

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์บางประเภท
ในประเทศไทยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2546

ลิขสิทธิ์เป็นของ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์บางประเภท
ในประเทศไทยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

เมษายน 2546

วรรณ ชูรักษ์. (2546). การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่
ในเซรามิกส์บางประเภทในประเทศไทยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.
ปริญญาโท กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: รองศาสตราจารย์อรุณีย์ อินทร ,
อาจารย์มานิชญ์ เสงี่ยมะ

ได้ศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์ประเภท
เครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง อิฐและปอร์ซเลน ในประเทศไทยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี
เอกซ์ พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเซรามิกส์เหล่านี้มีผลึกของแร่ควอตซ์ที่มีโครง
สร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเด่นชัดมาก จนทำให้การวิเคราะห์เฟสเชิงผลึกของแร่อื่นๆ ที่มี
ปริมาณน้อยในสารตัวอย่างบางชนิดทำได้ยากมาก ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการ
วิเคราะห์ จึงอาศัยเทคนิคการชะล้างสารตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกภายใต้เงื่อนไขต่างๆ กัน
ที่อุณหภูมิ 50°C เพื่อชะล้างธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแร่รองออกไป แล้วนำสารตัวอย่างหลัง
การชะล้างมาศึกษาในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์อีกครั้งหนึ่ง พร้อมกับนำสารละลายจากการ
ชะล้างไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอม ปรากฏว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
หลังการชะล้างมีเส้นรังสีเอกซ์ของผลึกแร่รองลดน้อยลง ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับผลการตรวจสอบ
ธาตุที่ชะล้างออกไป

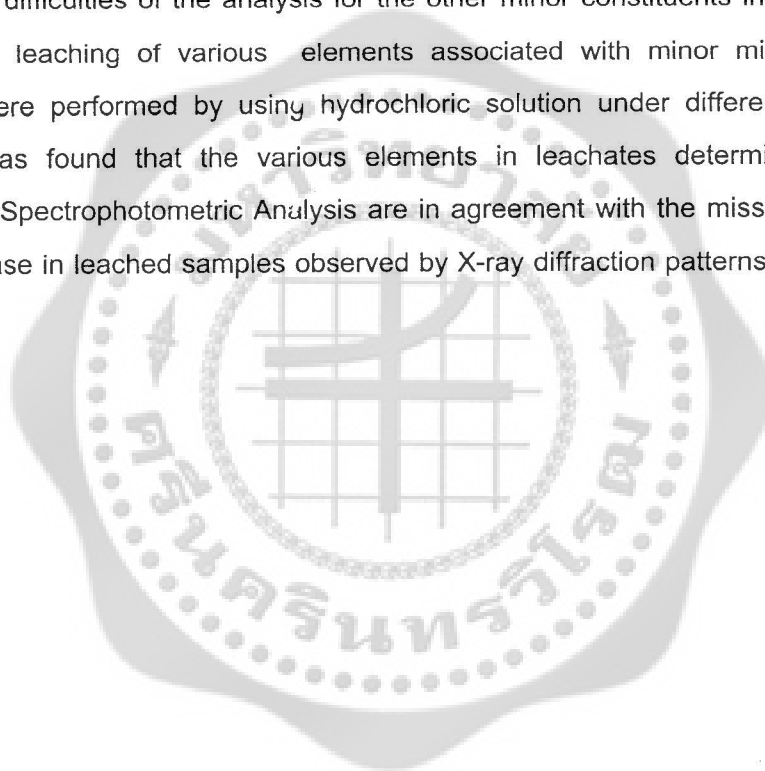
X-RAY DIFFRACTION STUDY MINERALS CRYSTALLINE PHASE COMPOSITIONS
ANALYSIS FOR SOME TYPES OF THAI CERAMICS



Presented in partial fulfillment of the requirements
For the Master of Education degree in Physics
at Srinakharinwirot University
April 2003

Wanna Churak. (2003). *X-ray Diffraction study Minerals Crystalline Phase Composition Analysis for some types of Thai Ceramics*. Master thesis, M.Ed. (Physics).
Bangkok: Graduate school, Srinakharinwirot University. Advisor Committee:
Assoc. Prof. Arunee Intasorn, Manoch Hengwattana

The minerals crystalline phase compositions of Thai potteries, tiles, bricks and porcelains were studied by X-ray diffraction technique. The X-ray diffraction patterns of these kinds of samples show the dominant pattern of hexagonal form of quartz which causes the difficulties of the analysis for the other minor constituents in some samples. Hence, the leaching of various elements associated with minor minerals of those samples were performed by using hydrochloric solution under different conditions at 50°C. It was found that the various elements in leachates determined by Atomic Absorption Spectrophotometric Analysis are in agreement with the missing of the minor mineral phase in leached samples observed by X-ray diffraction patterns.



ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์บางประเภท
ในประเทศไทยโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ของ
นางสาววรรณ ชูรักษ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพร หะวานนท์)
วันที่ เดือน พ.ศ.

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ อรุณย์ อินทศร)

.....กรรมการ
(อาจารย์ มาโนชญ์ เสงฆ์วัฒนะ)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข)

.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร. อมรมาศ กীরดีสิน)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทศร ประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ และอาจารย์มานิชญ์ เสงี่ยมะ กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขตลอดจนช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข และอาจารย์ ดร.อมรมาศ กิรติสิน ที่ได้ร่วมเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์และกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์นวลนาฏ จันทรเมฆา อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ได้อนุเคราะห์ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการดูดกลืนรังสีอะตอม

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ความเมตตาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอน้อมรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า จนสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงลงได้ด้วยดี

วรรณา ชูรักษ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
จุดมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎี.....	4
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3 วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	33
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	38
5 สรุปอภิปรายและข้อเสนอแนะ.....	127
สรุปผลการทดลอง.....	127
อภิปรายผลการทดลอง.....	127
ข้อเสนอแนะ.....	130
บรรณานุกรม.....	131
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	134

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ระบบผลึกและค่าคงตัวแลตทิซ	5
2 แผ่นกรองแสงเส้นสเปกตรัม $K\beta$ ($K\beta$ Filter) ที่เหมาะสมสำหรับเป่าโลหะชนิดต่าง.....	29
3 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่ควอตซ์	39
4 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เฟลด์สปาร์.....	42
5 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เคโอลิไนต์.....	44
6 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่แคลไซต์.....	46
7 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เฮมาไทต์.....	47
8 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่ลูมินาออกไซด์.....	48
9 ประเภทสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ได้จากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย.....	49
10 การวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย.....	50
11 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP1.....	53
12 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP2.....	55
13 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP3.....	57
14 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP4.....	59
15 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP5.....	61
16 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP6.....	63
17 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7.....	65
18 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST1.....	67
19 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2.....	69
20 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST3.....	71
21 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST4.....	73
22 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB1.....	75
23 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2.....	77
24 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB3.....	79
25 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB4.....	81
26 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SR.....	83

บัญชีตาราง(ต่อ)

[illegible]

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง

หน้า

41 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์ และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	113
42 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่ชะล้าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50° C เวลา 10 นาที	115
43 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่ชะล้าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50° C เวลา 10 นาที	117
44 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่ชะล้าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50° C เวลา 10 นาที	119
45 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่ชะล้าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50° C เวลา 10 นาที	121
46 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่ชะล้าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50° C เวลา 10 นาที	123
47 ข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่ชะล้าง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50° C เวลา 10 นาที	125
48 การวิเคราะห์สารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ถูกชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอม.....	126

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 จุดโครงผลึก.....	4
2 เซลล์หน่วยหนึ่งหน่วย.....	5
3 เซลล์หน่วย 14 แบบในบราวเส์แลตทิซ.....	6
4 การหาระนาบผลึกกรณีจุดตัดแกนอยู่ในทิศทางบวก.....	7
5 การหาระนาบผลึกกรณีจุดตัดแกนอยู่ในทิศทางลบ.....	7
6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์.....	20
7 อันดับการสะท้อนที่ 1 จากระนาบ (100).....	21
8 ความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์โพลาริเซชันที่มุมกระเจิงต่างๆ.....	24
9 หลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านข้าง.....	27
10 อุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องดิฟแฟกโตรมิเตอร์.....	28
11 ลักษณะและส่วนประกอบของหัววัดประกายแสง.....	30
12 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่ควอตซ์.....	39
13 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่เฟลด์สปาร์.....	41
14 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่เคโอลิไนต์.....	44
15 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่แคลไซต์.....	45
16 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่เฮมาไทต์.....	47
17 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่ลูมิโนอาอกไซด์.....	48
18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP1.....	52
19 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP2.....	54
20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP3.....	56
21 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP4.....	58
22 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP5.....	60
23 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP6.....	62
24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7.....	64
25 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST1.....	66
26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2.....	68
27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST3.....	70
28 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST4.....	72

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
29 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB1.....	74
30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2.....	76
31 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB3.....	78
32 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB4.....	80
33 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SR.....	82
34 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	84
35 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	86
36 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	88
37 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	90
38 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	92
39 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	95
40 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	97
41 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	99
42 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	101
43 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	103
44 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก.....	105

บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
45 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	107
46 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	109
47 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	110
48 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	112
49 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่ชะล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	114
50 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่ชะล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	116
51 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่ชะล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	118
52 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่ชะล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	120
53 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่ชะล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	122
54 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่ชะล้างด้วย กรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	124

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

เซรามิกส์ (Ceramics) เป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งมีกรรมวิธีการผลิตที่ต้องผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดส่วนใหญ่มาจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติบนเปลือกโลก ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะต้องมีส่วนประกอบของวัสดุประเภทอนินทรีย์และอโลหะ เซรามิกส์ที่ผลิตในประเทศไทยมีหลายประเภทด้วยกันซึ่งแต่ละประเภทจะผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งชนิดเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว ตัวอย่างเช่น เครื่องปั้นดินเผา (Pottery) วัสดุก่อสร้างที่เป็นดินเผา วัสดุทนไฟ (Refractory) ปอร์ซเลน (Porcelain) วัสดุขัดถู โลหะเคลือบแก้ว (Glass) เป็นต้น¹

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกส์จัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีอัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างสูงและมีแนวโน้มขยายตัวได้ดีในอนาคตเพราะผลิตภัณฑ์เซรามิกส์มีลักษณะการใช้ประโยชน์ที่กว้างขวาง ซึ่งอุตสาหกรรมเซรามิกส์ในประเทศไทยส่วนใหญ่จัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางกระจายอยู่ทั่วประเทศ มีเพียงส่วนน้อยที่เป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ซึ่งสามารถผลิตเซรามิกส์ชนิดเคลือบผิวและไม่เคลือบผิว ดังนั้นในการผลิตเซรามิกส์แต่ละประเภทจะมีวัตถุดิบที่แตกต่างกัน การศึกษาเกี่ยวกับเซรามิกส์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ แหล่งวัตถุดิบ การตกแต่งวัตถุดิบเพื่อให้มีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิต คุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุดิบ เช่น ส่วนประกอบทางเคมี สีนแร่ โครงสร้างผลึก การกระจายของอนุภาค สี และคุณสมบัติต่าง ๆ ระหว่างการเผาและหลังการเผา กระบวนการเผาเซรามิกส์แต่ละประเภทจะต้องผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิแตกต่างกันซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นภายในวัตถุดิบที่แตกต่างกันซึ่งถือว่าเป็นข้อมูลที่สำคัญ เพราะวัตถุดิบเหล่านี้เมื่อถูกเผาแล้วจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุดิบทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลทำให้เซรามิกส์แต่ละประเภทมีความแตกต่างกัน ผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซรามิกส์ที่ผ่านกระบวนการเผาจึงมีความประสงค์จะทำการศึกษาวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึก (Crystal Phase) ของแร่ในเซรามิกส์ที่ผลิตในประเทศไทย เนื่องจากเทคนิคการวิเคราะห์แร่สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)(XRD) เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (IR Spectroscopy)

¹ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). เซรามิกส์. หน้า 1

การละลายทางเคมีเชิงคัดเลือก (Selective chemical dissolution) การคำนวณเชิงปกติจากการวิเคราะห์ทางเคมี (Normative calculations from chemical analyses) การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential thermal analysis) การวิเคราะห์โดยน้ำหนักและอุณหภูมิเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermogravimetric analysis) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscopic analysis) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)^{1,2} ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ต่างกันไปขึ้นกับจุดประสงค์ของการศึกษา เช่น ส่วนประกอบทางเคมี การดูดและคายพลังงานความร้อน ความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออน โครงสร้างผลึก เป็นต้น ดังนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงจุดประสงค์ในการวิเคราะห์เพื่อเลือกวิธีการวิเคราะห์แร่ให้เหมาะสม

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของแร่แต่ละชนิดได้ดี เพราะแร่แต่ละชนิดจะมีลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางเคมีเฉพาะตัวมีรูปผลึกที่แน่นอน และสามารถวัดระยะห่างระหว่างอะตอมในระนาบต่าง ๆ ของโครงสร้างผลึกตลอดจนรู้ตำแหน่งของอะตอมหรือไอออนของธาตุต่าง ๆ ภายในผลึกได้อีกด้วย

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
2. เพื่อศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Pattern) ของแร่ต่าง ๆ ที่รวมกันอยู่อย่างซับซ้อนในผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ในประเทศไทยที่ให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ซับซ้อนยากต่อการวิเคราะห์

¹D. Minichelli. (1982). "The Quantitative Phase Analysis of Clay Minerals by X-ray Diffraction: Modern Aspects of Industrial Routine Control," in *Clay Minerals*. (17): 401-408

²A.K.M.E. Islam and E.G. Lotse. (1986). "Quantitative Mineralogical Analysis of some Bangladesh Soils with X-ray, Ion Exchange and Selective Dissolution Techniques," in *Clay Minerals*. (21): 31-42

ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษา ทดสอบ วิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของสารตัวอย่างมาตรฐานคือแร่ควอตซ์ (Quartz) แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) แร่แคลไซต์ (Calcite) แร่เฮมาไทต์ (Hematite) อลูมินาออกไซด์ (Alumina Oxide) โดยการเตรียมสารตัวอย่างที่มีแร่ชนิดเดียวและมีแร่ต่างๆ มาผสมกันเพื่อให้ได้เทคนิควิธีการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ไม่ทราบ (Unknown) แบบต่างๆ ประเภทผลิตภัณฑ์เซรามิกส์พวกเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง (Tile) อิฐ (Brick) และปอร์ซเลน (Porcelain) ที่ผลิตในประเทศไทย

ความสำคัญของงานวิจัย

ได้เทคนิคการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของสารตัวอย่างมาตรฐานคือแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่เคโอลิไนต์ แร่แคลไซต์ แร่เฮมาไทต์ อลูมินาออกไซด์ โดยการเตรียมสารตัวอย่างที่มีแร่ชนิดเดียวและมีแร่ต่าง ๆ ผสมกันตามสัดส่วนที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดความเชี่ยวชาญในการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างที่มีความซับซ้อนซึ่งยากต่อการวิเคราะห์และมีโอกาสวิเคราะห์ผิดพลาดได้ง่าย ทำให้สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ไม่ทราบแบบต่าง ๆ ต่อไปได้ถูกต้องน่าเชื่อถือและเป็นแนวทางในการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกธาตุต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

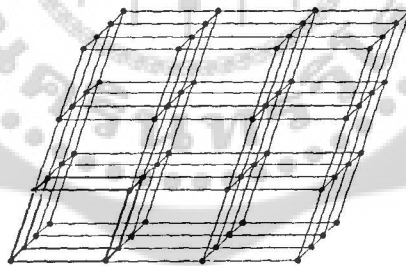
ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้แบ่งเป็นหัวข้อที่สำคัญดังนี้

1. ระบบผลึก
2. แร่วิทยา
3. ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์
4. หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
5. ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
6. เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

1. ระบบผลึก (Crystal Systems)

ในการศึกษาเกี่ยวกับผลึกนิยมใช้จุดแทนอะตอมหรือกลุ่มอะตอมที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบใน 3 มิติ ซึ่งจุดเหล่านี้เรียกว่า จุดโครงผลึกหรือจุดแลตทิซ (Lattice point) ดังภาพประกอบ 1

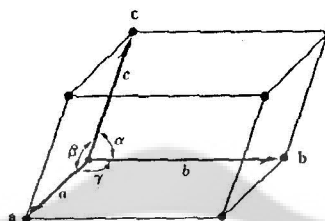


ภาพประกอบ 1 แสดงจุดโครงผลึก

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. p. 30. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

ฉะนั้นเมื่อให้ความหมายของผลึกจะได้ว่าผลึกคือแลตทิซที่มีอะตอมเข้าไปอยู่อย่างสม่ำเสมอในรูปแบบใดแบบหนึ่งซึ่งบางครั้งเรียกว่ากลุ่มของเซลล์โดยแต่ละเซลล์ที่มีลักษณะเหมือนกันทั้งรูปร่าง ขนาด และการจัดเรียงตัวซึ่งสามารถแทนทุกๆ เซลล์ได้

โดยทั่วไปเรียกแต่ละเซลล์หนึ่งว่า เซลล์หน่วย (Unit cell) ในการบอกรูปร่างและขนาดของหนึ่งเซลล์นิยมเขียนด้วยเวกเตอร์ $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ โดยมีทั้งขนาดและทิศทาง เรียกว่าแกนผลึก ซึ่งความยาวของ $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ คือ a, b, c โดยความยาวแกนของเซลล์หน่วยจะอยู่ในแกน x, y, z ตามลำดับ ส่วนมุม α, β, γ คือมุมระหว่างแกนผลึก b กับ c a กับ c และ a กับ b ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 2 สำหรับค่าความยาวแกนผลึกและมุมระหว่างแกนผลึก เรียกว่า ค่าคงตัวแลตทิซ (Lattice constant)



ภาพประกอบ 2 แสดงเซลล์หน่วย 1 หน่วย

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. p. 30. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

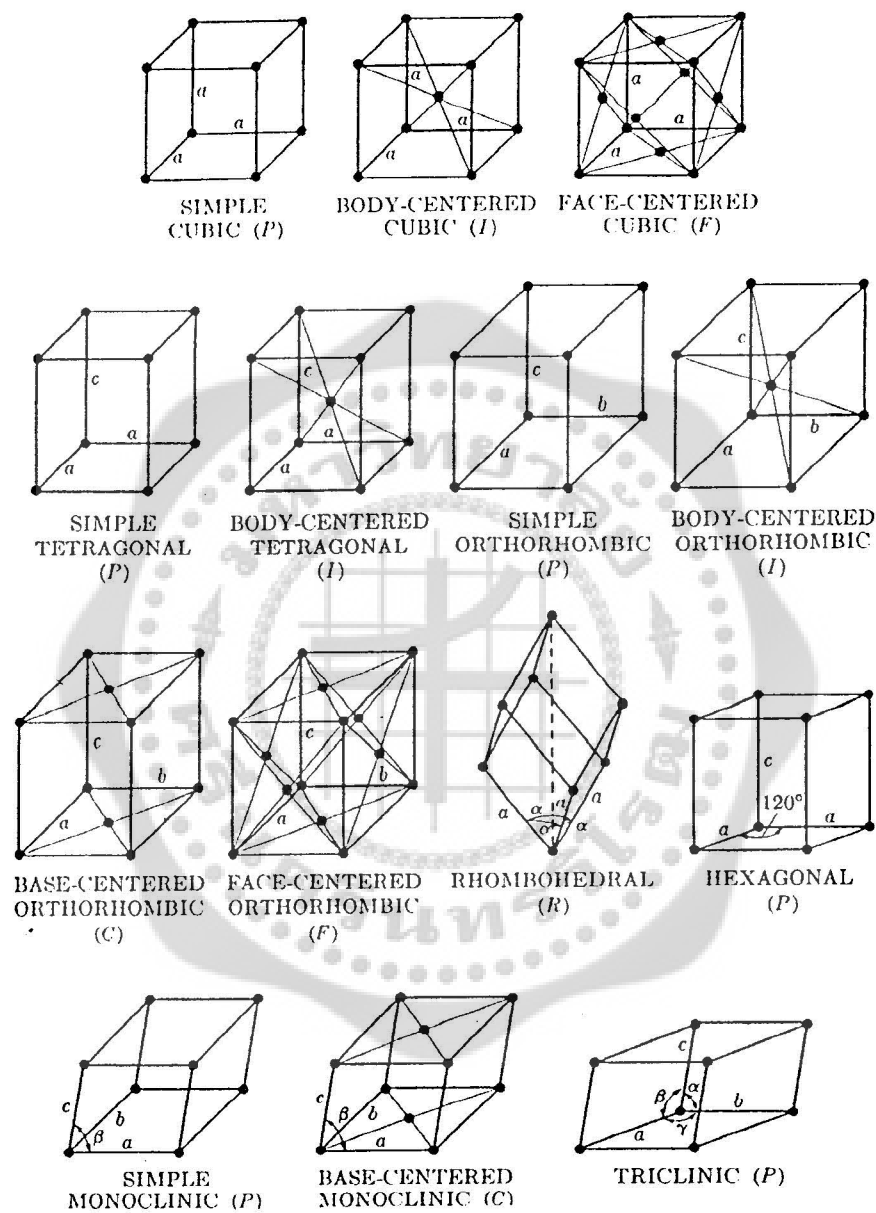
จะเห็นว่าในหนึ่งเซลล์ของผลึกมีพารามิเตอร์ 6 ค่าคือความยาวแกนผลึก a, b, c และมุมระหว่างแกนผลึก α, β, γ ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้ใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ในการแบ่งผลึกออกเป็น 7 ระบบ ดังตาราง 1

ตาราง 1 ระบบผลึกและค่าคงตัวแลตทิซ

ระบบผลึก	ค่าคงตัวแลตทิซ	
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma = 120^\circ$
Rhombohedral (Trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. p. 31. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

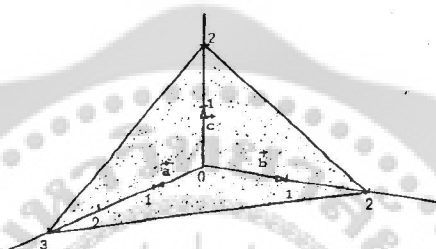
ในแต่ละระบบผลึก บราวเส์ (Bravais) ได้แบ่งเป็นโครงผลึกย่อยทั้งหมด 14 แบบซึ่งเรียกโครงผลึกย่อยเหล่านี้ว่า บราวเส์แลตทิซ (Bravais lattices) แสดงดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 เซลล์หน่วย 14 แบบในบราวเส์แลตทิซ

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. p. 32. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

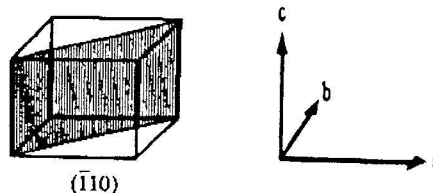
จะเห็นได้ว่าในหนึ่งเซลล์หน่วยของผลึกจะประกอบด้วยระนาบหลายระนาบซึ่งอยู่ในแนวใดๆ ที่ผ่านจุดโครงผลึกก็ได้ ในการเรียกชื่อระนาบผลึกใน 3 มิติจะใช้เลขจำนวนเต็ม 3 จำนวนแทน โดยแต่ละจำนวนต้องสอดคล้องกับแกนผลึกแต่ละแกน ซึ่งการให้ตัวเลขแทนระนาบผลึกจะพิจารณาจุดตัดโครงผลึกจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดเริ่มต้นและวัดความยาวตามแกนทั้ง 3 แกนจากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ระนาบผลึกตัดแกนแล้วนำความยาวในแต่ละแกนมาคำนวณเป็นส่วนกลับ (Reciprocal) ของความยาวแกนผลึกที่สอดคล้องกัน ค่าส่วนกลับที่ได้จะใช้แทนกลุ่มของระนาบผลึกซึ่งเรียกค่านี้ว่า ดัชนี (Indices) หรือดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ใช้สัญลักษณ์ (hkl) ดังตัวอย่างภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 แสดงการหาระนาบผลึกกรณีจุดตัดแกนอยู่ในทิศทางบวก

ที่มา: สำเนา จงจิตต์. (2528). เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์ 461 (ฟิสิกส์สถานะของแข็งเบื้องต้น). หน้า 20. กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร.

ระนาบตัดแกน $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ ที่ $3a$ $2b$ $2c$ ปริมาณส่วนกลับของเลขจำนวนเหล่านี้เป็น $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ เลขจำนวนเต็มทีน้อยที่สุดที่มีอัตราส่วนเดียวกันเป็น 2 3 3 ดังนั้นเลขดัชนีของระนาบคือ (233) หากจุดตัดแกนอยู่ในทิศทางลบจะใส่เครื่องหมาย “—” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนเลขดังกล่าว ดังภาพประกอบ 5 ซึ่งเลขดัชนีของระนาบคือ ($\bar{1}10$)



ภาพประกอบ 5 แสดงการหาระนาบผลึกกรณีจุดตัดแกนอยู่ในทิศทางลบ

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. p. 39. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

2. แร่วิทยา (Mineralogy)

แร่วิทยาเป็นสาขาหนึ่งทางวิทยาศาสตร์ด้านธรณีวิทยาซึ่งอธิบายเกี่ยวกับหน่วยเล็กๆ ที่เป็นส่วนประกอบของหินที่เกิดขึ้นในโลก ซึ่งหน่วยเล็กๆ นี้เรียกว่า “แร่” (Minerals)

แร่ หมายถึง สารอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติซึ่งแร่แต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบเฉพาะตัว มีสูตรทางเคมีและลักษณะทางกายภาพที่แน่นอนซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการจำกััดหรือจำแนกชนิดของแร่ได้

หลักในการจำแนกประเภทแร่ คือ

1. ลักษณะทางกายภาพของแร่ ได้แก่ สี ความแข็ง ความวาว ความถ่วงจำเพาะ รูปแบบโครงสร้างผลึก การเปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่ชนิดอื่น

2. คุณสมบัติทางด้านเคมีของแร่ ซึ่งแร่จะประกอบด้วยธาตุเพียงหนึ่งธาตุหรือธาตุตั้งแต่ 2 ธาตุขึ้นไป ฉะนั้นในการศึกษาด้านสมบัติทางเคมีของแร่แต่ละชนิดจำเป็นต้องศึกษาส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่ประกอบเป็นแร่ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเรียกชื่อชนิดแร่ด้วย

เพื่อให้่ายต่อการศึกษา James Dwight Dana ได้จำแนกระบบของแร่วิทยา (System of Mineralogy) ตามส่วนประกอบทางเคมีไว้ทั้งหมด 10 กลุ่ม ดังนี้

1. ธาตุ (Elements) เป็นธาตุบริสุทธิ์เพียงธาตุเดียวซึ่งส่วนใหญ่เป็นธาตุโลหะที่มีค่า เช่น ทอง (Au) ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) เพชร (C) เป็นต้น

2. ซัลไฟด์ (Sulfides) เทลลูไรด์ (Tellurides) และ อาร์เซนไนด์ (Arsenides) แร่กลุ่มนี้มีไอออนลบเป็น ซัลไฟด์ (S^{2-}) เทลลูไรด์ (Te^{2-}) และ อาร์เซนไนด์ (As^{3-}) แร่กลุ่มนี้มักเป็นโลหะ เช่น ไพไรต์ (Pyrite FeS_2) กาลีนนา (Galena PbS) เป็นต้น

3. ซัลโฟซอลต์ (Sulfosalts) แร่กลุ่มนี้มีส่วนประกอบของเกลือซึ่งส่วนใหญ่แร่กลุ่มนี้มีไอออนลบเป็นซัลเฟอร์ (S^{2-}) ซึ่งต่างจากแร่กลุ่มซัลไฟด์ตรงที่มีธาตุกึ่งโลหะเกิดอยู่ในตำแหน่งโลหะภายในโครงสร้างผลึกแร่บางครั้งจัดได้ว่าเป็นแร่ซัลไฟด์ซับซ้อน เช่น ไพราไรต์ไรต์ (Pyrargyrite Ag_3SbS_3) เอนนาร์ไต์ (Enargite Cu_3AsS_4) เป็นต้น

4. ออกไซด์ (Oxides) และ ไฮดรอกไซด์ (Hydroxides) แร่กลุ่มนี้มีไอออนลบเป็นออกไซด์ (O^{2-}) และไฮดรอกไซด์ (OH^{-1}) เช่น แร่เฮมาไทต์ (Hematite Fe_2O_3) แร่แมกนีไทต์ (Magnetite Fe_3O_4) เป็นต้น

5. ฮาไลด์ (Halides) แร่กลุ่มนี้มีไอออนลบเป็นฟลูออไรด์ (F^{-1}) คลอไรด์ (Cl^{-1}) บ्रोไมด์ (Br^{-1}) และไอโอดีน (I^{-1}) แร่กลุ่มนี้บางตัวละลายน้ำได้ซึ่งอาจมีรสเค็มหรือขม เช่น ฟลูออไรต์ (Fluorite CaF_2) ซิลไต์ (Sylvite KCl) เป็นต้น

6. คาร์บอเนต (Carbonates) ไนเตรท (Nitrates) และบอเรต (Borates) แร่กลุ่มนี้มีไอออนลบเป็นคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ไนเตรท (NO_3^{-}) และบอเรต ($B_4O_7^{2-}$ หรือ $(B_5O_9)^{3-}$ หรือ $(B_5O)^{4-}$) เช่น แคลไซต์ (Calcite $CaCO_3$) โดโลไมต์ (Dolomite $MgCa(CO_3)_2$) เป็นต้น

7. ซัลเฟต (Sulfates) แร่กลุ่มนี้มีอ็อกไซด์เป็นซัลเฟต (SO_4)⁻² แร่ชนิดนี้บางตัวละลายน้ำได้ เช่น ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) แบไรต์ (Barite BaSO_4) เป็นต้น

8. โครเมต (Chromates) ฟอสเฟต (Phosphates) อาร์ซีเนต (Arsenates) และวานาเดต (Vanadates) แร่กลุ่มนี้มีอ็อกไซด์เป็นโครเมต (CrO_4)⁻² ฟอสเฟต (PO_4)⁻³ อาร์ซีเนต (AsO_4)⁻³ และวานาเดต (VO_4)⁻³ เช่น โครคอยต์ (Crocoite PbCrO_4) อะพาไทต์ (Apatite $\text{Ca}_5(\text{F,Cl,OH})(\text{PO}_4)_3$) เป็นต้น

9. ทังสเตต (Tungstates) และโมลิบดีเตต (Molybdates) แร่กลุ่มนี้มีอ็อกไซด์เป็นทังสเตต (WO_4)⁻² และโมลิบดีเตต (MoO_4)⁻² เช่น วูลแฟรมไมต์ [Wolframite (Fe,Mn) WO_4] วูลฟีไนต์ [Wulfenite $\text{Pb}(\text{MoO}_4)$] เป็นต้น

10. ซิลิเกต (Silicate) เป็นแร่ประกอบหินที่มีซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด แร่กลุ่มนี้มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ได้ 6 แบบ คือ

10.1 นีโอซิลิเกต (Nesosilicate) หรือ ซิลิเกตแบบตั้งฉาก (Orthosilicates) เป็นกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้าง (SiO_4)⁻⁴ ตัวอย่าง แร่โอลิวีน [Olivine (Mg,Fe)₂ SiO_4] เซอร์คอน [Zircon $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$]

10.2 โซโรซิลิเกต (Sorosilicates) เป็นกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้าง (Si_2O_7)⁻⁶ ตัวอย่าง แร่เฮมิมอร์ไฟต์ (Hemimorphite $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$)

10.3 ไซโคลซิลิเกต (Cyclosilicates) หรือ ซิลิเกตแบบวงแหวน (Ring Silicates) เป็นกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้าง (Si_xO_{3x}) เช่น (Si_3O_9)⁻⁶ หรือ (Si_4O_{12})⁻⁸ เป็นต้น ตัวอย่าง แร่เบอริล [Beryl $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$]

10.4 ไอโนซิลิเกต (Inosilicates) หรือ ซิลิเกตแบบลูกโซ่ (Chain Silicates) เป็นกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้าง (Si_2O_6)⁻⁴ หรือ (Si_4O_{11})⁻⁶ ตัวอย่าง แร่เอนสทาไทต์ [Enstatite $\text{Mg}_2(\text{Si}_2\text{O}_6)$] ทรีโมไลต์ [Tremolite $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$]

10.5 ฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicates) หรือ ซิลิเกตแบบแผ่น (Sheet Silicates) เป็นกลุ่มแร่ที่มีการจับตัวกันเป็นแผ่นมีสูตรโครงสร้าง (Si_2O_5)⁻² ตัวอย่าง แร่ทัลก์ [Talc $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$]

10.6 เทกโทซิลิเกต (Tectosilicates) หรือ ซิลิเกตแบบโครงข่าย (Framework Silicates) เป็นกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้าง (SiO_2) ตัวอย่าง แร่ควอตซ์ (Quartz SiO_2) หรือที่เรียกว่าหินเขี้ยวหนุมาน

โดยทั่วไปแร่ในดินจะประกอบด้วยแร่หลายกลุ่มด้วยกัน ได้แก่ แร่กลุ่มออกไซด์ แร่กลุ่มคาร์บอเนต แร่กลุ่มซัลเฟต แร่กลุ่มซิลิเกต ซึ่งแร่แต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยแร่ชนิดต่างๆ มากมาย โดยจะกล่าวถึงชนิดแร่แต่ละกลุ่มที่พบมากที่สุดและมีความสำคัญ ดังนี้

2.1 แร่กลุ่มออกไซด์

(i) แร่เฮมาไทต์ (Hematite)

โครงสร้างผลึก : เฮกซะโกนอล (Hexagonal)

ส่วนประกอบทางเคมี : Fe_2O_3 ละลายได้ช้าๆ ในกรดเกลือเข้มข้นร้อน สารละลายมีสีเหลืองปนแดง

ลักษณะทางกายภาพ : โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแผ่นบางน้อยๆ ถึงหนามาก และมีเนื้อแน่น ชนิดที่บางมากขนาดแผ่นไม้กาจะมีสีเทาแบบโลหะเหล็ก วาวแบบโลหะเรียกว่า สเปคูลาไรต์ (Specularite) ส่วนใหญ่แร่เฮมาไทต์มีสีแดงเลือดหมูเข้มจนดำหรือเทาแบบเหล็ก สีผงละเอียดสีแดงหมู มีลักษณะโปร่งใส วาวคล้ายแก้วและลื่นเหมือนทาน้ำมันไว้ ความแข็ง 5.5 – 6 ความถ่วงจำเพาะ 5.3 ละลายในกรดเกลือเข้มข้นที่อุณหภูมิสูง

การกำเนิด : แร่เฮมาไทต์ เกิดจากการทับถมและการเปลี่ยนแปลงของหินอัคนี (Igneous rock) และเกิดจากการแปรสภาพของหินในธรรมชาติ

อิทธิพลความร้อน : แร่นี้มีการก่อผลึกสมบูรณ์เมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 550°C และจะสลายตัวเป็นฟลักซ์ (Flux) ที่อุณหภูมิ 900°C

ประโยชน์: เป็นสินแร่ของเหล็กใช้ทำสีย้อม ผงขัดมัน โดยเฉพาะในการขัดเลนส์หรือแว่นตา

(ii) แร่แมกนีไทต์ (Magnetite)

โครงสร้างผลึก : ไอโซเมตริก (Isometric) หรือ คิวบิก (Cubic)

ส่วนประกอบทางเคมี : Fe_3O_4 หรือ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ มักมีสังกะสี แมงกานีส แมกนีเซียมแทนที่เหล็ก ทำให้มีความบริสุทธิ์น้อย

ลักษณะทางกายภาพ : โดยทั่วไปจะมีสีดำ ค่อนข้างสีน้ำตาลดำ เป็นพวกโลหะ ทึบแสง ไม่สามารถงอได้ ความแข็ง 5.5-6.5 ความถ่วงจำเพาะ 5.2 ไม่หลอมละลาย

การกำเนิด : เป็นแร่ที่มีความสมบูรณ์ในธรรมชาติและมีอย่างกว้างขวาง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินอัคนี และการทับถมกันของแร่โลหะ

อิทธิพลความร้อน : โดยทั่วไปจะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนสูงกว่า 550°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่เฮมาไทต์ ไลโมนาइट (Limonite) ได้

ประโยชน์ : เป็นสินแร่ของเหล็ก

2.2. แร่กลุ่มคาร์บอเนต

(i) แร่แคลไซต์ (Calcite)

โครงสร้างผลึก : เฮกซะโกนอล (Hexagonal)

ส่วนประกอบทางเคมี : CaCO_3 อาจจะมี แมงกานีส เหล็ก สังกะสี แมกนีเซียม แบเรียม สทรอนเซียม และตะกั่วแทนที่แคลเซียม

ลักษณะทางกายภาพ : แร่แคลไซต์ มีหลายสีขึ้นอยู่กับ การเกิดหรือสารเจือปน ความวาวคล้ายแก้ว มีลักษณะโปร่งใส ไปจนถึงกระทั่งโปร่งแสง เพราะ ความแข็ง 3 ความถ่วงจำเพาะ 2.7 สีผงละเอียดมีสีขาวหรือสีเทา ไม่ละลายในน้ำแต่ทำปฏิกิริยากับกรดเป็นฟองฟู

การกำเนิด : ส่วนใหญ่เป็นพวกหินอัลคาลิก (Alkaline rock) เกิดจากการทับถมของหินในน้ำร้อน (Hydrothermal) การทับถมของใบไม้ การทับถมกันในถ้ำหินปูน หินชั้น หินแปร ฟอสซิล (Fossils) โครงกระดูก และสารอินทรีย์ โดยทั่วไปแร่นี้มีการก่อผลึกเมื่อได้รับความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม

