลิ่นเค็มของเกลือ เนื่องจากเกลือที่ซึมเข้าไป ไปดึงน้ำออกจากโปรตีนไข่ขาว ทำให้โปรตีนไข่ขาวเกิดการเสียสภาพเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ไข่ขาวจึงมีความหนืดลดลง (เสาวภา ยววุฒโฒ. 2538) ส่วนไข่แดงมีลักษณะเป็นก้อนกลมแข็ง มีความหนืดสูง มีสีส้มแดงเข้ม เมื่อผ่านการให้ความร้อน ไข่ขาวมีสีทึบ มีเนื้อนุ่ม ในขณะที่ส่วนไข่แดง มีเนื้อสัมผัสที่คงตัว และมีเนื้อหยาบ มีส่วนของน้ำมันเยิ้มออกมา ไข่เค็มที่ดีนั้น ไข่ขาวจะมีเนื้อละเอียด มีรสเค็มปานกลาง ส่วนไข่แดงมีสีส้มแดงเข้ม เป็นน้ำมันเยิ้ม และมีรสเค็มเล็กน้อย



ภาพประกอบ 32 ลักษณะของไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อน (30 นาที) ที่ดองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาดองเค็ม 7 วัน



ภาพประกอบ 33 ลักษณะของไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อน (30 นาที) ที่ดองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาดองเค็ม 14 วัน



ภาพประกอบ 34 ลักษณะของไข่เค็มที่ผ่านการให้ความร้อน (30 นาที) ที่ดองในน้ำเกลือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ (จากซ้ายไปขวา) โดยมีระยะเวลาดองเค็ม 21 วัน

จากภาพประกอบ 32 – 34 เมื่อผ่านการให้ความร้อน ไชขาวมีสีขาวขุ่น เนื้อสัมผัสนุ่ม มีกลิ่นเค็มของเกลือ ไชแดงมีสีส้มแดงเข้ม บางฟองเห็นชั้นไชแดงสลับกับชั้นไชแดงสีเข้มชัดเจน มีน้ำมันเยิ้มเกิดขึ้น เนื้อสัมผัสแข็งขึ้น เนื้อหยาบร่วน การเปลี่ยนแปลงสีในไชขาวและไชแดงเป็นผลมาจากเกลือซึมเข้าไปในไช (ชมภู ยิ้มโต. 2543: 63 – 66)

เปรียบเทียบลักษณะของไชไก่และไชเปิดเค็ม พบว่า ไชเค็มจากไชเปิดจะให้ลักษณะตามที่ต้องการมากที่สุด คือ มีสีส้ม เป็นมันเยิ้ม และมีเนื้อสัมผัสหยาบ (Chi; & Tseng. 1998; Lai; et al. 1999) ในขณะที่ไชไก่เค็มมีสีส้มอ่อนกว่า และไม่เกิดลักษณะการเป็นมันเยิ้มเหมือนในไชเปิด อีกทั้งมีแนวโน้มในการเกิดวงจรไขมันดำมากกว่า จึงเป็นเหตุผลให้ไชเปิดเค็มได้รับความนิยมมากกว่า ไชไก่เค็ม (ชมภู ยิ้มโต. 2543: 63 – 66)

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

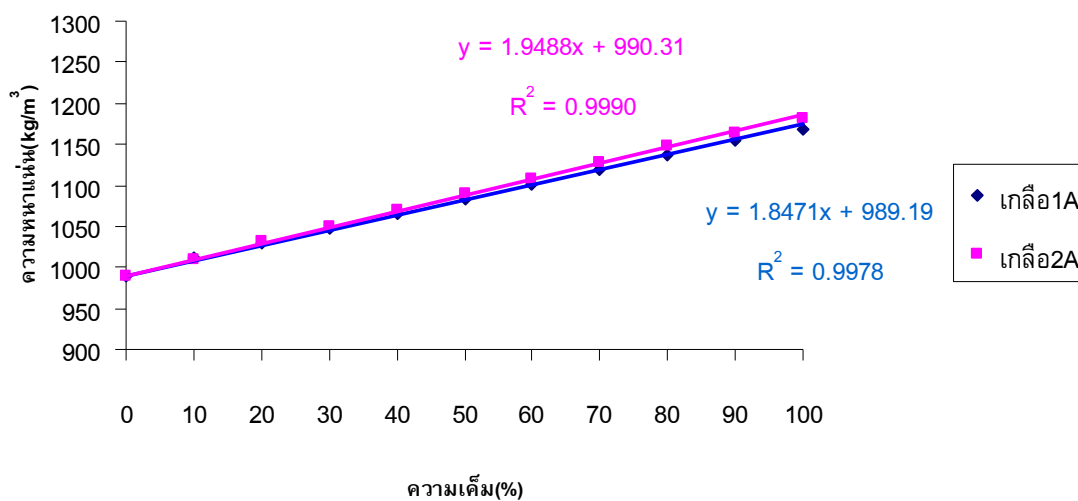
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือจากบ่อหลวง 1A และ บ่อหลวง 2A ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงระดับความเค็ม 0% – 100% ด้วยเทคนิค อัลตราโซนิก โดยศึกษาผลของระดับความเค็มของน้ำเกลือที่มีต่อความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ความหนาแน่น ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสของน้ำเกลือ ซึ่งได้ผลดังนี้

ตาราง 15 สมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือ (บ่อหลวง 1A) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความเค็ม (%)	ความหนาแน่น (kg/m^3)	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิก (m/s)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ ($\text{kg/m}^2\text{s} \times 10^6$)	บัลค์มอดุลัส ($\text{Pa} \times 10^9$)
0	989.19	1447.53	1.432	2.073
10	1011.64	1471.49	1.489	2.190
20	1030.13	1495.33	1.540	2.303
30	1047.20	1519.95	1.592	2.419
40	1065.60	1546.39	1.648	2.548
50	1083.55	1572.74	1.704	2.680
60	1100.76	1597.87	1.759	2.810
70	1119.83	1623.82	1.818	2.953
80	1137.60	1644.96	1.871	3.078
90	1154.31	1667.82	1.925	3.211
100	1169.03	1698.51	1.986	3.373

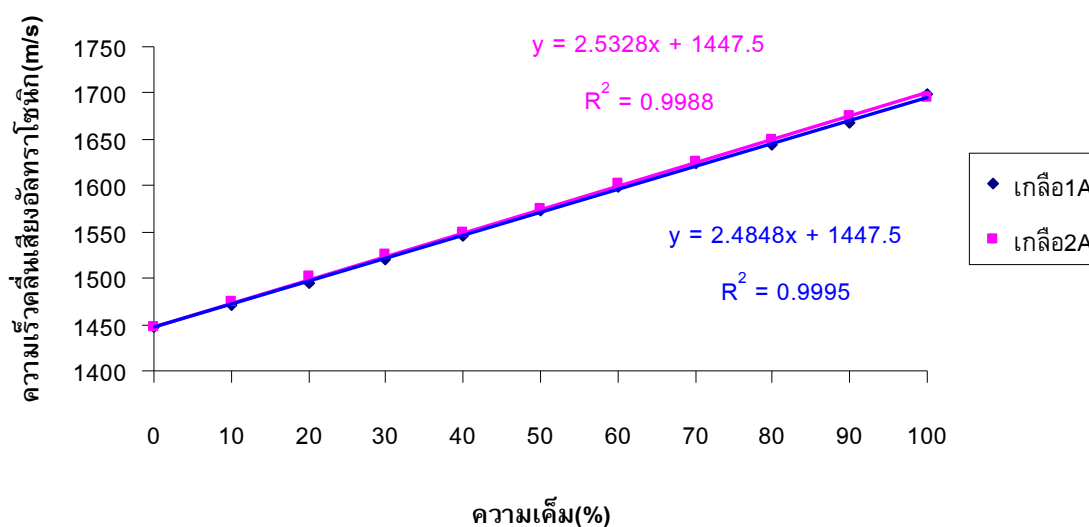
ตาราง 16 สมบัติทางกายภาพของน้ำเกลือ (บ่อหลวง 2A) อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความเค็ม (%)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิก (m/s ²)	ความต้านทาน เชิงซ้อนจำเพาะ (kg/m ² s×10 ⁶)	บัลค์มอดุลัส (Pa×10 ⁹)
0	990.31	1447.53	1.433	2.075
10	1009.88	1475.11	1.490	2.197
20	1032.56	1501.88	1.551	2.329
30	1049.04	1525.75	1.601	2.442
40	1069.55	1550.39	1.658	2.571
50	1089.76	1575.84	1.717	2.706
60	1108.03	1603.21	1.776	2.848
70	1128.95	1626.02	1.836	2.985
80	1147.36	1650.62	1.894	3.126
90	1163.60	1674.81	1.949	3.264
100	1181.88	1694.92	2.003	3.395



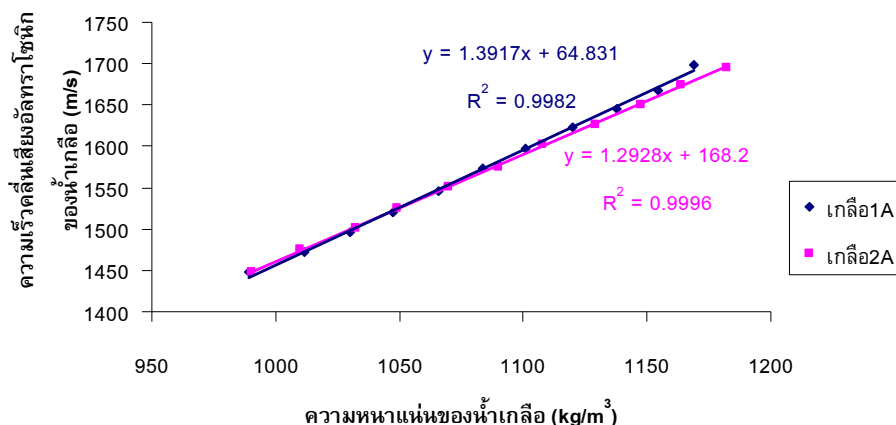
ภาพประกอบ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเค็มของน้ำเกลือจากบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A

จากภาพประกอบ 35 พบว่าเมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของน้ำเกลือเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกันในช่วงระดับความเค็ม 0% – 100% และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของน้ำเกลือจากทั้งสองแหล่ง คือ เกลือจากบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน โดยน้ำเกลือบ่อหลวง 1A มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1011 – 1169 kg/m³ และน้ำเกลือบ่อหลวง 2A มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1009 – 1181 kg/m³



ภาพประกอบ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับความเค็มของน้ำเกลือจากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง 2A

จากภาพประกอบ 36 พบว่าเมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้นความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของน้ำเกลือเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกันในช่วงระดับความเค็ม 0% – 100% และเมื่อพิจารณาความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของน้ำเกลือ จากทั้งสองแหล่ง คือ เกลือจากบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน โดยน้ำเกลือบ่อหลวง 1A มีค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก อยู่ระหว่าง 1471 – 1698 m/s และน้ำเกลือบ่อหลวง 2A มีค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก อยู่ระหว่าง 1475 – 1694 m/s



ภาพประกอบ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและความหนาแน่นของน้ำเกลือบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A

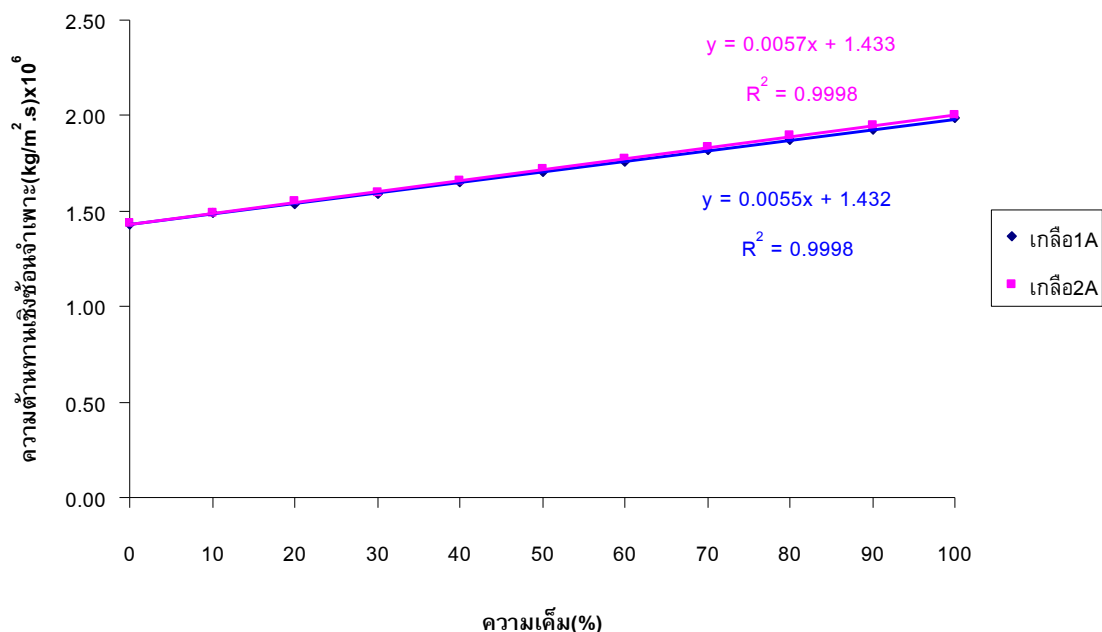
จากผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและความหนาแน่นของน้ำเกลือบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A สามารถนำมาคำนวณหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับความหนาแน่นของน้ำเกลือ โดยกำหนดให้ความหนาแน่นของน้ำเกลือเป็นตัวแปรอิสระ (x) ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นตัวแปรตาม (y) ได้สมการดังนี้

$$y_1 = 1.3917x_1 + 64.83 \quad R^2 = 0.9982$$

$$y_2 = 1.2928x_2 + 168.20 \quad R^2 = 0.9996$$

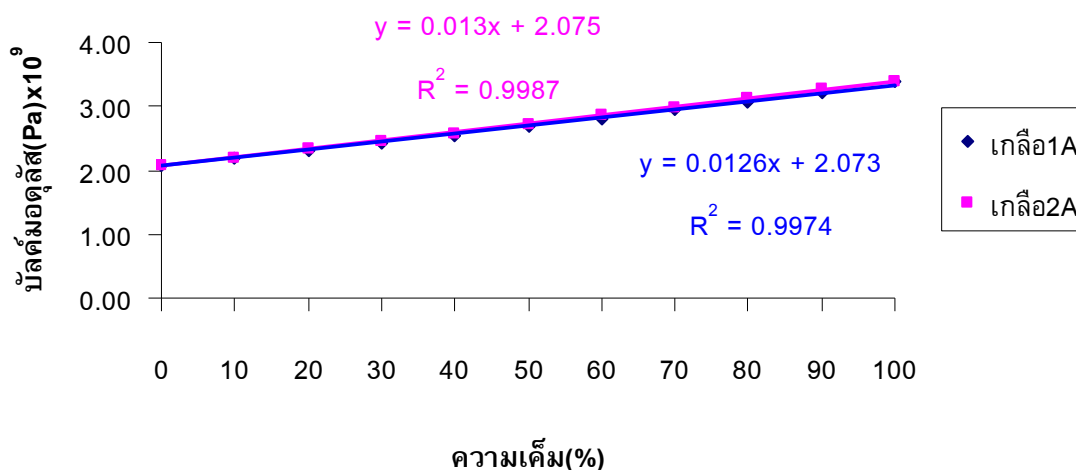
เมื่อ x_1 = ความหนาแน่นของน้ำเกลือบ่อหลวง 1A
 y_1 = ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของน้ำเกลือบ่อหลวง 1A
 x_2 = ความหนาแน่นของน้ำเกลือบ่อหลวง 2A
 y_2 = ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของน้ำเกลือบ่อหลวง 2A

