



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาเชิงสเปกโทรสโกปีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีน

Spectroscopic Studies of Thai and Chinese Freshwater Cultured Pearl

นามผู้วิจัย นางสาวกฤษณา สุวรรณศิลป์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ยี่วัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ศิวาพร สหวัฒน์, วท.ม.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์สมจิตต์ ปาละกาศ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ศิวาพร สหวัฒน์, วท.ม.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาเชิงสเปกโทรสโกปีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีน

Spectroscopic Studies of Thai and Chinese Freshwater Cultured Pearl

โดย

นางสาวกัญฉิศา สุวรรณศิลป์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2552

ภุชณิศ สุวรรณศิลป์ 2552: การศึกษาเชิงสเปกโทรสโกปีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีน ปรินญาวิทยาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด. 144 หน้า

ในการพัฒนาการเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย จำเป็นต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อทำความเข้าใจในลักษณะเฉพาะของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ในงานวิจัยนี้ทำในลักษณะเชิงเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีน การใช้เทคนิคเชิงสเปกโทรสโกปีจะทำให้สามารถเข้าถึงข้อมูลในระดับจุลภาค เช่น SEM สามารถใช้ดูภาพของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดในบริเวณเล็กๆ ในระดับไมโครเมตร ที่โครงสร้างผิวและโครงสร้างภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีโครงสร้างผิวและโครงสร้างภายใน ไม่แตกต่างกัน XRD ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด โครงสร้างผลึกส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตในรูปแบบอะราโกไนต์ และส่วนน้อยเป็นแบบแคลไซต์ ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดบริเวณเปลือกนอกจะมีโครงสร้างแบบอะราโกไนต์มากกว่าด้านในเมื่อเทียบกับแคลไซต์ ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจะมีปริมาณ Mn มากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนเมื่อวิเคราะห์ด้วยEDXRF ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีเซลล์หน่วยที่ใหญ่กว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เนื่องจากไอออนของ Mn^{2+} มีขนาดโตกว่า Ca^{2+} ในโครงสร้างของอะราโกไนต์ การแทนที่ของ Mn^{2+} ในตำแหน่งของ Ca^{2+} ยืนยันด้วยผลการทดลองจาก ESR นอกจากนี้ สีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เช่น สีม่วง สีชมพู และสีน้ำตาล แสดงพันธะของ C – C และ C = C ในโครงสร้างของโพลีอิน เมื่อวัดด้วยรามานสเปกโทรสโกปี

Pusanisa Suwansil 2009: Spectroscopic Studies of Thai and Chinese Freshwater Cultured Pearl. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Mr. Wiwat Wongkokua, Ph.D. 144 pages.

In order to develop Thai freshwater cultured pearl farming, it is essential and to for understanding the characteristic of pearl and shell. This research was carried out by comparative study between Thai and Chinese cultured pearl. Spectroscopic technics enable us to access microscopic information. SEM was employed to see small area on pearl surface in the level of micrometer. The surface and cross section of Thai and Chinese cultured pearl showed no difference. The crystal structure of pearl and shell were studied by using XRD. The majority of pearl crystal was aragonite while the minority was calcite. The outer shell of pearl exhibits more aragonite compared to the inner shell. Thai cultured pearl had more Mn^{2+} than Chinese cultured pearl analized by XRF. This caused the bigger unit cell compared to Chinese cultured pearl because the Mn^{2+} is bigger than the Ca^{2+} . The substitution of Mn^{2+} in the site of Ca^{2+} in the aragonite structure was confirmed by ESR. Moreover, the pearl colors such as purple, pink and brown showed the bonding of C – C and C = C which are in the structure of polyenes measured by Raman spectroscopy.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ดร.วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจและแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ศิวพร สหวัฒน์ และอาจารย์ดร.สมจิตต์ ปาละกาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำในการทำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้อำนวยการศูนย์พัฒนาประมงน้ำจืด อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดกาญจนบุรี และนักวิชาการประมงทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในสถาบันการศึกษาอันทรงเกียรติแห่งนี้ ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รุ่นพี่ เพื่อนๆและน้องๆทุกคน สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่ได้ช่วยเหลือดูแลและให้กำลังใจกำลังใจตลอดช่วงเวลาการศึกษาและช่วงเวลาทำวิทยานิพนธ์

ภูษณิศา สุวรรณศิลป์

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	42
สรุปผลการทดลอง	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	92
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	99
ภาคผนวก ข กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	104
ภาคผนวก ค รามานสเปกโทรสโกปี	112
ภาคผนวก ง การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน	121
ภาคผนวก จ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี	128
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	144

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงาน	12
2	ไข่มุกเลียนน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง	30
3	ไข่มุกเลียนน้ำจืดจีนจากท้องตลาด	32
4	ไข่มุกเลียนน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง	34
5	พื้นที่ใต้กราฟของยอดคอสันฐาน ผลึกอะราโกไนต์ และอัตราส่วนระหว่าง ยอดคอสันฐาน ต่อผลึกอะราโกไนต์	46
6	ความเข้ม (%) ของยอดสำหรับแต่ละตัวอย่างในไข่มุกเลียนน้ำจืดไทย ไข่มุก เลียนน้ำจืด จีน เปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดจีน เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล PDF 5-0453	46
7	ข้อมูลโครงสร้างผลึก พารามิเตอร์เซลล์ ขนาดเซลล์หน่วย และค่า R สำหรับ แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างแบบอะราโกไนต์ มีกลุ่มปริภูมิเป็น Pmcn มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก	52
8	ตำแหน่งอะตอมในโครงสร้างผลึกอะราโกไนต์ในไข่มุกเลียนน้ำจืดไทย ไข่มุก เลียนน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดจีน	52
9	ความเข้มของยอด (111) ของผลึกอะราโกไนต์ ยอด (104) ของผลึกแคลไซต์ และ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของยอดผลึกทั้งสอง	54
10	แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุส่วนน้อยในไข่มุกเลียนน้ำจืดไทย ไข่มุก เลียนน้ำจืดจีนเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดจีน (% มวล)	75
11	การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลียนน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืด ของไทยและจีนด้วย XRD	87
12	การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลียนน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืด ของไทยและจีนด้วย SEM	88
13	การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลียนน้ำจืดไทยและจีนด้วยรามาน สเปกโทรสโกปี	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
14	การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ของไทยและจีนด้วย EDXRF	90
15	การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ของไทยและจีนด้วย ESR	91

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	แผนภาพพลังงานของสเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืนและแบบเปล่งออก
2	การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงาน
3	โครงสร้างเปลือกหอยมุก
4	การเกิดของไข่มุก
5	โครงสร้างไข่มุก
6	รูปแบบการหักเหและการแทรกสอดผ่านชั้นมุก
7	การแทรกสอดของแสงที่ตกกระทบภายในชั้นมุก
8	รูปร่างของไข่มุกเลียนน้ำจืด
9	Orthorhombic Bravais Crystal Lattice
10	โครงสร้างผลึกอะราโกไนต์
11	Rhombohedral Bravais Crystal Lattice
12	โครงสร้างผลึกแคลไซต์
13	ตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดไทย
14	เปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดและการกำหนดแกนให้กับตัวอย่างหอยที่ตัดออก
15	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไข่มุกเลียนน้ำจืดจีนสีส้ม (CO)
16	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกนอกของไข่มุกเลียนน้ำจืดจีน (COS)
17	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดจีน (Cshell)
18	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างไข่มุกเลียนน้ำจืดไทยสีขาว (TW)
19	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกนอกของไข่มุกเลียนน้ำจืดไทย (TWS)
20	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดไทย (Tshell)
21	แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง CO, + เป็นผลการทดลอง , _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
22 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง COS, + เป็นผลการทดลอง , _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)	49
23 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง Cshell, + เป็นผลการทดลอง , _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)	50
24 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง TW, + เป็นผลการทดลอง , _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)	50
25 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง TWS, + เป็นผลการทดลอง , _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)	51
26 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง Tshell, + เป็นผลการทดลอง , _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)	51
27 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง TShell แสดงยอด (104) ของ แคลไซต์	54
28 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ A1 มีค่าเฉลี่ยความกว้าง ของร่องเท่ากับ 4.12 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์ เท่ากับ 773 นาโนเมตร	57
29 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ A2 มีค่าเฉลี่ยความกว้าง ของร่องเท่ากับ 4.15 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์ เท่ากับ 560 นาโนเมตร	57
30 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ A3 มีค่าเฉลี่ยความกว้าง ของร่องเท่ากับ 2.05 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์ เท่ากับ 350 นาโนเมตร	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
31	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ B1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 15.9 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 553 นาโนเมตร	58
32	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ B2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 1.99 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 570 นาโนเมตร	59
33	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ B3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 3.76 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 1089 นาโนเมตร	59
34	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ C1 มีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 613 นาโนเมตร	60
35	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ C2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 1.99 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 586 นาโนเมตร	60
36	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ C3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 2.67 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 350 นาโนเมตร	61
37	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ D1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 21.7 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 307 นาโนเมตร	61
38	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ D2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 12.1 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 628 นาโนเมตร	62
39	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ D3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 11.0 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 480 นาโนเมตร	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
40	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ E1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 15.3 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 313 นาโนเมตร	63
41	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ E2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 13.6 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 273 นาโนเมตร	63
42	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ E3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 10.8 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 360 นาโนเมตร	64
43	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ F1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 24.8 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 613 นาโนเมตร	64
44	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ F2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 10.7 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 440 นาโนเมตร	65
45	ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ F3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 24.8 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 406 นาโนเมตร	65
46	ภาพถ่าย SEM ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย (บน) บริเวณผิว (ซ้าย) และโครงสร้างภายใน (ขวา) และภาพถ่าย SEM ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน (ล่าง) บริเวณผิว (ซ้าย) และโครงสร้างภายใน (ขวา)	67
47	ภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสีม่วงวาวมาก (บน) บริเวณผิว (ซ้าย) และโครงสร้างภายใน (ขวา) และภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาวจากฟาร์มเพาะเลี้ยง (ล่าง) บริเวณผิว (ซ้าย) และโครงสร้างภายใน (ขวา)	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
48	ภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสีขาววาวน้อยบริเวณผิว (ซ้าย) และ โครงสร้างภายใน (ขวา)	69
49	ภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสีขาววาวมาก (บน) บริเวณผิว (ซ้าย) และ โครงสร้างภายใน (ขวา) และภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาวจากฟาร์มเพาะเลี้ยงวาวน้อย (ล่าง) บริเวณผิว (ซ้าย) และ โครงสร้างภายใน (ขวา)	70
50	รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาว	72
51	รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีม่วง	73
52	รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีชมพู	73
53	รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีน้ำตาล	74
54	กราฟแสดงปริมาณธาตุ Sr และ Mn ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน	76
55	สเปกตรัม ESR ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนแบบผง	78
56	สเปกตรัม ESR ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบ แกน A โดยลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา	80
57	สเปกตรัม ESR ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบ แกน B โดยลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา	81
58	สเปกตรัม ESR ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบ แกน C โดยลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา	82
59	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยก่อนการเผา มีความเข้มของยอด (111) สูงสุด ซึ่งแสดงความเป็นผลึกแบบอะราโกไนต์	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
60	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยหลังการเผา มีความเข้มของยอด (104) สูงสุด ซึ่งแสดงความเป็นผลึกแบบแคลไซต์	84
61	สเปกตรัม ESR ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบ แกน A, B ซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกัน	85
62	สเปกตรัม ESR ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบ แกน C โดยการหมุนในแต่ละองศา สเปกตรัมไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าแกน C ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดสอดคล้องกับแกนผลึก c ของแคลไซต์และอะราโกไนต์	86

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์	101
ก2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขของแบรกก์	102
ก3 หลอดรังสีเอกซ์และตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์อยู่บนทรงกลมของการสะท้อน	103
ข1 แสดงโครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอน	107
ข2 แสดงลำอิเล็กตรอนที่เบี่ยงเบนคล้ายลำแสงผ่านเลนส์นูน	108
ข3 แสดงความลึกโฟกัสของเลนส์อิเล็กตรอน	109
ข4 แสดงการเปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านและแบบส่องกราด	111
ค1 ส่วนประกอบของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์	116
ค2 การวัดการกระเจิงแบบรามานในแนว	117
ค3 เทคนิคการวัดรามานสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง	118
ค4 แผนภาพของเครื่อง FT-Raman spectrometer	119
ง1 ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว	123
ง2 การเกิดอันตรกิริยาในตัวอย่างเมื่อได้รับการกระตุ้น	125
ง3 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์	126
จ1 ระดับพลังงานอิเล็กตรอนสปินในสนามแม่เหล็กภายนอก (B)	131
จ2 สเปกตรัม ESR แบบอนุพันธ์อันดับที่ศูนย์ หนึ่งและสอง ตามลำดับ	133
จ3 (A) ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามแม่เหล็กภายนอก B (B) ESR สเปกตรัมอันดับศูนย์ ระหว่างค่าการดูดกลืน (p) กับสนามแม่เหล็กภายนอก (C) ESR สเปกตรัมอันดับหนึ่ง $\Delta\nu$ แสดงถึงความกว้างของยอดระหว่างยอดถึงยอด (the peak-to-peak line width)	135
จ4 ผลของนิวเคลียสสปิน ($I = \frac{1}{2}$) ที่มีผลต่อระดับพลังงาน m_s เท่ากับ $\pm \frac{1}{2}$	137

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
จ5 ระดับพลังงานที่ถูกแยกออกมาอันเนื่องมาจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ภายนอก (B) โดยไม่เกิดปรากฏการณ์ Zero-field splitting ของอิเล็กตรอนเดี่ยวจำนวน 1 อิเล็กตรอน ($S = \frac{1}{2}$), 2 อิเล็กตรอน ($S = 1$), 3 อิเล็กตรอน ($S = \frac{3}{2}$), 4 อิเล็กตรอน ($S = 2$) และ 5 อิเล็กตรอน ($S = \frac{5}{2}$) ตามลำดับ	139
จ6 (a) ระดับพลังงานที่ถูกแยกอันเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกของ อิเล็กตรอนเดี่ยว 1 อิเล็กตรอน ($S = \frac{1}{2}$) (b) ระดับพลังงานที่ถูกแยกออกเป็น 2 ระดับพลังงานก่อนอันเนื่องมาจากการเกิด Zero-field splitting ที่เป็นไปได้ 2 แบบก่อนจะผ่านสนามแม่เหล็กภายนอกของ อิเล็กตรอนเดี่ยว 3 อิเล็กตรอน ($S = \frac{3}{2}$) (c) ระดับพลังงานที่ถูกแยกออกเป็น 2 ระดับพลังงานก่อนอันเนื่องมาจากการเกิด Zero-field splitting ที่เป็นไปได้ 2 แบบก่อนจะผ่านสนามแม่เหล็กภายนอกของ อิเล็กตรอนเดี่ยว 2 อิเล็กตรอน ($S = 1$)	140
จ7 สเปกตรัม ESR ของไอออนเชิงซ้อนของ Mn^{2+} (มีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมแปด หน้า) จะประกอบด้วยยอดใหญ่ 5 ยอด แต่ละยอดจะถูกแยกออกเป็น 6 ยอด	141
จ8 ส่วนประกอบที่สำคัญของอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์	142
จ9 สเปกตรัมอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	143

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

EDXRF	=	การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน
ESR	=	อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
XRD	=	วิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
XRF	=	การเรืองรังสีเอกซ์

การศึกษาเชิงสเปกโทรสโกปีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดของไทย

Spectroscopic Studies of Thai Freshwater Cultured Pearl

คำนำ

ไข่มุกเป็นอัญมณีอินทรีย์ (organic gems) ที่มีความพิเศษแตกต่างจากอัญมณีอื่นๆ คือเป็นอัญมณีที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตโดยกระบวนการทางชีวภาพ (biological process) มีความสวยงามในตัวเอง มีความวาวแบบมุก (pearly) และการเหลือบสีรุ้ง (orient) โดยไม่ต้องตกแต่งเจียรระไน คุณค่าของไข่มุกขึ้นกับรูปร่าง สี ขนาด และความวาว โดยไข่มุกที่มีคุณค่ามากที่สุดคือ ทรงกลม สีขาว ขนาดใหญ่ และมีความวาวมาก ไข่มุกได้รับความนิยมสูงมากในตลาดโลก รongมาจากเพชรและคอรันดัม ให้แก่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

ไข่มุกเลี้ยง แบ่งเป็นไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด (freshwater cultured pearl) และไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม (saltwater cultured pearl) ในอดีตญี่ปุ่นเป็นผู้นำและผลิตไข่มุกสู่ตลาดอัญมณีโลก ในปัจจุบันจีนเป็นประเทศที่ผลิตและจำหน่ายไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสูงสุด ส่วนไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็มผลิตสูงสุดในประเทศออสเตรเลีย อินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ ตามลำดับ จีนได้พัฒนาการเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งเห็นได้ชัดในระยะ 5 ปีที่ผ่านมา ความสำเร็จของการเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดขึ้นกับ ตัวหอยมุกน้ำจืดที่นำมาผลิตไข่มุก และปริมาณกับคุณภาพของไข่มุกที่ผลิตได้

ประเทศไทยได้มีการทดลองเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดในขั้นเริ่มต้นที่ อำเภอนาทม จังหวัดกาญจนบุรี และที่อื่นๆ ซึ่งความสำเร็จของการเพาะเลี้ยงยังไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับประเทศจีน และยังไม่สามารถนำมาจำหน่ายในตลาดอัญมณีได้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาในเชิงสเปกโทรสโกปี ได้แก่ การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างผิว (surface structure) ภายนอก และโครงสร้างภายใน (internal structure) ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน ด้วย SEM (Scanning Electron Microscopy, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด) การศึกษาความเป็นผลึกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยการฉายรังสีเอกซ์ลงบนตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยเปรียบเทียบพื้นที่ได้กราฟของยอดคออติจันและยอดของผลึก พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างผลึก ขนาดเซลล์หน่วย และ

เปรียบเทียบปริมาณความเข้มของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; CaCO_3) แบบอะราโกไนต์ (aragonite) และแบบแคลไซต์ (calcite) การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณธาตุส่วนน้อย (trace elements) ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ด้วย EDXRF (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน) และเทคนิค ESR (Electron Spin Resonance Spectroscopy, อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์) เพื่อจำแนกประเภทของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด และการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบอินทรีย์ (organic components) ซึ่งเป็นโปรตีนประเภทต่างๆ ซึ่งอาจมีบทบาทต่อการเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด (origin of color) ด้วยเทคนิครามาน สเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

โดยทั่วไปการประเมินคุณภาพและราคาของอัญมณีต่างๆ ขึ้นกับองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ประการที่รู้จักกันในชื่อ 4C's ซึ่งหมายถึง สี (Color) ความใสสะอาด (Clarity) การเจียรไน (Cut) และน้ำหนักกะรัต (Carat Weight) แต่ในกรณีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด หลักการประเมินคุณภาพจะเป็น 2C's บวก 4S's โดย 2C คือ Coating (การเคลือบของชั้นมุกที่เรียกว่าเนเคอร์ (nacre)) และ Color (สีของเม็ดไข่มุก) ส่วน 4S หมายถึง Shape (รูปร่าง) Surface (ผิว) Shining (ความวาวหรือ Luster) และ Size (ขนาดของไข่มุก) ดังนั้นในการศึกษาเชิงสเปกโทรสโกปีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดในวิทยานิพนธ์นี้ จึงมุ่งเน้นไปที่องค์ประกอบที่สามารถศึกษาได้คือ 2C และ 2S ได้แก่ Coating, Color, Surface และ Shining สำหรับองค์ประกอบที่เหลือคือ Shape และ Size เป็นองค์ประกอบที่ขึ้นอยู่กับลักษณะและระยะเวลาการเพาะเลี้ยง ซึ่งอยู่นอกเหนือขอบเขตของงานวิจัยนี้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystal structure) ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน ด้วย XRD
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน ด้วย SEM
3. เพื่อตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบอินทรีย์ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด ซึ่งเป็นโปรตีนประเภทต่างๆ ซึ่งอาจมีบทบาทต่อการเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี
4. เพื่อศึกษาองค์ประกอบของธาตุและธาตุส่วนน้อยภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน ด้วย EDXRF และ ESR ตามลำดับ

การตรวจเอกสาร

จีนมีการเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดกันอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ศตวรรษที่ 13 มีการใส่พระพุทธรูปขนาดเล็กเข้าไปในเปลือกของหอยมุก (Akamatsu *et al.*, 2001) เมื่อเวลาผ่านไปพระพุทธรูปจะถูกเคลือบด้วยชั้นมุก กลายเป็นพระพุทธรูปมุกทั้งดวง แม้ในปัจจุบันเทคนิคนี้ยังคงมีการใช้อยู่ นอกจากพระพุทธรูปแล้ว ยังมีการใส่รูปปั้นสิ่งต่างๆ เช่น ดอกไม้, นก และสัตว์ ขนาดเล็ก เข้าไปในหอยมุก และมีการทดสอบกับหอยมุกพันธุ์ต่างๆ ในญี่ปุ่นการเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดเริ่มต้นประมาณปี ค.ศ. 1910 แต่ไม่ประสบความสำเร็จจนกระทั่ง ค.ศ. 1924 เมื่อประสบความสำเร็จในการเพาะเลี้ยงแล้ว การเพาะเลี้ยงเพื่อการค้าจึงเริ่มต้นขึ้นในปี ค.ศ. 1928 ได้มีการเริ่มใช้นิวเคลียสเป็นครั้งแรกและต่อมาพบว่าการใช้เนื้อเยื่อเป็นนิวเคลียสให้ผลการผลิตที่ดีกว่า ในปี ค.ศ. 1946 เกษตรกรผู้เพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจึงได้เปลี่ยนมาใช้เนื้อเยื่อเป็นนิวเคลียส

ESR หรือ อิเล็กตรอนพาราแมกเนติกเรโซแนนซ์ (Electron Paramagnetic Resonance; EPR) เป็นหนึ่งในเทคนิคที่สามารถใช้ศึกษาธาตุส่วนน้อย (trace element) ในโครงสร้างผลึกสำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตในธรรมชาติแบบอะราโกไนต์ได้มีการศึกษาโดยเทคนิค ESR อย่างแพร่หลาย เช่นในเปลือกหอย (White *et al.*, 1977; Narasimhulu and Rao, 2000; Raju *et al.*, 2002; Udomkan *et al.*, 2005) ในไข่มุก (Habermann *et al.*, 2001) ซึ่งการศึกษาส่วนใหญ่แสดงให้เห็นว่าธาตุส่วนน้อยที่พบได้ในโครงสร้างแคลเซียมคาร์บอเนตในธรรมชาติคือ Mn ซึ่งแทนที่ตำแหน่งของ Ca การศึกษา Mn ในผลึกเดี่ยวอะราโกไนต์ แสดงให้เห็นว่าแกนหลักของ zero-field splitting (D_{zz}) อยู่ในระนาบ ac โดยทำมุมกับแกน c 31 องศา (Low and Zeira, 1972) ส่วนการศึกษาตัวอย่างหอยกาบ (Clam shells, *Mya arenaria*) แสดงว่าแกน c ของอะราโกไนต์นั้นตั้งฉากกับผิวของเปลือกหอย และแกนของ zero-field splitting ทำมุม 65 ± 5 องศา กับแกน c (White *et al.*, 1977) การศึกษาส่วนใหญ่มักทำในตัวอย่างแบบผงเนื่องจากสเปกตรัมของ Mn ในแคลเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะเฉพาะซึ่งเป็นที่รู้จักโดยทั่วไป การศึกษาการเปลี่ยนเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างหอย (Snail shells) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนเฟสจากแคลไซต์เป็นอะราโกไนต์เกิดที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส

การตรวจวิเคราะห์เพื่อแยกประเภทของไข่มุกออกเป็นไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดหรือไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม (saltwater cultured pearl) สามารถทำได้โดยวิเคราะห์ปริมาณ Mn ด้วยเทคนิค ESR

เนื่องจากไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมีปริมาณ Mn สูงกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม (Banerjee *et al.*, 2001) ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจึงมีปริมาณ Mn ในแคลไซต์ต่ออะราโกไนต์เป็น 3.27 : 1 (Habermann *et al.*, 2001) และไม่มี Mn อยู่ในโครงสร้างของแคลไซต์ในไข่มุกธรรมชาติ และสามารถใช้เทคนิคการเปล่งแสงแคโทด เพื่อตรวจสอบแหล่งที่มาของไข่มุก เช่น ถ้าเป็นไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่มีแกนเป็นเนื้อเยื่อจะเปล่งแสงสีส้ม เนื่องจากแคลไซต์บริเวณแกนกลางของไข่มุก ในขณะที่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดธรรมชาติจากแม่น้ำมิตสซึชิบิไม่แสดงลักษณะดังกล่าว แต่จะมีการเปล่งแสงสีเขียวเนื่องจาก Mn อยู่ในโครงสร้างของอะราโกไนต์ และยังพบว่าปริมาณของ Mn ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดลดลงจากบริเวณแกนกลางจนถึงขอบนอก

ธาตุส่วนน้อย สามารถจำแนกแหล่งกำเนิดของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ต่างกัน เนื่องจากแต่ละแหล่งที่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดเกิดขึ้นมีสภาพแวดล้อมและภูมิประเทศที่ต่างกัน รวมไปถึงธาตุส่วนน้อยในแหล่งน้ำ ดังนั้นปริมาณของธาตุส่วนน้อยจึงเป็นลักษณะเฉพาะของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดแต่ละแหล่ง ธาตุส่วนน้อยที่สามารถพบได้ในโครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต เช่น Mg, Sr, Ba, Na, K, Al, Mn, Fe, Cu, Zn (Thorn *et al.*, 1995; Fujino *et al.*, 1999; Zhang and Wang, 2001; Lam *et al.*, 2004)

การศึกษาด้วย EDXRF พบว่าปริมาณของธาตุหลักและธาตุส่วนน้อยในชั้นมุกแตกต่างกัน น้อย เมื่อมาจากแหล่งกำเนิดต่างกัน (Gutmannsbauer and Hanni, 1994) โดยมีความแตกต่างระหว่างปริมาณของ Mg และ P ในการเกิดหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ส่วนในหอยมุกเลี้ยงน้ำเค็มบางชนิดมีปริมาณ Sr ปรากฏอยู่แต่ไม่มีการวิเคราะห์ที่ชัดเจน ส่วนบริเวณโครงสร้างภายในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด โดยวิเคราะห์บริเวณแกนกลางกับผิวนอก พบว่าธาตุหลักบริเวณแกนกลางประกอบด้วย Ca, C และ O ธาตุส่วนน้อยประกอบด้วย Na, Mg, Al, Si, Cl, P, S, K, Cr และ Ni ส่วนธาตุหลักบริเวณผิวนอกประกอบด้วย Ca, C และ O ธาตุส่วนน้อยประกอบด้วย Al และ Si (Kuchaisit, 2004)

การจำแนกประเภทระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็มทำได้ยาก แต่ในท้องตลาดมูลค่าของไข่มุกเป็นสิ่งสำคัญ จึงได้ทำการศึกษาธาตุส่วนน้อยด้วยเทคนิค LA-ICP-MS (Jacob *et al.*, 2005) พบว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมีปริมาณ Mn มาก ประมาณ 134-5659 ppm ซึ่งสามารถแยกออกจากไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม และมีปริมาณ Ag น้อยสำหรับไข่มุกเลี้ยงธรรมชาติ แต่พบมากในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยถ้าเทียบอัตราส่วนระหว่าง Ba / Sr และ Ga / Sr พบว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมีค่าอัตราส่วนมากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม (Jacob *et al.*, 2005)

สาเหตุเพราะองค์ประกอบทางเคมีในแหล่งน้ำที่เพาะเลี้ยง คุณภาพน้ำ คุณภาพทางธรณีและสิ่งแวดล้อมที่ใช้เพาะเลี้ยง

ไข่มุกที่มีคุณภาพสูงจะมีความวาวที่สวยงาม เกิดจากการเรียงตัวที่เป็นระเบียบของชั้นอะราโกไนต์ แต่ไข่มุกที่มีคุณภาพต่ำจะไม่มี ความวาว ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างของวาเทอร์ไรต์ (vaterite) รวมอยู่ด้วย จากการศึกษาด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Ma and Lee, 2006) วาเทอร์ไรต์เป็นโครงสร้างที่เกิดก่อนแคลไซต์และอะราโกไนต์ เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร แต่สามารถเสถียรอยู่ได้ในไข่มุกคุณภาพต่ำ เนื่องจากไข่มุกเหล่านี้มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์มากกว่าไข่มุกที่มีคุณภาพสูง โดยที่สารอินทรีย์เหล่านี้เป็นตัวควบคุมการเกิดของแคลเซียมคาร์บอเนต ไข่มุกที่มีวาเทอร์ไรต์มากจะมีคุณภาพต่ำกว่าไข่มุกที่มีวาเทอร์ไรต์น้อย

การศึกษาลักษณะผิวภายนอกของเปลือกหอยด้วย SEM พบว่า พื้นผิวภายนอกมีโครงสร้างผลึกขนาดเล็กและบางคล้ายฟิล์มบางที่เรียงตัวซ้อนทับกันแบบ pseudo-hexagonal (Gutmannsbauer and Hanni, 1994 and Kuchaisit, 2004) มีลักษณะเป็นร่องขนาดเล็กๆ มีโครงสร้างคล้ายแผ่นกระเบื้องปกคลุมพื้นผิวของเปลือกหอย วางเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบสองทิศทางตั้งฉากกัน หรือวางเรียงตัวทิศทางเดียวแบบขนานกันคล้ายเกรตติงแบบสะท้อน (Tan *et al.*, 2005) ส่วนโครงสร้างภายในของเปลือกหอย ประกอบด้วยแผ่นอะราโกไนต์วางเรียงตัวทับกันคล้ายกระเบื้องอยู่ที่ขอบของแท่งแคลไซต์ ทำให้มีปริมาณของอะราโกไนต์มากกว่าแคลไซต์ (Kiefert *et al.*, 2004) ส่วนใหญ่แผ่นอะราโกไนต์จะวางขนานกัน มีบางส่วนที่เรียงตัวไม่สม่ำเสมอ แต่โครงสร้างภายในจะไม่ปรากฏลักษณะที่เป็นร่องแบบเกรตติง ซึ่งชั้นอะราโกไนต์จะพบมากบริเวณส่วนตัดขวาง โดยมีความหนาแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับวัฏจักรการเจริญเติบโตของหอย (Snow *et al.*, 2005)

จากการที่โครงสร้างของเปลือกหอยเป็นชั้นของอะราโกไนต์ จึงได้มีการจำลองโครงสร้างของชั้นอะราโกไนต์ (Liu *et al.*, 2002) ให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ขอบมน มีความกว้างด้านละ 0.5 ไมโครเมตร วางเรียงต่อกันสลับกับชั้นโปรตีน ดังนั้นเมื่อแสงตกกระทบก็จะเกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบน อีกทั้งเมื่อมีแสงตกกระทบในหลายทิศทาง ก็จะเกิดการเลี้ยวเบนในหลายทิศทางและหลายอันดับ ทำให้มีการเลื่อมซ้อนกันของหลายๆ อันดับ จึงเป็นสาเหตุของการเกิดสีเหลือบ ส่วนแสงที่สะท้อนออกมาถือว่าไม่เป็นสาเหตุของการเกิดสีเหลือบ เนื่องจากการสะท้อนในอันดับที่ศูนย์ (Liu *et al.*, 1999)

ปรากฏการณ์เลี้ยวเบน เป็นปรากฏการณ์ที่พบเห็นได้โดยทั่วไปในพืชบางชนิด แมลง ขนนก และเปลือกหอยทะเล เกิดจากการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของแสงตามกฎของแบรกก์ บนผิวของเปลือกหอย เมื่อแสงตกกระทบเปลือกหอย ผิวของเปลือกหอย จะทำหน้าที่เป็นเสมือนเกรตติงเลี้ยวเบน เปลือกหอยแต่ละชนิดจะมีสีเลี้ยวเบนแตกต่างกันขึ้นกับมุมมองที่สังเกต (Snow *et al.*, 2005) โดยเปลือกหอยที่มีปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่สวยงาม จะมีความหนาแน่นของร่องประมาณ 500 ร่องต่อตารางมิลลิเมตร ในขณะที่เปลือกหอยที่มีความเข้มของปรากฏการณ์เลี้ยวเบนรองลงมา จะมีความหนาแน่นของร่องประมาณ 300 ร่องต่อตารางมิลลิเมตร (Tan *et al.*, 2005) การวัดระยะห่างของร่องจะทำให้ทราบความหนาแน่นของร่อง ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ SEM ที่มีกำลังขยายไม่น้อยกว่า 7000 เท่า โดยสีที่ปรากฏจะเป็นสีในช่วงของสเปกตรัมที่ตามองเห็น โดยสีที่เห็นชัดที่สุดเป็นสีที่มีการเลี้ยวเบนเป็นอันดับแรก (Snow *et al.*, 2005)

การเกิดสีเลี้ยวเบน เป็นปรากฏการณ์ทางแสงที่ไม่ขึ้นกับทิศทางของแหล่งกำเนิดแสง (Nagata *et al.*, 1997) เมื่อแสงตกกระทบไข่มุก ผิวของไข่มุกจะทำหน้าที่เป็นเสมือนเกรตติงเลี้ยวเบน เป็นผลมาจากโครงสร้างของมุกที่มีชั้นมุกหนาประมาณ 30-500 ไมโครเมตร และแผ่นอะราโกไนต์ในรูปของฟิล์มบางกึ่งโปร่งแสงหนา 300-800 นาโนเมตร อีกทั้งชั้นโปรตีนหนาน้อย 20 นาโนเมตร วางทับกัน 60-1000 ชั้น สำหรับไข่มุกสีดำอาจมีสารโพฟีลีน (porphyrin) แทรกอยู่ (Kiefert *et al.*, 2004) สาเหตุทั้งหลายทำให้เกิดลักษณะพิเศษคือ การแทรกสอดแบบฟิล์มบางหลายๆ ชั้น (Snow *et al.*, 2004) หรือการแทรกสอดของแผ่นอะราโกไนต์และชั้นโปรตีนที่อยู่ภายในชั้นมุก (Nagata *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 1999; Liu *et al.*, 2002; Tan *et al.*, 2004; Tan *et al.*, 2005) ซึ่งพิจารณาจากการสะท้อน (reflection) กลับหลายๆ ชั้นของวัตถุทรงกลม โดยอาศัยหลักการทางฟิสิกส์ คือการแทรกสอด (interference) การสะท้อน (mirroring) และโครงสร้างภายใน เมื่อแสงตกกระทบที่ผิวไข่มุกจะเกิดทั้งการสะท้อน การหักเห (refraction) และการแทรกสอดผ่านเข้าไปยังชั้นมุกและชั้นโปรตีน เนื่องจากแต่ละชั้นมีดัชนีหักเหแตกต่างกัน ซึ่งแสงจากแต่ละจุดในแต่ละชั้นจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งผ่านรังสีไปทุกทิศทุกทาง เมื่อแสงสะท้อน หักเห และแทรกสอดกลับออกจากชั้นมุกก็จะปรากฏสีเลี้ยว (Nagata *et al.*, 1997)

ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมาไข่มุกเลี้ยงสีทองจากทะเลได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีไข่มุกสีทองที่ผ่านการปรับปรุงสีเข้าสู่ตลาด (Elen, 2002) วิธีการปรับปรุงสีโดยทั่วไปจะใช้วิธีทางเคมีหรือการย้อมสี ในกรณีที่เป็นการย้อมด้วยสียอนินทรีย์ สามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค XRF เนื่องจากการย้อมด้วยวิธีนี้มักจะทำหลังจากการเจาะไข่มุกแล้ว โดยทั่วไปมักจะ

ตรวจสอบได้โดยง่ายจากการใช้แว่นขยายหรือกล้องจุลทรรศน์อณูมณี แต่การปรับปรุงคุณภาพสีของไข่มุกที่ไม่ผ่านการเจาะสามารถตรวจสอบได้ยาก การตรวจวิเคราะห์ไข่มุกสีธรรมชาติหรือสีที่ผ่านการย้อมสามารถทำได้โดยการเรืองรังสีเอกซ์ หรือรามานสเปกโทรสโกปีในกรณีที่เป็นสีย้อมอินทรีย์ แต่ทั้งสองเทคนิคไม่สามารถใช้ได้กับสีของไข่มุกที่เกิดจากปรับปรุงด้วยการให้ความร้อน

การศึกษาการเกิดสีของไข่มุกธรรมชาติ รวมถึงสีของไข่มุกที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยการย้อมสีอินทรีย์ สามารถทำได้ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Liping and Zhonghui, 2001) โดยทั่วไปไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมักจะมีสีขาว ส้ม หรือม่วง ซึ่งสามารถแยกออกจากไข่มุกดำจากตาฮิติได้ง่าย แต่ถ้าเป็นไข่มุกเลี้ยงจากตาฮิติสีเทาจะแยกได้ยาก การใช้รามานสเปกโทรสโกปี จะทำให้เห็นความแตกต่างได้ชัดเจนระหว่างไข่มุกเลี้ยงสีธรรมชาติกับไข่มุกเลี้ยงที่สีเกิดจากการย้อม ไข่มุกเลี้ยงสีธรรมชาติมีสเปกตรัมรามานที่มียอดเด่นของอะราโกไนต์ที่ 1083 cm^{-1} แต่ถ้ามีการย้อมด้วยสารอินทรีย์จะมียอดกว้างที่ประมาณ 1340 และ 1598 cm^{-1} เกิดขึ้นด้วย และถ้าสีเกิดจากการย้อมด้วยซิลเวอร์ไนเตรต ยอดของอะราโกไนต์จะถูกกลบด้วยสารประกอบของคาร์บอน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยรามานสเปกโทรสโกปีไม่สามารถใช้แยกความแตกต่าง ระหว่างสีของไข่มุกเลี้ยงธรรมชาติและสีของไข่มุกเลี้ยงที่เกิดจากการอาบรังสี

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสเปกโทรสโกปี

1. สเปกโทรสโกปี

สเปกโทรสโกปี คือ การศึกษาอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) กับสสาร (matter) โดยในการทดลองจะทำการพิจารณาสมบัติของสสารก่อนและหลังการเกิดอันตรกิริยากับรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า สเปกโทรสโกปีนับเป็นเครื่องมือที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมากสำหรับนักวิทยาศาสตร์ในการศึกษาสมบัติจุลทรรศน์ (microscopic property) ของอะตอมและโมเลกุล เช่น

- การหาองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) ของสาร
- การหาโครงสร้างและสมบัติต่าง ๆ ของโมเลกุลอย่างละเอียดโดยมีความถูกต้องแม่นยำสูง เช่น ขนาด รูปร่าง ความยืดหยุ่น (flexibility) การจัดตัวของอิเล็กตรอน
- การศึกษาและติดตามปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลที่มีช่วงระยะเวลาการเกิดต่าง ๆ กันตั้งแต่เป็นวันลงไปจนกระทั่งถึงเฟมโตวินาที (1 ใน พันล้านล้านวินาที)
- การศึกษาเกี่ยวกับสถานะแตรนซิชันของปฏิกิริยาเคมีโดยอาศัยเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าในปัจจุบัน
- การศึกษาเพื่อไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับสมบัติทางโครงสร้างและพลศาสตร์ของโมเลกุล โดยอาศัยความรู้ทางกลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics) เข้ามาประกอบกับสเปกโทรสโกปี ซึ่งนับเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงมาก
- การหาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสาร โดยใช้เทคนิคกลศาสตร์สถิติ (Statistical Mechanics) เข้ามาประกอบกับสเปกโทรสโกปี

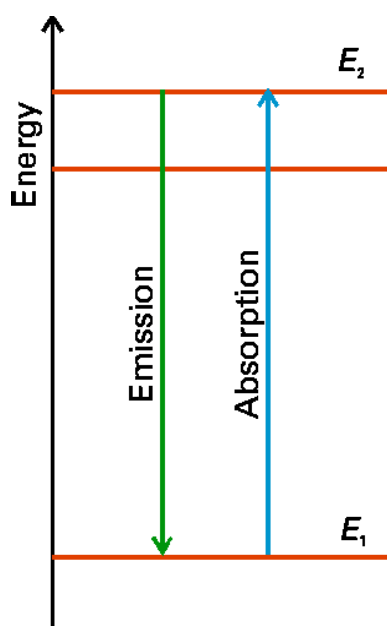
2. ชนิดของสเปกโทรสโกปี

การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีสามารถทำได้หลายแบบ ขึ้นกับเกณฑ์ในการแบ่ง แต่โดยทั่วไปนิยมใช้เกณฑ์ในการแบ่ง 2 ชนิด คือ

2.1 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีโดยพิจารณาจากเทคนิคการทดลอง ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

2.1.1 สเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืน (Absorption Spectroscopy) เป็นการศึกษาวัดพลังงานที่ระบบต้องการเพื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่มีพลังงานต่ำไปยังสถานะที่มีพลังงานสูงขึ้น ดังภาพที่ 1

2.1.2 สเปกโทรสโกปีแบบเปล่งออก (Emission Spectroscopy) เป็นการศึกษาวัดพลังงานที่ระบบคายออกมา เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะถูกกระตุ้น (excited state) ไปยังสถานะพื้น (ground state) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพพลังงานของสเปกโทรสโกปีแบบดูดกลืนและแบบเปล่งออก

ที่มา: สมศักดิ์ (2550)

2.2 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีโดยพิจารณาจากขนาดของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะแบ่งได้เป็น 6 ชนิด ดังตารางที่ 1 ดังนี้

2.2.1 สเปกโทรสโกปีชนิดนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy - NMR) เป็นการให้สนามแม่เหล็ก (magnetic field) แก่ระบบ ซึ่งจะไปทำให้นิวเคลียสที่จำเพาะเจาะจงเกิดการหันไปในทิศทางที่แน่นอนเมื่อเทียบกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางการจัดตัวที่ต่างกันจะมีค่าพลังงานที่ต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลค่าพลังงานที่วัดได้มาบ่งบอกถึงทิศทางการจัดตัวของนิวเคลียสชนิดต่าง ๆ ได้ พลังงานที่เกี่ยวข้องกับแตรนซิชันจะมีขนาดประมาณ 10^{-6} กิโลจูล / โมล ซึ่งจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 104 เซนติเมตร (radio frequency)

2.2.2 สเปกโทรสโกปีชนิดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ เป็นเทคนิคการตรวจหาสปีชีส์ (species) ที่มีอิเล็กตรอนขาดคู่ (unpaired electron) ซึ่งโดยทั่วไปมักจะหมายถึงอนุมูลอิสระ (free radical) ในกรณีที่เป็นสารอินทรีย์ และไอออนของโลหะแตรนซิชัน ในกรณีที่เป็นสารอนินทรีย์ เนื่องจากสารที่เสถียรโดยทั่วไปมักจะมีอิเล็กตรอนครบคู่ ดังนั้นเทคนิค อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ จึงไม่ค่อยแพร่หลายเท่าเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ หลักการของเทคนิคนี้ จะคล้ายกับเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ กล่าวคือ เป็นการให้สนามแม่เหล็ก (magnetic field) แก่ระบบ ซึ่งจะไปทำให้สปินของอิเล็กตรอนที่จำเพาะเจาะจงเกิดการหันไปในทิศทางเดียวกันกับหรือตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ทิศทางการจัดตัวที่ต่างกันจะมีค่าพลังงานที่ต่างกัน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลค่าพลังงานที่วัดได้มาบ่งบอกถึงทิศทางการจัดตัวของอิเล็กตรอนชนิดต่าง ๆ ได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่านิวเคลียส เทคนิคนี้จึงใช้พลังงานสำหรับแตรนซิชันน้อยกว่า คือประมาณ 10^{-3} กิโลจูล / โมล โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10 เซนติเมตร

2.2.3 สเปกโทรสโกปีแบบหมุน (Rotational Spectroscopy) การเปลี่ยนระดับพลังงานของสารจะเกี่ยวข้องกับการหมุนของพันธะในโมเลกุล ดังนั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับแตรนซิชันจะมีขนาดประมาณ 10^{-1} กิโลจูล / โมล โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ย่านไมโครเวฟ (microwave frequency) จึงมักมีผู้เรียกสเปกโทรสโกปีแบบนี้ว่า สเปกโทรสโกปีชนิดไมโครเวฟ (Microwave Spectroscopy)