อิทธิพลความร้อน : การก่อผลึกสมบูรณ์เมื่อได้รับความร้อนตั้งแต่ 970°C

ประโยชน์ : ใช้ทำซีเมนต์ ปูนขาว อุปกรณ์เกี่ยวกับแสง โซลาร์ ซีลัม หินขัด

(ii) แร่อะราโกไนต์ (Aragonite)

โครงสร้างผลึก : ออโธโรมบิก (Orthorhombic)

ส่วนประกอบทางเคมี : CaCO_3 มักมีสทรอนเซียม ตะกั่วและสังกะสีแทนที่แคลเซียม

ลักษณะทางกายภาพ : โดยทั่วไปแร่อะราโกไนต์ส่วนใหญ่ไม่มีสี แต่บางครั้งอาจจะมีสีขาว สีเทา สีเหลือง สีน้ำเงิน สีม่วงหรือสีแดง ขึ้นกับสิ่งเจือปน วาวคล้ายแก้วหรือเรซิน โปร่งแสง เพราะ มีความแข็ง 3.5 – 4 ความถ่วงจำเพาะ 2.9 ไม่สามารถละลายในน้ำ แต่ละลายได้ง่ายในกรดเกลือเจือจางและมีฟองฟู

การกำเนิด : ส่วนใหญ่แร่นี้จะพบที่อุณหภูมิต่ำซึ่งมีน้ำรวมอยู่ด้วย พบบริเวณที่มีน้ำพุร้อนซึ่งเกิดร่วมในชั้นของแร่บิสมัทและแร่เหล็ก หรือในเปลือกหอย

อิทธิพลความร้อน : โดยทั่วไปจะเป็นผลึกสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำหากเผาในอากาศที่อุณหภูมิ 400°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่แคลไซต์

ประโยชน์ : ใช้ทำซีเมนต์ อุปกรณ์เกี่ยวกับแสง โซลาร์ ปูน ซีลัม

(iii) แร่โดโลไมต์ (Dolomite)

โครงสร้างผลึก : เฮกซะโกนอล (Hexagonal)

ส่วนประกอบทางเคมี : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ มีเหล็ก แมงกานีส โคบอล ตะกั่ว

สังกะสี แทนที่แมกนีเซียม เมื่อเหล็กแทนที่แมกนีเซียมเรียกว่าแอนเคไรต์ (Ankerite)

ลักษณะทางกายภาพ : โดยทั่วไปไม่มีสี หากบริสุทธิ์จะมีสีขาว โปร่งแสงเมื่อมีสิ่งเจือปนจะมีสีเทา เขียว เหลือง น้ำตาล ชมพู แดง วาวคล้ายแก้ว โปร่งใสและโปร่งแสง แร่ที่พบหลังการเปลี่ยนแปลงของแร่โดโลไมต์ ได้แก่ แคลไซต์ ควอตซ์ โลมอไนต์ ไฟไรต์ และซิเดอไรต์ (Siderite) แร่โดโลไมต์จะเปราะ มีความแข็ง 3.5 ความถ่วงจำเพาะ 2.85 ไม่ละลายในน้ำ

การกำเนิด : ส่วนใหญ่จะพบแร่โดโลไมต์ในแผ่นหิน ซึ่งเกิดจากสายน้ำร้อน (Hydrothermal veins) พบในหินปูนโดโลไมต์ที่เป็นก้อนขนาดใหญ่ ซึ่งเข้าใจกันว่าเป็นการกำเนิดแบบทุติยภูมิซึ่งเกิดจากการแทนที่ด้วยแมกนีเซียมหรือเกิดร่วมในสายแร่ตะกั่วหรือสังกะสี ซึ่งตัดผ่านหินปูน

อิทธิพลความร้อน : โดยทั่วไปเป็นผลึกสมบูรณ์

ประโยชน์ : ใช้ทำหินก่อสร้าง หินประดับ ปูนซีเมนต์บางชนิด หากมีแมกนีเซียมจะใช้ในงานวัสดุทนความร้อน (Refractories) ในเตาถลุงเหล็ก

2.3 แร่กลุ่มซัลเฟต แร่ที่พบบ่อยคือ

(i) แร่ยิปซัม (Gypsum)

โครงสร้างผลึก : โมโนคลีนิก (Monoclinic)

ส่วนประกอบทางเคมี : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีสิ่งเจือปนเล็กน้อย

ลักษณะทางกายภาพ : โดยทั่วไปแร่ชนิดนี้มีสีขาว สีเทา สีเหลือง สีน้ำตาล หรือไม่มีสี วาวคล้ายแก้ว โปร่งแสง เป็นแผ่นบางงอได้ มีความแข็ง 2 ความถ่วงจำเพาะ 2.3

การกำเนิด : ส่วนใหญ่เกิดจากแร่ซัลเฟต เมื่อรวมตัวกับเบสจะขยายตัวมาก มีความบาง ซึ่งจะเกิดควบคู่กับการทับถมกันของหินปูน (Limestone) หินดินดาน (Shales) และเกลือ การก่อรูปผลึกเกิดจากการระเหย (Hydration) ของหินชั้นและแร่แอนไฮไดรต์ (Anhydrite) แร่นี้สามารถรวมกับแร่อื่นๆได้ เช่น ไฟไรต์ ฮาลาइट (Halite) แร่แอนไฮไดรต์ แคลไซต์ โดโลไมต์ อะราโกไนต์ ซัลเฟอร์ (Sulfur) และควอตซ์ เป็นต้น

ประโยชน์ : ใช้ทำปูนปลาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พวกฟลักซ์ในแก้ว ปอร์ซเลนและอุตสาหกรรมสิ่งก่อสร้าง

2.4 แร่กลุ่มซิลิเกต

(i) แร่ดินเหนียว (Clay Mineral) โดยทั่วไปมีขนาดเล็กมากกว่า 2 ไมโครเมตร และมีลักษณะทางกายภาพเฉพาะ แร่ดินเหนียวบริสุทธิ์จะมีสีขาว แต่เนื่องจากมีสิ่งเจือปนจึงทำให้มีสีบ้างเล็กน้อย จะนุ่มเมื่อถูกน้ำ มีความแข็ง 1.5-2.5 ความถ่วงจำเพาะ 2.5-2.7 และหลอมละลายได้ยาก

แร่ดินเหนียวจัดเป็นพวกไฮดรอลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous Aluminum Silicates) ประกอบด้วยอลูมินา (Al_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) และน้ำ (H_2O) ในบางครั้งอาจมีแมกนีเซียม เหล็ก แทนที่อลูมิเนียม เนื่องจากแร่ดินเหนียวมีความละเอียดมาก และมีโครงสร้างเฉพาะ ในการวิเคราะห์ที่ถูกต้องทั้งลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีจำเป็นต้องวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการวิเคราะห์อนุกรมเคมีเชิงอนุพันธ์ โดยทั่วไปแร่ดินเหนียวจะมีแร่อื่นเจือปนอยู่ ได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่กลุ่มคาร์บอเนต แร่กลุ่มไมกา พวกอัลคาไลและอัลคาไลเอิร์ท แร่ดินเหนียวที่พบบ่อยคือ

(a) แร่ดินขาว (Kaolin mineral) หรือ แร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite)

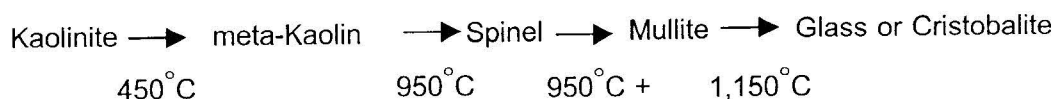
โครงสร้างผลึก : โมโนคลินิก (Monoclinic)

ส่วนประกอบทางเคมี : $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$

ลักษณะทางกายภาพ : มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหรือเป็นรูปหกเหลี่ยม มีขนาดเล็กเป็นแผ่นบาง โดยปกติแร่ดินขาวจะมีสีขาว หรือขาวคล้ำๆ สีจะเปลี่ยนไปเมื่อมีสิ่งเจือปน มีลักษณะทึบแสง มีความแข็ง 2 แร่ดินขาวเมื่อเผาด้วยความร้อนสูงจะหดตัวมาก

การกำเนิด : แร่ดินขาวจัดเป็นแร่ดินที่พบบ่อยที่สุดประกอบอยู่ในดินขาวหรือดินเหนียว เกิดจากการชะล้างด้วยน้ำหรือการชะล้างด้วยน้ำร้อน มีส่วนผสมของอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminum Silicate) โดยเฉพาะหินฟันม้า แร่ดินขาวมีขนาดอนุภาค 0.05 ไมโครเมตร โดยทั่วไปเกิดจากการสลายของแร่พวกอลูมิเนียมซิลิเกตต่างๆ โดยเฉพาะหินฟันม้า และการสลายตัวของหินซึ่งต่อมาจะฝังเป็นเนื้อดินซึ่งถูกพัดพาไปกับน้ำ พบในหินฟันม้า หินแกรนิต หินสเปกมาไทต์

อิทธิพลความร้อน : แร่เคโอลิไนต์ถูกเผาอุณหภูมิ 450°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่เมตาเกอลิน (Meta-Kaolin) ถ้าได้รับความร้อน 950°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่สปิเนล (Spinel) ขณะเดียวกันก็จะแตกตัวไปเป็นผลึกแรมัลไลต์ (Mullite) หากได้รับความร้อนสูงกว่า 980°C จะทำให้ผลึกของแรมัลไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อได้รับความร้อน $1,150^\circ\text{C}$ จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นแก้วซิลิกาและบางส่วนจะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่คริสโตบาลไลต์ (Cristobalite) ซึ่งสามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



ประโยชน์ : ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมประเภทอิฐ อิฐปูพื้น กระเบื้อง ภาชนะเครื่องเคลือบดินเผา อุตสาหกรรมยาง และวัสดุทนไฟ

(ii) แร่มัลไลต์ (Mullite)

โครงสร้างผลึก : ออโรรมบิก (Orthorhombic)

ส่วนประกอบทางเคมี : $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$

ลักษณะทางกายภาพ : สีขาว

การกำเนิด : เป็นแร่ที่เกิดจากการหลอมตัวของอลูมินาและซิลิกาเมื่อได้รับความร้อน 950°C ซึ่งส่วนใหญ่จะได้อาจจากการหลอมตัวของแร่ดินเหนียวไฮดรอกซอลูมินัมซิลิเกต เช่น แร่เคโอลิไนต์ แร่โคยาไนต์ (Kyanite) เป็นต้น

(iii) แร่ควอตซ์ (Quartz)

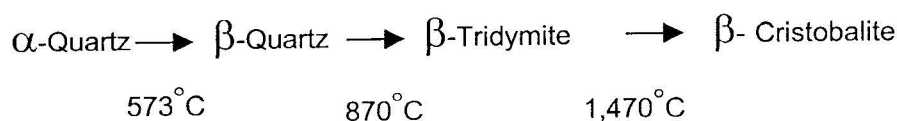
โครงสร้างผลึก : เฮกซะโกนอล (Hexagonal)

ส่วนประกอบทางเคมี : SiO_2

ลักษณะทางกายภาพ : ส่วนใหญ่ไม่มีสีอาจมีสีขาวและมีสีจางเมื่อถูกความร้อน วาวเป็นเงาคล้ายแก้ว ไม่มีลวดลาย มีเนื้อโปร่งใสถึงโปร่งแสง เปราะ มีความแข็ง 7 ความถ่วงจำเพาะ 2.65 มีจุดหลอมตัว $1,725^{\circ}\text{C}$ ละลายได้ในกรดเกลือ

การกำเนิด : เป็นสารประกอบของซิลิกาที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความบริสุทธิ์มากกว่าวัตถุดิบชนิดอื่น มีลักษณะเป็นก้อนเกิดจากการเปลี่ยนแปลงและการตกตะกอนของหิน บริสุทธิ์ แข็งแกร่งและคมมาก แร่นี้จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของหินตะกอนประเภท หินทรายและหินแปร สำหรับในดินแร่จะเป็นองค์ประกอบของอนุภาคดินขนาดดินทรายและดินตะกอน เป็นแร่ที่ทนต่อการสลายมาก

อิทธิพลความร้อน : แร่ควอตซ์มีการก่อผลึก 2 รูปแบบคือ α -Quartz และ β -Quartz ซึ่งเกิดเมื่อได้รับความร้อนแตกต่างกัน คือ α -Quartz มีการก่อผลึกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 573°C และ β -Quartz มีการก่อผลึกที่อุณหภูมิระหว่าง 573°C - 870°C เมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า 870°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่ไทรไต์ไมต์ (Tridymite) และถ้าได้รับความร้อน $1,470^{\circ}\text{C}$ จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ปฏิกริยา ดังนี้



ประโยชน์ : ทำแก้ว สารกักความร้อน ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์

(iv) แร่ไทรดีไมต์ (Tridymite)

โครงสร้างผลึก : ออโรธอมบิก (Orthorhombic)

ส่วนประกอบทางเคมี : SiO_2

ลักษณะทางกายภาพ : มีสีขาว วาวคล้ายแก้วหรือไข่มุก โปร่งแสง มีความแข็ง 7 ความถ่วงจำเพาะ 2.28-2.33

การกำเนิด : แร่ไทรดีไมต์เป็นสารประกอบซิลิกาโดยทั่วไปการก่อผลึกสามารถผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิ 117°C และ 163°C ที่อุณหภูมิต่ำการก่อผลึกเป็น α -Tridymite โครงสร้างผลึกแบบออโรธอมบิก และที่อุณหภูมิสูงการก่อผลึกเป็น β -Tridymite โครงสร้างผลึกแบบออโรธอมบิก หากได้รับความร้อน 870°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกที่สมบูรณ์ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกแบบออโรธอมบิก

(v) แร่คริสโตบาไลต์ (Cristobalite)

โครงสร้างผลึก : เตตระโกนอล (Tetragonal)

ส่วนประกอบทางเคมี : SiO_2

ลักษณะทางกายภาพ : มีสีขาว ความวาวคล้ายแก้วหรือไข่มุก มีความโปร่งแสง ความแข็ง 7 ความถ่วงจำเพาะ 2.28-2.33

การกำเนิด : แร่คริสโตบาไลต์เป็นสารประกอบซิลิกาโดยทั่วไปการก่อผลึกสามารถผันกลับได้ในช่วงอุณหภูมิ 197°C และ 275°C ที่อุณหภูมิต่ำการก่อผลึกเป็น α -Cristobalite โครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลและที่อุณหภูมิสูงการก่อผลึกเป็น β -Cristobalite โครงสร้างผลึกแบบคิวบิก หากได้รับที่อุณหภูมิ $1,150^{\circ}\text{C}$ จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกที่สมบูรณ์ซึ่งจะมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล

(vi) แร่เฟลด์สปาร์

เป็นสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตของโพแทสเซียม โซเดียม และแคลเซียม แร่นี้มักเกิดร่วมกับแร่ควอตซ์ในหินอัคนี โดยทั่วไปมีสีขาวขุ่น มีความแข็งเท่ากับ 6 มีอยู่ในดินน้อย

มากเนื่องจากการสลายตัวได้ง่าย โดยทั่วไปทำปฏิกิริยากับน้ำหรือกรดคาร์บอนิก เมื่อสลายตัวจะกลายเป็นดินเหนียว แร่เฟลด์สปาร์มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น

(a) แร่อัลไบต์ (Albite) หรือ โซดา-เฟลด์สปาร์ (Soda-feldspar)

โครงสร้างผลึก : ไตรคลินิก (Triclinic)

ส่วนประกอบทางเคมี : $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$

ลักษณะทางกายภาพ : แร่ชนิดนี้มีสีขาว บางครั้งมีสีน้ำเงิน สีแดงอ่อน สีเขียว ขึ้นกับสิ่งเจือปน เมื่อบดละเอียดเป็นผงสีขาวเหมือนแป้ง บางครั้งมีสีเทา วาวคล้ายแก้ว หรือไข่มุก โปร่งใสถึงโปร่งแสง ความแข็ง 6 ความถ่วงจำเพาะ 2.62

การกำเนิด : แร่อัลไบต์ประกอบด้วยโซเดียมอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยทั่วไปเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติและการทับถมกันของหินแกรนิต พบในหินอัคนี หินสเปกมาไทต์และหินชั้นซึ่งมีกระจายอย่างสมบูรณ์ในธรรมชาติและมีมากกว่าโพแทส-เฟลด์สปาร์ที่พบในหินแกรนิต

อิทธิพลความร้อน : แร่อัลไบต์เมื่อได้รับความร้อน $1,100^{\circ}\text{C}$ จะหลอมละลายเป็นฟลักซ์

ประโยชน์ : พบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก้วและเคลือบผิว

(b) แร่ออโรเคลส (Orthoclase) หรือ โพแทส-เฟลด์สปาร์

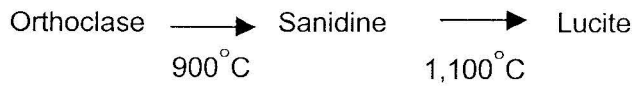
โครงสร้างผลึก : โมโนคลินิก (Monoclinic)

ส่วนประกอบทางเคมี : $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ มีแคลเซียมและรูบิเดียมเล็กน้อย

ลักษณะทางกายภาพ : แร่ชนิดนี้ไม่มีสีหรือสีขาว สีเทา สีน้ำตาลแดงขึ้นกับสิ่งเจือปน วาวคล้ายแก้วหรือไข่มุก กึ่งโปร่งแสงถึงโปร่งแสง ไม่เรียบ เปราะ มีความแข็ง 6 ความถ่วงจำเพาะ 2.6 และทำปฏิกิริยากับกรด

การกำเนิด : แร่ออโรเคลส เป็นแร่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ในธรรมชาติอยู่ท่ามกลางหินภูเขาไฟ เช่น หินแกรนิต (Granite) หินซีไนต์ (Syenite) เนฟไฟไลต์ซีไนต์ (Nepheline Syenite) มีผลึกขนาดใหญ่ สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลึกแร่เซริไซต์ (Sericite) แร่เคโอลิไนต์ แร่มัสโคไวต์ (Muscovite) แร่อัลไบต์และแร่ควอตซ์ได้

อิทธิพลความร้อน : แร่ออโรเคลสเมื่อได้รับความร้อน 900°C จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่ซานิไดน์ (Sanidine) มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก ถ้าได้รับความร้อน $1,100^{\circ}\text{C}$ จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่ลิวไซต์ (Leucite) ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอลและแก้ว (Glass) แร่ลิวไซต์จะทนความร้อนได้ถึง $1,500^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



ประโยชน์ : ใช้ทำสี สีเคลือบเซรามิกส์ และแก้ว

(c) แร่อะนอร์โทเคลส (Anorthoclase)

โครงสร้างผลึก : ไตรคลีนิก (Triclinic)

ส่วนประกอบทางเคมี : $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ อาจมีแคลเซียมอยู่บ้างเล็กน้อย

ลักษณะทางกายภาพ : แร่ชนิดนี้ไม่มีสี หรืออาจมีสีขาว สีเทา สีน้ำตาลแดง สีเหลืองเทา สีเขียวเทา วาวคล้ายแก้วหรือไข่มุก โปร่งแสง ไม่เรียบ เปราะ มีความแข็ง 6 ความถ่วงจำเพาะ 2.6

การกำเนิด : เกิดจากหินที่ปล่อยออกมาจากภูเขาไฟ หินที่เกิดหลังจากการระเบิดอย่างรุนแรงซึ่งมีโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) สูง แร่นี้สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นแร่เชิร์ตและแร่เคโอลิไนต์

อิทธิพลความร้อน : แร่อะนอร์โทเคลสเป็นแร่ที่มีการก่อผลึกสมบูรณ์ หากได้รับความร้อน $1,100^{\circ}\text{C}$ จะสลายกลายเป็นแก้ว

ประโยชน์ : ใช้ทำสี, สีเคลือบ, เซรามิกส์ และแก้ว

(d) แร่ลิวไซต์ (Leucite)

โครงสร้างผลึก : เตตระโกนอล (Tetragonal)

ส่วนประกอบทางเคมี : KAlSi_2O_6 อาจจะมีโซเดียม (Sodium) แทนที่โพแทสเซียม (Potassium)

ลักษณะทางกายภาพ : โดยทั่วไปจะมีสีขาวเทา วาวคล้ายแก้ว สีนํ้ามุ่นคล้ายน้ำมันไว้ โปร่งแสง เปราะ มีความแข็ง 5.5-6 ความถ่วงจำเพาะ 2.5 ไม่ละลายน้ำ

การกำเนิด : เกิดจากการไหลและความบกพร่องของซิลิกา โดยมีความสัมพันธ์กับแร่อื่นๆ เช่น แร่ออไจต์ (Augite) แร่ออโรเคลส แร่เนเฟลิไลน์ (Nepheline) เพราะง่ายต่อการเปลี่ยนแปลง ซึ่งส่วนใหญ่พบในหินที่เก่าแก่กว่า 3 ยุค

อิทธิพลความร้อน : เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแร่อโรเคลสเมื่อได้รับความร้อน $1,100^{\circ}\text{C}$ จะเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่ลิวไซต์ (Leucite) มีโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนอล แร่ลิวไซต์สามารถทนความร้อนได้ถึง $1,500^{\circ}\text{C}$

ประโยชน์ : ไม่มีประโยชน์ทางการค้า

3. ผลิตภัณฑ์เซรามิกส์

สำหรับผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่ผลิตในประเทศไทยสามารถแยกเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

3.1 ประเภทเครื่องปั้นดินเผา (Pottery)

เครื่องปั้นดินเผาเป็นการผลิตในระบบอุตสาหกรรมในครัวเรือนและระบบอุตสาหกรรมขนาดเล็ก วัตถุประสงค์ส่วนใหญ่จะเป็นดินเหนียวทั่วไปในท้องถิ่นเพียงอย่างเดียว โดยนำดินมาบดแล้วใช้แรงงานคนหรือสัตว์ย่ำ ถ้าเป็นการผลิตระบบอุตสาหกรรมจะใช้เครื่องรีดดิน เนื้อดินปั้นโดยทั่วไปจะผสมทรายละเอียดเพื่อลดการหดตัว การเผาจะเผาดิบ (Biscuit Firing) ที่อุณหภูมิ 800°C - 900°C หรือสูงกว่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งผลิตหรือขนาดของผลิตภัณฑ์ เนื้อผลิตภัณฑ์ค่อนข้างหยาบดูดน้ำได้มาก หลังเผามีความแข็งแรง

3.2 ประเภทกระเบื้อง (Tile)

กระเบื้องมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับนำไปใช้ประโยชน์ ทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบได้แก่ กระเบื้องปูพื้น (Floor Tile) กระเบื้องมุงหลังคา กระเบื้องบุผนัง กระเบื้องเคลือบห้องน้ำ กระเบื้องโมเสค เป็นต้น การผลิตกระเบื้องปูพื้น จัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง วัตถุประสงค์คือดินขาว ดินเหนียวขาว (Ball Clay) หินควอตซ์ (Quartz) และหินฟันม้า (Feldspar) ส่วนผสมของวัตถุดิบขึ้นอยู่กับชนิดและความเหมาะสมในการใช้งาน ผลิตโดยวิธีการอัดแรง (Press) สำหรับการเผาเหนียวเผาด้วยเตาถาวร โดยใช้ฟืนหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิในการเผาดิบระหว่าง $1,000^{\circ}\text{C}$ - $1,200^{\circ}\text{C}$ กระเบื้องส่วนใหญ่จะไม่นิยมเคลือบเพราะต้องการโชว์ลวดลาย สิ่งก่อสร้างบางแห่งนำไปก่อประดับแทนกระเบื้องโมเสค และทาน้ำมันเคลือบผิวทำให้สวยงามอีกแบบหนึ่ง การผลิตกระเบื้องมุงหลังคาดินเผาชนิดไม่เคลือบและเคลือบ วัตถุประสงค์คือดินขาว ดินเหนียวขาว หินควอตซ์ หินฟันม้า ทัลก์ (Talc) และหินปูน (Lime Stone) เดิมจะผลิตด้วยมือโดยใช้ไม้แบบหรือสังกะสีเป็นต้นแบบ ปัจจุบันจะผลิตโดยใช้เครื่องอัดแรง สำหรับการเคลือบนิยมเคลือบด้วยฟrit (Frit) กระเบื้องเคลือบต้องเผา 2 ครั้งด้วยเตาเผาแบบจีน (Chinese Kiln) หรือเตาเผาแบบทางระบายความร้อนลง (Down Draft Kiln) โดยใช้ฟืนหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิในการเผาดิบระหว่าง $1,000^{\circ}\text{C}$ - $1,100^{\circ}\text{C}$ แล้วนำไปเคลือบด้วย ฟrit การเผาเคลือบ (Glost Firing) จะใช้อุณหภูมิระหว่าง 700°C - 900°C

3.3 ประเภทอิฐก่อสร้างแบ่งได้ 3 ชนิดคือ

(i) อิฐมอญ จัดเป็นอุตสาหกรรมในครอบครัวและอุตสาหกรรมขนาดกลาง วัตถุประสงค์คือดินเหนียว แกลบ หรือขี้เลื่อยอย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ที่นิยมกันมากคือแกลบ สำหรับ

อุตสาหกรรมในครอบครัวการผลิตวัตถุดิบนิยมให้คนย่ำในหลุมเล็กๆ จนวัตถุดิบรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันแล้วปล่อยหมักค้างหลุมไว้ 1 คืน (Aging) แล้วนำมาอัดลงในพิมพ์ซึ่งทำด้วยไม้โดยใช้แรงคน (Hand Pressing) สำหรับอุตสาหกรรมขนาดกลางนิยมผลิตด้วยเครื่องอัดรีด (Extruder) การเผาจะใช้วิธีนำอิฐที่ตากแห้งแล้วมาวางซ้อนกันเป็นช่องๆ ด้านนอกสุดจะวางซ้อนต่อกันเพื่อเป็นผนังกันเชื้อเพลิงคล้ายเตาสี่เหลี่ยม นิยมใช้กลบเป็นเชื้อเพลิง แต่ถ้าเผาในเตาแบบถาวรนิยมใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่ใช้เผาระหว่าง 700°C – 900°C

(ii) อิฐประดับ เดิมนิยมเรียกกันว่าอิฐ บ.ป.ก. หรืออิฐ บ.บ.ท. ปัจจุบันผลิตกันทั่วไป จึงเรียกสั้นๆ ว่าอิฐประดับ วัตถุดิบคือดินเหนียวที่มีสิ่งเจือปนจำพวกแร่เหล็กน้อย บางแหล่งผสมดินเหนียวขาวเพื่อไม่ให้อิฐมีสีแดงจัดจนเกินไป การผลิตอิฐประดับนิยมผลิตด้วยเครื่องรีดดินหรือเครื่องบีบด้วยแรงอัดทำให้เนื้ออิฐมีความหนาแน่นมาก การเผาดินนิยมเผาด้วยเตาถาวรโดยใช้ฟืนหรือใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่เผาประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ – $1,100^{\circ}\text{C}$ โดยไม่เผาเคลือบ

(iii) อิฐปราง เป็นอิฐที่ดัดแปลงมาจากอิฐมอญคือเจาะรูตรงกลางก้อนอิฐให้ขนาดกัน 2 รูไปตามแนวยาวของก้อนอิฐ วัตถุดิบคือดินเหนียวตามท้องนาทั่วไป (Surface Clay) ไม่นิยมผสมทรายหรือกลบ ผลิตโดยใช้เครื่องอัดรีดดินออกมาเป็นแท่ง แล้วตัดแบ่งเป็นก้อน การเผานิยมเผาด้วยเตาถาวรโดยใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง บางแหล่งเผาด้วยกลบโดยวางอิฐดิบเป็นช่องๆ แบบการเผาอิฐมอญเพื่อประหยัดการลงทุน อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประมาณ 700°C – $1,200^{\circ}\text{C}$

3.4 ประเภทอิฐทนไฟ (Fire Brick) จัดเป็นพวกวัสดุทนไฟ (Refractory) ผลิตเพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมเตาเผาเป็นส่วนใหญ่ วัตถุดิบคือดินทนไฟ (Fire Clay) ดินขาว ดินเหนียวขาว หินบดย่อย การผลิตโดยใช้เครื่องอัดแรงระบบไฮดรอลิก (Hydraulic Press) หรือบางประเภทก็ใช้แรงคนอัด การเผานิยมเผาด้วยเตาถาวร โดยใช้ฟืนหรือแก๊สเป็นเชื้อเพลิง อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาระหว่าง $1,100^{\circ}\text{C}$ – $1,400^{\circ}\text{C}$

3.5 ประเภทปอร์ซเลน (Porcelain)

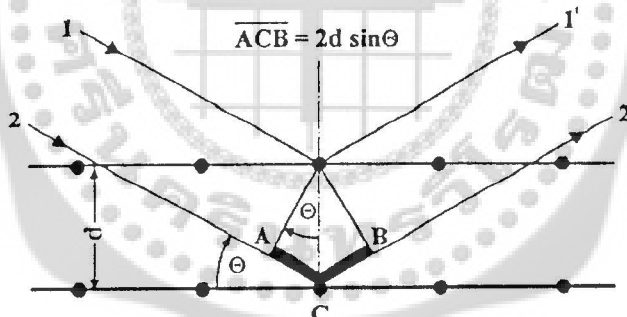
เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อแน่นแข็งแกร่งเคลือบเป็นมันโปร่งแสง จัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดใหญ่ นิยมผลิตในโรงงานถ้วยชาม วัตถุดิบคือดินขาว ดินเหนียวขาว หินฟันม้า หินเขียวหนุมาน ซึ่งส่วนใหญ่ นิยมเผา 2 ครั้ง คือเผาดิบอุณหภูมิ 750°C – 800°C และเผาเคลือบอุณหภูมิ $1,200^{\circ}\text{C}$ – $1,350^{\circ}\text{C}$

4. หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและความยาวคลื่นระหว่าง 0.05 – 0.25 นาโนเมตร รังสีเอกซ์จะแสดงคุณสมบัติเชิงคลื่น คือการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมกันและแบบหักล้างกัน

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบอะตอมของผลึกแล้วเกิดการกระเจิงโดยการชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของผลึก ซึ่งการกระเจิงของรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นทุกทิศทางโดยความยาวคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงเรียกการกระเจิงหรือการเลี้ยวเบน แบบนี้ว่าการกระเจิงแบบอาพันธ์ (Coherent scattering) ซึ่งสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ (Bragg's law)

ในปี 1912 แบรกก์ (W.L.Bragg) ได้อธิบายการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่าหรือเท่ากับระยะห่างระหว่างอะตอมเคลื่อนที่ไปตกกระทบบอะตอมที่ขนานกันทำมุม θ กับระนาบของอะตอม โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นอะตอม (d) ในผลึกที่แน่นอน รังสีเอกซ์เลี้ยวเบนจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดเมื่อผลต่างของทางเดินรังสีเอกซ์กระเจิงออกจากระนาบต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) พิจารณาภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์

ที่มา: Schlotz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis(XRF)*.
p. 24. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.

รังสีเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2 มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบบอะตอม ในชั้นที่ต่างกันที่ ทำมุม θ และมีการสะท้อนออกไปตามกฎการสะท้อน ถ้าความแตกต่างกันของทางเดินรังสีทั้งสองมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบบ นั่นคือรังสีทั้งสองมีเฟสเดียวกันจะได้ว่า

$$AC + CB = n\lambda \quad \dots\dots (1)$$

จากรูปจะได้ว่า

$$AC = CB = d \sin \theta \quad \dots\dots (2)$$

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots (3)$$

เมื่อ n คือ อันดับการสะท้อน (order of reflection) ซึ่งเป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, ...

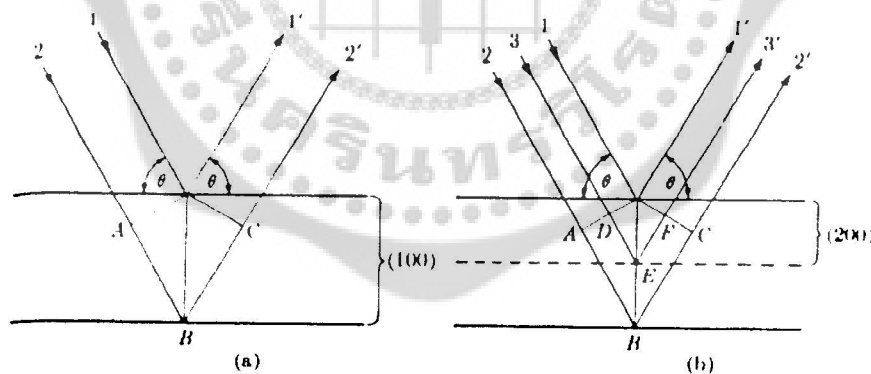
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก

เรียกสมการที่ 3 ว่ากฎของแบรกก์

ความหมายอันดับการสะท้อนจากกฎของแบรกก์ โดยพิจารณารังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากระนาบ (100) ของผลึก ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 (a) แสดงอันดับการสะท้อนที่ 1 จากระนาบ (100)

(b) แสดงอันดับการสะท้อนที่ 2 จากระนาบ (100)

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-ray Diffraction*. p. 85. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

สำหรับการสะท้อนอันดับที่ 1 (1^{st} order reflection) คือ

$$2d_{100}\sin \theta = 1\lambda$$

การสะท้อนอันดับที่ 2 (2^{nd} order reflection) คือ

$$2d_{100}\sin \theta = 2\lambda$$

อาจเขียนได้ว่า

$$2(d_{100}/2)\sin \theta = 1\lambda$$

ดังนั้นการสะท้อนอันดับที่ 2 จากระนาบ (100) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d_{100} จะเหมือนเป็นการสะท้อนอันดับที่ 1 จากระนาบที่มีระยะห่างระหว่างระนาบเป็นครึ่งหนึ่งของ d_{100} ที่เป็นระนาบ (200)

สำหรับการสะท้อนอันดับที่ n จากระนาบ (hkl) ใด ๆ หาได้จาก

$$2(d_{hkl}/n)\sin \theta = 1\lambda \quad \dots\dots\dots (4)$$

5. ความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

สำหรับสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษาและมีการวัดภายใต้เงื่อนไขของเครื่องมือชนิดเดียวกันความเข้มรวมสัมพัทธ์ (Relative integrated intensity) ของเส้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึกผงเป็นไปตามสมการ

$$I = |F|^2 p \left(\frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มรวมสัมพัทธ์

p คือ แฟคเตอร์ทวีคูณ

F คือ แฟคเตอร์โครงสร้าง

θ คือ มุมแบรกก์

$\left(\frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \right)$ คือ แฟคเตอร์ลอเรนซ์โพลาไรเซชัน

จะเห็นได้ว่าค่าความรวมเข้มสัมพัทธ์ของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์โครงสร้าง แฟกเตอร์ทวีคูณ และแฟกเตอร์ลอเรนซ์โพลาไรเซชัน ซึ่งแต่ละแฟกเตอร์มีรายละเอียดดังนี้

5.1 แฟกเตอร์โครงสร้าง (Structure factor)

เนื่องจากหนึ่งเซลล์หน่วยจะประกอบด้วยอะตอมหลายๆ อะตอม เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอมในหนึ่งเซลล์หน่วยจะเกิดการกระเจิงขึ้น หากพิจารณาแอมพลิจูดของการกระเจิงทั้งหมดของคลื่นเลี้ยวเบนจากแลตทิซของผลึก สามารถเขียนในรูปผลรวมของทุกๆ อะตอมในหนึ่งเซลล์หน่วย ซึ่งผลรวมของแฟกเตอร์การกระเจิงโดยอะตอมทั้งหมดเรียกว่าแฟกเตอร์โครงสร้าง (Structure factor)

$$F_{hkl} = \sum_n f_n e^{2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

โดยที่

- n คือ จำนวนอะตอมทั้งหมดในเซลล์หน่วย
- f_n คือ แฟกเตอร์การกระเจิงโดยอะตอมจำนวน n อะตอม
- h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบ
- u_n, v_n, w_n คือ พิกัดของอะตอมที่ n ในเซลล์หน่วย

5.2 แฟกเตอร์ทวีคูณ (Multiplicity factor)

$$p = f_n (\text{Crystal System}, \{h, k, l\}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

เป็นสมการที่บอกจำนวนของระนาบที่มุมกระเจิงหนึ่งๆ ซึ่งมีระยะห่างของเซลล์หน่วยเท่ากัน สำหรับระบบลูกบาศก์เมื่อพิจารณาสมการที่ 7 ซึ่งแสดงระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl)

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

- เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (hkl)
- a คือ ระยะของเซลล์หน่วย

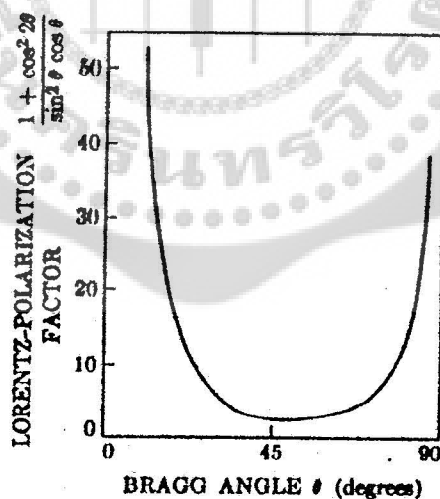
จะเห็นได้ว่าค่า d_{hkl} ของระนาบ $(100)(010)(001)(\bar{1}00)(0\bar{1}0)(00\bar{1})$ จะมีค่าระยะห่างเซลล์หน่วยเท่ากันแสดงว่าทุกระนาบจะเกิดการกระเจิงที่มุมเดียวกันจำนวนระนาบจะบอกด้วยค่าแฟคเตอร์ทวีคูณ (p) ซึ่งค่านี้ขึ้นกับโครงสร้างของผลึก

5.3 แฟคเตอร์ลอเรนซ์โพลาไรเซชัน (Lorentz-Polarization factor)

เป็นค่าความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอกซ์เมื่อคำนึงถึงปัจจัยทางเรขาคณิต ซึ่งค่าความเข้มของการกระเจิงจะมีแฟคเตอร์ที่ขึ้นกับมุม θ ดังนี้

$$LP(\theta) = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \theta \cos \theta} \quad \dots\dots (9)$$

หากนำความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์โพลาไรเซชันที่มุมกระเจิงต่างๆ มาสร้างกราฟ จะเห็นได้ว่าค่าความเข้มของการกระเจิงของรังสีเอกซ์มีลักษณะเด่นที่มุมกระเจิงต่ำ และลดลงในช่วงมุมกระเจิงกลางๆ แล้วจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงมุมกระเจิงมากขึ้น ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟคเตอร์โพลาไรเซชันที่มุมกระเจิงต่างๆ

ที่มา: Cullity, B.D. (1967). *Elements of X-Ray Diffraction*. p. 128. London : Addison – Wesley Publishing, INC.