จากสมการถดถอยทั้ง 2 สมการ สมการแรก $y_1 = 1.3917x_1 + 64.83$ ซึ่งสมการนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของน้ำเกลือกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกได้ร้อยละ 99.91 แสดงว่าค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือบ่อหลวง 1A มีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเส้นตรง สมการที่สอง $y_2 = 1.2928x_2 + 168.20$ ซึ่งสมการนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของน้ำเกลือกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกได้ร้อยละ 99.98 แสดงว่าค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือบ่อหลวง 2A มีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเป็นเส้นตรง จากสมการทั้งสองพบว่าเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกก็เพิ่มขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับความเค็มของน้ำเกลือจากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง2A

จากภาพประกอบ 38 พบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของน้ำเกลือ มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับความเค็มของน้ำเกลือในช่วงระดับความเค็ม 0% – 100% และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของน้ำเกลือ จากทั้งสองแหล่ง คือเกลือจากบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน โดยน้ำเกลือบ่อหลวง 1A มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ อยู่ระหว่าง $1.489 \times 10^6 - 1.986 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ และน้ำเกลือบ่อหลวง 2A มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ อยู่ระหว่าง $1.490 \times 10^6 - 2.003 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ จากการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของน้ำเกลือ จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือ โดยค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะแปรผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงและความหนาแน่นของน้ำเกลือ



ภาพประกอบ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับความเค็มของน้ำเกลือจากบ่อหลวง1A และบ่อหลวง2A

จากภาพประกอบ 39 พบว่าค่าบัลค์มอดุลัสของน้ำเกลือ มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับความเค็มของน้ำเกลือในช่วงระดับความเค็ม 0% – 100% เมื่อพิจารณาค่าบัลค์มอดุลัสของน้ำเกลือจากทั้งสองแหล่ง คือ เกลือจากบ่อหลวง 1A และบ่อหลวง 2A พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน โดยน้ำเกลือบ่อหลวง 1A มีค่าบัลค์มอดุลัสอยู่ระหว่าง 2.190×10^9 – 3.373×10^9 Pa และ น้ำเกลือบ่อหลวง 2A มีค่าบัลค์มอดุลัสอยู่ระหว่าง 2.197×10^9 – 3.395×10^9 Pa จากการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าบัลค์มอดุลัสของน้ำเกลือ จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิค และค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือ โดยค่าบัลค์มอดุลัสแปรผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงและค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือ

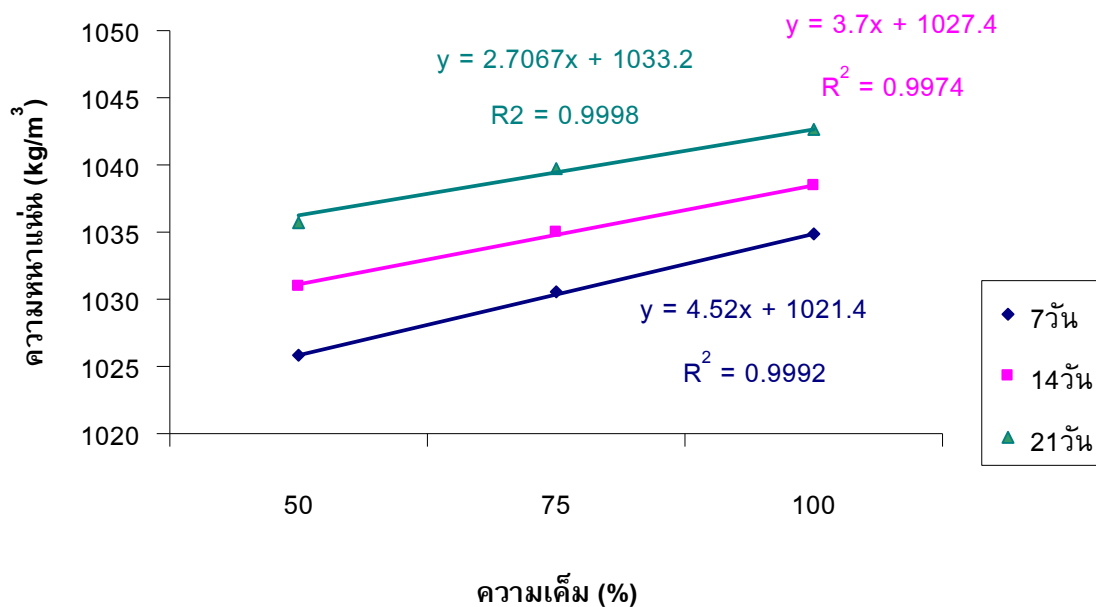
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่โดยอิทธิพลของความเค็มด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก ศึกษาที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% ดองไข่เค็มเป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วันตามลำดับ จากนั้นนำไข่เค็มที่ได้ (แยกเอาเฉพาะส่วนของไข่ขาว) มาวัดหาค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ความหนาแน่น ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็ม

4.3.1 ผลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบ

ตาราง 17 ผลของระดับความเค็มของน้ำเกลือที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (วัน)	ความเค็ม (%)	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิก (m/s)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	ความต้านทาน เชิงซ้อน จำเพาะ (kg/m ² s × 10 ⁶)	บัลค์มอดุลัส (Pa × 10 ⁹)
0	0	1408.45	1033.00	1.455	2.050
7	50	1433.92	1025.80	1.471	2.109
	75	1447.06	1030.55	1.492	2.159
	100	1455.49	1034.84	1.506	2.192
14	50	1446.13	1031.03	1.491	2.156
	75	1458.67	1035.05	1.510	2.202
	100	1465.56	1038.43	1.522	2.230
21	50	1455.49	1035.73	1.508	2.194
	75	1470.59	1039.76	1.527	2.246
	100	1481.12	1042.67	1.542	2.284



ภาพประกอบ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไข่เค็มดิบกับความเค็มของน้ำเกลือ

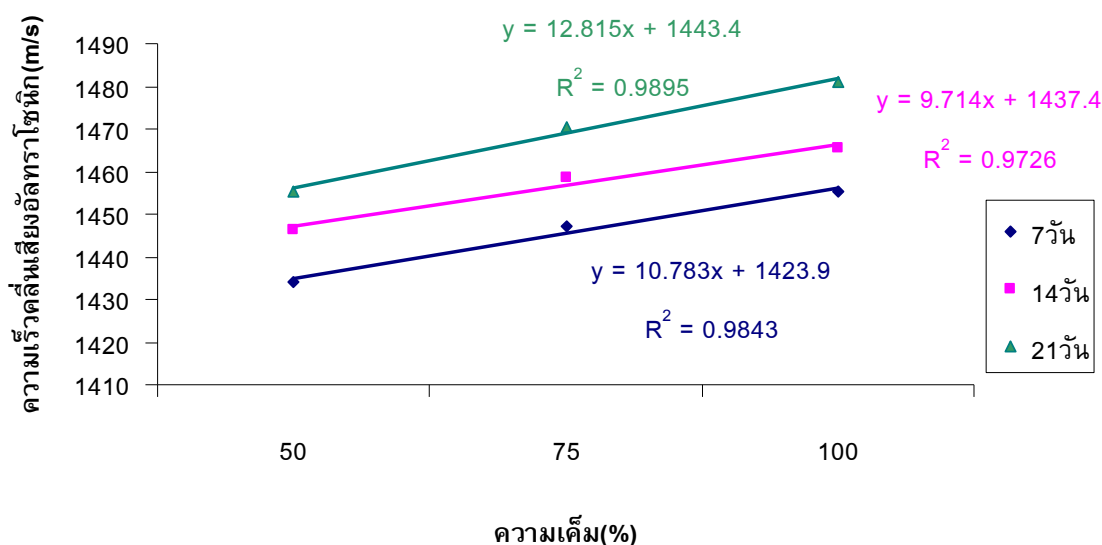
จากภาพประกอบ 40 พบว่าเมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของไข่เค็มดิบเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกันในช่วงระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1025 – 1041 kg/m³ และเมื่อพิจารณาที่ระดับความเค็มเท่ากันแต่ใช้เวลาในการดองไข่เค็มต่างกัน พบว่า เมื่อเวลาในการดองเค็มนานขึ้น ความหนาแน่นของไข่เค็มดิบก็เพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ ความหนาแน่นของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือด้วย โดยที่เวลา 7 วัน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1025 – 1034 kg/m³ ที่เวลา 14 วัน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1031 – 1038 kg/m³ และที่เวลา 21 วัน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1035 – 1041 kg/m³

ตาราง 18 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ

เวลา (วัน)	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของ ค่าความหนาแน่น(kg/m ³ .%salinity)	ความหนาแน่นของไข่เค็ม (kg/m ³) ที่ระดับความเค็ม 0%
7	4.3267	1021.8
14	3.6267	1027.6
21	2.7067	1033.2

จากตาราง 18 จะเห็นว่าเมื่อเวลาที่แช่ในน้ำเกลือนานขึ้น ความหนาแน่นของไข่เค็มดิบก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกัน เนื่องด้วยเมื่อแช่ไข่เป็นเวลานานเกลือจะซึมเข้าไปในไข่ได้มากขึ้น ปริมาณเกลือในไข่จึงสูงขึ้น เป็นเหตุให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่น พบว่า ที่เวลา 7 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเทียบกับระดับความเค็มมากที่สุด รองลงมา คือ ที่เวลา 14 วัน และ 21 วัน ตามลำดับ อธิบายได้ว่า เมื่อนำไข่แช่ในน้ำเกลือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของน้ำเกลือภายในและภายนอกไข่มีมาก จึงเกิดการแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไข่ขาว และแพร่จากไข่ขาวเข้าสู่ไข่แดง โดยที่ระยะเวลา 7 วันเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการแพร่ อัตราการแพร่จึงเกิดได้มาก ปริมาณเกลือในไข่ขาวจึงเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของไข่เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อความแตกต่างของความเข้มข้นลดลงอัตราการแพร่ก็ลดลงด้วย จนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำเกลือภายในและภายนอกไข่คงที่ การแพร่จึงยุติ

ค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบที่ระดับความเค็ม 0 % ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน มีค่าแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากสภาพอากาศและอุณหภูมิขณะที่เริ่มต้นทำการวิจัยในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน



ภาพประกอบ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบกับความเค็มของน้ำเกลือ

จากภาพประกอบ 41 พบว่า เมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้นความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกันในช่วงระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% โดยมีค่าความความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกอยู่ระหว่าง 1433 – 1481 m/s และเมื่อพิจารณาที่ระดับความเค็มเท่ากันแต่ใช้เวลาในการดองไข่เค็มต่างกัน พบว่า เมื่อเวลาในการดองเค็มนานขึ้น ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบก็เพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่ดองในน้ำเกลือด้วย โดยที่เวลา 7 วัน มีค่าความความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกอยู่ระหว่าง 1433 – 1455 m/s ที่เวลา 14 วันมีค่าความความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกอยู่ระหว่าง 1446 – 1465 m/s และที่เวลา 21 วันมีค่าความความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกอยู่ระหว่าง 1455 – 1481 m/s

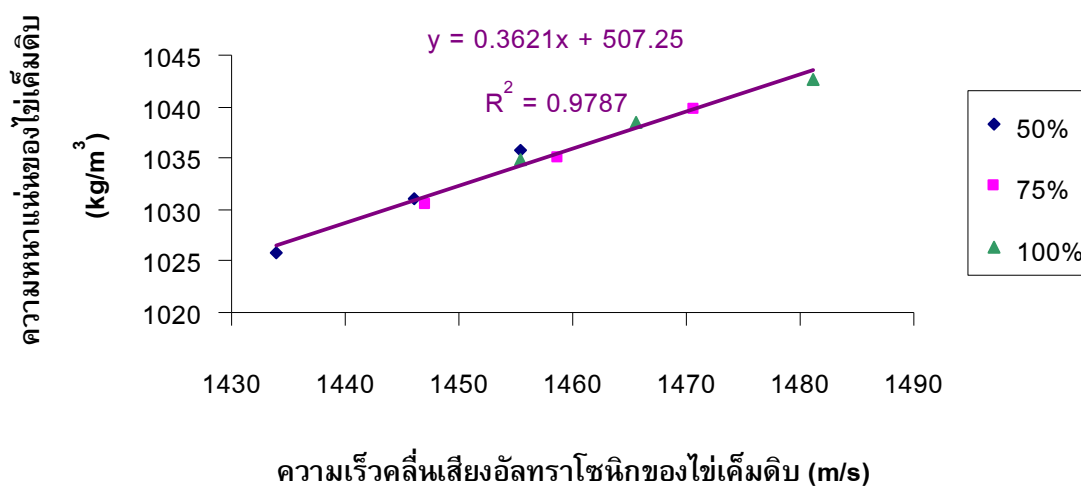
ตาราง 19 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ

เวลา (วัน)	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก (m/s.%salinity)	ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก(m/s) ที่ระดับความเค็ม 0 %
7	10.783	1423.90
14	9.7139	1437.40
21	12.815	1443.40

จากตาราง 19 จะเห็นว่าเมื่อเวลาที่แช่ในน้ำเกลือนานขึ้น ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ ก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกัน และเมื่อพิจารณาลักษณะการเพิ่มขึ้นของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่าที่เวลา 21 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มมากที่สุด รองลงมา คือ ที่เวลา 7 วัน และ 14 วันตามลำดับ