2.2.4 สเปกโทรสโกปีแบบสั่น (Vibrational Spectroscopy) การเปลี่ยนระดับพลังงานของสารจะเกี่ยวข้องกับการสั่นของพันธะในโมเลกุล ดังนั้นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับแตรนซิชันจะมีขนาดประมาณ 10 กิโลจูล / โมล โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10^{-3} เซนติเมตร ซึ่ง

เป็นคลื่นความถี่ย่านอินฟราเรด (infrared frequency - IR) จึงมักมีผู้เรียก สเปกโทรสโกปีแบบนี้ว่า สเปกโทรสโกปีชนิดอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy)

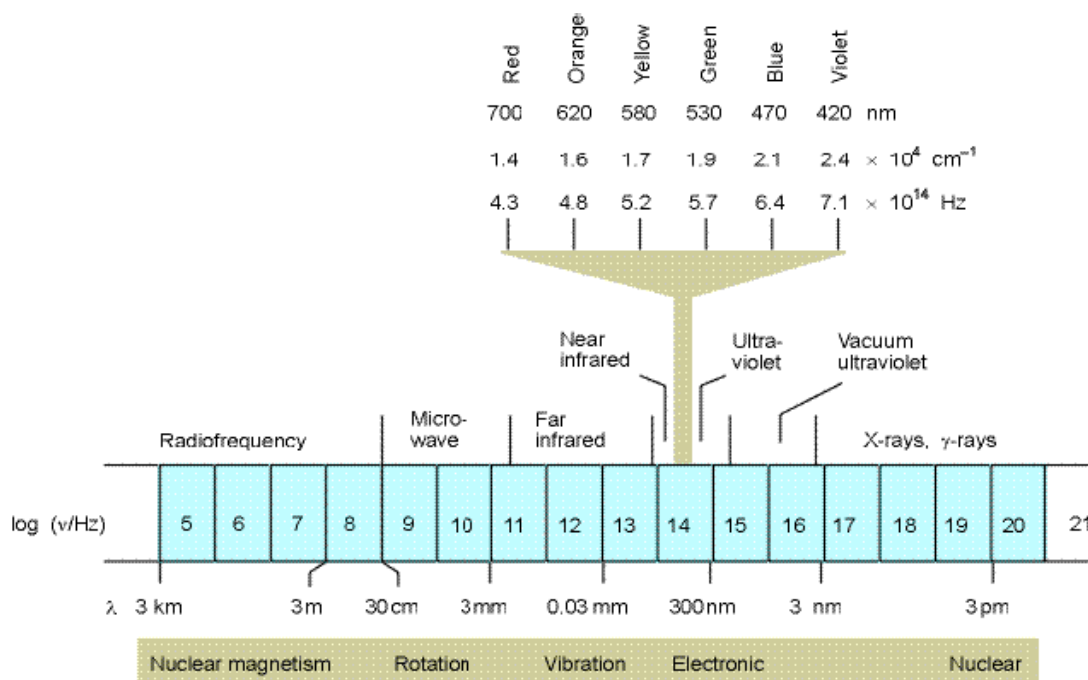
2.2.5 สเปกโทรสโกปีแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Spectroscopy) จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในสาร จึงต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าสเปกโทรสโกปีแบบหมุนและแบบสั่น นั่นคือจะต้องใช้พลังงานประมาณ $10^3 - 10^4$ กิโลจูล / โมล โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ $10^{-5} - 10^{-6}$ เซนติเมตร ซึ่งเป็นคลื่นความถี่ย่านอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล (ultraviolet-visible frequency - UV) จึงมักมีผู้เรียกสเปกโทรสโกปีแบบนี้ว่าสเปกโทรสโกปีชนิดยูวี-วิสิเบิล (UV-Visible Spectroscopy)

2.2.6 สเปกโทรสโกปีแบบนิวเคลียร์ (Nuclear Spectroscopy) จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของนิวเคลียสในสาร จึงต้องใช้พลังงานที่สูงกว่าสเปกโทรสโกปีชนิดอื่น ๆ นั่นคือจะต้องใช้พลังงานถึงประมาณ 10^8 กิโลจูล / โมล โดยจะตรงกับแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 10^{-10} เซนติเมตร

ตารางที่ 1 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงาน

ชนิดของสเปกโทรสโกปี	ขนาดของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปโดยประมาณ (กิโลจูล / โมล)	ความยาวคลื่นโดยประมาณ (เซนติเมตร)
นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์	10^{-6}	10^4
อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	10^{-3}	10
แบบหมุน	10^{-1}	0.1 (ไมโครเวฟ)
แบบสั่น	10	10^{-3} (อินฟราเรด)
อิเล็กทรอนิกส์	$10^3 - 10^4$	$10^{-5} - 10^{-6}$ (อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล)
นิวเคลียร์	10^8	10^{-10}

ที่มา: สมศักดิ์ (2550)



ภาพที่ 2 การแบ่งชนิดของสเปกโทรสโกปีตามระดับพลังงาน

ที่มา: สมศักดิ์ (2550)

2. การเกิดของไข่มุก

คำว่า pearl มาจากภาษาละตินว่า perula เป็นคำที่ใช้เรียกมุก ไข่มุกเกิดจากสัตว์พวกหอย (mollusk) ซึ่งหมายถึงสัตว์ในไฟลัมมอลลัสคา (Phylum Mollusca) ที่รู้จักกันดีได้แก่หอยกาบคู่ (clams, bivalves) หอยกาบเดี่ยว (snail) หอยงาช้าง (tusk shell) หมีกต่าง ๆ เช่น หมีกกล้วย (squid), หมีกสายหรือหมีกยักษ์ (octopus) และลันทะเล (chiton) โดยทั่วไปแล้วพบว่าไข่มุกที่มีความวาวที่สามารถนำมาเป็นเครื่องประดับได้นั้น ส่วนมากเกิดจากหอยกาบคู่จำพวกหอยนางรม (oyster) จำพวกหอยสองฝา (mussel) และหอยเปาฮื้อ (abalone) ส่วนมากนิยมหอยสองฝาเพราะมีเมือกมาก ซึ่งมีชั้นมุก (nacreous layer) เป็นผลึกของอะราโกไนต์ ลักษณะเป็นแผ่นแบนบางและมันวาวเรียงซ้อน ๆ กัน

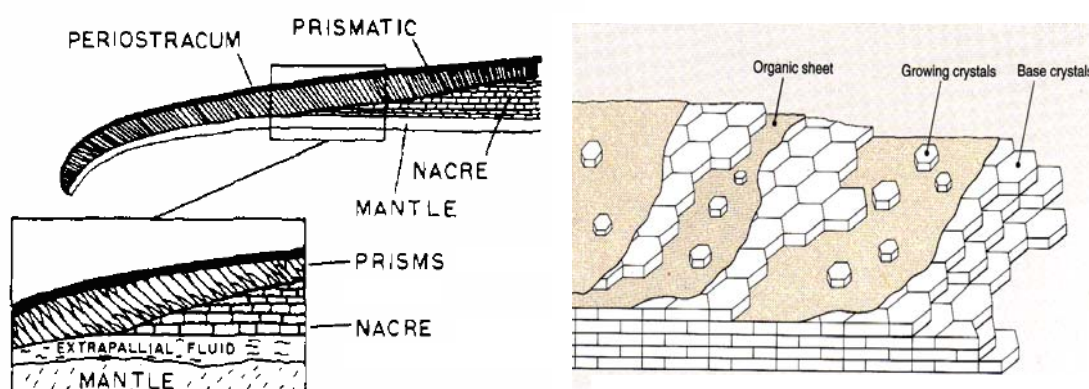
3. โครงสร้างของเปลือกหอยมุก

เปลือกของหอยฝาเดียวและหอยสองฝา มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก จะถูกสร้างขึ้นจากชั้นแมนเทิล ซึ่งจะมีสองชนิดคือแมนเทิลชนิดที่สร้างแคลเซียมคาร์บอเนตโครงสร้างแบบอะราโกไนต์และชนิดที่สร้างโครงสร้างแบบแคลไซต์ ส่วนที่เหลือเป็นสารอื่นๆ เช่น แคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต และโปรตีนประเภทคอนไคโอลิน (conchiolin) (วันทนา, 2539) เปลือกหอยมีโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 3 ประกอบด้วยชั้นของสสาร 3 ชั้นคือ

3.1 ชั้นนอกสุด หรือชั้นผิวหนัง (periostracum layer) ประกอบด้วยสารส่วนใหญ่เป็นโปรตีนประเภทคอนไคโอลิน เป็นชั้นที่บาง หลุดง่าย และมีสี

3.2 ชั้นกลาง หรือชั้นผืนแคลเซียม (prismatic layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่างๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ มีลักษณะเป็นชั้นหลายๆ ชั้น (โดยปกติ 3 – 4 ชั้น) มีความหนาทั้งหมด 0.3 – 0.9 มิลลิเมตร อัดตัวกันแน่นมากและเรียงตั้งฉากกับชั้นแรก แคลไซต์เป็นผลึกแบบ 5 – 6 เหลี่ยม มีความยาวประมาณ 13 – 55 ไมโครเมตร ถ้ามองด้านตัดขวางจะเห็นโครงสร้างซ้อนทับกันแบบแผ่น (sheet-like) และแบบตาข่าย (net-like) (Fengming *et al.*, 2004) ซึ่งจะมีโปรตีนคอนไคโอลินอยู่ระหว่างแท่งแคลไซต์ อีกทั้งเป็นชั้นที่หนาและแข็งแรงที่สุด ชั้นนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วความหนาจะไม่มี的增加ขึ้น

3.3 ชั้นในสุด หรือชั้นมุก มีลักษณะโครงสร้างเป็นขั้นๆ (step-like) ซึ่งเพิ่มขึ้นตามความยาวและความกว้างของเปลือกหอย (Fengming *et al.*, 2004) รวมทั้งโครงสร้างแบบลายนิ้วมือ (fingerprint-like) ไปจนถึงโครงสร้างแบบก้นหอย (spiral-like) ซึ่งเพิ่มขึ้นตามความหนาของเปลือกหอย ชั้นมุกประกอบด้วยผลึกของสารหินปูน (อะราโกไนต์) ลักษณะเป็นแผ่นแบนบางและมันวาวเรียงซ้อนๆ กัน เรียกว่าชั้นมุก เพราะเป็นบริเวณที่มีการสร้างไข่มุกโดยมีโปรตีนคอนไคโอลินเชื่อมแผ่นอะราโกไนต์แต่ละแผ่นเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งมีความหนาทั้งหมด 1.0 – 1.5 มิลลิเมตร โดยแผ่นอะราโกไนต์มีความหนาประมาณ 0.3 – 0.8 ไมโครเมตร อีกทั้งมีการสะสมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะส่งผ่านไปยังชั้นกลาง เป็นชั้นที่เรียบมีความหนาบางแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของหอย ทำให้เปลือกมีสีขาวขุ่นและเป็นมันวาวแตกต่างกัน (วันทนา, 2539) ชั้นนี้จะเพิ่มความหนาไปเรื่อยๆ ตลอดอายุของหอย

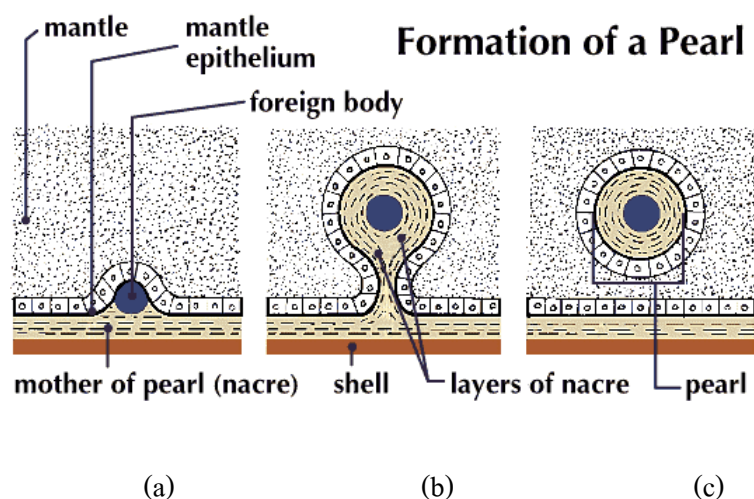


ภาพที่ 3 โครงสร้างเปลือกหอยมุก

4. ประเภทของไข่มุก

สามารถจัดจำแนกประเภทของไข่มุกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

4.1 ไข่มุกธรรมชาติ (natural pearl) คือไข่มุกที่เกิดขึ้นเองในหอยมุก มีทั้งไข่มุกน้ำเค็มและไข่มุกน้ำจืด อาจเกิดเนื่องจากเซลล์เนื้อเยื่อชั้นนอกของแมนเทิลบางส่วนหลุดเข้าไปในตัวของหอยมุกโดยบังเอิญ หรืออาจจะมีสิ่งแปลกปลอม เช่น เปลือกหอยเล็กๆ กรวด ทราย หนองทะเล หรือตัวเบียน (parasite) พัดเข้าไปในหอย หรือชิ้นส่วนของเปลือกหอยที่แตกเจาะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นระหว่างแมนเทิลและเปลือกหอยซึ่งจะทำให้เกิดการระคายเคือง เพื่อลดการระคายเคือง จึงต้องขับสารมุกออกมาเคลือบวัตถุแปลกปลอม สิ่งแปลกปลอมนี้จะค่อยๆ ถูกเคลือบด้วยชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผลิตจากชั้นแมนเทิล ทำให้ได้สิ่งที่เรียกว่า blister pearl เป็นตุ่มครึ่งทรงกลมที่มีความยาวติดอยู่กับเปลือกหอย สามารถตัดออกไปทำเป็นเครื่องประดับได้ ในกรณีที่วัตถุแปลกปลอมเกิดติดอยู่ที่เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้านในเซลล์เนื้อเยื่อชั้นนอกของแมนเทิล ก็จะสร้างสารมุกเคลือบหนาขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ได้ไข่มุกธรรมชาติติดกับเปลือกหอย (สุริย์, 2550) สำหรับกรณีของไข่มุกแบบกลมนั้นจะเกิดจากปฏิกิริยานาดเล็กเข้าไปในชั้นแมนเทิล เนื้อเยื่อแมนเทิลจะล้อมรอบปฏิกิริยานาดเล็กนี้แล้วกลายเป็นถุงหลุดออกจากชั้นแมนเทิล ซึ่งถุงที่บรรจุสิ่งแปลกปลอมนี้มีเพียงส่วนน้อยที่ยังคงมีชีวิตอยู่และกลายเป็นถุงมุก (pearl sac) ซึ่งจะสร้างชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตเรียกว่าเนเคอร์ (nacre) ออกมาปกคลุมสิ่งแปลกปลอมนี้ ชั้นของแคลเซียมคาร์บอเนตนี้ก็จะกลายเป็นไข่มุกทรงกลม ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเกิดของไข่มุก

- (a) สิ่งแปลกปลอมเข้าไปในชั้นแมนเทิล
- (b) แมนเทิลมีลักษณะเป็นถุงเพื่อล้อมสิ่งแปลกปลอม
- (c) ถุงนี้แยกออกจากชั้นแมนเทิล กลายเป็นถุงมุก

4.2 ไข่มุกเลี้ยง (cultured pearl) เนื่องจากไข่มุกธรรมชาติมีจำนวนน้อยไม่พอเพียงกับความต้องการของตลาด จึงมีการเพาะเลี้ยงหอยมุก แยกได้เป็นสองประเภทคือไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม และไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด ซึ่งไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจะทำการเลี้ยงในทะเลสาบ แม่น้ำ หรือในบ่อเลี้ยง โดยใช้หอยจำพวกหอยสองฝา ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ซื้อขายกันในปัจจุบันเกือบทั้งหมดมาจากประเทศจีน ส่วนไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็มได้จากหอยจำพวกหอยนางรมที่เลี้ยงในทะเล โดยไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็มมีอยู่สามชนิดหลักคือไข่มุกอะโกยา (Akoya) ไข่มุกเซาท์ซี (South Sea) และไข่มุกตาฮิติ (Tahiti)

ไข่มุกเลี้ยงนอกจากจะจำแนกเป็นน้ำจืดและน้ำเค็มแล้ว ยังจำแนกได้ตามลักษณะของไข่มุกเลี้ยงที่ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการเลี้ยงคือ

1. ไข่มุกซีกและไข่มุกครึ่งวงกลม (hemispherical pearl หรือ half pearl) ไข่มุกประเภทนี้ มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมและมีด้านหนึ่งแบน เกิดจากการนำแกนกลาง (nucleus) ซึ่งสามารถทำขึ้นได้จากวัสดุหลายชนิด เช่น เม็ดพลาสติก เม็ดแก้ว หรือ เปลือกหอยที่มีความหนา โดยนำมาคลึงให้เป็นรูปครึ่งทรงกลม แล้วนำด้านแบนของแกนกลางนี้ไปติดไว้กับเปลือกหอยด้านใน ดังนั้นแกนกลางที่ใส่เข้าไปก็จะอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นแมนเทิลกับชั้นในสุดของเปลือกหอย ซึ่งจะทำให้

เนื้อเยื่อบริเวณนั้นจับสารมุกมาเคลือบแกน ในที่สุดก็จะได้ไข่มุกซึ่งมีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมตามรูปร่างของแกนกลาง

2. ไข่มุกเดี่ยว (spherical pearl) ไข่มุกเดี่ยวมีลักษณะที่แตกต่างไปจากไข่มุกซึก คือ จะไม่มีส่วนใดติดกับเปลือกหอยแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ประเภทแสดงดังภาพที่ 3 คือ

2.1 ไข่มุกแบบไม่มีแกน (non-nucleated pearl) (ภาพที่ 5a) เป็นไข่มุกที่ได้จากผ่าตัดฝังชั้นเนื้อแมนเทิลของหอยให้เนื้อเยื่อ (donor หรือ cell mussel) ลงไปในระหว่างชั้นแมนเทิลด้านในกับชั้นแมนเทิลด้านนอกของแผ่นแมนเทิลของหอยรับเนื้อเยื่อ (recipient หรือ operation mussel) ชั้นแมนเทิลจะขยายเซลล์เพิ่มขึ้นและกลายเป็นถุงมุก สารมุกจะถูกจับมาสะสมกันอยู่ภายในถุงมุกจนกลายเป็นไข่มุกซึ่งจะมีรูปร่างหลายแบบ (irregular shape) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผ่าตัดเนื้อเยื่อเพื่อผลิตไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด หอยมุกน้ำจืดตัวหนึ่งสามารถฝังเนื้อเยื่อได้ครั้งละ 10 – 30 เม็ด หมายความว่าหอยมุกน้ำจืดสามารถผลิตไข่มุกได้ครั้งละ 10 – 30 เม็ดต่อตัว ใช้เวลาเลี้ยง 1 – 3 ปี

2.2 ไข่มุกแบบมีแกน (nucleated pearl) (ภาพที่ 5b) วิธีการผลิตไข่มุกประเภทนี้ มีการเพิ่มแกนกลาง ซึ่งอาจเป็นเนื้อเยื่อแมนเทิล หรือลูกปัดทรงกลม ทำจากเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดชนิดหนึ่งในแม่น้ำมิสซิสซิปปี สหรัฐอเมริกา ขนาดต่างๆ กัน ลงไปพร้อมกับชั้นแมนเทิล ขณะทำการผ่าตัดปลูกถ่ายเนื้อเยื่อ สารมุกที่ถูกขับออกมาจะเคลือบแกนกลางที่อยู่ภายในถุงมุก เกิดเป็นไข่มุกรูปร่างกลมสวยงามซึ่งจะได้ราคาแพง แต่วิธีในการผ่าตัดมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่า จึงต้องอาศัยความชำนาญและความละเอียดอ่อนในการผ่าตัดมาก วิธีการเพาะเลี้ยงไข่มุกแบบมีแกนใช้ผลิตไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็ม ได้แก่ ไข่มุกอะโกยา ไข่มุกเซาท์ซี ไข่มุกตาสี หอยมุกเลี้ยงน้ำเค็มตัวหนึ่งสามารถใส่นิวเคลียสได้เพียงหนึ่งหรือสองเม็ดต่อตัวต่อครั้ง



ภาพที่ 5 โครงสร้างไข่มุก

- (a) ใช้เนื้อเยื่อแมนเทิลเป็นแกนกลางหรือไข่มุกธรรมชาติ
- (b) ใช้ลูกปัดเป็นแกนกลางหรือไข่มุกเลี้ยง

ที่มา: Pearl Museum (1998)

ในส่วนสีของไข่มุกก็จะขึ้นอยู่กับ “ลิป” (lip) หรือแถบสีของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดตัวนั้น และสีของแมนเทิล ถ้าหากเอานิวเคลียสไปวางไว้ในช่วงแถบสีขาวก็จะได้ไข่มุกสีขาว หรือหากวางไว้ในช่วงแถบที่ออกสีชมพู ก็จะได้ไข่มุกสีชมพู การพิจารณาสีของไข่มุกจะมีการพิจารณาเป็นสองส่วน คือสีพื้นของไข่มุก (body color) และสีเหลือบ (overtone) ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงจากชั้นอะราโกไนต์ในส่วนของชั้นมุก สีของไข่มุกมีได้หลากหลายขึ้นกับชนิดของหอยมุกและแหล่งเพาะเลี้ยง ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด สีธรรมชาติ คือ สีขาว สีครีม สีชมพู สีมะปราง สีม่วง สีส้ม

5. การเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดในไทย

การเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดในไทยมีทั้งการเพาะเลี้ยงไข่มุกทั้งในแหล่งน้ำจืดและน้ำเค็ม การเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำเค็มมีแหล่งเพาะเลี้ยงอยู่ที่ภาคใต้ โดยเฉพาะจังหวัดภูเก็ต เกาะรังใหญ่ และเกาะสมุย

สำหรับการเพาะเลี้ยงไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมีการศึกษาและวิจัยที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดกาญจนบุรี ในปี พ.ศ. 2528 ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดกาญจนบุรี ได้เริ่มรวบรวมหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดที่พบในจังหวัดกาญจนบุรี ได้แก่ชนิด *C. hainesiana* และ *Hyriopsis (Limnoscapha) myersiana* มาทำการศึกษาเพื่อเพาะขยายพันธุ์เพื่อทดแทนทรัพยากรที่ถูกนำขึ้นมาใช้ประโยชน์อย่าง

รวดเร็ว การเพาะพันธุ์หอยมุกน้ำจืดประสบผลสำเร็จในปี พ.ศ. 2535 โดยสามารถเพาะพันธุ์หอยชนิด *C. hainesiana* ได้ ปัจจุบันศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดกาญจนบุรี สามารถเพาะพันธุ์หอยมุกเลี้ยงน้ำจืด *H. (L.) myersiana* ได้อีกหนึ่งชนิด ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ได้จากการเพาะเลี้ยงที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงน้ำจืดกาญจนบุรี เป็นไข่มุกแบบไม่มีแกน สีของไข่มุกที่ได้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของหอย

6. สมบัติของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

6.1 ส่วนประกอบทางเคมี

แคลเซียมคาร์บอเนต	ร้อยละ	92.64
โปรตีนคอนไคโอลิน	ร้อยละ	4.49
น้ำ	ร้อยละ	0.59
สิ่งอื่นๆ	ร้อยละ	2.28

6.2 สมบัติทางกายภาพ

6.2.1 ครรชนหักเห (Reflective Index; RI) 1.53 – 1.68

6.2.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity; SG) 2.75 ค่าความถ่วงจำเพาะของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดแต่ละเม็ดมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ไม่เท่ากัน (Kuchaisit, 2004) โดยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดชั้นนอกมีปริมาณสารอินทรีย์มากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดชั้นใน (Scarratt *et al.*, 2000)

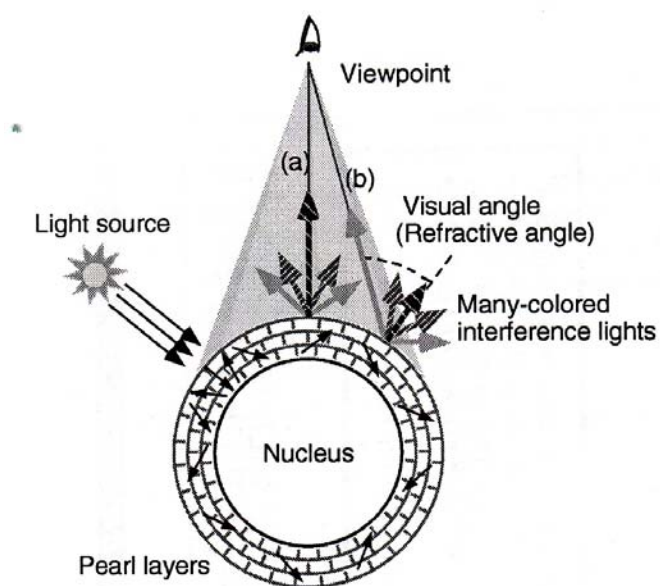
6.2.3 ความแข็ง 3.5 – 4.0

6.2.4 ความวาว (luster) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของชั้นมุก การผ่านแสงภายในชั้นมุก การเลื่อมมุก การจัดเรียงตัวของชั้นมุก และความหนาของชั้นมุก

6.2.5 สีของไข่มุกมีหลากหลายสี ทั้งสีธรรมชาติ สีจากการอาบรังสี สีจากการย้อมด้วยสารเคมี แต่การพิจารณาโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

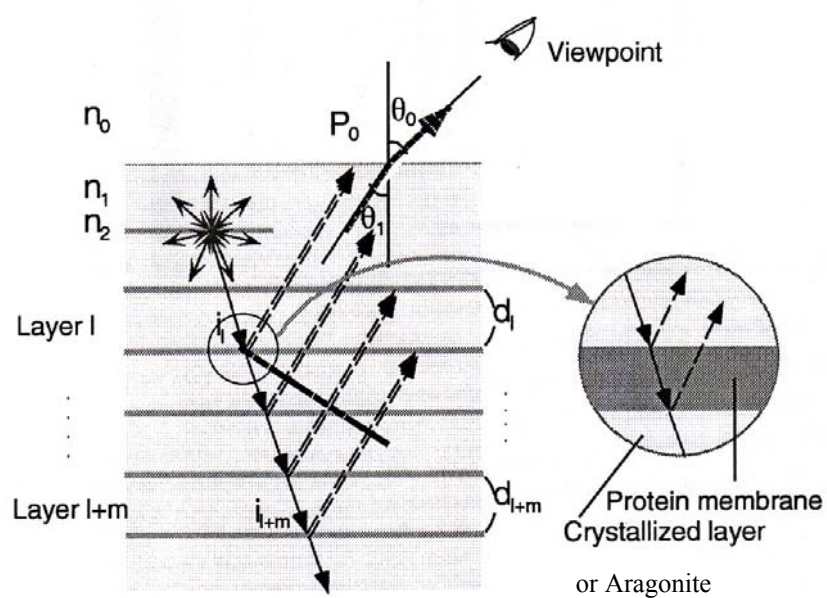
6.2.5.1 สีพื้นของไข่มุกเมื่อดำเนิน ซึ่งเกิดจากรงควัตถุ (pigments) ของสารโปรตีนในชั้นชั้นมุก เช่น สีขาว สีชมพู สีม่วง สีทอง สีดำ และสีเขียว ถ้าเป็นมุกจีนสีพื้นคือ สีส้ม

6.2.5.2 สีเหลือบที่เกิดจากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงผ่านชั้นต่างๆ ที่ผิวของไข่มุก โดยสาเหตุของสีพื้นยังไม่เป็นที่ทราบอย่างชัดเจนในรายละเอียด สำหรับการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดเกิดขึ้นในสองลักษณะต่างกันคือ เกิดเนื่องจากความเป็นเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อนของผิวของไข่มุก และเกิดจากชั้นของอะราโกไนต์ เนื่องจากไข่มุกเกิดจากการซ้อนกันของแผ่นอะราโกไนต์หนาประมาณ 0.1 – 1 ไมครอน บริเวณผิวของไข่มุกจึงมีร่องที่เกิดจากการซ้อนกันของแต่ละแผ่นอะราโกไนต์ ซึ่งร่องบนผิวไข่มุกจะทำหน้าที่เป็นร่องของเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน ในการสะท้อนและเลี้ยวเบน ทำให้แสงบางส่วนเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและบางส่วนเกิดการแทรกสอดแบบเสริม สีที่เกิดจากการเลี้ยวเบนและแทรกสอดบนผิวจึงขึ้นอยู่กับระยะห่างและความเป็นระเบียบของร่องบนผิว การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดเกิดจากความโปร่งใสของชั้นอะราโกไนต์ แสงบางส่วนจึงสามารถทะลุผ่านลงไปได้ เมื่อแสงผ่านรอยต่อระหว่างแผ่นอะราโกไนต์และคอนไคโอลิน แสงจะเกิดการหักเห ทำให้มุมตกกระทบของแสงกับแต่ละชั้นอะราโกไนต์ต่างกัน ทำให้แสงที่สะท้อนออกมาด้วยมุมสะท้อนที่ต่างกันเกิดการแทรกสอดทำให้เกิดสีเหลือบ ดังภาพที่ 6 และ 7 ดังนั้นโครงสร้างของชั้นมุก จึงมีความสำคัญมากต่อคุณภาพของไข่มุก ถ้าแผ่นชั้นอะราโกไนต์ยืงบาง และเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ จะทำให้คุณสมบัติการเหลือบมุกและความวาวสูง แต่ถ้าแผ่นอะราโกไนต์หนาเกินไปและเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ จะทำให้ไข่มุกมีคุณภาพเหลือบมุก และความวาวต่ำเนื่องจากเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันในคลื่นแสง (สุริย์, 2550) ปกติสีเหลือบจะมี 1 หรือ 2 สี เช่น สีขาวอมชมพู สีพื้น คือ สีขาว และสีเหลือบคือ สีชมพู



ภาพที่ 6 รูปแบบการหักเหและการแทรกสอดผ่านชั้นมุก

ที่มา: Nagata *et al.*, (1997)



ภาพที่ 7 การแทรกสอดของแสงที่ตกกระทบบภายในชั้นมุก

ที่มา: Nagata *et al.*, (1997)

จากภาพที่ 6 เมื่อมีแสงจากแหล่งกำเนิดตกกระทบบนผิวไข่มุก จะเกิดการสะท้อน และการหักเหภายในชั้นมุก จากนั้นเกิดการแทรกสอดกันของแสง จึงเกิดสีเหลือบในแต่ละมุมมองและจุดสังเกต

จากภาพที่ 7 แสงจากอากาศที่มีดัชนีหักเห n_0 มาตกกระทบบนผิวของไข่มุก ทำให้แสงบางส่วนสะท้อนออกจากผิวไข่มุก บางส่วนหักเหเข้าไปในชั้นมุก ผ่านชั้นโปรตีนที่มีดัชนีหักเห n_1 เกิดการสะท้อนกลับสู่ด้านบนและเกิดการหักเหไปยังแผ่นอะราโกไนต์ที่มีดัชนีหักเห n_2 โดยแสงเกิดการสะท้อนกลับที่ชั้น 1 และหักเหไปยังชั้น $1 + m$ หรือจากแสง i_1 ไปยังแสง i_{1+m} ซึ่งภายหลังแสงทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดกันที่จุด P_0 จากชั้นมุกที่มีดัชนีหักเห n_1 ไปยังอากาศที่มีดัชนีหักเห n_0 มุมตกกระทบบน θ_1 และเกิดการหักเหที่มุม θ_0 ดังนั้นจากจุดสังเกตและจุด P_0 จึงมีมุมหักเหเท่ากับ θ_0 ส่วนมุมตกกระทบบน θ_1 คำนวณได้จากกฎของสเนลล์ดังสมการที่ 1 (Nagata *et al.*, 1997)

$$\frac{\sin \theta_1}{n_1} = \frac{\sin \theta_0}{n_0} \quad (1)$$

6.2.6 ขนาด (size) ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของนิวเคลียสที่ใส่เข้าไปในตัวหอย ชนิดของหอย อุณหภูมิของน้ำ และตำแหน่งของนิวเคลียส (สุริย์, 2550) โดยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 – 7.0 มิลลิเมตร

6.2.7 รูปร่าง มีหลายลักษณะขึ้นกับรูปร่างของนิวเคลียสหรือเนื้อเยื่อแมนเทิลที่ใส่เข้าไปในหอย โดยทั่วไปจะมีรูปร่างกลม (round) ค่อนข้างกลม (off-round) หยดน้ำตา (teardrop) กึ่งบิดเบี้ยว (semi – baroque) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 รูปร่างของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

ที่มา: bluenile (n.d.)

7. ผลึก (crystal)

ผลึกเป็นของแข็งที่มีองค์ประกอบเป็นอะตอม โมเลกุล หรือไอออนซึ่งอยู่รวมกันอย่างมีระเบียบ เป็นรูปแบบที่ซ้ำกันและแผ่ขยายออกไปในเนื้อที่สามมิติ โดยทั่วไปสสารที่เป็นของเหลวจะเกิดผลึกได้เมื่ออยู่ภายใต้กระบวนการ solidification ภายใต้สภาวะที่สมบูรณ์ผลที่ได้จะเป็นผลึกเดี่ยว (single crystal) ที่ซึ่งทุกอะตอมในของแข็งมีความพอดีที่จะอยู่ในแลตทิซ (lattice คือ กลุ่มของจุดซึ่งแต่ละจุดมีลักษณะแวดล้อมเหมือนกันในทุกทิศทาง) เดียวกัน หรือโครงสร้างผลึกเดียวกัน แต่โดยทั่วไปจะเกิดหลายรูปแบบของผลึกในระหว่าง solidification ทำให้เกิดของแข็งที่เรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) solid เช่น โลหะส่วนใหญ่ที่พบเห็นในชีวิตประจำวันจะเป็นพหุผลึก (polycrystals)

โครงสร้างผลึก

ในทางวิทยาแร่และผลึกศาสตร์ (crystallography) โครงสร้างผลึก คือการจัดเรียงกันของอะตอมเป็นการเฉพาะตัวในผลึก โครงสร้างผลึกประกอบด้วยหน่วยเซลล์ (unit cell) ซึ่งเป็นกลุ่มของอะตอมที่จัดเรียงกันในทางเฉพาะเป็นโครงสร้างสามมิติแบบแลตทิซ โดยที่ว่างระหว่างหน่วยเซลล์ในทิศทางต่างๆ จะถูกเรียกว่าแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameters) คุณสมบัติความสมมาตร (symmetry) ของผลึกจะปรากฏในกลุ่มปริภูมิ (space group) ของผลึก โครงสร้างของผลึกและความสมมาตรจะแสดงหน้าที่ของผลึกในการหาคุณสมบัติหลายๆ อย่าง เช่น การแตกร้าว แถบโครงสร้าง (band structure) ทางอิเล็กทรอนิกส์ และคุณสมบัติทางแสง (crystal optics) ของผลึก

9. แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารประกอบเคมี ที่มีสูตรเคมี CaCO_3 พบได้ในหินที่อยู่ทั่วไป และเป็นส่วนประกอบหลักในเปลือกหอยทะเล ไข่มุก และเปลือกไข่ แคลเซียมคาร์บอเนตไม่ละลายในน้ำ ในธรรมชาติพบได้ในรูป เช่น อะราโกไนต์ แคลไซต์ วาเทอร์ไรต์ ปูนขาว (chalk) หินปูน (limestone) หินอ่อน (marble) ทราเวอร์ทีน (travertine)

9.1 อะราโกไนต์

อะราโกไนต์เป็นแร่ในกลุ่มคาร์บอเนต ซึ่งเป็นหนึ่งในสองของพหุสัณฐาน (polymorphs) ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต อะราโกไนต์มีแลตทิซผลึก (crystal lattice)

ระบบผลึก (crystal system)

ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)

กลุ่มปริภูมิ (space group)

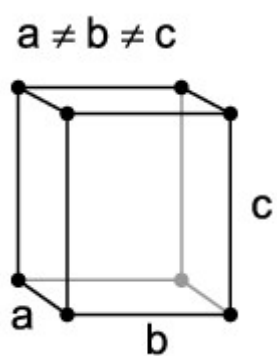
Pmcn

แลตทิซพารามิเตอร์

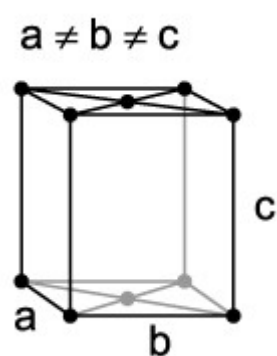
$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

ค่าคงที่ของผลึก (unit-cell dimensions)

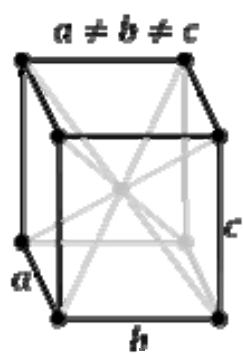
$a = 4.9611, \quad b = 7.9672, \quad c = 5.7407$



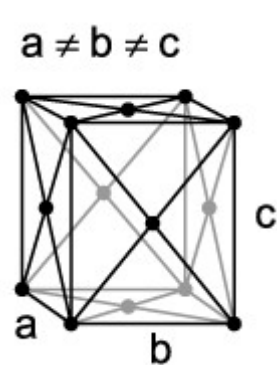
(a)



(b)



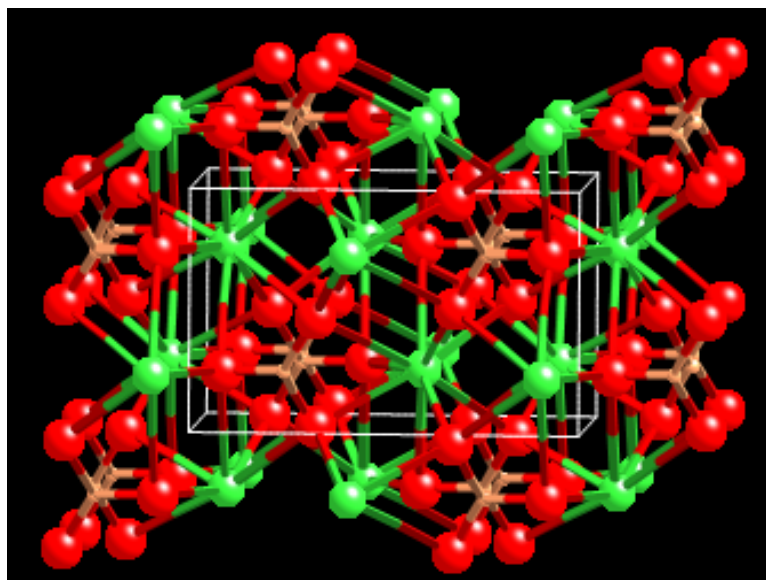
(c)



(d)

ภาพที่ 9 Orthorhombic Bravais Crystal Lattice

- (a) Simple Orthorhombic
- (b) Base-Centered Orthorhombic
- (c) Body-Centered Orthorhombic
- (d) Face-Centered Orthorhombic



ภาพที่ 10 โครงสร้างผลึกอะราโกไนต์

สีแดงแทนอะตอมออกซิเจน (O)

สีเขียวแทนอะตอมแคลเซียม (Ca)

สีน้ำตาลแทนอะตอมคาร์บอน (C)

9.2 แคลไซต์

แคลไซต์เป็นแร่ในกลุ่มคาร์บอเนต ซึ่งเป็นพื้นฐานที่เสถียรที่สุดของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนพื้นฐานอื่นเป็นแบบอะราโกไนต์และวาเทอร์ไรต์ โดยผลึกแบบอะราโกไนต์จะเปลี่ยนสถานะเป็นแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 470 องศาเซลเซียส ส่วนวาเทอร์ไรต์เป็นสถานะที่เสถียรน้อยที่สุด

ระบบผลึก

รอมโบฮีดรอล (rhombohedral)

กลุ่มปริภูมิ

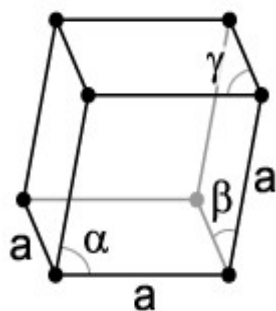
$R\bar{3}c$

แลตทิซพารามิเตอร์

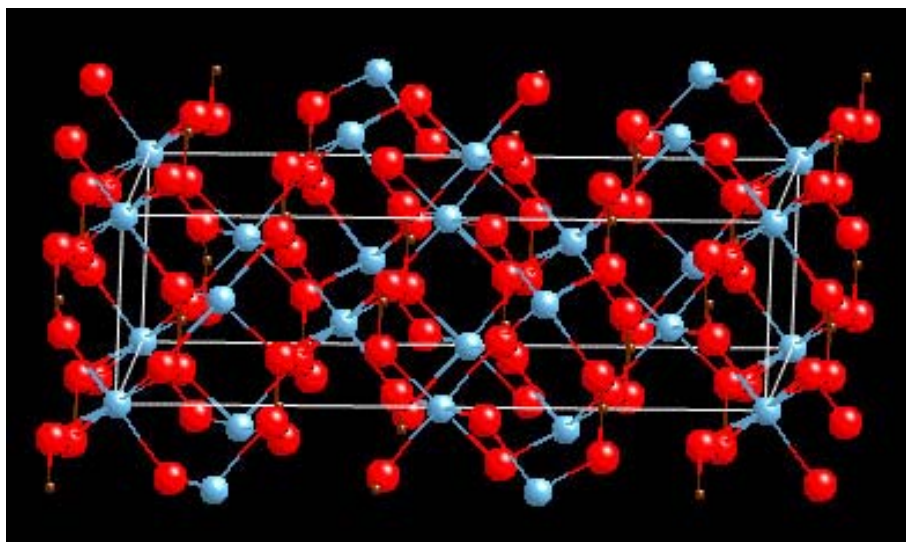
$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

ค่าคงที่ของผลึก (unit-cell dimensions)

$a = 4.9896, \quad c = 17.0610$



ภาพที่ 11 Rhombohedral Bravais Crystal Lattice



ภาพที่ 12 โครงสร้างผลึกแคลไซต์

สีแดงแทนอะตอมออกซิเจน (O)

สีฟ้าแทนอะตอมแคลเซียม (Ca)

สีน้ำตาลแทนอะตอมคาร์บอน (C)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด

1.1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย *Chamberlainia hainesiana* และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด *Chamberlainia hainesiana* จากฟาร์มเพาะเลี้ยงของศูนย์พัฒนาประมงน้ำจืด อ.ท่าม่วง จ.กาญจนบุรี ประเทศไทย

1.2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากท้องตลาด

1.3 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง จากหมู่บ้าน Shanxiahu เมือง Zhuji ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

2. การเตรียมตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด

2.1 เครื่องตัดเพชร Low Speed Diamond Wheel Saw Model 650

2.2 ใบเลื่อย (Diamond Wheel)

2.3 จี๊ฉิ่ง แท่งเหล็กทรงสี่เหลี่ยม

2.4 แท่งแกรไฟต์

2.5 น้ำหล่อเย็น

2.6 ปากคีบ

2.7 แท่นให้ความร้อน

2.8 เลื่อยฉลุ

3. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

3.1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่นำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วย XRD จะใช้เพียง 2 ชนิด คือ กลุ่มของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง และไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง เนื่องจากเป็นไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาด้วย XRD ต้องเป็นผง ดังนั้นจึงต้องทุบไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและบดให้ละเอียดมีขนาดของผง ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่เล็กและสม่ำเสมอ ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดแต่ละชนิดจะถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ

3.1.1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ถูกทุบและนำเฉพาะเปลือกด้านนอกมาบด

- ก. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีส้มกะเทาะเฉพาะส่วนเปลือกออกมา (COS)
- ข. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาวกะเทาะเฉพาะส่วนเปลือกที่ออกมา (TWS)

3.1.2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดบดทั้งเม็ด

- ก. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีส้ม (CO)
- ข. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาว (TW)

3.1.3 เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดบด

- ก. เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน (CShell)
- ข. เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย (TShell)