5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก สามารถนำข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาวิเคราะห์ได้โดยตรง โดยการหาระยะห่างระหว่างระนาบในผลึกซึ่งแสดงความสัมพันธ์กับมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่อ่านได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบน รวมทั้งหาค่าคงตัวของแลตทิซของผลึกจากค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่คำนวณได้ โดยมีหลักการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแต่ละระบบดังนี้

1. ระบบลูกบาศก์ (Cubic)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad \dots\dots (10)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4} \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right)$$

2. ระบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad \dots\dots (11)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4} \left(\frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)$$

3. ระบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad \dots\dots (12)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)$$

4. ระบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad \dots\dots (13)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$$

5. รอมโบอีตรอล (Rhombohedral)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)}{a^2(1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha)} \quad \dots\dots (14)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4} \frac{(h^2 + k^2 + l^2) \sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)}{a^2(1 - 3 \cos^2 \alpha + 2 \cos^3 \alpha)}$$

6. ระบบโมโนคลีนิก (Monoclinic)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left[\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right] \quad \dots\dots (15)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4} \left\{ \frac{1}{\sin^2 \beta} \left[\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right] \right\}$$

7. ระบบไตรคลีนิก (Triclinic)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl) \quad \dots\dots (16)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{n^2 \lambda^2}{4} \left\{ \frac{1}{V^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl) \right\}$$

เมื่อ

$$V = abc \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}$$

$$S_{11} = b^2 c^2 \sin^2 \alpha$$

$$S_{22} = a^2 c^2 \sin^2 \beta$$

$$S_{33} = a^2 b^2 \sin^2 \gamma$$

$$S_{12} = abc^2 (\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma)$$

$$S_{23} = a^2 bc (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha)$$

$$S_{13} = ab^2 (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)$$

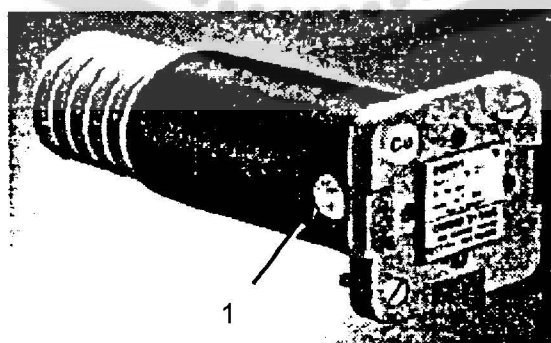
6. เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รุ่น D8 ของบริษัท BRUKER ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ที่สำคัญดังนี้

1. หลอดรังสีเอกซ์
2. โกลิโอมิเตอร์
3. หัววัดรังสีแบบประกายแสง
4. ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ

6.1 หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube)

หลอดรังสีเอกซ์ชนิดแบบหน้าต่างด้านข้าง (Side Window) มีลักษณะดังภาพประกอบ 9 หน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์ประกอบด้วยขั้วลบ (Cathode) ทำหน้าที่ปล่อยอิเล็กตรอน ขั้วบวก (Anode) ทำหน้าที่เป่าโลหะและหน้าต่างทางออกรังสี (Radiation outlet window) (หมายเลข 1) โดยมีหลักการทำงานคือ การเร่งอิเล็กตรอนด้วยความต่างศักย์สูงๆ ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งชนโลหะที่เป็นเป้า (Target) ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้น ในขณะที่อิเล็กตรอนชนกับเป้าโลหะพลังงานจลน์ส่วนใหญ่จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นจำเป็นต้องมีน้ำเย็นไหลผ่านหลอดรังสีเอกซ์โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นเป้าโลหะตลอดเวลา โดยทั่วไปหลอดรังสีเอกซ์จะใช้โลหะที่เป็นเป้าได้หลายชนิด ได้แก่ Cr, Fe, Co, Cu, Mo, Ag หรือ W สำหรับหลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านข้างนี้ใช้ทองแดง (Cu) เป็นโลหะเป้า โดยหลอดรังสีเอกซ์จะบรรจุในขวดสุญญากาศเพื่อป้องกันรังสีที่ออกมาจากหลอดรังสีเอกซ์และมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการเปิดปิดของหน้าต่างอัตโนมัติสำหรับขาตั้งหลอดจะติดตั้งกับวงแหวนภายนอกของโกลิโอมิเตอร์

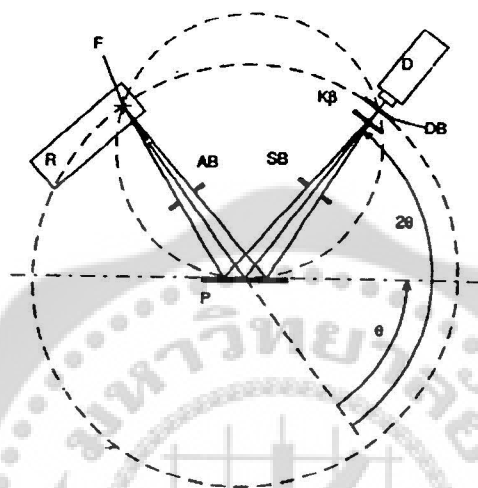


ภาพประกอบ 9 แสดงหลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านข้าง

ที่มา: Bruker AXS. (1999). *D8 X-ray Diffractometer Vol 1*. p. 3-6. Karlsruhe : Bruker Analytical X-ray System.

6.2 โกนิโอมิเตอร์ (Goniometer)

เป็นชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถ่ายภาพประกอบ 10 ประกอบด้วยวงแหวนภายในสามารถหมุนได้โดยจะติดตั้งที่วางสารตัวอย่าง (Sample Carrier)(ตำแหน่ง P) และวงแหวนภายนอกซึ่งจะติดตั้งอุปกรณ์ดังนี้



ภาพประกอบ 10 แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องดิฟแฟกโตรมิเตอร์

ที่มา: Bruker AXS. (1999). *D8 X-ray Diffractometer Vol 1*, p. 3-2. Karlsruhe : Bruker Analytical X-ray System.

- (i) ขาตั้งหลอดรังสี (Tube stand) ที่ตำแหน่ง R ภายในจะบรรจุหลอดรังสีเอกซ์ชนิดหน้าต่างด้านข้างซึ่งจะติดตั้งตำแหน่งที่แน่นอนไม่สามารถหมุนได้
- (ii) ระบบสลิต (Slit system) ประกอบด้วย สลิตแบบลู่ออก (Divergence slit) (ตำแหน่ง AB) ซึ่งติดตั้งระหว่างหลอดรังสีเอกซ์กับสารตัวอย่าง ทำหน้าที่กำหนดปริมาณการลู่ออกของรังสีเอกซ์ไปตกบนสารตัวอย่าง โดยมีสลิตของรังสีกระเจิง (Scattered-radiation slit) (ตำแหน่ง SB) ทำหน้าที่ให้เฉพาะรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากสารตัวอย่างเท่านั้นผ่านไปยังหัววัด และสลิตของหัววัด (Detector slit)(ตำแหน่ง DB) ทำหน้าที่กำหนดปริมาณรังสีสู่หัววัด (Detector)
- (iii) แผ่นกรอง $K\beta$ ($K\beta$ Filter) หรือตัวดูดกลืนรังสีเอกซ์ (Absorber) (ตำแหน่ง $K\beta$) ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์เฉพาะเส้น $K\beta$ ซึ่งเป็นเส้นสเปกตรัมที่มีความเข้มต่ำและปล่อยให้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมผ่านไปได้ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามตาราง 2

ตาราง 2 แสดงแผ่นกรองแสงเส้นสเปกตรัม K_{β} (K_{β} Filter) ที่เหมาะสมสำหรับเป้าโลหะชนิดต่างๆ

การแผ่รังสี (K_{α} , K_{β})	วัสดุแผ่นกรอง (Filter material)	ความหนา (Thickness)
Cu	Ni	12 μm
Cr	V	10 μm
Fe	Mn	10 μm
Co	Fe	10 μm
Mo	Zr	10 μm

ที่มา: Bruker AXS. (1999). *D8 X-ray Diffractometer Vol 1*. p. 3-13. Karlsruhe : Bruker Analytical X-ray system.

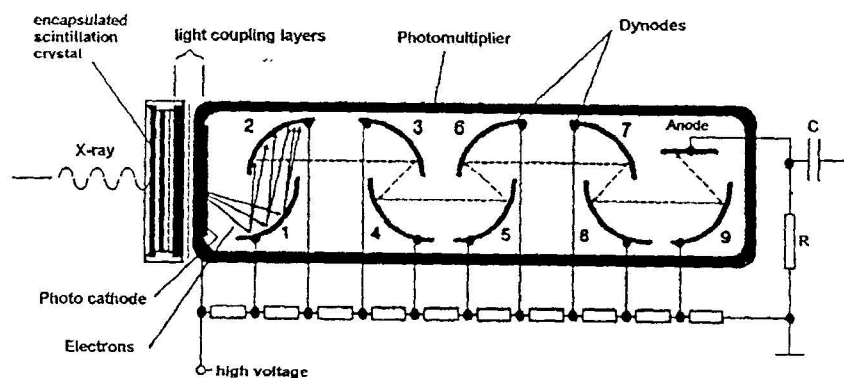
6.3 เครื่องนับรังสี

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจนับหรือวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของผลึกที่มุมต่างๆ กัน เครื่องมือชุดนี้จะใช้เครื่องนับแบบประกายแสง (Scintillation counter)

เครื่องนับแบบประกายแสง (Scintillation counter)

ประกอบด้วยผลึกโซเดียมไอโอไดด์ (Sodiumiodide) ซึ่งมีแธลเลียม (Thallium) อยู่เล็กน้อย (NaI[Tl]) โดยผลึกโซเดียมไอโอไดด์จะหุ้มด้วยอลูมิเนียม (Al) บางๆ ทุกด้านยกเว้นด้านที่ต่อกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และภายในอลูมิเนียมจะเคลือบด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide) เพื่อเป็นตัวสะท้อนแสง เมื่อรังสีเอกซ์ตกลงบนผลึกจะเกิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าออกมาจากผลึก แสงที่ฉายออกมาจะไปตกกระทบบโฟโตแคโทด (Photocathode) ของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier) ซึ่งภายในมีการจัดเรียงไดโนด (Dynode) มีผลทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งเข้าไปตกกระทบบไดโนดตัวแรกซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) หลุดออกมาประมาณ 2-5 ตัวต่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) 1 ตัวและอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ได้จะถูกเร่งไปตกกระทบบไดโนดตัวที่สอง

ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 แสดงลักษณะและส่วนประกอบของหัววัดประกายแสง

ที่มา: Schlotz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)*.
p. 17. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.

ซึ่งจะได้อิเล็กตรอนจำนวนทวีคูณจนกระทั่งถึงไดโนดตัวสุดท้ายแล้วจะเข้าสู่ขั้วแอโนด (Anode) ทำให้เกิดโวลต์เตจพัลส์ (Voltage pulse) โดยความสูงของพัลส์จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของอนุภาคที่ตกกระทบในผลึก

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 1982 มินิเชลลี (D. Minichelli) ได้ทำการวิเคราะห์เฟสของแร่ดินเชิงปริมาณจากการผสมสารมาตรฐานภายนอกทั้งที่มีในธรรมชาติและที่ผลิตขึ้นมา โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สำหรับการวิเคราะห์แร่ที่มีวัตถุดิบที่ผสมในสารมาตรฐานมีลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งสกัดจาก Alkali-boron - silicon glasses มีการปรับเปลี่ยนมุมตามลำดับโครงสร้างของสารมาตรฐาน และการวิเคราะห์สารมาตรฐานผสมที่มีหลายเฟสมีการปรับเปลี่ยนเวลาการเคลื่อนที่ของเครื่องมือรังสีเอกซ์ พร้อมทั้งกำหนดให้อนุภาคหมุนเพื่อความถูกต้องและทดสอบสารมาตรฐานผสมที่อนุภาคนั้นๆ เพื่อแยกการกระเจิงที่ซ้อนทับในช่วงมุม 2 θ ที่มีค่าต่ำๆ

ในปี 1984 สวาโอกาและอะคาชิ (A. Sawaoka and T. Akashi) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของโบรอนไนไตรด์ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนแกรไฟต์ ด้วยการอัดอย่างฉับพลันหลาย ๆ ครั้ง โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากการทดลองพบว่าโครงสร้างใหม่ที่เกิดขึ้น คือ แบบเวอร์ไรต์ (Wurtzite type) แบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blende type) และได้อภิปรายกลไกการก่อรูปของโบรอนไนไตรด์ที่มีความหนาแน่นสูงภายใต้การอัดอย่างฉับพลัน

ในปี 1986 อิสลามและลอตเซ (A. K. M. E. Islam and E. G. Lotse) ศึกษาสัดส่วนของดินละเอียด (Fine Clay) ดินหยาบ (Coarse Clay) ดินโคลน (Silt) สำหรับดิน 4 แหล่งในประเทศบังกลาเทศ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากการทดสอบดินจาก Barter และ Ghior พบแร่สแมกไทต์ (Smectite) และไมกา (Mica) เด่นชัดสุด ในขณะที่ดินจาก Naraibag และ Ghatail มีแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) และไมกา (Mica) เด่นชัดสุด โดยมีแร่อื่นๆ เจือปนได้แก่ แรเวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) ซึ่งซ้อนทับกับไฮโดรซีลูมิเนียม แร่คลอไรต์ ซึ่งอยู่กันอย่างสุ่ม (Random) ระหว่างแร่คลอไรต์และแร่ไมกา แร่เฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์ แร่แอมฟิโบล (Amphibole) เล็กน้อย และมีพวกอสัณฐาน (Amorphous) ประมาณ 1 -11% ซึ่งจะทำให้ขนาดของอนุภาคลดลงมากขึ้น และในสัดส่วนของดินที่นำมาศึกษาไม่พบโครงสร้างผลึกของเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide)

ในปี 1992 ฮาร์ดี (M. Hardy) ทำการศึกษาปริมาณสัดส่วนของควอตซ์ในดินเหนียว (Clay) และดินโคลน (Silt) ในดิน (Soil) โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าปริมาณสัดส่วนของควอตซ์ซึ่งใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารมาตรฐานเพื่อทดสอบความแตกต่างของขนาดอนุภาคระหว่าง 0 - 20 μm โดยใช้กราฟปรับเทียบ (Calibration graph) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของความเข้มการเลี้ยวเบนของควอตซ์ต่อซิงค์ออกไซด์กับสัดส่วนน้ำหนักควอตซ์ต่อน้ำหนักซิงค์ออกไซด์ของขนาดอนุภาค 20 μm ขึ้นไป พบว่ากราฟปรับเทียบของขนาดอนุภาคระหว่าง 0.7 - 5 μm มีความชันเพิ่มขึ้น กราฟปรับเทียบของขนาดอนุภาคหยาบ ค่าความชันคงที่ โดยควอตซ์ที่ละเอียดซึ่งได้จากการสกัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก พบว่าค่า

ความชันของกราฟเปรียบเทียบเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของอนุภาคมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ได้อ้างถึงสัดส่วนของควอตซ์ที่มีในธรรมชาติโดยการหาค่าเฉลี่ยของการวัด 6 ค่าที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไขความชันจากกราฟเปรียบเทียบเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดอนุภาค โดยขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง $0-20\ \mu\text{m}$, $0-0.2\ \mu\text{m}$ และ $0.2-2\ \mu\text{m}$

ในปี 1997 คานรา (A. Khanra) และคณะ ศึกษาเกี่ยวกับเฟสของแร่และลักษณะของการชะล้างเถ้าลอย (Fly ash) ของถ่านหินและประเมินถึงความปลอดภัยในการนำบ่อแร่ที่ถูกทิ้งไว้มาใช้ประโยชน์อีกครั้งหนึ่ง พบว่า เถ้าลอยประกอบด้วยธาตุที่เป็นพิษจำนวนมาก การชะล้างเถ้าลอยโดยใช้สารละลายกรดแก่ เบส และน้ำกลั่น ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน เช่น อัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลว เวลาในการชะล้าง pH ในช่วงอุณหภูมิ $30-100^{\circ}\text{C}$ พบว่าปริมาณความเข้มข้นของโลหะจากการชะล้างขึ้นกับธรรมชาติของสารเคมี โดยสัมพันธ์กับเฟสของแร่ของเถ้าลอย ซึ่งส่วนใหญ่พบว่าสามารถชะล้างเหล็กด้วยกรดปานกลางได้ดี สำหรับการกระจายของธาตุที่เป็นพิษปริมาณน้อยๆ ในเถ้าลอยของถ่านหินและลักษณะการชะล้างขึ้นกับการเผาแบบไม่สมบูรณ์ระหว่างคาร์บอนกับเหล็กในเถ้าลอยของถ่านหิน ในต่างประเทศการชะล้างเหล็กและธาตุที่เป็นพิษสามารถชะล้างได้น้อยมาก ดังนั้นการจัดตั้งด้วยตัวของเถ้าลอยถ่านหินก็ต้องระมัดระวังในการป้องกันอันตรายจากการนำบ่อเหมืองถ่านหินมาใช้ใหม่อีกครั้ง

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินการ

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. สารตัวอย่างมาตรฐาน คือ แร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่แคลไซต์ แร่แคลไซต์ แร่เฮมาไทต์และอลูมินาออกไซด์
2. สารตัวอย่างประเภทเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง อิฐและปอร์ซเลน
3. โกร่งบดสาร (Mortar)
4. ตะแกรงร่อนสาร (Sieve)
5. ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample Holder)
6. กรดไฮโดรคลอริก
7. แผ่นแก้วใส
8. บีกเกอร์
9. เครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ที่ใช้เป็น BRUKER รุ่น D8 ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร
10. เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมการวิเคราะห์สำเร็จรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในขั้นต้นของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ชนิดเดียวด้วยวิธี XRD เพื่อสร้างความชำนาญและแนวทางการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือในเบื้องต้นก่อน โดยอาจจะนำผลการวิเคราะห์สารผสมตัวอย่างมาตรฐานจากแร่ชนิดต่าง ๆ มาใช้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่มีแร่ต่าง ๆ รวมกันอยู่อย่างซับซ้อนได้บ้าง ดังนั้นจึงได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่าง

3.1.1 การเตรียมสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ชนิดเดียว

เพื่อศึกษาทดสอบวิธีการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ชนิดเดียว ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. นำแร่ควอตซ์มาบดให้ละเอียดโดยใช้โกร่งบดสารจากนั้นนำมาผ่านตะแกรงร่อนสารขนาด 200 Mesh เพื่อกรองเฉพาะสารขนาด 74 ไมครอนให้ผ่านออกมา

ข. นำแร่ควอตซ์ที่ได้จากการผ่านตะแกรงร่อนสารใส่ในที่ใส่สารตัวอย่างอัดให้แน่นและทำผิวหน้าให้เรียบด้วยแผ่นแก้วใสจะได้สารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ควอตซ์ชนิดเดียวสำหรับนำไปวิเคราะห์

ค. ทำการเตรียมแร่เฟลด์สปาร์ แร่เคโอลิไนต์ แร่แคลไซต์ แร่เฮมาไทต์ และอลูมินาออกไซด์ ตามขั้นตอน ก ถึง ข ตามลำดับ

3.1.2 การเตรียมสารตัวอย่างเซรามิกส์

สารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเซรามิกส์ที่ผลิตจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย ประเภทเครื่องปั้นดินเผา 7 ตัวอย่าง ประเภทอิฐ 4 ตัวอย่าง ประเภทกระเบื้อง 4 ตัวอย่าง และประเภทปอร์ซเลน 1 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 16 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ต่างๆ ที่รวมกันอยู่อย่างซับซ้อน โดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการเตรียมสารในทำนองเดียวกับหัวข้อ 3.1.1

3.1.3 การเตรียมสารผสมตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ต่างๆ ผสมกัน

เป็นการนำสารผสมตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ต่างๆ ซึ่งพบในสารตัวอย่างเซรามิกส์มาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ กัน เพื่อศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ต่างๆ ผสมกันและเพื่อนำผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ต่างๆ ผสมกันไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ที่รวมกันอยู่อย่างซับซ้อนในสารตัวอย่างเซรามิกส์ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ก. นำแร่ควอตซ์และแร่อลูมินาออกไซด์ที่เตรียมไว้ในหัวข้อ 3.1.1 มาชั่งชนิดละ 1 กรัม ใส่ขวดพลาสติกขนาดเล็กเขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 10 นาที ซึ่งจะได้สารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ควอตซ์และแร่อลูมินาออกไซด์ผสมกันในสัดส่วน 50:50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

ข. นำแร่ที่ผสมแล้วใส่ในที่ใส่สารตัวอย่างอัดให้แน่นและทำผิวหน้าให้เรียบด้วยแผ่นแก้วใสจะได้สารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ควอตซ์และอลูมินาออกไซด์ผสมกัน สำหรับนำไปวิเคราะห์

ค. เตรียมแร่ควอตซ์และอลูมินาออกไซด์ ตามขั้นตอน ก ถึง ข ซ้ำโดยเปลี่ยนสัดส่วนเป็น 20:80 และ 80:20 ตามลำดับ

ง. ทำการเตรียมสารผสมตัวอย่างมาตรฐานระหว่างแร่ควอตซ์กับแร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์กับแร่เฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์กับแร่เคโอลิไนต์ และแร่ควอตซ์กับแร่เฮมาไทต์ ตามขั้นตอน ก ถึง ค ตามลำดับ

3.1.4 การเตรียมสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) ในการศึกษาสารตัวอย่างในข้อ 3.1.2

เพื่อยืนยันโครงสร้างผลึกของแร่ที่วิเคราะห์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ซับซ้อนยากต่อการวิเคราะห์อาจใช้วิธีการชะล้างธาตุบางชนิดแยกออกจากสารตัวอย่างเพื่อลดความซับซ้อนลง ในงานวิจัยนี้เลือกสารตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยธาตุซิลิกอน โซเดียม โพแทสเซียมและเหล็กในสารตัวอย่างเซรามิกส์นำมาชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกแล้วนำสารที่เหลือหลังการชะล้างไปวัดและวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ของแร่ที่ถูกชะล้างออกไปลดลงหรือหายไปหลังการชะล้าง ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องจากธาตุที่ถูกชะล้างออกไปด้วยการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอม (Atomic Absorption Spectrophotometric technique) ขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ก. นำเซรามิกส์ประเภทเครื่องปั้นดินเผาที่เลือกมา บดให้ละเอียดโดยใช้โถรงบดสาร จากนั้นนำมาชั่งจำนวน 3 กรัม แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมกรดไฮโดรคลอริก จำนวน 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็นอัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร คนให้เข้ากันเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งให้เย็น สังเกตผล

ข. แยกสารละลายและตะกอนออกจากกัน นำตะกอนที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้งโดยการอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปบดให้ละเอียดโดยใช้โถรงบดสาร จากนั้นผ่านตะแกรงร่อนสารขนาด 200 Mesh จะทำให้ได้สารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผาที่ถูกชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก ขนาด 74 ไมครอน

ค. นำสารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผาที่ถูกชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ได้จากการผ่านตะแกรงร่อนสารไปใส่ในที่ใส่สารตัวอย่างอัดให้แน่นและทำผิวหน้าให้เรียบด้วยแผ่นแก้วใสจะได้สารตัวอย่างสำหรับนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

ง. นำสารละลายที่ได้จากข้อ ข ไปวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอม สำหรับตรวจสอบธาตุที่ถูกชะล้างออกมา

จ. ทำการทดลองในทำนองเดียวกันกับข้อ ก ถึงข้อ ง โดยเปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 1:30 ตามลำดับ

ฉ. ทำการเตรียมสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกประเภทอิฐ กระเบื้อง ตามขั้นตอน ก ถึง จ ตามลำดับ จนครบทุกตัวอย่าง

3.2 ขั้นตอนการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่อง XRD

เครื่อง XRD ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ใช้เป็น BRUKER รุ่น D8 ตันกำเนิดรังสีเอกซ์ใช้เป้าทองแดง โดยใช้ตัวกรอง (Filter) ทำด้วยนิกเกิล เพื่อให้ได้รังสีเอกซ์เส้น K_{α} ที่มีความยาวคลื่นเฉลี่ย 1.5407 อังสตรอม ในการทดลองนี้ใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีกระแสน้ำ 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ขนาด 40 กิโลโวลต์ ซึ่งมีวิธีการวัดดังนี้

3.2.1 นำสารตัวอย่างแร่ควอตซ์ที่เตรียมไว้จากขั้นตอน 3.1 วางในตำแหน่งวางสารของเครื่อง XRD

3.2.2 หาพารามิเตอร์ของการวัดที่เหมาะสม โดยเข้าโปรแกรมการวัด ศึกษาการตั้งค่าอัตราการหมุนของโกนิโอมิเตอร์ที่ 20 และตั้งพิสัยค่ามุมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมสำหรับในการทดลองนี้ แล้วทำการวัดสารตัวอย่างแต่ละตัวอย่างด้วยพารามิเตอร์ของการวัดที่เหมาะสมเดียวกันทั้งหมดจนครบทุกตัวอย่าง เพื่อให้ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ดีและชัดเจน ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์

3.2.3 ทำการวัดสารตัวอย่างที่เตรียมไว้จากขั้นตอน 3.1 จนครบทุกตัวอย่าง

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

3.3.1 นำข้อมูลที่บันทึกค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุมต่าง ๆ ของแร่ควอตซ์ มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม DIFFRAC^{Plus} EVA โดยเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้กับฐานข้อมูล PDFJcp.2cat ซึ่งมีในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสามารถวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ระนาบของการเลี้ยวเบนและระยะห่างระหว่างผลึก

3.3.2 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ระนาบของการเลี้ยวเบนและระยะห่างระหว่างผลึก จากข้อมูลที่บันทึกค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุมต่าง ๆ ในขั้นตอน 3.2 จนครบทุกตัวอย่าง

3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ

3.4.1 นำผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ซับซ้อนมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ชนิดเดียวและสารผสมตัวอย่างมาตรฐานที่มีแร่ต่าง ๆ ผสมกัน ถ้ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ทั้งสองมีเส้นรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งมุมต่าง ๆ สอดคล้องกันดีก็น่าจะเป็นการยืนยันผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างเซรามิกส์ว่ามีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

3.4.2 นำผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ซับซ้อนมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ชนิดเดียวกันหลังการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแร่ในสารตัวอย่าง โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึกของแร่ในสารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมีด้วยธาตุที่ถูกชะล้างออกไปจะมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ของแร่นั้นลดลงหรือหายไป ซึ่งสามารถตรวจสอบความถูกต้องได้จากการวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอมที่ใช้ตรวจสอบชนิดของธาตุที่ถูกชะล้างออกไป ถ้าธาตุที่ถูกชะล้างออกไปสอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างผลึกของแร่นั้น ก็เป็นการยืนยันถึงผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวอย่างเซรามิกส์ว่ามีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้อีกวิธีหนึ่ง



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ ในเซรามิกส์

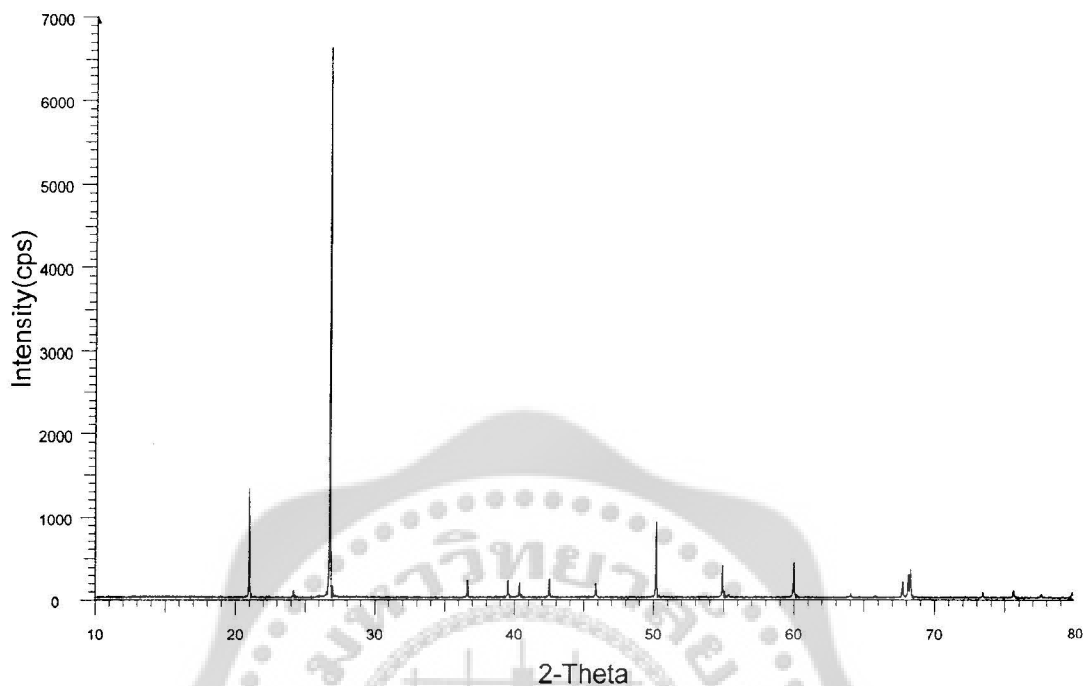
รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างมาตรฐานของแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่แคลไซต์ แร่เฮมาไทต์และอลูมินาออกไซด์ จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1.1 แสดงดังภาพประกอบ 12-17 จากภาพประกอบ 17 จะเห็นได้ว่ามีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากสารตัวอย่างแร่อลูมินาออกไซด์ มีค่าความเข้มรังสีเอกซ์เลี้ยวเบนที่ไม่สูงนักอยู่ในอันดับ 10^2 cps เท่านั้น แสดงว่าโอกาสที่จะวิเคราะห์แร่อลูมินาออกไซด์ที่ผสมอยู่กับแร่ควอตซ์ทำได้ยากมาก ซึ่งข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างมาตรฐานแสดงดังตาราง 3-8

ประเภทสารตัวอย่างเซรามิกส์จากที่ต่าง ๆ ในประเทศไทยที่นำมาวิเคราะห์แสดงไว้ในตาราง 9 โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ในตาราง 9 แสดงดังภาพประกอบ 18-33 และการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ทั้งหลายในสารตัวอย่างเซรามิกส์ดังกล่าวแสดงดังตาราง 10 สำหรับข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สารตัวอย่างเซรามิกส์เหล่านั้น แสดงดังตาราง 11-26

สำหรับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์กับแร่อลูมินาออกไซด์ แร่ควอตซ์กับแร่เฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์กับแร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์กับแร่เฮมาไทต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 50:50 และ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1.3 แสดงดังภาพประกอบ 34-48 ซึ่งข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงดังตาราง 27-41

4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ สารตัวอย่างเซรามิกส์

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพประกอบ 49 - 54 ซึ่งข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์แสดงดังตาราง 42-47 และผลการวิเคราะห์ธาตุที่ถูกชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกด้วยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอม แสดงดังตาราง 48



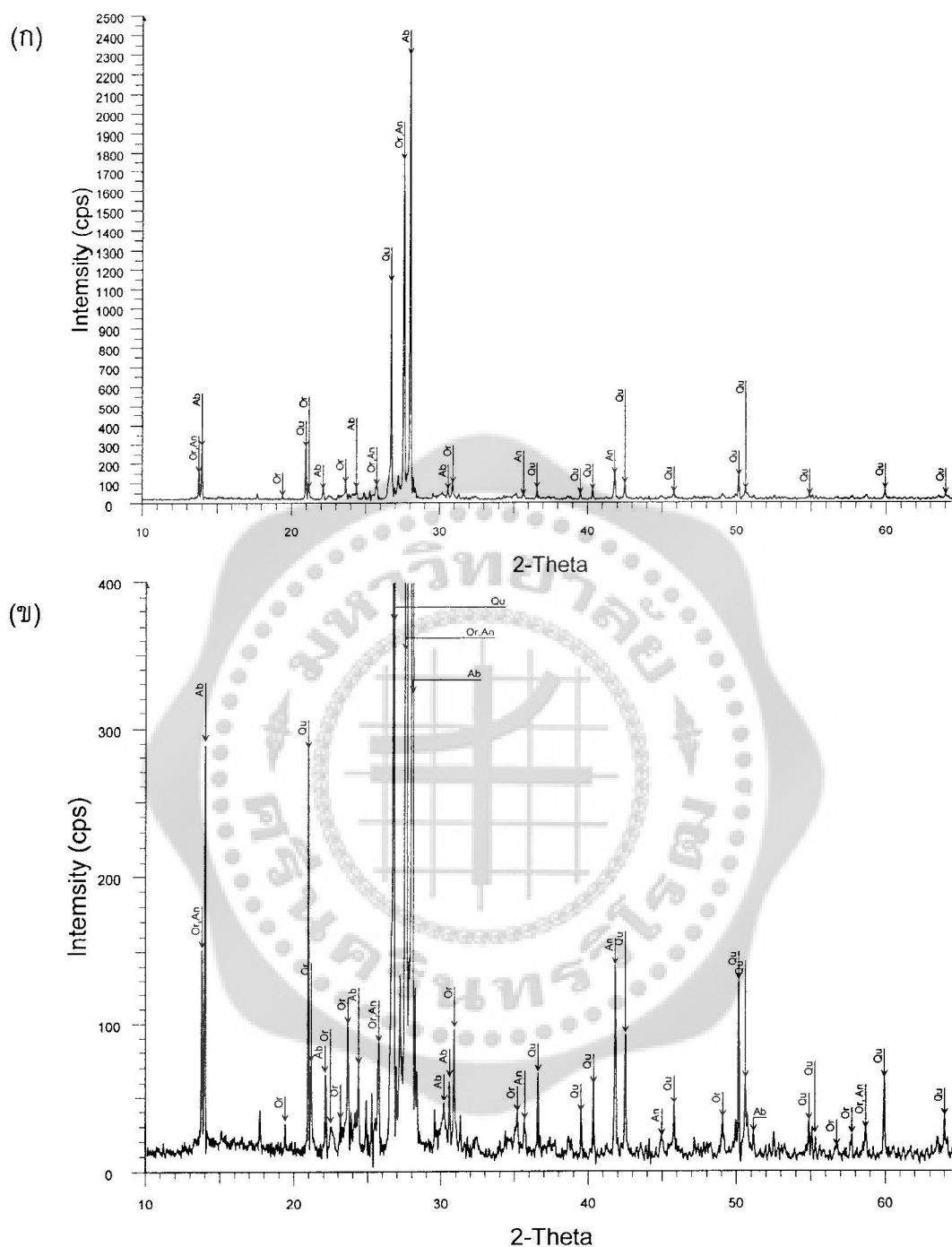
ภาพประกอบ 12 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่ควอตซ์ โดยมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 7000 cps และค่ามุมในแนวนอน ช่วง 10 ถึง 80 องศา

ตาราง 3 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่ควอตซ์ ในภาพประกอบ 12

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l
20.90	4.2466	19.9	1	0	0
26.68	3.3385	100.0	1	0	1
36.56	2.4560	3.3	1	1	0
39.51	2.2791	3.9	1	0	2
40.33	2.2347	2.4	1	1	1
42.50	2.1253	3.9	2	0	0
45.82	1.9788	3.0	2	0	1
50.14	1.8180	7.7	1	1	2

ตาราง 3 (ต่อ)

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l
54.87	1.6718	3.8	2	0	2
59.96	1.5416	4.2	2	1	1
67.75	1.3819	2.9	2	1	2
68.14	1.3750	3.3	2	0	3
68.33	1.3717	6.6	3	0	1
73.46	1.2881	1.0	1	0	4
75.65	1.2561	1.0	3	0	2
77.69	1.2282	0.7	2	2	0



ภาพประกอบ 13 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างที่ประกอบด้วยแร่เฟลด์สปาร์หลายชนิดและมีแร่ควอตซ์ผสมอยู่ด้วยเล็กน้อย โดยมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 2500 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