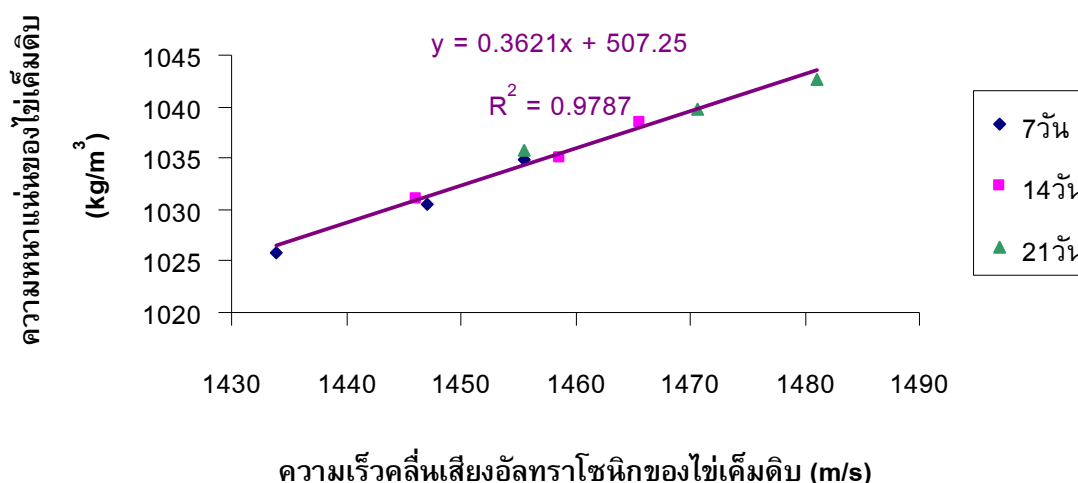
เมื่อแช่ไข่ในน้ำเกลือเป็นเวลานาน ปริมาณเกลือในไข่จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของไข่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความเร็วคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากจะมีค่ามาก นั่นคือ ค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแปรผันตรงกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ

ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบที่ระดับความเค็ม 0% ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน มีค่าแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิขณะที่เริ่มต้นทำการวิจัยในแต่ละครั้งไม่เท่ากัน ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของน้ำเค็มดิบ

- หมายเหตุ
- จุดสีน้ำเงิน คือ ระดับความเค็ม 50% ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ
 - จุดสีชมพู คือ ระดับความเค็ม 75% ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ
 - จุดสีเขียว คือ ระดับความเค็ม 100% ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ
 - เส้นตรงสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของน้ำเค็มที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ



ภาพประกอบ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ

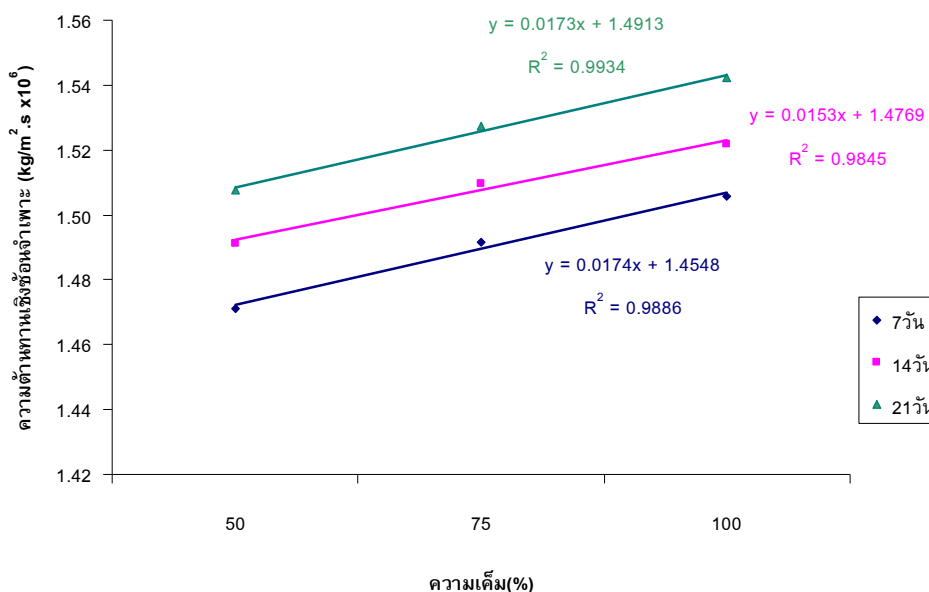
หมายเหตุ จุดสีน้ำเงิน คือ ที่เวลา 7 วัน ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ

จุดสีชมพู คือที่เวลา 14 วัน ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ

จุดสีเขียว คือ ที่เวลา 21 วัน ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ

เส้นตรงสีม่วง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% (เรียงจากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ

จากภาพประกอบ 42 – 43 พบว่า ความหนาแน่นของไข่เค็มดิบ (y) มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ (x) โดยมีความสัมพันธ์กันเป็นไปตามสมการ $y = 0.3621x + 507.25$ ซึ่งสมการนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ร้อยละ 98.93 แสดงว่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบเป็นเส้นตรง



ภาพประกอบ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบกับความเค็มของน้ำเกลือ

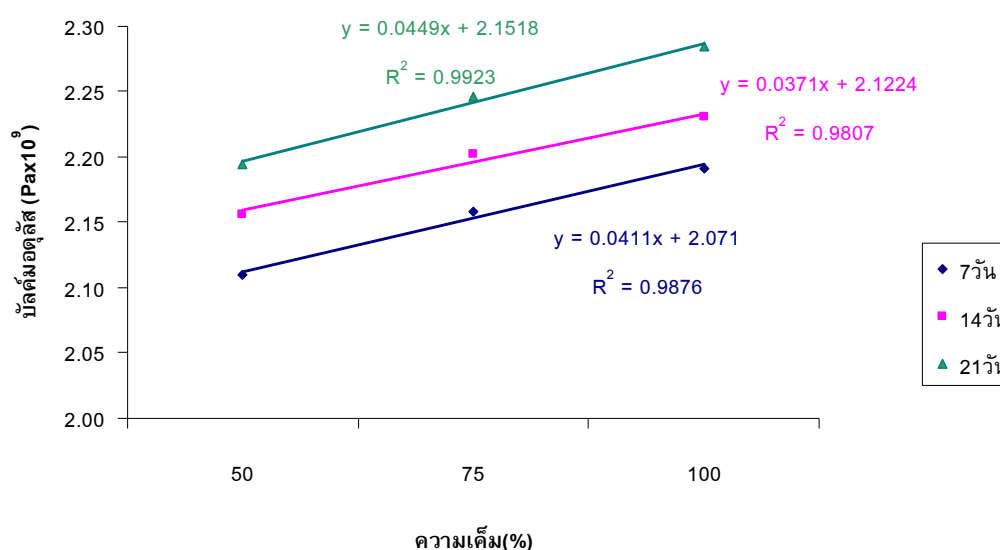
จากภาพประกอบ 44 พบว่า เมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกันในช่วงระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% โดยมีค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบ อยู่ระหว่าง 1.471×10^6 – 1.542×10^6 kg/m².s เมื่อพิจารณาที่ระดับความเค็มเท่ากันแต่ใช้เวลาในการดองไข่เค็มต่างกัน พบว่า เมื่อเวลาในการดองเค็มนานขึ้น ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบก็เพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือด้วย โดยที่เวลา 7 วันมีค่าอยู่ระหว่าง 1.471×10^6 – 1.506×10^6 kg/m².s ที่เวลา 14 วันมีค่าอยู่ระหว่าง 1.491×10^6 – 1.522×10^6 kg/m².s และที่เวลา 21 วันมีค่าอยู่ระหว่าง 1.508×10^6 – 1.542×10^6 kg/m².s

จากการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบ จะเห็นได้ว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบ โดยค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงของไข่เค็มดิบและค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบ

ตาราง 20 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ

เวลา (วัน)	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความ ต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็ม ดิบ ($\text{kg/m}^2 \text{s} \times 10^6 \cdot \% \text{salinity}$)	ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ ของไข่เค็มดิบ ($\text{kg/m}^2 \text{s} \times 10^6$) ที่ระดับความเค็ม 0 %
7	0.0174	1.4548
14	0.0153	1.4769
21	0.0174	1.4548

เมื่อพิจารณาลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบ พบว่า ที่เวลา 7 วัน และ 21 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือเท่ากัน แต่มากกว่าที่เวลา 14 วัน



ภาพประกอบ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มดิบกับความเค็มของน้ำเกลือ

จากภาพประกอบ 45 พบว่า เมื่อระดับความเค็มเพิ่มขึ้น ค่าบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มดิบ ก็เพิ่มขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกันในช่วงระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% โดยมีค่าบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มดิบอยู่ระหว่าง $2.109 \times 10^9 - 2.284 \times 10^9$ Pa เมื่อพิจารณาที่ระดับความเค็มเท่ากันแต่ใช้เวลาในการดองไข่เค็มต่างกัน พบว่าเมื่อเวลาในการดองไข่เค็มนานขึ้น

ค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบก็เพิ่มขึ้นด้วย นั่นคือ ค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่ตองในน้ำเกลือด้วย โดยที่เวลา 7 วัน มีค่าบัลค์มอดุลัสอยู่ระหว่าง $2.109 \times 10^9 - 2.284 \times 10^9$ Pa ที่เวลา 14 วัน มีค่าบัลค์มอดุลัสอยู่ระหว่าง $2.109 \times 10^9 - 2.284 \times 10^9$ Pa และที่เวลา 21 วันมีค่าบัลค์มอดุลัส อยู่ระหว่าง $2.109 \times 10^9 - 2.284 \times 10^9$ Pa

จากการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบ จะเห็นได้ว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ โดยค่าบัลค์มอดุลัสแปรผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงและค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบ

ตาราง 21 ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ

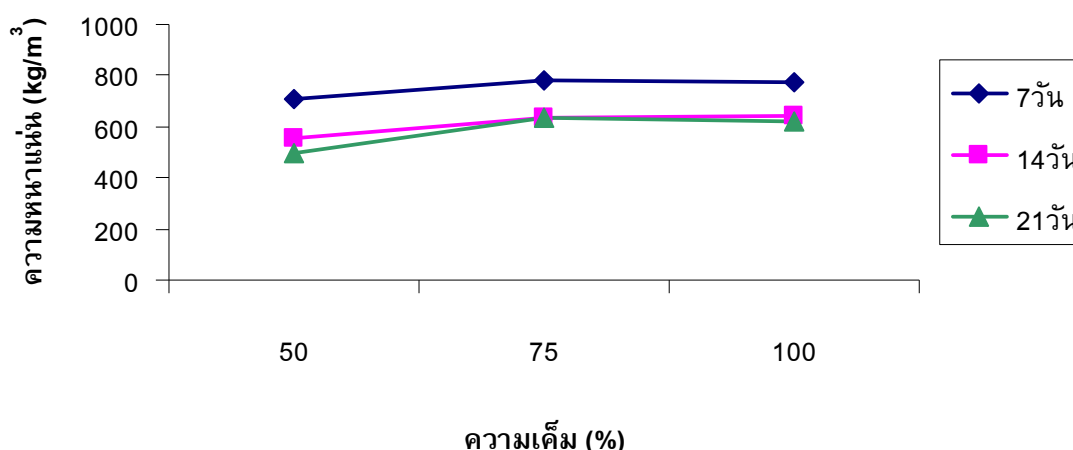
เวลา (วัน)	ลักษณะการเพิ่มขึ้นของ ค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบ ($\text{Pa} \times 10^9$ / %salinity)	ค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็ม($\text{Pa} \times 10^9$) ที่ระดับความเค็ม 0 %
7	0.0411	2.0710
14	0.0370	2.1224
21	0.0449	2.1518

จากตาราง 21 เมื่อเวลาที่แช่ในน้ำเกลือนานขึ้นค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นต่อกัน เนื่องด้วยค่าบัลค์มอดุลัสเป็นค่าที่บอกถึงความยืดหยุ่น หรือความแข็งตัวของไข่เค็ม นั่นคือ เมื่อไข่ได้รับความเค็มเป็นเวลานาน การแข็งตัวของไข่ขาวของไข่เค็มดิบมีค่ามากขึ้น โดยที่เวลา 21 วัน มีการเปลี่ยนแปลงของค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือมากที่สุด รองลงมา คือ 7 วัน และ 14 วันตามลำดับ

4.3.2 ผลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้ม

ตาราง 22 ผลของระดับความเค็มของน้ำเกลือที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้ม อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เวลา (วัน)	ความเค็ม (%)	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิก (m/s)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ความต้านทาน เชิงซ้อนจำเพาะ (kg/m ² s×10 ⁶)	บัลค์มอดุลัส (Pa×10 ⁹)
0	0	1460.29	988.82	1.444	2.109
7	50	1617.58	706.04	1.142	1.847
	75	1383.72	783.99	1.085	1.501
	100	1467.32	770.53	1.131	1.659
14	50	1463.71	557.05	0.815	1.193
	75	1301.49	638.16	0.831	1.081
	100	1386.95	645.31	0.895	1.241
21	50	1374.66	499.21	0.686	0.943
	75	1219.68	634.82	0.774	0.944
	100	1347.17	623.15	0.839	1.131



ภาพประกอบ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไผ่เค็มต้มกับความชื้นของน้ำเกลือ