3.2 อุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง

- 3.2.1 ครกบดสารอะลูมินา
- 3.2.2 ช้อนตักสารแบบโลหะ
- 3.2.3 กระชกสไลด์
- 3.2.4 ขวดแก้วสำหรับใส่ตัวอย่างที่บด
- 3.2.5 แอชีโทน

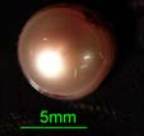
4. การศึกษาลักษณะโครงสร้างผิวภายนอก และโครงสร้างภายในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด

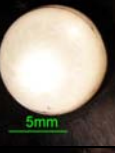
ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่นำมาทดลองเปรียบเทียบความวาวแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่หนึ่ง เปรียบเทียบไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง กับ ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากท้องตลาด และ ตอนที่สอง เปรียบเทียบไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง กับ ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย กับ เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

4.1.1 ตอนที่หนึ่ง คัดแยกไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง ที่มีความวาวต่างๆ กัน โดยใช้ความชำนาญจากผู้เชี่ยวชาญทางอัญมณีในการจำแนกความวาว ดังตารางที่ 1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับความวาว ระดับละ 3 เม็ด ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยที่มีความวาวมากที่สุดจะอยู่ในระดับ A รองลงมาจะเป็นระดับ B และระดับ C ตามลำดับ โดยที่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยที่มีความวาวระดับเดียวกันอาจมีสีไม่เหมือนกัน สำหรับตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากท้องตลาดมีการแบ่งออกเป็น 3 ระดับความวาวเช่นเดียวกับไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย โดยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนที่มีความวาวมากที่สุดจะอยู่ในระดับ D รองลงมาเป็นระดับ E และระดับ F ตามลำดับดังตารางที่ 2 แต่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจะมีระดับความวาวมากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยเมื่อเปรียบเทียบกันแบบระดับต่อระดับ และไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจะมีสีหลากหลายมากกว่า ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดทั้งหมดจะถูกตัดแบ่งออกเป็นสองส่วน เพื่อที่จะสามารถศึกษาได้ทั้งผิวภายนอกและบริเวณด้านใน

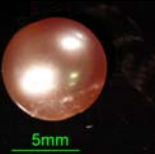
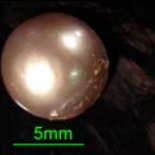
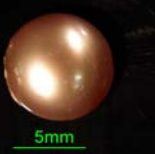
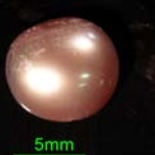
ตารางที่ 2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง

ตัวอย่าง	ภาพไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	สี	น้ำหนัก (กรัม)	ความถ่วงจำเพาะ	ดัชนีหักเห
A1		ครีม	2.6785	2.652	1.51
A2		ชมพู	1.6770	2.979	1.50

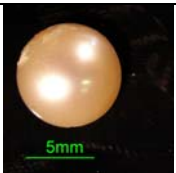
ตารางที่ 2 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ภาพไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด ไทย	สี	น้ำหนัก (กรัม)	ความ ถ่วงจำเพาะ	ดัชนีหัก เห
A3		ครีมอมชมพู	1.8875	2.701	1.50
B1		ครีม	1.1460	2.777	1.53
B2		ครีม	1.6520	2.723	1.53
B3		เหลืองส้ม	1.7510	2.750	1.52
C1		ครีม	3.5310	2.788	1.58
C2		ครีม	2.9380	2.788	1.55
C3		ครีม	1.4130	2.824	1.56

ตารางที่ 3 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจันทองตลาด

ตัวอย่าง	ภาพไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด	สี	น้ำหนัก (กรัม)	ความ ถ่วงจำเพาะ	ดัชนี หักเห
D1		ส้ม	1.3885	2.753	1.55
D2		ม่วงอมชมพู	1.4700	2.577	1.57
D3		ส้มอม น้ำตาล	1.6240	2.466	1.59
E1		ม่วงเข้ม	1.7060	2.657	1.56
E2		ส้มอม น้ำตาล	1.2875	2.644	1.60
E3		ม่วง	1.4455	2.677	1.55
F1		ส้ม	1.6960	2.674	1.58
F2		ครีม	1.3955	2.728	1.60

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ภาพไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด จีน	สี	น้ำหนัก (กรัม)	ความ ถ่วงจำเพาะ	ดรรชนี หักเห
F3		ส้มอ่อน	1.5160	2.683	1.55

4.1.2 ตอนที่สอง กลุ่มตัวอย่างเป็นไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยงกับไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง โดยแบ่งความวาวของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนออกเป็น 2 ระดับความวาว คือวาวมากและวาวน้อย เนื่องจากตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยงมีการแปรผันของความวาวไม่มากและมีความวาวน้อยกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากท้องตลาด จึงไม่สามารถแบ่งระดับของความวาว และศึกษาเปรียบเทียบเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

4.2 อุปกรณ์การวิเคราะห์

4.2.2 ปากคีบ

4.2.3 เครื่องเคลือบทอง

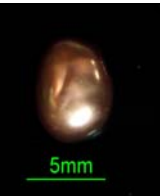
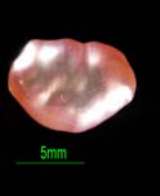
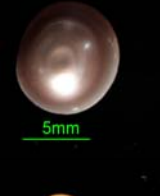
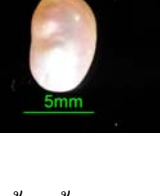
4.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM – 6480 LV

5. การวิเคราะห์การเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ใช้วิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง และไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากท้องตลาด ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีสีใกล้เคียงกัน แต่ภายในกลุ่มเดียวกันมีสีต่างกัน

5.1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง มี 4 ตัวอย่าง คือ สีนํ้าตาล (TH_brown) สีครีม (TH_cream) สีชมพูอ่อน (TH_pink) และสีม่วง (TH_purple) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง

ตัวอย่าง	ภาพไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	สี	น้ำหนัก (กรัม)	ความถี่จำเพาะ	ดัชนีหักเห
TH_brown		น้ำตาล	0.7225	2.656	1.50
TH_pink		ชมพู	0.9575	2.580	1.53
TH_purple		ม่วง	1.4360	2.684	1.51
TH_cream		ครีม	1.2055	2.091	1.50

5.2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจันทราจากท้องตลาด มี 4 ตัวอย่าง คือ สีส้มอมน้ำตาล (CH_brown) สีม่วงเข้ม (CH_purple) สีครีม (CH_cream) และสีชมพู (CH_pink)

5.3 เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี รุ่น Renishaw Invia Raman Microscope โดยใช้เลเซอร์อาร์กอนไอออน ความยาวคลื่น 514 นาโนเมตร

6. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

6.1 เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจันทราจากฟาร์มเพาะเลี้ยง (TShell และ CShell)

6.2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง สีขาว สีน้ำตาล และสีม่วง (TW, TWS, TBrS และ TVS)

6.3 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง สีขาว สีส้มและสีม่วง (CWS, COS, CO และ CVS)

เมื่อ 'S' หมายถึงการกะเพาะเฉพาะเปลือกนอกโดยไม่เอาส่วนที่เป็นแกนของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

7. การวิเคราะห์ธาตุส่วนน้อยภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

7.1 เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง (TShell และ CShell)

7.2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง สีขาว สีน้ำตาล และสีม่วง (TW, TWS, TBrS และ TVS)

7.3 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยง สีขาว สีส้ม และสีม่วง (CWS, COS, CO และ CVS)

เมื่อ 'S' หมายถึงการกะเพาะเฉพาะเปลือกนอกโดยไม่เอาส่วนที่เป็นแกนของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

7.4 เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance Spectrometer) รุ่น Bruker EPR Spectrometer Model E500 ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ของไมโครเวฟอยู่ในช่วง 9.8 GHz (x-band)

วิธีการ

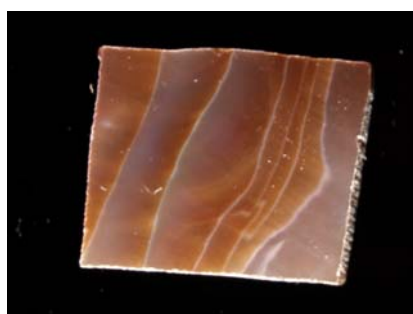
1. การเตรียมตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

เนื่องจากตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่ได้มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม จึงต้องนำมาตัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน เพื่อจะได้ศึกษาทั้งบริเวณผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน

- 1.1 วางจี๊ฟึงบนแท่นให้ความร้อน รอจนจี๊ฟึงละลาย จึงนำแท่งแกรไฟต์วางทับลงไป
- 1.2 นำจี๊ฟึงวางบนแท่งแกรไฟต์ รอจนจี๊ฟึงละลาย จึงนำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดวางทับลงไป
- 1.3 ปิดแท่นให้ความร้อน รอจนจี๊ฟึงแข็งตัว เพื่อให้แท่งเหล็ก แท่งแกรไฟต์ และไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดยึดติดกัน
- 1.4 นำแท่งเหล็กที่ติดกับตัวอย่าง ไปติดกับแท่นยึดตัวอย่างของเครื่องตัดเพชร
- 1.5 กดแท่นยึดตัวอย่างให้ค่อยๆ สัมผัสกับใบเลื่อยอย่างเบามือ จนไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดแยกออกจากกัน

2. การเตรียมตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด

นำเลื่อยจูลู่ค่อยๆ ตัดเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยบริเวณขอบของเปลือกหอย ซึ่งเป็นส่วนที่บางที่สุด ให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยขนาด 1x1 เซนติเมตร

3. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนที่ใช้ตรวจสอบจะวิเคราะห์เฉพาะโครงสร้างภายใน ดังนั้นตัวอย่างที่ใช้จึงไม่คำนึงถึงความยาวและสี ซึ่งเป็นลักษณะภายนอก การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นการเตรียมตัวอย่างที่ทำลายตัวอย่าง เพราะหลังการวิเคราะห์ไม่สามารถนำตัวอย่างกลับมาใช้ได้อีกครั้ง เนื่องจากต้องนำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดมาทุบและบดให้มีขนาดอนุภาคนาขนาดเล็กและสม่ำเสมอ

3.1 นำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดในลักษณะที่เป็นเม็ดใส่ในช่องพลาสติกที่มีความหนา จากนั้นใช้ค้อนทุบให้แตก โดยทุบพอให้ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดแยกออกเป็น 2 ส่วน คือเปลือกด้านนอก (เนื้อเยื่อชั้นนอกของชั้นแมนเทิล) และเปลือกด้านใน (เนื้อเยื่อชั้นในของชั้นแมนเทิล)

3.2 นำเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดที่ตัดเป็นชิ้นใส่ในช่องพลาสติกที่มีความหนา จากนั้นใช้ค้อนทุบให้แตก

3.3 นำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดแต่ละส่วนมาแยกบดให้เป็นผงละเอียดประมาณ 150 ไมโครเมตร (คล้ายผงแป้ง) ด้วยครกบดสาร

3.4 นำกระจกสไลด์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร มาตัดให้ได้ขนาดความกว้าง 2.50 เซนติเมตร และความยาว 3.75 เซนติเมตร

3.5 ล้างสิ่งสกปรกและคราบไขมันที่ติดบนกระจกสไลด์ด้วยน้ำยาล้างจานจนสะอาด และเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษชำระ

3.6 เช็ดกระจกด้วยเอซีโทนเพื่อล้างสิ่งสกปรกและคราบไขมันอีกครั้ง

3.7 นำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดที่บดละเอียดเป็นผงประมาณ 0.0111 กรัม มาเกลี่ยให้กระจายเต็มแผ่นกระจกสไลด์

3.8 นำแผ่นกระจกสไลด์ใส่ในเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

3.9 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ทำงานที่ 40 kV/40 mA ให้ความยาวคลื่น 1.54060 Å (CuK_{α_1}) และ 1.54439 Å (CuK_{α_2}) โดยมีอัตราส่วน $\text{CuK}_{\alpha_1} : \text{CuK}_{\alpha_2}$ เท่ากับ 1:0.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ถูกบันทึกเป็นฟังก์ชันของมุมการเลี้ยวเบน (Diffraction angle, 2θ) ในช่วง 6 – 80 องศา โดยบันทึกทุกๆ 0.05 องศา วิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้จากการทดลองโดยซอฟต์แวร์ GSAS (Larson and Dreele, 2004)

4. การวิเคราะห์โครงสร้างผิวภายนอก และโครงสร้างภายในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาด้วย SEM เพื่อวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผิวภายนอกและโครงสร้างภายในที่ลึกลงไปจากผิว ซึ่งการศึกษาด้วย SEM จำเป็นต้องเคลือบผิวตัวอย่างด้วยโลหะนำไฟฟ้า เช่น ทองแท่งเคลือบเพื่อทำให้บริเวณที่ศึกษาสามารถนำไฟฟ้าได้ จึงสามารถมองเห็นภาพ การศึกษาด้วยวิธีนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างผิวภายนอกและโครงสร้างภายในซึ่งเป็นชั้นอะราโกไนต์ที่อยู่ด้านในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่มีความวาวแตกต่างกัน

4.1 นำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนแบบผ่าซีกวางบนแท่นวางตัวอย่าง ถ้าศึกษาโครงสร้างที่ผิวนอกให้วางด้านที่เป็นส่วนโค้งของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดอยู่ด้านบน และถ้าศึกษาโครงสร้างภายในให้วางด้านส่วนตัดขวางอยู่ด้านบน จากนั้นใช้แผ่นกระดาษกาวขนาดเล็กๆ ติดที่ขอบของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดเพื่อให้ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดยึดติดกับแท่นวางตัวอย่าง

4.2 นำแท่นวางตัวอย่างพร้อมไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไปวางในเครื่องเคลือบทอง

4.3 นำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่เคลือบทองแล้ว วางในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

5. การวิเคราะห์การเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

รามานสเปกโทรสโกปีใช้ศึกษาสเปกตรัมการสั่นของพันธะโมเลกุล โดยเฉพาะการสั่นของพันธะไม่มีขั้วเช่น $C-C$ และ $C=C$ ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจะมีโปรตีนชนิดหนึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่เรียกว่า คอนไโคโอลิน ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการเกิดสีในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

ขั้นตอนการวิเคราะห์ นำไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนแบบผ่าซีกวางบนแท่นวางตัวอย่างซึ่งอยู่ใต้กล้องไมโครสโคปของเครื่องรามานสเปกโทรสโกปี โดยให้ด้านที่เป็นส่วนโค้งของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดอยู่ด้านบน

6. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDXRF มีการเตรียมเช่นเดียวกับกรณี XRD ซึ่งชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดอาจมีผลต่อคุณภาพของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับเทคนิคเชิงสเปกโทรสโกปีอื่นๆ เช่น XRD อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้จากการศึกษาองค์ประกอบธาตุด้วย EDXRF เพียงอย่างเดียว สามารถนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์แหล่งการผลิตของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดได้

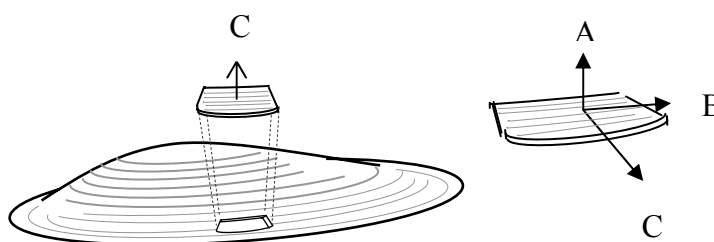
ขั้นตอนการวิเคราะห์ นำตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดแบบผางวางบนกระจกสไลด์ จากนั้นวางบนแท่นวางตัวอย่างภายในเครื่อง EDXRF

7. การวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปีนโรโซแนนซ์

7.1 ศึกษา ESR สเปกตรัมของตัวอย่างผางของตัวอย่างทั้งหมด

7.2 ศึกษา ESR สเปกตรัมแบบผลึกเดี่ยวของตัวอย่าง TShell ก่อนและหลังเผาที่ 600 องศาเซลเซียส

7.2.1 ตัดชิ้นส่วนเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน โดยตัดให้ด้านขนานกับริ้วของเปลือกหอย โดยกำหนดแกนดังนี้ แกน C ตั้งฉากกับเปลือกหอย แกน B ขนานกับริ้วบนเปลือกหอย และแกน A ตั้งฉากกับแกนทั้งสองข้างต้นดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดและการกำหนดแกนให้กับตัวอย่างหอยที่ตัดออก

7.2.2 นำชิ้นเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนที่ตัดออกมาไปวัดและบันทึก ESR สเปกตรัมโดยหมุนตัวอย่างรอบแกนทั้งสาม ทำการบันทึกสเปกตรัมทุกๆ 5 องศาจนครบ 360 องศา ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม EPR-NMR (Mombourquette and Weil, n.d.)

7.2.3 ทำการเผาชิ้นเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยที่ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมาวัดและบันทึก ESR สเปกตรัมรอบแกนทั้งสามดังเดิม

7.2.4 นำเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยที่เผาแล้วทำการวิเคราะห์ด้วย XRD เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยก่อนการเผาและหลังเผา

สถานที่และระยะเวลาในการทำวิจัย

1. สถานที่ทำการวิจัย

1.1 การเตรียมตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ที่ห้องปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วย เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผิว และ โครงสร้างภายในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 การวิเคราะห์การเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ

1.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ

1.6 การวิเคราะห์ธาตุส่วนน้อยของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วย เทคนิคอิเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์ ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

2. ระยะเวลาทำการวิจัย

ปีการศึกษา 2549 – ปีการศึกษา 2551

ผลและวิจารณ์

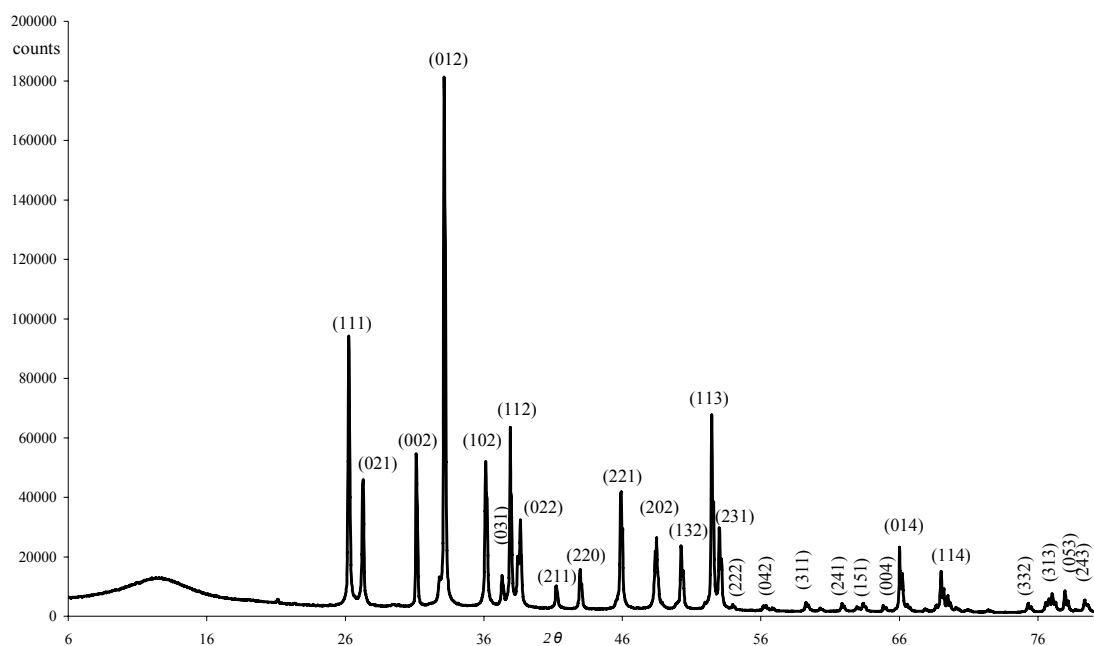
1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ภาพที่ 15 – 20 แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทั้งหมักรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เหมือนกัน โดยตำแหน่งของยอดของแต่ละตัวอย่างมีตำแหน่งที่ตรงกัน แต่ความเข้มของยอดค่อนข้างแตกต่างกัน ทุกตัวอย่างมียอดกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 13° ($\text{FWHM} \approx 4^\circ$) ซึ่งมีลักษณะเป็นยอดเดี่ยวแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน (amorphous)

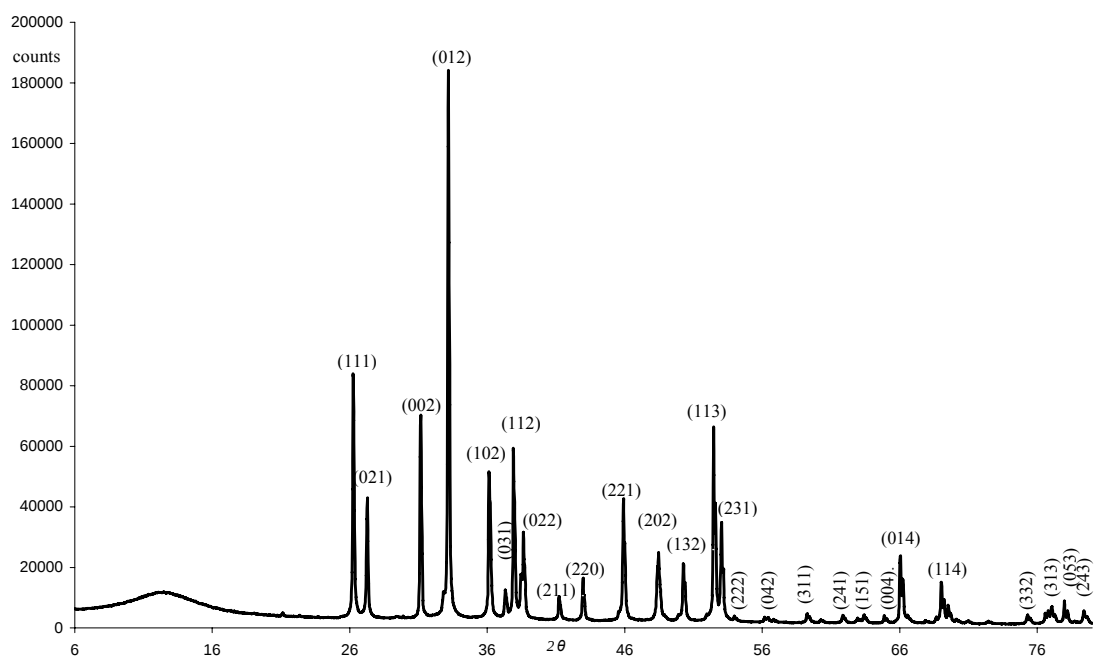
ความเป็นผลึก

อัตราส่วนความเป็นผลึกสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟของยอดอสัณฐานและยอดของผลึก ซึ่งจากภาพที่ 15 – 20 ยอดของอสัณฐานมีความกว้าง FWHM ประมาณ 4° ในขณะที่ยอดอื่นๆ มีความกว้างประมาณ $0.1 - 0.2$ องศา ซึ่งถือว่าเป็นยอดเนื่องจากผลึก ตารางที่ 5 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของยอดอสัณฐาน ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟของยอดเนื่องจากผลึก และอัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของยอดอสัณฐานและผลึก จากตารางแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทั้งหมัความเป็นผลึกไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าตั้งแต่ $87 - 91\%$ นั่นคือไม่สามารถแยกความแตกต่างระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยกับไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากความเป็นผลึกได้

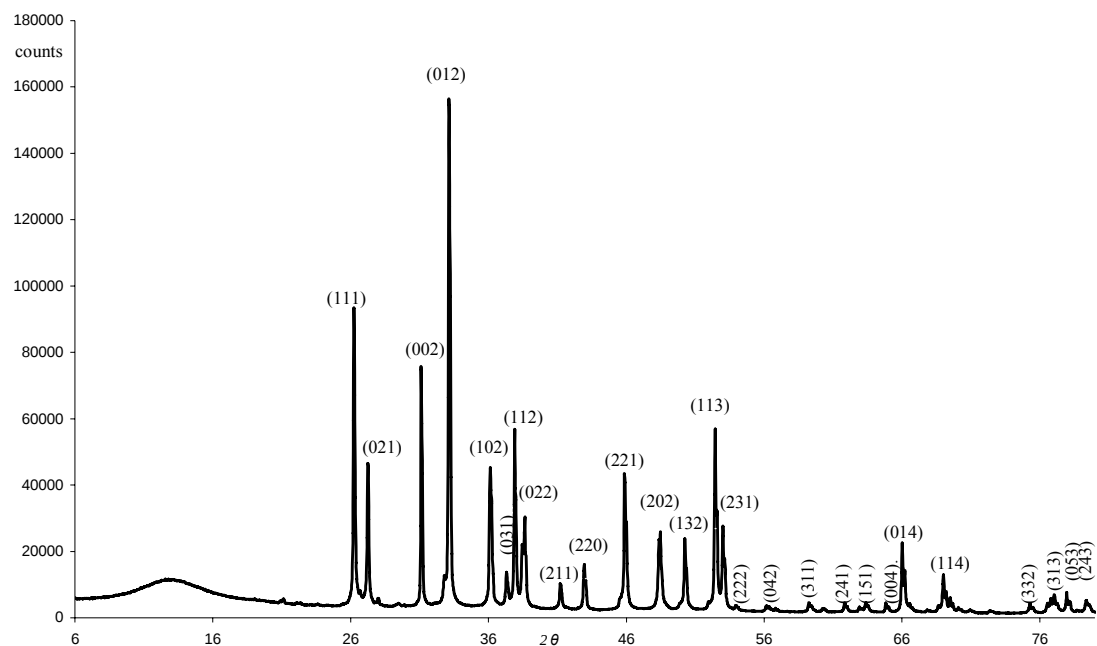
FWHM (Full Width at Half Maximum) คือค่าความกว้างของยอดที่ครึ่งหนึ่งของความสูง ซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกของตัวอย่าง ถ้ามีค่า FWHM มาก ยอดยังมีความกว้างมาก แสดงว่ามีความเป็นผลึกน้อย หรือคือมีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น



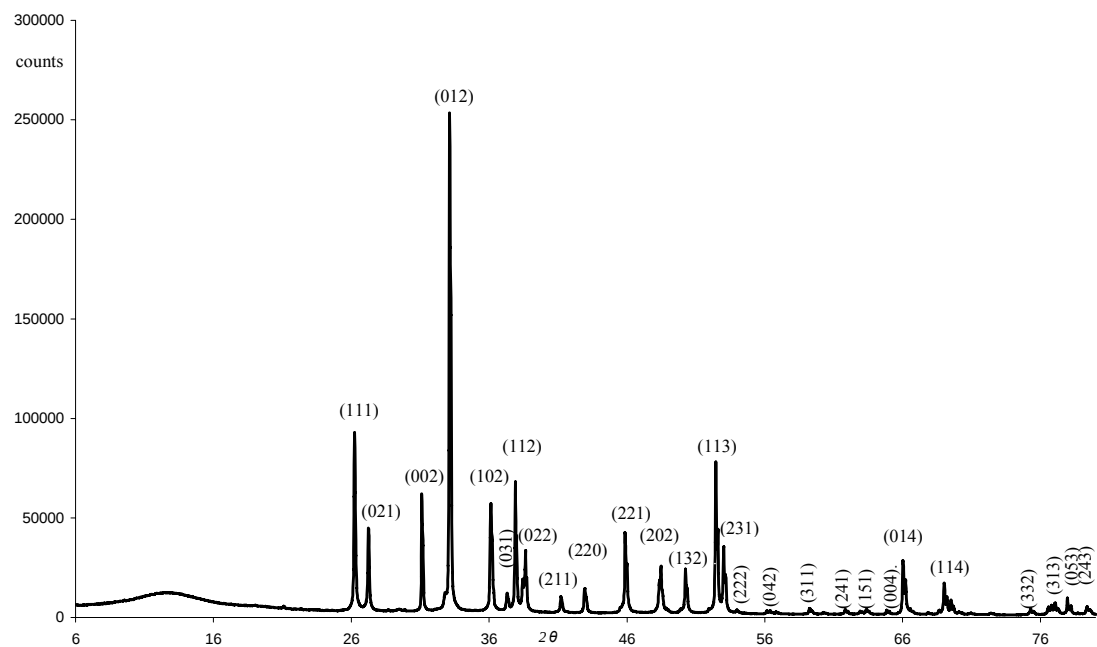
ภาพที่ 15 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีส้ม (CO)



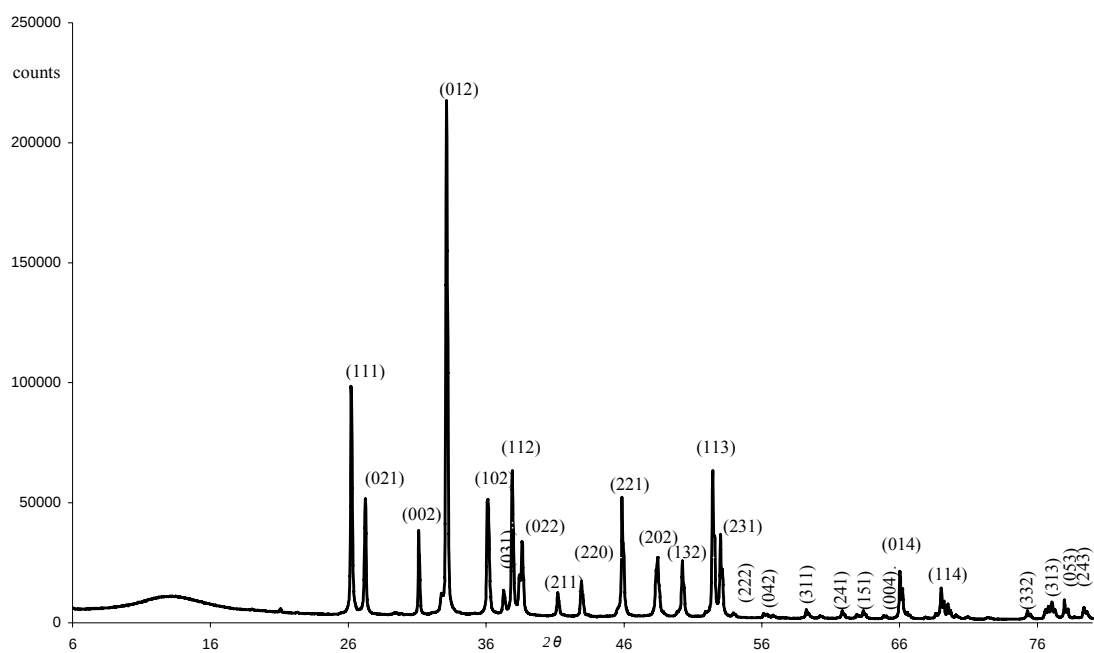
ภาพที่ 16 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกนอกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน (COS)



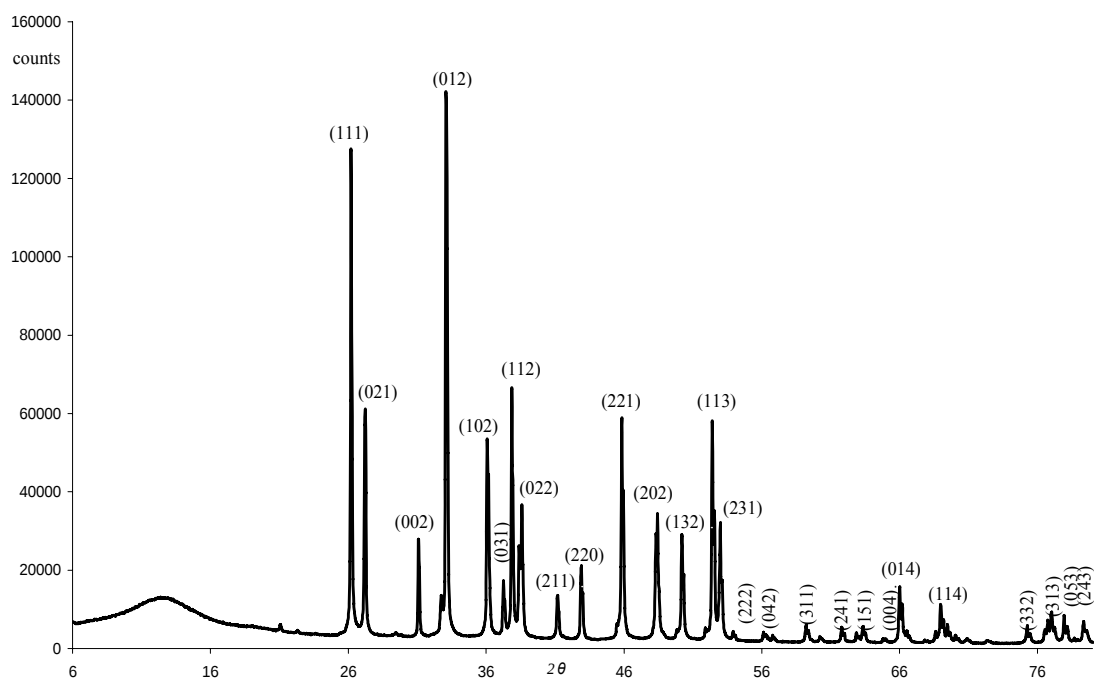
ภาพที่ 17 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลียนน้ำจืดจีน (Cshell)



ภาพที่ 18 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างไข่มุกเลียนน้ำจืดไทยสีขาว (TW)



ภาพที่ 19 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกนอกของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย (TWS)



ภาพที่ 20 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย (Tshell)

ตารางที่ 5 พื้นที่ใต้กราฟของยอดคอสันฐาน ผลึกอะราโกไนต์ และอัตราส่วนระหว่างยอดคอสันฐานต่อผลึกอะราโกไนต์

ตัวอย่าง	พื้นที่ใต้กราฟของ ยอดคอสันฐาน	พื้นที่ใต้กราฟของ ยอดจากผลึกทั้งหมด	อัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟ ของคอสันฐานต่อผลึก
CO	457400	3658000	0.125041
COS	402700	3634000	0.110814
Cshell	383500	3623000	0.105851
TW	442400	3838000	0.115268
TWS	366000	3925000	0.0932484
Tshell	444000	3755000	0.118242

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผง (Powder Diffraction File, PDF) เช่น JCPDS 5-0453 (The Joint Committee on Powder Diffraction Standard 5-0453) (McClune, 1983) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของตัวอย่างทั้งหมดมีโครงสร้างแบบอะราโกไนต์ โดยที่ตำแหน่งของยอดตรงกันแต่ความเข้มของยอดค่อนข้างแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6 โดยจากฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างแบบอะราโกไนต์พบว่าที่ยอด (111) มีความเข้มสูงสุด จึงใช้ยอด (111) เป็นตัวเปรียบเทียบกำหนด โดยกำหนดให้ยอด (111) มีความเข้มเป็น 100 %

ตารางที่ 6 ความเข้ม (%) ของยอดสำหรับแต่ละตัวอย่างในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล PDF 5-0453

(hkl)	5-0453	CO	COS	Cshell	TW	TWS	Tshell
(111)	100	100	100	100	100	100	100
(021)	52	49.46	51.07	52.21	49.03	50.61	48.79
(002)	4	58.62	83.53	82.04	67.82	37.60	23.67
(012)	46	194.56	219.40	169.18	275.99	212.91	119.34

ตารางที่ 6 (ต่อ)

(hkl)	5-0453	CO	COS	Cshell	TW	TWS	Tshell
(031)	14	14.56	14.51	14.88	13.10	13.23	13.36
(112)	38	67.43	71.10	60.94	73.52	62.40	52.28
(211)	11	10.94	12.39	11.33	11.47	12.29	10.77
(221)	65	45.85	50.93	48.43	46.52	51.14	47.36
(132)	23	25.25	26.38	25.58	26.26	25.20	23.00
(113)	25	71.65	79.27	60.98	84.15	62.21	45.70
(014)	3	24.56	28.98	24.21	31.47	21.32	12.37

เพื่อพิจารณาความแตกต่างนี้ จึงทำการเปรียบเทียบแบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ระหว่างผลการทดลองและการจำลอง (simulation) โดยใช้ข้อมูลโครงสร้างจากงานของ Villiers (Villiers, 1971) และ Negro (Negro and Ungaretti, 1971) ทำการจำลองโดยโปรแกรม DIAMOND (Brandenburg and Putz, 2004) โดยใช้ $\text{CuK}\alpha_1$ และรูปร่างของยอดเป็นแบบ Voigt function ผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 23

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองภาพที่ 15 – 20 กับฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุ ผง ดังตารางที่ 6 พบความแตกต่างอย่างชัดเจนคือยอด (012) เป็นยอดที่มีความเข้มสูงสุดในผลการทดลอง แต่จากฐานข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุ ผง ยอดที่มีความเข้มสูงสุดคือยอด (111) ความแตกต่างนี้แสดงถึงการมี preferred orientation ในตัวอย่างไข่มุกเกลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเกลี้ยงน้ำจืด โดยมียอด (012) preferred orientation ที่ชัดเจน การมี preferred orientation สามารถพบได้ในโครงสร้างอะราโกไนต์ในธรรมชาติเช่นในหอย (Cortie *et al.*, 2006) เปลือกไข่สัตว์เลื้อยคลาน (Heather and Shart, 1985) และปะการัง (Dahan *et al.*, 2003)

เนื่องจากตัวอย่างจะประกอบด้วยผลึกหรือเศษผลึก ที่มีตำแหน่งอะตอมจัดไปในทิศทางต่างๆ การมี preferred orientation เป็นลักษณะเฉพาะสำหรับตัวอย่างใดๆ พบได้บ่อย ซึ่งเกิดจากอะตอมภายในตัวอย่างมีแนวโน้มที่จะจัดเรียงไปในทิศทางหนึ่งทิศทางใดมากกว่า ซึ่งอาจจะไม่สอดคล้องกับทฤษฎีหรือหลักการที่ควรจะเป็น ทำให้การวัดความเข้มจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เกิด

ความผิดพลาด ทำให้ได้ข้อมูลที่คลาดเคลื่อน ซึ่งสามารถแก้ไขเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง โดยใช้วิธีแบบ Rietveld

Rietveld Refinement

เป็นวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ทางสถิติโดยใช้เทคนิคกำลังสองน้อยสุด (Least Squares mothode) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ระหว่างผลการทดลองกับการจำลองให้มีค่าต่างกันน้อยสุด โดยสาเหตุของการเลือกใช้วิธีแบบ Rietveld Refinement คือข้อมูลจากการทดลองมีการซ้อนทับ (overlap) กัน ทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ ส่วนใหญ่จะใช้กับตัวอย่างที่เป็นผลึกผง และผลที่ได้จะให้ข้อมูลที่ใกล้เคียงกับผลึกเดี่ยว

โดยปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ $M_p = \sum w(I_o - I_c)^2$ มีค่าน้อยสุด

เมื่อ w คือฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weight function)

I_o คือความเข้มของยอดจากการทดลอง

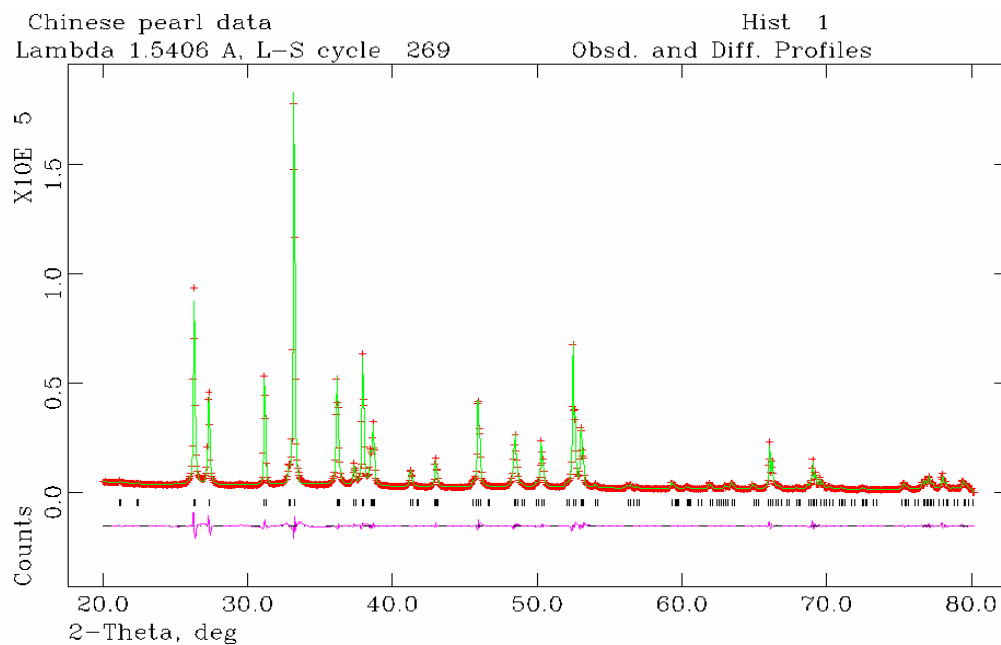
I_c คือความเข้มของยอดจากการคำนวณ

ความถูกต้องของพารามิเตอร์สามารถพิจารณาได้จากค่าResiduals (R) ซึ่งมีรูปแบบสองรูปแบบคือ R_{wp} และ R_p ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

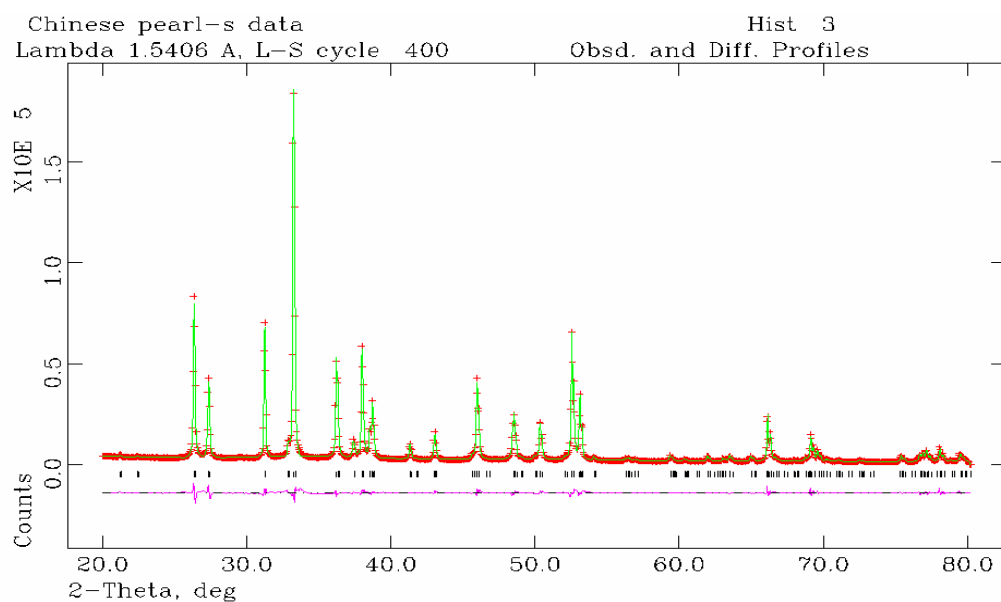
$$R_{wp} = \sqrt{M_p / \sum w I_o^2} \quad (2)$$

$$R_p = \sum |I_o - I_c| / \sum I_o \quad (3)$$

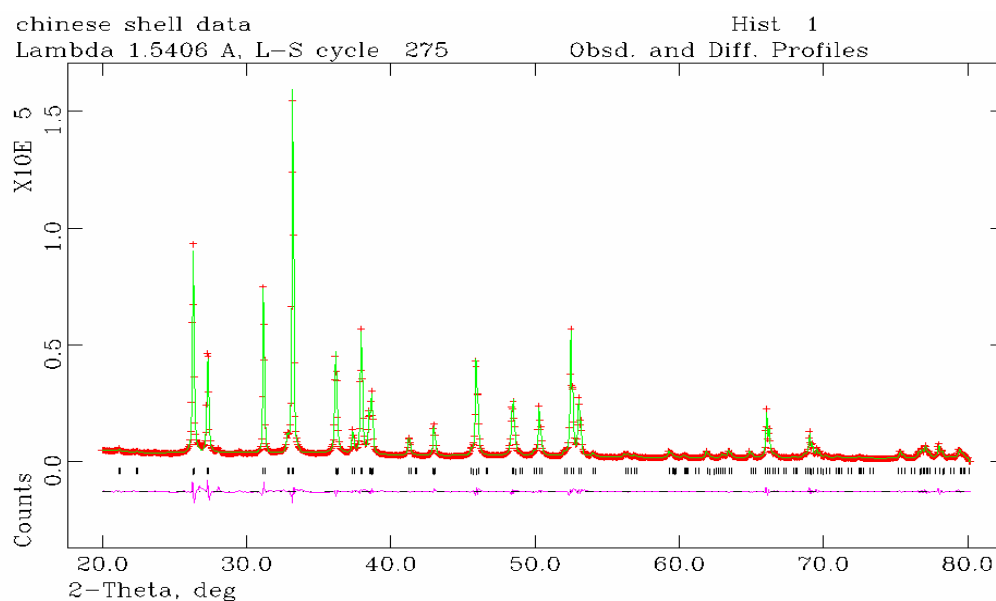
การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม GSAS (General Structure Analysis System) เพื่อหาข้อมูลของโครงสร้างผลึกที่สำคัญ คือ ขนาดเซลล์หน่วย, พารามิเตอร์ของเซลล์ และตำแหน่งของอะตอมในโครงสร้างผลึก โดยใช้วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์แบบ Rietveld ดังภาพที่ 21 – 26 แสดงผลของการปรับค่าพารามิเตอร์แบบ Rietveld และข้อมูลของโครงสร้างผลึกแสดงในตารางที่ 7 – 8