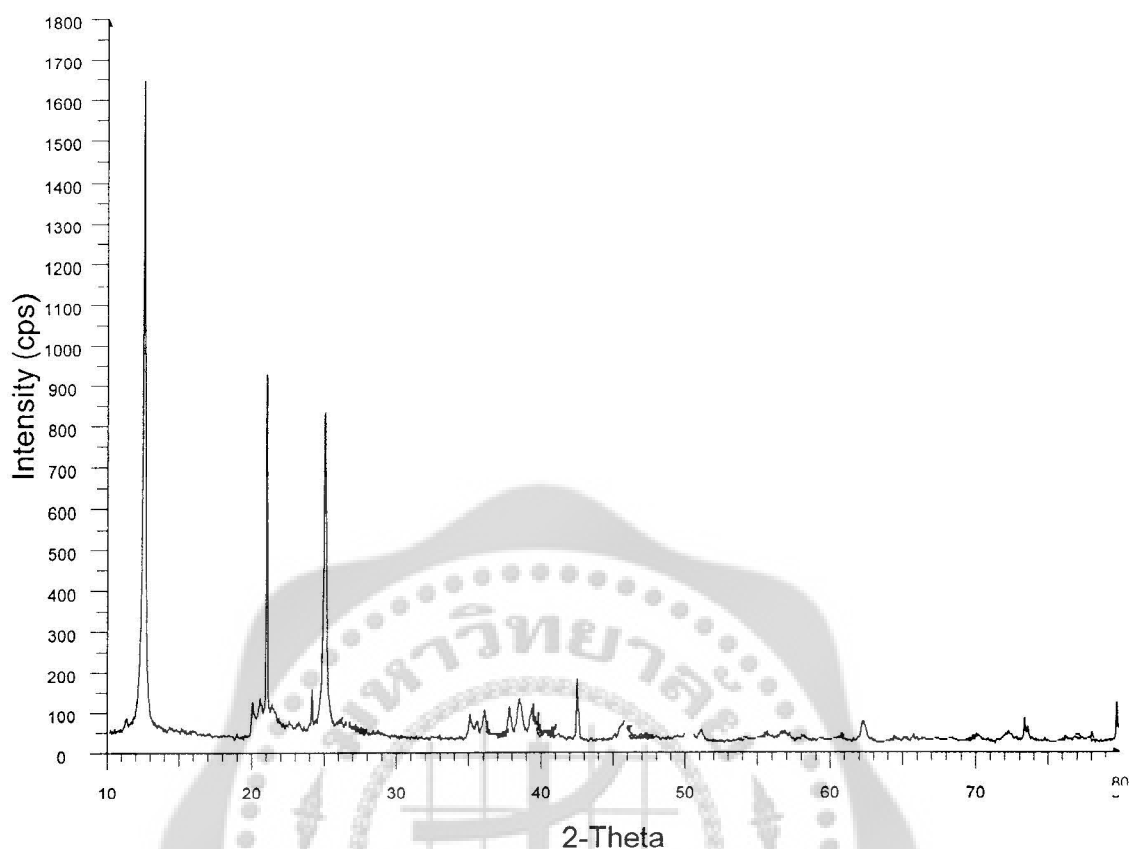
(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 400 cps Qu=Quartz, Ab=Albite, Or=Orthoclase An=Anorthoclase

ตาราง 4 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างที่ประกอบด้วย
แร่เฟลด์สปาร์หลายชนิดและมีแร่ควอตซ์ผสมอยู่ด้วยเล็กน้อยในภาพประกอบ 13

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
13.65	6.4815	9.5	0	0	1	Or
13.67	6.4738	8.2	0	2	0	An
13.85	6.3900	8.5	0	0	1	Ab
19.36	4.5817	1.2	0	2	1	Or
20.87	4.2534	16.2	1	0	0	Qu
21.04	4.2183	3.3	$\bar{2}$	0	1	Or
22.03	4.0315	4.1	$\bar{2}$	0	1	Ab
22.56	3.9385	1.5	1	1	1	Or
23.08	3.8496	2.2	2	0	0	Or
23.57	3.7716	6.3	1	3	0	Or
24.27	3.6637	4.0	$\bar{1}$	$\bar{3}$	1	Ab
25.64	3.4712	4.7	$\bar{1}$	1	2	Or
25.64	3.4713	5.0	$\bar{2}$	2	1	An
26.64	3.3437	56.4	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	99.4	0	4	0	An
27.52	3.2380	99.4	0	0	2	Or
27.90	3.1950	100.0	0	0	2	Ab
30.13	2.9638	2.7	1	$\bar{3}$	1	Ab
30.46	2.9320	2.6	0	$\bar{2}$	2	Ab
30.79	2.9008	5.1	0	4	1	Or
35.11	2.5536	2.4	1	1	2	Or
35.63	2.5175	1.7	1	1	2	An
36.54	2.4571	3.5	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	2.1	1	0	2	Qu
40.30	2.2358	3.3	1	1	1	Qu
41.82	2.1579	6.0	0	6	0	An

ตาราง 4 (ต่อ)

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
42.45	2.1278	3.3	2	0	0	Qu
45.00	2.0128	1.3	3	1	1	An
45.79	1.9797	2.8	2	0	1	Qu
49.04	1.8559	2.1	$\bar{3}$	5	2	Or
50.18	1.8180	7.1	1	1	2	Qu
50.61	1.8020	3.8	0	0	3	Qu
51.14	1.7847	1.5	$\bar{2}$	0	4	Ab
54.87	1.6718	1.9	2	0	2	Qu
55.33	1.6589	1.4	1	0	3	Qu
56.82	1.6189	1.0	$\bar{1}$	3	4	Or
57.83	1.5931	1.2	$\bar{4}$	2	4	Or
58.72	1.5711	1.7	0	8	1	An
58.72	1.5411	1.7	0	2	4	Or
59.96	1.5416	3.9	2	1	1	Qu
64.03	1.4530	2.0	1	1	3	Qu



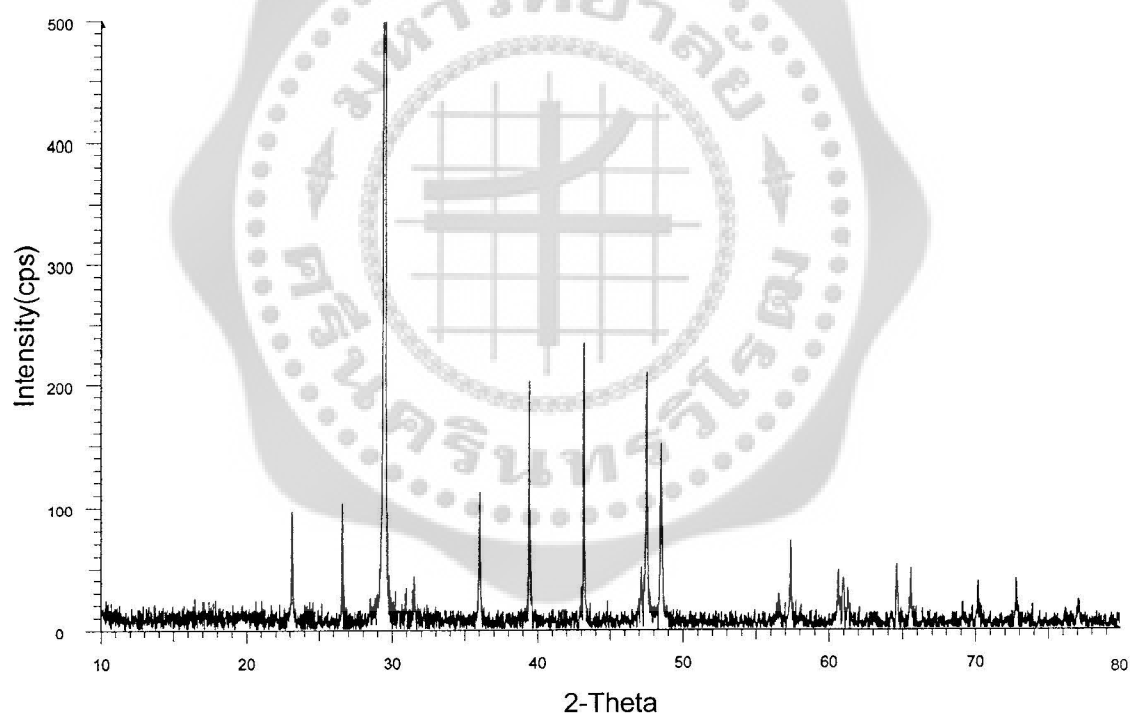
ภาพประกอบ 14 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เคโอลิไนต์ โดยมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1800 cps และค่ามุมในแนวนอน ช่วง 10 ถึง 80 องศา

ตาราง 5 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เคโอลิไนต์ ในภาพประกอบ 14

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l
12.39	7.1359	100.0	0	0	2
21.03	4.2211	21.4	0	2	1
24.91	3.5711	46.5	0	0	4
35.05	2.5584	5.7	1	3	0
35.45	2.5300	4.4	2	0	0
36.18	2.4809	4.1	1	3	1
37.77	2.3800	6.3	0	0	6

ตาราง 5 (ต่อ)

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l
38.38	2.3433	6.7	1	3	2
42.52	2.1245	10.5	2	2	1
51.14	1.7848	3.0	0	0	8
62.44	1.4862	4.2	1	5	4
73.46	1.2881	4.0	3	3	4
73.67	1.2848	3.5	$\bar{4}$	0	2
79.89	1.1998	6.5	0	6	7

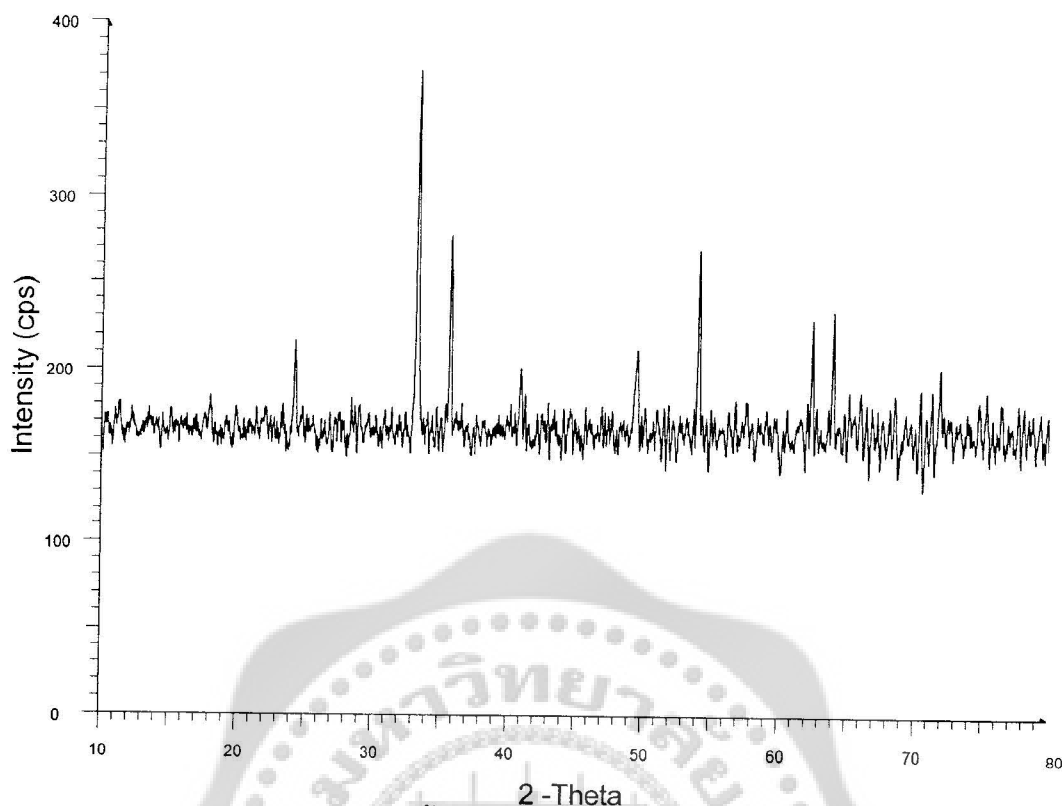


ภาพประกอบ 15 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่แคลไซต์

โดยมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps และค่ามุมในแนวแกนช่วง 10 ถึง 80 องศา

ตาราง 6 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่แคลไซต์
ในภาพประกอบ 15

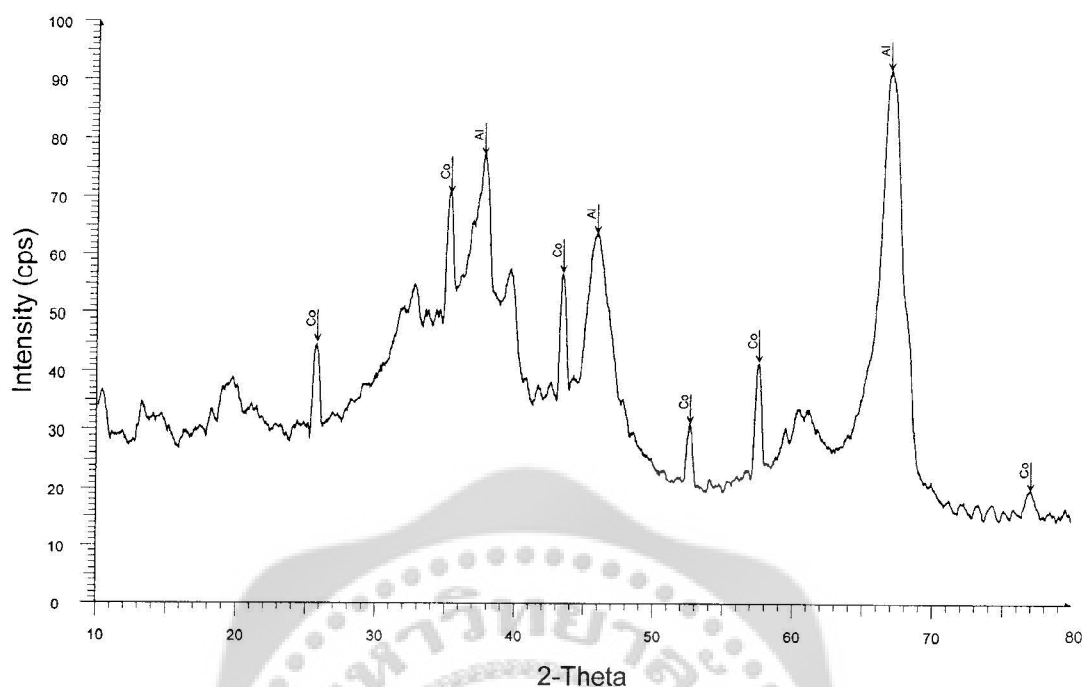
มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l
23.02	3.8605	3.1	0	1	2
29.42	3.0341	100.0	1	0	4
31.43	2.8444	0.9	0	0	6
35.97	2.4645	3.1	1	1	0
39.41	2.2844	5.0	1	1	3
43.14	2.0951	6.2	2	0	2
47.13	1.9266	0.9	0	2	4
47.49	1.9131	4.4	0	1	8
48.53	1.8746	3.1	1	1	6
56.55	1.6260	0.4	2	1	1
57.41	1.6038	1.7	1	2	2
60.68	1.5249	1.2	2	1	4
60.98	1.5182	0.9	2	0	8
61.36	1.5098	0.5	1	1	9
64.67	1.4402	1.3	3	0	0
65.59	1.4222	0.4	0	0	12
70.24	1.3390	0.6	0	2	10
72.87	1.2970	1.0	1	2	8
76.31	1.2469	0.3	2	2	0
77.19	1.2349	0.3	1	1	12



ภาพประกอบ 16 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เฮมาไทต์ โดยมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 400 cps และค่ามุมในแนวนอน ช่วง 10 ถึง 80 องศา

ตาราง 7 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่เฮมาไทต์ ในภาพประกอบ 16

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l
24.11	3.6888	57.1	0	1	2
33.21	2.6957	100.0	1	0	4
35.61	2.5191	73.5	1	1	0
40.86	2.2069	53.5	1	1	3
49.57	1.8376	57.1	0	2	4
54.10	1.6940	69.8	1	1	6
62.46	1.4857	61.5	2	1	4
63.98	1.4540	60.5	3	0	0
69.61	1.3495	42.6	2	0	8
71.93	1.3116	54.0	1	0	10



ภาพประกอบ 17 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่ลูมินาออกไซด์ โดยมีค่าความเข้มรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 100 cps และค่ามุมในแนวนอน ช่วง 10 ถึง 80 องศา Al=Alumina Oxide, Co=Corundum

ตาราง 8 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างแร่ลูมินาออกไซด์ ในภาพประกอบ 17

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
ผลึก (อังสตรอม)						
25.58	3.4800	51	0	1	2	Co
35.16	2.5504	81.5	1	0	4	Co
37.45	2.3995	82.4	3	1	1	Al
43.35	2.0855	65.3	1	1	3	Co
45.80	1.9797	73.2	4	0	0	Al
52.55	1.7400	34.9	0	2	4	Co
57.51	1.6013	47.2	1	1	6	Co
67.31	1.3899	100	4	4	1	Al
76.86	1.2393	22.3	1	0	10	Co

ตาราง 9 แสดงประเภทสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่ได้จากที่ต่างๆ ในประเทศไทย

ตัวอย่าง	ประเภท	ลักษณะ	แหล่งผลิต
SP 1*	เครื่องปั้นดินเผา	ครก สีน้ำตาลดำ	จ.นครราชสีมา
SP 2*		กระถางต้นไม้รูปนกยูง สีน้ำตาลดำ	จ.นครราชสีมา
SP 3		ฝาหม้อดินขาว สีขาวครีม	จ.สมุทรปราการ
SP 4		อ่างเลี้ยงปลา สีแดงอ่อน	จ.นนทบุรี
SP 5		กระถางต้นไม้ สีแดงอ่อน	จ.อ่างทอง
SP 6		ของที่ระลึกรูปเต่า สีน้ำตาลอ่อน	จ.สุโขทัย
SP 7*		กระบวยตักน้ำ สีแดงเข้ม	จ.นครสวรรค์
ST 1	กระเบื้อง	กระเบื้องปูพื้น สีขาว เผาที่อุณหภูมิ 1,100-1,200°C	จ.อ่างทอง
ST 2*		กระเบื้องปูพื้น สีแดงอ่อน เผาที่อุณหภูมิ 800°C	จ.อ่างทอง
ST 3		กระเบื้องปูพื้น สีแดงเข้ม เผาที่อุณหภูมิ 800°C	จ.อ่างทอง
ST 4		กระเบื้องประดับ สีแดงเข้ม เผาที่อุณหภูมิ 800°C	จ.อ่างทอง
SB 1	อิฐ	อิฐทนไฟ สีขาว เผาที่อุณหภูมิ 1,100-1,200°C	จ.อ่างทอง
SB 2*		อิฐมอญ สีแดงเข้ม เผาที่อุณหภูมิ 800°C	จ.อ่างทอง
SB 3		อิฐประดับ สีแดงอ่อน เผาที่อุณหภูมิ 800°C	จ.อ่างทอง
SB 4		อิฐโปร่ง สีแดงเข้ม เผาที่อุณหภูมิ 800°C	จ.อ่างทอง
SR	ปอร์ซเลน	ถ้วยกาแฟ สีขาว เผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,350°C	จ.นครปฐม

หมายเหตุ * คือ สารตัวอย่างเซรามิกส์ที่เลือกมาชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก

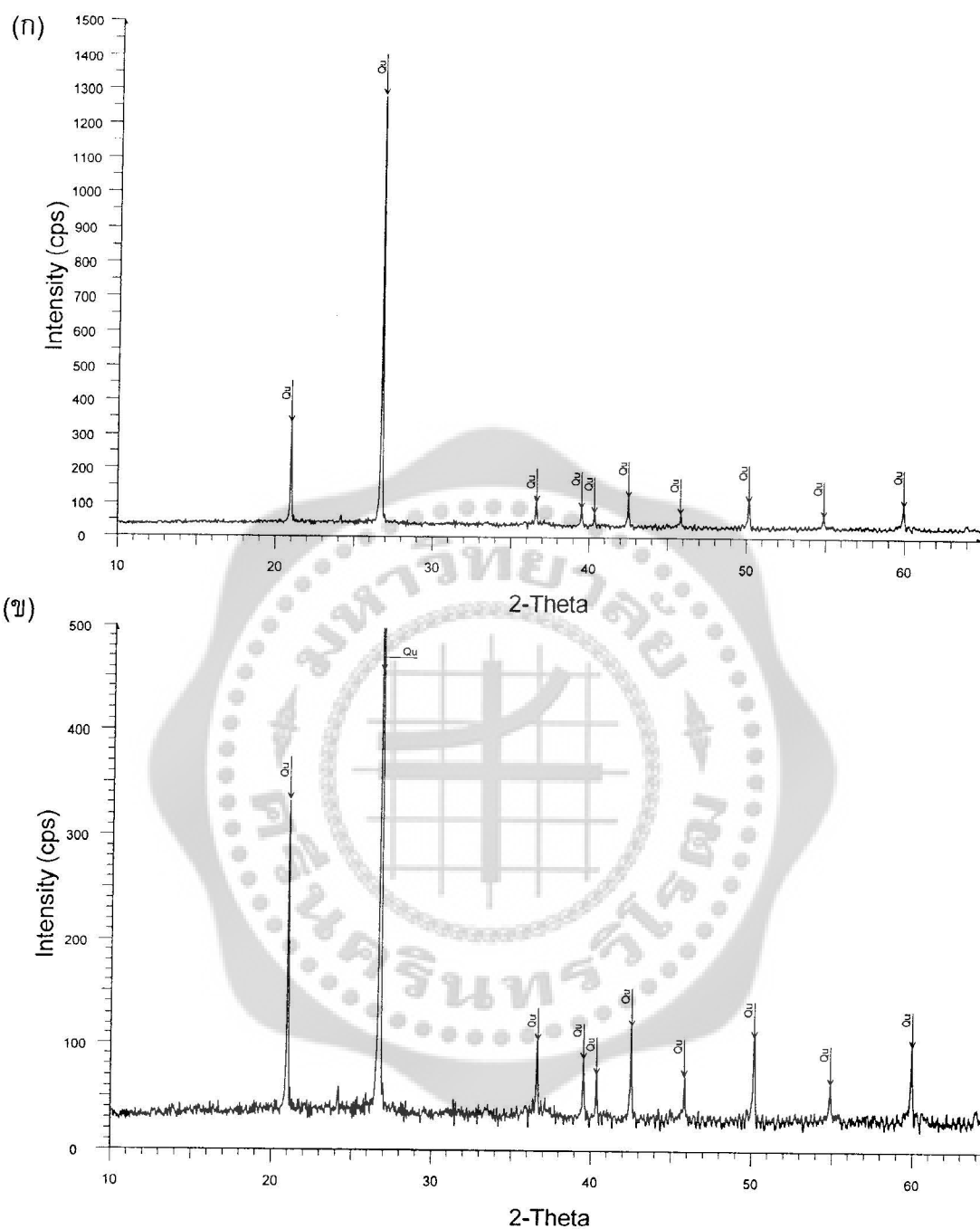
ตาราง 10 แสดงการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ จำนวน 16 ตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ชื่อแร่ ¹	ส่วนประกอบทางเคมี	โครงสร้างผลึก
SP 1	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
SP 2	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่คริสโตบาไลต์	SiO ₂	เตตระโกนอล
	3. แร่มัลไลต์	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	ออโรมบิก
SP 3	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่มัลไลต์	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	ออโรมบิก
SP 4	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่อัลไบต์	NaSi ₃ (AlO ₈)	ไตรคลีนิก
SP 5	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
	3. แร่อะนอร์โทเคลส	(Na _{0.75} K _{0.25})(AlSi ₃ O ₈)	ไตรคลีนิก
SP 6	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่อัลไบต์	NaSi ₃ (AlO ₈)	ไตรคลีนิก
	3. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
SP 7	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่แมกนีไทต์	Fe ₃ O ₄	ออโรมบิก
	3. แร่อะนอร์โทเคลส	(Na _{0.75} K _{0.25})(AlSi ₃ O ₈)	ไตรคลีนิก
	4. แร่ลิวไซต์	KAlSi ₂ O ₆	คิวบิก
ST 1	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
ST 2	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
ST 3	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่เฮมาไทต์	Fe ₂ O ₃	เฮกซะโกนอล
	3. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก

ตาราง 10 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ชื่อแร่ ¹	ส่วนประกอบทางเคมี	โครงสร้างผลึก
ST 4	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่เฮมาไทต์	Fe ₂ O ₃	เฮกซะโกนอล
	3. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
	4. แร่อัลไบต์	NaSi ₃ (AlO ₈)	ไตรคลีนิก
SB 1	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
SB 2	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่เฮมาไทต์	Fe ₂ O ₃	เฮกซะโกนอล
	3. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
SB 3	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่อัลไบต์	NaSi ₃ (AlO ₈)	ไตรคลีนิก
	3. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
SB 4	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่เฮมาไทต์	Fe ₂ O ₃	เฮกซะโกนอล
	3. แร่ออโรเคลส	KSi ₃ (AlO ₈)	โมโนคลีนิก
	4. แร่อัลไบต์	NaSi ₃ (AlO ₈)	ไตรคลีนิก
SR	1. แร่ควอตซ์	SiO ₂	เฮกซะโกนอล
	2. แร่มัลไลต์	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	ออโรรมบิก

¹ Ford, W.E. (1932). *Text Book of Mineralogy*. New York: John Wiley & Son.

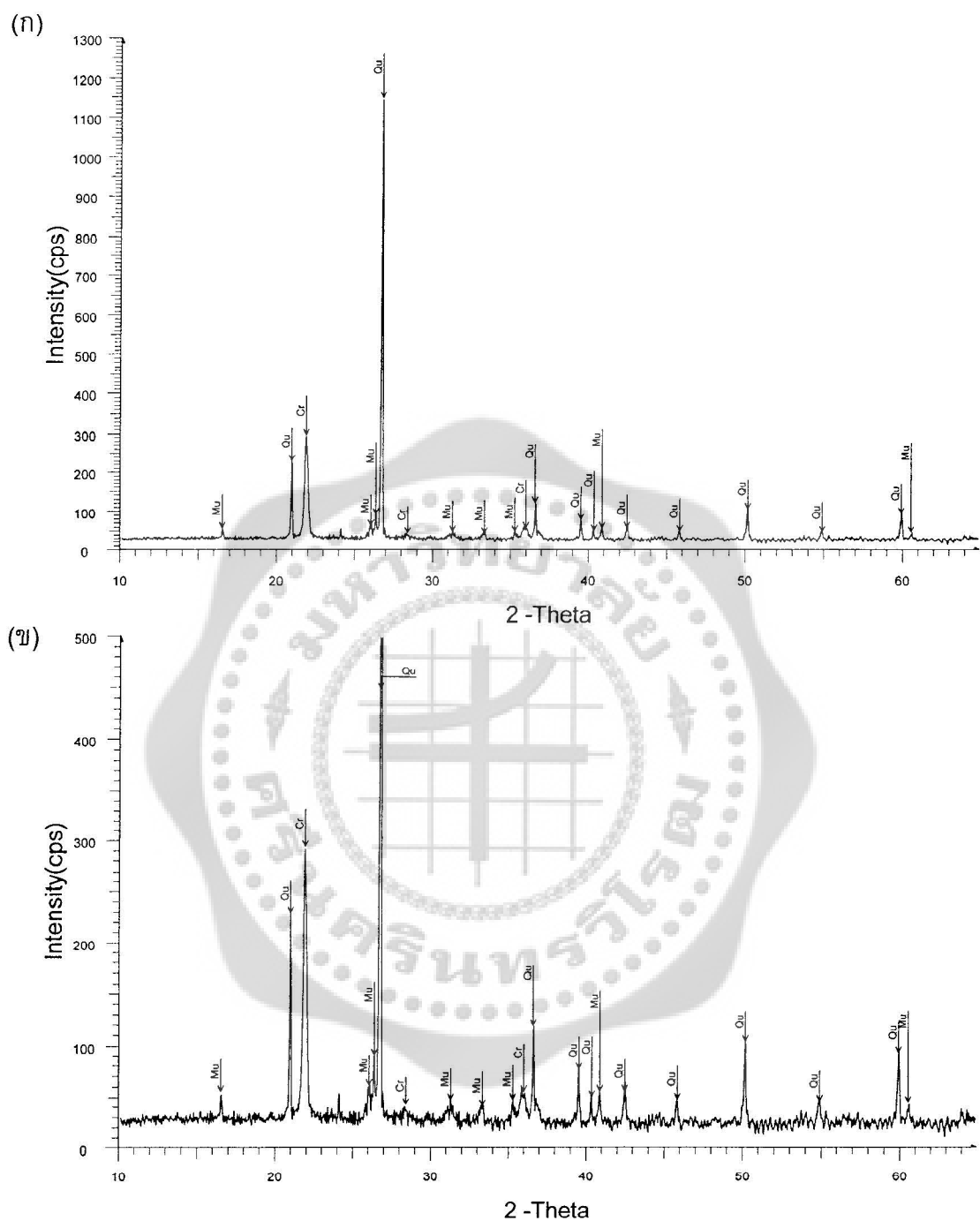


ภาพประกอบ 18 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP1 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1500 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz

ตาราง 11 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP1
ในภาพประกอบ 18

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	30.6	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	11.9	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	9.4	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	9.6	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	13.0	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	8.3	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	14.3	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	7.9	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	14.2	2	1	1	Qu



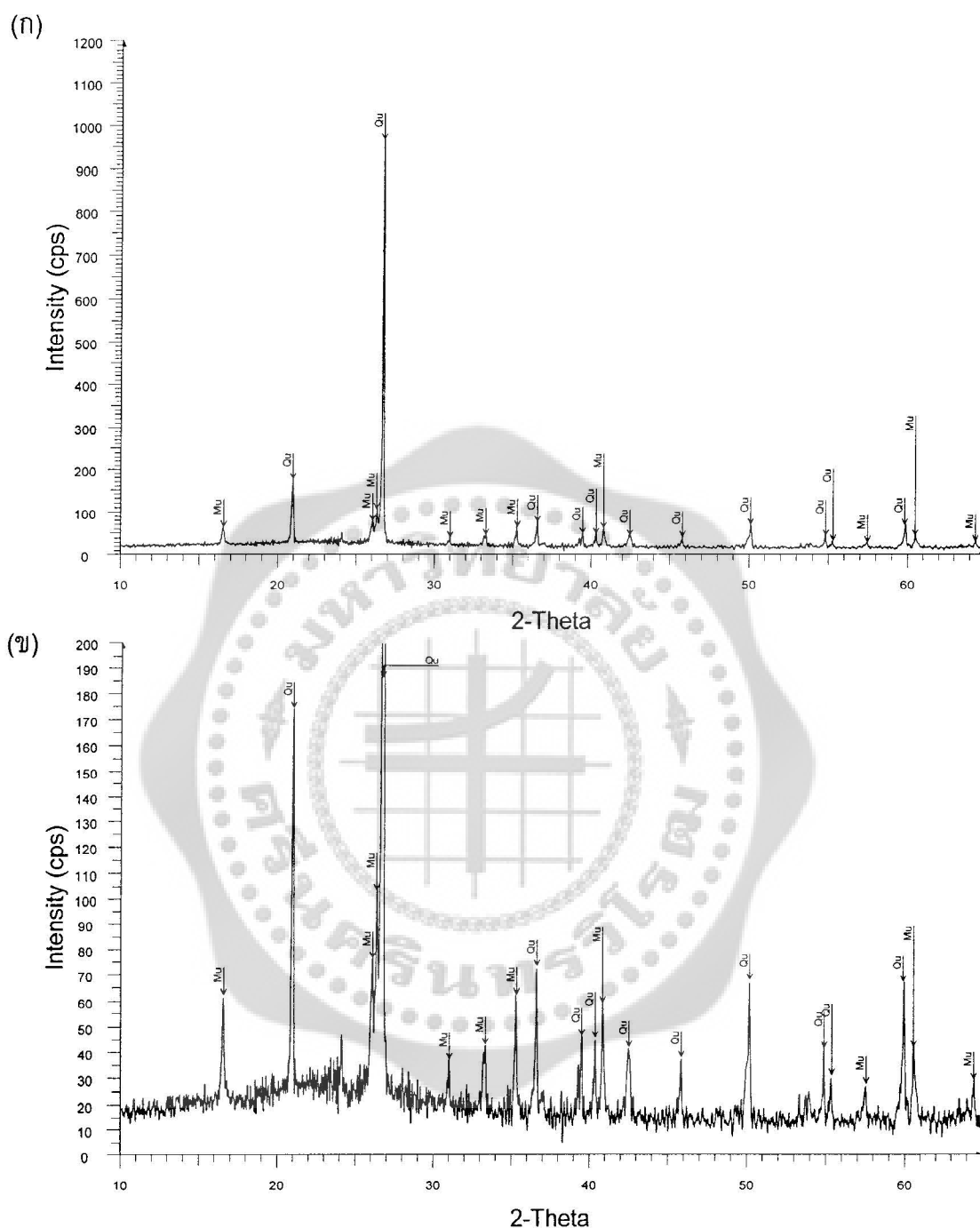
ภาพประกอบ 19 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP2

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1300 cps และค่ามุม
ในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการ
ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Mu=Mullite, Cr=Cristobalite

ตาราง 12 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP2
ในภาพประกอบ 19

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
16.34	5.3895	7.0	1	1	0	Mu
20.87	4.2534	30.3	1	0	0	Qu
21.81	4.0716	43.3	1	0	1	Cr
25.97	3.4276	7.6	1	2	0	Mu
26.28	3.3879	12.7	2	1	0	Mu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
28.24	3.1581	4.6	1	1	1	Cr
30.96	2.8865	5.3	0	0	1	Mu
33.24	2.6930	5.4	2	2	0	Mu
35.23	2.5451	5.3	1	1	1	Mu
35.09	2.4992	6.8	2	0	0	Cr
36.54	2.4571	10.0	1	1	0	Qu
39.51	2.2791	8.0	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	7.5	1	1	1	Qu
40.88	2.2057	8.1	1	2	1	Mu
42.45	2.1278	9.1	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.6	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	12.3	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	6.6	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	12.5	2	1	1	Qu
60.71	1.5244	4.0	3	3	1	Mu

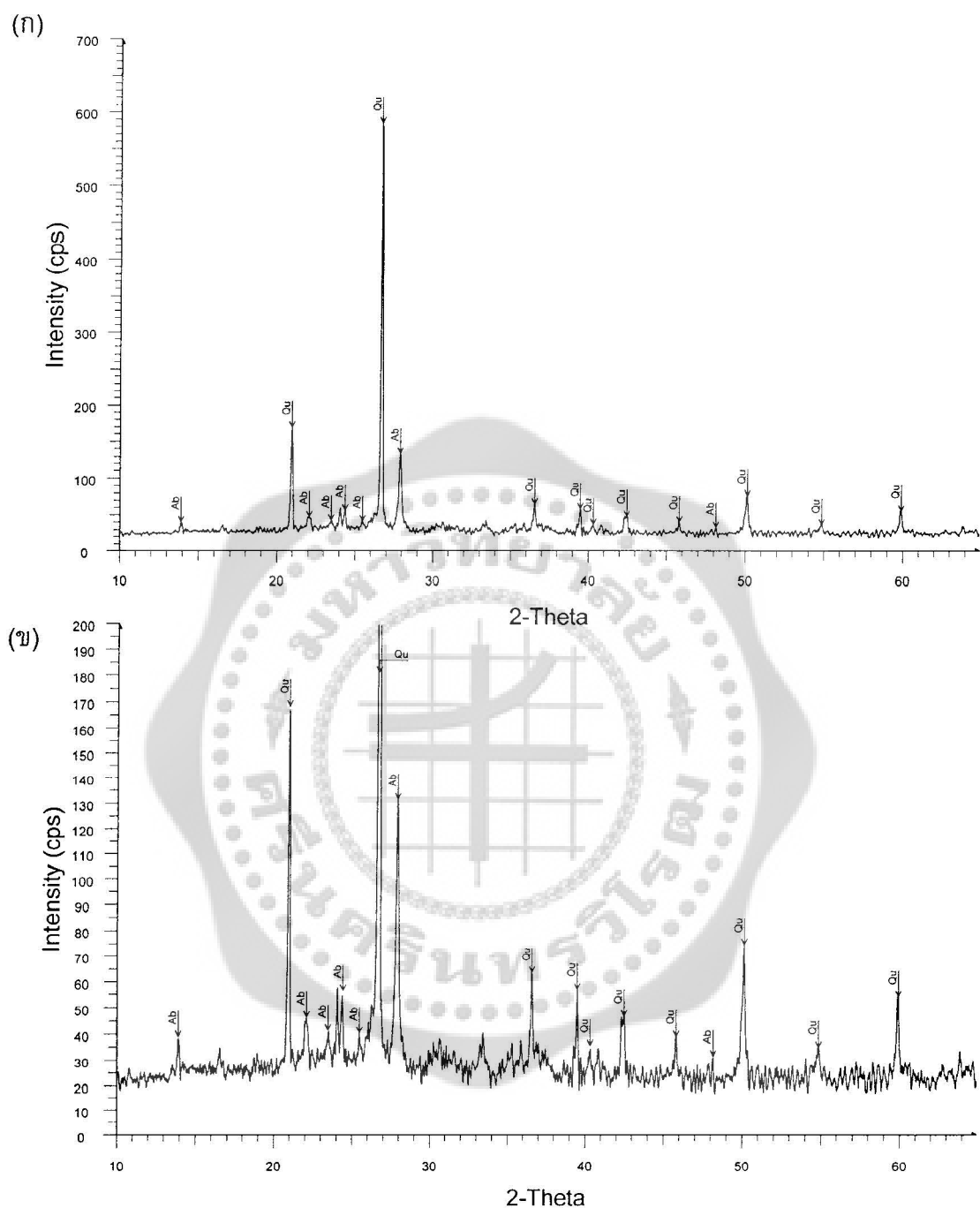


ภาพประกอบ 20 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP3 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1200 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 200 cps Qu=Quartz, Mu=Mullite