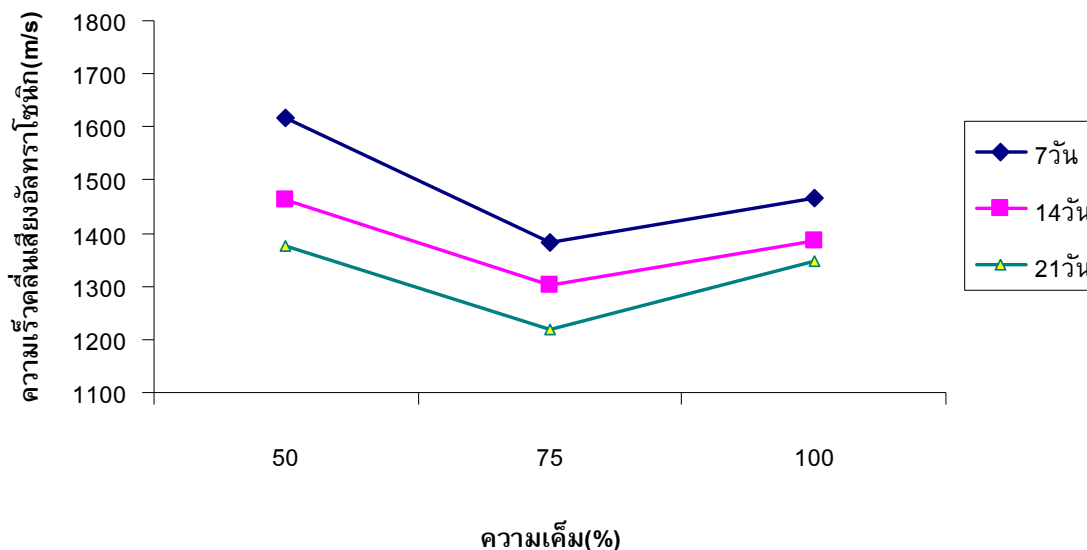
เมื่อให้ความร้อนกับไผ่เค็มเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไผ่เค็มที่ได้มาสไลด์เป็นแผ่นโดยใช้เครื่องสไลด์ไผ่ (แยกเอาเฉพาะส่วนของไผ่ขาว) ซึ่งสามารถตัดไผ่ขาวเป็นชิ้นที่มีขนาดประมาณ $2.30 \times 2.35 \times 0.595$ เซนติเมตร ซึ่งจะพอดีกับขนาดของหัววัดของทรานส์ดิวเซอร์

หาค่าความหนาแน่นของไผ่เค็มต้มจากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตร พบว่า ความหนาแน่นของไผ่เค็มต้มที่แช่ในน้ำเกลือเป็นเวลา 7 วันมีค่าอยู่ระหว่าง $706 - 783 \text{ kg/m}^3$ เวลา 14 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $557 - 645 \text{ kg/m}^3$ และเวลา 21 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $499 - 634 \text{ kg/m}^3$

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไผ่เค็มต้มกับระดับความชื้นของน้ำเกลือ พบว่าที่ระดับความชื้น 50% เกลือมีความเข้มข้นน้อย อัตราการแพร่จึงเกิดได้น้อย ปริมาณเกลือที่แทรกซึมเข้าไปในไผ่จึงมีไม่มาก ไผ่ขาวของไผ่เค็มต้ม จึงมีลักษณะเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน เนื้อสัมผัสไม่เปื่อยยุ่ย ไม่มีช่องว่างภายในไผ่มากนัก ทำให้ความหนาแน่นของไผ่มีมากที่สุด ที่ระดับความชื้น 75% (ประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร) มีอัตราการแพร่ของเกลือเร็วที่สุด (Thanh. 1998) ปริมาณเกลือที่แทรกซึมเข้าไปในไผ่มีมาก เนื้อของไผ่ขาวของไผ่เค็มต้มจึงร่วน ไม่เกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะเปื่อยยุ่ย มีช่องว่างภายในไผ่มาก ทำให้อากาศแทรกซึมเข้าไปได้มาก ความหนาแน่นของไผ่จึงลดลงและมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระดับความชื้นอื่นๆ ดังนั้นความหนาแน่นของไผ่เค็มต้มจึงมากที่สุดที่ระดับความชื้น 50% รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไผ่เค็มต้มกับเวลา พบว่า เมื่อนำไผ่เค็มต้มที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ไปให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที แล้วหาค่าความหนาแน่น พบว่า ที่เวลา 7 วัน มีค่าความหนาแน่นมากที่สุด เนื่องจากเนื้อของไผ่ขาวมีเกลือแทรกซึมอยู่ในปริมาณที่ไม่มาก เนื้อของไผ่ขาวจึงเกาะตัวกันดี ไม่เปื่อยยุ่ย แต่เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน และ 21 วัน

ตามลำดับ เกลือแทรกซึมเข้าไปในไข่มากขึ้น เนื้อของไข่ขาวจึงเปื่อยยุ่ย ไม่เกาะตัวกันเป็นก้อน มีช่องว่างให้อากาศแทรกซึมเข้าไปได้เยอะ ค่าความหนาแน่นของไข่ขาวจึงลดลง นั่นคือ ความหนาแน่นของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ



ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มกับความเค็มของน้ำเกลือ

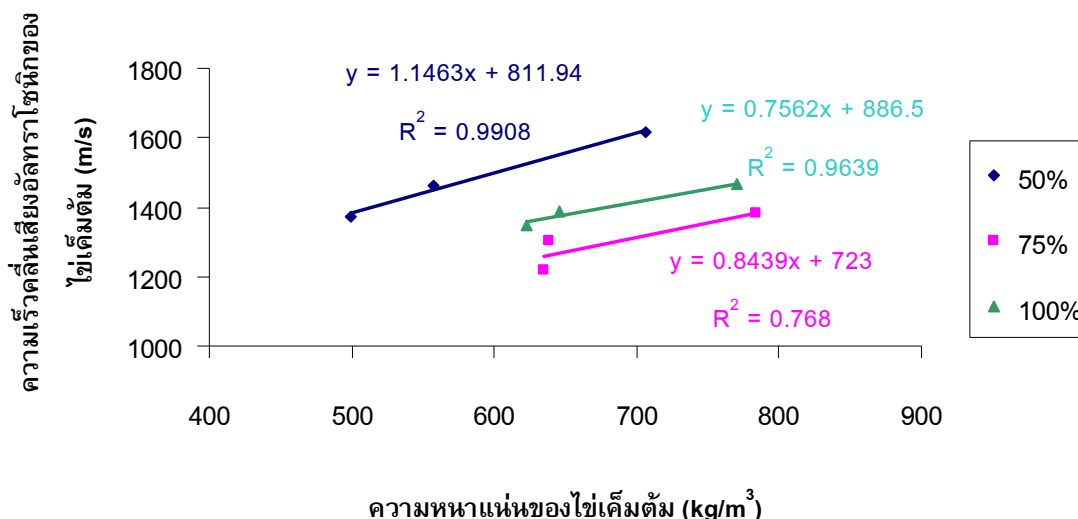
เมื่อให้ความร้อนกับไข่เค็มเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไข่เค็มที่ได้ (แยกเอาเฉพาะส่วนของไข่ขาว) มาวัดค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก พบว่าไข่เค็มต้มที่แช่ในน้ำเกลือเป็นเวลา 7 วัน มีค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมากที่สุด คือมีค่าอยู่ระหว่าง 1383 – 1617 m/s รองลงมาคือเวลา 14 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง 1301 – 1463 m/s และเวลา 21 วัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1219 – 1347 m/s วันตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มกับระดับความเค็มของน้ำเกลือ พบว่าที่ระดับความเค็ม 50% มีค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมากที่สุด รองลงมาคือ ระดับความเค็ม 100% และระดับความเค็ม 75% ตามลำดับ เนื่องจากการแพร่ของเกลือเข้าไปในไข่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของเกลือ โดยถ้าความเข้มข้นของเกลือมาก การแพร่ของเกลือจะเกิดได้เร็ว เนื่องจากเกิดกระบวนการออสโมไลซิสและการสูญเสียน้ำได้อย่างรวดเร็ว เสาวภา ยุกวุฒโฒ (2538) และ ธาน (Thanh. 1998) ได้ศึกษาการผลิตไข่แดงเค็มด้วยน้ำเกลือความเข้มข้น 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า การดองไข่แดงเค็มในน้ำเกลือความเข้มข้น

20 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร มีอัตราการแพร่ของเกลือเร็วกว่าการดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 15 และ 10 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ

นั่นคือ ที่ระดับความเค็ม 50% (ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร) เกลือมีความเข้มข้นน้อย อัตราการแพร่จึงเกิดได้น้อย ปริมาณเกลือที่แทรกซึมเข้าไปในไข่จึงมีไม่มาก ไข่ขาวของไข่เค็มต้ม จึงมีลักษณะเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน เนื้อสัมผัสไม่เปื่อยยุ่ย ไม่มีช่องว่างภายในไข่มากนัก ทำให้ความหนาแน่นของไข่มีมากที่สุด ดังนั้นความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มจึงมีค่ามากที่สุดด้วย ที่ระดับความเค็ม 75% (ประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร) มีอัตราการแพร่ของเกลือเร็วที่สุด ปริมาณเกลือที่แทรกซึมเข้าไปในไข่มีมาก เนื้อของไข่ขาวของไข่เค็มต้มจึงร่วน ไม่เกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะเปื่อยยุ่ย มีช่องว่างภายในไข่มาก ทำให้อากาศแทรกซึมเข้าไปได้มาก ความหนาแน่นของไข่จึงลดลงและมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับระดับความเค็มอื่นๆ ดังนั้นค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มจึงมีค่าน้อยที่สุดด้วย

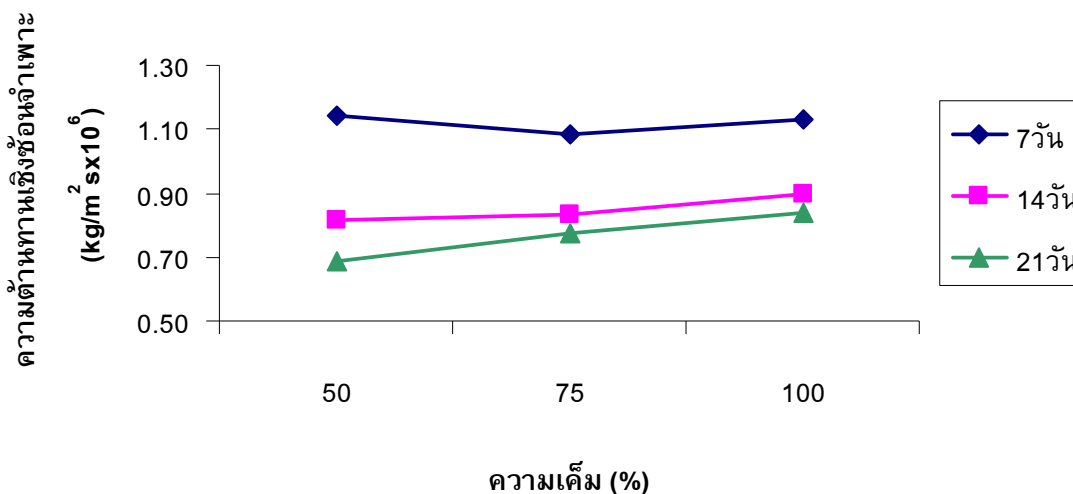
เนื่องจากค่าความเร็วคลื่นเสียงของตัวกลางแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับ ค่าความหนาแน่นของตัวกลางนั้น ดังนั้น เมื่อความหนาแน่นของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับระยะเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้ม จึงแปรผกผันกับระยะเวลาที่แช่ในน้ำเกลือด้วย



ภาพประกอบ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มที่ระดับความเค็ม 50% 75% 100%

จากภาพประกอบ 48 พบว่า ที่ระดับความเค็มเท่ากัน ความหนาแน่นของไข่เค็มต้มมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้ม เมื่อพิจารณาที่

ระดับความเค็มต่างๆ พบว่าที่ระดับความเค็ม 50% มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วคลื่นเสียง เทียบกับความหนาแน่นของไข่เค็มต้มมากที่สุด รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ

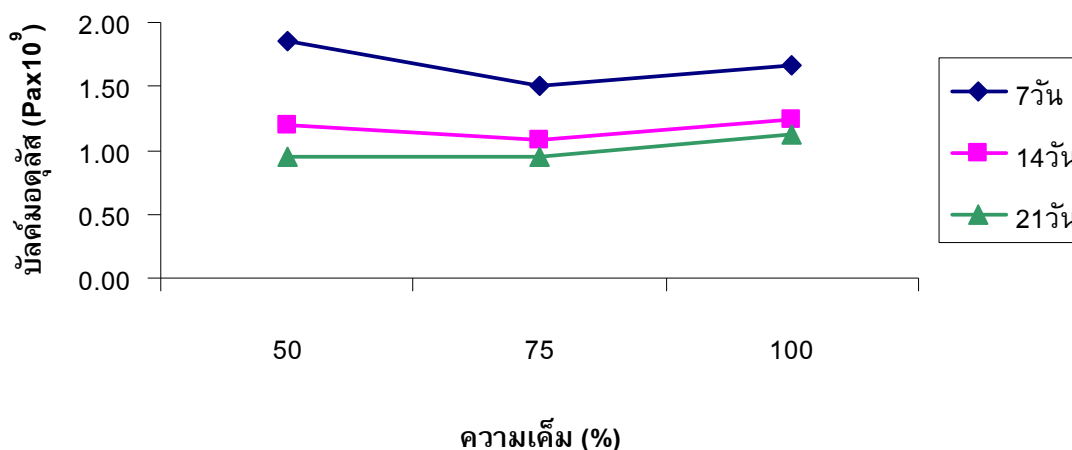


ภาพประกอบ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มต้มกับความเค็มของน้ำเกลือ

นำค่าความเร็วคลื่นเสียงและค่าความหนาแน่นของไข่เค็มต้มที่ได้จากการวัด มาคำนวณหาความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มต้ม ผลปรากฏว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มต้มที่แช่ในน้ำเกลือเป็นเวลา 7 วันมีค่ามากที่สุด คือมีค่าอยู่ระหว่าง $1.085 \times 10^6 - 1.142 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ รองลงมา คือเวลา 14 วันมีค่าอยู่ระหว่าง $0.815 \times 10^6 - 0.895 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ และเวลา 21 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $0.686 \times 10^6 - 0.839 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มต้มกับระดับความเค็มของน้ำเกลือ พบว่าที่ระดับความเค็ม 50% มีค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะมากที่สุด รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ

เนื่องจากค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะแปรผันตรงกับค่าความเร็วของคลื่นเสียงและความหนาแน่นของไข่เค็มต้ม เมื่อความหนาแน่นของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มก็แปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ ดังนั้นค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มต้มจึงแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือด้วย