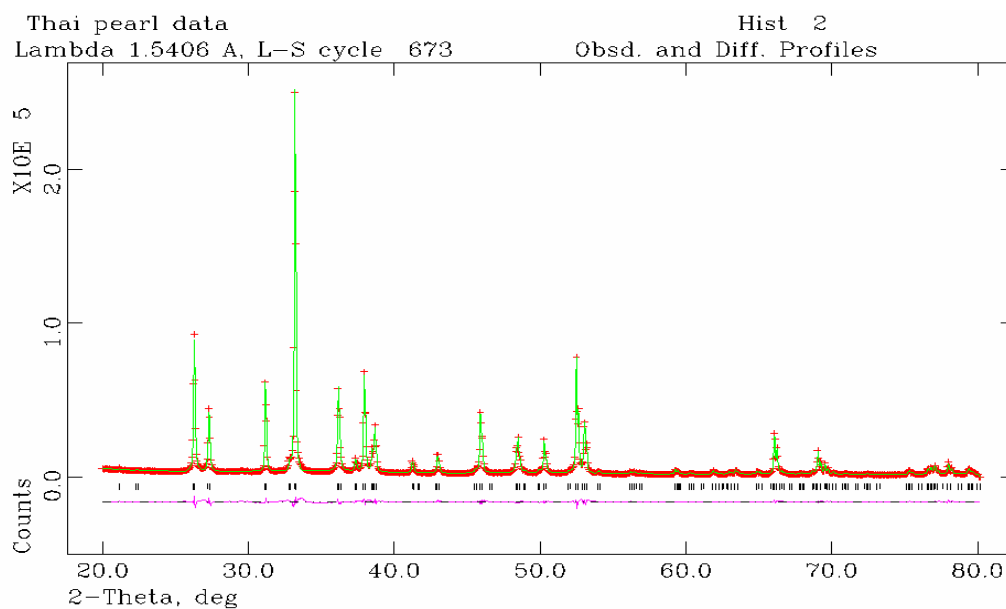
ภาพที่ 21 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง CO, + เป็นผลการทดลอง ,
 _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ
 | เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)



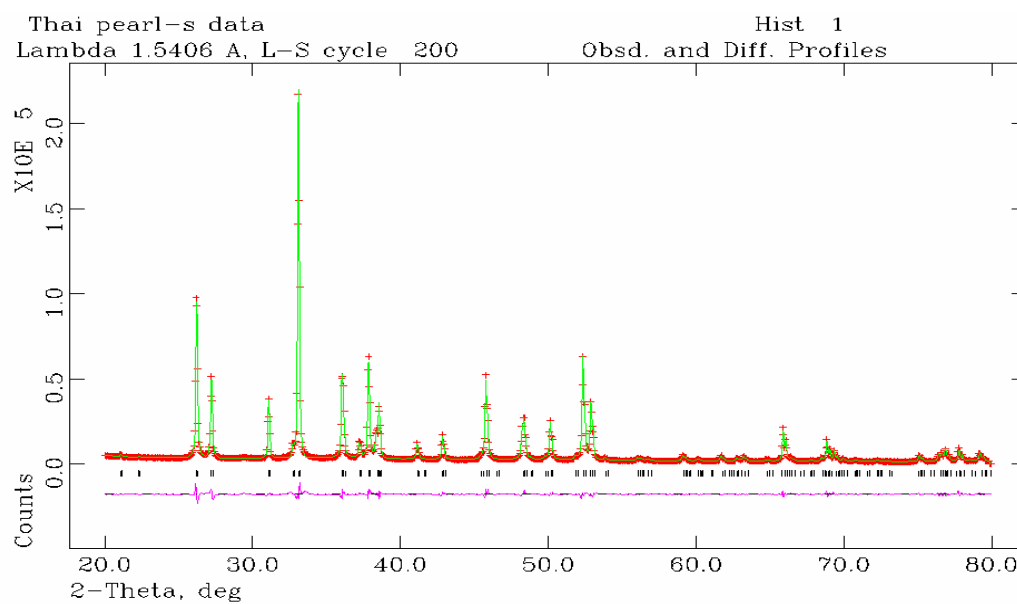
ภาพที่ 22 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง COS, + เป็นผลการทดลอง ,
 _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ
 | เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)



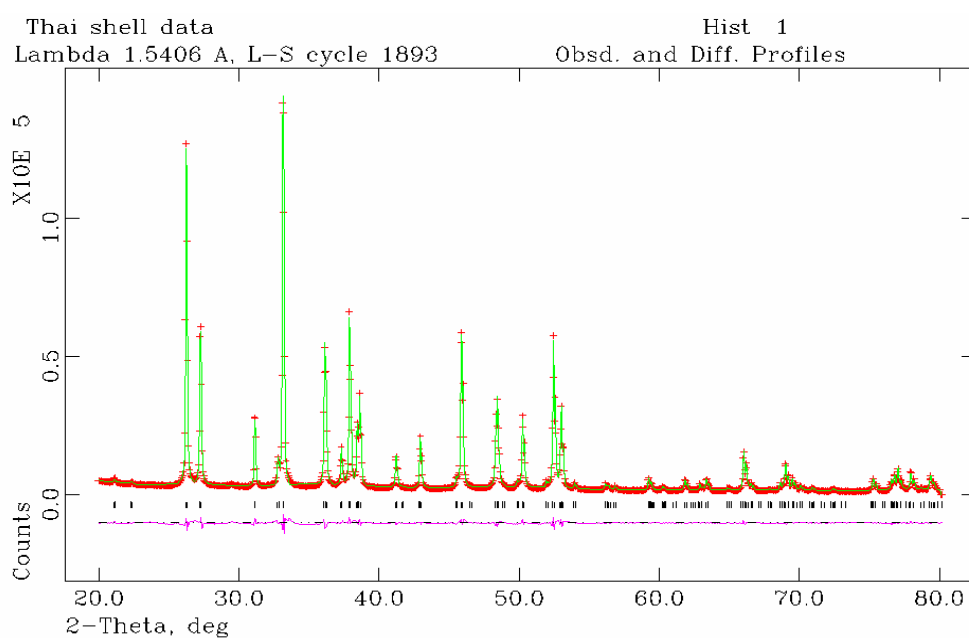
ภาพที่ 23 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง Cshell, + เป็นผลการทดลอง ,
 _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ
 | เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)



ภาพที่ 24 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง TW, + เป็นผลการทดลอง ,
 _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ
 | เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)



ภาพที่ 25 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง TWS, + เป็นผลการทดลอง ,
 _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ
 | เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)



ภาพที่ 26 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง Tshell, + เป็นผลการทดลอง ,
 _____ เป็นการจำลอง, _____ เป็นผลต่างระหว่างการจำลองและข้อมูลการทดลอง และ
 | เป็นตำแหน่งยอด (ตำแหน่ง Bragg)

ตารางที่ 7 ข้อมูลโครงสร้างผลึก พารามิเตอร์เซลล์ ขนาดเซลล์หน่วย และค่า R สำหรับแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างแบบอะราโกไนต์ มีกลุ่มปริภูมิเป็น Pmcn โครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก

Sample	a(Å)	b(Å)	c(Å)	V(Å ³)	R _{wp} (%)	R _p (%)
CO	4.95607	7.95748	5.74197	226.451	6.80	4.94
COS	4.95693	7.95833	5.741188	226.484	6.49	4.52
Cshell	4.95639	7.95783	5.74214	226.482	6.23	4.57
TW	4.96467	7.97213	5.75022	227.588	6.45	4.50
TWS	4.96534	7.97269	5.75009	227.629	6.61	4.83
Tshell	4.96338	7.96934	5.748470	227.380	5.82	4.30

ตารางที่ 8 ตำแหน่งอะตอมในโครงสร้างผลึกอะราโกไนต์ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

ตัวอย่าง	อะตอม	x	y	z
CO	Ca	0.25000	0.41465	0.23908
	C	0.25000	0.75800	0.08036
	O1	0.25000	0.91795	0.09534
	O2	0.47819	0.67827	0.08674
COS	Ca	0.25000	0.41501	0.23961
	C	0.25000	0.75590	0.08284
	O1	0.25000	0.91819	0.09531
	O2	0.47923	0.67832	0.08765
Cshell	Ca	0.25000	0.41465	0.23925
	C	0.25000	0.75592	0.08099
	O1	0.25000	0.91921	0.09579
	O2	0.47729	0.67945	0.08748

ตารางที่ 8 (ต่อ)

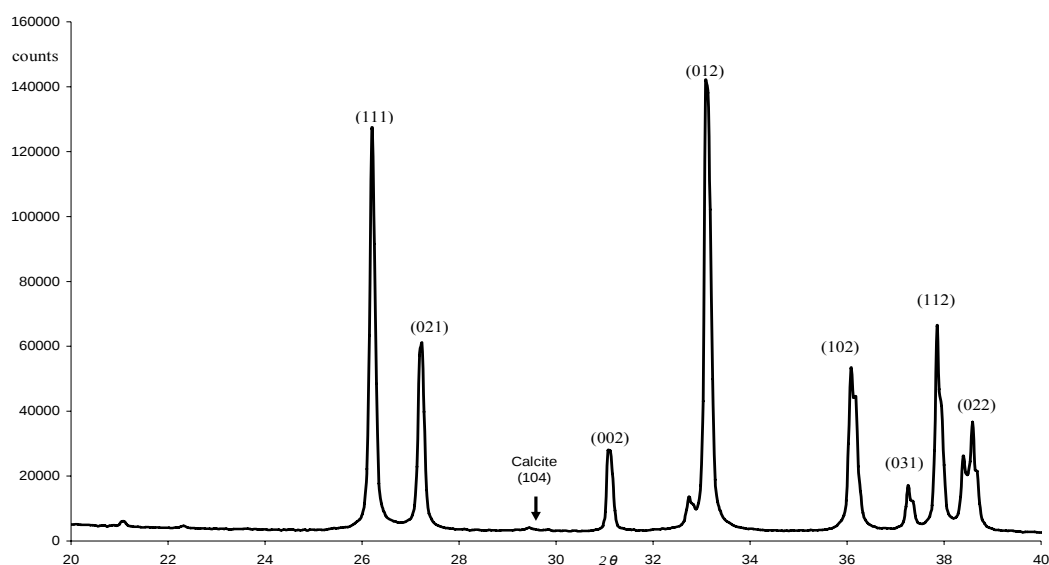
ตัวอย่าง	อะตอม	x	y	z
TW	Ca	0.25000	0.41557	0.23923
	C	0.25000	0.75325	0.07825
	O1	0.25000	0.91220	0.09445
	O2	0.48175	0.67647	0.08708
TWS	Ca	0.25000	0.41569	0.24154
	C	0.25000	0.75629	0.08350
	O1	0.25000	0.91651	0.09568
	O2	0.47705	0.67796	0.08610
TShell	Ca	0.25000	0.41474	0.24027
	C	0.25000	0.75931	0.08090
	O1	0.25000	0.91790	0.09676
	O2	0.47848	0.67809	0.08745

จากข้อมูลในตารางที่ 7 และ 8 เห็นได้ว่าโครงสร้างของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน มีความคล้ายคลึงกัน ตำแหน่งของอะตอมในโครงสร้างผลึกมีความใกล้เคียงกันในทุกตัวอย่าง สิ่งที่มีความแตกต่างกันที่สามารถสังเกตได้คือขนาดเซลล์หน่วย จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีขนาดเซลล์หน่วยที่ใหญ่กว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของจีน

แคลไซต์ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด

สำหรับแคลเซียมคาร์บอเนต นอกเหนือจากโครงสร้างแบบอะราโกไนต์ แคลไซต์เป็นอีกโครงสร้างหนึ่งที่สามารถพบได้ จากผลการทดลองดังภาพที่ 27 ในทุกตัวอย่างสามารถสังเกตพบยอด (104) ซึ่งเป็นยอดที่มีความเข้มสูงสุดสำหรับแคลไซต์ ยอดของแคลไซต์มีความเข้มต่ำมากเมื่อเทียบกับความเข้มจากโครงสร้างแบบอะราโกไนต์ ทำให้ไม่สามารถใช้โปรแกรม GSAS ในการหาปริมาณของแคลไซต์ในแต่ละตัวอย่าง จึงพิจารณาความเข้มของยอด (104) ของแคลไซต์เท่านั้น ดัง

ในตารางที่ 9 แสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลไซต์บริเวณตรงกลางไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมากกว่าด้านนอก มีลักษณะเหมือนกันทั้งไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน



ภาพที่ 27 แบบอย่างการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่าง TShell แสดงยอด (104) ของแคลไซต์

ตารางที่ 9 ความเข้มของยอด (111) ของผลึกอะราโกไนต์ ยอด (104) ของผลึกแคลไซต์ และอัตราส่วนระหว่างความเข้มของยอดผลึกทั้งสอง

ตัวอย่าง	I (111) อะราโกไนต์	I (104) แคลไซต์	I (104) แคลไซต์ ต่อ I (111) อะราโกไนต์
CO	90390	572	0.00633
COS	79891	392	0.00491
Cshell	89810	820	0.00913
TW	89544	973	0.0109
TWS	94221	764	0.00811
Tshell	123623	934	0.00756

จากการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุผง แสดงให้เห็นว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีนมีโครงสร้างหลักเป็นแบบอะราโกไนต์ มีแคลไซต์บริเวณตรงกลางของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมากกว่าด้านนอก ถ้าพิจารณาไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดทั้งเม็ดจะพบว่าปริมาณแคลไซต์ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจะมี 1.09 % มากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนซึ่งมีเพียง 0.63 % ตัวอย่างทั้งหมดมี (012) preferred orientation ความแตกต่างอีกประการหนึ่งระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีนคือขนาดเซลล์หน่วย โดยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีขนาดเซลล์หน่วยที่ใหญ่กว่า

2. ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตอนที่หนึ่ง

ภาพถ่าย SEM สำหรับไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยงที่บริเวณผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน แสดงดังภาพที่ 28 – 36 โดยเรียงลำดับจากกลุ่มตัวอย่างที่มีความวาวมากไปน้อย เห็นได้ว่าภาพที่ผิวจะมีลักษณะเป็นเส้นเหมือนร่องของเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน แต่ไม่ได้มีอยู่อย่างหนาแน่นตลอดทั้งเม็ด ค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องไม่สามารถบ่งบอกได้ชัดเจนนัก เนื่องจากร่องบนผิวของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไม่ได้จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ ดังนั้นตัวเลขที่ระบุตรงคำบรรยายภาพจึงเป็นค่าโดยประมาณ

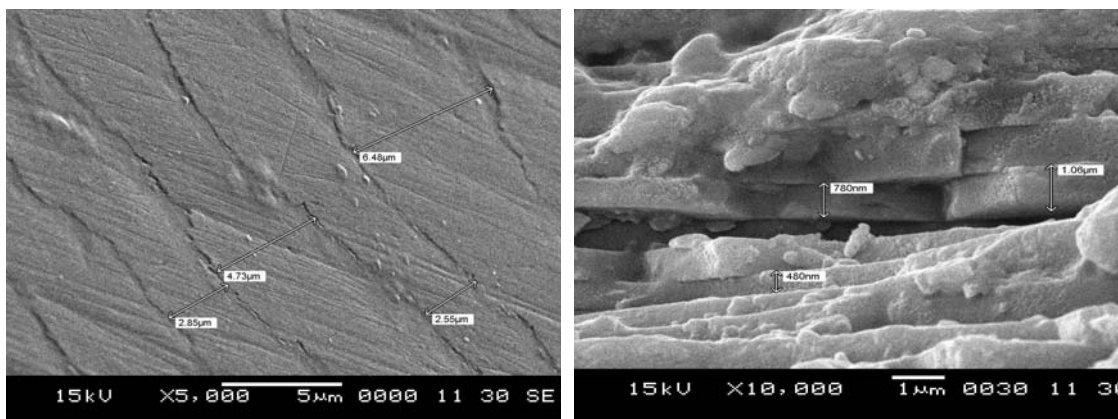
ภาพถ่าย SEM ของโครงสร้างภายใน แสดงให้เห็นการเรียงตัวเป็นชั้นของผลึกอะราโกไนต์ แต่รูปที่ได้มีลักษณะค่อนข้างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการตัดด้วยใบมีดได้ไม่ดัดเน็ค ความหนาของผลึกอะราโกไนต์เรียงตามความวาวมากไปน้อยมีค่าเฉลี่ย 561, 737 และ 583 นาโนเมตร ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ไม่มีความสัมพันธ์กับความวาว

ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากท้องตลาด แสดงดังภาพที่ 37 – 45 โดยเรียงลำดับจากความวาวมากไปน้อย เห็นได้ว่ามีลักษณะร่องที่ผิวชัดเจน และมีปริมาณหนาแน่นมากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยง

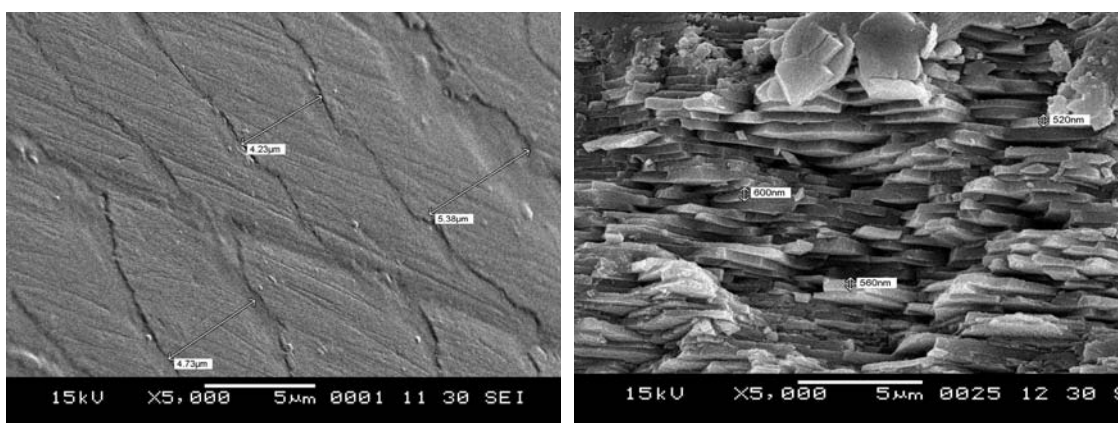
ภาพถ่าย SEM ของโครงสร้างภายใน สามารถวัดความหนาได้ค่าที่แน่นอนมากกว่าซึ่งเป็นผลมาจากการตัดด้วยใบมีดได้ดีกว่า ความหนาของผลึกอะราโกไนต์เรียงตามความวาวมากไปน้อยมีค่าเฉลี่ย 471, 315 และ 486 นาโนเมตร ตามลำดับ

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยบริเวณผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน

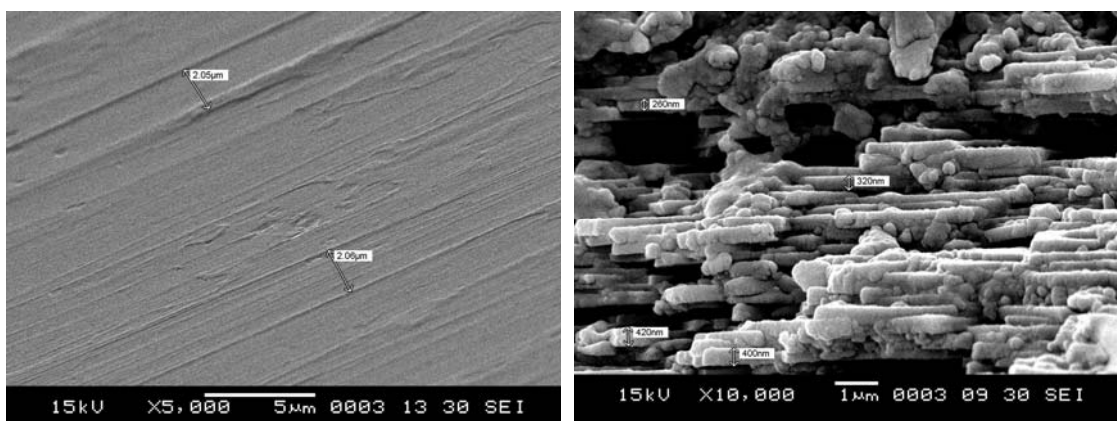
กลุ่ม A (วาวมาก)



ภาพที่ 28 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ A1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 4.12 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 773 นาโนเมตร

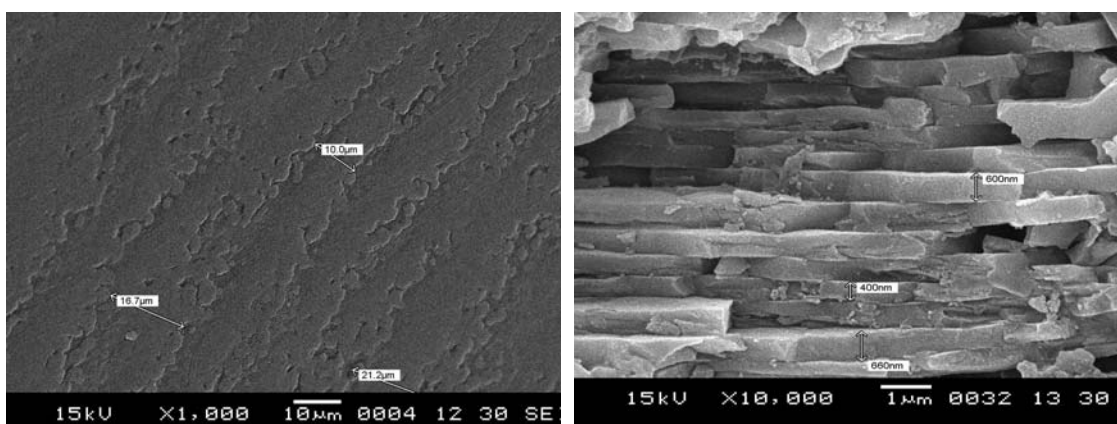


ภาพที่ 29 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ A2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 4.15 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 560 นาโนเมตร

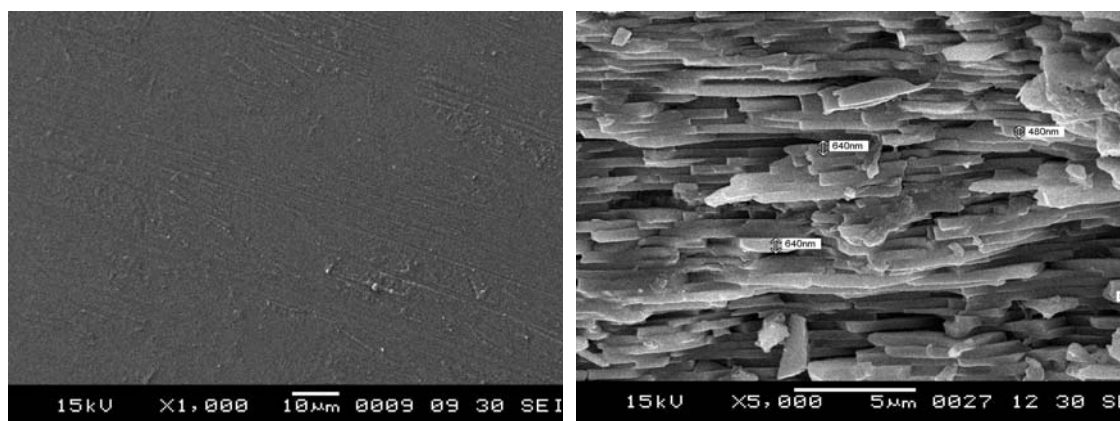


ภาพที่ 30 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ A3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 2.05 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 350 นาโนเมตร

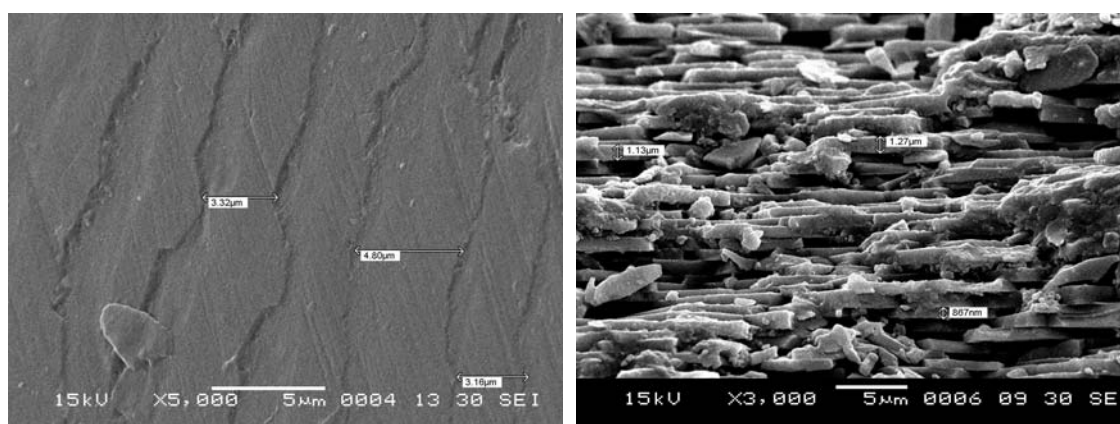
กลุ่ม B (วาวปานกลาง)



ภาพที่ 31 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ B1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 15.9 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 553 นาโนเมตร

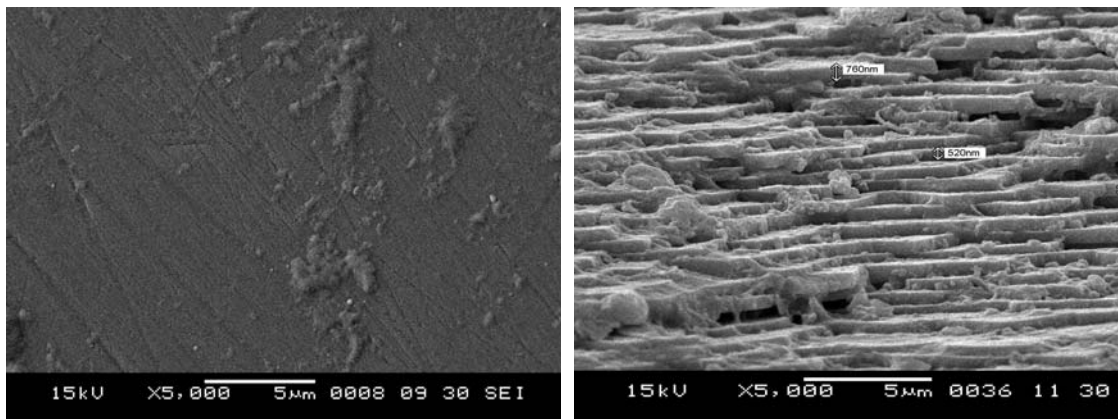


ภาพที่ 32 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ B2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 1.99 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 570 นาโนเมตร

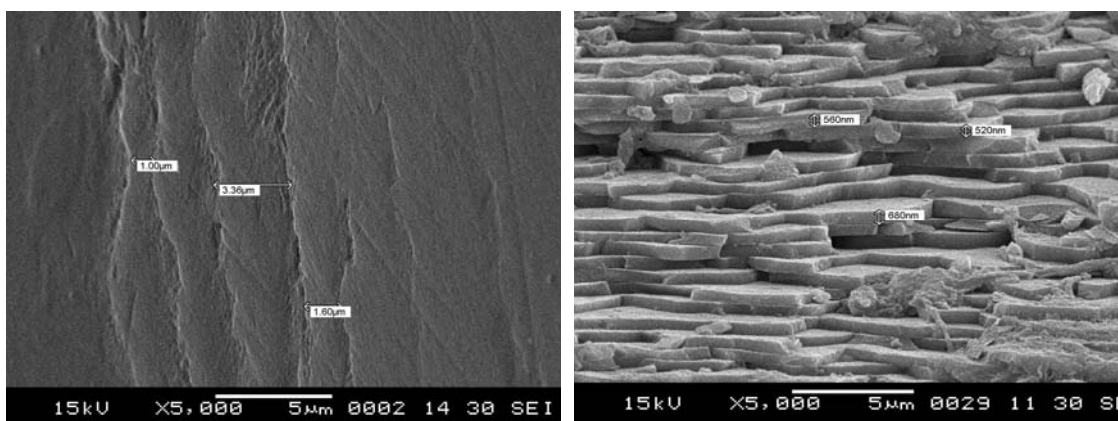


ภาพที่ 33 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ B3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 3.76 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 1089 นาโนเมตร

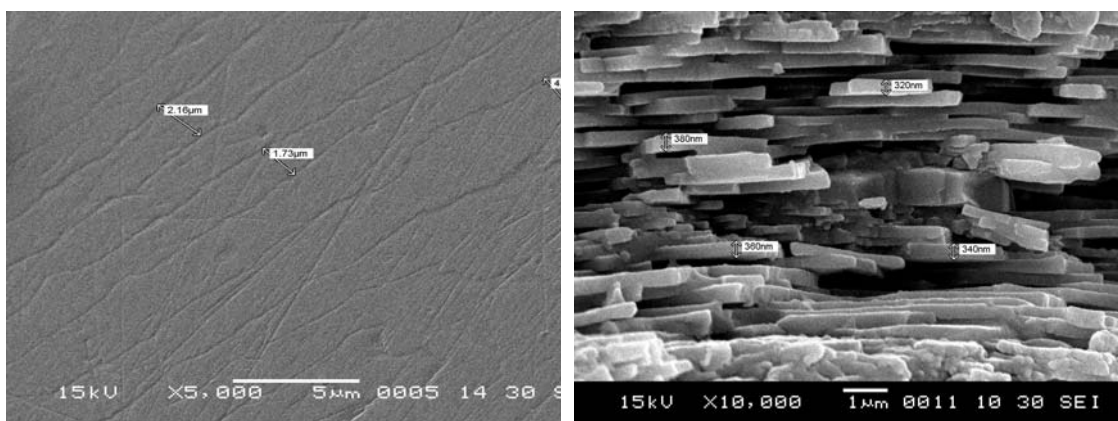
กลุ่ม C (วาวน้อย)



ภาพที่ 34 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ C 1 มีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 613 นาโนเมตร



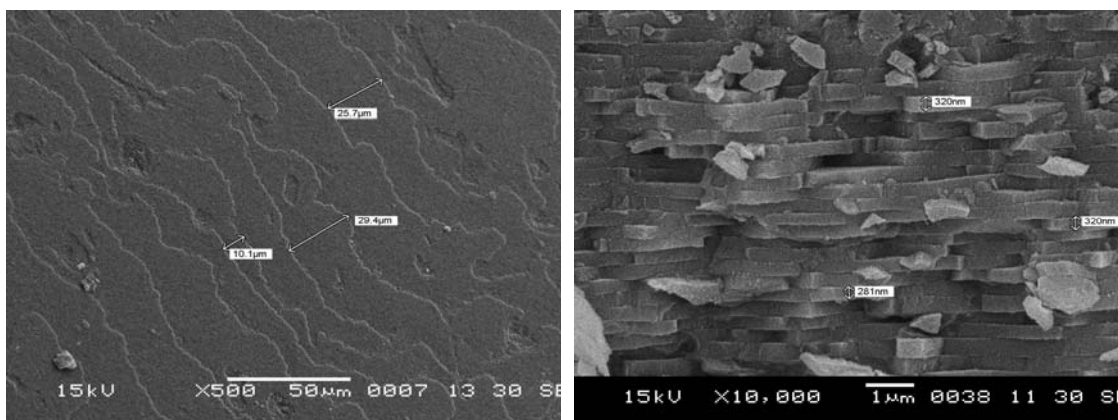
ภาพที่ 35 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ C2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 1.99 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 586 นาโนเมตร



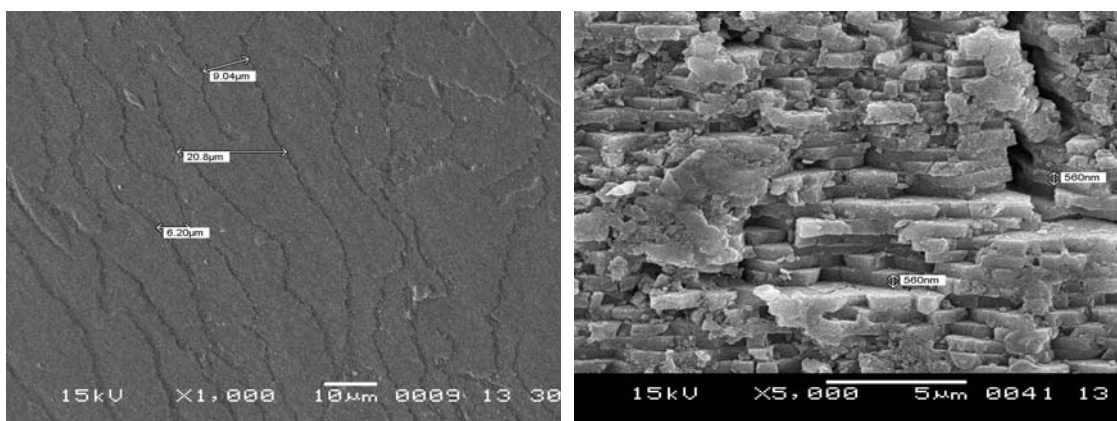
ภาพที่ 36 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ C3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 2.67 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 350 นาโนเมตร

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจิบบริเวณผิวภายนอกและโครงสร้างภายใน

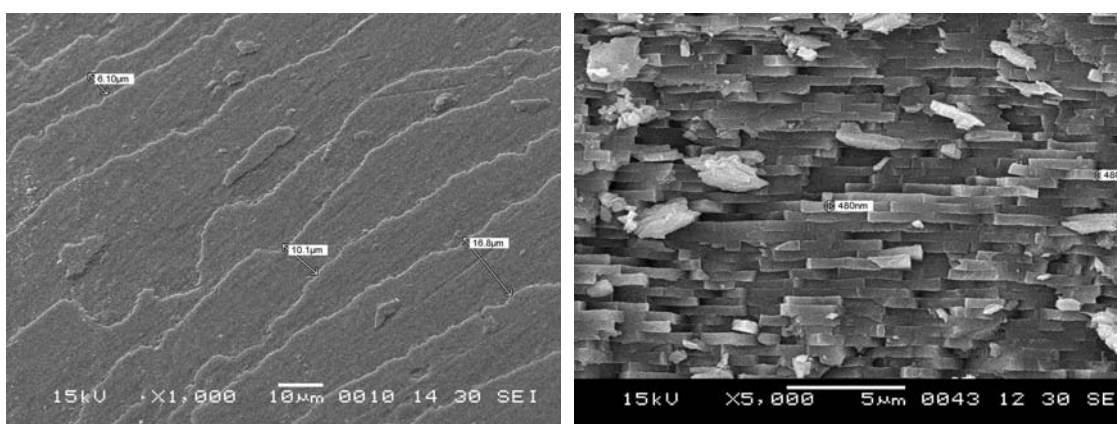
กลุ่ม D (วาวมาก)



ภาพที่ 37 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ D1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 21.7 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 307 นาโนเมตร

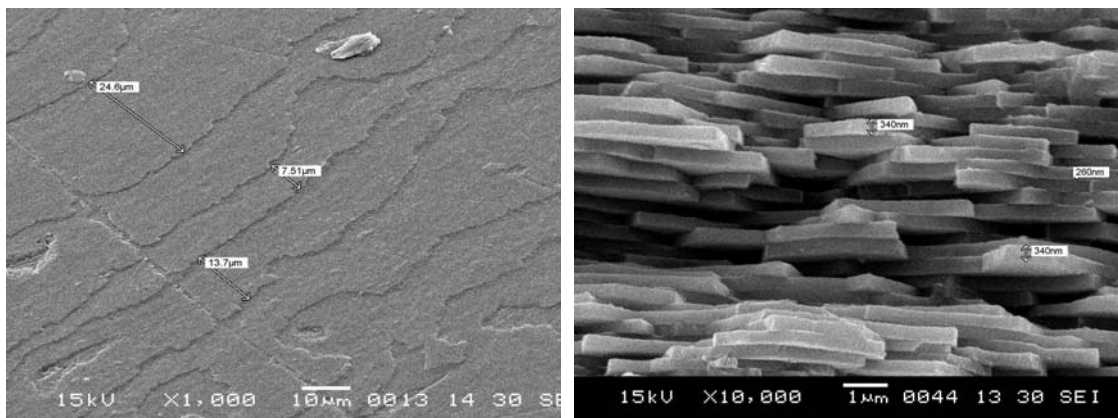


ภาพที่ 38 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ D2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 12.1 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 628 นาโนเมตร

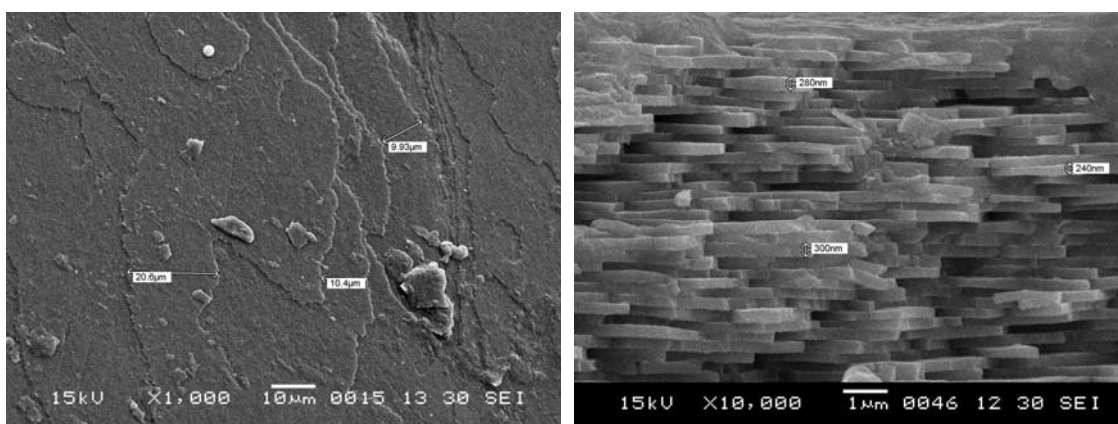


ภาพที่ 39 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ D3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 11.0 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 480 นาโนเมตร

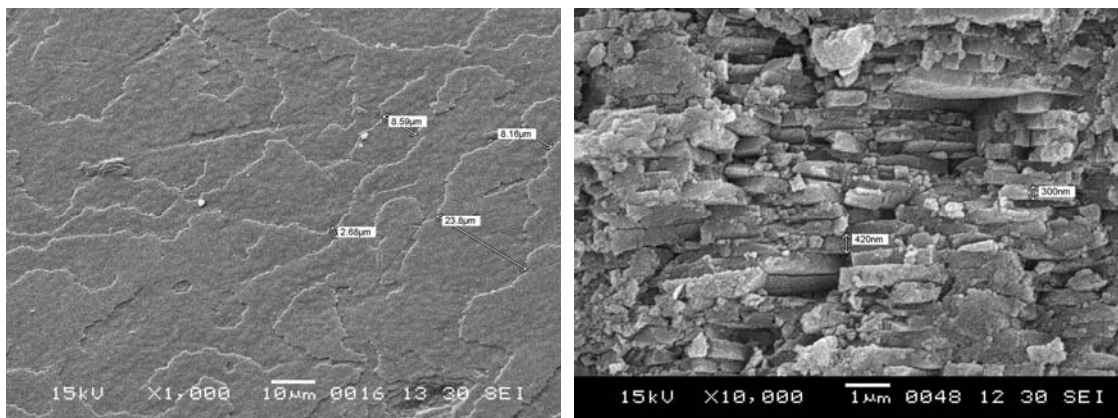
กลุ่ม E (วาวปานกลาง)



ภาพที่ 40 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ E1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 15.3 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 313 นาโนเมตร

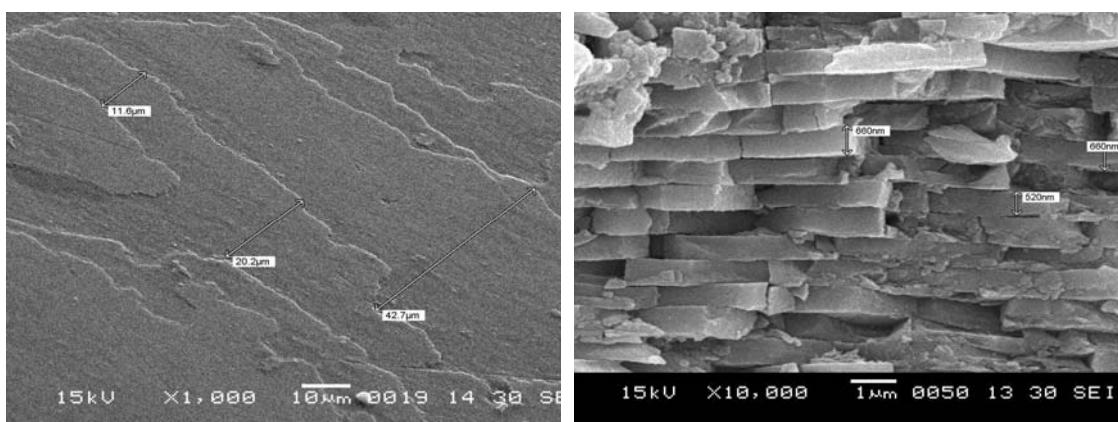


ภาพที่ 41 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ E2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 13.6 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 273 นาโนเมตร

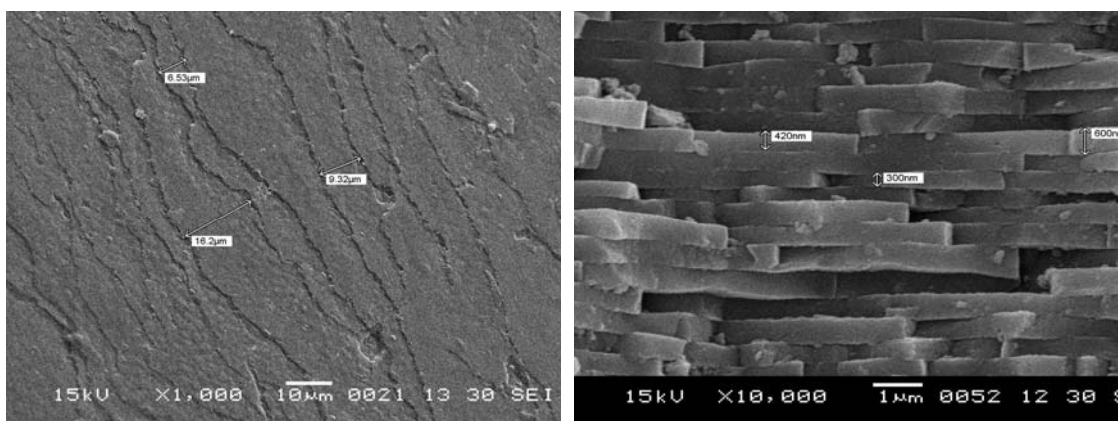


ภาพที่ 42 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ E3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 10.8 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 360 นาโนเมตร