ตาราง 13 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP3
ในภาพประกอบ 20

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
16.34	5.3895	7.7	1	1	0	Mu
20.87	4.2549	18.5	1	0	0	Qu
25.97	3.4276	9.0	1	2	0	Mu
26.26	3.3907	11.8	2	1	0	Mu
26.64	3.3434	100.0	1	0	1	Qu
30.96	2.8865	4.7	0	0	1	Mu
33.22	2.6947	4.4	2	2	0	Mu
35.27	2.5425	6.3	1	1	1	Mu
36.54	2.4568	7.1	1	1	0	Qu
39.46	2.2814	5.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2361	4.4	1	1	1	Qu
40.88	2.2057	5.6	1	2	1	Mu
42.45	2.1277	4.9	2	0	0	Qu
45.80	1.9798	4.5	2	0	1	Qu
50.14	1.8179	7.5	1	1	2	Qu
54.87	1.6717	5.6	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	3.7	1	0	3	Qu
57.66	1.6000	3.0	0	4	1	Mu
59.96	1.5416	8.5	2	1	1	Qu
60.71	1.5244	3.4	3	3	1	Mu
64.57	1.4423	2.4	0	0	2	Mu



ภาพประกอบ 21 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP4

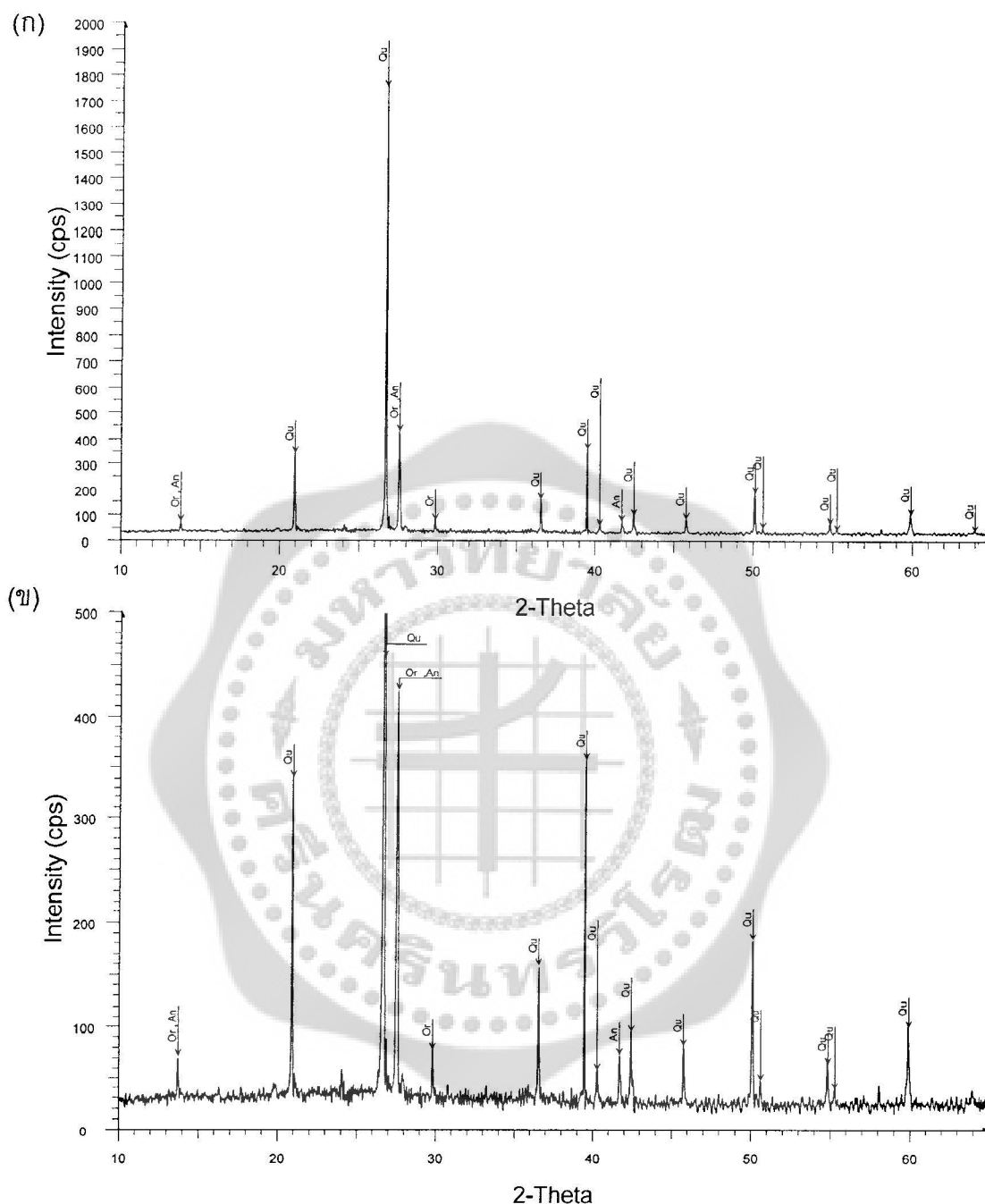
โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 700 cps และค่ามุม

ในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 200 cps Qu=Quartz, Ab=Albite

ตาราง 14 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP4
ในภาพประกอบ 21

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
13.85	6.3900	6.3	0	0	1	Ab
20.87	4.2534	28.6	1	0	0	Qu
22.03	4.0315	7.4	$\bar{2}$	0	1	Ab
23.53	3.7786	5.9	1	1	1	Ab
24.27	3.6637	9.1	$\bar{1}$	$\bar{3}$	1	Ab
25.36	3.5099	6.2	$\bar{1}$	$\bar{1}$	2	Ab
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.90	3.1950	17.7	0	0	2	Ab
36.54	2.4571	10.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	9.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.7	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	8.0	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.7	2	0	1	Qu
48.12	1.8893	5.2	2	2	2	Ab
50.14	1.8180	12.5	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.8	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	8.7	2	1	1	Qu

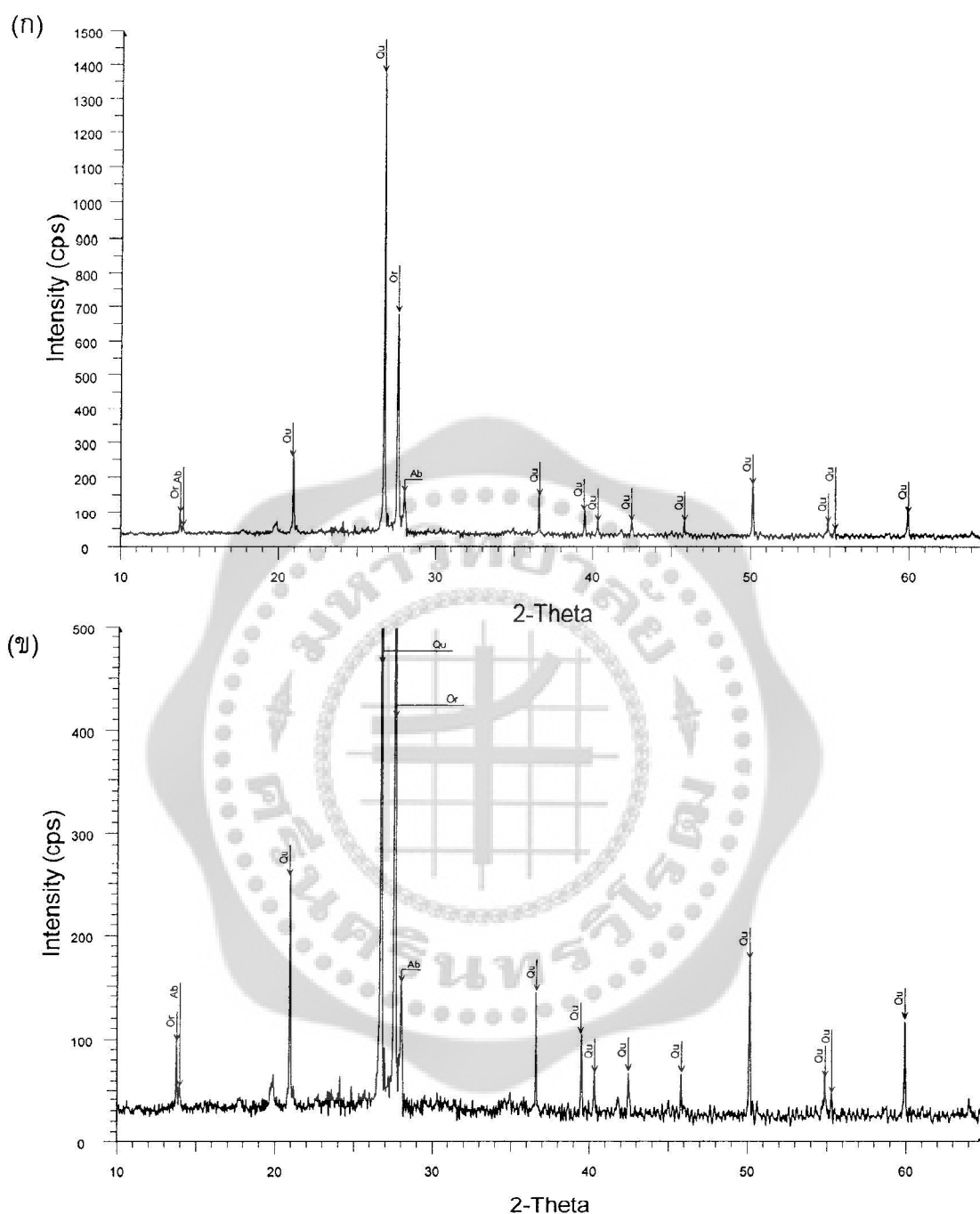


ภาพประกอบ 22 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP5 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 2200 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Or = Orthoclase, An=Anorthoclase

ตาราง 15 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP5
ในภาพประกอบ 22

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
13.65	6.4815	4.1	0	0	1	Or
13.67	6.4738	4.1	0	2	0	An
20.87	4.2534	19.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	25.3	0	4	0	An
27.52	3.2380	24.5	0	0	2	Or
29.84	2.9920	3.8	1	3	1	Or
36.54	2.4571	8.9	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	15.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	3.8	1	1	1	Qu
41.82	2.1579	3.7	0	6	0	An
42.45	2.1278	4.9	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.0	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.9	1	1	2	Qu
50.61	1.8020	2.2	0	0	3	Qu
54.87	1.6718	4.1	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	2.3	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	6.2	2	1	1	Qu



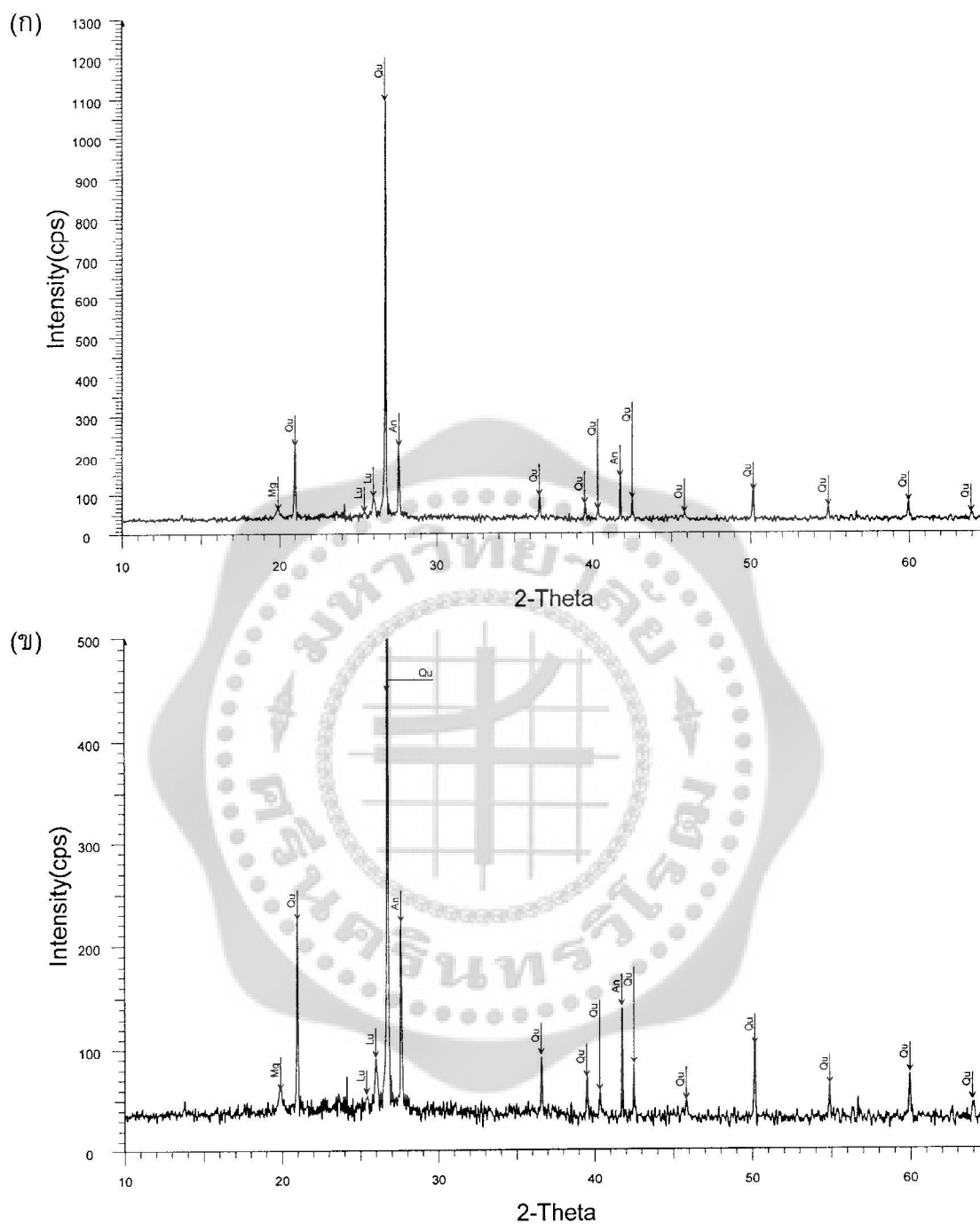
ภาพประกอบ 23 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP6

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1500 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Or = Orthoclase, Ab=Albite

ตาราง 16 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP6
ในภาพประกอบ 23

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	L	สัญลักษณ์
13.65	6.4815	7.2	0	0	1	Or
13.85	6.3900	4.0	0	0	1	Ab
20.87	4.2534	19.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	48.0	0	0	2	Or
27.90	3.1950	8.7	0	0	2	Ab
36.54	2.4571	9.5	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	7.2	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.0	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	4.6	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	4.8	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	13.4	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.8	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	3.2	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	8.5	2	1	1	Qu



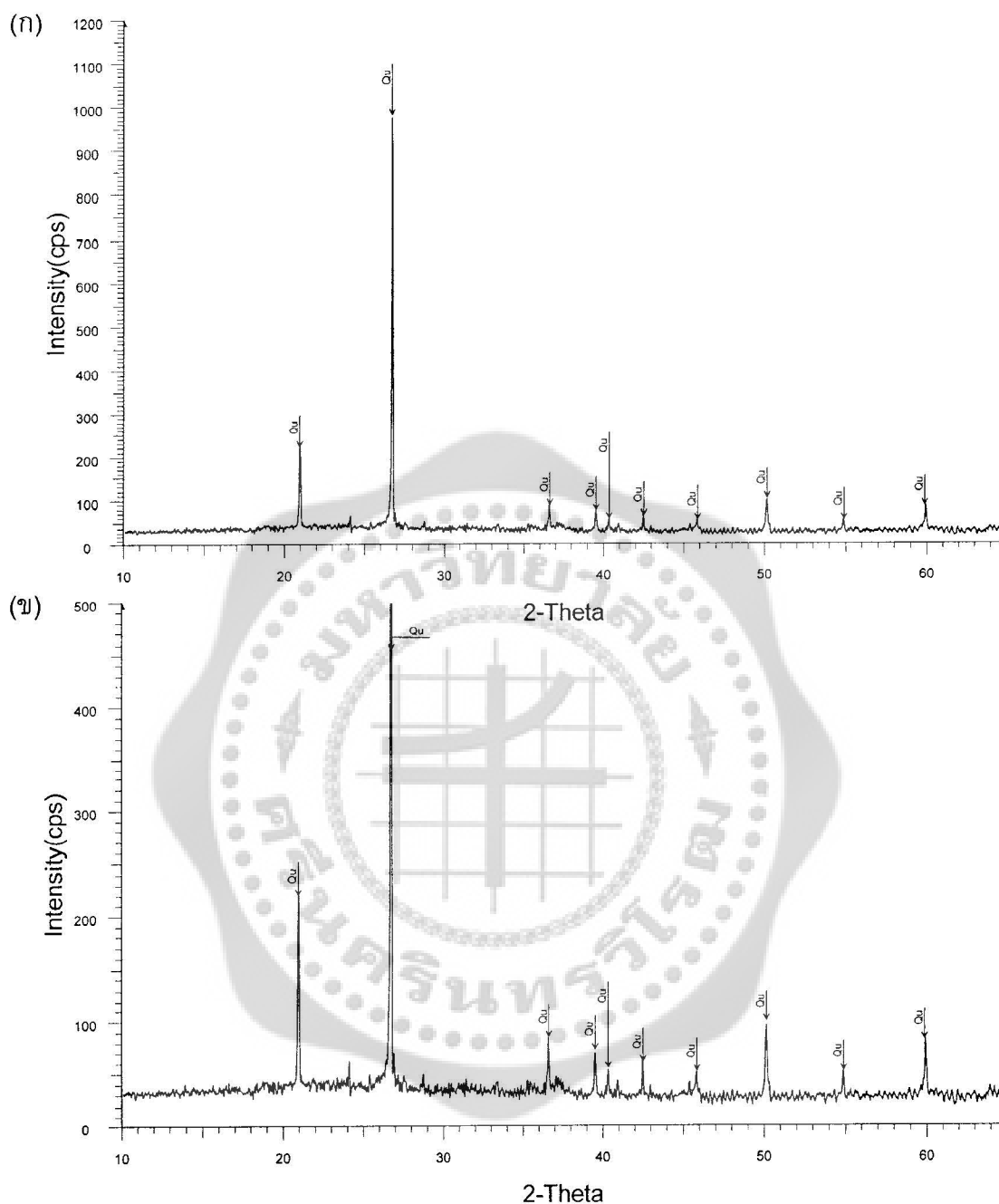
ภาพประกอบ 24 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1300 cps และค่ามุม
ในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูปแบบ (ก) ที่มีการ
ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, An = Anorthoclase,
Lu=Leucite, Mg=Magnetite

ตาราง 17 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7
ในภาพประกอบ 24

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
19.80	4.4814	9.8	2	1	2	Mg
20.87	4.2534	26.3	1	0	0	Qu
25.38	3.5069	8.1	3	2	1	Lu
25.89	3.4391	12.6	0	0	4	Lu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	31.3	0	4	0	An
36.54	2.4571	10.0	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	9.3	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	8.2	1	1	1	Qu
41.82	2.1579	18.4	0	6	0	An
42.45	2.1278	8.1	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	7.0	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	14.4	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	9.1	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	5.5	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	9.9	2	1	1	Qu

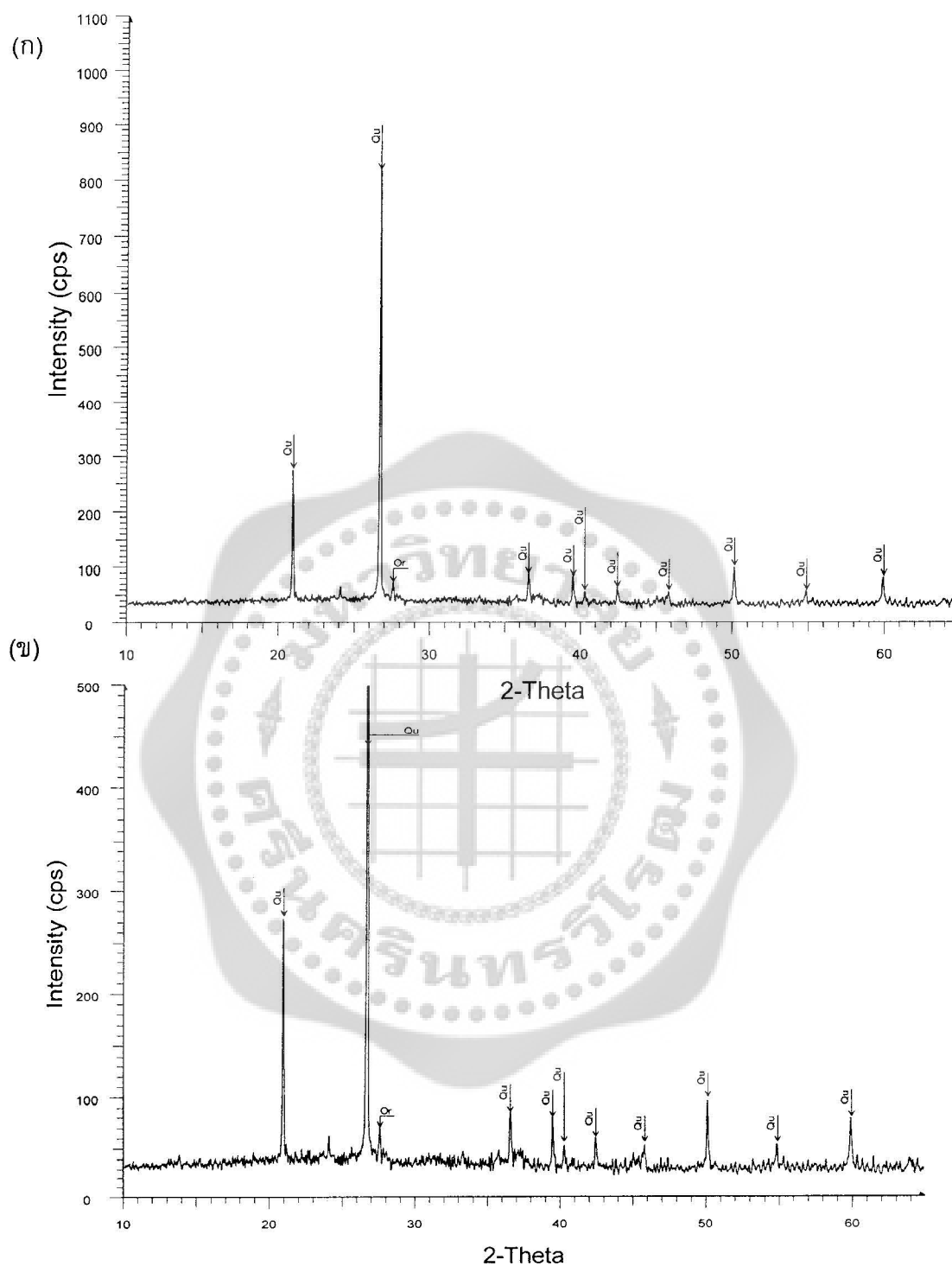


ภาพประกอบ 25 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST1 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1200 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz

ตาราง 18 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST1
ในภาพประกอบ 25

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	23.6	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	8.5	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	7.1	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.6	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	6.3	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.5	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.2	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.6	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	9.0	2	1	1	Qu

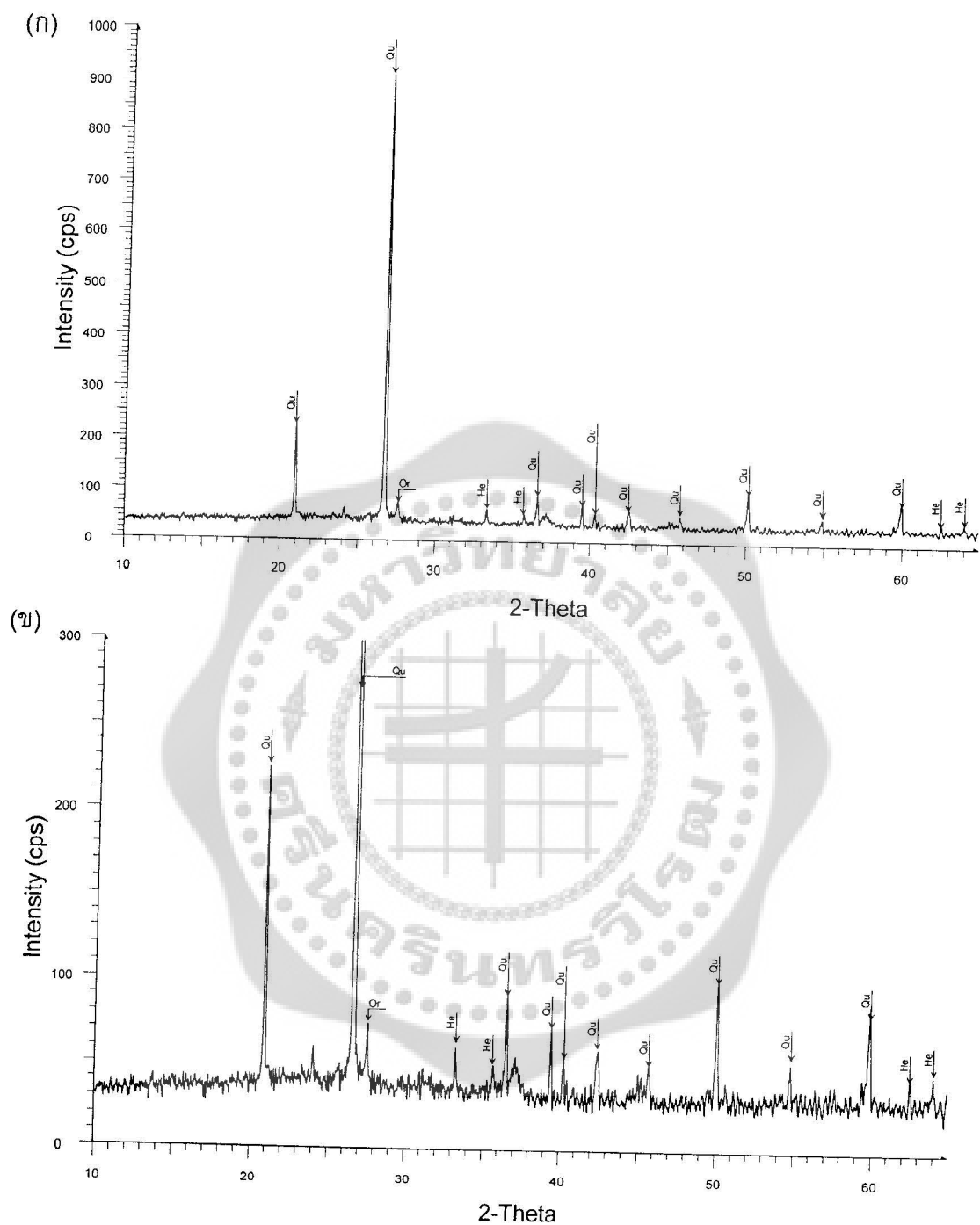


ภาพประกอบ 26 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1100 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Or=Orthoclase

ตาราง 19 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2
ในภาพประกอบ 26

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	33.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	8.4	0	0	2	Or
36.54	2.4571	10.3	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	9.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.5	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	7.0	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.2	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	11.4	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	6.3	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	9.3	2	1	1	Qu

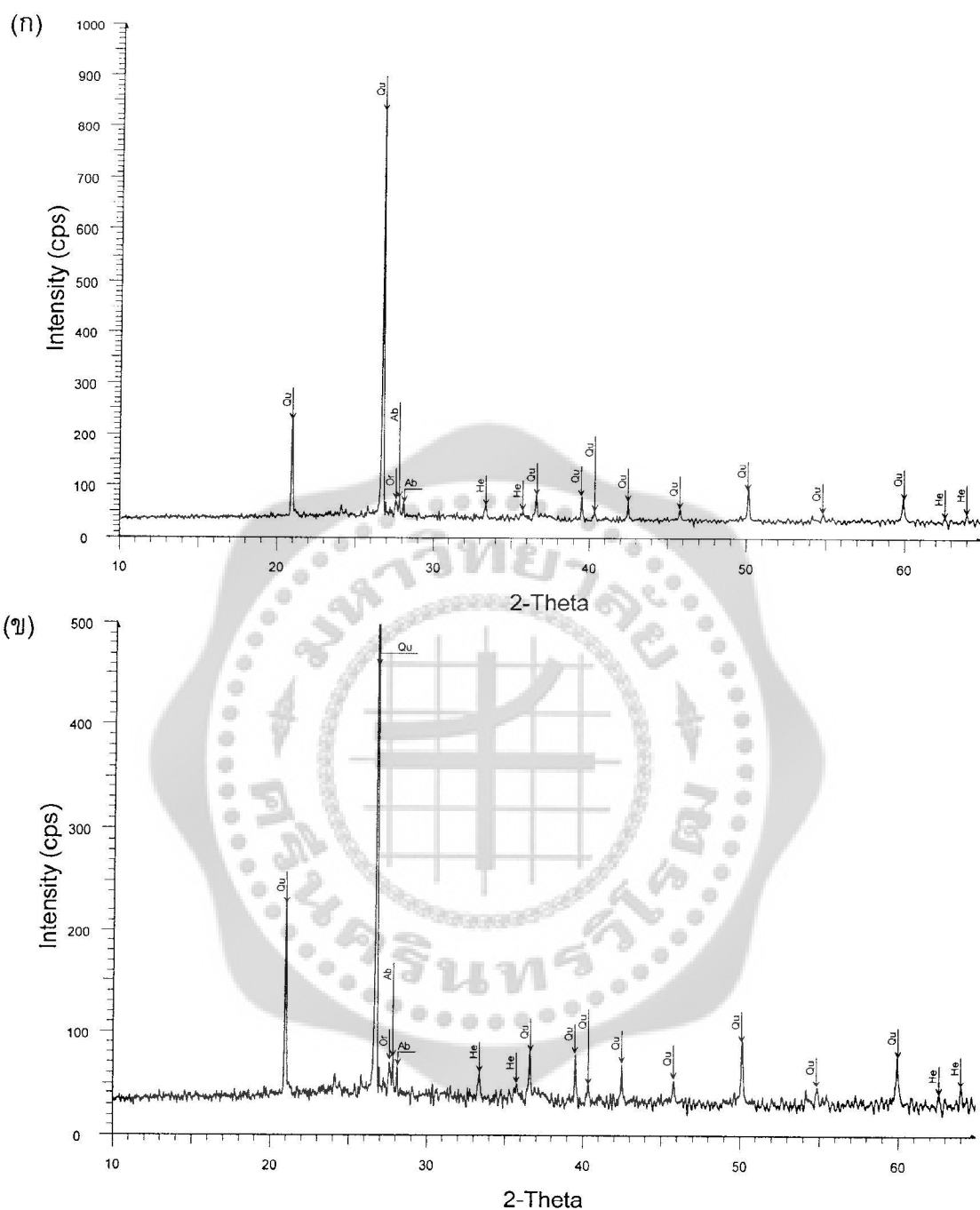


ภาพประกอบ 27 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST3 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1000 cps และค่ามุมในแนวอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 300 cps Qu=Quartz, Or=Orthoclase, He=Hematite

ตาราง 20 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST3
ในภาพประกอบ 27

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	26.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	7.4	0	0	2	Or
33.21	2.6957	4.3	1	0	4	He
35.61	2.5191	4.2	1	1	0	He
36.54	2.4571	10.4	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	8.3	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	6.7	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	6.8	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.3	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	12.5	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	6.1	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	10.5	2	1	1	Qu



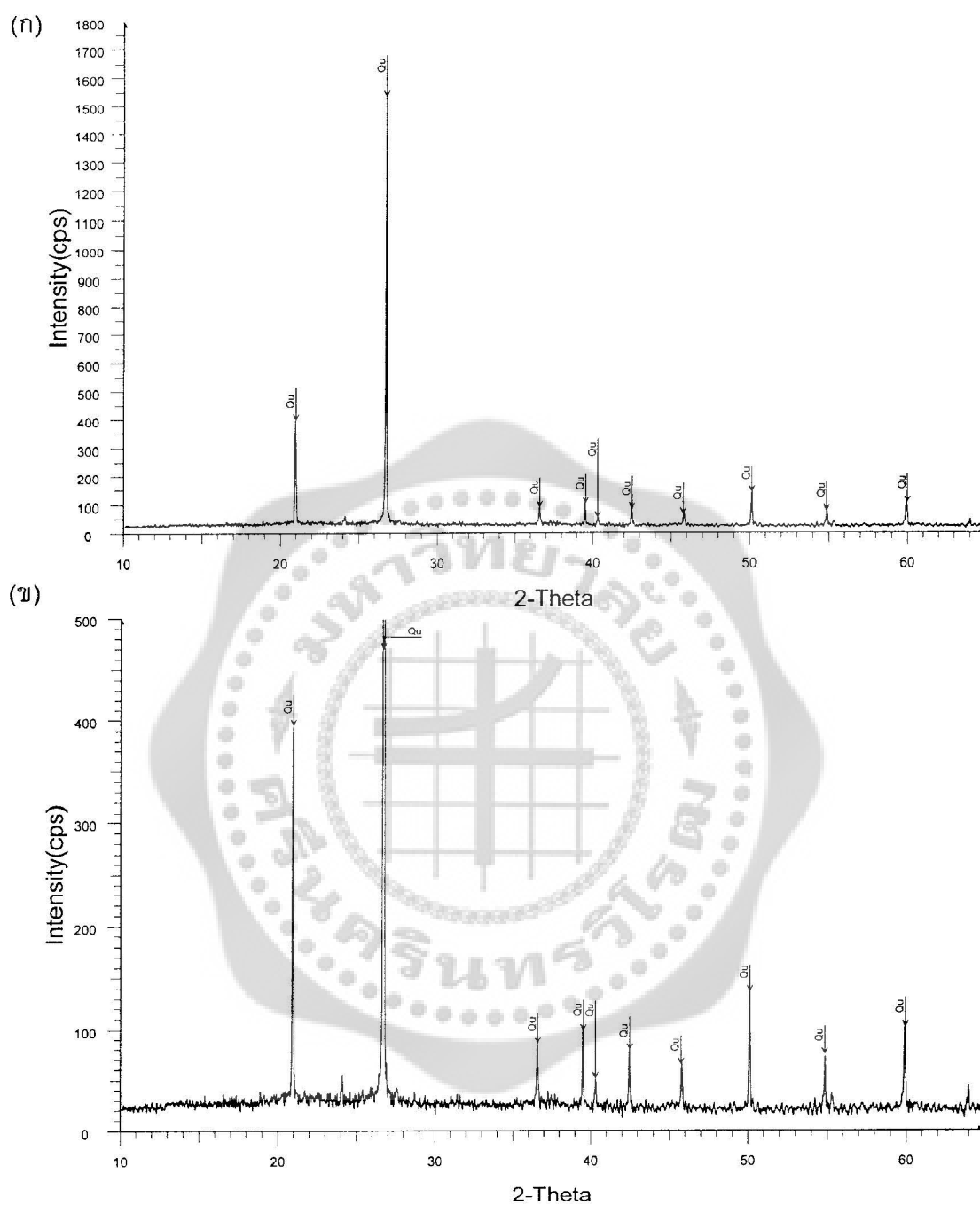
ภาพประกอบ 28 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST4

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1000 cps และค่ามุม
ในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการ
ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Or=Orthoclase, Ab=Albite,
He=Hematite

ตาราง 21 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST4
ในภาพประกอบ 28

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	29.9	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	8.5	0	0	2	Or
27.75	3.2126	9.6	0	4	0	Ab
27.90	3.1950	8.8	0	0	2	Ab
33.21	2.6957	4.7	1	0	4	He
35.61	2.5191	4.6	1	1	0	He
36.54	2.4571	9.9	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	9.3	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	6.3	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	8.4	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.8	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	12.3	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.9	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	9.9	2	1	1	Qu
62.46	1.4857	3.4	2	1	4	He
63.98	1.4540	4.4	3	0	0	He