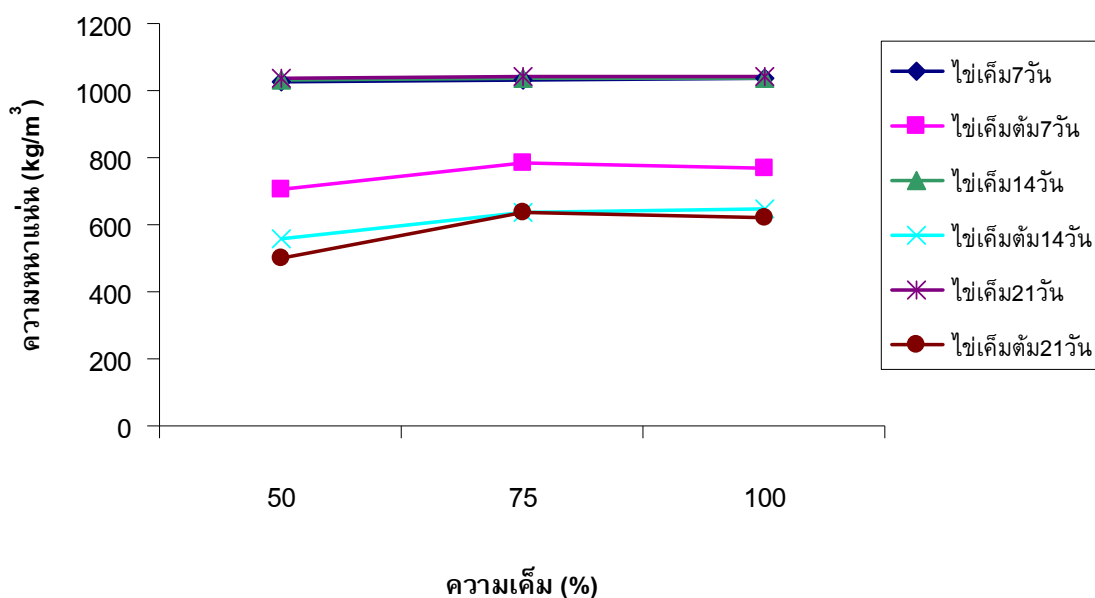
ภาพประกอบ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มต้มกับความเค็มของน้ำเกลือ

นำค่าความเร็วคลื่นเสียงและค่าความหนาแน่นของไข่เค็มต้ม ที่ได้จากการวัด มาคำนวณหาค่าบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มต้ม ผลปรากฏว่าค่าบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มต้มที่แช่ในน้ำเกลือเป็นเวลา 7 วันมีค่ามากที่สุด คือมีค่าอยู่ระหว่าง $1.501 \times 10^9 - 1.847 \times 10^9$ Pa รองลงมา คือ เวลา 14 วัน มีค่าอยู่ระหว่าง $1.081 \times 10^9 - 1.241 \times 10^9$ Pa และเวลา 21 วันมีค่าอยู่ระหว่าง $0.943 \times 10^9 - 1.131 \times 10^9$ Pa ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มต้มกับระดับความเค็มของน้ำเกลือ พบว่าที่ระดับความเค็ม 50% มีค่าบัลค์มอดูลัสมากที่สุด รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ

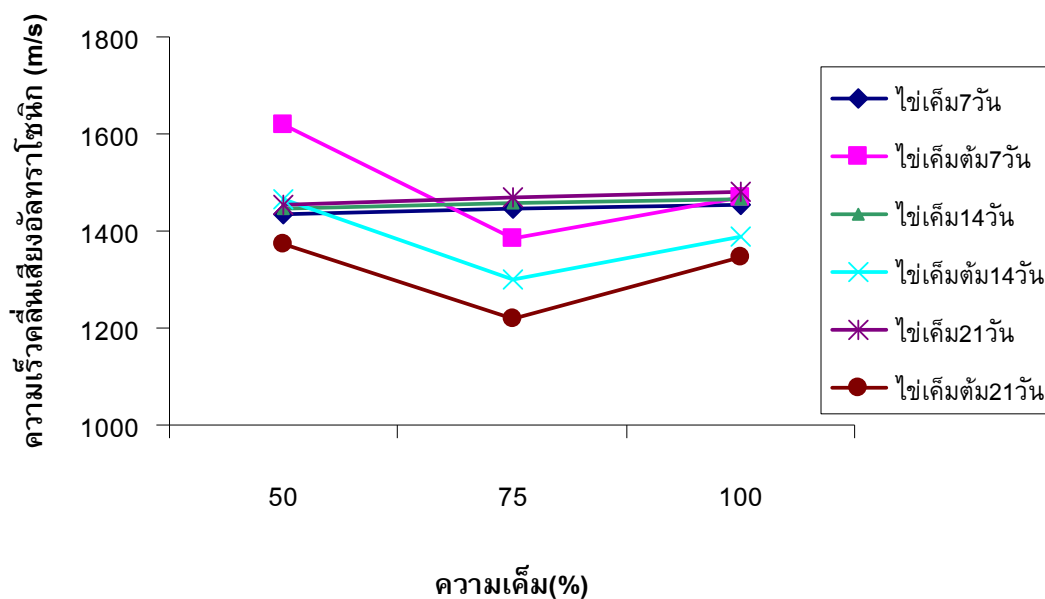
เนื่องจากค่าบัลค์มอดูลัสแปรผันตรงกับค่าความเร็วของคลื่นเสียงและความหนาแน่นของไข่เค็มต้ม เมื่อความหนาแน่นของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มก็แปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ ดังนั้น ค่าบัลค์มอดูลัสของไข่เค็มต้มจึงแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือด้วย

4.3.3 การเปรียบเทียบผลของความเค็มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม



ภาพประกอบ 51 เปรียบเทียบความหนาแน่นของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม

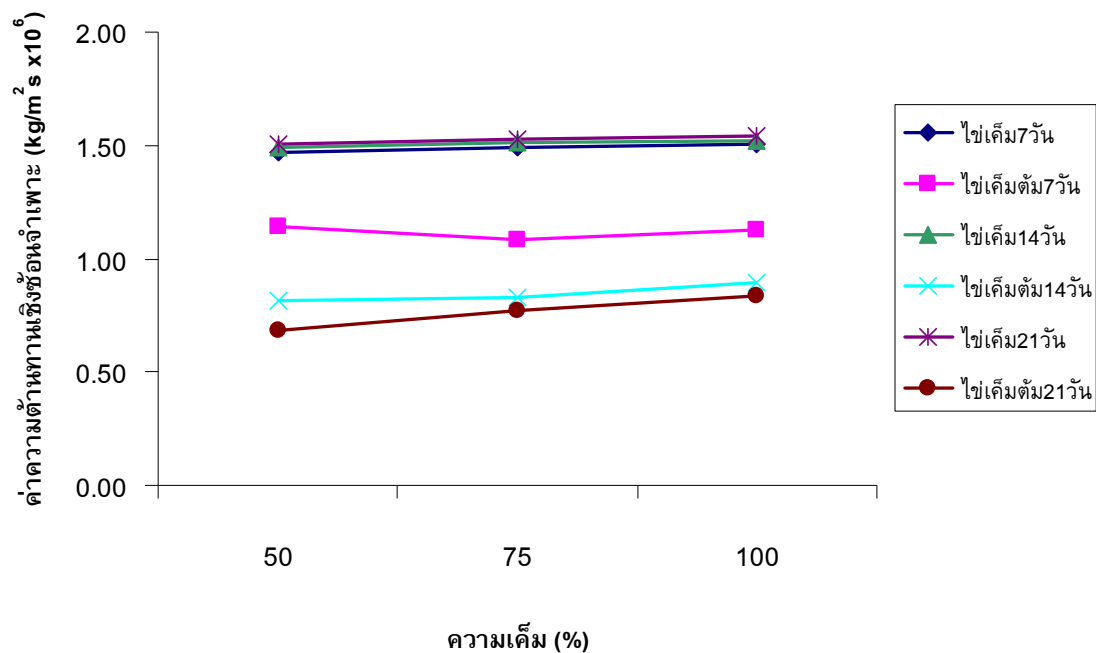
จากภาพประกอบ 51 จะเห็นว่าไข่เค็มดิบมีความหนาแน่นมากกว่าไข่เค็มต้ม เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาเก็บค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบ พบว่า ความหนาแน่นของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ แสดงว่าเมื่อเวลาผ่านไป เกลือแทรกซึมเข้าไปในไข่ได้มากขึ้น ความหนาแน่นของไข่จึงเพิ่มมากขึ้น แต่ความหนาแน่นของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ เนื่องจากปริมาณเกลือที่แทรกซึมเข้าไปในไข่ขาว จะทำให้เนื้อของไข่ขาวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เปื่อยยุ่ยตามปริมาณของเกลือที่แทรกซึมเข้าไป นั่นคือ เมื่อเวลามากขึ้น ปริมาณเกลือมากขึ้น ความหนาแน่นของไข่เค็มต้มจึงลดลง



ภาพประกอบ 52 เปรียบเทียบความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม

จากภาพประกอบ 52 จะเห็นว่าเมื่อความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ และระดับความเค็มของน้ำเกลือ แต่ในไข่เค็มต้ม พบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกแปรผกผันกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ และมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับความเค็ม กล่าวคือ ที่ระดับความเค็ม 50% มีค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกมากที่สุด รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ

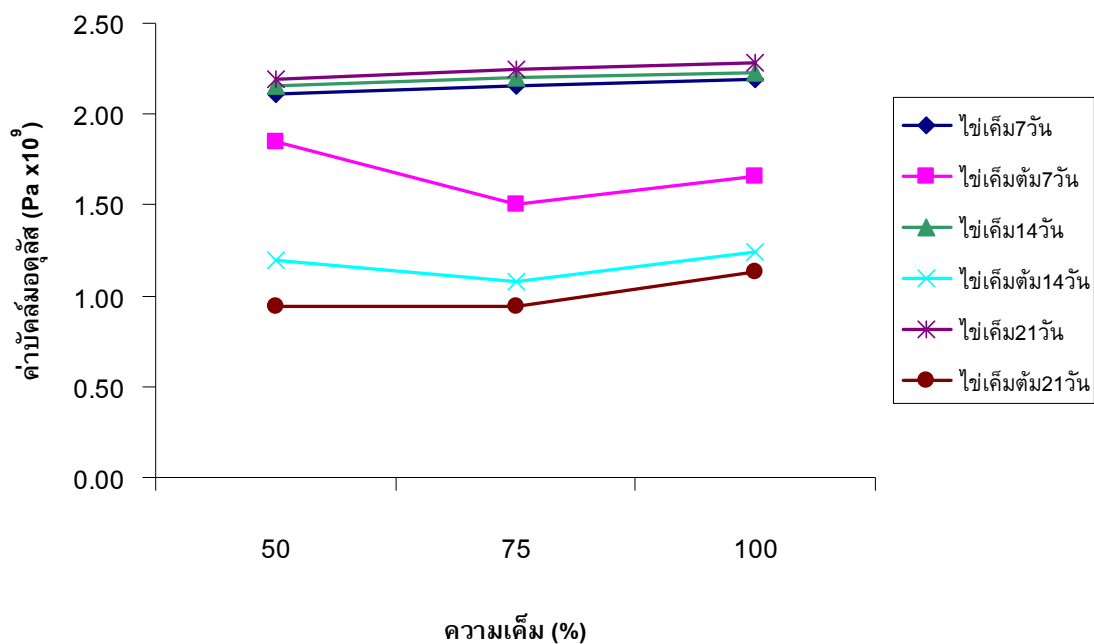
เนื่องจากการเดินทางของเสียงอาศัยการสั่นของโมเลกุลของตัวกลางดังนั้นเสียงจะเดินทางได้เร็วขึ้นหากตัวกลางมีความหนาแน่นมาก ทำให้เสียงเดินทางในของแข็งได้เร็วกว่าในของเหลว จากการทดลอง ที่ระดับความเค็ม 50% เวลา 7 วัน ไข่เค็มต้มมีความหนาแน่นมากที่สุด ความเร็วคลื่นเสียงจึงมากที่สุดด้วย



ภาพประกอบ 53 เปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม

จากภาพประกอบ 53 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลา และระดับความเค็มของน้ำเกลือ แต่ในไข่เค็มต้ม พบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะแปรผกผันกับเวลา และมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับระดับความเค็ม

ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของเสียง แสดงถึงสมบัติในการต้านทานเสียงและแปรผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงและความหนาแน่นของตัวกลาง ดังนั้น ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะของไข่เค็ม จึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเร็วคลื่นเสียงของไข่เค็ม



ภาพประกอบ 54 เปรียบเทียบค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้ม

จากภาพประกอบ 54 จะเห็นว่า ค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลา และระดับความเค็มของน้ำเกลือ แต่ในไข่เค็มต้ม พบว่าค่าบัลค์มอดุลัสแปรผกผันกับเวลา เนื่องจากเกลือที่ซึมเข้าไปในไข่ขาวจะดึงน้ำออกจากโปรตีนไข่ขาวทำให้อนุภาคโปรตีนเล็กลง ความหนืดไข่ขาวจึงลดลง เนื้อสัมผัสของไข่ขาวจะเปลี่ยนจากเนื้อสัมผัสที่มีลักษณะแข็งเกาะรวมตัวกันแน่น จนมีเนื้อสัมผัสนุ่ม การเกาะรวมตัวกันน้อยลง เนื่องจากเกลือซึมเข้าไปทำให้ไข่ขาวเหลวขึ้น เมื่อนำมาต้มจะทำให้เนื้อสัมผัสนุ่ม

ค่าบัลค์มอดุลัส แสดงถึงสมบัติค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ และแปรผันตรงกับค่าความเร็วคลื่นเสียงและความหนาแน่นของตัวกลาง ดังนั้น ค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็ม จึงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับความเร็วคลื่นเสียงของไข่เค็ม

4.3.4 ผลการตรวจสอบความเค็มของไข่ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก

การทดลองของชิและเซง (Chi; & Tseng. 1998) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของไข่แดงเค็มโดยศึกษาทั้งไข่เป็ดและไข่ไก่เปรียบเทียบกับกัน โดยทำไข่เค็มแบบการพอกดิน ใช้อัตราส่วนของดินต่อเกลือต่อน้ำ 2 : 2 : 1 พอกไข่ที่อุณหภูมิ 20 – 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 49 วัน พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ NaCl ในไข่เค็ม ปรากฏดังภาพประกอบ 55

การอ่านข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง NaCl (%) กับเวลา (ภาพประกอบ 55) พบว่าที่เวลา 7 วัน มีปริมาณ NaCl ในไข่ขาวของไข่เป็ด ประมาณ 2.5 % ที่เวลา 14 วัน มีปริมาณ NaCl ในไข่ขาวของไข่เป็ด ประมาณ 5 % และที่เวลา 21 วัน มีปริมาณ NaCl ในไข่ขาวของไข่เป็ด ประมาณ 5.5% ที่เวลา 28 วัน มีปริมาณ NaCl ในไข่ขาวของไข่เป็ดประมาณ 7.5%

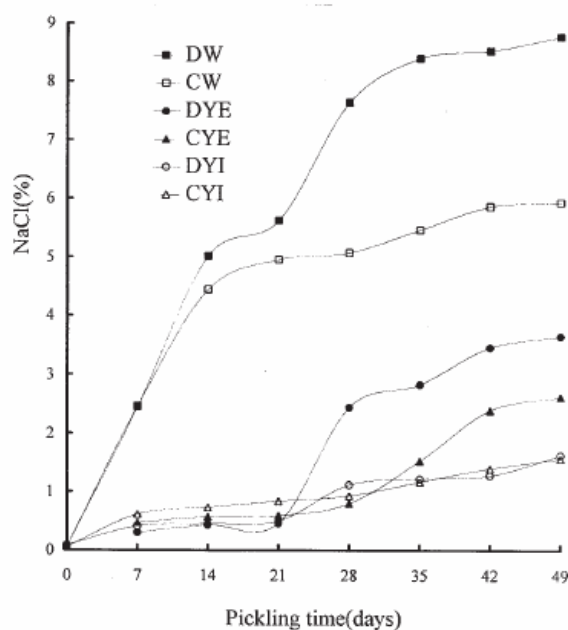


Fig. 3—Increase in salt (NaCl) content of salted eggs during pickling. (DW = duck egg white; CW = chicken egg white; DYE = exterior duck egg yolk; DYI = interior duck egg yolk; CYE = exterior chicken egg yolk; CYI = interior chicken egg yolk).