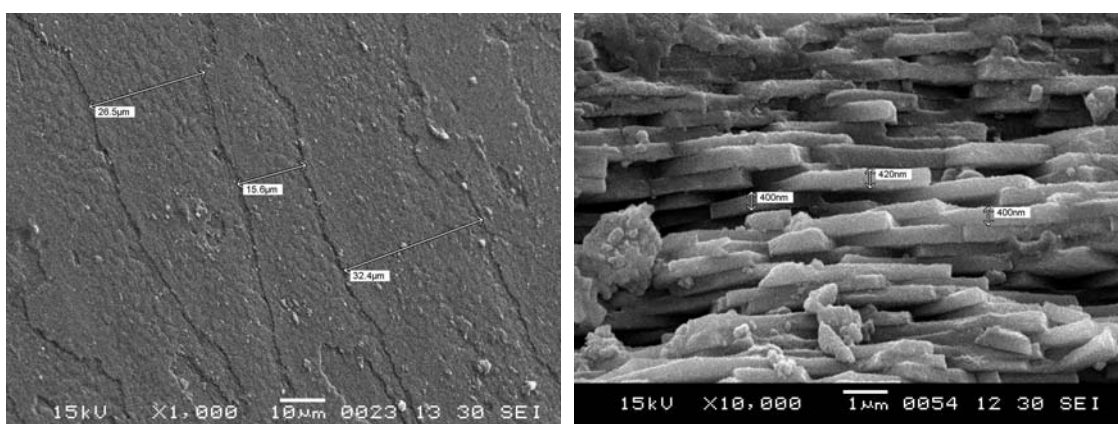
กลุ่ม F (วาวน้อย)



ภาพที่ 43 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ F1 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 24.8 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 613 นาโนเมตร



ภาพที่ 44 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ F2 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 10.7 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 440 นาโนเมตร



ภาพที่ 45 ภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของ F3 มีค่าเฉลี่ยความกว้างของร่องเท่ากับ 24.8 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 406 นาโนเมตร

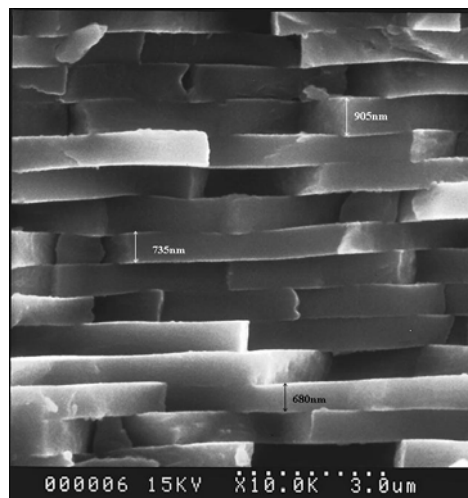
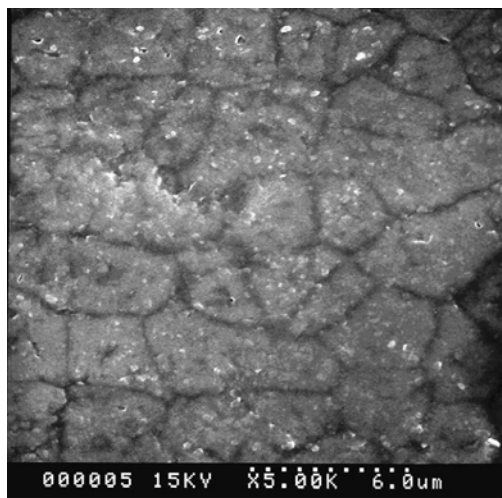
ตอนที่สอง

ภาพถ่าย SEM บริเวณผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนแสดงดังภาพที่ 46 เห็นได้ว่า ผิวภายนอกของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีลักษณะคล้ายแผ่นกระเบื้องทรงหลายเหลี่ยมปกคลุมไปทั่ว ตรงกลางแผ่นเป็นจุดดำทึบ และมีระยะห่างระหว่างแผ่น ส่วนเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีลักษณะเป็นเส้นคล้ายรอยแตกร้าว ส่วนโครงสร้างภายในพบว่าแผ่นอะราโกไนต์ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีความหนาหนามากกว่าเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน คือมีความหนาเฉลี่ย 773 และ 490 นาโนเมตร ตามลำดับ

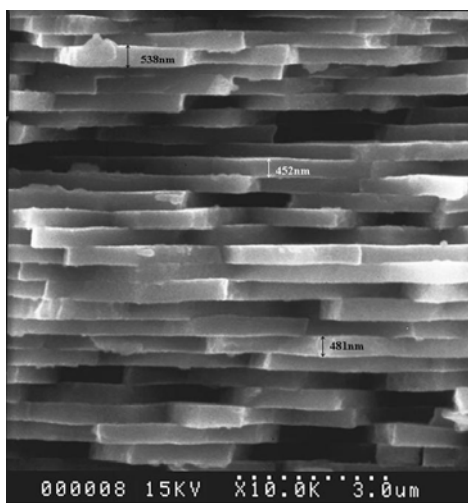
ภาพที่ 47 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีม่วงวาวมาก และสีขาววาวมากจากฟาร์มเพาะเลี้ยง เห็นได้ว่าลักษณะของผิวไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมีความเป็นระเบียบน้อยและมีระยะห่างระหว่างขอบค่อนข้างมากคือประมาณ 20 ไมโครเมตร มีความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 381 และ 367 นาโนเมตร ตามลำดับ

สำหรับภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาววาวน้อยแสดงดังภาพที่ 48 ผิวนอกมีลักษณะเป็นร่อง มีปริมาณหนาแน่น รูปร่างไม่เป็นระเบียบ กระจายอยู่ทั่ว ส่วนขอบของแผ่นอะราโกไนต์ที่มาต่อกันอย่างชัดเจน เนื่องจากความหนาของชั้นอะราโกไนต์ที่มากกว่าอีกสองตัวอย่างข้างต้น คือ 513 นาโนเมตร

ภาพที่ 49 แสดงภาพถ่าย SEM ที่ผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาววาวมาก ที่ผิวมีลักษณะเป็นแผ่นรูปร่างไม่แน่นอนคล้ายแผ่นกระเบื้องปกคลุมต่อเนื่องทั่วทั้งผิว ซึ่งไม่พบลักษณะแบบนี้ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาววาวมาก ส่วนโครงสร้างภายในพบว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาววาวมากมีชั้นอะราโกไนต์หนากว่าคือ 577 นาโนเมตร ในขณะที่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาววาวน้อยมีความหนาของแผ่นอะราโกไนต์เท่ากับ 467 นาโนเมตร

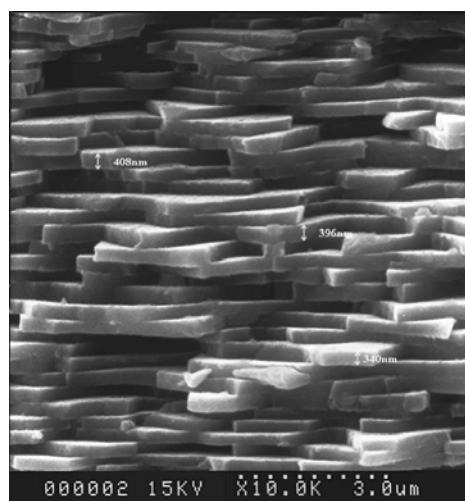
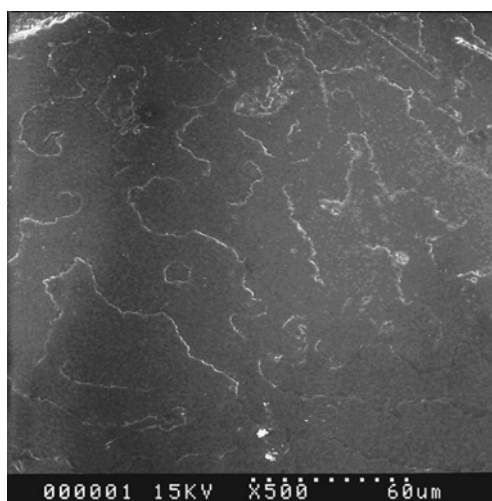


เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย

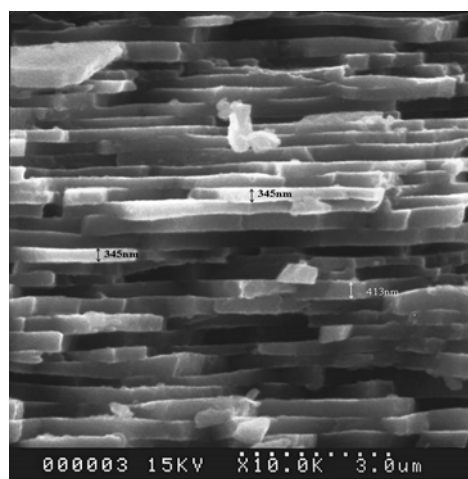
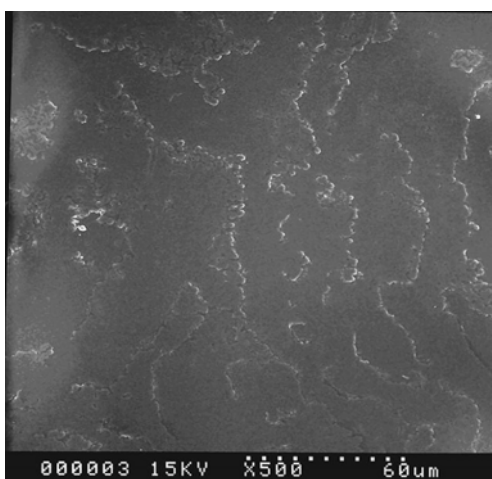


เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

ภาพที่ 46 ภาพถ่าย SEM ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย (บน) บริเวณผิว (ซ้าย) และส่วนตัดขวาง (ขวา) และภาพถ่าย SEM ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน (ล่าง) บริเวณผิว (ซ้าย) และส่วนตัดขวาง (ขวา)

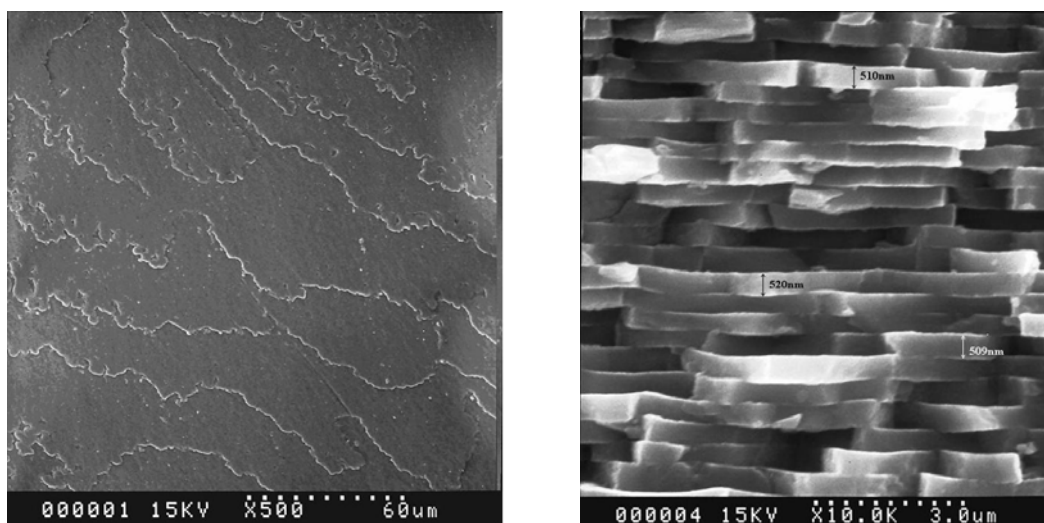


ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีม่วงวาวมาก



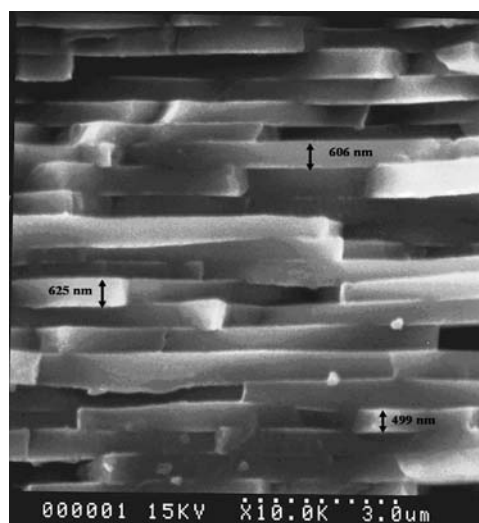
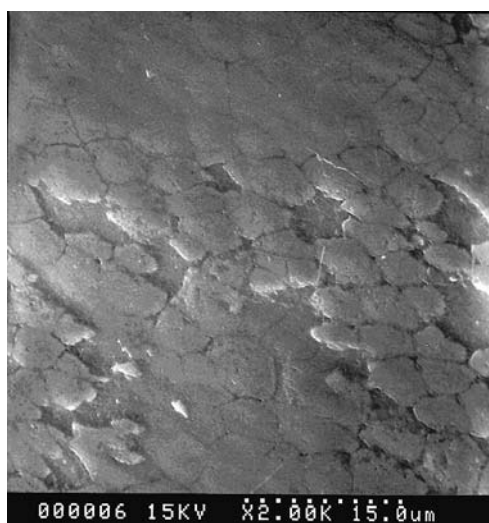
ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาววาวมาก

ภาพที่ 47 ภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสีม่วงวาวมาก (บน) บริเวณผิว (ซ้าย) และส่วนตัดขวาง (ขวา) และภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาวจาก ฟาร์มเพาะเลี้ยง (ล่าง) บริเวณผิว (ซ้าย) และส่วนตัดขวาง (ขวา)

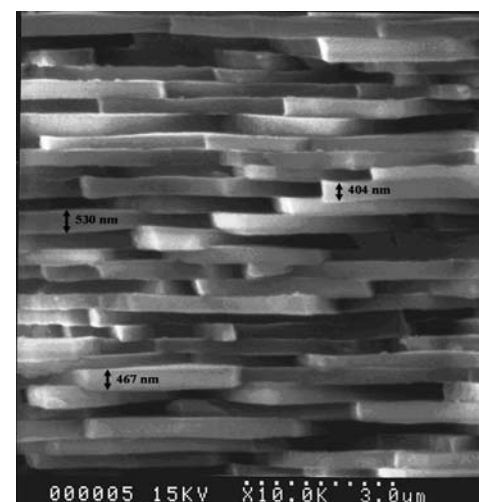
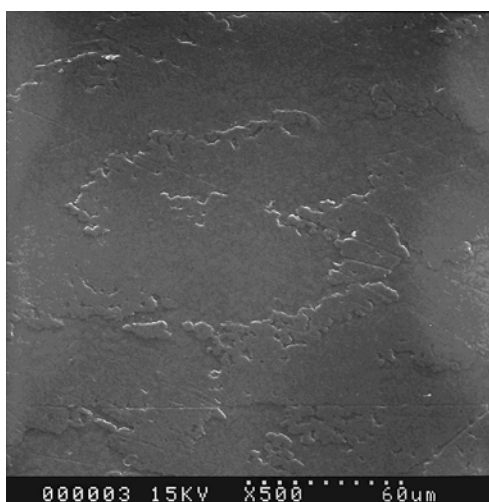


ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาววาวน้อย

ภาพที่ 48 ภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสีขาววาวน้อยบริเวณผิวน้ำ (ซ้าย) และ ส่วนตัดขวาง (ขวา)



ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาววาวมาก



ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาววาวน้อย

ภาพที่ 49 ภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจากฟาร์มเพาะเลี้ยงสีขาววาวมาก (บน) บริเวณผิว (ซ้าย) และส่วนตัดขวาง (ขวา) และภาพถ่าย SEM ของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยสีขาวจากฟาร์มเพาะเลี้ยงวาวน้อย (ล่าง) บริเวณผิว (ซ้าย) และส่วนตัดขวาง (ขวา)

จากผลการทดลองทั้งสองตอน สามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผิวภายนอกและโครงสร้างผิวภายใน ได้ดังนี้

1. โครงสร้างผิวภายนอก

1.1 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีลักษณะเป็นร่องขนานกันคล้ายเกรดิงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน โดยมีปริมาณร่องไม่หนาแน่น และจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีผิวเรียบกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

1.2 ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีลักษณะเป็นร่องขนานกันคล้ายเกรดิงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน โดยมีปริมาณร่องหนาแน่น และจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ มีผิวขรุขระกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

1.3 เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีลักษณะคล้ายแผ่นกระเบื้องทรงหลายเหลี่ยมปกคลุม และมีระยะห่างระหว่างแผ่น แต่ไม่พบลักษณะเช่นนี้ในเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

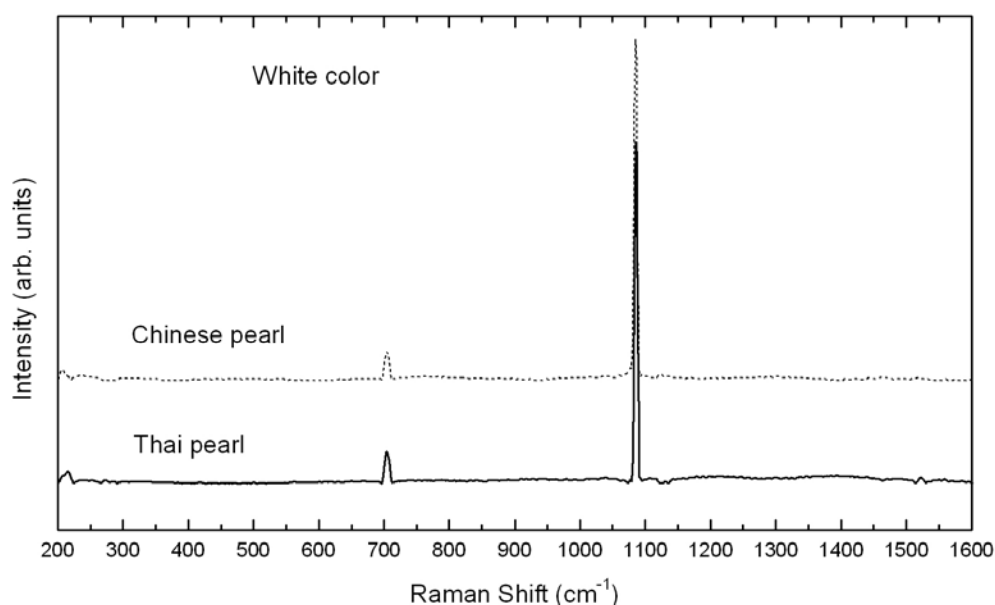
2. โครงสร้างภายใน

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีความหนาของแผ่นอะราโกไนต์มากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนโดยมีความหนาดังแต่ 260 – 905 นาโนเมตร นอกจากนี้ความหนาของแผ่นอะราโกไนต์ยังไม่สม่ำเสมอ คือในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดเม็ดเดียวกันมีแผ่นอะราโกไนต์ที่มีความหนาแตกต่างกันค่อนข้างมาก ข้อสังเกตคือความหนาของแผ่นอะราโกไนต์มีค่าครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นได้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร มีผลทำให้แสงสามารถเลี้ยวเบนและแทรกสอดได้ที่ชั้นของอะราโกไนต์ ทำให้เห็นเป็นความวาวที่เป็นลักษณะเฉพาะของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด

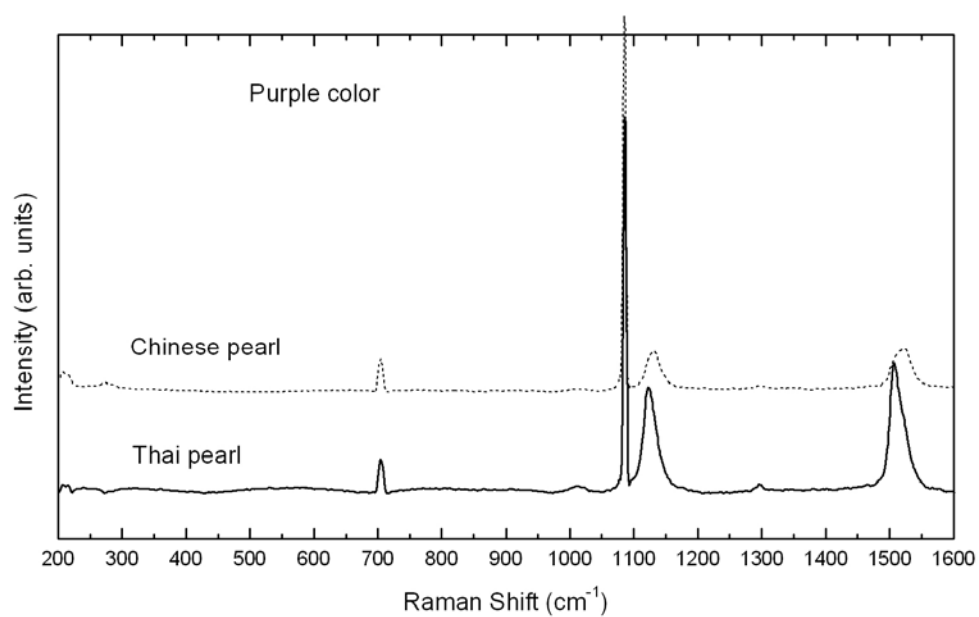
3. ผลการศึกษาการเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยรามานสเปกโทรสโกปี

ทำการเปรียบเทียบธาตุส่วนน้อย ภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่มีสีใกล้เคียงกัน แต่มาจากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน โดยผลของรามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีขาวแสดงดังภาพที่ 50 จะพบเพียงสองยอด คือยอดที่เลขคลื่น 704 และ 1086 cm^{-1} ซึ่งเป็นยอดของอะราโกไนต์

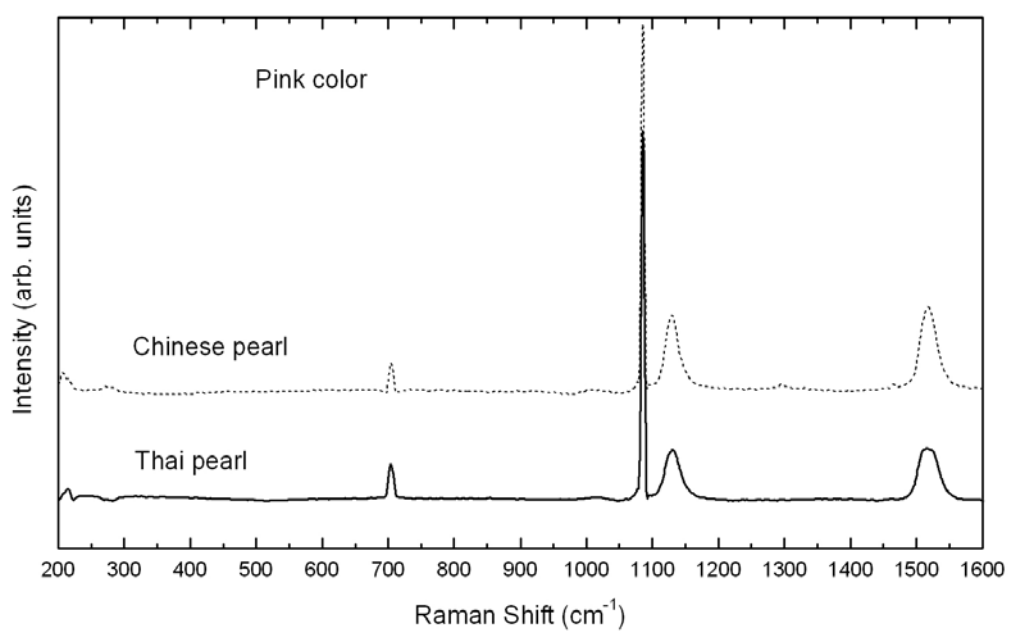
ในกรณีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีอื่น ได้แก่ สีม่วง สีชมพู และสีน้ำตาล รามานสเปกตรัมแสดงดังภาพที่ 51 – 53 ตามลำดับ จะพบยอดเด่นเพิ่มขึ้นอีกสองยอดคือที่เลขคลื่น 1131 และ 1516 cm^{-1} ซึ่งถูกระบุให้เป็นพันธะของ C – C และ C = C ในโพลีอินซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ชนิดหนึ่ง (Karampelas *et al.*, 2007) ซึ่งทั้งสองยอดจะไม่พบในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีขาว ทำให้เป็นข้อบ่งชี้ได้ว่าสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดน่าจะเกิดจากโพลีอิน อย่างไรก็ตามจากการทดลองนี้ไม่พบความแตกต่างของสาเหตุการเกิดสีระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน



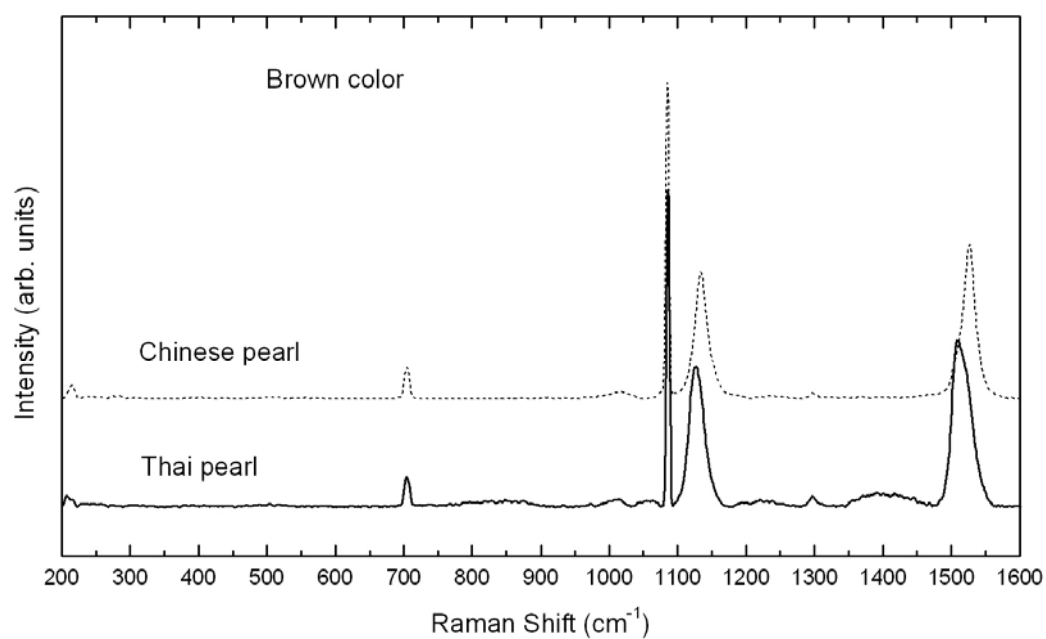
ภาพที่ 50 รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีขาว



ภาพที่ 51 รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีม่วง



ภาพที่ 52 รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีชมพู



ภาพที่ 53 รามานสเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนสีน้ำตาล

4. ผลการศึกษาองค์ประกอบธาตุภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

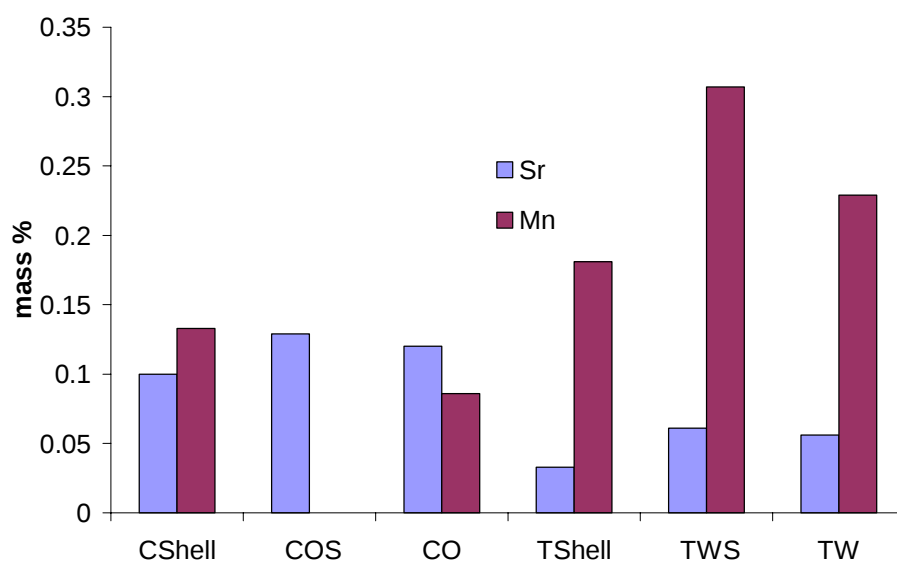
จากตารางที่ 10 พบว่าธาตุที่สามารถตรวจหาได้ด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน คือ Ca, O, Sr, Mn, Fe, และ Si โดยธาตุ Ca และ O พบได้ทั้งในตัวอย่างหอยมุกและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน โดยมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันมากทุกตัวอย่าง

ธาตุ Si พบเฉพาะในตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนเท่านั้น สำหรับปริมาณ Fe พบว่าในเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนนั้นมีปริมาณ Fe สูงกว่าในเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยอย่างชัดเจน

ความแตกต่างอีกประการหนึ่งระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีนคือปริมาณ Sr และ Mn ดังภาพที่ 54 แสดงปริมาณ Sr และ Mn ในแต่ละตัวอย่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืด ส่วนภาพที่ 77 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Sr และ Mn ซึ่งสามารถเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีปริมาณ Mn มากกว่า Sr แต่สำหรับไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีปริมาณ Sr และ Mn ที่มาน้อยแตกต่างกัน ส่วนในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีปริมาณ Sr สูงกว่าในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย

ตารางที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุส่วนน้อยในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน (% มวล)

ตัวอย่าง	Sr	Mn	Fe	Si	Ca	O
CShell	0.100	0.133	0.195	0.605	70.124	28.843
COS	0.129	—	—	—	71.360	28.511
CO	0.120	0.086	0.059	—	71.219	28.516
TShell	0.033	0.181	0.056	—	71.199	28.532
TWS	0.061	0.307	0.037	—	71.065	28.53
TW	0.056	0.229	—	—	71.187	28.528



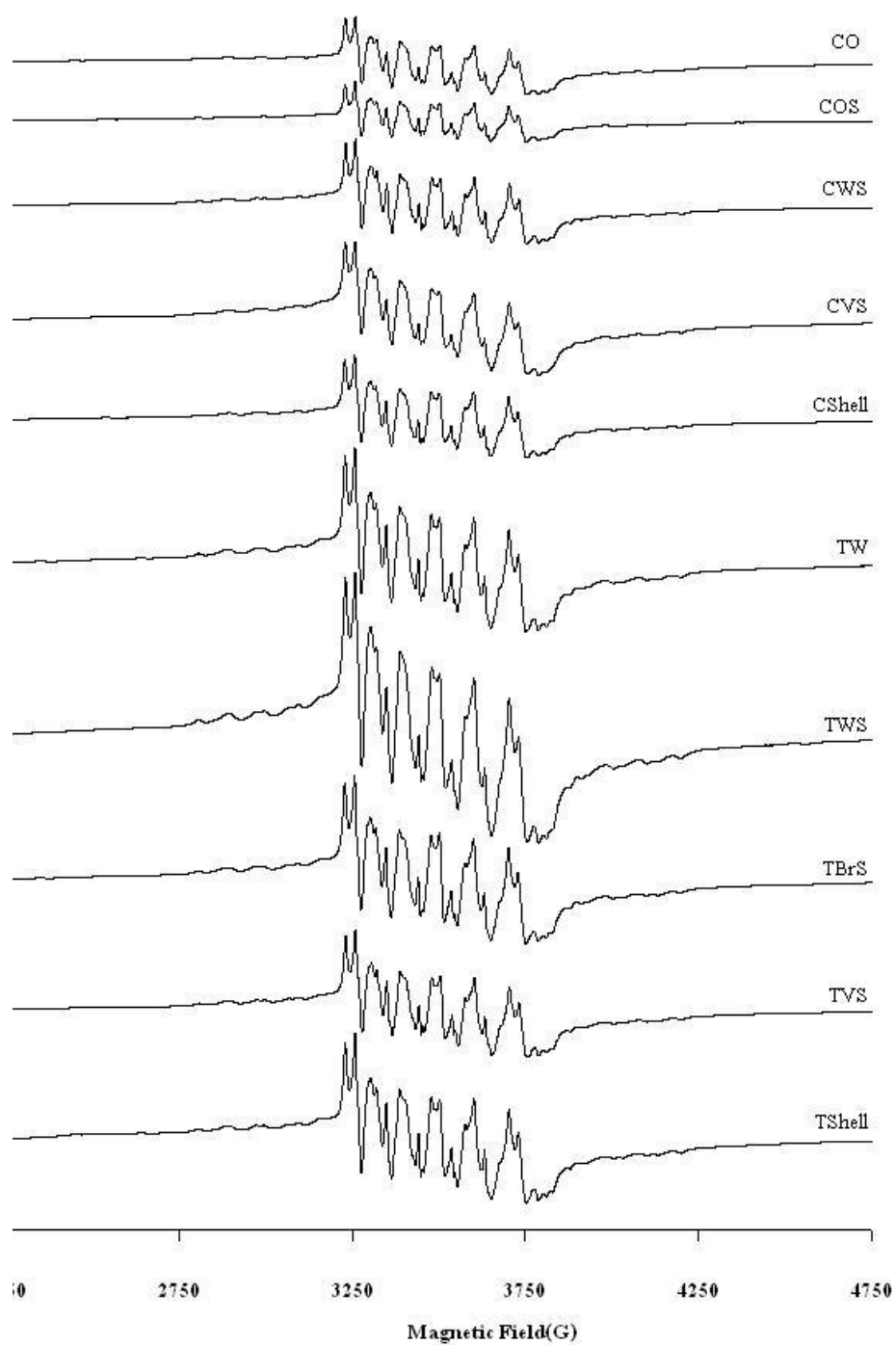
ภาพที่ 54 กราฟแสดงปริมาณธาตุ Sr และ Mn ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน

5. การวิเคราะห์ธาตุส่วนน้อยด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

5.1 สเปกตรัมของตัวอย่างผง

สเปกตรัมของตัวอย่างผงของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดแสดงดังภาพที่ 55 ซึ่งเป็นลักษณะของ Mn^{2+} (สังเกตได้จากลักษณะสเปกตรัมซึ่งมี 6 กลุ่มสอดคล้องกับนิวเคลียร์สปินของ Mn^{2+} , $I = 5/2$) เมื่อ Mn^{2+} ($3d^5$) มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 5 อิเล็กตรอน จากไอออนเชิงซ้อนของ Mn^{2+} มีผลทำให้เกิด Zero - field splitting และผลของสนามแม่เหล็กภายนอกจะได้ 6 ระดับพลังงานที่มี m_s เท่ากับ $+\frac{5}{2}, +\frac{3}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}$ และ $-\frac{5}{2}$ และเกิด 5 แทรนซิชัน ($-\frac{5}{2} \longrightarrow -\frac{3}{2}, -\frac{3}{2} \longrightarrow -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \longrightarrow +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \longrightarrow +\frac{3}{2}$ และ $+\frac{3}{2} \longrightarrow +\frac{5}{2}$) และได้เส้น ESR สเปกตรัม 5 เส้น แต่ละเส้นถูกแยกออกไปได้อีก 6 เส้น คิดจาก $2I + 1$ เท่ากับ $2(\frac{5}{2}) + 1$

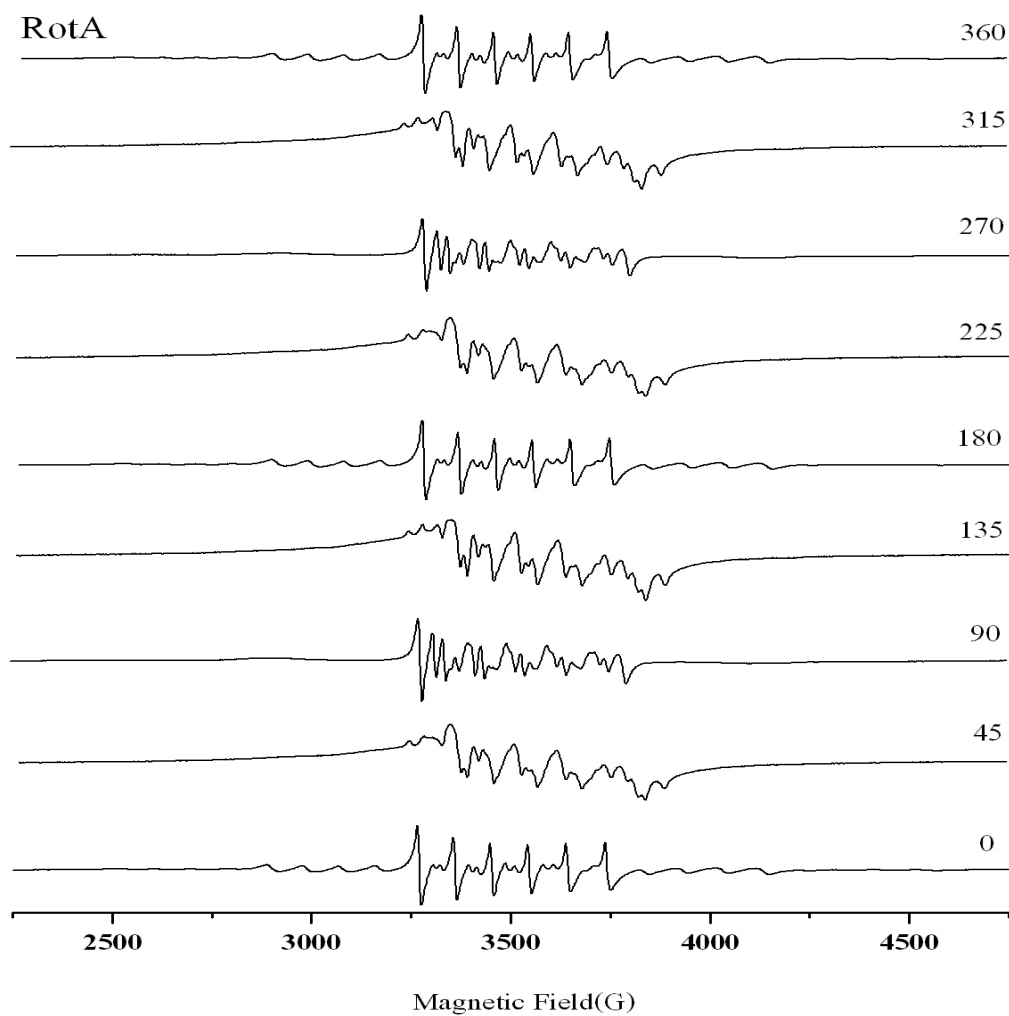
ในอะราโกไนต์ จะเห็นว่าโดยเฉลี่ยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยจะมีปริมาณแมงกานีสมากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน ซึ่งสังเกตได้จากความเข้มของสเปกตรัม โดยพิจารณาจากการที่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีความเข้มของสเปกตรัมสูงกว่า ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณ Mn มากกว่า



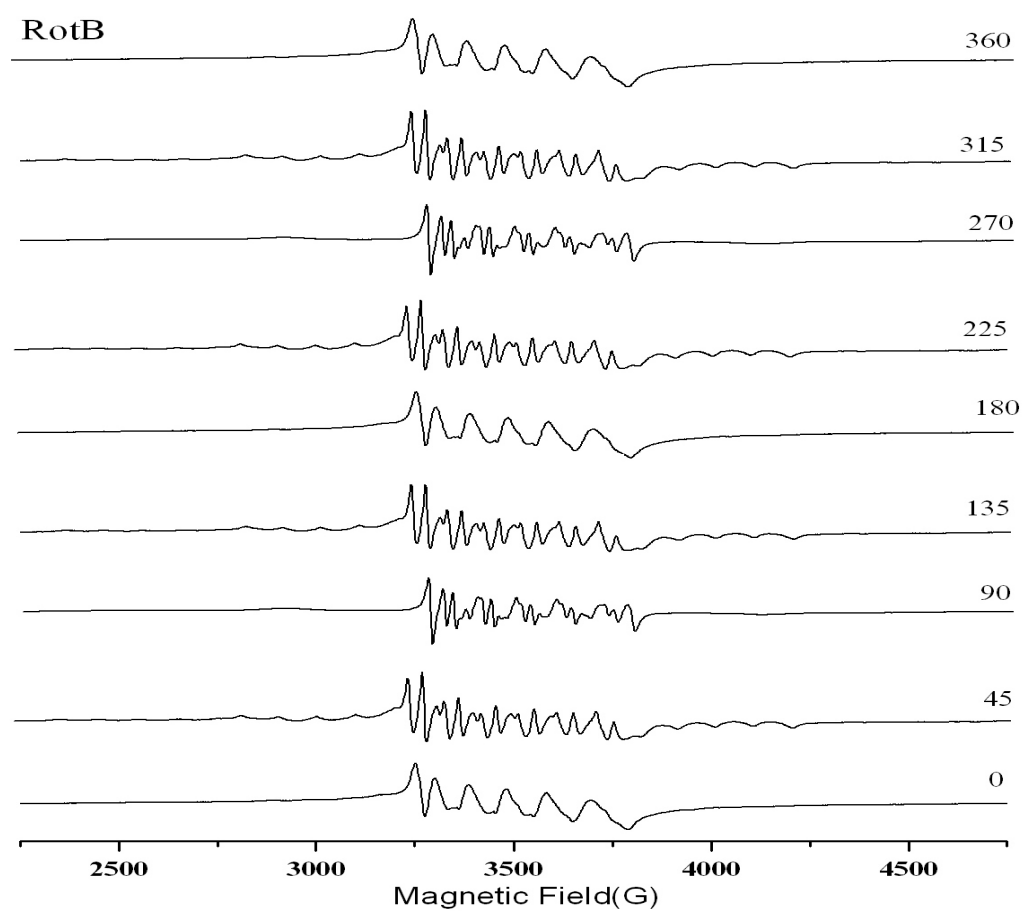
ภาพที่ 55 ESR สเปกตรัมของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย และเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนแบบผง

5.2 สเปกตรัมของตัวอย่างผลึก

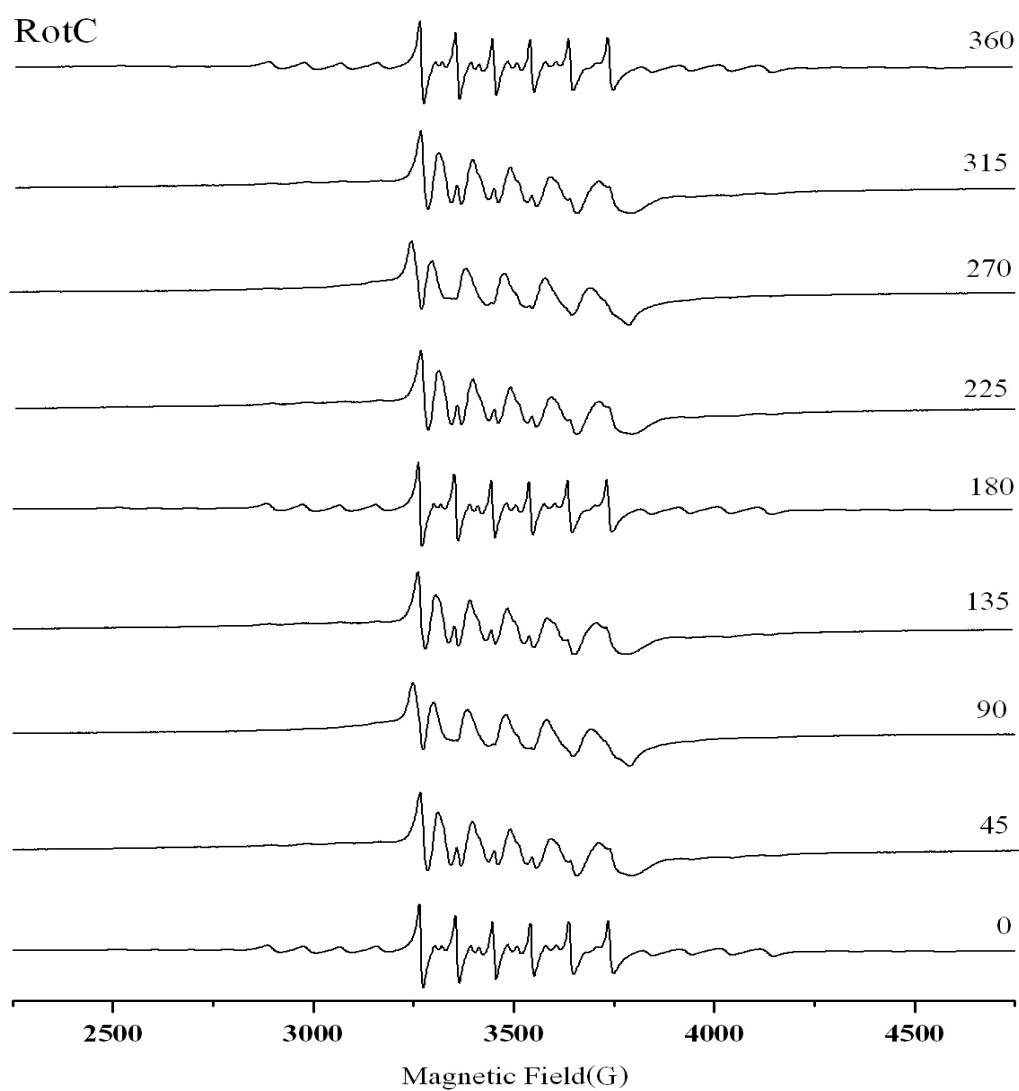
สเปกตรัมของตัวอย่างผลึกของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย แสดงดังภาพที่ 56 – 58 จากลักษณะของสเปกตรัมจะเห็นว่า สเปกตรัมในระนาบที่ตั้งฉากกันสามระนาบแสดงสมมาตรแบบ C_2 (การหมุน 180 องศา) รอบแกนทั้งสาม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสมมาตรของอะราโกไนต์ ($Pmcn$) ซึ่งเป็นสมมาตรแบบ C_2 จะแสดงการการหมุนที่ซ้ำกันทุกๆ 180 องศา โดยจากภาพลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา ไม่ว่าจะเป็นการหมุนตัวอย่างรอบแกน A, B และ C จากลักษณะสมมาตรดังกล่าวสามารถอธิบายอย่างพอสังเขป คือแกนที่กำหนดให้กับชิ้นตัวอย่างเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดค่อนข้างสอดคล้องกับแกนผลึกของอะราโกไนต์