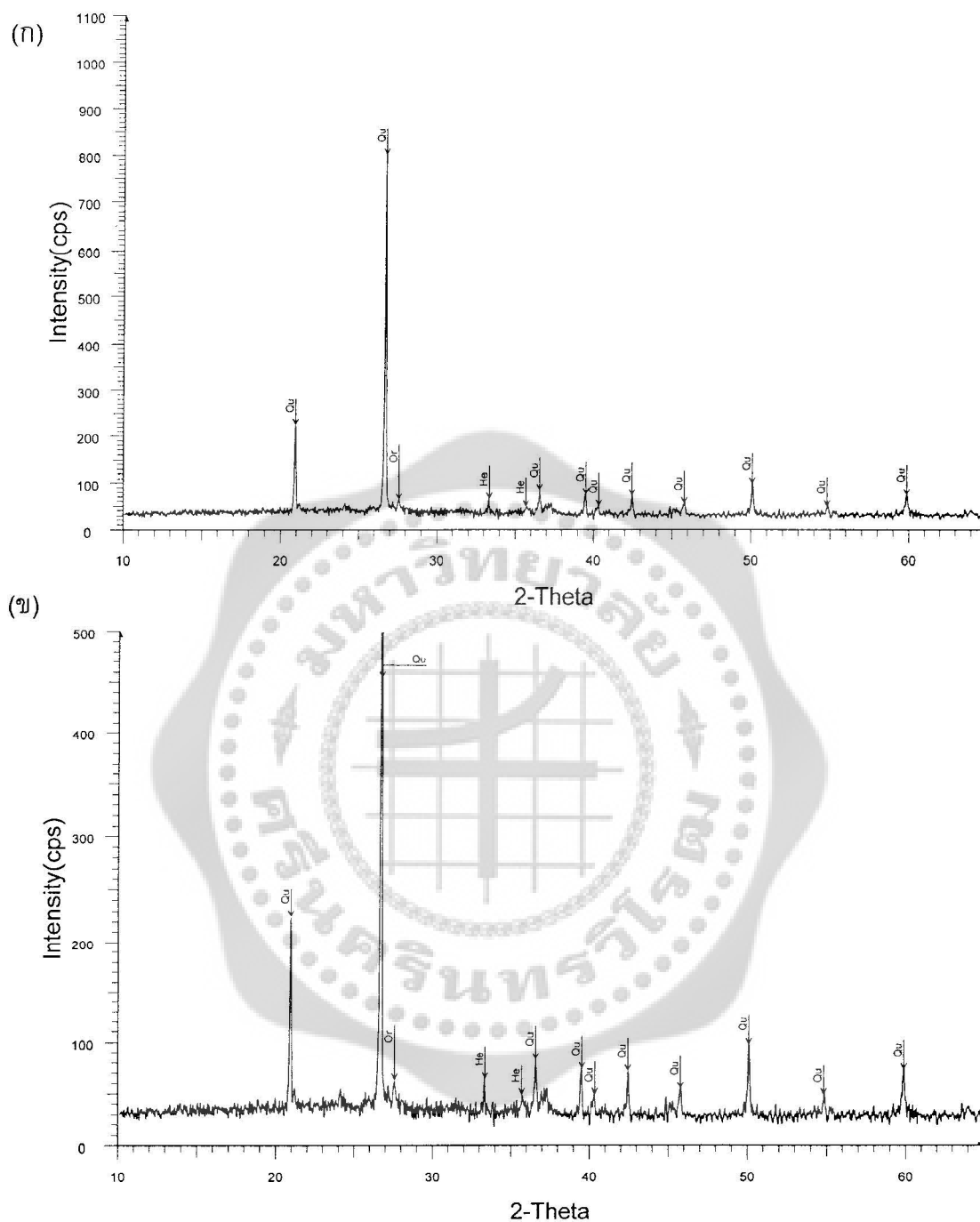


ภาพประกอบ 29 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB1 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1800 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz

ตาราง 22 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB1
ในภาพประกอบ 29

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	30.3	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	6.7	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	7.2	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	4.1	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	5.9	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.4	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.9	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.5	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	8.4	2	1	1	Qu



ภาพประกอบ 30 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2

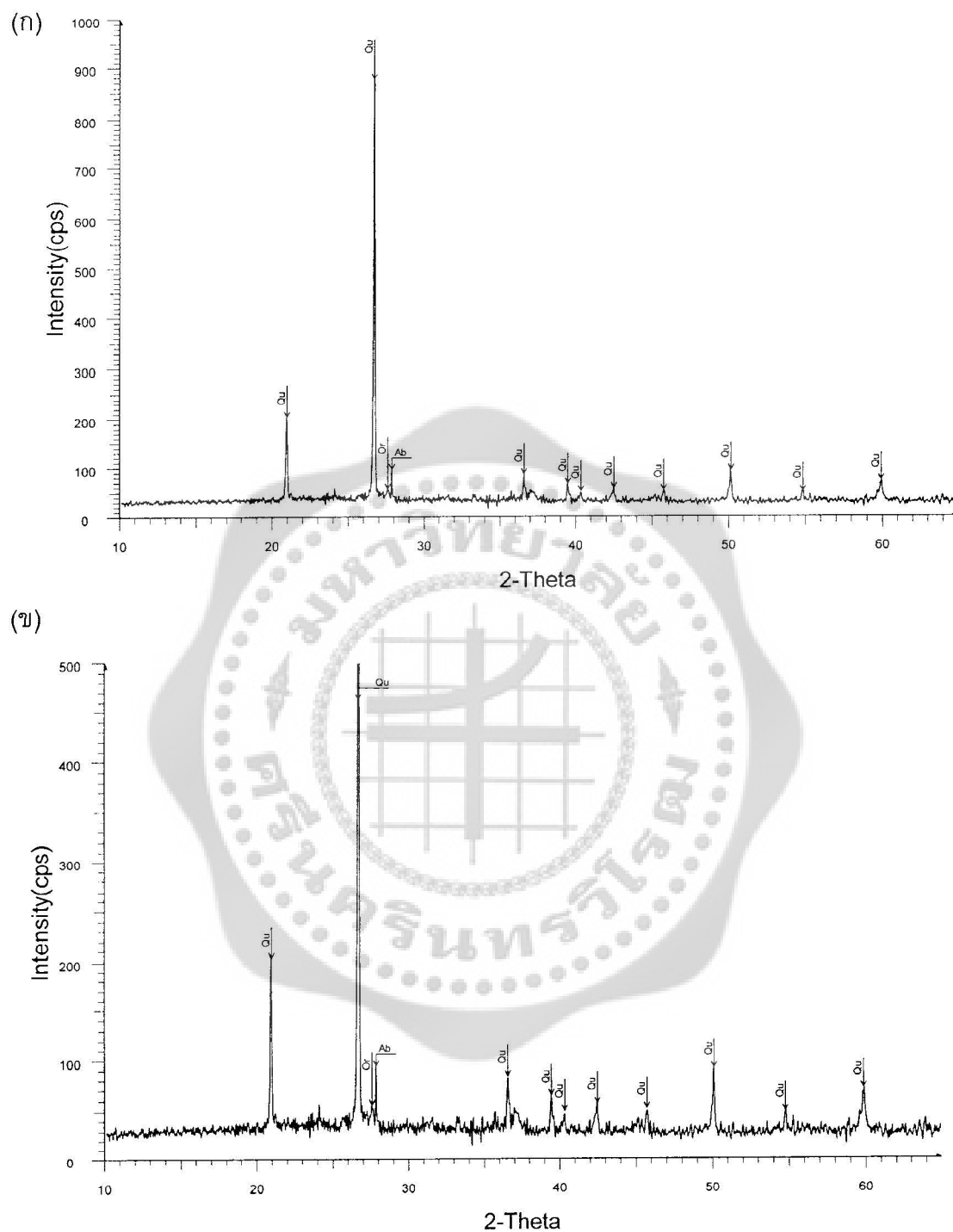
โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1100 cps

และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , Or=Orthoclase, He=Hematite

ตาราง 23 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2
ในภาพประกอบ 30

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	27.7	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	7.6	0	0	2	Or
33.21	2.6957	3.9	1	0	4	He
35.61	2.5191	4.7	1	1	0	He
36.54	2.4571	10.3	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	8.9	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	6.2	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	8.7	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.9	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	11.8	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	6.2	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	8.6	2	1	1	Qu



ภาพประกอบ 31 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB3

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1000 cps

และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

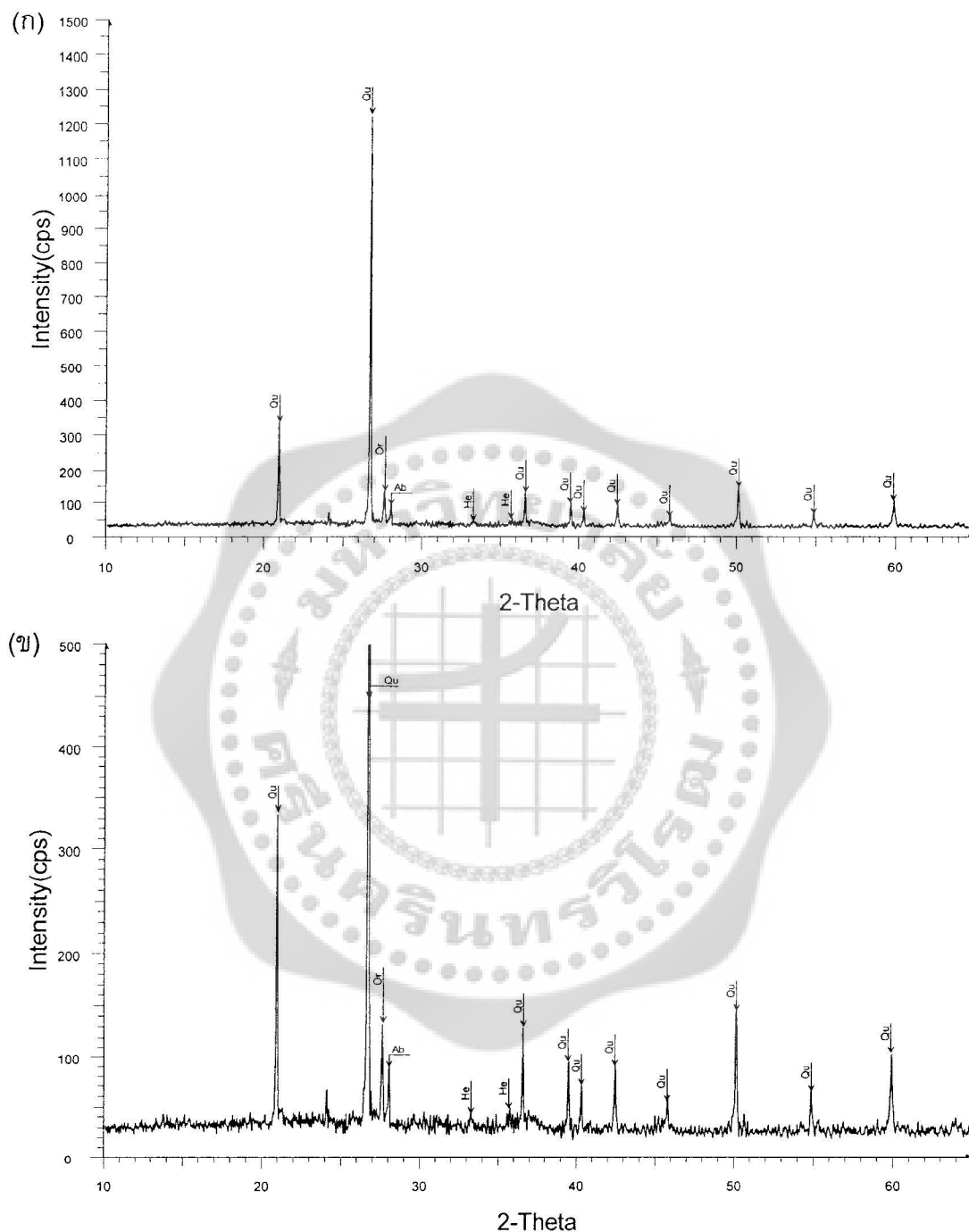
(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการ

ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , Or=Orthoclase,

Ab=Albite

ตาราง 24 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB3
ในภาพประกอบ 31

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	22.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	5.8	0	0	2	Or
27.79	3.2075	11.0	0	0	2	Ab
36.54	2.4571	9.2	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	6.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	4.9	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	6.0	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.1	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.0	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.4	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	7.7	2	1	1	Qu



ภาพประกอบ 32 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB4

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1500 cps

และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

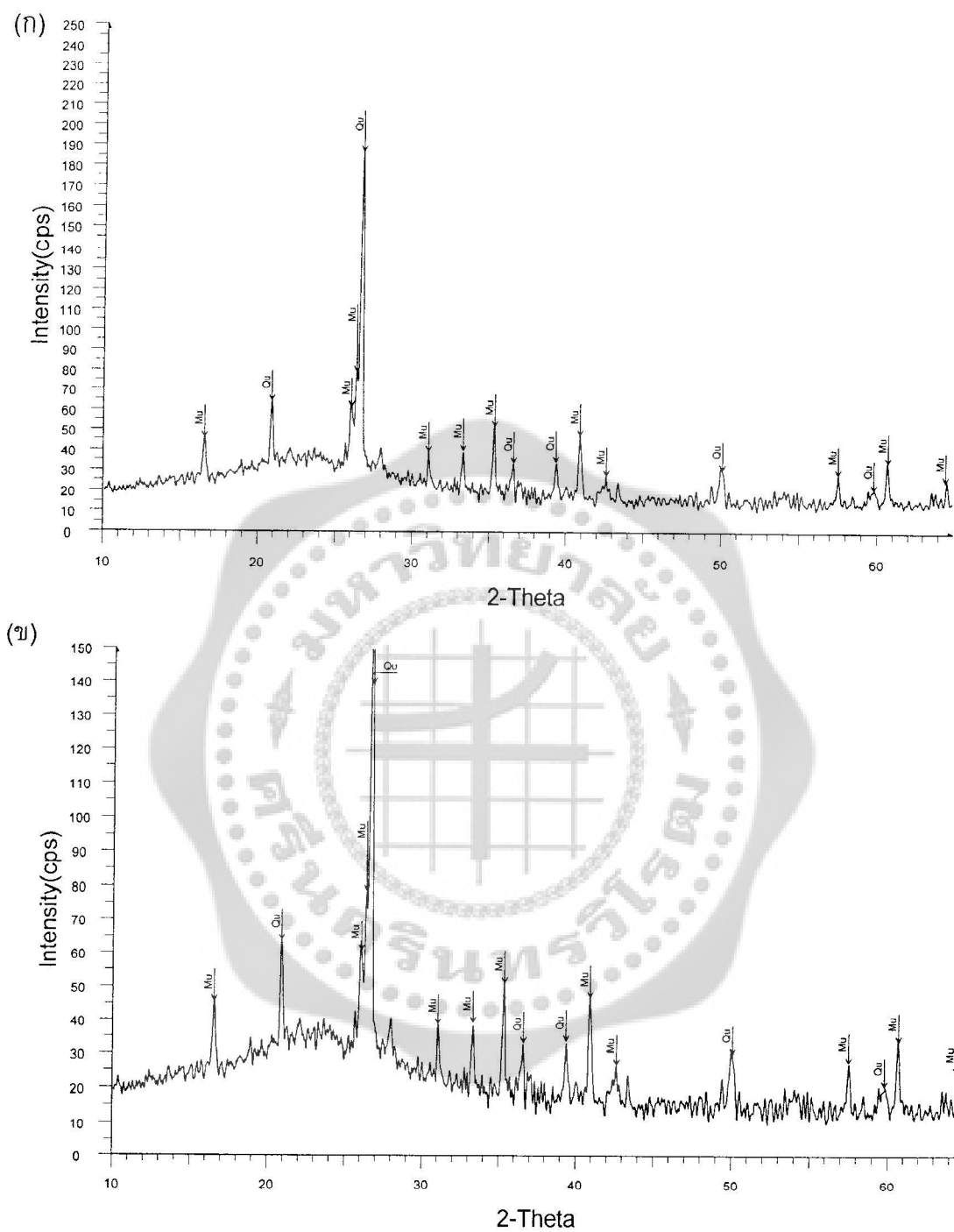
(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการ

ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , Or=Orthoclase,

Ab=Albite, He=Hematite

ตาราง 25 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB4 จาก
ในภาพประกอบ 32

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	27.2	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	7.4	0	0	2	Or
28.01	3.1826	7.3	0	0	2	Ab
33.21	2.6957	2.8	1	0	4	He
35.61	2.5191	2.4	1	1	0	He
36.54	2.4571	10.1	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	7.4	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.8	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	6.9	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.1	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	12.8	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.4	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	8.5	2	1	1	Qu

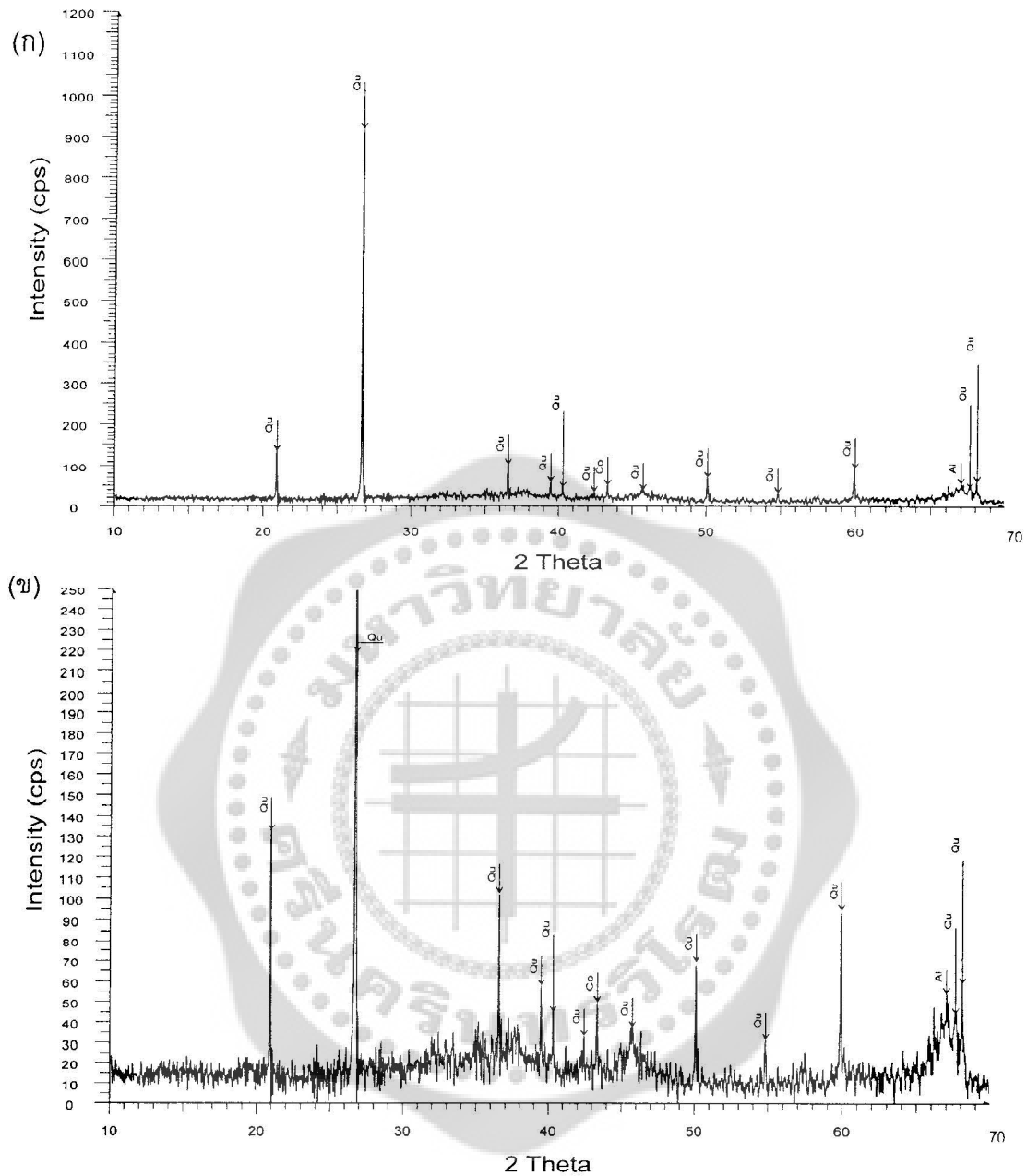


ภาพประกอบ 33 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SR โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 250 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 150 cps Qu=Quartz , Mu=Mullite

ตาราง 26 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SR
ในภาพประกอบ 33

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
16.34	5.3895	24.6	1	1	0	Mu
20.82	4.2622	34.0	1	0	0	Qu
25.97	3.4276	33.9	1	2	0	Mu
26.26	3.3907	40.2	2	1	0	Mu
26.62	3.3464	100.0	0	1	1	Qu
30.96	2.8865	19.7	0	0	1	Mu
33.22	2.6947	18.3	2	2	0	Mu
35.23	2.5451	27.8	1	1	1	Mu
36.50	2.4601	16.2	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	13.1	1	0	2	Qu
40.88	2.2057	25.2	1	2	1	Mu
42.59	2.1212	14.0	2	3	0	Mu
50.11	1.8188	14.8	1	1	2	Qu
57.56	1.6000	14.3	0	4	1	Mu
59.88	1.5433	10.8	1	2	1	Qu
60.71	1.5244	18.0	3	3	1	Mu
64.57	1.4423	12.7	0	0	2	Mu

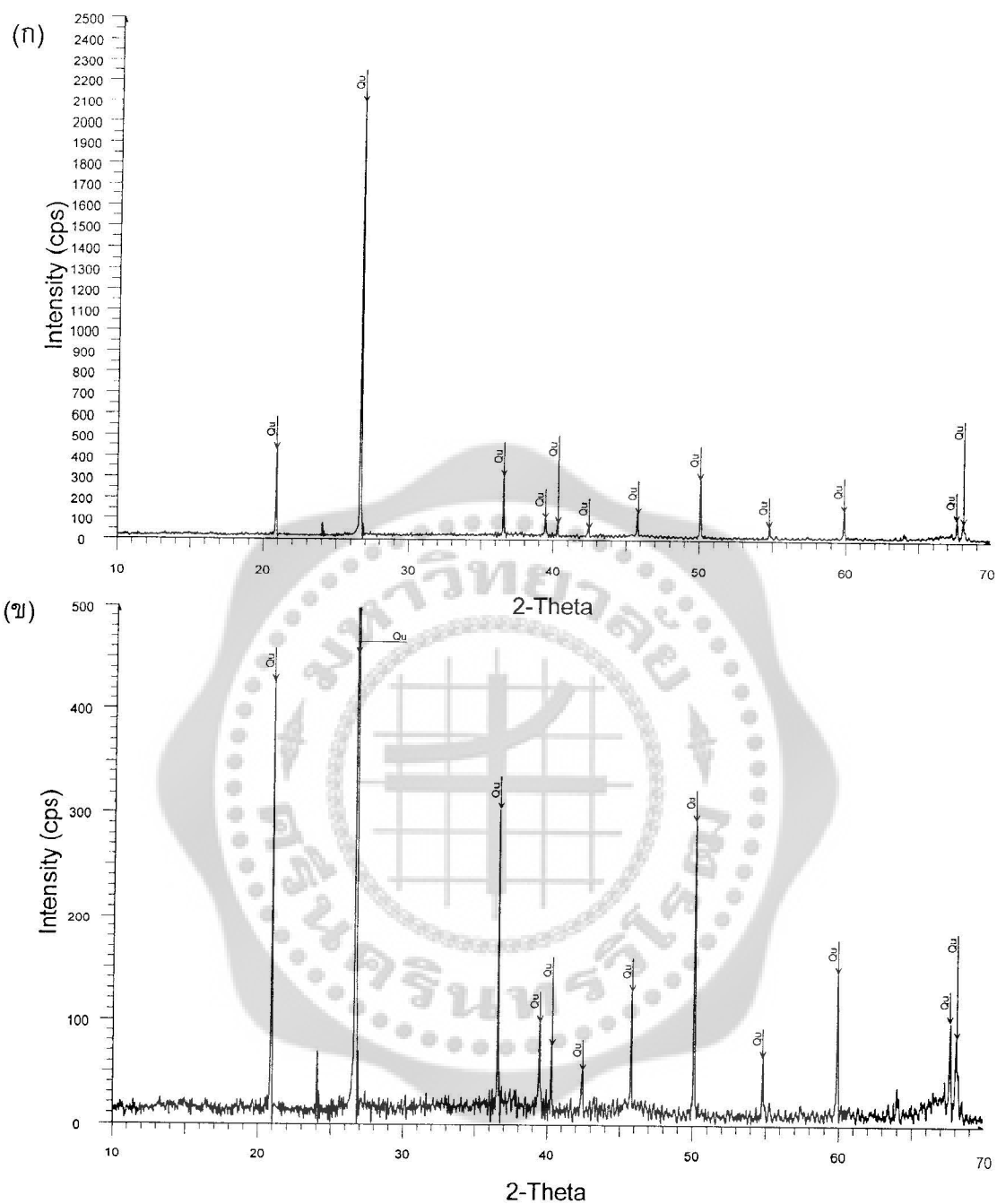


ภาพประกอบ 34 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย แร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1200 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 70 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 250 cps Qu=Quartz, Al=Alumina Oxide Co=Corundum

ตาราง 27 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่โอลิวีนออกไซด์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 34

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	15.0	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	10.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	5.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.1	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	3.3	2	0	0	Qu
43.38	2.0845	4.8	1	1	3	Co
45.80	1.9797	4.1	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	7.1	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	2.9	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	10.4	2	1	1	Qu
67.31	1.3899	3.4	4	4	1	Al
67.75	1.3819	5.0	2	1	2	Qu
68.14	1.3750	5.9	2	0	3	Qu

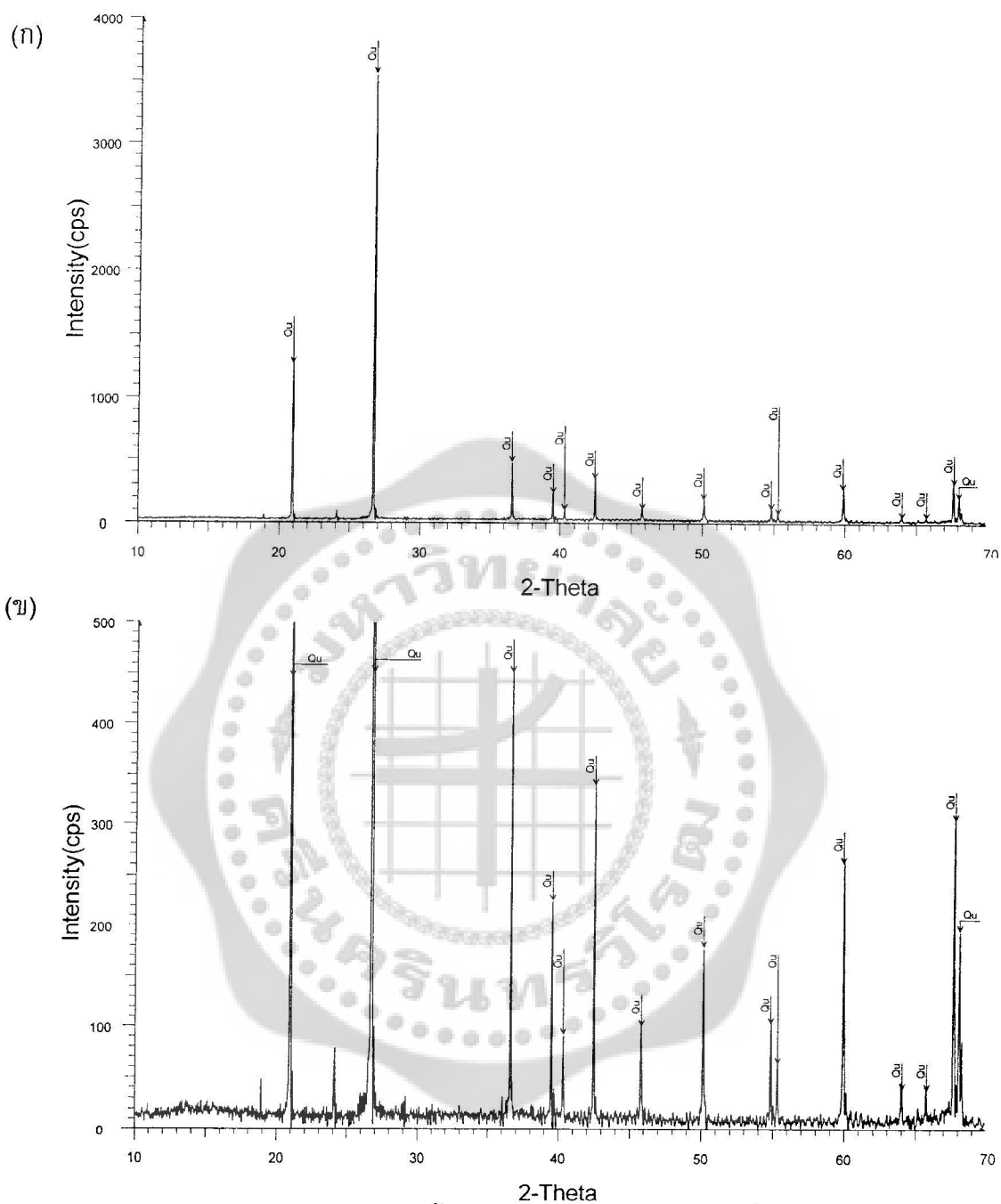


ภาพประกอบ 35 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 2500 cps
 และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 70 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการ
 ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz

ตาราง 28 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 ในภาพประกอบ 35

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	20.2	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	13.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	4.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	3.6	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	2.4	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.9	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	13.7	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	2.9	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	6.6	2	1	1	Qu
67.75	1.3819	3.6	2	1	2	Qu
68.14	1.3750	4.0	2	0	3	Qu



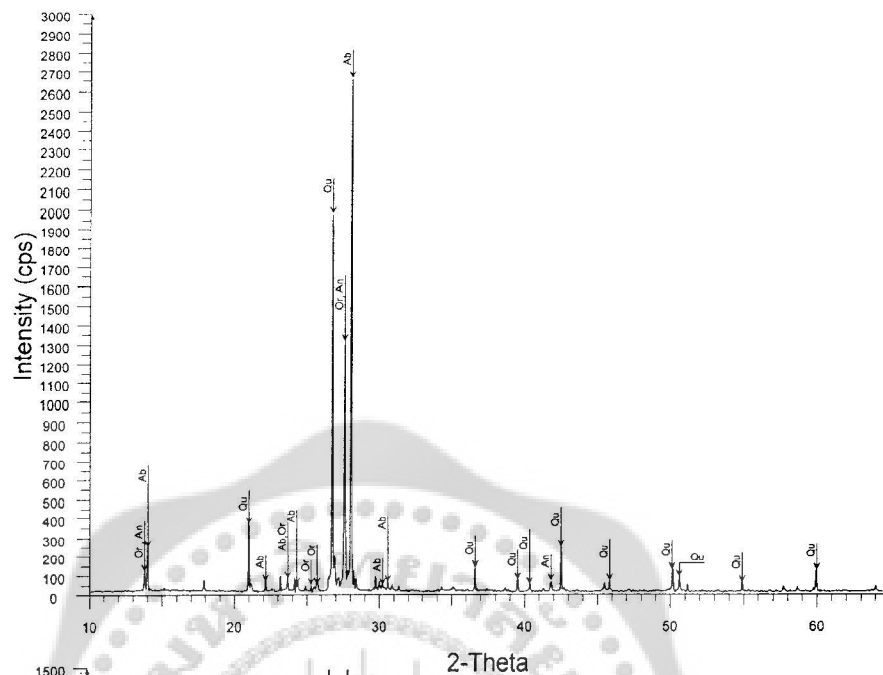
ภาพประกอบ 36 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 4000 cps
 และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 70 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการ
 ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz

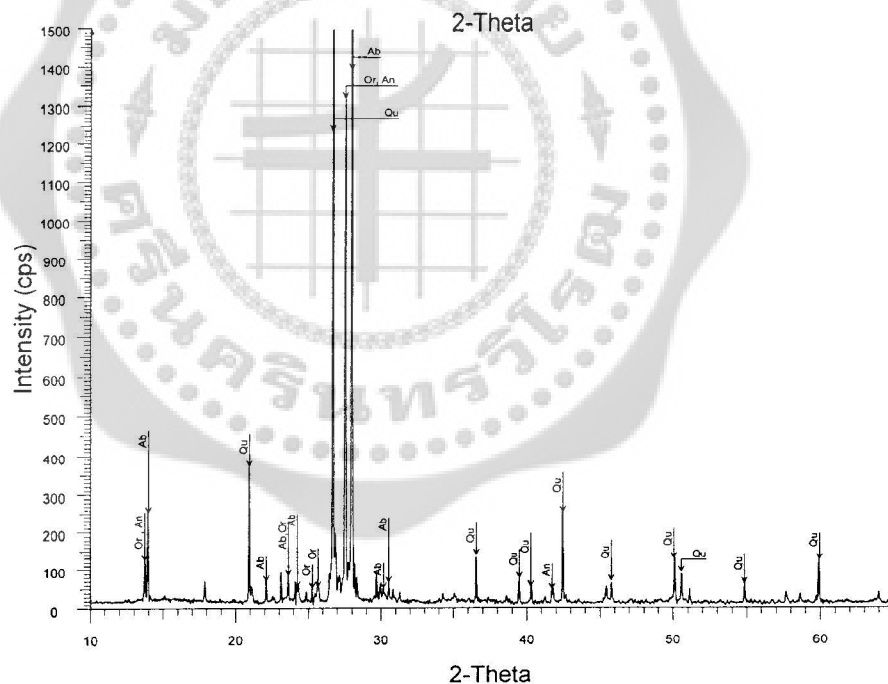
ตาราง 29 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่ลูมินาออกไซด์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 36

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	36.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	7.0	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	5.1	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	3.6	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	9.2	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.2	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	8.9	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.5	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	4.0	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	13.6	2	1	1	Qu
64.03	1.4530	2.6	1	1	3	Qu
65.79	1.4183	2.5	3	0	0	Qu
67.75	1.3819	20.5	2	1	2	Qu
68.14	1.3750	9.5	2	0	3	Qu

(ก)



(ข)

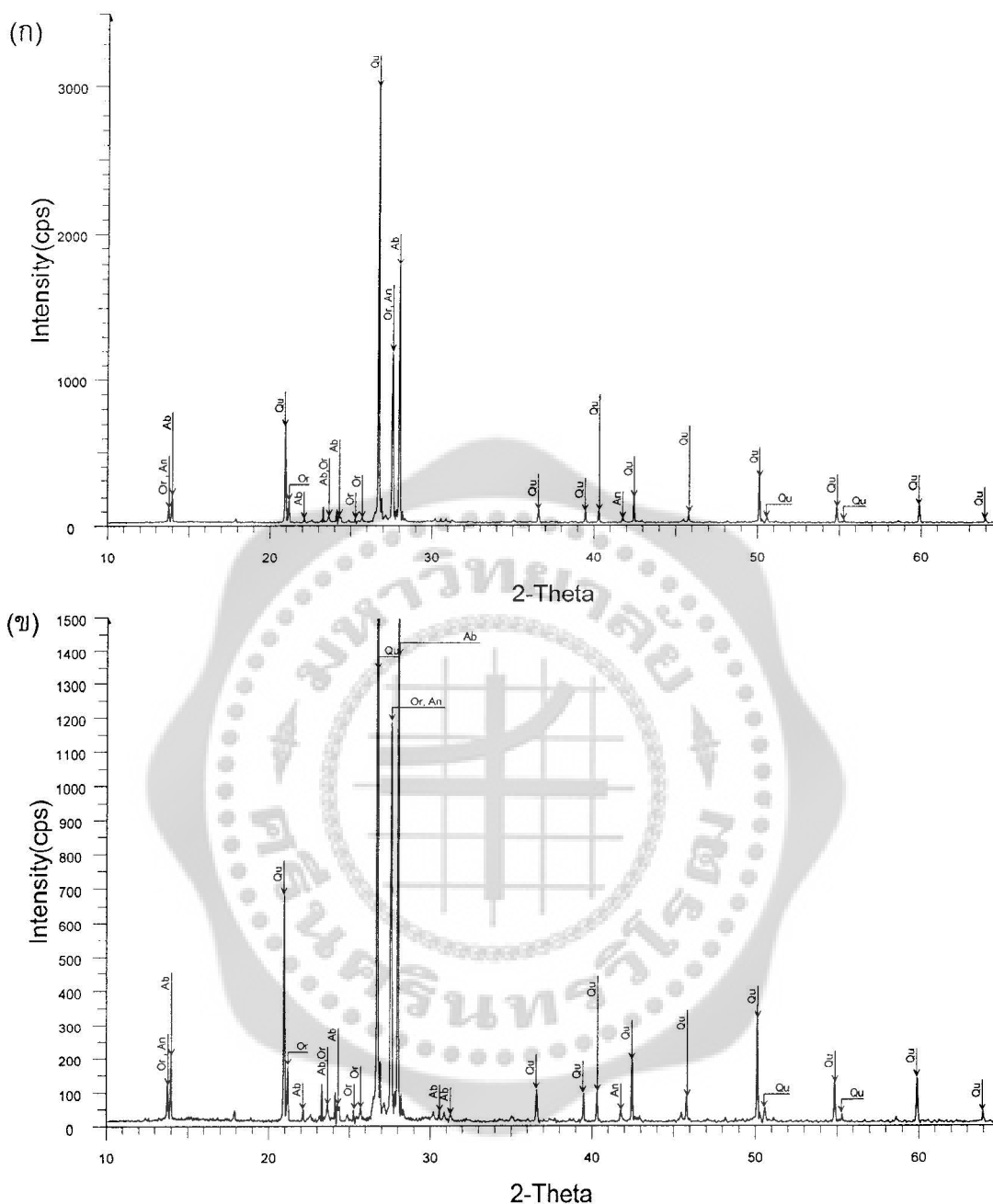


ภาพประกอบ 37 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย แร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 3000 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 1500 cps Qu=Quartz, Ab=Albite
Or=Orthoclase, An=Anorthoclase

ตาราง 30 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 37

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
13.65	6.4815	7.0	0	0	1	Or
13.67	6.4738	8.2	0	2	0	An
13.85	6.3900	5.6	0	0	1	Ab
20.87	4.2534	19.0	1	0	0	Qu
22.03	4.0315	3.8	$\bar{2}$	0	1	Ab
23.53	3.7786	2.5	1	1	1	Ab
23.57	3.7716	5.4	1	3	0	Or
24.27	3.6637	3.8	$\bar{1}$	$\bar{3}$	1	Ab
25.64	3.4713	1.2	$\bar{2}$	2	1	An
25.64	3.4712	4.6	$\bar{1}$	1	2	Or
26.64	3.3437	72.3	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	49.5	0	4	0	An
27.52	3.2380	49.5	0	0	2	Or
27.90	3.1950	100	0	0	2	Ab
30.13	2.9638	2.9	1	$\bar{3}$	1	Ab
30.46	2.9320	2.1	0	$\bar{2}$	2	Ab
36.54	2.4571	7.1	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	3.8	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	2.9	1	1	1	Qu
41.82	2.1579	3.6	0	6	0	An
42.45	2.1278	7.5	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	3.4	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	7.7	1	1	2	Qu
50.61	1.8020	5.6	0	0	3	Qu
54.87	1.6718	3.3	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	6.8	2	1	1	Qu
64.08	1.4521	2.0	1	1	3	Qu