ภาพประกอบ 55 การเพิ่มขึ้นของปริมาณเกลือในไข่เค็มกับเวลา

ที่มา : Chi; & Tseng. (1998: 29)

การทดลองของไลและคณะ (Lai; et al. 1999) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไข่แดงของไข่เป็ด ใช้วิธีการทำไข่เค็มแบบแช่ในน้ำเกลือความเข้มข้น 26% ที่อุณหภูมิ 15 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณของเกลือในไข่ขาวและไข่แดงที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที เพิ่มขึ้นถึง 14.8 และ 8.9% ตามลำดับระหว่างที่แช่ในน้ำเกลือตลอด 24 สัปดาห์ ดังแสดงในภาพประกอบ 56

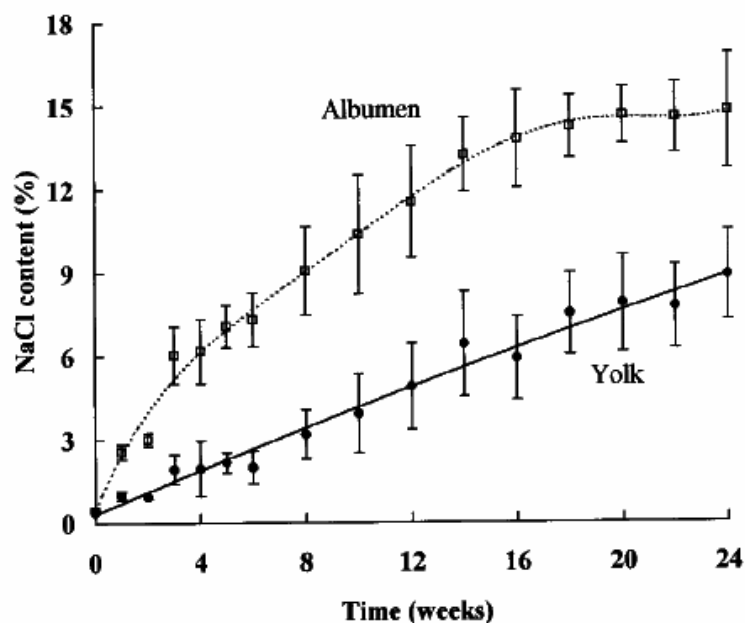


Figure 1. Change of NaCl content in albumen and yolk during long-term brining.

ภาพประกอบ 56 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเกลือในไข่ขาวและไข่แดงขณะแช่ในน้ำเกลือเป็นเวลา 24 สัปดาห์

ที่มา : Lai; et al. (1999: 733)

จากภาพประกอบ 56 พบว่า ปริมาณของเกลือในไข่ขาวที่เวลา 4 สัปดาห์ (28 วัน) มีค่า 6.6% (Lai; et al. 1999)

เปรียบเทียบปริมาณของเกลือในไข่ขาวของไข่เป็ดที่ได้จากการทำไข่เค็มแบบแช่ในน้ำเกลือ และแบบพอกดิน พบว่า ที่เวลา 28 วัน ปริมาณเกลือในไข่ขาวที่ได้จากการแช่ในน้ำเกลือ คือ 6.6% ปริมาณเกลือในไข่ขาวที่ได้จากการพอกดิน คือ 7.5% ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณเกลือในไข่ขาวที่ได้จากการทำไข่เค็มทั้ง 2 วิธีไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มกับปริมาณของเกลือในไข่

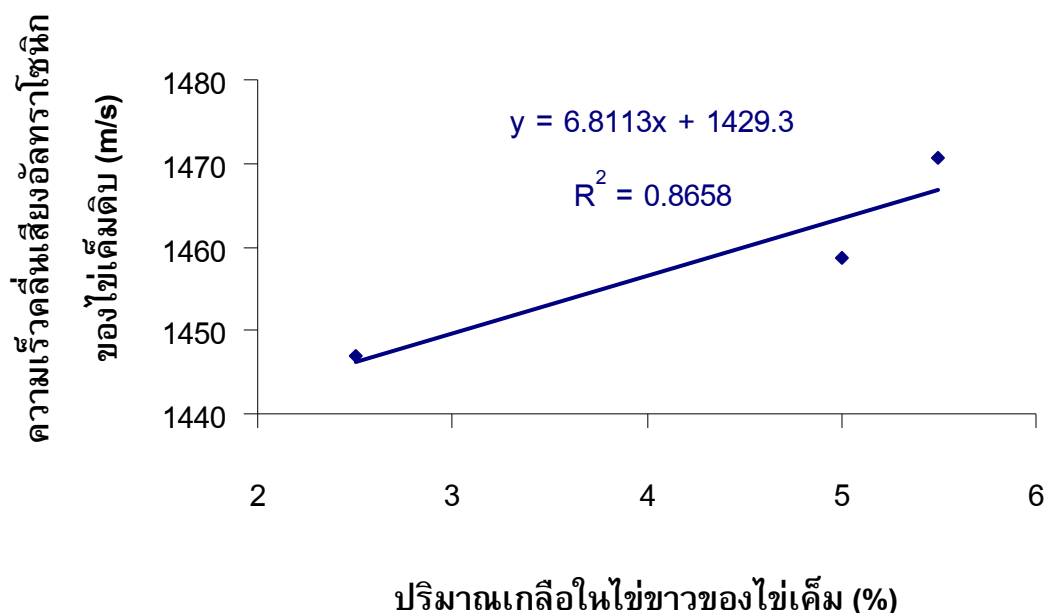
นำข้อมูลที่อ่านได้จากกราฟดังแสดงในภาพประกอบ 55 – 56 มาเปรียบเทียบกับค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่ขาวของไข่เค็มดิบที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ที่ระดับความเค็ม 75% (เทียบเท่ากับ 27% NaCl) ผลปรากฏดังแสดงในตาราง 23

ตาราง 23 ปริมาณเกลือและความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่ที่เวลา 7 วัน 14 วันและ 21 วัน

เวลา (วัน)	ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ^a (m/s)	ปริมาณเกลือในไข่ขาว ^b (%)
7	1447.06	2.5
14	1458.67	5.0
21	1470.59	5.5

หมายเหตุ ^aคือความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่ขาวของไข่เค็มดิบที่ความเค็ม 75%

^bคือปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็มที่ได้จากการอ่านกราฟในภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบกับปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็ม ที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน (จากซ้ายไปขวา) ตามลำดับ

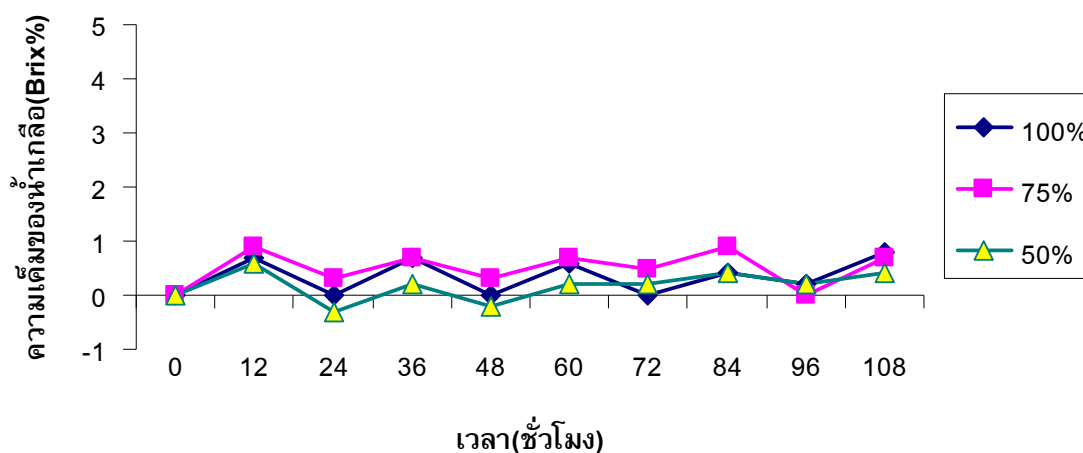
จากภาพประกอบ 57 พบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบและปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็มมีความสัมพันธ์กันแบบเป็นเชิงเส้น สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ (y) กับปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็ม (x) ได้ คือ $y = 6.8113x + 1429.3$ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ร้อยละ 93.04 แสดงว่า เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถตรวจสอบความเค็มของไข่ได้

การตรวจสอบความเค็มของไข่โดยวิธีการนี้อาจไม่มีความแม่นยำและเหมาะสมนัก เนื่องจากไม่ใช่ปริมาณเกลือในไข่เค็มที่ได้จากการศึกษาของผู้วิจัยเอง เป็นเพียงการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองของชิและเซง (Chi; & Tseng, 1998) ไลและคณะ (Lai; et al. 1999) มาเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสอดคล้องกัน ซึ่งสภาวะแวดล้อมของการทดลองแต่ละครั้งก็มีความแตกต่างกันในหลายๆปัจจัย ดังนั้นความสัมพันธ์ที่ได้นี้จึงเป็นเพียงการแสดงให้เห็นว่า เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถตรวจสอบความเค็มของไข่ได้

เหตุผลที่ผู้วิจัยไม่เลือกใช้ปริมาณของเกลือในไข่ขาวที่ได้จากการทดลองของไลและคณะ (Lai; et al. 1999) ซึ่งเป็นการทำไข่เค็มแบบแช่น้ำเกลือเหมือนกัน เนื่องจากการทดลองของไลและคณะ มีข้อมูลปริมาณเกลือในไข่ขาวเทียบกับเวลาเป็นสัปดาห์ ซึ่งในการทดลองวัดค่าความเร็วคลื่นเสียงของไข่ขาวนั้นผู้วิจัยวัดที่เวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ข้อมูลจากการทดลองของไลและคณะ จึงไม่มีความละเอียดพอที่จะนำมาเทียบเคียงได้

4.4 ผลการศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือที่ระดับความเค็มต่าง ๆ

ผลการศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไขโดยดองไขในน้ำเกลือที่มีความเค็ม 50% 75% และ 100% เป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง โดยดองที่อุณหภูมิปกติ (22 – 27 องศาเซลเซียส) แล้ววัดความเค็มของน้ำเกลือโดยเครื่องมือวัดความเค็มที่ระยะเวลา 0 3 6 9 12 15 18 21 24 27 30 33 36 42 48 54 60 72 84 และ 96 ชั่วโมง ผลการศึกษาปรากฏดังภาพประกอบ 58



ภาพประกอบ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค็มของน้ำเกลือภายในไขกับเวลา

จากภาพประกอบ 58 พบว่า การศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไขโดยใช้เครื่องมือวัดความเค็มแบบ Hand Held Refractometer Operation Instructions ซึ่งเครื่องมือนี้มีค่าความละเอียดของเครื่องมือคือ 0.2 Brix% ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทดลองพบว่าค่าความเค็มที่วัดมีความแปรปรวนสูงมากเนื่องจากข้อจำกัดของการควบคุมอุณหภูมิของน้ำเกลือที่ใช้ในการทำไขเค็ม (22 – 27 องศาเซลเซียส) แต่งานวิจัยของ วรพินิต ลิ้มปภาส (2547: 49 – 50) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำเกลือที่มีต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงของเกลือในไขแดงเค็มโดยการแยกดองเฉพาะส่วนของไขแดงดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 15 25 35 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งพบว่า ไขแดงเค็มมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นยังคงมีปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ช้ากว่า 3 ชั่วโมงแรก โดยไขแดงเค็มที่ดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 25 และ 35 เปอร์เซ็นต์ มีการแพร่ของเกลือใกล้เคียงกันและมีการแพร่ของเกลือเร็วกว่าไขแดงเค็มที่ดองในน้ำเกลือความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพของไข่ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก โดยแช่ไข่ในน้ำเกลือที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100% เป็นเวลา 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ในภาวะอุณหภูมิปกติ (20 – 27 องศาเซลเซียส)

โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่

ขนาดของไข่เปิดเทียบตามค่าน้ำหนักมาตรฐานของไข่ไก่ในสหรัฐอเมริกา จัดอยู่ในกลุ่มไข่ใหญ่มาก (เบอร์ 1) และไข่ใหญ่พิเศษ (เบอร์ 0) จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Scheffé พบว่า ค่าของน้ำหนัก ความกว้าง ความยาว พื้นที่ผิว ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่ ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนัก ความกว้าง ความยาว พื้นที่ผิว ปริมาตร และความหนาแน่นของไข่ที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดกับการคำนวณตามทฤษฎีของปากเนลลี และคณะ (Paganelli; Olszowka; & Ar. 1974: 319 – 325) พบว่า มีความสอดคล้องกัน สำหรับผลการศึกษาอิทธิพลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไข่ขาวและไข่แดงที่ระยะเวลาต่างๆ เปรียบเทียบกัน โดยการทำให้สุกในน้ำ พบว่า ไข่เปลี่ยนสภาพไปจากธรรมชาติและแข็งตัว เนื้อสัมผัสของไข่ต้มแตกต่างกันตามอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ต้ม ระยะเวลาที่ต้ม และคุณภาพของไข่ที่นำมาต้ม การต้มไข่นานกว่า 25 นาที พบว่า สีของชั้นผิวไข่แดงที่ติดกับไข่ขาวเปลี่ยนจากสีไข่แดงปกติเป็นสีเขียวคล้ำ ซึ่งอาจเกิดมาจากการปฏิกิริยาของเหล็กกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (รัชนี้ ตันตะพานิชกุล. 2544) ผลการศึกษาดูอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไข่ขาวและไข่แดง พบว่า เมื่อแช่ไข่ในน้ำเกลือ ซึ่งมีความเข้มข้นของเกลือมากกว่าภายในไข่ จะทำให้เกิดการดึงน้ำออกและโปรตีนบางส่วนของไข่ขาวและไข่แดงละลายออกมาด้วยแรงดันออสโมติก โดยผ่านเยื่อเลือกผ่านของเปลือกไข่ ทำให้น้ำหนักของไข่ลดลง และเกลือจะแทรกซึมเข้าไปในไข่ขาวและไข่แดง ทำให้ความเข้มข้นของเกลือภายในไข่สูงขึ้น