ภาพที่ 56 ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบแกน A โดยลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา



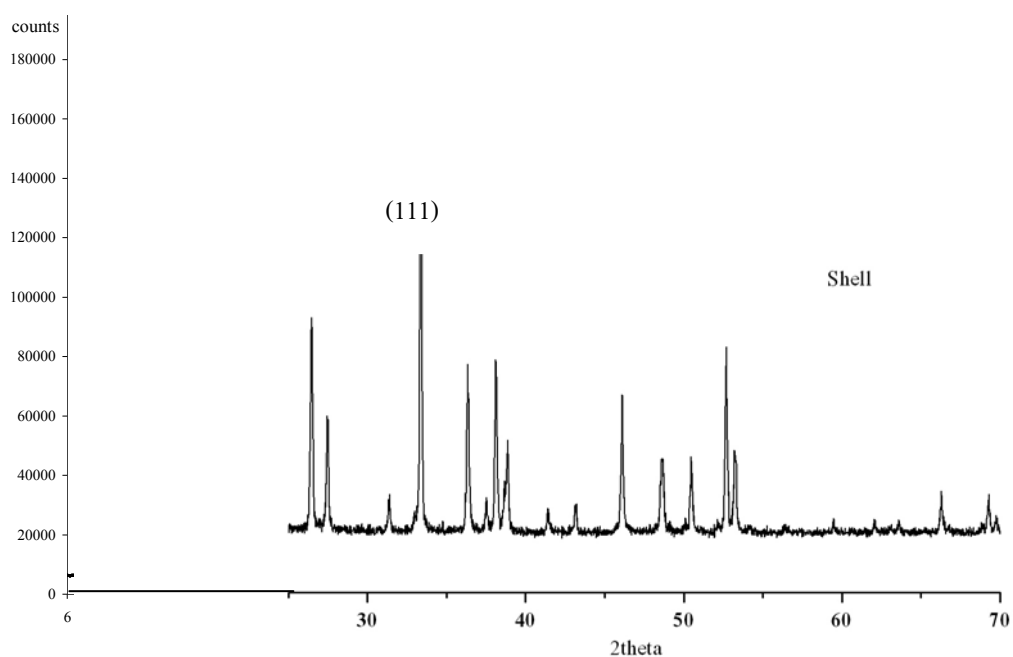
ภาพที่ 57 ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบแกน B โดยลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา



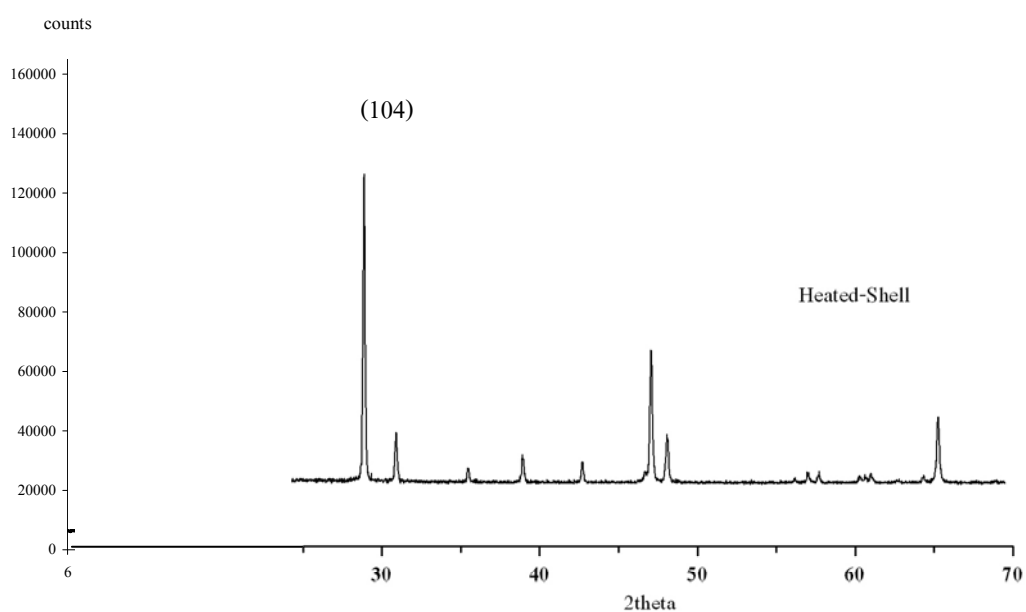
ภาพที่ 58 ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบแกน C โดยลักษณะสเปกตรัมที่ 0 องศา จะมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกับการหมุนที่ 180 และ 360 องศา

ส่วน ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยหลังการเผา พบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนเฟสจากอะราโกไนต์เป็นแคลไซต์ (Udomkan *et. al.*, 2005) โดยพิจารณาจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งเปลี่ยนจากผลึกอะราโกไนต์เป็นผลึกแคลไซต์ดังภาพที่ 59 - 60

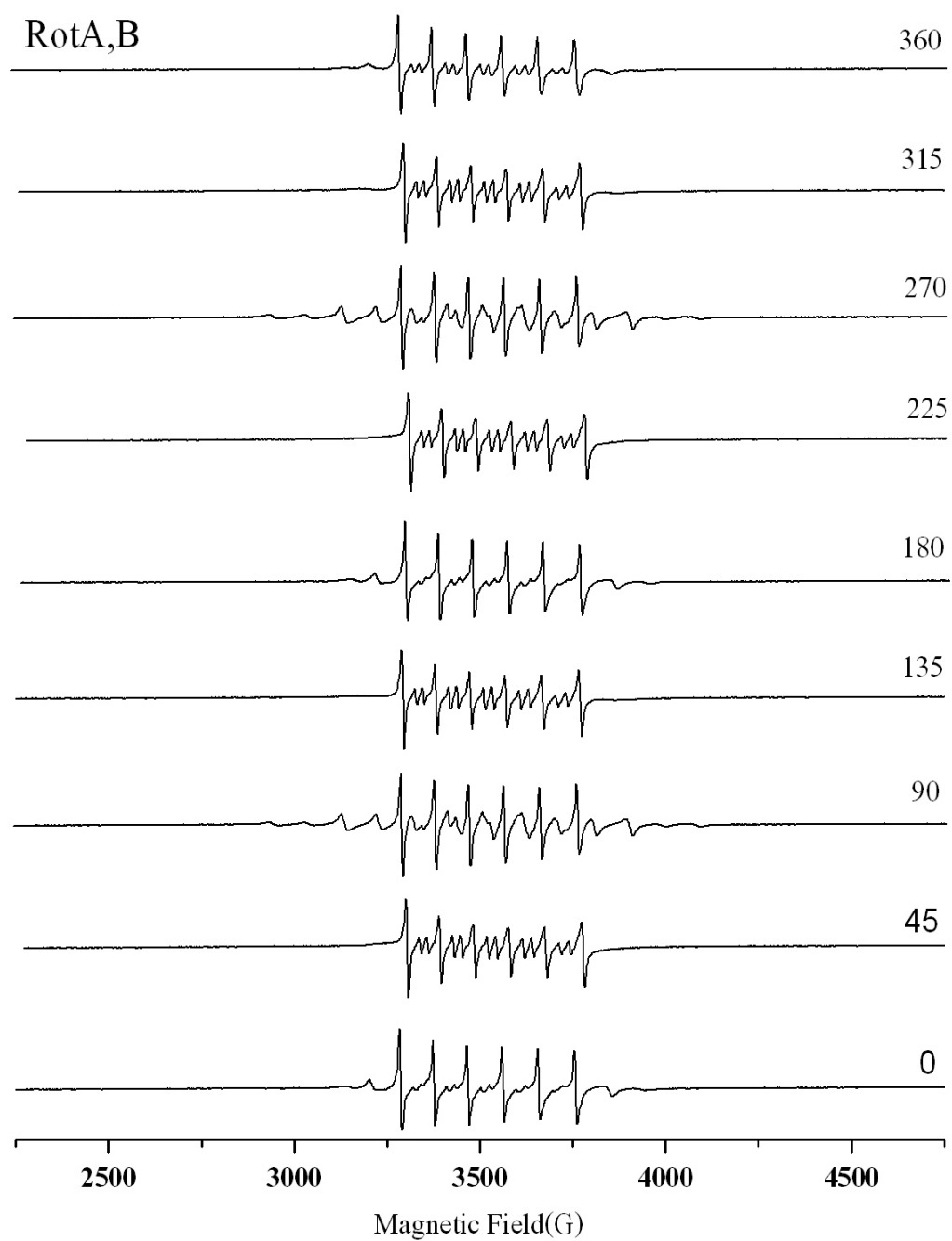
ส่วนภาพที่ 61 - 62 แสดง ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยหลังการเผา โดยที่รูปแบบสเปกตรัมของการหมุนรอบแกน A และ B มีลักษณะเหมือนกัน ในขณะที่สเปกตรัมของการหมุนรอบแกน C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าแกน C ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดสอดคล้องกับแกนผลึก c ของแคลไซต์และอะราโกไนต์ เพราะฉะนั้นแกนที่เหลือจึงสอดคล้องกับแกน a และ b ของแคลไซต์และอะราโกไนต์



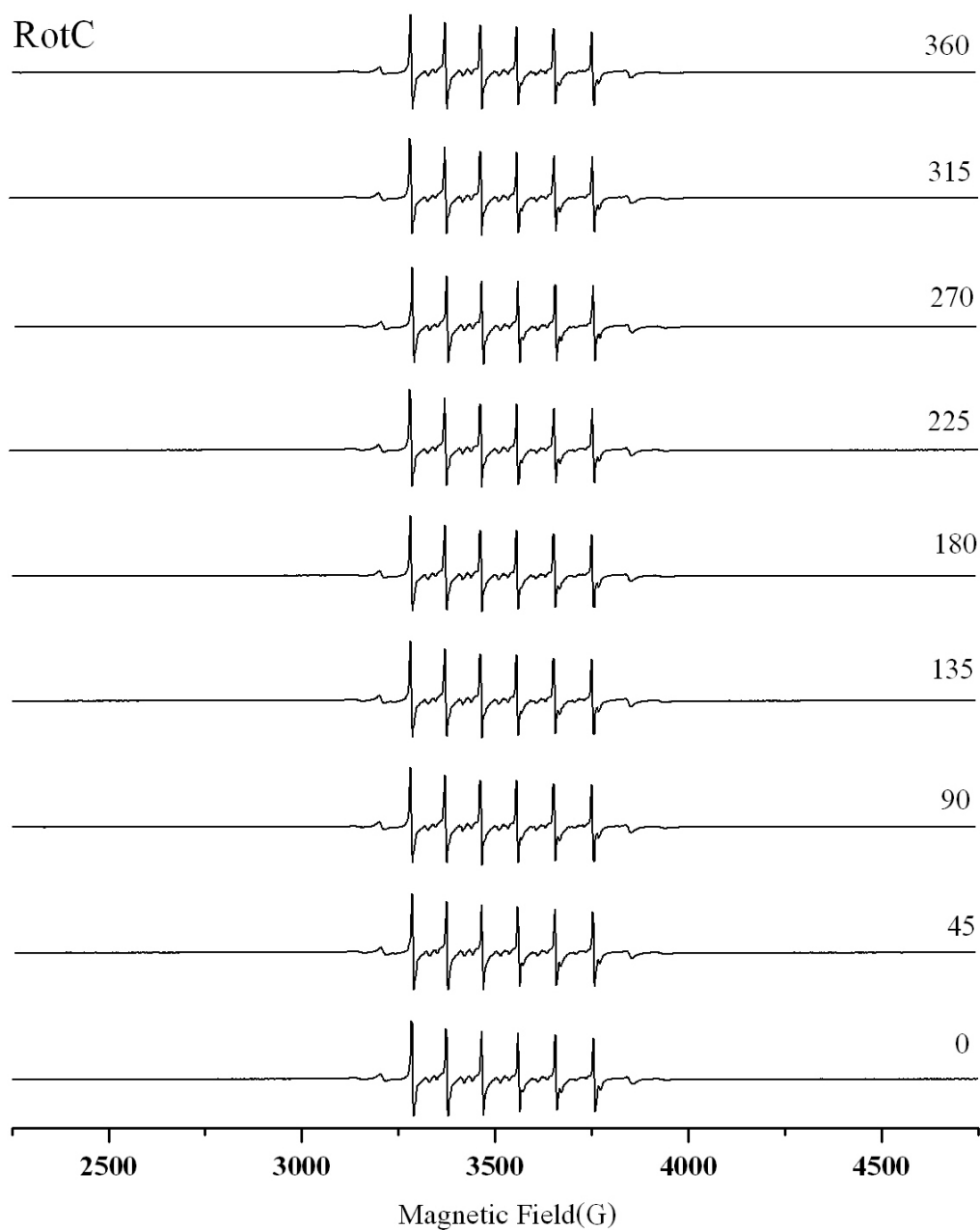
ภาพที่ 59 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยก่อนการเผา มีความเข้มของยอด (111) สูงสุด ซึ่งแสดงความเป็นผลึกแบบอะราโกไนต์



ภาพที่ 60 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยหลังการเผา มีความเข้มของยอด (104) สูงสุด ซึ่งแสดงความเป็นผลึกแบบแคลไซต์



ภาพที่ 61 ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบแกน A, B ซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมเหมือนกัน



ภาพที่ 62 ESR สเปกตรัมของเปลือกหอยมุกเลียน้ำจืดไทย เมื่อหมุนทุกๆ 45 องศา รอบแกน C โดยการหมุนในแต่ละองศา สเปกตรัมไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าแกน C ของเปลือกหอยมุกเลียน้ำจืดสอดคล้องกับแกนผลึก c ของแคลไซต์และอะราโกไนต์

สรุปผลการทดลอง

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ตารางที่ 11 การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีนด้วย XRD

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน
1. มีโครงสร้างหลักเป็นผลึกแบบอะราโกไนต์ และมีโครงสร้างส่วนน้อยเป็นผลึกแบบแคลไซต์ (Kiefert <i>et al.</i> , 2004)	1. มีโครงสร้างหลักเป็นผลึกแบบอะราโกไนต์ และมีโครงสร้างส่วนน้อยเป็นผลึกแบบแคลไซต์ (Kiefert <i>et al.</i> , 2004)
2. มีขนาดเซลล์หน่วยของอะราโกไนต์ใหญ่กว่า มีค่าประมาณ $227.532 \text{ \AA}^3$	2. มีขนาดเซลล์หน่วยของอะราโกไนต์เล็กกว่า มีค่าประมาณ $226.472 \text{ \AA}^3$
3. แสดงลักษณะการมี Preferred Orientation คือโครงสร้างแบบอะราโกไนต์จะพบยอดที่มีความเข้มสูงสุดที่ระนาบ (111) แต่จากการทดลองพบยอดที่มีความเข้มสูงสุดที่ระนาบ (012)	3. แสดงลักษณะการมี Preferred Orientation คือโครงสร้างแบบอะราโกไนต์จะพบยอดที่มีความเข้มสูงสุดที่ระนาบ (111) แต่จากการทดลองพบยอดที่มีความเข้มสูงสุดที่ระนาบ (012)
4. มีปริมาณแคลไซต์บริเวณตรงกลางของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมากกว่าด้านนอก (Habermann <i>et al.</i> , 2001)	4. มีปริมาณแคลไซต์บริเวณตรงกลางของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมากกว่าด้านนอก (Habermann <i>et al.</i> , 2001)
5. มีปริมาณแคลไซต์ประมาณ 1.09 %	5. มีปริมาณแคลไซต์ประมาณ 0.63 %

จากการที่ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีขนาดของเซลล์หน่วยของอะราโกไนต์ใหญ่กว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน อาจมีสาเหตุจากปริมาณ Mn ในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยที่มีมากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน โดยเข้าแทนที่ไอออนของ Ca ในโครงสร้างอะราโกไนต์ ซึ่ง Mn มีขนาดไอออนใหญ่กว่า Ca (Habermann *et al.*, 2001)

2. ลักษณะโครงสร้างผิว และโครงสร้างภายในของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตารางที่ 12 การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีนด้วย SEM

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน
1. ลักษณะที่ผิวภายนอกเป็นเส้นเหมือนร่องของเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน โดยมีปริมาณร่องไม่หนาแน่น และจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ	1. ลักษณะที่ผิวภายนอกเป็นเส้นเหมือนร่องของเกรตติงเลี้ยวเบนแบบสะท้อน โดยมีปริมาณร่องหนาแน่น และจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ
2. ความกว้างของร่องมีค่าตั้งแต่ 2.55-6.48 μm	2. ความกว้างของร่องมีค่าตั้งแต่ 2.68-42.7 μm
3. ความหนาของแผ่นอะราโกไนต์มีค่าแตกต่างกันออกไป (Snow <i>et al.</i> , 2005) ตั้งแต่ 260 nm – 1.27 μm	3. ความหนาของแผ่นอะราโกไนต์มีค่าแตกต่างกันออกไป (Snow <i>et al.</i> , 2005) ตั้งแต่ 260 nm – 1.27 μm
4. มีชั้นอะราโกไนต์หนากว่าแต่ผิวเรียบมากกว่า	4. มีชั้นอะราโกไนต์บางกว่าแต่ผิวเรียบน้อยกว่า
5. เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย มีลักษณะผิวคล้ายแผ่นกระเบื้องผกคลุมผิว และมีระยะห่างระหว่างแผ่น (Gutmannsbauer and Hanni, 1994 and Kuchaisit, 2004)	5. เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน มีลักษณะคล้ายรอยแตกร้าวเล็กน้อย มีผิวเรียบกว่าเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย

จากการจำแนกความวาวของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดด้วยตาเปล่าจากผู้เชี่ยวชาญทางอัญมณี พบว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีความวาวมากกว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย จากการทดลองอาจสรุปได้ว่าไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่มีความหนาของแผ่นอะราโกไนต์ และความเรียบที่ผิวน้อยกว่า จะมีความวาวมากกว่า ดังนั้นไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจึงสามารถที่จะนำมาขัดผิวให้มีความวาวมากขึ้น แม้ว่าความวาวถูกจำกัดด้วยความหนาของชั้นอะราโกไนต์

3. การเกิดสีของไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี

ตารางที่ 13 การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทยและจีนด้วยรามานสเปกโทรสโกปี

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดจีน
1. พบยอดของอะราโกไนต์ที่มีเลขคลื่น 704 และ 1086 cm^{-1} ในทุกตัวอย่าง	1. พบยอดของอะราโกไนต์ที่มีเลขคลื่น 704 และ 1086 cm^{-1} ในทุกตัวอย่าง
2. ไม่พบยอดของพันธะ C – C และ C = C ของสารประกอบโพลิอินในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีขาว	2. ไม่พบยอดของพันธะ C – C และ C = C ของสารประกอบโพลิอินในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีขาว
3. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่มีสี ได้แก่ สีม่วง สีส้มพู และสีน้ำตาล จะมียอดเด่นเกิดขึ้นสองยอดที่เลขคลื่นประมาณ 1130 และ 1500 cm^{-1} ซึ่งเป็นพันธะ C – C และ C = C ของสารประกอบโพลิอิน ตามลำดับ (Karampelas <i>et al.</i> , 2007)	3. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดที่มีสี ได้แก่ สีม่วง สีส้มพู และสีน้ำตาล จะมียอดเด่นเกิดขึ้นสองยอดที่เลขคลื่นประมาณ 1130 และ 1500 cm^{-1} ซึ่งเป็นพันธะ C – C และ C = C ของสารประกอบโพลิอิน ตามลำดับ (Karampelas <i>et al.</i> , 2007)
4. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีน้ำตาลมียอดที่เลขคลื่น 1130 และ 1500 cm^{-1} หรือปริมาณสารประกอบโพลิอินสูงที่สุด ตามด้วยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีม่วง และสีชมพู	4. ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีน้ำตาลมียอดที่เลขคลื่น 1130 และ 1500 cm^{-1} หรือปริมาณสารประกอบโพลิอินสูงที่สุด ตามด้วยไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีม่วง และสีชมพู

สามารถระบุได้ว่าสาเหตุของการเกิดสีในเนื้อไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด มาจากพันธะ C – C และ C = C ของสารประกอบโพลิอิน เนื่องจาก ไม่พบสารประกอบโพลิอินในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดสีขาว

4. การศึกษาองค์ประกอบของธาตุภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน ด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

ธาตุที่สามารถตรวจพบคือ Ca, O, Sr, Mn, Fe และ Si โดยธาตุ Ca และ O พบได้ทั้งในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดมุกและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน เนื่องจากเป็นธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันมากทุกตัวอย่าง

ตารางที่ 14 การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีนด้วย EDXRF

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน
1. ไม่พบธาตุ Si	1. พบธาตุ Si เฉพาะในเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน
2. มีปริมาณ Mn มากกว่า	2. มีปริมาณ Mn น้อยกว่า
3. มีปริมาณ Sr น้อยกว่า	3. มีปริมาณ Sr มากกว่า
4. มีปริมาณ Mn มากกว่า Sr	4. มีปริมาณ Sr และ Mn ที่มากน้อยแตกต่างกัน
5. เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยมีปริมาณ Fe น้อยกว่าเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	5. เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีนมีปริมาณ Fe สูงกว่าเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทยอย่างชัดเจนประมาณ 4 เท่า

5. ศึกษาธาตุส่วนน้อยภายในไข่มุกเลี้ยงน้ำจืดและเปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีน ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์

ตารางที่ 15 การสรุปผลเปรียบเทียบระหว่างไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดของไทยและจีนด้วย ESR

ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดไทย	ไข่มุกเลี้ยงน้ำจืด / เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดจีน
- มีปริมาณ Mn มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน - เปลือกหอยมุกเลี้ยงน้ำจืดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอะราโกไนต์เป็นแคลไซต์ (Udomkan <i>et. al.</i>, 2005)	มีปริมาณ Mn น้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

นรรุณิ ต.เทียนประเสริฐ. 2548. การศึกษาสมบัติการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิดา ตั้งคณานุรักษ์. 2547. สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วันทนา อยู่สุข. 2539. เปลือกหอย. จดหมายข่าวราชบัณฑิตยสถาน 6 (56)

วันวิสา พงษ์เพียร. 2548. การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบของหอยมุกน้ำจืด *Hyriopsis (Hyriopsis) bialatus* Simpson, 1900 โดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมศักดิ์ ตันหมั่นเพียร. 2004. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสเปกโทรสโกปี. 230633 Quantum Chemistry and Spectroscopy. Available Source: <http://192.207.64.1/somsak/2302633/2302633-Chapter1.pdf>, May 13, 2008.

สุริย์ ลิขิตตชัย. 2550. อัญมณีและเครื่องประดับ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศศิพันธุ์ คะวีรัตน์. ม.ป.ป. การวิเคราะห์ธาตุโดยการวาวรังสีเอกซ์. โครงการวิจัยฟิสิกส์และวิทยาการก้าวหน้า สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. แหล่งที่มา: http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/xrf/xrf00.html, 23 มีนาคม 2552.

ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยีสำหรับวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2545. ก้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนพร้อมชุดวิเคราะห์ธาตุ เล่ม1.

- Akamatsu, S., L.T. Zansheng, T.M. Moses and K. Scarratt. 2001. the current status of Chinese freshwater cultured pearls. **Gems & Gemology** 37(2): 96-113.
- Benergee, A. 2001. Identification of Cultured Pearls using Cathodoluminescence and Electron Paramagnetic Resonance. **Gems and Minerals of Vietnam; Hanoi** April 4-10 :247-260.
- Bluenile. n.d. Pearls. **Pearl Education**. Available Source: <http://www.bluenile.com/pearls.jsp>, April 2, 2009.
- Brandenburg, K. and G.H. Putz. 2004. DIAMOND: Crystal and Molecular Structure Visualization. **Crystal Impact Germany**
- Cortie, M.C., K.E. McBean and M.M. Elcombe. 2006. Fracture mechanics of mollusc shells. **Physica B** 385-386: 545-547.
- Dahan, D., R. Vago and Y.Golan. 2003. Skeletal architecture and microstructure of the calcifying coral *Fungia simplex*. **Materials Science and Engineering C** 23: 473-477.
- Elen, S. 2002. Identification of yellow cultured pearls from the black-lipped oyster *Pinctada margaritifera*. **Gems & Gemology** 38: 66-72.
- Fengming, H., C. Zhonghui, T. Hua, Z. Ying, Z. Ziqi and Y. Mingxing. 2004. The microstructure of the shell and cultured blister pearls of *Pteria penguin* from Sanya, Hainan, China. **J. Gemm.** 29(1): 37-47.
- Fujino, O., K. Orimi, T. Kotani and I. Nishino. 1999. Determination of Multi-Elements in Hard Tissues of Pearl Mother Shellfish (Ikecho-gai) in Lake Biwa by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry and their Distribution. **Jap. J. Limnol.** 60.

- Gutmannsbauer, W. and H.A. Hänni. 1994. Structural and chemical investigations on shells and pearls of nacre forming salt-and fresh-water bivalve mollusks. **J. Gemm.** 24 (4): 241-252.
- Habermann, D., A. Banerjee, J. Meijer, and A. Stephan. 2001. Investigation of manganese in salt- and freshwater pearls. **Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B** 181: 739-743.
- Heather, S.R. and R.M. Shart. 1985. Preferred orientation of calcite and aragonite in the reptilian eggshells. **Proc. R. Soc. Lond. B** 225: 445-455.
- Helmenstine, A.M. 2005. Bravais Crystal Lattice. **Bravais Crystal Lattice**. Available Source: <http://www.chemistry.about.com/od/crystallography/ig/Bravais-Crystal-Lattices>, April 2, 2009.
- Jacob, D.E., U. Wehrmeister and T. Häger. 2005. Provenance Determination of Freshwater Cultured Pearls by LA-ICP-MS. **Agilent ICP-MS Journal** 25: 4-5.
- Karampelas S., E. Fritsch, J.-Y. Mevellec, J.-P. Gauthier, S. Sklavounos and T. Soldatos. 2007. Determination by Raman scattering of the nature of pigment in cultured freshwater pearls from the mollusk *Hyriopsis cumingi*. **J. Raman Spectrosc.** 38: 217-230.
- Kiefert, L., D.M. Moreno, E. Arizmendi, H.A. Hänni and S. Elen. 2004. Cultured Pearls from the Gulf of California, Mexico. **Gems & Gemology** 40(1): 26-38.
- Kuchaisit, W. 2004. Spectroscopic Study and Determination of Calcium in Freshwater Cultured Pearls. **M.S. thesis. Kasetsart University.**
- Lam, J.C.W., S. Tanabe, B.S.F. Wong and P.K.S. Lam. 2004. Trace element residues in eggs of Little Egret (*Egretta garzetta*) and Black-crowned Night Heron (*Nycticorax nycticorax*) from Hong Kong, China. **Baseline / Marine Pollution Bulletin** 48: 378-402.

- Larson A.C. and R.B. Dreele. 2004. .General Structure Analysis System (GSAS). **LosAlamos National Laboratory Report LAUR :86-748.**
- Liping, L. and C. Zhonghui. 2001. Cultured pearls and colour-changed cultured pearls: Raman spectra. **J. Gemm.** 27 (8): 449-455.
- Liu, Y., K.N. Hurwit and J.E. Shigley. 1999. Iridescence color of a shell of the mollusk *Pinctada Margaritifera* caused by diffraction. **Opt. Express** 4(5): 177-182.
- Liu, Y., K.N. Hurwit and J.E. Shigley. 2002. Iridescence color of a shell of the abalone *Haliotis rufescens* caused by diffraction. **J. Gemm.** 28(1): 1-5.
- Low W. and S. Zeira. 1972. ESR Spectra of Mn^{2+} in Heat-Treated Aragonite. **Am. Miner.** 57: 1115-1124.
- Ma, H.Y. and I.S. Lee. 2006. Characterization of vaterite in low quality freshwater-cultured pearls. **Materials Science and Engineering C** 26: 721-723.
- McClune, W.F. 1983. Powder diffraction file. **JCPDS International center for Diffraction Datas, Pennsylvania.**
- Mombourquette M.J. and J.A. Weil. EPR-NMR (version 6.51). **Department of Chemistry, University of Saskatchewan Saskatoon, Sk, S7N 5C9, Canada.**
- Nagata N., T. Dobashi, Y. Manabe, T. Usami and S. Inokuchi. 1997. Modeling and Visualization for a Pearl-Quality Evaluation Simulator. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics** 3(4): 307-315.
- Narasimhulu, K.V. and J. Rao. 2000. Lakshmana.EPR and IR spectral studies of the sea water mussel *Mytilus conradinus* shells. **Spectrochim. Acta A** 56: 1345-1353.

Negro, A.D. and L. Ungaretti. 1971. Refinement of the crystal structure of aragonite. **Am. Miner.** 56: 768-772.

Pearl Museum. 1998. Pearl Museum. **Mikimoto pearl island co., ltd**: 38-58

Raju, Ch. L., K.V. Narasimhulu, N.O. Gopal, J.L. Rao and B.C.V. Reddy. 2002. Electron paramagnetic resonance, optical and infrared spectral studies on the marine mussel *Arca burnesi* shells. **J. Mol. Struct.** 608: 201-211.

Scarratt, K., T.M. Moses and S. Akamatsu. 2000. Characteristics of nuclei in Chinese freshwater cultured pearls. **Gems & Gemology** 36 (2): 98-109.

Snow, M.R., A. pring, P. Self, D. Losic and J. Shapter. 2004. The origin of the color of pearls in iridescence from nano-composite structures of the nacre. **Am. Miner.** 89: 1353-1358.

Snow, M.R. and A. pring. 2005. The mineralogical microstructures of shells. **Am. Miner.** 90: 1705-1711.

Tan, T.L., D. Wong and P. Lee. 2004. Iridescence of a shell of mollusk *Haliotis glabra*. **J. Gemm.** 29: 4847-4854.

Tan, T.L., D. Wong, and P. Lee. 2005. Iridescent colours of the abalone shell (*Haliotis glabra*). **J. Gemm.** 29: 395-399.

Thorn, K., R.M. Cerrat and M.L. Rivers. 1995. Elemental Distributions in Marine Bivalve Shells as Measured by Synchrotron X-Ray Fluorescence. **Biol. Bull.** 188: 57-67.

Udomkan, N., S. Meejoo, P. Limsuwan, P. Winotai and Y. Chaimanee. 2005. Electron Spin Resonance Studies of Mn^{2+} in Freshwater Snail Shells: *Pomacea Canaliculata* Lamarck and Fossilized Snail Shell. **Chin. Phys. Lett.** 22: 1780-1783.

Villiers, J.P.R. de. 1971. Crystal structure of aragonite, strontianite and witherite. **Am. Miner.** 56: 758-767.

White, L.K., A. Szabo, P. Carkner and N.D. Chasteen. 1977. An Electron Paramagnetic Resonance Study of Manganese(II) In the Aragonite Lattice of a Clam Shell, *Mya arenaria*. **J. Phys. Chem.** 81: 1420-1424.

Zhang, C. and L. Wang. 2001. Multi-element geochemistry of sediments from the Pearl River system, China. **Appli. Geoche.** 16: 1251-1259.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์อยู่ในช่วงประมาณ 0.1-10 อังสตรอม ซึ่งเทียบได้กับขนาดของอะตอมและโมเลกุล รังสีเอกซ์จึงสามารถตรวจสอบวัตถุในระดับอะตอมและโมเลกุลได้ รังสีเอกซ์ประกอบด้วยอนุภาคพื้นฐานที่เรียกว่า โฟตอน พลังงานของโฟตอน E ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) มีค่าสอดคล้องกับความยาวคลื่น (λ) ของรังสีเอกซ์ในหน่วยนาโนเมตร ตามความสัมพันธ์

$$E = \frac{1240}{\lambda} \quad (\text{ผ1})$$

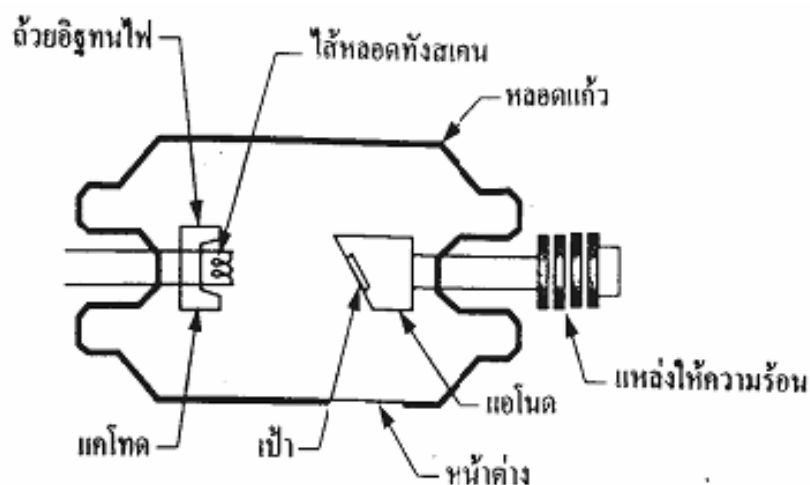
1. การเกิดรังสีเอกซ์

เมื่ออิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานจลน์สูง ถูกทำให้ลดความเร็วหรือทำให้หยุดนิ่งแบบกะทันหันโดยการชนกับเป้าโลหะ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระจะถูกถ่ายเทให้กับเป้าและถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนร้อยละ 99 ซึ่งถูกดูดกลืนที่ผิวของเป้าโลหะ ส่วนอีกประมาณร้อยละ 1 จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะที่เป็นเป้า ผลของการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดรังสีเอกซ์ ที่ถูกนำมาใช้งานต่อไป ในทางปฏิบัตินั้นจะใช้หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tubes) เป็นเครื่องมือในการเกิดรังสีเอกซ์ ภายในหลอดรังสีเอกซ์จะประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1.1 แหล่งผลิตอิเล็กตรอนอิสระ จะใช้ไส้หลอด (filament) ที่ทำจากโลหะทั้งสแตนซึ่งถูกเผาให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า ไส้หลอดนี้ทำหน้าที่เป็นแคโทดของหลอดรังสีเอกซ์

1.2 แหล่งจ่ายความต่างศักย์สูง หรือศักย์ไฟฟ้าเร่ง (acceleration voltage) เพื่อเร่งอิเล็กตรอนอิสระให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ

1.3 เป้าโลหะ ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์ และเป็นแอโนดของหลอดรังสีเอกซ์ วัสดุที่จะนำมาทำเป้าโลหะควรเป็นวัสดุที่มีเลขอะตอมสูง จุดหลอมเหลวสูง นำความร้อนได้ดีและกลายเป็นไอได้ยาก ซึ่งนิยมใช้ ทองแดง (Cu) และ โครเมียม (Cr) เป็นเป้าโลหะ



ภาพผนวกที่ ก1 ส่วนประกอบของหลอครั้งสีเอกซ์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

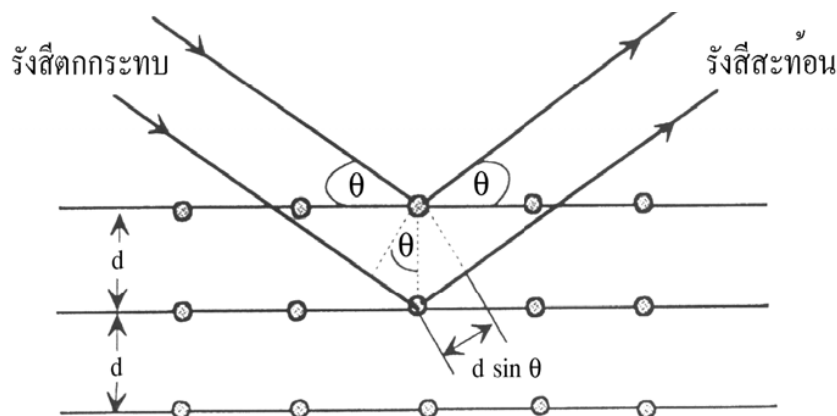
หลอครั้งสีเอกซ์ต้องเป็นหลอดสุญญากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้เป่าเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ และอิเล็กตรอนอิสระที่ขั้วแคโทดจะเคลื่อนที่ไปยังเป่าโลหะโดยไม่มีการสูญเสียพลังงาน

2. อันตรกิริยารังสีเอกซ์กับอะตอม

วัตถุทุกชนิดสามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ บางชนิดทำให้เกิดการเลี้ยวเบน การหักเห และการสะท้อนของรังสีเอกซ์ได้ ตอบสนองของวัตถุที่มีต่อรังสีเอกซ์มีที่มาจากอันตรกิริยาพื้นฐานระหว่างโฟตอนกับอะตอมในวัตถุ โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เกิดจากอันตรกิริยาการกระเจิงรังสีของอะตอม การกระเจิงของรังสีเอกซ์ในอะตอมแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกระเจิงจะมีค่าเท่ากัน การกระเจิงแบบยืดหยุ่นจึงไม่ทำให้อะตอมเปลี่ยนสถานะพลังงาน สนามไฟฟ้าของรังสีเอกซ์จะทำให้เกิดการสั่นของอิเล็กตรอนในอะตอมเท่านั้น อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีประจุลบ เมื่อถูกแรงกระทำหรือเกิดความเร่งจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นเท่ากับรังสีเอกซ์ที่ไปตกกระทบออกมาเราเรียกคลื่นนี้ว่า คลื่นกระเจิงรังสีเอกซ์ (X-ray scattered wave) การกระเจิงแบบยืดหยุ่นจึงสามารถทำให้คลื่นเลี้ยวเบนและแทรกสอดได้ในผลึก

การแทรกสอดแบบเสริมของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบและสะท้อนจากสองระนาบ เป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (ผ2)



ภาพผนวกที่ ก2 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขของแบรกก์

ที่มา: นรวุฒิ (2548)

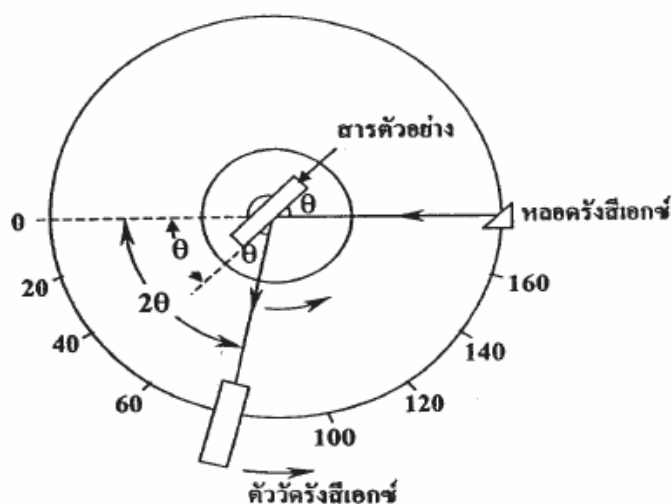
$$2d_{hkl} \sin \theta = n \lambda \quad (\text{ผ2})$$

โดย d_{hkl} เป็น ระยะระหว่างระนาบ (interplanar spacing)
 θ เป็น มุมเลี้ยวเบน หรือมุมที่รังสีเอกซ์กระทำกับระนาบของผลึก
 n เป็น เลขจำนวนเต็ม $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
 และ λ เป็น ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นโฟตอนจะสูญเสียพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ทำให้ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ก่อนและหลังการกระเจิงมีค่าไม่เท่ากัน ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์จะมีค่ามากขึ้นหลังจากการกระเจิง และเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุมกระเจิง การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นทำให้คลื่นไม่สามารถแทรกสอดกันได้

3. การวิเคราะห์ธาตุในสารประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

หลักการของเทคนิคนี้ ตัวอย่างจะถูกกดเป็นผงและถูกวางไว้ในแนวรับรังสีเอกซ์ที่จะไปกระทบบนสารตัวอย่างซึ่งทำมุม θ กับลำรังสีเอกซ์ ลำรังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างเป็นมุม 2θ เมื่อเทียบกับลำรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ ดังนั้นตัวตรวจวัดความเข้มรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกมา จะกางทำมุม 2θ กับแนวรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ ดังภาพผนวกที่ ก3



ภาพผนวกที่ ก3 หลอดรังสีเอกซ์และตัวตรวจวัดรังสีเอกซ์ อยู่บนทรงกลมของการสะท้อน

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่ถูกเลี้ยวเบนออกมาจากสารตัวอย่าง เรียกว่า เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer) เมื่อมุมของลำรังสีเอกซ์ตกกระทบเปลี่ยนไปอย่างต่อเนื่อง การเลี้ยวเบนจากระนาบต่างๆจะเกิดขึ้น ความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนจะเป็นฟังก์ชันของ ชนิดและตำแหน่งของแต่ละธาตุ เมื่อสารตัวอย่างหมุนไปด้วยอัตราเร็วคงที่ สัญญาณจากตัววัดสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวบันทึกสัญญาณออกมาในรูปของสเปกตรัม โดยมีแกนตั้งแทนความเข้มของรังสีเอกซ์ และแกนนอนแทนตำแหน่งของมุม

ภาคผนวก ข

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

De Broglie (1924) ได้พบว่าอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าในสุญญากาศให้มีพลังงานสูงขึ้น จะมีพฤติกรรมทางกายภาพคล้ายคลื่นแสง และสามารถบังคับให้คลื่นอิเล็กตรอนมีขนาดความยาวคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยขึ้นกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนก็เข้ามามีบทบาทในระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

Ernst Ruska (1931) ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนขึ้นเป็นครั้งแรก ด้วยเทคนิคระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน ต่อมาได้พัฒนาให้มีกำลังขยายสูงมากกว่าล้านเท่าและมีกำลังการแยกได้น้อยกว่า 2 อังสตรอม และยังได้มีการออกแบบโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนให้สามารถศึกษาโครงสร้างระดับไมโครเมตรบนพื้นผิววัตถุด้วยเทคนิคระบบเลนส์แบบอิเล็กตรอนส่องกราด ปัจจุบันนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงเป็นเครื่องมือวิจัยหลักที่จำเป็น และมีบทบาทสำคัญต่อการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงเป็นอย่างมาก

1. หลักการเบื้องต้นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

การพัฒนากล้องจุลทรรศน์ให้เกิดการมองเห็นโครงสร้างระดับไมโครเมตรด้วยตาเปล่า มีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ กำลังการแยกของเลนส์ (resolving power) กำลังขยาย (magnification) และความคมชัดและความชัดเจนของภาพแนวลึก (focus and contrast depth)

องค์ประกอบทั้งสาม ขึ้นกับโครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์ตั้งแต่แหล่งกำเนิดของสื่อกลางที่ช่วยให้เกิดการมองเห็น ระบบเลนส์ที่ทำให้เกิดกำลังขยายและอุปกรณ์ประกอบที่ช่วยลดความผิดเพี้ยนของภาพ

ในกรณีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะต้องทำงานในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ โดยจะถูกบังคับด้วยสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์สูงเร่งให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงและมีพฤติกรรมคล้ายคลื่นแสง กำลังขยายของภาพในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เกิดจากการบังคับให้ลำอิเล็กตรอนผ่านสนามแม่เหล็กซึ่งทำหน้าที่คล้ายเลนส์ การปรับเปลี่ยนกำลังขยายและความคมชัดของระบบเลนส์อิเล็กตรอนเป็นการปรับกระแสไฟฟ้าในขดลวด การใส่ชิ้นตัวอย่างที่จะ

ศึกษาจะต้องใส่ในห้องสุญญากาศ รวมทั้งระบบการมองเห็นภาพต้องอาศัยตัวกลางในการเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากอันตรกิริยาในโครงสร้างของชิ้นตัวอย่างให้ปรากฏเป็นภาพที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ด้วยเหตุนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงประกอบด้วยระบบต่างๆมากมาย เช่น ระบบสุญญากาศ ระบบแหล่งกำเนิดความต่างศักย์สูง ระบบควบคุมอิเล็กตรอนิกส์และระบบเลนส์อิเล็กตรอน เป็นต้น

1.1 กำลังการแยกของเลนส์ พฤติกรรมของโฟตอนซึ่งมีธรรมชาติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนตัมกับความยาวคลื่น เป็นไปตามกฎของ เดอบรอยล์ (De Broglie) ดังนี้

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{ผ3})$$

หรือ
$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (\text{ผ4})$$

โดย h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Plank's constant) มีค่า 6.63×10^{-34} จูล-วินาที
 p คือ โมเมนตัมของโฟตอน มีหน่วย กิโลกรัม-เมตรต่อวินาที
 และ λ คือ ความยาวคลื่นของโฟตอน หรือความยาวคลื่นเดอบรอยล์ มีหน่วย เมตร

ในกรณีของอิเล็กตรอนมวล m ความเร็ว v โมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะมีค่า mv ดังนั้นจากสมการ (ผ4) ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนหรือความยาวคลื่นเดอบรอยล์ คือ

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (\text{ผ5})$$

ขณะที่อิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุไฟฟ้า q_e เท่ากับ 1.602×10^{-19} คูโลมบ์ ถูกบังคับให้เคลื่อนในสนามไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ V พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = q_e V \quad (\text{ผ6})$$

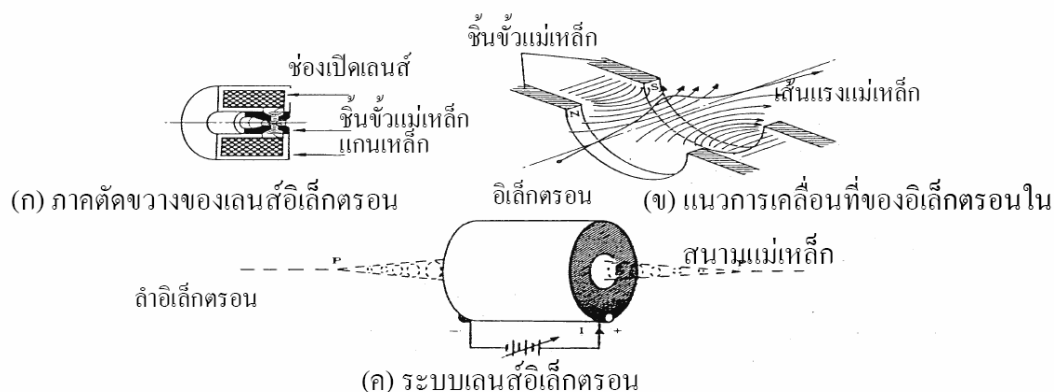
จากสมการ (ผ5) และ (ผ6) จะได้

$$\lambda = \sqrt{\frac{h^2}{m^2 \left(\frac{2q_e V}{m} \right)}} = \sqrt{\frac{h^2}{2mq_e V}}$$

ดังนั้น $\lambda \approx \sqrt{\frac{150}{V}} \times 10^{-8}$ เซนติเมตร (ผ7)

จากสมการ (ผ7) จะเห็นว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนจะสั้นลง ซึ่งถ้าเทียบกับความยาวคลื่นของแสงแล้ว อิเล็กตรอนความเร็วสูงจะมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่ามาก จึงสามารถใช้ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของชิ้นตัวอย่างได้ละเอียดมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกำลังการแยกของกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแล้ว กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นสื่อกลางในการมองเห็นภาพจะมีกำลังการแยกมากกว่าหลายเท่า

1.2 กำลังขยายเลนส์อิเล็กตรอน โครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอนที่ทำหน้าที่บังคับลำอิเล็กตรอนให้มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแสงผ่านเลนส์นั้นประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า แกนเหล็ก ขึ้นขั้วแม่เหล็ก ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข1 (ก) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด แกนเหล็กจะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นแม่เหล็กส่งเส้นแรงแม่เหล็กมายังขึ้นขั้วแม่เหล็กตามแนวแกนของเลนส์ เมื่อลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านช่องเลนส์อิเล็กตรอนจะถูกแรงจากสนามแม่เหล็ก ลำอิเล็กตรอนจะเบี่ยงเบน ตามภาพผนวกที่ ข1 (ข) และ (ค)



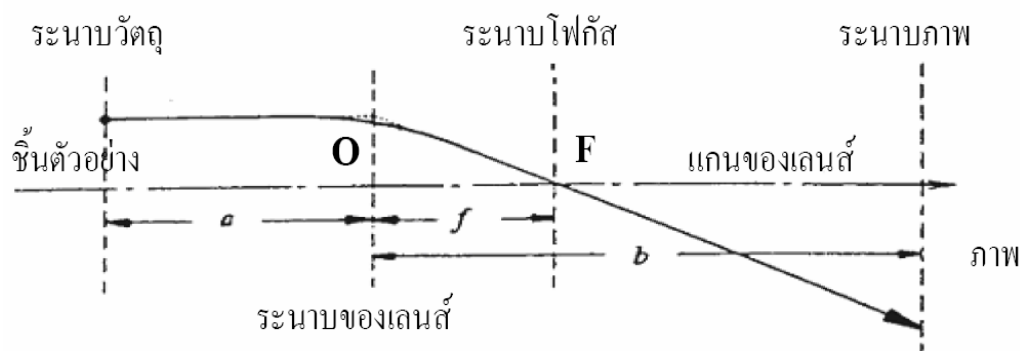
ภาพผนวกที่ ข1 โครงสร้างของเลนส์อิเล็กตรอน

ที่มา: ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

เลนส์อิเล็กตรอนที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดภาพจริงเช่นเดียวกับเลนส์นูนของระบบเลนส์แก้วในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง ความยาวโฟกัสของเลนส์ (f) คือ ระยะจากระนาบของเลนส์อิเล็กตรอนถึง จุดโฟกัส F บนแกนของเลนส์ ดังแสดงในภาพผนวกที่ ข2 ความยาวโฟกัสของเลนส์อิเล็กตรอนขึ้นกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) ซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนได้ด้วยปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) และความเร็วของอิเล็กตรอน (v) ซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนได้ด้วยความต่างศักย์ (V)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเลนส์อิเล็กตรอนมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับเลนส์นูน ดังนั้นกำลังขยายของเลนส์ (M) สามารถคำนวณได้จากระยะห่างระหว่างชิ้นตัวอย่างกับแนวระนาบของเลนส์ หรือระยะวัตถุ a และระยะห่างระหว่างภาพกับแนวระนาบของเลนส์ หรือระยะภาพ b

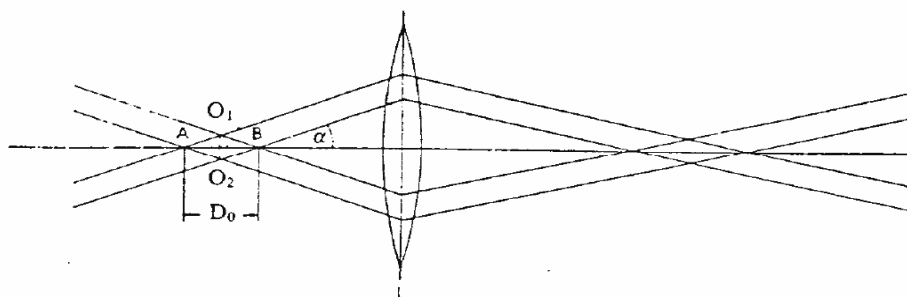
$$M = \frac{b}{a} \quad (\text{ผ8})$$



ภาพผนวกที่ ข2 ลำอิเล็กตรอนที่เบี่ยงเบนคล้ายลำแสงผ่านเลนส์นูน

ที่มา: ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

1.3 ความคมชัดและความชัดเจนของภาพแนวลึก เนื่องจากมุมช่องบังคับ α (angular aperture) ของอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กมาก คุณลักษณะดังกล่าวมีผลให้ระยะความชัดของภาพแนวลึกสูงกว่าที่ได้จากเลนส์แก้ว จึงสามารถเห็นรายละเอียด บนชิ้นตัวอย่างที่มีความลึกต่างกันชัดเจน ระยะความลึกโฟกัส (depth of focus) D_0 แสดงดังภาพผนวกที่ ข3



ภาพผนวกที่ ข3 ความลึกโฟกัสของเลนส์อิเล็กตรอน

ที่มา: ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

จากภาพผนวกที่ ข3 O_1 และ O_2 เป็นจุดวัตถุที่อยู่ใกล้กันเท่ากับระยะที่สามารถแจกแจงได้ ลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบจุดวัตถุทั้งสองจะมีแนวการเคลื่อนที่ผ่านจุดตัดแนวแกนที่จุด A และ B

ตามคุณสมบัติของเลนส์นูน ระยะของจุดตัดนี้ คือความลึกโฟกัสของเลนส์ที่มีมุมช่องเปิด เท่ากับ α ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\frac{d}{2} = \frac{D_o}{2} \tan \alpha$$

เมื่อ d คือ ระยะจาก O_1 ถึง O_2 และ α มีขนาดเล็กมาก ดังนั้น

$$D_o = \frac{d}{\alpha} \quad (\text{ผ9})$$

ในทางปฏิบัติการปรับความชัดเจนของภาพที่มีกำลังขยายสูงขึ้น จะต้องเปลี่ยนช่องเปิดให้กว้างขึ้น ดังนั้น ความลึกโฟกัสจะลดลงด้วย

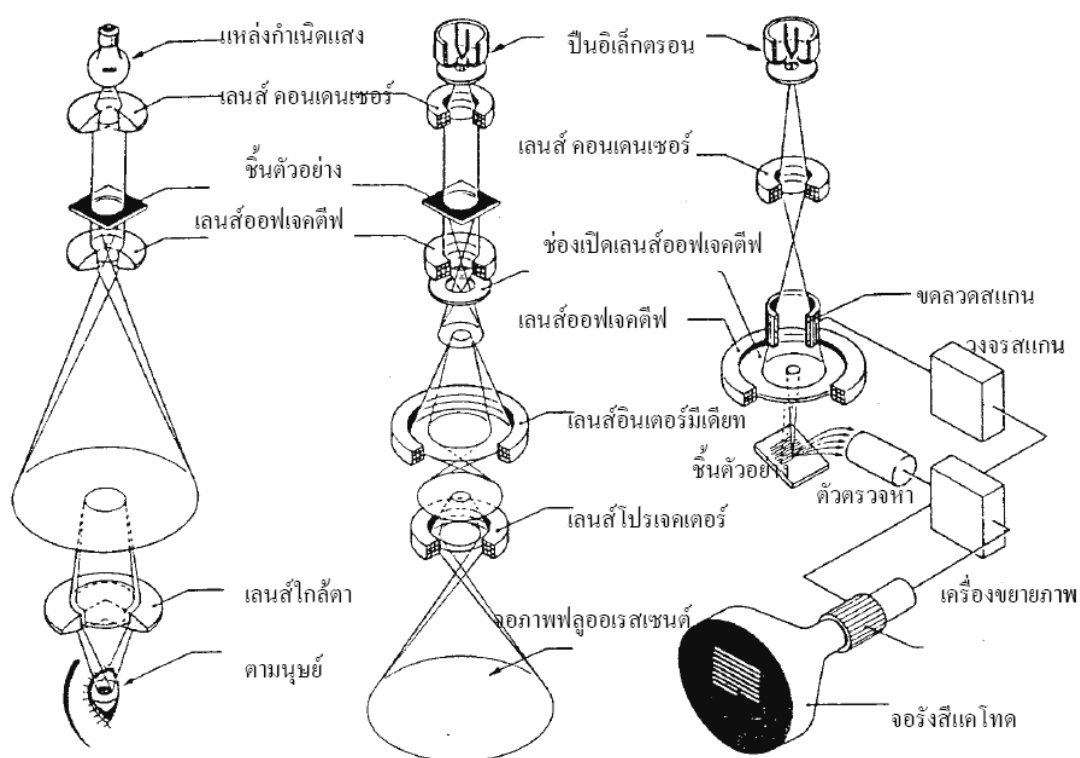
2. โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ กล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่าน และกล้องจุลทรรศน์ที่จัดระบบเลนส์แบบลำอิเล็กตรอนส่องกราด กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั้งสองแบบจะมีโครงสร้างภายนอกคล้ายกัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน คือ

- 2.1 ระบบทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics system)
- 2.2 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)
- 2.3 ระบบระบายความร้อน (cooling system)
- 2.4 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า (power supply system)
- 2.5 ระบบสร้างภาพและบันทึกภาพ (image translating and photo recording)

แม้ว่าโครงสร้างภายนอกของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและแบบส่องกราดจะเหมือนกันก็ตาม แต่เมื่อพิจารณาด้านการจัดระบบเลนส์อิเล็กตรอนแล้ว โครงสร้างเลนส์อิเล็กตรอนภายในบริเวณสุญญากาศจะแตกต่างกันมากทีเดียว กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนั้น ชิ้นตัวอย่างจะอยู่ใต้เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) กำลังขยายของภาพจะเกิดโดยระบบเลนส์ออฟเฟกตีฟ (objective lens) เลนส์อินเตอร์มีเดียท (intermediate lens) และฉายภาพขยาย

ลงบนฉากเรืองแสงด้วยเลนส์โปรเจกเตอร์ (projector lens) การบันทึกภาพสามารถบันทึกโดยตรงบนแผ่นฟิล์มซึ่งบรรจุไว้ได้แผ่นเรืองแสง ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น ชิ้นตัวอย่างจะอยู่ใต้เลนส์ออฟเฟกตีฟ ถ้าอิเล็กตรอนในระบบเลนส์จะถูกโฟกัสลงบนผิวของชิ้นตัวอย่าง และถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามบริเวณที่ต้องการศึกษา โครงสร้างด้วยระบบสแกน และสร้างสัญญาณภาพขยายอิเล็กตรอนบนจอภาพ การบันทึกภาพจะบันทึกจากจอร์จซีแคโทด (cathode ray)



(ก) กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ค) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาพผนวกที่ ข4 การเปรียบเทียบระบบเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบลำอิเล็กตรอนส่องผ่านและแบบส่องกราด

ที่มา: ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2545)

ภาคผนวก ค
รามานสเปกโทรสโกปี

รามานสเปกโทรสโกปี

เทคนิครามานสเปกโทรสโกปี เป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ เนื่องจากโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะไม่สามารถถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรด (infrared wave) อย่างไรก็ตามพันธะของโมเลกุลดังกล่าวยังคงมีการสั่น และพบว่าเทคนิครามานสามารถจะให้สเปกตรัมของโมเลกุลดังกล่าวได้ โดยการผ่านคลื่นแสงไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตร ถ้าการชนของคลื่นแสงกับโมเลกุลเป็นแบบยืดหยุ่นจะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนมีพลังงานเท่ากับคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh scattering) ถ้าการชนเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนอาจมีพลังงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน (Raman scattering) ความเข้มแสงของการกระเจิงแบบรามาน มีค่าประมาณ 10^{-10} - 10^{-12} เท่าของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล ซึ่งทำให้ตรวจวัดยาก จึงต้องใช้คลื่นแสงที่มีความเข้มสูงคือ คลื่นแสงเลเซอร์ และสเปกตรัมที่ได้จากการกระเจิงแบบรามาน มี 2 แบบ คือ

เส้นสโตก (Stoke Line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ เส้นนี้เกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับ โมเลกุลที่อยู่สถานะพื้นของระดับพลังงานการสั่น เป็นผลทำให้โฟตอนมีพลังงานลดลง ส่วนโมเลกุลที่ได้รับพลังงานจากโฟตอนจะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excited state) แล้วกลับลงสู่สถานะพื้น ดังสมการที่ (ผ10)

$$E_{ST} = h\nu_0 - h\nu \quad (\text{ผ10})$$

เมื่อ E_{ST} คือ พลังงานของเส้นสโตก
 $h\nu_0$ คือ พลังงานในสถานะพื้น
 $h\nu$ คือ พลังงานในสถานะถูกกระตุ้น

เส้นแอนติสโตก (Anti-Stoke Line) เป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของคลื่นแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ เส้นนี้เกิดจากการชนกันของโฟตอนของคลื่นแสงเลเซอร์กับ โมเลกุลที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้น ทำให้โฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุล พลังงานเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (ผ11)

$$E_{AST} = h\nu_0 + h\nu \quad (\text{ผ11})$$

เมื่อ E_{AST} คือ พลังงานของเส้นแอมิตสโตก

1. กลไกการเกิดรามานสเปกตรัม

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแสงจะเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลถูกโพลาไรซ์ (polarize) และเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพขั้วขึ้นมาชั่วคราว สภาพขั้วจะหายไปเมื่อโมเลกุลดังกล่าวคายคลื่นแสงออกมาโดยการกระเจิง ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าในโมเลกุลนั้นมีพันธะเคมีที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปจากตำแหน่งสมดุลมากน้อยเพียงใด โดยการบิดเบี้ยวอาจเกิดจากการสั่น หรือการยืดหดของโมเลกุล การเกิดสภาพขั้วโมเลกุลจะเหนี่ยวนำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ ซึ่งจะแปรผันตรงกับความเข้มสนามไฟฟ้าที่เป็นองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ (ผ12)

$$\mu = \alpha E \quad (\text{ผ12})$$

โดย μ คือ โมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment)
 α คือ ค่าสภาพมีขั้วได้ (polarizability)
 E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

ถ้าคลื่นแสงที่ใช้มีความถี่ ν_{ex} ที่ให้กับโมเลกุลที่ถูกโพลาไรซ์ ความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าดังสมการที่ (ผ13)

$$E = E_o \cos(2\pi\nu_{ex}t) \quad (\text{ผ13})$$

เมื่อ E_o คือ แอมพลิจูดของความเข้มสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา

แทนค่าสมการ (ผ13) ลงในสมการ (ผ12) จะได้

$$\mu = \alpha E_o \cos(2\pi\nu_{ex}t) \quad (\text{ผ14})$$

เพื่อให้เกิดการกระเจิง α จะเป็นฟังก์ชันของระยะทางระหว่างนิวเคลียส

$$\alpha = \alpha_o + (r - r_{eq}) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \quad (\text{ผ15})$$

โดย α_o คือ สภาพมิซัวได้ของพันธะเคมี ที่สภาวะสมดุลที่มีระยะทางระหว่างนิวเคลียส
เป็น r_{eq}
 r คือ ระยะทางระหว่างนิวเคลียสที่ไม่อยู่ในสภาวะสมดุล

การเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างนิวเคลียส $(r - r_{eq})$ จะขึ้นอยู่กับความถี่ของการสั่น ν_v

$$r - r_{eq} = r_m \cos(2\pi\nu_v t) \quad (\text{ผ16})$$

โดย r_m คือ ระยะห่างระหว่างนิวเคลียสมากที่สุด

นำสมการ (ผ16) แทนลงในสมการ (ผ15) จะได้

$$\alpha = \alpha_o + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) r_m \cos(2\pi\nu_v t) \quad (\text{ผ17})$$

นำสมการ (ผ17) แทนลงในสมการ (ผ14) จะได้

$$\mu = \alpha_o E_o \cos(2\pi\nu_{ex}t) + E_o r_m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \cos(2\pi\nu_v t) \cos(2\pi\nu_{ex}t) \quad (\text{ผ18})$$

จากความสัมพันธ์ของตรีโกณ $\cos x \cos y = [\cos(x+y) + \cos(x-y)]/2$ นำไปใช้ในสมการ
ที่ (ผ18) จะได้

$$\mu = \alpha_o E_o \cos(2\pi\nu_{ex}t) + \frac{E_o}{2} r_m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \cos[2\pi(\nu_{ex} - \nu_v)t] + \frac{E_o}{2} r_m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \cos[2\pi(\nu_{ex} + \nu_v)t] \quad (\text{ผ19})$$

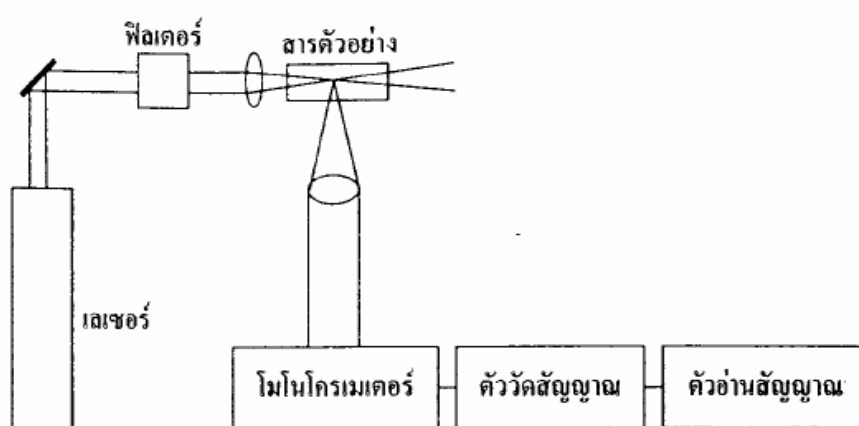
พจน์แรกในสมการที่ (ผ19) แทนการกระเจิงแบบเรย์ลีที่ความถี่กระตุ้นของคลื่นแสง ν_{ex} พจน์ที่สองและสาม แทนเส้นสโตก ($\nu_{ex} - \nu_v$) และเส้นแอนติสโตก ($\nu_{ex} + \nu_v$) ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าต้องการให้เกิดการกระเจิงแบบรามาน ค่าสภาพมีขั้วได้ของพันธะเคมีจะเป็นฟังก์ชันกับระยะห่างระหว่างนิวเคลียส นั่นคือ

$$\frac{\partial \alpha}{\partial r} > 0 \quad (\text{ผ20})$$

สรุปได้ว่า โมเลกุลใดๆที่ทำให้คลื่นแสงที่ไปกระตุ้นเกิดการกระเจิงแล้วให้เกิดการเลื่อนแบบรามาน (Raman shift) โมเลกุลนั้นจะต้องมีการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพมีขั้วได้ของพันธะเคมีนั้น และแต่ละพันธะโมเลกุลที่สั่นจะมีค่าระยะห่างระหว่างนิวเคลียสมากที่สุดเป็นแบบเฉพาะ จึงสามารถตรวจสอบพันธะเคมีได้จากการไปเทียบกับค่ามาตรฐาน

2. เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ ได้แก่ แหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง ระบบทัศนศาสตร์ (optic system) ระบบใส่สารตัวอย่าง ระบบแยกแสงและตัวตรวจวัดสัญญาณ ดังภาพผนวกที่ ค1

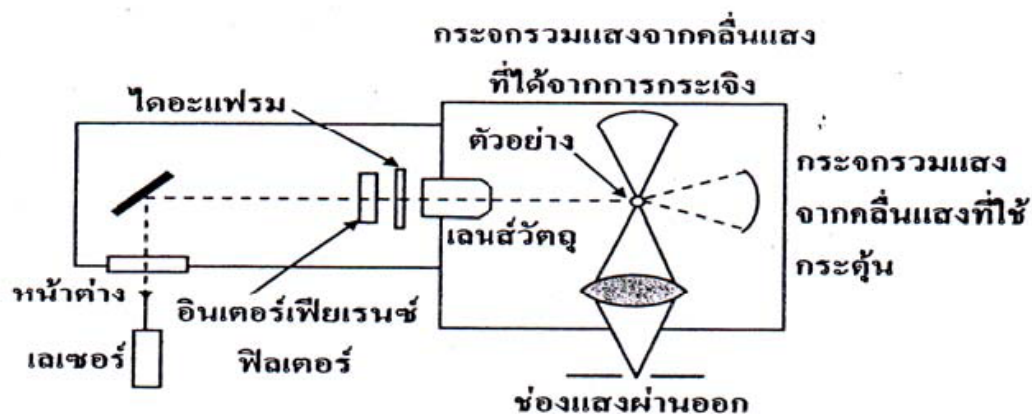


ภาพผนวกที่ ค1 ส่วนประกอบของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์

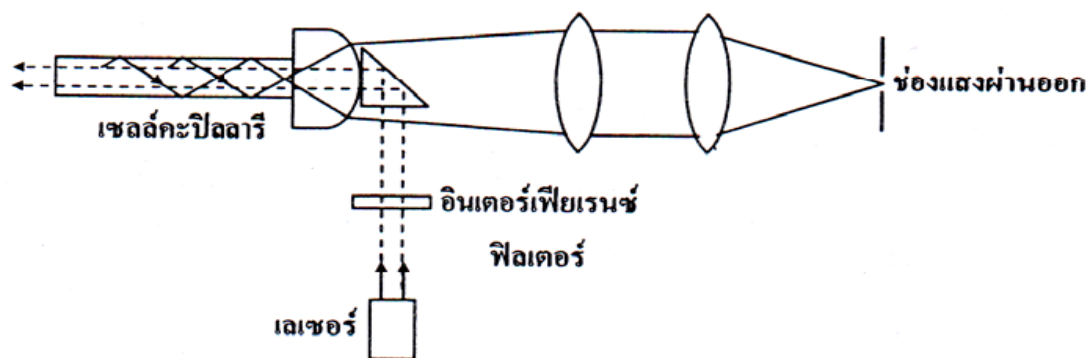
ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

2.1 แหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง เนื่องจากการเกิดการกระเจิงแบบรามานนั้นอ่อนมาก (ความเข้มของการกระเจิงต่ำ) เพื่อให้ได้จำนวนโฟตอนที่เกิดจากการกระเจิงแบบรามานมากเพียงพอที่จะตรวจวัดได้ จึงต้องใช้แหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง เช่น เลเซอร์ ซึ่งจัดเป็นแหล่งผลิตคลื่นแสงที่มีความเข้มสูง มีความกว้างของช่วงแสงที่ใช้แคบมากๆ เช่น Nd/YAG (Neodymium ion ที่เข้าไปแทนที่ในผลึก yttrium aluminium garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) เลเซอร์ที่ได้มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร

2.2 เลนส์และตัวกรองแสง เมื่อลำแสงเลเซอร์ผ่านออกจากแหล่งผลิตไปตกกระทบกระจกแบนราบ ได้ลำแสงคู่ขนานผ่านไปยังตัวกรองแสงที่มีประสิทธิภาพสูงในการกรองแสงช่วงคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปได้ถึงร้อยละ 99.9 ลำแสงที่ผ่านการกรองแล้วจะถูกเลนส์นูนปรับให้เป็นจุดเล็กๆ ไปกระทบที่สารตัวอย่าง แสงที่กระเจิงแบบรามานจากตัวอย่างถูกรวบรวมเข้าสู่เลนส์นูนให้มาอยู่ที่ช่องแสงผ่านออกของโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ซึ่งอาจจะเป็นมุม 90 องศาหรือ 180 องศาตามภาพผนวกที่ ค2



(ก)

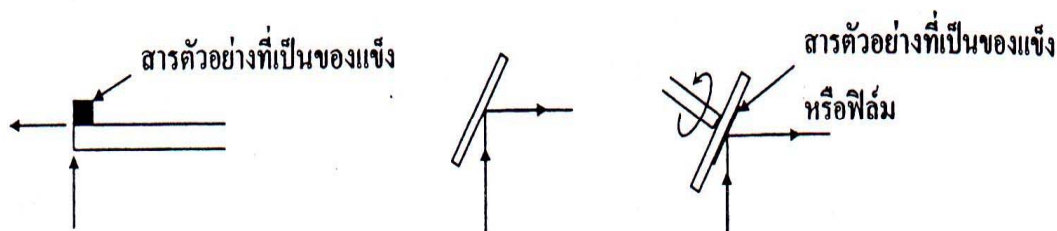


(ข)

ภาพผนวกที่ ค2 การวัดการกระเจิงแบบรามานในแนว (ก) 90 องศา และ (ข) 180 องศา

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

2.3 ระบบใส่สารตัวอย่าง เนื่องจากเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ส่วนใหญ่จะใช้แสงเลเซอร์ จึงสามารถใช้แก้วเป็นภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง เพราะว่าแก้วให้สัญญาณการกระเจิงแบบรามานที่อ่อนมาก นอกจากนี้ยังทนความร้อนและความดันได้ดีพอสมควร จึงใช้แก้วเป็นภาชนะบรรจุสารกรณีที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิหรือความดัน



ภาพผนวกที่ ค3 เทคนิคการวัดรามานสเปกตรัมของสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

2.4 โมโนโครเมเตอร์ ทำหน้าที่รวบรวมแสงที่กระเจิงแบบรามาน มาที่ช่องแสงผ่านออก แล้วกระจายออกเป็นแต่ละความถี่ของคลื่น จากนั้นผ่านออกที่ช่องแสงเข้าสู่ตัววัดสัญญาณ

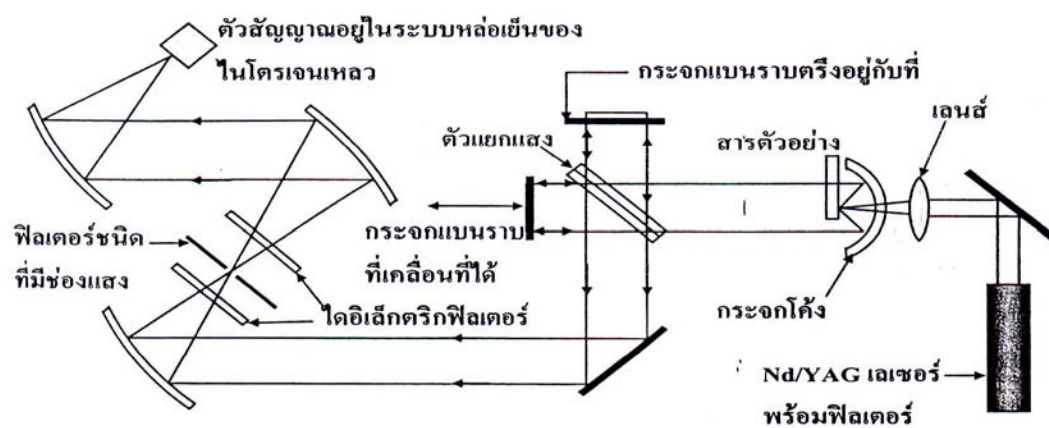
2.5 ตัววัดสัญญาณ ตัววัดสัญญาณที่ใช้ในเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์มีด้วยกัน 2 แบบ คือ

2.5.1 แบบช่องสัญญาณเดี่ยว (single channel)

2.5.2 แบบหลายช่องสัญญาณ (multi channel)

ความไวของเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์จะดี เมื่อใช้ตัววัดสัญญาณแบบหลายช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถจะตรวจวัดสัญญาณอ่อนๆ ของแสงที่กระเจิงแบบรามานได้ แต่ถ้ามีแสงภายนอกรบกวน (background fluorescence) แสงดังกล่าวจะถูกตรวจวัดไปด้วย ปัญหาที่ต้องแก้ไขคือต้องกำจัดแสงรบกวน ทำได้โดยให้แสงตัวอย่างถูกอาบด้วยแสงเลเซอร์เป็นเวลานานขึ้น อีกปัญหาหนึ่งก็คือ การสลายตัวอันเนื่องมาจากความร้อน (thermal decomposition) การแก้ปัญหานี้ทำได้โดยการหมุนสารตัวอย่างด้วยความเร็วสูง

การใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ จะช่วยแก้ปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณแสงรบกวนและการสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้ โดยเครื่องนี้ประกอบด้วย อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (interferometer) แหล่งผลิตคลื่นแสงเลเซอร์เป็น Nd/YAG เลเซอร์ มีตัวกรองแสงและตัววัดสัญญาณชนิดหลายช่องสัญญาณอยู่ในระบบหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว



ภาพผนวกที่ ค4 แผนภาพของเครื่อง FT-Raman spectrometer

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

ภาคผนวก ง

การเรียงรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

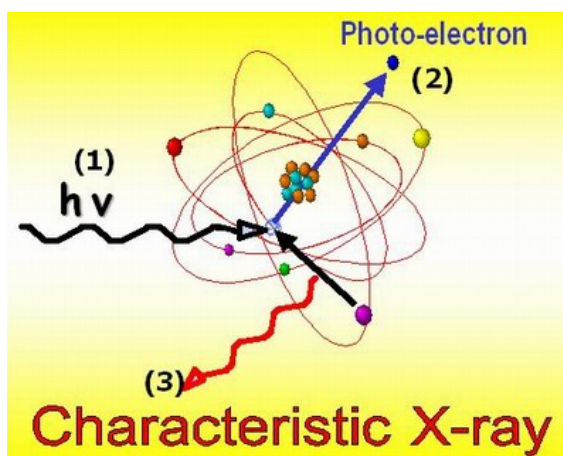
การวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy; XRFS) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-destructive analysis) สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาค่าประกอบต่างๆ ในตัวอย่างทั้งเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (quantitative analysis) สามารถทำการวิเคราะห์ ธาตุได้ทีละธาตุ หรือหลายๆ ธาตุพร้อมๆ กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบัน มีการพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ โปรแกรมของระบบวิเคราะห์ และคอมพิวเตอร์ ให้ทันสมัย สะดวกในการใช้งาน ทำให้วิเคราะห์ชิ้นงานที่ให้สเปกตรัมซับซ้อน ได้อย่างรวดเร็ว และถูกต้อง นอกจากนี้ ยังใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุได้ ตั้งแต่ระดับความเข้มข้นสูงจนถึงระดับ trace element (ppm) จึงทำให้เทคนิคนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การแพทย์ ธรณีวิทยา สิ่งแวดล้อม และการเกษตร การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย 2 วิธี คือ

1. การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายความยาวคลื่น (Wavelength dispersive X-ray Fluorescence, WDXRF) เป็นการวิเคราะห์ที่วิเคราะห์การกระจายรังสีเอกซ์ที่เกิดจากตัวอย่าง โดยมีต้นกำเนิดรังสี (radiation source) ทำอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ ในตัวอย่าง ทำให้ปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องบังคับลำรังสี (collimator) ให้ไปในทิศทางกระทบกับผลึกวิเคราะห์ เพื่อให้ผ่านการแยก หรือกระจายรังสีให้มีความยาวคลื่นต่างๆ กัน โดยคุณสมบัติการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy dispersive X-ray Fluorescence, EDXRF) เป็นวิธีที่วิเคราะห์รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างโดยตรง โดยที่ต้นกำเนิดรังสีทำอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ ในตัวอย่าง ทำให้ธาตุเหล่านั้นปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา ผ่านมายังตัวรับสัญญาณ และมีการแสดงผลออกมาในรูปแบบกราฟ ที่แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มรังสีเอกซ์กับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV)

ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะการวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานเท่านั้น

การเรืองรังสีเอกซ์

เมื่ออิเล็กตรอนในอะตอม (Orbital electron) ถูกทำให้หลุดออกไป จากชั้นพลังงาน (shell) ด้วยวิธีใดก็ตาม จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน จากชั้นพลังงานอื่นเข้ามาแทนที่ พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปโฟตอนหรือที่เรียกว่า “รังสีเอกซ์” จึงเรียกขบวนการนี้ว่า การเรืองรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาของแต่ละธาตุ จะมีพลังงานเฉพาะตัว เนื่องจากการจัดชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน ของแต่ละธาตุไม่เหมือนกัน จึงเรียกอีกอย่างว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray)” ดังภาพที่ 1 ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว ที่ได้จากแหล่งกระตุ้นเดียวกัน จะเป็นปฏิภาคกับจำนวนอะตอมของธาตุนั้นๆ การที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดจากชั้นพลังงานได้ ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้กระตุ้น (source) จะต้องให้รังสีที่มีพลังงาน มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นพลังงานนั้นๆ ซึ่งพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนนี้มีพลังงานใกล้เคียงกับค่าแถบการดูดกลืนพลังงาน (Absorption edges) ในแต่ละชั้นพลังงาน



ภาพผนวกที่ 1 ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

ที่มา: ศศิพันธุ์ (ม.ป.ป.)

แถบการดูดกลืนพลังงาน คือความสามารถในการดูดกลืนโฟตอนของธาตุใดๆ ดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (Absorption coefficient) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามขนาดของพลังงานที่ตกกระทบ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน จะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น แต่จะมีขนาดพลังงานของโฟตอนขนาดหนึ่ง ที่ธาตุสามารถดูดกลืนได้ดีเป็นพิเศษ เรียกพลังงานของโฟตอนนี้ว่า

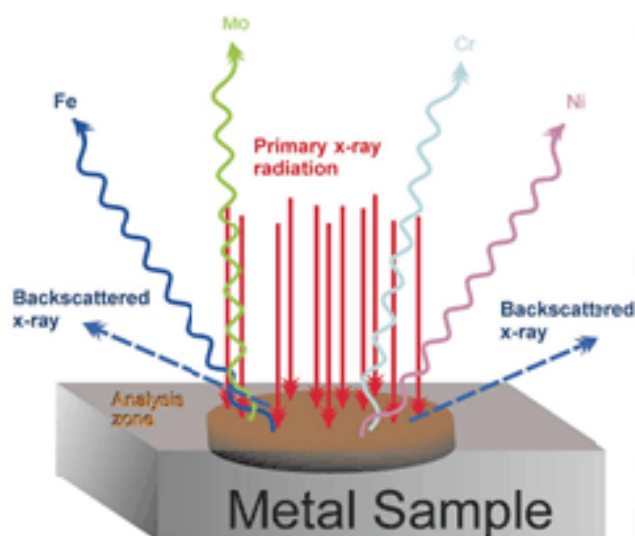
“ค่าแถบการดูดกลืนพลังงาน” ของธาตุนั้นๆ อะตอมของธาตุจะดูดกลืนโฟตอนจนหมด กลายเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ที่หลุดจากวงชั้นพลังงาน ค่าแถบการดูดกลืนพลังงานของธาตุ มีค่าใกล้เคียงกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในอะตอม แต่ละธาตุจะมีหลายแถบการดูดกลืนพลังงาน ตามลักษณะชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งขึ้นอยู่กับ จำนวนอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุนั้นๆ ชั้นเค (K-shell) มีหนึ่งแถบการดูดกลืนพลังงาน (K_{ab}) และชั้นแอล (L - shell) มี 3 แถบการดูดกลืนพลังงาน (L_{Iab} , L_{IIab} , และ L_{IIIab}) เป็นต้น

การที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากชั้นพลังงานใดๆ ของอะตอม จะต้องใช้โฟตอนที่ มีพลังงานมากกว่าแถบการดูดกลืนพลังงานของชั้นพลังงานนั้นๆ และพลังงานของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นอะตอมที่มากกว่าแถบการดูดกลืนพลังงานของชั้นพลังงานเพียงเล็กน้อย จะมีโอกาสทำให้เกิดการเรืองของรังสีเอกซ์ (Fluorescent yield) มากกว่าโฟตอนที่มีพลังงานสูงๆ

กระบวนการเกิดการเรืองรังสีเอกซ์ อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

1. การกระตุ้นแบบปฐมภูมิ (Primary Excitation) คือ การทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมโดยการยิง (bombard) ด้วยอนุภาคต่างๆ เช่น อิเล็กตรอน โปรตอน แอลฟา หรือ ไอออนที่มีความเร็วสูง เป็นต้น ทำให้อนุภาคเบี่ยงเบนทิศทางการเคลื่อนที่ เนื่องจากสนามไฟฟ้ารอบๆ นิวเคลียส พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์มีลักษณะต่อเนื่อง ขึ้นกับมุมที่อนุภาคเบี่ยงเบนไป เรียกว่า รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง continuous x-ray หรือ white X-ray หรือ Bremsstrahlung พบการเกิดรังสีเอกซ์แบบนี้ได้ ในหลอดรังสีเอกซ์ และในเครื่องเร่งอนุภาคต่างๆ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมา จะเป็นสัดส่วนโดยตรง กับความเร็วของอนุภาคที่ยิง พลังงานของรังสีเอกซ์ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับชนิดของสารที่เป็นเป้า

2. การกระตุ้นแบบทุติยภูมิ (Secondary Excitation) หรือการเรืองรังสีเอกซ์ คือการทำให้อิเล็กตรอน หลุดออกไปจากอะตอม โดยใช้โฟตอน ซึ่งอาจเป็นรังสีเอกซ์ หรือแกมมา โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมด ให้อะตอมด้วยกระบวนการที่เรียก โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric Effect) โดยพลังงานของโฟตอน จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม และเกิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะตัวตามมา

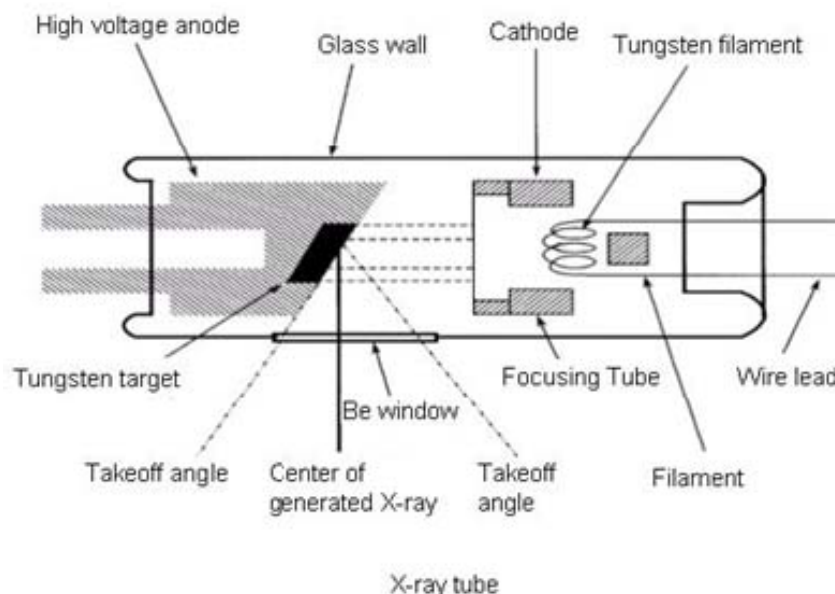


ภาพผนวกที่ ๒ การเกิดอันตรกิริยาในตัวอย่างเมื่อได้รับการกระตุ้น

ที่มา: วันวิสา (2548)

ต้นกำเนิดรังสีกระตุ้น

รังสีเอกซ์ที่ใช้ในการกระตุ้นสำหรับการวิเคราะห์ได้มาจาก ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ และ/หรือ รังสีแกมมาที่เป็นไอโซโทปรังสี หรือจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เครื่องเร่งรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงานนิยมใช้ต้นกำเนิดรังสีที่เป็นหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ โดยที่ลักษณะของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ภายในเป็นหลอดสุญญากาศ ประกอบด้วยขั้วแคโทด และแอโนดที่มีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ที่มีธาตุที่ใช้เป็นเป้าเคลือบอยู่ เช่น ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) ทังสเตน (W) เงิน (Ag) เป็นต้น เมื่อทำให้เส้นลวดที่แคโทดร้อนจะทำให้ไอเล็กตรอนหลุดออกมา และไอเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนดชนกับเป้าทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ซึ่งส่งผลให้ทำให้เกิดรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง และรังสีเอกซ์เฉพาะของธาตุที่เป็นเป้า ซึ่งรังสีเอกซ์ที่ได้จะนำไปใช้ในการกระตุ้นตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ต่อไป