สมบัติทางกายภาพของไข่เค็ม

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบ ได้แก่ ความเร็วคลื่นเสียง อัลตราโซนิก ความหนาแน่น ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบ พบว่า สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบขึ้นอยู่กับระดับความเค็มและเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ เมื่อระดับความเค็มและเวลามากขึ้น สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ละน้อย โดยมี

ความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับระดับความเค็มและเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือมีค่ามากที่สุดที่เวลา 21 วัน รองลงมา คือ 7 วัน และ 14 วันตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือ มีค่ามากที่สุดที่เวลา 7 วัน รองลงมาคือ 14 วัน และ 21 วันตามลำดับ ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มดิบเทียบกับระดับความเค็มของน้ำเกลือ พบว่า ที่เวลา 7 วัน และ 21 วันมีค่าใกล้เคียงกัน แต่มีค่ามากกว่าที่เวลา 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบที่เวลาต่างๆ พบว่า ที่ระดับความเค็มเท่ากัน สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบ มีค่าเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก คือ 7 วัน 14 วัน และ 21 วัน ตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบที่ระดับความเค็มต่างๆ พบว่า ที่เวลาเดียวกัน สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบมีค่าเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก คือ 50% 75% และ 100% ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของไข่เค็มดิบแปรผันตรงกับเวลาที่แช่ในน้ำเกลือและระดับความเค็มของน้ำเกลือ สอดคล้องกับการทดลองของวรพินิต ลิ้มภาส (2547) ชิและเซง (Chi; & Tseng, 1998) และไลและคณะ (Lai; et al. 1999) การแช่ไข่ในน้ำเกลือจะทำให้เกลือแทรกซึมเข้าไปในไข่ เมื่อระดับความเค็มและเวลาที่แช่ในน้ำเกลือมากขึ้น เกลือแทรกซึมเข้าไปในไข่ได้มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของไข่เค็มเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรง โดยทั่วไปความเร็วคลื่นเสียงในแต่ละตัวกลางขึ้นอยู่กับค่าความยืดหยุ่นและค่าความหนาแน่นของตัวกลาง เมื่อความหนาแน่นของตัวกลางเกิดการเปลี่ยนแปลง ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันด้วย

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้ม ได้แก่ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ความหนาแน่น ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสของไข่เค็มต้ม พบว่า สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มขึ้นอยู่กับระดับความเค็มและเวลาที่แช่ในน้ำเกลือ โดยมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นต่อกัน เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มที่เวลาต่างๆ พบว่า ที่ระดับความเค็มเท่ากัน สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มแปรผกผันกับเวลาที่แช่ไข่น้ำเกลือ โดยสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มมีค่ามากที่สุดที่เวลา 7 วัน รองลงมา คือ 14 วัน และ 21 วันตามลำดับ สำหรับการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มที่ระดับความเค็มต่างๆ พบว่า ที่เวลาเดียวกัน สมบัติทางกายภาพของไข่เค็มต้มมีค่ามากที่สุดที่ระดับความเค็ม 50% รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ

การลดลงของค่าความหนาแน่นของไข่เค็มต้ม สามารถอธิบายได้ คือ การแพร่ของเกลือเข้าไปในไข่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเกลือ โดยเกลือที่มีความเข้มข้นสูงจะมีอัตราการแพร่สูง ที่ระดับความเค็ม 50% (ประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร) เกลือมีความเข้มข้นน้อย อัตราการแพร่จึงเกิดได้น้อย และที่ระดับความเค็ม 75% (ประมาณ 27 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร)

มีอัตราการแพร่ของเกลือเร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของธาน (Thanh. 1998) นอกจากนี้เมื่อความหนาแน่นของไข่เค็มต้มเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลคัมอดุลัสเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันด้วย

จากการศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบ พบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและความหนาแน่นของไข่เค็มดิบมีความสัมพันธ์ต่อกันเป็นแบบเชิงเส้น โดยพบว่า เมื่อระดับความเค็มและเวลาที่แช่ในน้ำเกลือมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกต่อความหนาแน่นจะมากขึ้นด้วย และสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไข่เค็มดิบ (y) กับ ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ (x) ได้ คือ $y = 0.3621x + 507.25$ ซึ่งสมการนี้มีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ร้อยละ 98.93 ในไข่เค็มต้มพบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกและความหนาแน่นแตกต่างจากในไข่เค็มดิบ คือ ที่ระดับความเค็มเท่ากัน ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มต้มมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับความหนาแน่นของไข่เค็มต้ม โดยที่ระดับความเค็ม 50% มีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกเทียบกับความหนาแน่นของไข่เค็มต้มมากที่สุด รองลงมาคือ 100% และ 75% ตามลำดับ ดังนั้นเทคนิคอัลตราโซนิกสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มดิบและไข่เค็มต้มได้

การตรวจสอบความเค็มของไข่ด้วยเทคนิคอัลตราโซนิก พบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็ม ซึ่งได้จากกราฟการเพิ่มขึ้นของปริมาณเกลือในไข่เค็มกับเวลาจากงานวิจัยของชิและเซง (Chi; & Tseng. 1998) และสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มดิบ (y) กับปริมาณเกลือในไข่ขาวของไข่เค็ม (x) ได้ คือ $y = 6.8113x + 1429.3$ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำนายความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ร้อยละ 93.04 แสดงว่า เทคนิคอัลตราโซนิกสามารถตรวจสอบความเค็มของไข่ได้

การแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไข่

จากการศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไข่โดยใช้เครื่องมือวัดความเค็มแบบ Hand Held Refractometer Operation Instructions ซึ่งเครื่องมือนี้มีค่าความละเอียดของเครื่องมือคือ 0.2 Brix% ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จากการทดลอง พบว่า ค่าความเค็มที่วัดมีความแปรปรวนสูงมาก เนื่องจากข้อจำกัดของการควบคุมอุณหภูมิของน้ำเกลือที่ใช้ในการทำไข่เค็ม (22 – 27 องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ พบว่า ความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกของไข่เค็มมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับปริมาณของเกลือในไข่ ซึ่งน่าจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

ข้อเสนอแนะ

1. หากมีการวัดปริมาณเกลือที่ผ่านเข้าไปในไข่โดยตรงแทนการวัดปริมาณน้ำเกลือที่อยู่ภายนอกไข่ จะทำให้สามารถศึกษาการแพร่ของน้ำเกลือเข้าไปในไข่ได้ นอกจากนี้ควรมีวิธีการวัดที่แม่นยำและละเอียดมากขึ้น และควรเพิ่มระยะเวลาในการวัดปริมาณน้ำเกลือจนถึงจุดสมดุลของการแพร่ (ความเข้มข้นของน้ำเกลือคงที่) เพื่อจะได้ทราบระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำไข่เค็ม
2. ควรปรับภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของไข่เค็มและไข่ต้มให้อยู่ในภาวะเดียวกัน
3. ควรมีการนำเทคนิคทางอัลตราโซนิกไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาภาวะการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของไข่เค็มเพื่อศึกษาอิทธิพลของความเค็มต่อการเกิดการแข็งตัวในไข่
4. วิธีการทางอัลตราโซนิกสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในวงการวิทยาศาสตร์การอาหารได้ โดยนำค่าตัวแปรทางอัลตราโซนิกไปวิเคราะห์ร่วมกับปริมาณอื่น ๆ ทางวิทยาศาสตร์การอาหารหรือองค์ประกอบทางเคมี เช่น ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิกกับความหนาแน่น ค่าบัลค์มอดุลัสกับความยืดหยุ่นของอาหาร การหาปริมาณของเกลือในอาหารด้วยการวัดค่าความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- เข็มทอง นิ่มจินดา. (2538). *ทฤษฎีอาหาร*. กรุงเทพฯ: ภาคพัฒนาตำราและเอกสารวิชาการ
หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู.
- ชมภู ยิ้มโต. (2543). *การพัฒนาไข่เค็มชนิดโซเดียมต่ำพอกด้วยเยื่อฟางข้าว*. วิทยานิพนธ์ วท.ม.
(พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร
- ณัฐมล จินดาพรรณ. (2549). *องค์ประกอบและสมบัติในการทำหน้าที่ของไข่แดง*. ในวารสาร
เทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม 3(1): 14 – 20.
- ณรงค์ นิยมวิทย์. (2538). *องค์ประกอบและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของอาหาร*.
พิมพ์ครั้งที่1. ฟอรัมแมตพริ้นติ้ง. กรุงเทพฯ: คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิธยา รัตนานนท์. (2544). *หลักการแปรรูปอาหารเบื้องต้น*. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.
กรุงเทพฯ: 54.
- นุชรี เบญจนาวัตร. (2529). *หน่วยที่ 9 ไข่ : 527 – 623 ใน เอกสารการสอนชุดวิชาอาหาร
และโภชนาการ หน่วยที่ 8 – 15 เล่ม 2. สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์*
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. กรุงเทพฯ.
- ประภาษ มุลนา. (2547). *การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัสของคอลลอยด์
นมโดยเทคนิคอัลตราโซนิก*. วิทยานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิต
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- รัชนี ตันทะพานิชกุล. (2537). *เคมีอาหาร*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย
รามคำแหง. กรุงเทพฯ.
- วรรณวิบูลย์ กาญจนกฤษ. (2543). *ไข่และผลิตภัณฑ์*. กรุงเทพฯ: ใน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาหาร. หน้า 230 – 247. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วรพินิต ลิ้มปภาส. (2547). *การพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตไข่แดงเค็ม*.
วิทยานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมอาหาร). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. ถ่ายเอกสาร
- ศุภชัย ชุ่มใจ. (2550). *การศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติการนำไฟฟ้าของน้ำเกลือจาก
อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน*. สารนิพนธ์ กศ.ม. (วิทยาศาสตร์ศึกษา). กรุงเทพฯ: บัณฑิต
วิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- สุรเชษฐ์ กฤษแสงโชติ. (2549). *การศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่โดยเทคนิคอัลตรา
โซนิก*. วิทยานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.

- สุวรรณ เกษตรสุวรรณ. (2516). โครงสร้างของไข่สัตว์ปีก. ข่าวสารเกษตรศาสตร์ 18(5): 52 – 72
- _____ (2529). ไข่และเนื้อไก่. อมรการพิมพ์. กรุงเทพฯ: 382
- เสาวคนธ์ วงศาสุลักษณ์, ทิพาพร อยู่วิทยา, ศักรินทร์ ภูมิรัตน์, ปาริฉัตร หงสประภาส. (2548). การเตรียมเจลและฟิล์มประกอบจากไข่ขาวกับแป้งมันสำปะหลังโดยการเหนียวนำด้วย กลีโกลิเดียมคลอไรด์. สืบค้นเมื่อ 20 เมษายน 2552, จาก http://www.engineer.msu.ac.th/CD_Conference/conference/PROCEEDING/
- เสาวภา ยววุฒโฒ. (2538). การพัฒนาดินสำเสร็จรูปในการผลิตไข่เค็ม. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร). กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Chen, X.D.; Freeman Y.; Guo.F.; & Chen.P. (1999). *Diffusion of sodium chloride through chicken eggshell in relation to an ancient method of egg preservation*. Trans IChemE. 77: Part C.
- Chi, S.P.; & Tseng, K.H. (1998). *Physicochemical Properties of Salted Pickled Yolks from Duck and Chicken Eggs*. Journal of Food Science. 63(1): 27-30.
- CMC Food ,Inc., *Egg Facts* [outline], Available:<http://www.cmcfood.com>[2002,December 7].
- Dickinson, E.; & McClements D.J. (1995). *Advance Food colloids*. pp.191-192. Glasgow: Blackie academic & professional.
- Johg-Rim BAE.; & Jeong-Koo Kim. (1998). *Ultrasonic Velocity and Absorption Measurements upon a gelaton of egg White*. Journal of the Korean Physical Society. 32(5): 686-690.
- Lai, K.M.; Chi, S.P.; & Ko, W.C. (1999). *Changes in Yolk States of Duck Egg during Long-Term Brining*. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 47: 733-736.
- Malcolm J W Povey. (1996). *A Bats Eye on Food*. Retrieved May 2, 2008, from <http://www.food.leeds.ac.uk/mp/Batseye2.htm>
- Paganelli, C. V.; Olszowka, A.; & Ar, A. (1974). *The Avian Egg: Surface Area, Volume, and Density. Brining*. J. Agric. Food Chem. 47: 733 – 736.
- Romanoff, A.L.; & Romanoff, A.J. (1949). *The Avian Egg*. New York. John Wiley and Sons Inc. 918.
- Thammarat Kaewmanee.; Soottawat Benjakul.; & Wonnop Visessanguan. (2008). *Changes in chemical composition, physical properties and microstructure of duck egg as influenced by salting*. Food Chemistry. 560 – 569.

Thanh, V.T. (1998). *Quality Changes During Salt Curing of Egg Yolk*. Master of Science Thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok: Thailand.