ภาพผนวกที่ ง3 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

ที่มา: วันวิสา (2548)

หัววัดรังสี (Detector)

หัววัดรังสีที่ใช้ในงานของเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์นั้น ที่นิยมมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

1. Gas ionization detectors หรือ proportional counter เป็นหัววัดรังสีที่ใช้หลักการทำให้เกิดไอออนในเซชันกับก๊าซที่บรรจุหรือผ่านเข้าไปในหัววัดรังสี โดยทั่วไปก๊าซที่ใช้จะเป็นก๊าซผสม 16 ของอาร์กอน 90 เปอร์เซ็นต์ และมีเทน (CH₄) 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออาร์กอนเกิดอันตรกิริยากับรังสีเอกซ์ จะเกิดไอออนในเซชันและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะชนกับโมเลกุลของตัวอื่นๆอีก จะทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกว่า คู่ของไอออนมากขึ้น ไอออนบวกและอิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังอิเล็กโทรด ซึ่งจะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยที่หัววัดรังสีประเภทนี้นิยมใช้ใน WDXRF

2. Scintillation detector เป็นหัววัดรังสีอีกชนิดที่นิยมใช้ โดยเฉพาะใช้สำหรับวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดจากธาตุหนัก ซึ่งหัววัดแบบใช้ก๊าซมีประสิทธิภาพของค่อนข้างต่ำโดยที่หัววัดรังสีประเภทนี้นิยมใช้ใน Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence การเรืองแสงของสารเรืองแสงซึ่งเป็น

ตัวกลางของหัววัดรังสีเอกซ์นั้น เกิดขึ้นจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับอะตอมของตัวกลาง ส่วนใหญ่อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยรังสีเอกซ์จะชนกับอิเล็กตรอนของสารเรืองแสง และถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน ซึ่งโฟโตอิเล็กตรอนนี้จะไปทำอันตรกิริยากับสารเรืองแสง และให้แสงฟลอรูออมาโดยความเข้มของแสงฟลอรูออที่ปล่อยออกมาจะแปรผันตามพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าทำอันตรกิริยา

3. Semi-conductor เป็นหัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ โดยใช้ธาตุหมู่ IV เช่น ซิลิคอน (Si) เจอมาเนียม (Ge) ซึ่งจะเคลือบด้วยลิเทียม (Li) โดยนำไปอบด้วยความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนของธาตุลิเทียมเคลื่อนที่เข้าไปในหัววัดได้ และจะเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาทำให้มีบทบาทต่อการตรวจวัดรังสีที่ผ่านเข้ามา เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้ามาจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ได้ electron-hole pair (การเกิด electron-hole pair 1 คู่ใช้พลังงาน 3.8 eV) ภายในผลึกหัววัด ซึ่งเปรียบเสมือนประจุลบและประจุบวก ทำให้เปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าจากผลึกหัววัดรังสีไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าสู่ส่วนขยายสัญญาณต่อไป โดยที่หัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำนี้นิยมใช้ในเครื่องเรืองรังสีชนิด EDXRF

หลักการทำงานของเครื่องมือการวิเคราะห์การเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน

ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน เมื่อเริ่มทำการวิเคราะห์รังสีจากหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) จะเข้าทำอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ ทำให้ได้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา โดยที่รังสีเอกซ์เฉพาะตัวเหล่านั้นจะผ่านมายังตัวรับสัญญาณ ซึ่งเป็นหัววัดแบบกึ่งตัวนำ โดยใช้เป็นแบบ Si (Li) (lithium-drifted silicon detector) โดยที่รังสีเอกซ์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นประจุโดยหัววัดรังสี ประจุที่เกิดขึ้นจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามา สัญญาณจากหัววัดรังสีจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) และถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัล โดยที่สัญญาณดิจิทัลนี้จะถูกส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (multi-channel analyzer) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องจะสามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์ได้ครอบคลุมในช่วงพลังงาน จึงทำให้สามารถทำงานได้พร้อมกันหลายระดับพลังงาน ข้อมูลสัญญาณที่สะสมไว้ จะถูกแสดงผลออกมาอย่างต่อเนื่อง ที่แสดงออกมาในรูปแบบความเข้มรังสีกับจำนวนนับรังสีสะสมแต่ละช่องวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังสามารถเก็บข้อมูลไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในคราวต่อไปได้อีกด้วย จากการวิเคราะห์ด้วยระบบวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องนี้เองทำให้สามารถวิเคราะห์ได้แบบ multi-element

ภาคผนวก จ

อิเล็กทรอนิกส์ปันเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงไมโครเวฟ (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ 10^6 - 10^8 Hz คิดเป็นพลังงาน 6.626×10^{-28} – 6.626×10^{-26} J) อันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpair electron) อยู่ในสนามแม่เหล็ก สารหรือไอออนที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว ได้แก่ อนุมูลอิสระ (free radical) โมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคี่ (odd electron molecule) ไอออนเชิงซ้อน (complex ions) สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชัน (transition-metal complexes) แลนทาไนด์ไอออน (lanthanide ions) โมเลกุลที่มีสถานะทริฟเฟิลต์ (triplet-state molecule) และสารที่เป็นพาราแมกเนติก (paramagnetic molecule) เช่น O_2 , NO, NO_2 , และ ClO_2 เป็นต้น

อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบและมีการเคลื่อนที่ นอกจากการหมุนรอบนิวเคลียสแล้ว ยังหมุนรอบตัวเองด้วย การหมุนรอบตัวเองทำให้มีโมเมนต์เชิงมุมเกิดขึ้น เลขควอนตัมที่ใช้กำหนดค่าโมเมนต์ดังกล่าวเรียกว่า เลขควอนตัมเชิงสปิน (spin quantum number, m_s) ค่า m_s จะบอกถึงการหมุนอิเล็กตรอนรอบตัวเองซึ่งสามารถหมุนตามเข็มนาฬิกา m_s จึงกำหนดไว้ 2 ค่า คือ $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$

การหมุนรอบแกนตัวเองของอิเล็กตรอน และการหมุนของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสทำให้เกิดแมกเนติกโมเมนต์ การหมุนแบบแรกทำให้เกิดแมกเนติกโมเมนต์ที่เรียกว่า สปิน - ออรัลแมกเนติกโมเมนต์ (spin-only magnetic moment μ_s) และการหมุนแบบที่สองจะเกิดแมกเนติกโมเมนต์ที่เรียกว่า ออร์บิตอลแมกเนติกโมเมนต์ (orbital magnetic moment μ_L) จากการศึกษาพบว่า สปิน-ออรัลแมกเนติกโมเมนต์หรืออาจเรียกว่า แมกเนติกไดโพลโมเมนต์จะมีอิทธิพลต่อความเป็นแม่เหล็กของสารมากกว่าออร์บิตอลแมกเนติกโมเมนต์

ค่าแมกเนติกไดโพลโมเมนต์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวดังนี้

$$\mu_s = \sqrt{n(n+2)} \quad (\text{ผ 21})$$

และ

$$\mu_s = g\mu_B m_s \quad (\text{ผ 22})$$

เมื่อ g คือ g-factor จะสัมพันธ์กับแมกเนติกโมเมนต์ของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนอิสระจะมีค่า g เท่ากับ 2.0023 ค่า g ของอิเล็กตรอนในอะตอมและโมเลกุลจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.9 ถึง 2.1 สำหรับค่า g ของ d - อิเล็กตรอนในสารประกอบเชิงซ้อนและไอออนเชิงซ้อนของโลหะไอออนแทรนซิชันมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4

เมื่อ	μ_B	คือ	โบร์แมกเนตัน	$= \frac{eh}{4\pi mc}$	$= 9.274 \times 10^{-24}$ จูล/เทสลา (J/T)
	m	คือ	มวลของอิเล็กตรอน		$= 9.11 \times 10^{-28}$ กรัม (g)
	e	คือ	ประจุของอิเล็กตรอน		$= 1.60 \times 10^{-19}$ คูโลมบ์ (C)
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์		$= 6.626 \times 10^{-34}$ จูลเฮิร์ตซ์ ⁻¹ (JHz ⁻¹)
	c	คือ	ความเร็วของแสง		$= 2.998 \times 10^8$ เมตร/วินาที (m/s)
	m_s	เท่ากับ	$+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$		

ทิศทางการสปินของอิเล็กตรอนมีได้ 2 แบบเท่านั้นตามค่าของ m_s จึงมีการระบุสถานะสปิน โดยกำหนดเป็นฟังก์ชันคลื่น (spin wave function) คือ แอลฟา และบีตา สำหรับ $m_s = +\frac{1}{2}$ เรียกเป็น แอลฟา-อิเล็กตรอน (α -electron) และ $m_s = -\frac{1}{2}$ เรียกเป็น บีตา-อิเล็กตรอน (β -electron) เนื่องจากบีตา-อิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำจึงมีจำนวนมากกว่าแอลฟา-อิเล็กตรอน

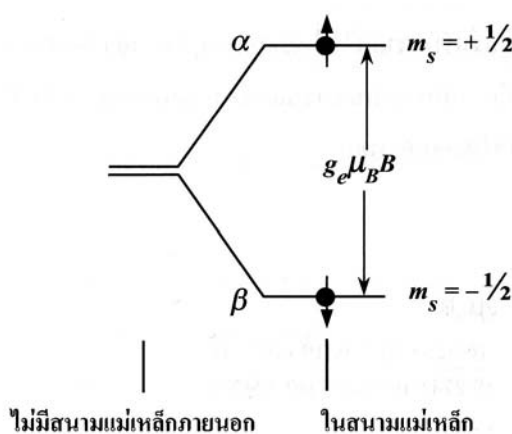
1. อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่ออิเล็กตรอนเดี่ยว

อิเล็กตรอนที่มีเลขควอนตัมเชิงสปิน 2 ค่า คือ $m_s = +\frac{1}{2}$ และ $m_s = -\frac{1}{2}$ นั้นเมื่อยังไม่มีสนามแม่เหล็กไปรบกวน สถานะทั้ง 2 สปินจะมีพลังงานเท่ากัน (doubly degenerate spin state) แต่เมื่ออยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก ทำให้สถานะทั้ง 2 สปินมีพลังงานต่างกันดังภาพผนวกที่ จ1 ซึ่งพลังงานที่ต่างกันนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดตัวของมันเองในสนามแม่เหล็กภายนอก

พลังงานการหมุนของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามแม่เหล็ก B เขียนได้

$$E = \mu_s B = g\mu_B m_s B \quad (\text{ผ23})$$

พลังงานของแอลฟา-อิเล็กตรอน ($m_s = +\frac{1}{2}$) เพิ่มขึ้น เนื่องจากสภาวะการหมุนของอิเล็กตรอนมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็ก ส่วนพลังงานของบีตา-อิเล็กตรอน ($m_s = -\frac{1}{2}$) ลดลง เนื่องจากสภาวะการหมุนของอิเล็กตรอนขนานกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก เมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นของฟลักซ์สนามแม่เหล็ก (magnetic flux density) หน่วยเทสลา เพิ่มขึ้น



ภาพผนวกที่ จ1 ระดับพลังงานอิเล็กตรอนสปินในสนามแม่เหล็กภายนอก (B)

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออิเล็กตรอนเดี่ยวเพียง 1 อิเล็กตรอน เรียกว่า electron zeeman effect แต่ถ้ามีอิเล็กตรอนเดี่ยวหลายๆ อิเล็กตรอนเกิดกระทำต่อกันจะเรียกว่า zero field splitting

จากภาพผนวกที่ จ1 ผลต่างของระดับพลังงานของสองสปินหรือแอลฟาและ บีตา - อิเล็กตรอน ΔE เป็นดังนี้

$$\Delta E = E_\alpha - E_\beta$$

$$\Delta E = \left(+\frac{1}{2} g \mu_B B\right) - \left(-\frac{1}{2} g \mu_B B\right)$$

$$\Delta E = g\mu_B B \quad (\text{ผ24})$$

ESR สเปกโทรสโกปีจะเกิดแทรนซิชันระหว่างสองระดับพลังงานของสองสปินนี้จะต้องใช้พลังงานคลื่นแสงที่เหมาะสมคือ 10 - 1000 J/mol ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นไมโครเวฟ การเกิดแทรนซิชันในช่วงคลื่นไมโครเวฟนี้จะเรียกว่าการเกิดเรโซแนนซ์ จะได้ว่า

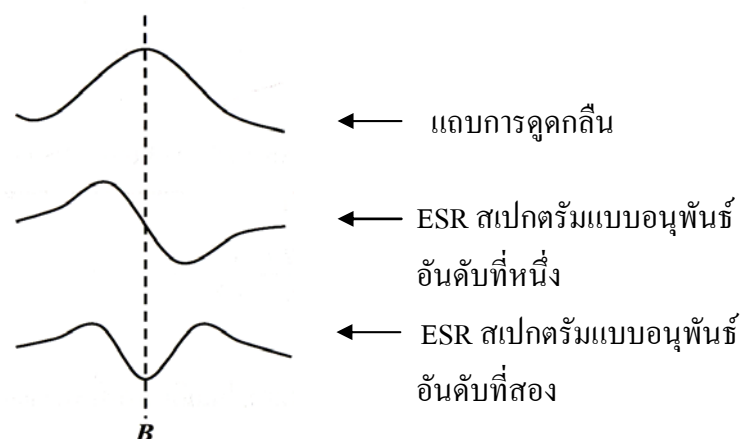
$$h\nu = g\mu_B B \quad (\text{ผ25})$$

ความถี่ที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์ $\nu = g\mu_B B / h$ แสดงว่าสนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่งจะพอดีกับความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ν) ค่าหนึ่งเท่านั้น ซึ่งเป็นความถี่ในช่วงคลื่นไมโครเวฟที่จะทำให้อิเล็กตรอนเกิดเรโซแนนซ์จากระดับพลังงานต่ำไปสู่ระดับพลังงานสูง

2. ลักษณะของ ESR สเปกตรัม

เนื่องจาก ΔE ระหว่างระดับพลังงานใน ESR มีค่าน้อยทำให้สเปกตรัมดูดกลืนอาจมีแถบที่กว้างหรือเกิดการซ้อนทับกันของยอด และเพื่อเพิ่มอัตราสัญญาณรบกวน ESR สเปกตรัมจึงถูกบันทึกเป็นสเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและที่สอง (first and second derivative spectrum) แต่ส่วนใหญ่แล้วจะบันทึกสเปกตรัม ESR เป็นแบบอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง

ESR สเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่ศูนย์ หนึ่ง และสองนั้นถูกบันทึกโดยมีแกนตั้งเป็นค่าแถบการดูดกลืน (absorb band) A , dA/dB และ d^2A/dB^2 ตามลำดับกับการกราฟความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก (B) ในแนวนอนดังภาพผนวกที่ จ2



ภาพผนวกที่ จ2 ESR สเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่ศูนย์ หนึ่งและสอง ตามลำดับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

ความกว้างของยอดระหว่างยอดถึงยอด $\Delta\nu$ (line width) ของอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกตรัมนั้นจะให้ข้อมูลด้านเวลาของการผ่อนคลาย (relaxation time) อธิบายได้จากหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก

$$\Delta E \cdot \Delta t = \frac{h}{2\pi} \quad (\text{ผ26})$$

ΔE และ Δt เป็นความไม่แน่นอนในการวัดค่าพลังงานและช่วงชีวิตของระบบหนึ่งตามลำดับ

$$h\Delta\nu \cdot \Delta t = \frac{h}{2\pi}$$

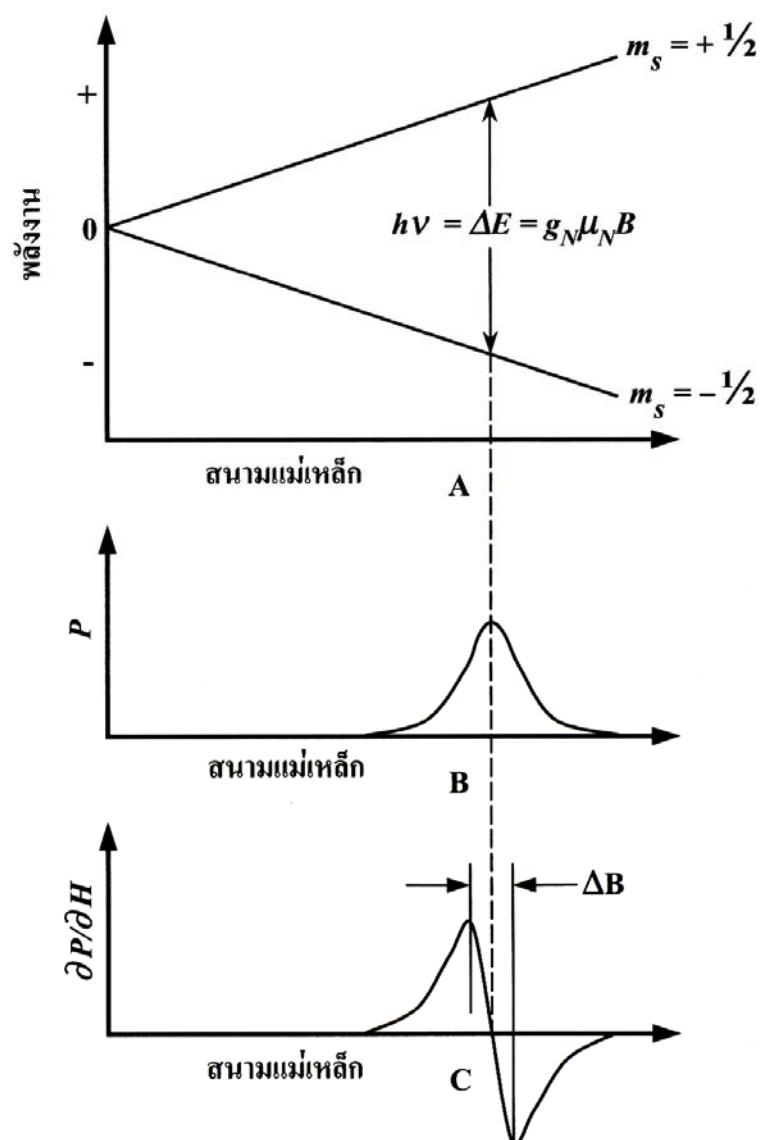
$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi \Delta t} = 0.1/J \quad (\text{ผ27})$$

เมื่อ J เป็นเวลาการผ่อนคลายของการหมุนของอิเล็กตรอน (electron spin relaxation time) สำหรับอิเล็กตรอนจะมี J อยู่ระหว่าง $10^{-7} - 10^{-8}$ วินาที

$$\text{ถ้า } J \text{ เท่ากับ } 10^{-7} \text{ วินาที } \Delta\nu = 0.1/10^{-7} = 10^6 \text{ Hz}$$

$$\text{ถ้า } J \text{ เท่ากับ } 10^{-8} \text{ วินาที } \Delta\nu = 0.1/10^{-8} = 10^7 \text{ Hz}$$

ดังนั้นความกว้างของขอดระหว่างขอดถึงขอด $\Delta\nu$ ของ ESR สเปกตรัม จะอยู่ระหว่าง $10^6 - 10^7 \text{ Hz}$ หรือ $1 - 10 \text{ MHz}$



- ภาพผนวกที่ จ3 (A) ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามแม่เหล็กภายนอก B
 (B) ESR สเปกตรัมอันดับศูนย์ ระหว่างค่าการดูดกลืน (p) กับสนามแม่เหล็กภายนอก
 (C) ESR สเปกตรัมอันดับหนึ่ง $\Delta\nu$ แสดงถึงความกว้างของยอดระหว่างยอดถึงยอด (the peak-to-peak line width)

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

3. อันตรกิริยาไฮเปอร์ไฟน์ (hyperfine interaction)

โลหะไอออน โมเลกุล หรืออะตอมที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวและอยู่ใกล้กับนิวเคลียสของอะตอมอื่นที่มีนิวเคลียสสปินซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นได้ และเกิดอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กของอิเล็กตรอนเรียกว่า การเกิดอันตรกิริยาไฮเปอร์ไฟน์หรือไฮเปอร์ไฟน์คัปเพิล (hyperfine coupling) เป็นผลให้ระดับพลังงานแอลฟาและบีตา-อิเล็กตรอนถูกแยกออกเป็นอย่างละ $(2I+1)$ ระดับพลังงาน แต่ละระดับพลังงานจะมีเลขควอนตัมแมกเนติก M_I และมีพลังงาน (ΔE) ดังนี้

$$\Delta E = g\mu_B B m_s + a M_I m_s \quad (\text{ผ28})$$

นิวเคลียสของธาตุที่มีนิวเคลียสสปินจะให้ M_I จำนวน $(2I+1)$ ค่าและค่า M_I เป็นดังนี้

$$M_I = I, I-1, I-2, \dots, 0, \dots, -I$$

เช่น แมงกานีส (Mn) มี $I = \frac{5}{2}$

มี $M_I = 2(\frac{5}{2})+1 = 6$ ค่า

ค่า M_I 2 ค่า คือ $+\frac{5}{2}, +\frac{3}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}$ และ $-\frac{5}{2}$

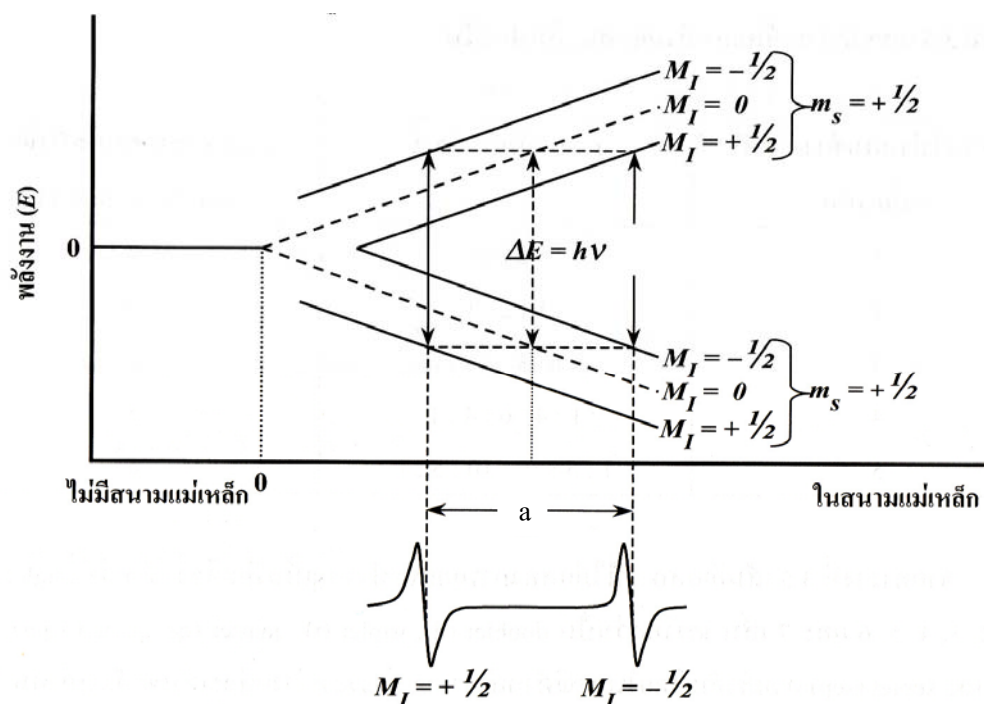
ไฮโดรเจนมี

มี $I = \frac{1}{2}$

มี $M_I = 2(\frac{1}{2})+1 = 2$ ค่า

ค่า M_I 2 ค่า คือ $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$

ESR สเปกตรัมที่ได้เรียกว่า เส้นไฮเปอร์ไฟน์ (hyperfine line) แต่ละเส้นไฮเปอร์ไฟน์จะมีระยะห่างเท่าๆ กันเท่ากับ a เรียกว่าค่าคงที่คู่ควบไฮเปอร์ไฟน์ (hyperfine coupling constant) ในหน่วยของสนามแม่เหล็ก ดังภาพผนวกที่ จ4



ภาพผนวกที่ จ4 ผลของนิวเคลียร์สปิน ($I = \frac{1}{2}$) ที่มีผลต่อระดับพลังงาน m_s เท่ากับ $\pm \frac{1}{2}$

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

จากภาพผนวกที่ จ4 กล่าวได้ว่าการเกิดอันตรกิริยาไฮเปอร์ไฟด์ระหว่างอิเล็กตรอนกับไฮโดรเจน ($I = \frac{1}{2}$) ผลคือทำให้ได้ระดับพลังงานทั้งหมด 4 ระดับพลังงานและจะเห็น ESR สเปกตรัมหรือเส้นไฮเปอร์ไฟด์ทั้งหมด 2 เส้น (คิดจาก $2I+1$) และแต่ละเส้นมีความเข้มเท่ากัน

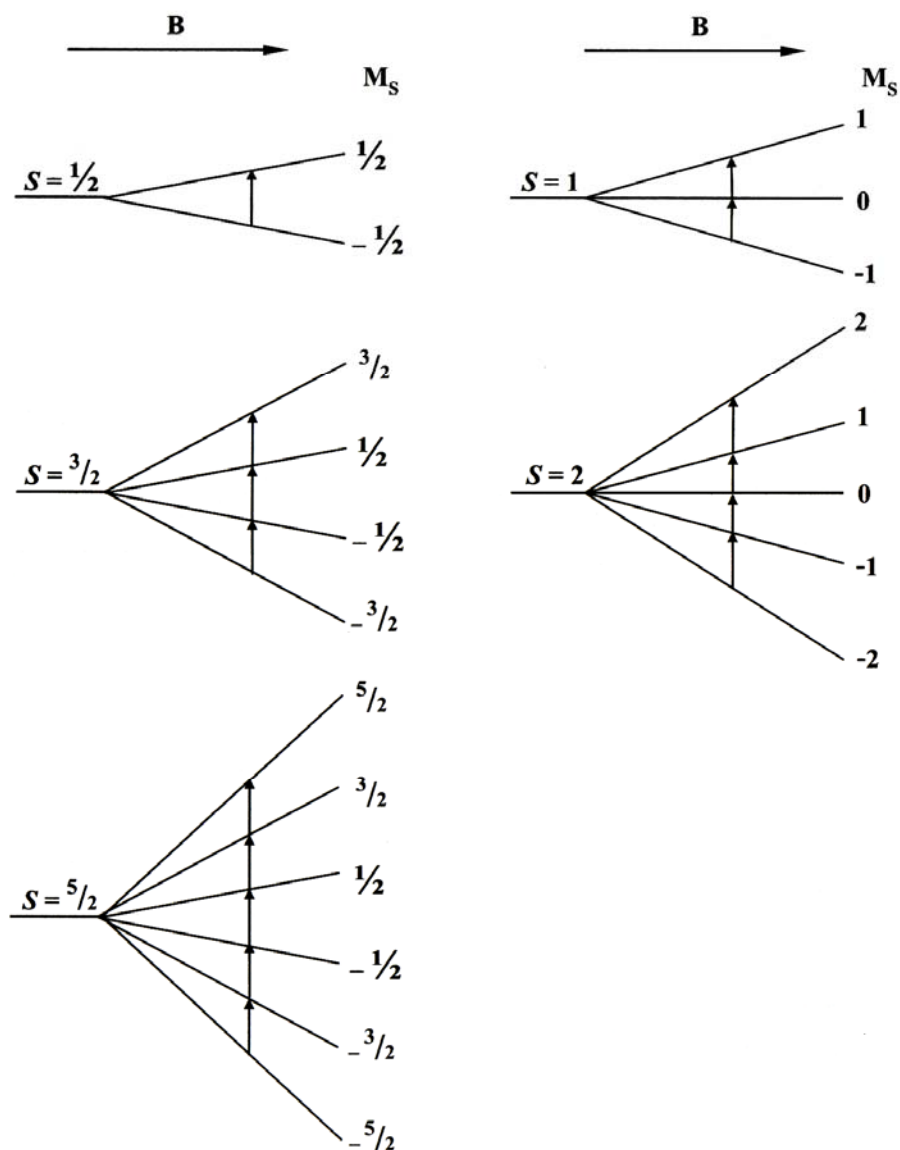
4. Zero-field splitting (D)

อิเล็กตรอนเดี่ยวมีอิเล็กตรอนสปิน $\frac{1}{2}$ ตามหลักการของกลศาสตร์ควอนตัมจะบอกถึงจำนวนการจัดเรียงหรือทิศทางสปินของอิเล็กตรอนเท่ากับ $2S+1$ แบบ (S เป็นจำนวนอิเล็กตรอนสปินทั้งหมดของอิเล็กตรอนเดี่ยว) การจัดเรียงหรือทิศทางสปินบอกด้วยค่าเลขควอนตัมเชิงสปิน (m_s) ค่าของ m_s เป็นดังนี้

$$m_s = S, S-1, S-2, \dots, 0, \dots, -S$$

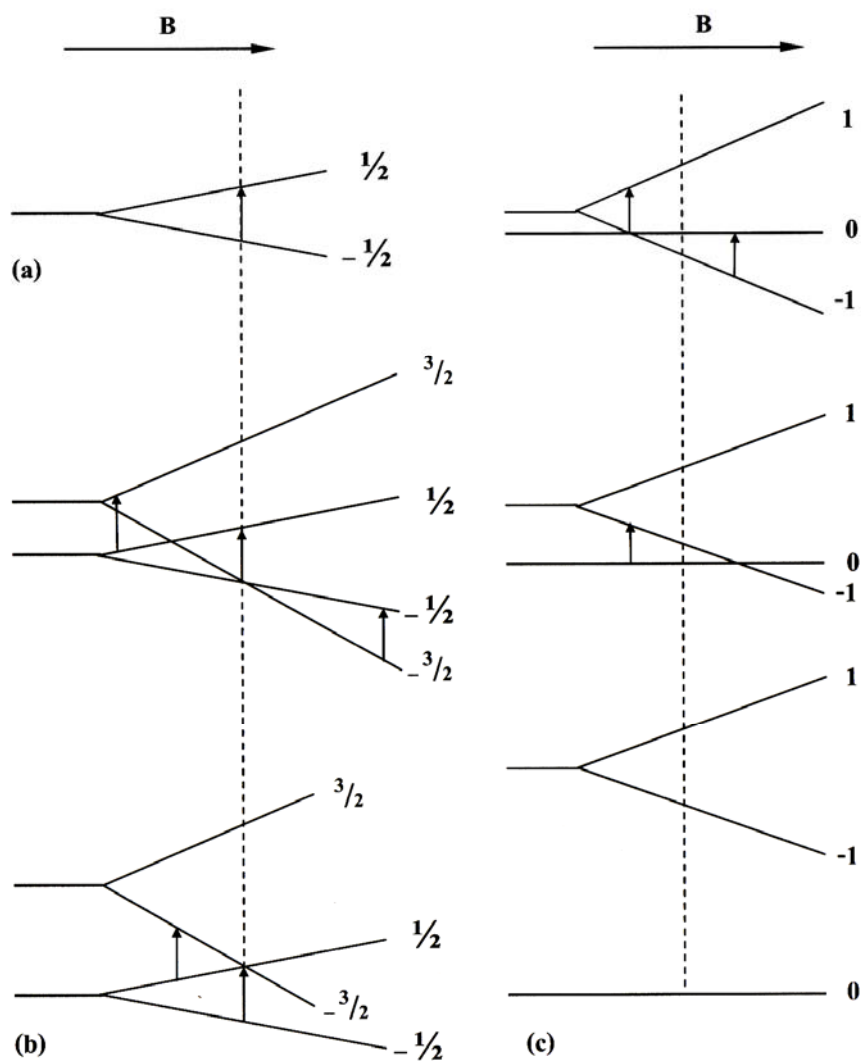
สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยว 1 อิเล็กตรอนมี $S = \frac{1}{2}$ การสปินของอิเล็กตรอนจึงมี 2 แบบ m_s มี 2 ค่า คือ $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ การสปินของอิเล็กตรอนทั้งสองแบบจะมีพลังงานเท่ากันเมื่อไม่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก (สนามแม่เหล็กภายนอกมีผลทำให้ภาวะทั้งสองสปินแยกออกจากกันและมีพลังงานไม่เท่ากัน)

ในกรณีสารหรือไอออนที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวมากกว่าหนึ่งอิเล็กตรอน การสปินของอิเล็กตรอนในแต่ละแบบจะถูกแยกออกจากกัน (ทำให้มีพลังงานไม่เท่ากัน) อันเนื่องมาจากการกระทำของสปินอิเล็กตรอนของอิเล็กตรอนเดี่ยวด้วยกันโดยไม่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Zero-field splitting เช่น ในโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 2 อิเล็กตรอน จะมี S เท่ากับ 1 (เกิดจาก $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$) และมี m_s 3 ค่า คือ +1, 0 และ -1 ภาวะการสปินทั้ง 3 แบบจะมีพลังงานเท่ากัน เมื่อผ่านสนามแม่เหล็กภายนอก ภาวะการสปินทั้ง 3 แบบจะแยกออกจากกัน และมีการแทนชั้ชจาก $m_s = 0$ ไปที่ $m_s = 1$ และ $m_s = -1$ ไปที่ $m_s = 0$ (ตามกฎการเลือก $\Delta m_s = \pm 1$) การแทนชั้ชทั้งสองแบบจะมีพลังงานเท่ากัน จึงเห็นเส้นสเปกตรัมอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์หนึ่งเส้นดังภาพผนวกที่ จ5 แต่ถ้าอิเล็กตรอนเดี่ยวทั้ง 2 อิเล็กตรอนเกิดปรากฏการณ์ Zero-field splitting จะทำให้สภาวะการสปินทั้ง 3 แบบมีการแยกเป็นสองระดับพลังงานขึ้นมาก่อน เมื่อผ่านสนามแม่เหล็กภายนอกเข้าไป การแทนชั้ชเกิดขึ้น 2 แบบที่มีพลังงานต่างกัน จึงเห็นเส้นสเปกตรัมอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สองเส้นหรือหนึ่งเส้นก็ได้ ดังภาพผนวกที่ จ6



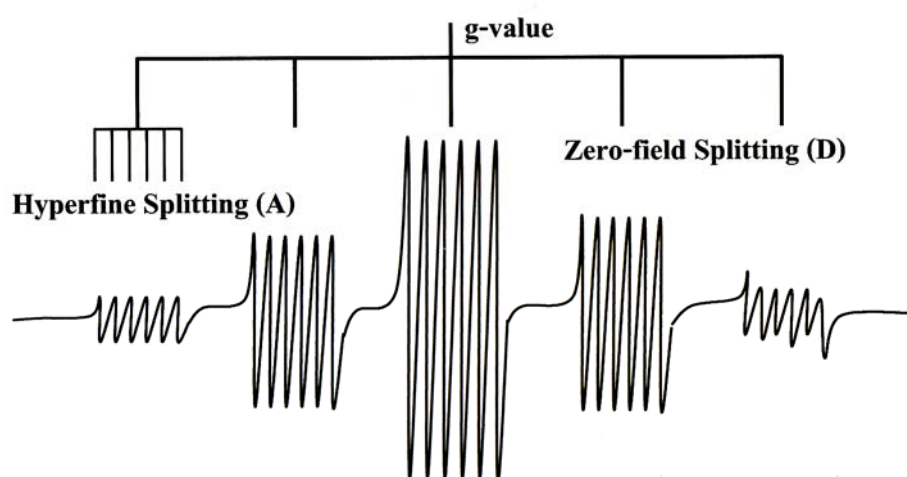
ภาพผนวกที่ จ5 ระดับพลังงานที่ถูกแยกออกมาอันเนื่องมาจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ภายนอก (B) โดยไม่เกิดปรากฏการณ์ Zero-field splitting ของอิเล็กตรอนเดี่ยวจำนวน 1 อิเล็กตรอน ($S = \frac{1}{2}$), 2 อิเล็กตรอน ($S = 1$), 3 อิเล็กตรอน ($S = \frac{3}{2}$), 4 อิเล็กตรอน ($S = 2$) และ 5 อิเล็กตรอน ($S = \frac{5}{2}$) ตามลำดับ

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)



- ภาพผนวกที่ ๖6 (a) ระดับพลังงานที่ถูกแยกกันเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอกของอิเล็กตรอนเดี่ยว 1 อิเล็กตรอน ($S = \frac{1}{2}$)
- (b) ระดับพลังงานที่ถูกแยกออกเป็น 2 ระดับพลังงานก่อนอันเนื่องมาจากการเกิด Zero-field splitting ที่เป็นได้ 2 แบบก่อนจะผ่านสนามแม่เหล็กภายนอกของอิเล็กตรอนเดี่ยว 3 อิเล็กตรอน ($S = \frac{3}{2}$)
- (c) ระดับพลังงานที่ถูกแยกออกเป็น 2 ระดับพลังงานก่อนอันเนื่องมาจากการเกิด Zero-field splitting ที่เป็นได้ 2 แบบก่อนจะผ่านสนามแม่เหล็กภายนอกของอิเล็กตรอนเดี่ยว 2 อิเล็กตรอน ($S = 1$)

สรุปได้ว่า จำนวนการเกิด ESR แทรนซิชันที่เกิดจาก Zero-field splitting ของโมเลกุลหรือไอออนที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวจำนวน i อิเล็กตรอนจะเท่ากับ i เช่น Mn^{2+} ($3d^5$) มีอิเล็กตรอนเดี่ยว 5 อิเล็กตรอน จะเกิด 5 แทรนซิชัน และถ้าโมเลกุลหรือไอออนที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวจำนวน i อิเล็กตรอน สามารถเกิดอันตรกิริยาไฮเปอร์ไฟน์ได้จะทำให้แต่ละระดับพลังงานของ m_s แยกออกเป็น $(2I+1)$ ระดับพลังงาน เช่น ไอออนเชิงซ้อนของ Mn^{2+} ($3d^5$) ผลของการเกิด Zero - field splitting และผลของสนามแม่เหล็กภายนอกจะได้ 6 ระดับพลังงานที่มี m_s เท่ากับ $+\frac{5}{2}, +\frac{3}{2}, +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}$ และ $-\frac{5}{2}$ และเกิด 5 แทรนซิชัน $(-\frac{5}{2} \longrightarrow -\frac{3}{2}, -\frac{3}{2} \longrightarrow -\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \longrightarrow +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2} \longrightarrow +\frac{3}{2}$ และ $+\frac{3}{2} \longrightarrow +\frac{5}{2})$ ได้เส้น สเปกตรัมอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ 5 เส้น แต่ละเส้นถูกแยกออกไปได้อีก 6 เส้น (คิดจาก $2(\frac{5}{2}) + 1$, เมื่อ Mn มี $I = \frac{5}{2}$) ดังภาพผนวกที่ จ7

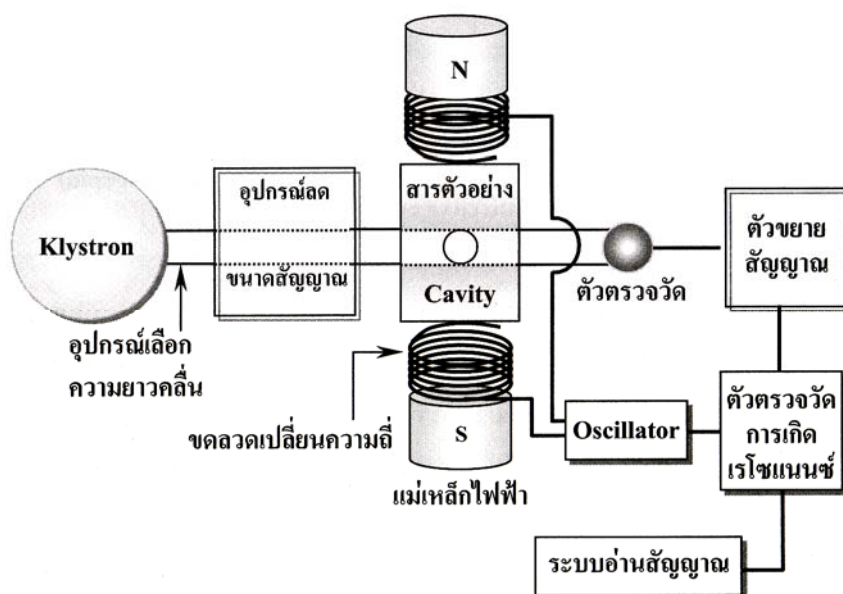


ภาพผนวกที่ จ7 ESR สเปกตรัมของไอออนเชิงซ้อนของ Mn^{2+} (มีโครงสร้างแบบทรงเหลี่ยมแปดหน้า) จะประกอบด้วยยอดใหญ่ 5 ยอด แต่ละยอดจะถูกแยกออกเป็น 6 ยอด

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

5. ESR สเปกโตรมิเตอร์

ช่วงคลื่นไมโครเวฟประกอบด้วย L-band (1-2 GHz), S-band (2-4 GHz), X-band (8-10 GHz), K-band (27-35 GHz) และ W-band (95 GHz)

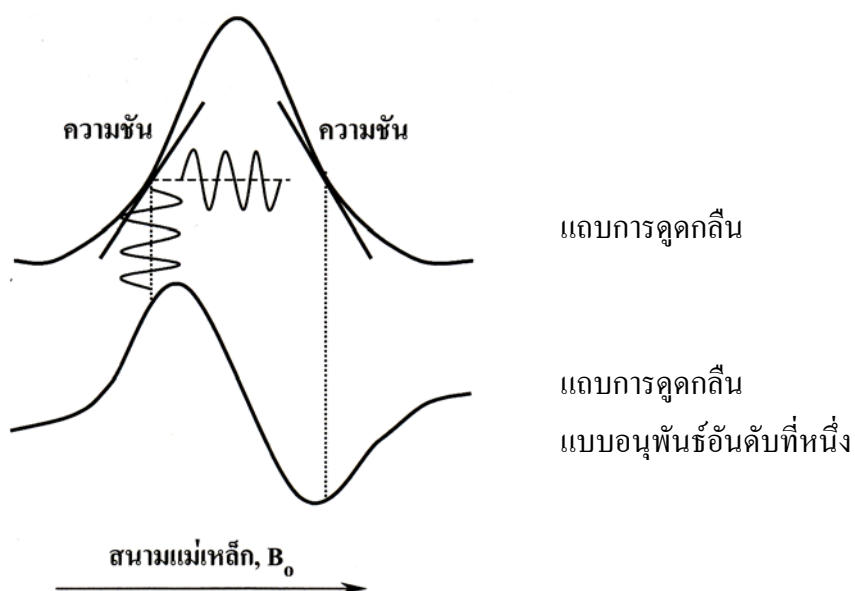


ภาพผนวกที่ จ8 ส่วนประกอบที่สำคัญของอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิดา (2547)

จากภาพผนวกที่ จ8 แหล่งกำเนิดคลื่นแสงไมโครเวฟเรียกว่า Klystron tube จะผลิตคลื่นไมโครเวฟผ่านไปยังอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นที่เป็นหลอดโลหะ (hollow-metal) อยู่ภายใต้สุญญากาศ (เพื่อลดความกว้างของ ESR สเปกตรัม) แล้วเข้าสู่ที่บรรจุสารตัวอย่าง (ภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างซึ่งอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ จะทำด้วยแก้วหรือ ควอตซ์) ภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างจะอยู่ระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็กมี digital multimeter ใช้สำหรับอ่านความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยทั่วไปแล้วจะให้ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟคงที่แล้วปรับเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กจนกระทั่งเกิดการเรโซแนนซ์ เครื่อง ESR สเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป จะใช้ความเข้มสนามแม่เหล็ก 0.3 T เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ที่พอดีกับช่วงความถี่ไมโครเวฟ 8-10 GHz (X-band) สำหรับตัวตรวจวัดนั้นประกอบด้วยตัวตรวจ

คลื่นไมโครเวฟที่เหลือเรียกว่า microwave diode หรือ microwave detector และตัวตรวจวัดการเกิดเรโซแนนซ์ที่เรียกว่า phase-sensitive detector เพื่อบันทึก ESR สเปกตรัมดังภาพผนวกที่ จ9



ภาพผนวกที่ จ9 สเปกตรัมอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

ที่มา: นิพนธ์ และ คณิตา (2547)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวกัญญา สุวรรณศิลป์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	(วท.บ.) ฟิลิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2547)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยนักวิจัย จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัย แห่งชาติ (พ.ศ.2550-2551) ทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการ ตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ.2551-2552)