Weijers, M. (2003). *Protein Aggregation and Gelation*. [Online]. Available:
<http://www.fenk.wau.nl/onderzoek/projecten/Weijers.html> [2009, March 30].
<http://th.wikipedia.org/wiki/>

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตาราง ก ค่า Time duration , ΔT (μs) ของไข่เค็มที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100%

เวลา(วัน)	ความเค็ม(%)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย
7	50	42.47	41.53	41.53	41.84
	75	42.93	40.73	40.73	41.46
	100	41.27	41.20	41.20	41.22
14	50	42.07	41.20	41.20	41.49
	75	41.00	41.67	40.73	41.13
	100	41.01	41.01	40.80	40.94
21	50	41.27	41.20	41.20	41.22
	75	40.60	41.00	40.80	40.80
	100	40.40	40.60	40.53	40.51

ตาราง ข ค่า Time duration , ΔT (μs) ของไข่เค็มต้มที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100%

เวลา(วัน)	ความเค็ม(%)	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ค่าเฉลี่ย
7	50	7.19	7.91	6.97	7.36
	75	7.97	8.91	8.92	8.60
	100	8.03	8.45	7.85	8.11
14	50	8.17	8.01	8.21	8.13
	75	8.47	9.93	9.03	9.14
	100	8.67	8.47	8.60	8.58
21	50	9.87	7.43	8.67	8.66
	75	9.70	9.70	9.87	9.76
	100	8.80	8.87	8.83	8.83

ตาราง ค ค่าความหนาแน่นของไข่เค็มที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100%

เวลา (วัน)	ความเค็ม (%)	มวล(g)				ความหนาแน่น (kg/m ³)
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
7	50	25.653	25.650	25.641	25.648	1025.920
	75	25.865	25.734	25.713	25.771	1030.827
	100	25.863	25.855	25.875	25.864	1034.573
14	50	25.775	25.781	25.776	25.777	1031.093
	75	25.877	25.874	25.876	25.876	1035.027
	100	25.962	25.954	25.960	25.959	1038.347
21	50	25.904	25.900	25.888	25.897	1035.893
	75	25.998	25.910	25.992	25.967	1038.667
	100	26.000	25.998	26.100	26.033	1041.307

ตาราง ง ค่าความหนาแน่นของไข่เค็มต้มที่ระดับความเค็ม 50% 75% และ 100%

เวลา (วัน)	ความเค็ม (%)	มวล(g)				ความ หนาแน่น (kg/m ³)
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย	
7	50	2.272	2.277	2.271	2.273	706.04
	75	2.525	2.535	2.513	2.524	783.99
	100	2.480	2.483	2.480	2.481	770.53
14	50	1.804	1.796	1.780	1.794	557.05
	75	2.061	2.059	2.044	2.055	638.16
	100	2.068	2.075	2.090	2.078	645.31
21	50	1.608	1.605	1.609	1.607	499.21
	75	2.046	2.044	2.042	2.044	634.82
	100	2.404	2.392	2.390	2.395	623.15

ตาราง จ ค่า Time duration , ΔT (μs) และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก(V) ของน้ำเกลือ
 ป้อนหลวง 1A ในช่วงระดับความเค็ม 0% - 100%

ความเค็ม(%)	คู่ที่1	คู่ที่2	คู่ที่3	ค่าเฉลี่ย	V(m/s)
0	55.2	55.3	55.3	55.3	1447.53
10	54.3	54.4	54.4	54.4	1471.49
20	53.4	53.5	53.6	53.5	1495.33
30	52.6	52.6	52.7	52.6	1519.95
40	51.6	51.8	51.8	51.7	1546.39
50	50.8	50.9	50.9	50.9	1572.74
60	50	50.1	50.1	50.1	1597.87
70	49.2	49.3	49.3	49.3	1623.82
80	48.6	48.6	48.7	48.6	1644.96
90	47.9	48	48	48.0	1667.82
100	46.7	47.3	47.3	47.1	1698.51

ตาราง จ ค่า Time duration , ΔT (μs) และความเร็วคลื่นเสียงอัลตราโซนิก(V) ของน้ำเกลือ
 ป่อหลวง 2A ในช่วงระดับความเค็ม 0% - 100%

ความเค็ม (%)	คู่ที่1	คู่ที่2	คู่ที่3	ค่าเฉลี่ย	V(m/s)
0	55.2	55.3	55.3	55.3	1447.53
10	54.3	54.2	54.2	54.2	1475.11
20	53.2	53.3	53.3	53.3	1501.88
30	52.4	52.4	52.5	52.4	1525.75
40	51.6	51.6	51.6	51.6	1550.39
50	50.7	50.8	50.8	50.8	1575.84
60	49.9	49.9	49.9	49.9	1603.21
70	49.2	49.2	49.2	49.2	1626.02
80	48.4	48.5	48.5	48.5	1650.62
90	47.8	47.8	47.7	47.8	1674.81
100	47.1	47.2	47.3	47.2	1694.92

ตาราง ข ค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือปอหลวง 1A ในช่วงระดับความเค็ม 0% - 100%

ความเค็ม(%)	มวล(g)				ความหนาแน่น (kg/m ³)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
0	24.77	24.71	24.71	24.73	989.19
10	25.26	25.31	25.31	25.29	1011.64
20	25.75	25.77	25.75	25.75	1030.13
30	26.14	26.22	26.18	26.18	1047.20
40	26.64	26.65	26.64	26.64	1065.60
50	27.07	27.10	27.10	27.09	1083.55
60	27.53	27.50	27.53	27.52	1100.76
70	28.01	27.97	28.01	28.00	1119.83
80	28.45	28.41	28.46	28.44	1137.60
90	28.82	28.87	28.88	28.86	1154.31
100	29.35	29.14	29.19	29.23	1169.03

ตาราง ซ ค่าความหนาแน่นของน้ำเกลือป่อหลวง 2A ในช่วงระดับความเค็ม 0% - 100%

ความเค็ม (%)	มวล(g)				ความหนาแน่น (kg/m ³)
	1	2	3	เฉลี่ย	
0	24.76	24.76	24.76	24.76	990.31
10	25.31	25.32	25.12	25.25	1009.88
20	25.84	25.83	25.78	25.81	1032.56
30	26.27	26.25	26.17	26.23	1049.04
40	26.77	26.69	26.75	26.74	1069.55
50	27.25	27.23	27.25	27.24	1089.76
60	27.64	27.71	27.75	27.70	1108.03
70	28.21	28.23	28.23	28.22	1128.95
80	28.66	28.69	28.70	28.68	1147.36
90	29.09	29.09	29.09	29.09	1163.60
100	29.55	29.52	29.57	29.55	1181.88

ภาคผนวก ข
การหาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่

ภาคผนวก ข
การหาโครงสร้างทางเรขาคณิตของไข่



ภาพประกอบ ก การหาน้ำหนักของไข่



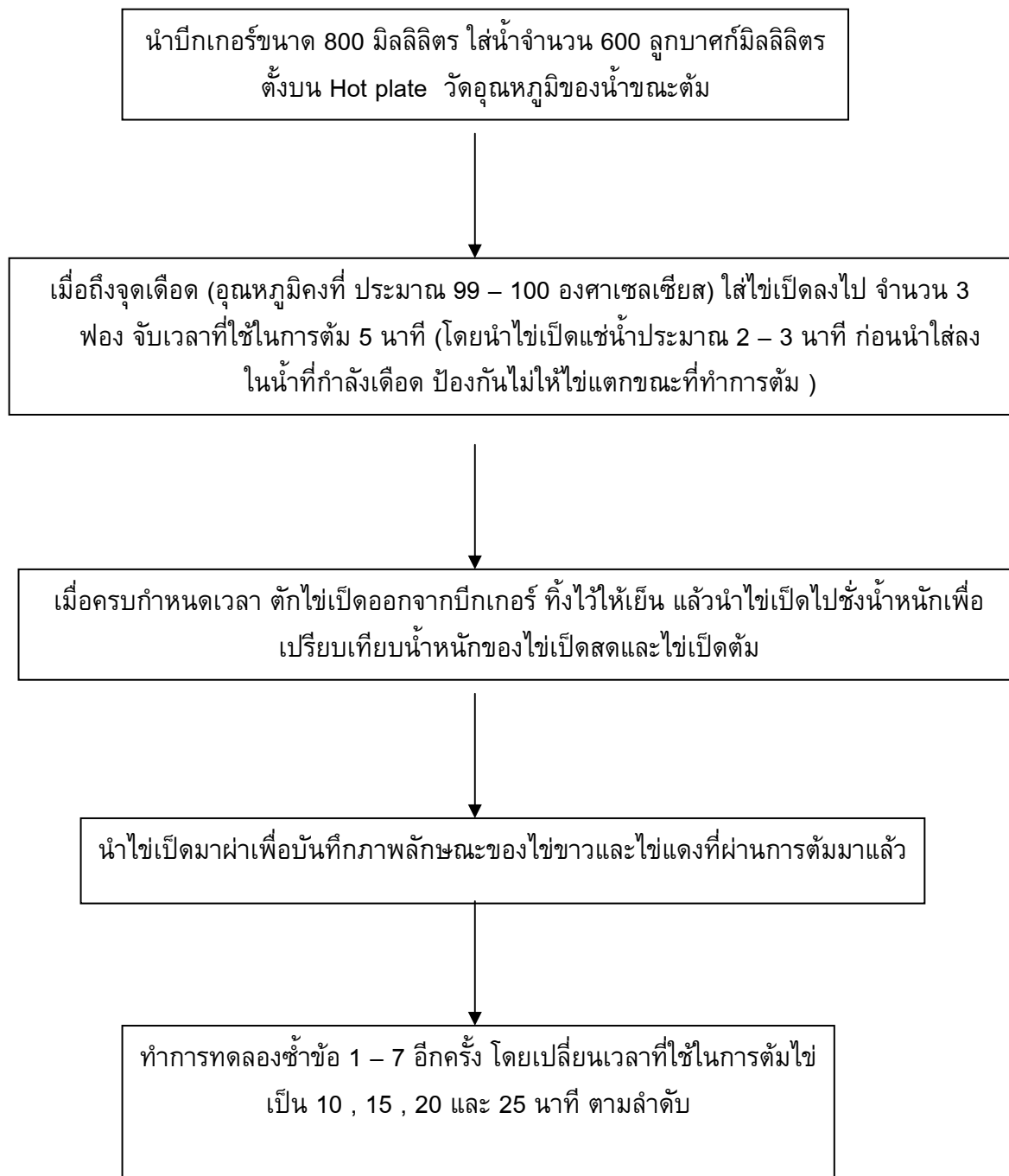
ภาพประกอบ ข การหาความกว้าง(ซ้าย)และความยาว(ขวา)ของไข่โดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์

ภาคผนวก ค
แผนภาพแสดงการต้มไข่

ภาคผนวก ค
แผนภาพแสดงการต้มไข่



ภาพประกอบ ค การต้มไข่ในน้ำเดือด (อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส)

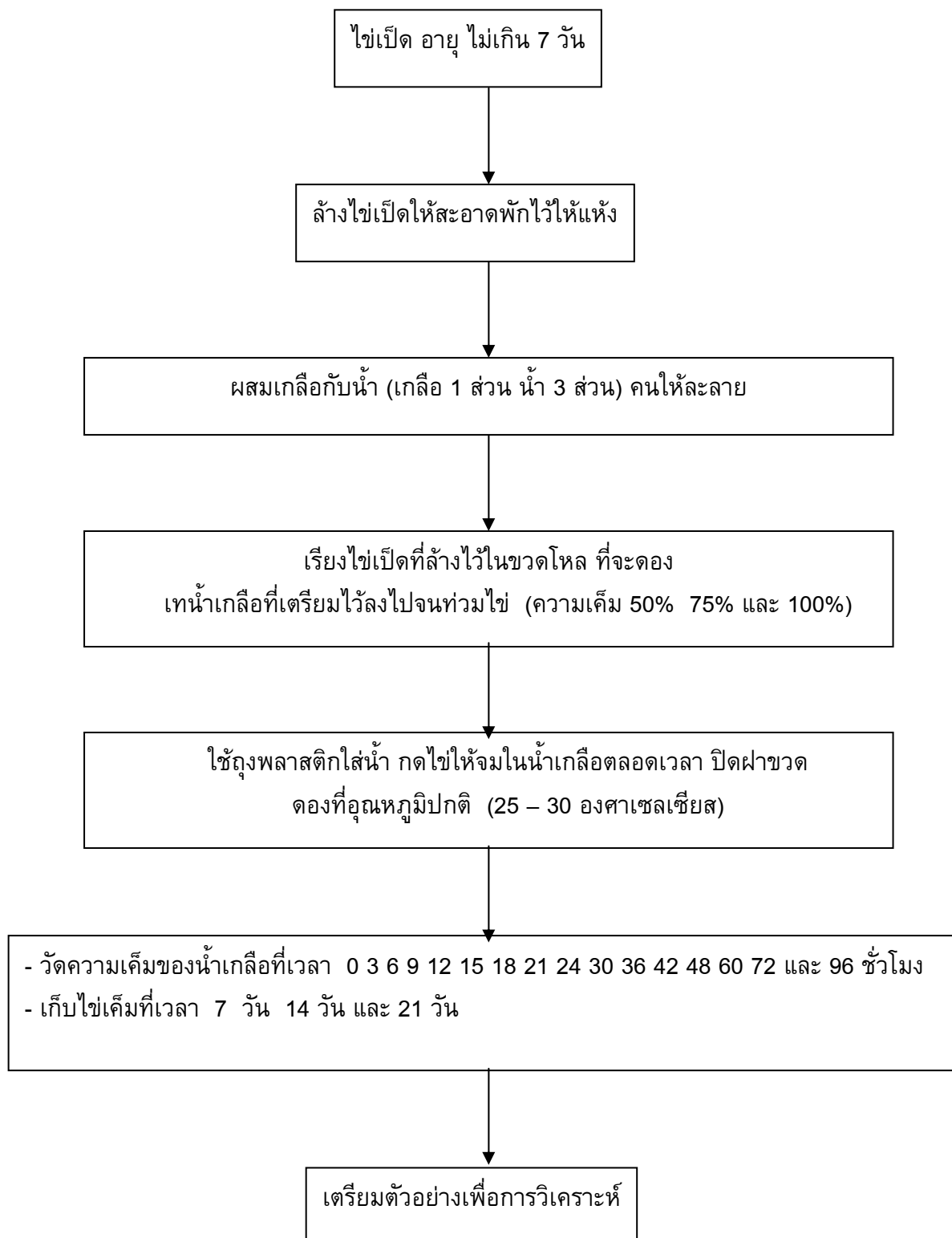


ภาพประกอบ ง ขั้นตอนในการต้มไข่

ภาคผนวก ง
แผนภาพแสดงการทำไขเค็ม

ภาคผนวก ง
แผนภาพแสดงการทำไข่เค็ม





ภาพประกอบ จ ขั้นตอนในการทำไข่เค็ม

ภาคผนวก จ

เครื่องมือวัดความเค็ม (Hand Held Refractometer Operation Instructions)

ภาคผนวก จ

เครื่องมือวัดความเค็ม (Hand Held Refractometer Operation Instructions)



ภาพประกอบ จ เครื่องมือวัดความเค็ม

ประวัติผู้ทำสารนิพนธ์