ภาพประกอบ 38 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย แร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 3500 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

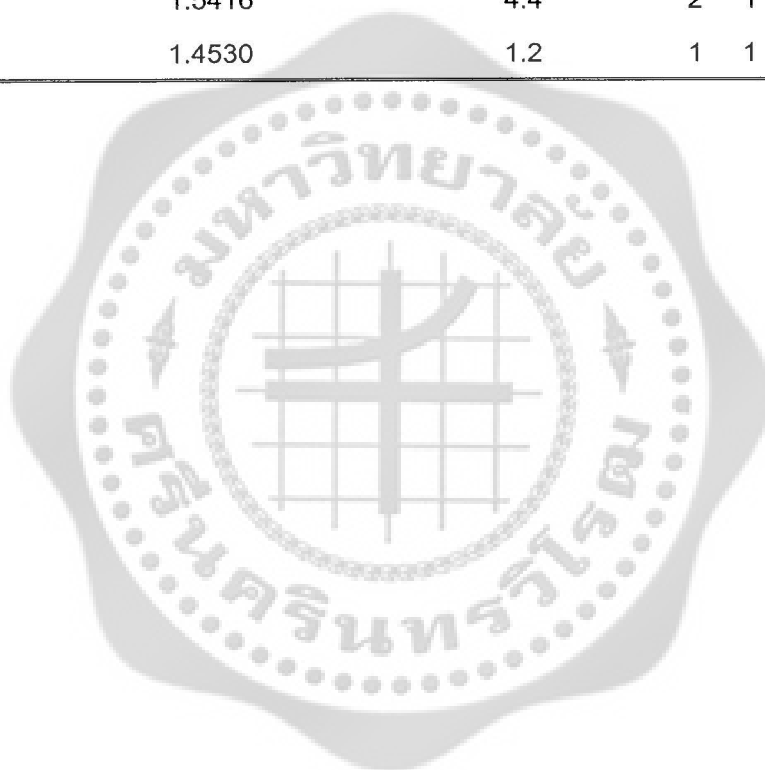
(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 1500 cps Qu=Quartz, Ab=Albite, Or=Orthoclase, An=Anorthoclase

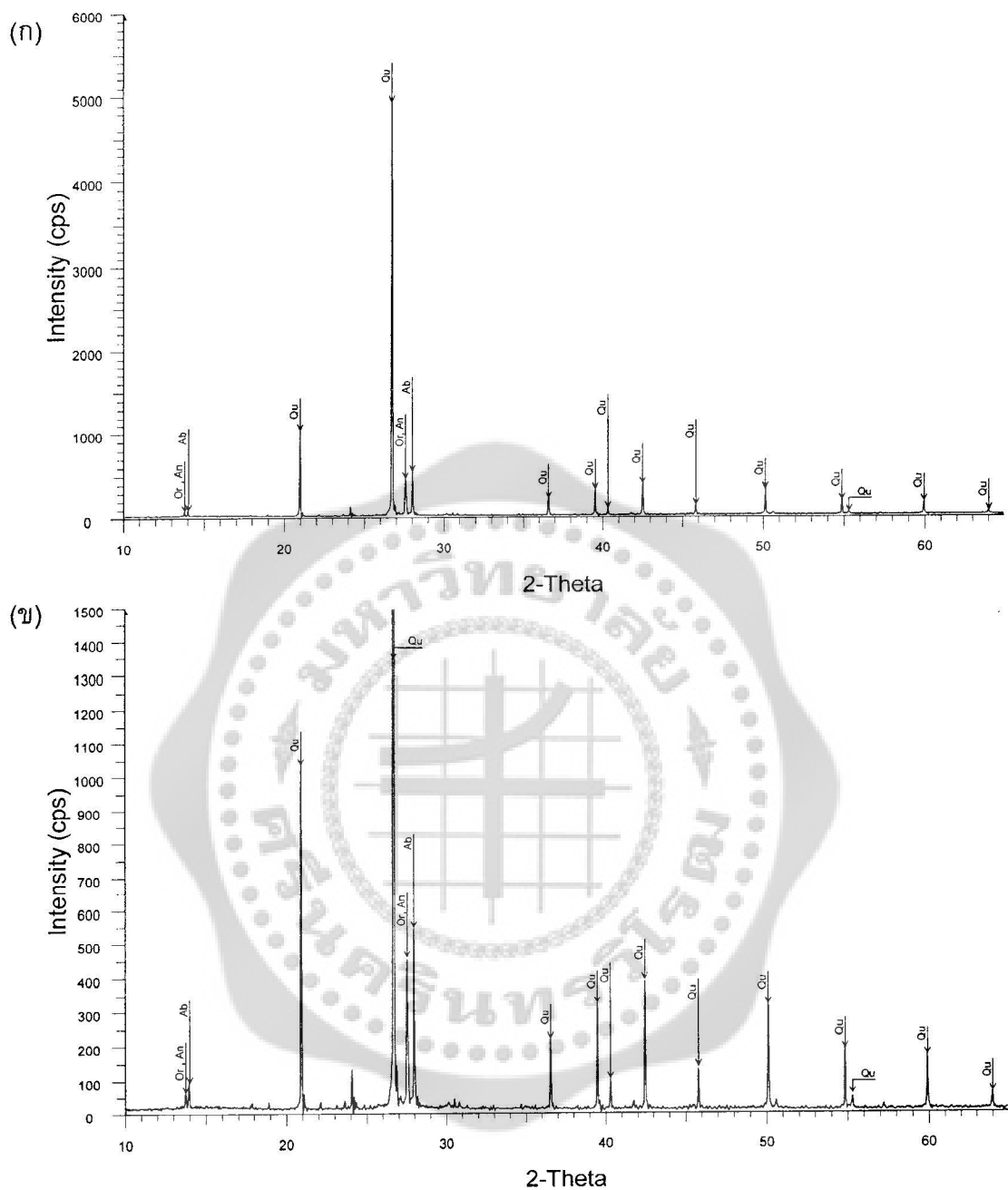
ตาราง 31 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 38

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
13.65	6.4815	4.2	0	0	1	Or
13.67	6.4738	3.4	0	2	0	An
13.85	6.3900	6.9	0	0	1	Ab
20.87	4.2534	21.9	1	0	0	Qu
21.04	4.2183	1.6	$\bar{2}$	0	1	Or
22.03	4.0315	1.4	$\bar{2}$	0	1	Ab
23.53	3.7786	1.3	1	1	1	Ab
23.57	3.7716	1.7	1	3	0	Or
24.27	3.6637	1.8	$\bar{1}$	$\bar{3}$	1	Ab
25.64	3.4713	1.0	$\bar{2}$	2	1	An
25.64	3.4712	1.7	$\bar{1}$	1	2	Or
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	39.4	0	4	0	An
27.52	3.2380	39.4	0	0	2	Or
27.90	3.1950	71.9	0	0	2	Ab
30.46	2.9320	0.9	0	$\bar{2}$	2	Ab
31.18	2.8663	0.8	1	3	1	Ab
36.54	2.4571	3.3	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	3.0	1	0	2	Qu
39.53	2.2781	1.0	$\bar{1}$	1	3	Qu
40.31	2.2358	3.2	1	1	1	Qu
41.82	2.1579	1.0	0	6	0	An
42.45	2.1278	6.5	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	2.7	2	0	1	Qu

ตาราง 31 (ต่อ)

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
50.14	1.8180	11.7	1	1	2	Qu
50.61	1.8020	1.6	0	0	3	Qu
54.87	1.6718	4.3	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	1.0	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	4.4	2	1	1	Qu
64.03	1.4530	1.2	1	1	3	Qu



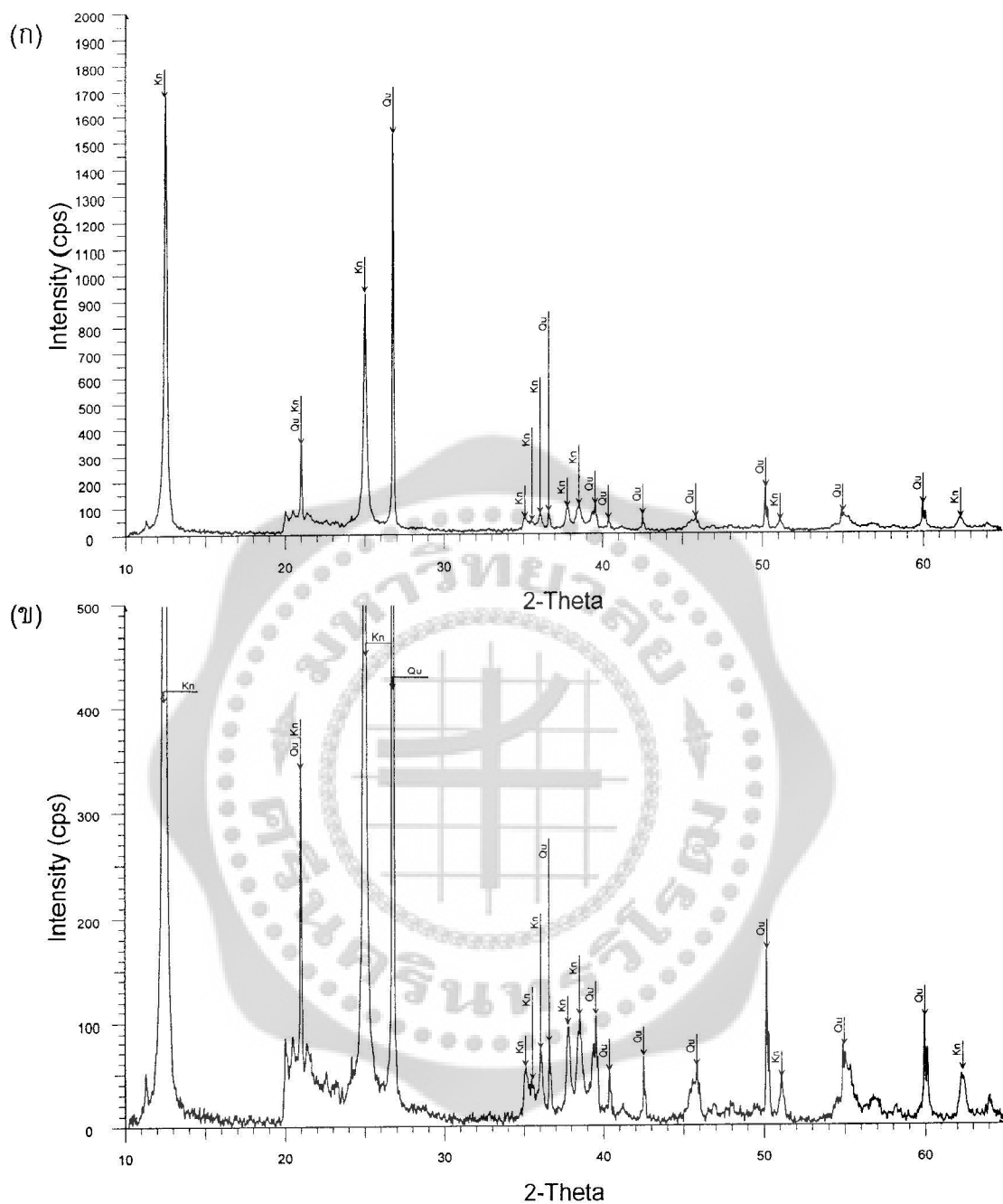


ภาพประกอบ 39 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 6000 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตามอัตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 1500 cps Qu=Quartz, Ab=Albite, Or=Orthoclase, An=Anorthoclase

ตาราง 32 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฟลด์สปาร์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 39

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
13.65	6.4815	1.8	0	0	1	Or
13.67	6.4738	2.0	0	2	0	An
13.85	6.3900	1.0	0	0	1	Ab
20.87	4.2534	17.6	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	13.6	0	4	0	An
27.52	3.2380	13.6	0	0	2	Or
27.90	3.1950	14.7	0	0	2	Ab
36.54	2.4571	4.5	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	4.4	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	2.9	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	4.3	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	3.2	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	8.4	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.1	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	1.4	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	4.8	2	1	1	Qu
64.03	1.4530	1.6	1	1	3	Qu

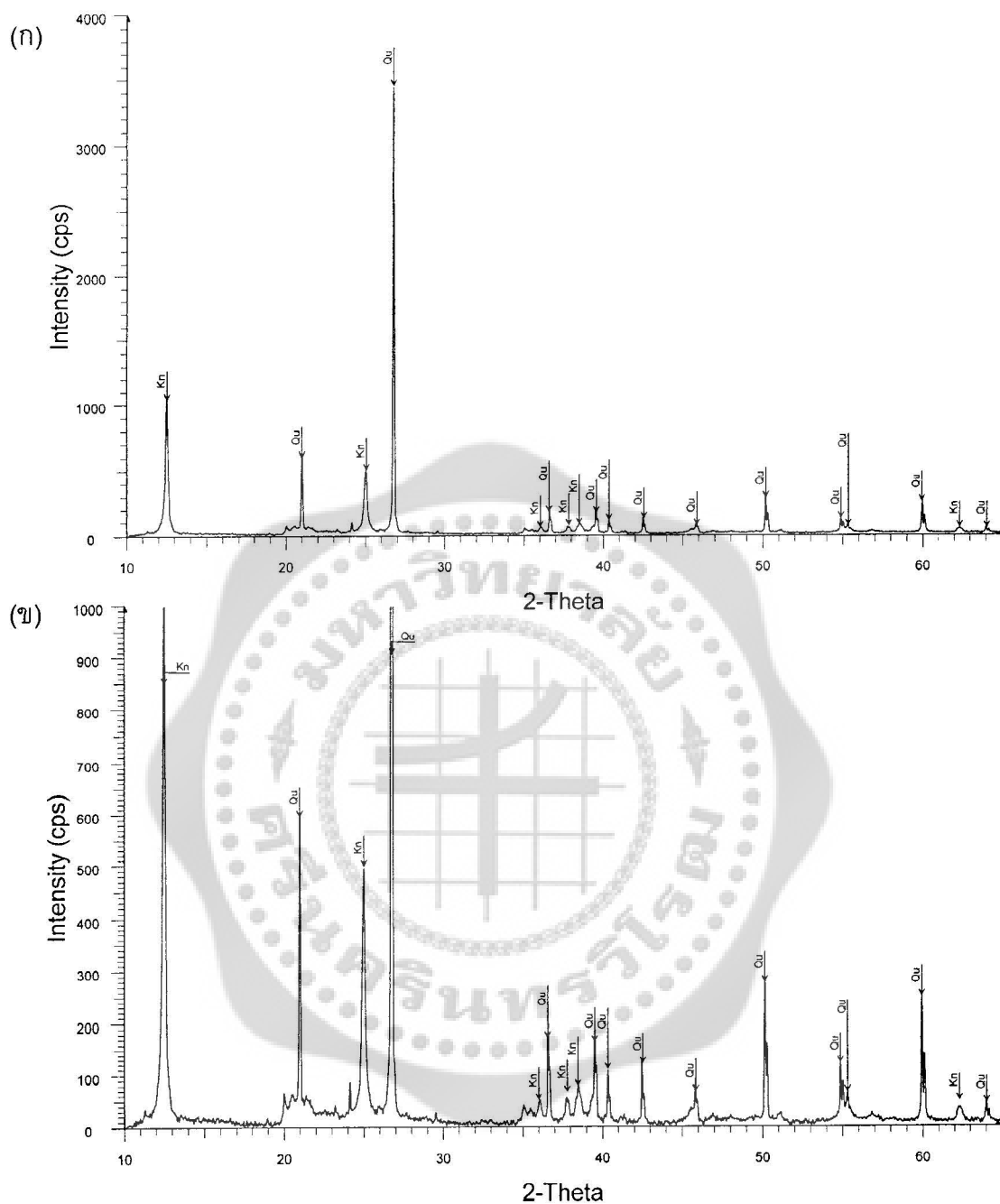


ภาพประกอบ 40 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 2000 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Kn=Kaolinite

ตาราง 33 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 ในภาพประกอบ 40

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
12.39	7.1359	100.0	0	0	2	Kn
20.87	4.2534	11.5	1	0	0	Qu
20.03	4.2211	17.1	0	2	1	Kn
24.91	3.5711	53.4	0	0	4	Kn
26.66	3.3410	68.3	1	0	1	Qu
35.05	2.5584	3.0	1	3	0	Kn
35.45	2.5300	2.4	2	0	0	Kn
36.56	2.4556	3.9	1	1	0	Qu
37.77	2.3800	5.5	0	0	6	Kn
38.38	2.3433	5.0	1	3	2	Kn
39.48	2.2806	5.3	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	1.9	1	1	1	Qu
42.47	2.1267	3.6	2	0	0	Qu
45.82	1.9787	3.6	0	2	1	Qu
50.16	1.8172	8.9	1	1	2	Qu
51.14	1.7848	2.1	0	0	8	Kn
54.90	1.6712	4.1	2	0	2	Qu
59.98	1.5410	6.1	1	2	1	Qu
62.44	1.4862	2.4	1	5	4	Kn
64.08	1.4520	1.5	1	1	3	Qu

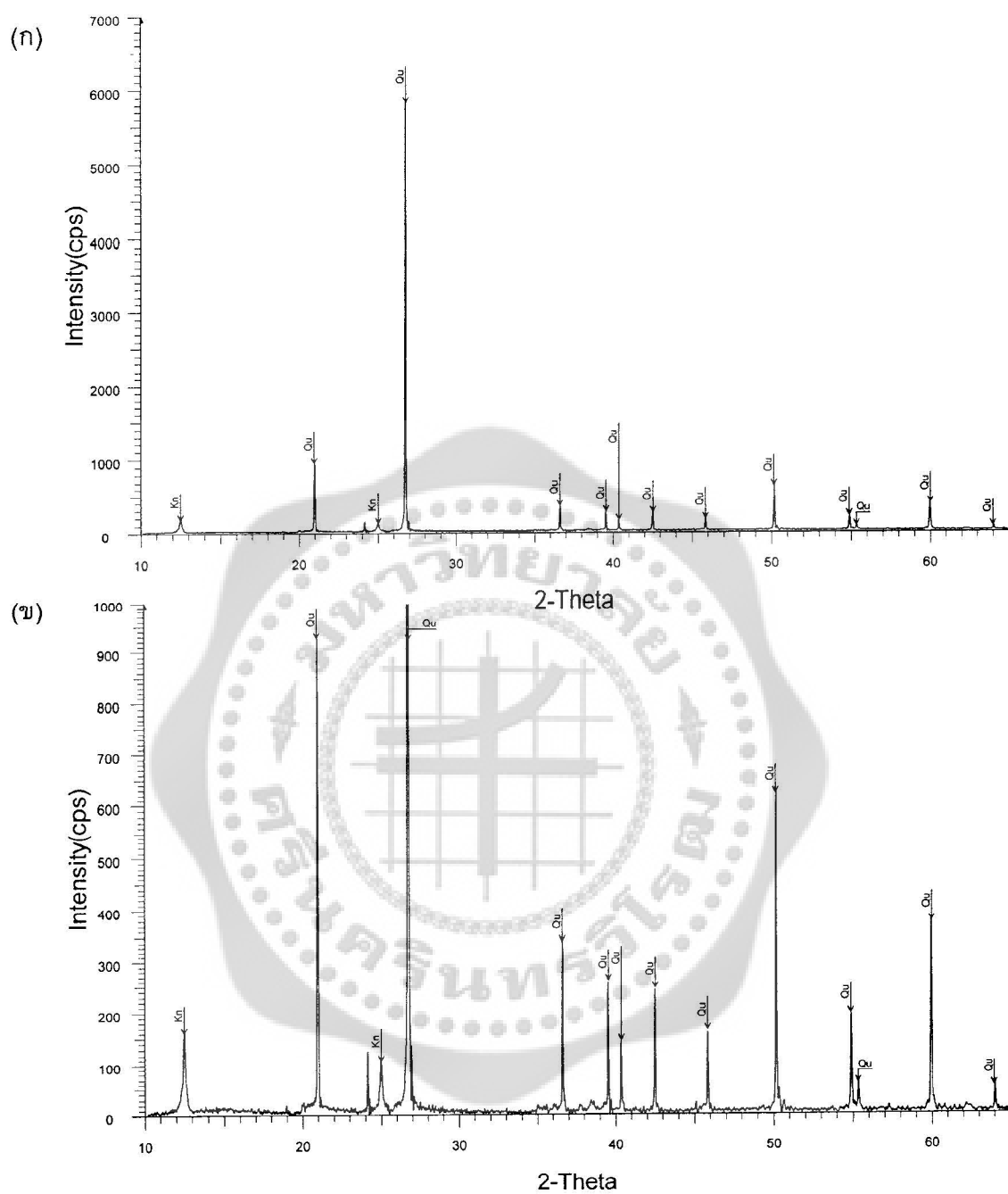


ภาพประกอบ 41 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 4000 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 1000 cps Qu=Quartz, Kn=Kaolinite

ตาราง 34 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 41

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
12.39	7.1359	52	0	0	2	Kn
20.87	4.2534	18.1	1	0	0	Qu
24.91	3.5711	24.2	0	0	4	Kn
26.64	3.3437	100	1	0	1	Qu
36.18	2.4809	1.3	1	3	1	Kn
36.54	2.4571	6	1	1	0	Qu
37.77	2.3800	2.3	0	0	6	Kn
38.38	2.3433	2.5	1	3	2	Kn
39.46	2.2819	6.4	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	4.4	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	3.5	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	3.8	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	11.4	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.3	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	3.2	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	10.1	2	1	1	Qu
62.44	1.4862	1.5	1	5	4	Kn
64.03	1.4530	2.2	1	1	3	Qu

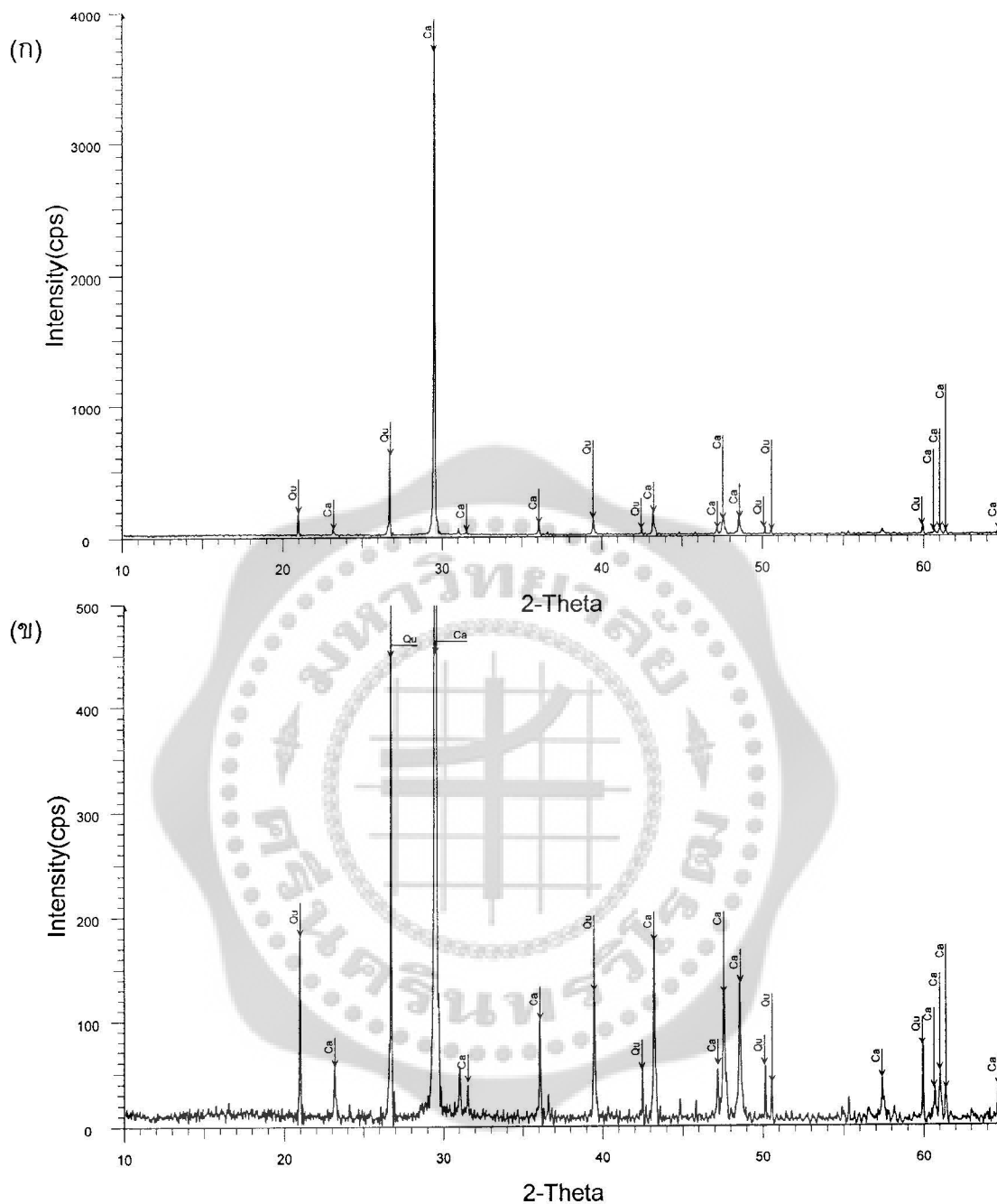


ภาพประกอบ 42 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่เคโอลิไนต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 7000 cps
 และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการ
 ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 1000 cps Qu=Quartz, Kn=Kaolinite

ตาราง 35 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 ในภาพประกอบ 42

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
12.39	7.1359	4.7	0	0	2	Kn
20.87	4.2534	18.1	1	0	0	Qu
24.91	3.5711	3.1	0	0	4	Kn
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	5.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	4.4	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	3.6	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	3.5	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	3.6	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	12.3	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.6	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	1.7	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	8.9	2	1	1	Qu
64.03	1.4530	1.5	1	1	3	Qu

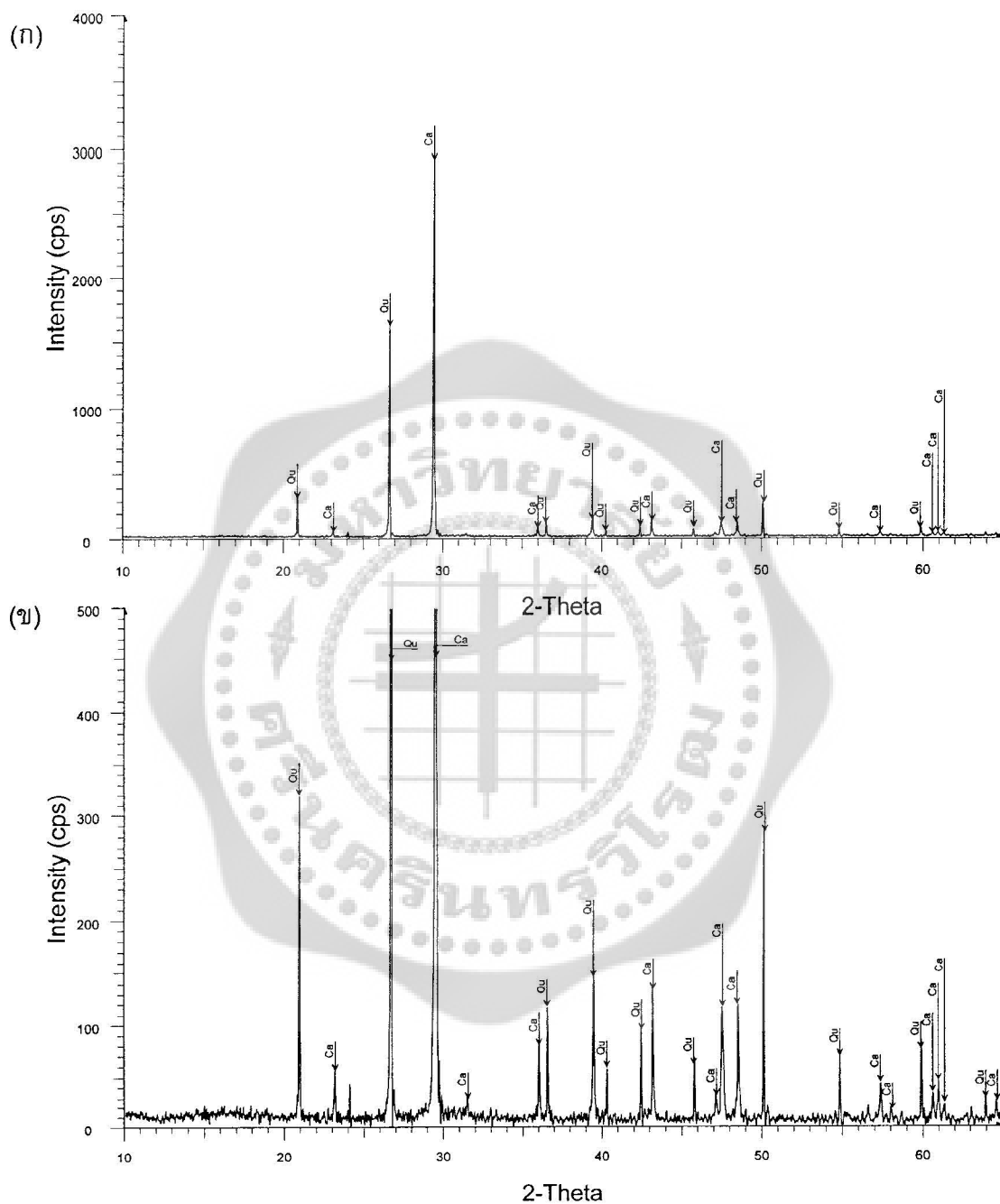


ภาพประกอบ 43 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย แร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 4000 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz, Ca=Calcite

ตาราง 36 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 43

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	5.1	1	0	0	Qu
23.02	3.8605	0.8	0	1	2	Ca
26.64	3.3437	17.8	1	0	1	Qu
29.42	3.0341	100.0	1	0	4	Ca
31.43	2.8444	0.6	0	0	6	Ca
35.97	2.4945	2.2	1	1	0	Ca
39.46	2.2819	4.2	1	0	2	Qu
42.45	2.1278	1.4	2	0	0	Qu
43.14	2.0951	2.1	2	0	2	Ca
47.13	1.9266	1.4	0	2	4	Ca
47.49	1.9131	2.4	0	1	8	Ca
48.53	1.8746	4.0	1	1	6	Ca
50.14	1.8180	1.5	1	1	2	Qu
50.61	1.8020	0.1	0	0	3	Qu
59.96	1.5416	2.2	2	1	1	Qu
60.68	1.5249	0.7	2	1	4	Ca
60.98	1.5182	0.9	2	0	8	Ca
61.36	1.5098	0.5	1	1	9	Ca
64.67	1.4402	0.6	3	0	0	Ca

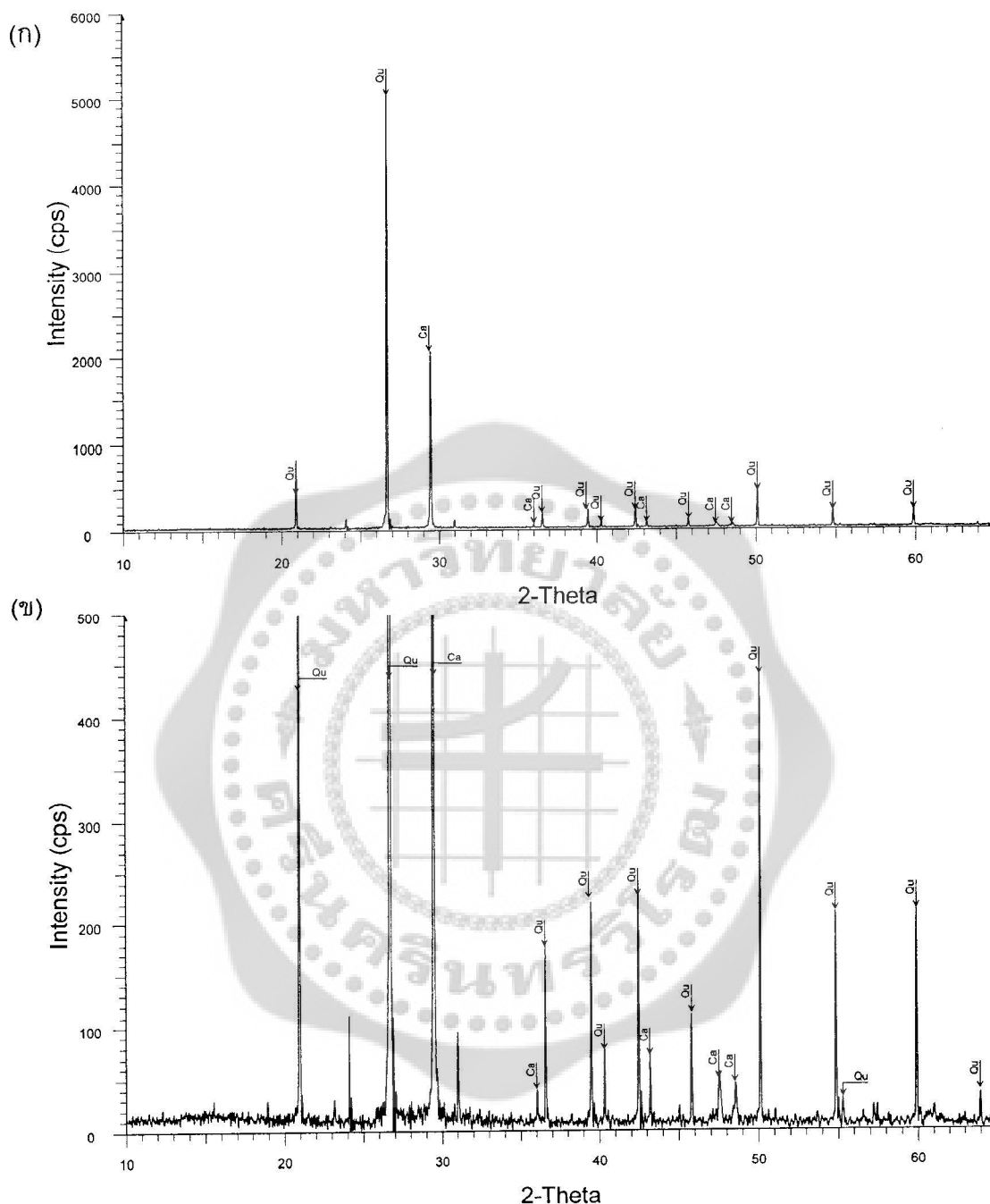


ภาพประกอบ 44 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 4000 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz ,Ca=Calcite

ตาราง 37 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 44

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	10.9	1	0	0	Qu
23.02	3.8605	1.0	0	1	2	Ca
26.64	3.3437	56	1	0	1	Qu
29.42	3.0341	100	1	0	4	Ca
31.43	2.8444	0.6	0	0	6	Ca
35.97	2.4945	2.6	1	1	0	Ca
39.46	2.2819	5.2	1	0	2	Qu
42.45	2.1278	3.1	2	0	0	Qu
43.14	2.0951	2.5	2	0	2	Ca
45.82	1.9788	3.0	2	0	1	Qu
47.13	1.9266	1.1	0	2	4	Ca
47.49	1.9131	2.6	0	1	8	Ca
48.53	1.8746	4.0	1	1	6	Ca
50.14	1.8180	9.7	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	2.3	2	0	2	Qu
57.41	1.6038	1.4	1	2	2	Ca
59.96	1.5416	2.8	2	1	1	Qu
60.68	1.5249	1.1	2	1	4	Ca
60.98	1.5182	0.8	2	0	8	Ca
61.36	1.5098	0.6	1	1	9	Ca
64.03	1.4530	0.9	1	1	3	Qu
64.67	1.4402	0.8	3	0	0	Ca



ภาพประกอบ 45 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย

แร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 6000 cps

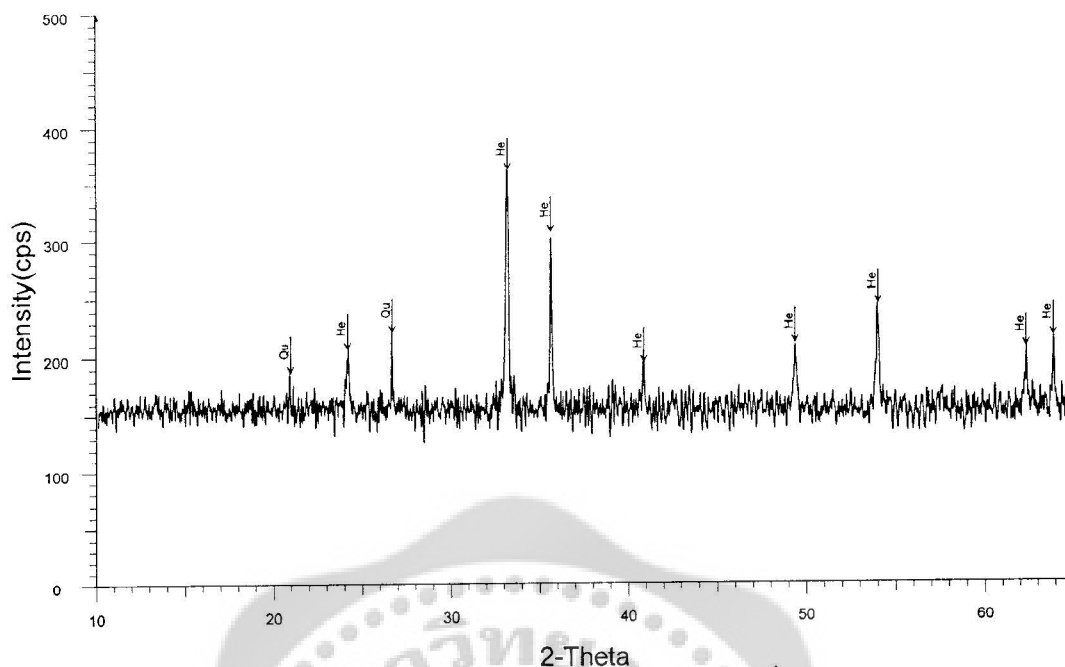
และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการ

ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , Ca=Calcite

ตาราง 38 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่แคลไซต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 45

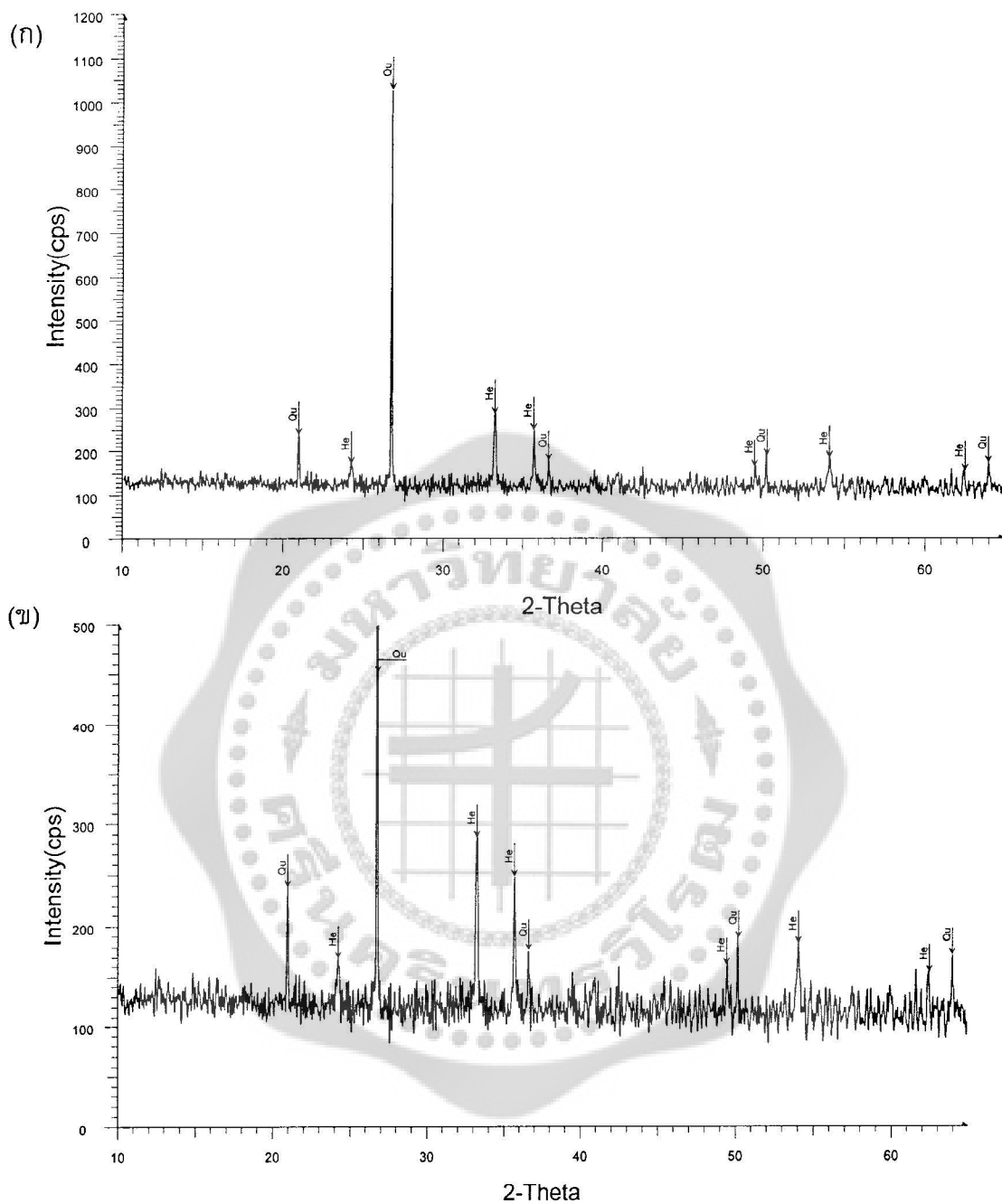
มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	16.1	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
29.42	3.0341	36.8	1	0	4	Ca
35.97	2.4945	0.7	1	1	0	Ca
36.54	2.4571	3.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	4.6	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	1.6	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	4.3	2	0	0	Qu
43.14	2.0951	0.5	2	0	2	Ca
45.80	1.9797	2.3	2	0	1	Qu
47.49	1.9131	0.8	0	1	8	Ca
48.53	1.8746	0.7	1	1	6	Ca
50.14	1.8180	9.2	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.4	2	0	2	Qu
55.33	1.6590	0.6	1	0	3	Qu
59.96	1.5416	4.4	2	1	1	Qu
64.03	1.4530	0.7	1	1	3	Qu



ภาพประกอบ 46 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 500 cps
และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา Qu=Quartz ,He=Hematite

ตาราง 39 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 46

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	51.3	1	0	0	Qu
24.11	3.6888	54.3	0	1	2	He
26.64	3.3437	56.1	1	0	1	Qu
33.21	2.6957	100.0	1	0	4	He
35.61	2.5191	83.2	1	1	0	He
40.86	2.2069	54.1	1	1	3	He
49.57	1.8376	53.5	0	2	4	He
54.10	1.6940	64.4	1	1	6	He
62.46	1.4857	55.0	2	1	4	He
63.98	1.4540	53.8	3	0	0	He

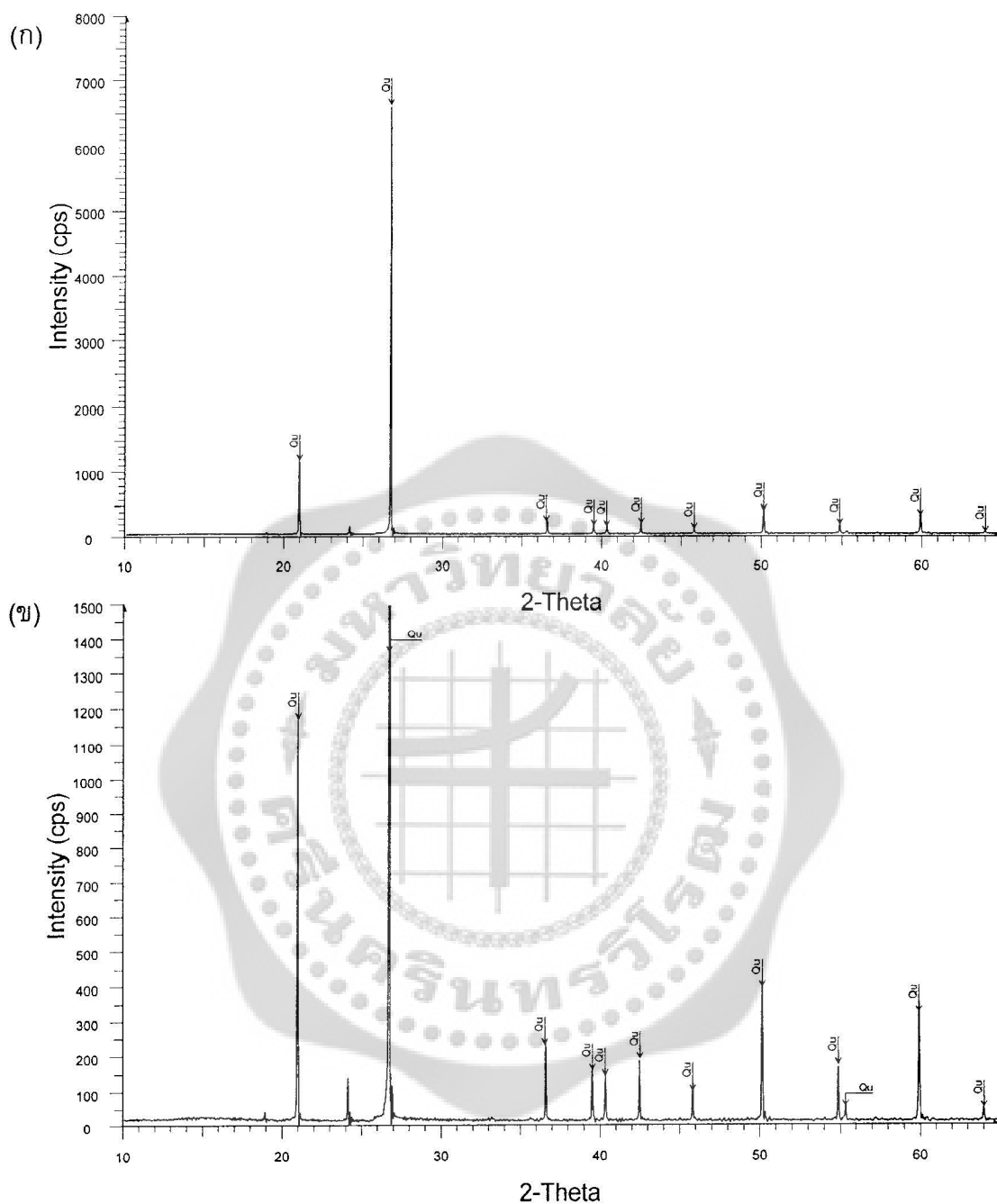


ภาพประกอบ 47 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วยแร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 1200 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz ,He=Hematite

ตาราง 40 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 47

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	K	L	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	24.5	1	0	0	Qu
24.11	3.6888	20.4	0	1	2	He
26.64	3.3437	100	1	0	1	Qu
33.21	2.6957	32.3	1	0	4	He
35.61	2.5191	23.6	1	1	0	He
36.56	2.4556	19.6	1	1	0	Qu
49.5	1.8376	19.2	0	2	4	He
50.16	1.8172	19.5	1	1	2	Qu
54.10	1.6940	22.5	1	1	6	He
62.46	1.4857	18.5	2	1	4	He
64.08	1.4520	18.3	1	1	3	Qu

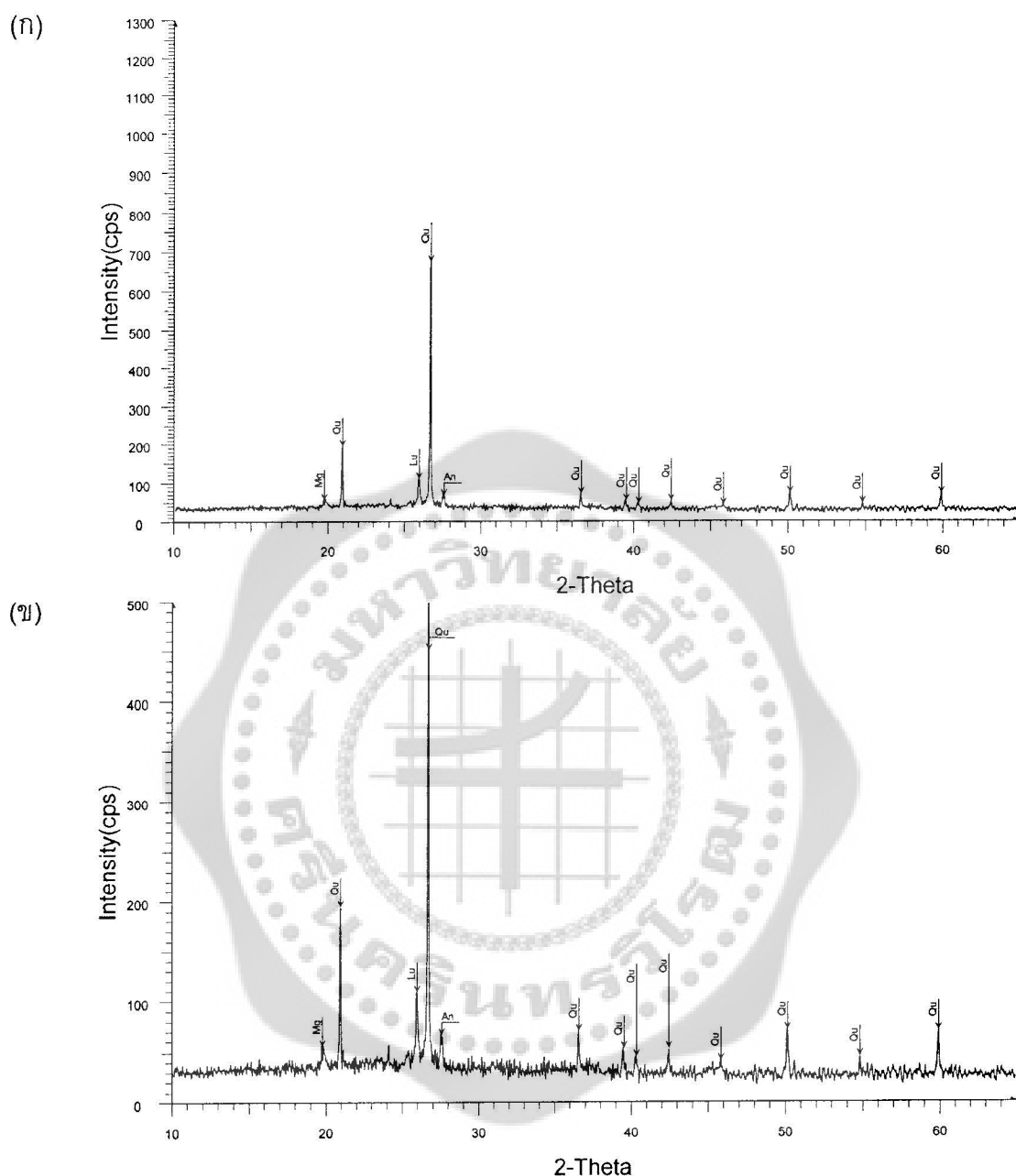


ภาพประกอบ 48 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
 แร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
 โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวแกนตั้งกว้างถึง 8000 cps
 และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมในรูป (ก) ที่มีการ
 ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 1500 cps Qu=Quartz

ตาราง 41 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมที่ประกอบด้วย
แร่ควอตซ์และแร่เฮมาไทต์ผสมกันในอัตราส่วน 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ในภาพประกอบ 48

มุม 2 θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	K	L	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	13.8	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100	1	0	1	Qu
36.56	2.4556	3.7	1	1	0	Qu
39.48	2.2806	2.4	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	1.8	1	1	1	Qu
42.47	2.1267	2.6	2	0	0	Qu
45.82	1.9787	1.8	0	2	1	Qu
50.16	1.8172	6.6	1	1	2	Qu
54.90	1.6712	2.5	2	0	2	Qu
55.36	1.6583	0.7	0	1	3	Qu
59.98	1.5410	5.3	1	2	1	Qu
64.08	1.4520	0.5	1	1	3	Qu

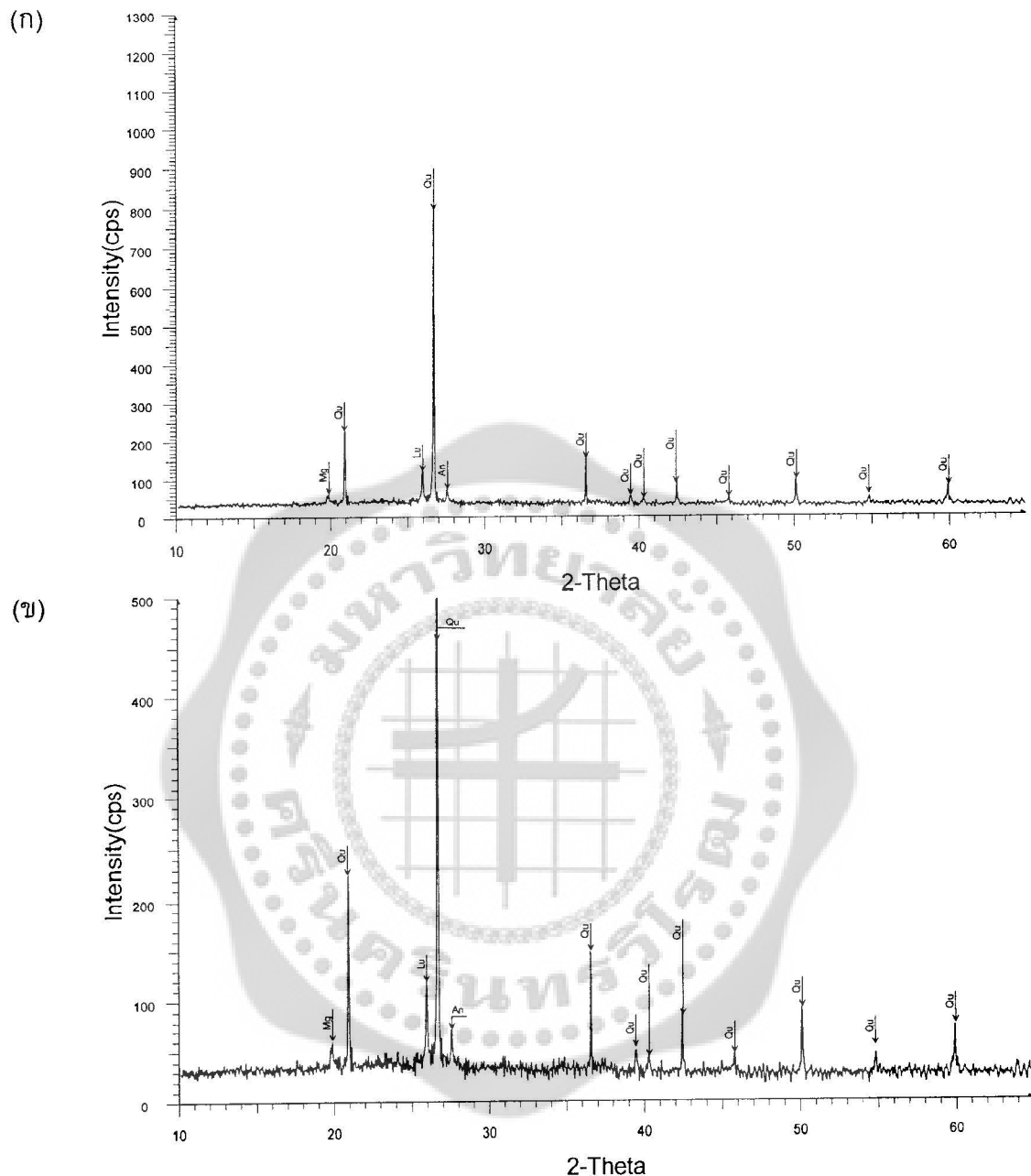


ภาพประกอบ 49 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 10 นาที โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวตั้งกว้างถึง 1300 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , An=Anorthoclase, Mg=Magmetite, Lu=Leucite

ตาราง 42 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที ในภาพประกอบ 49

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
19.80	4.4814	7.3	2	1	2	Mg
20.87	4.2534	28.6	1	0	0	Qu
25.89	3.4391	16.1	0	0	4	Lu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	8.2	0	4	0	An
36.54	2.4571	9.9	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	7.3	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	6.2	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	7.5	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.2	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.7	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.5	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	10.7	2	1	1	Qu

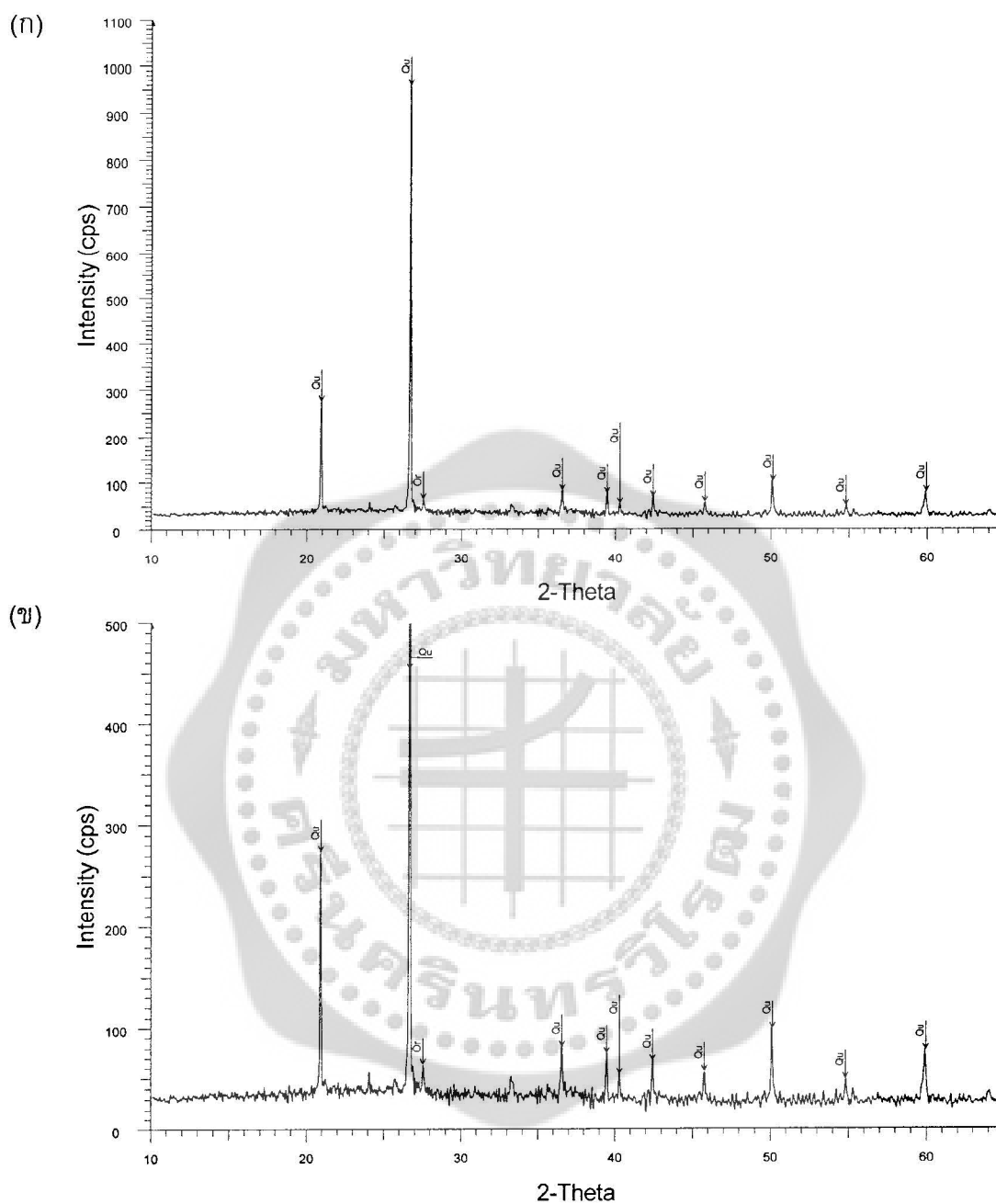


ภาพประกอบ 50 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 10 นาที โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวตั้งกว้างถึง 1300 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , An=Anorthoclase, Mg=Magmetite, Lu=Leucite

ตาราง 43 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SP7 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที ในภาพประกอบ 50

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
19.80	4.4814	6.8	2	1	2	Mg
20.87	4.2534	28.1	1	0	0	Qu
25.89	3.4391	15.0	0	0	4	Lu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.50	3.2410	9.0	0	4	0	An
36.54	2.4571	18.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	6.1	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	4.9	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	11.4	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.5	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.9	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	5.7	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	9.3	2	1	1	Qu

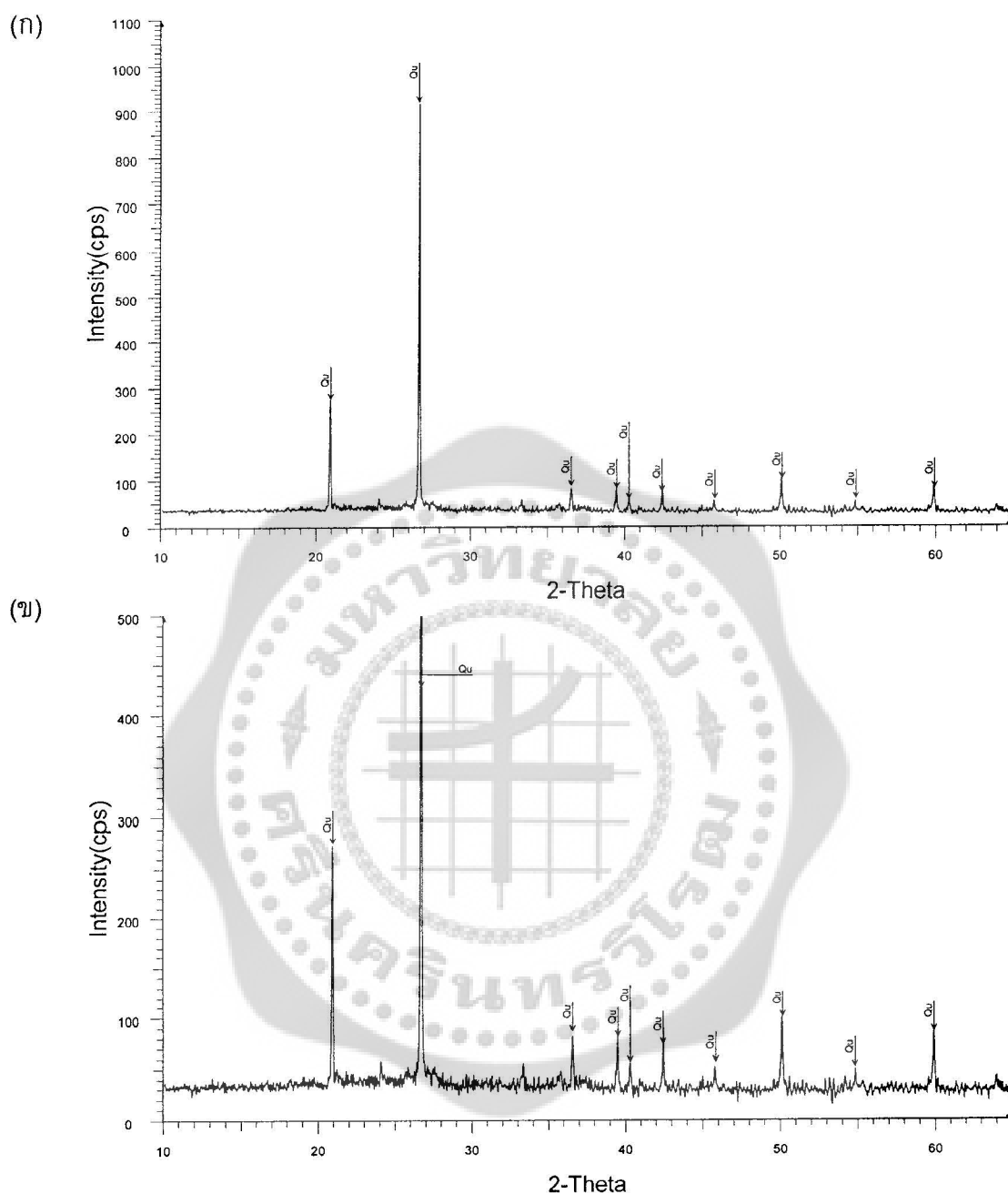


ภาพประกอบ 51 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวตั้งกว้างถึง 1100 cps และ
 ค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการ
 ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz , Or=Orthoclase,

ตาราง 44 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที ในภาพประกอบ 51

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	27.3	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	6.1	0	0	2	Or
36.54	2.4571	9.4	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	8.0	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.3	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	7.0	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.1	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.0	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.8	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	7.9	2	1	1	Qu

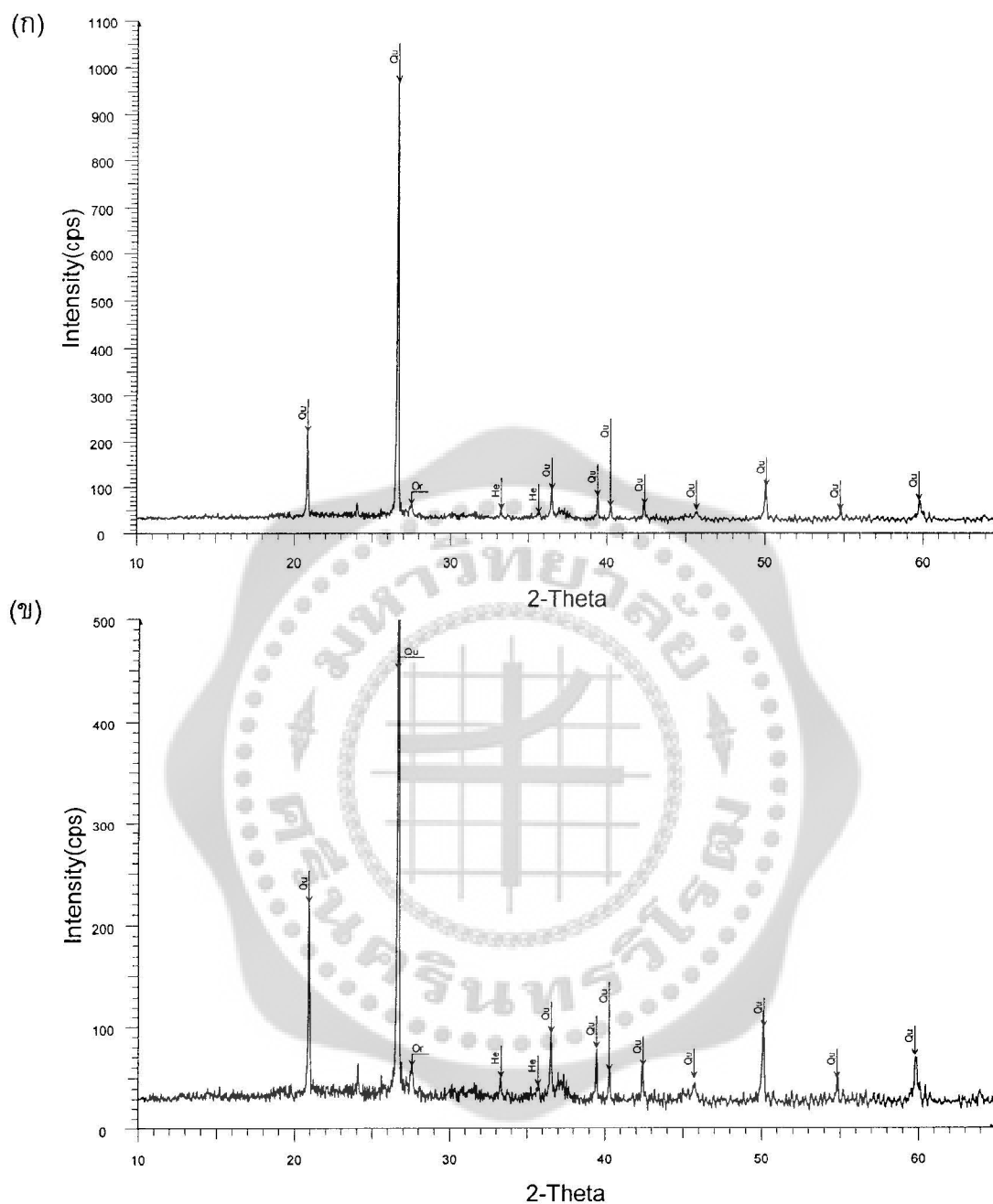


ภาพประกอบ 52 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 10 นาที โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวตั้งกว้างถึง 1100 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz

ตาราง 45 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที ในภาพประกอบ 52

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	29.7	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
36.54	2.4571	8.6	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	8.8	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.5	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	9.6	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	5.0	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	10.0	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.9	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	9.4	2	1	1	Qu

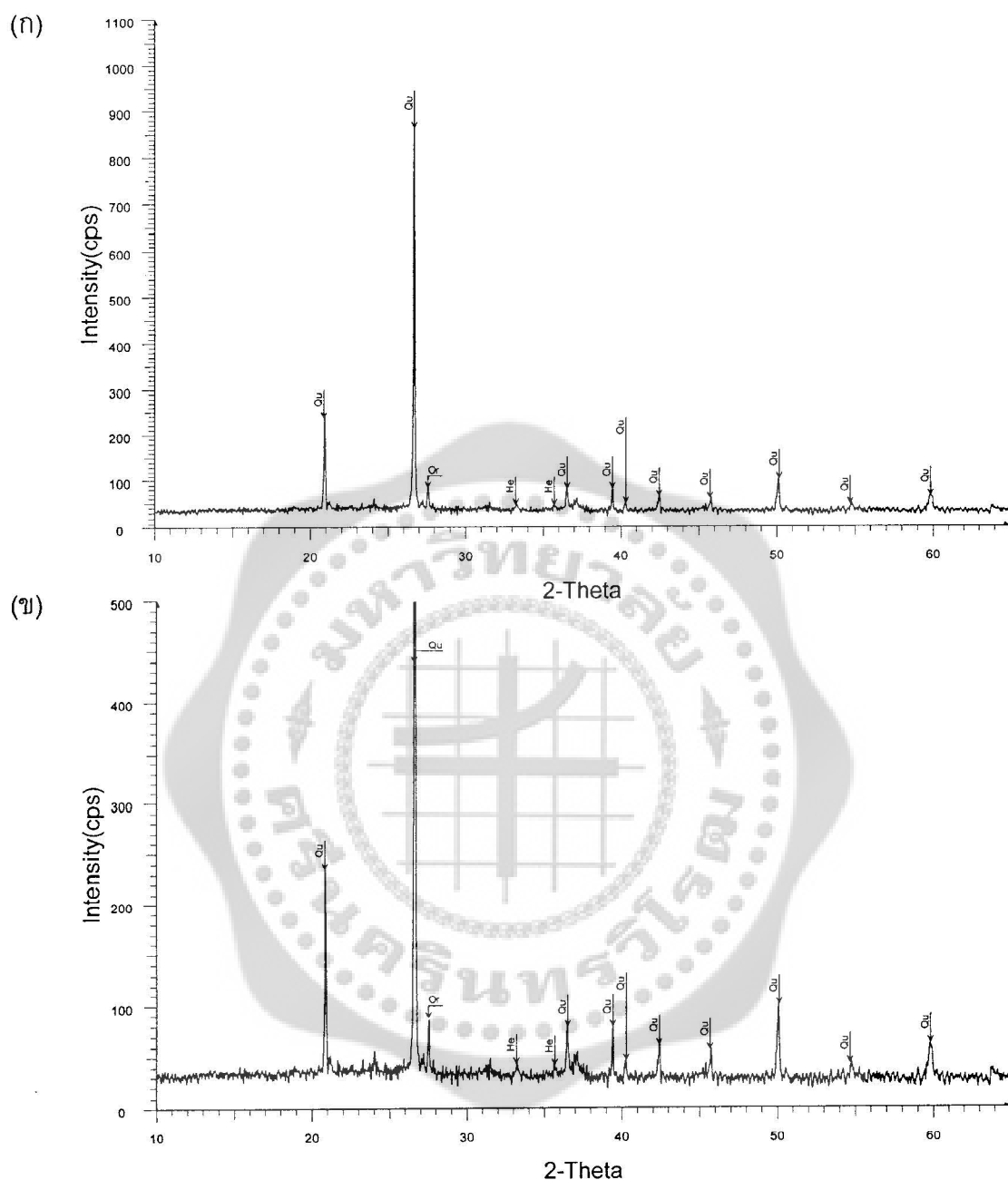


ภาพประกอบ 53 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 10 นาที โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวตั้งกว้างถึง 1100 cps และค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz ,Or=Orthoclase, He=Hematite

ตาราง 46 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่
 ทะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที ในภาพประกอบ 53

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.85	4.2568	24.1	1	0	0	Qu
26.63	3.3451	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	9.8	0	0	2	Or
33.21	2.6957	5.4	1	0	4	He
35.61	2.5191	4.5	1	1	0	He
36.53	2.4580	9.9	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	8.8	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.0	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	8.0	2	0	0	Qu
45.79	1.9800	5.4	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	11.1	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.3	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	6.7	2	1	1	Qu



ภาพประกอบ 54 (ก) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที โดยมีค่าความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ในแนวตั้งกว้างถึง 1100 cps และ
 ค่ามุมในแนวนอนช่วง 10 ถึง 65 องศา

(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างในรูป (ก) ที่มีการ
 ขยายมาตราส่วนในแนวแกนตั้งในช่วง 500 cps Qu=Quartz ,Or=Orthoclase,
 He=Hematite

ตาราง 47 แสดงข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างเซรามิกส์ SB2 ที่
 ชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกอัตราส่วน 1:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิ
 50°C เวลา 10 นาที ในภาพประกอบ 54

มุม 2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างระนาบ ผลึก (อังสตรอม)	ความเข้มสัมพัทธ์ (%)	h	k	l	สัญลักษณ์
20.87	4.2534	27.6	1	0	0	Qu
26.64	3.3437	100.0	1	0	1	Qu
27.52	3.2380	9.9	0	0	2	Or
33.21	2.6957	4.2	1	0	4	He
36.54	2.4571	8.5	1	1	0	Qu
39.46	2.2819	8.9	1	0	2	Qu
40.31	2.2358	5.1	1	1	1	Qu
42.45	2.1278	8.1	2	0	0	Qu
45.80	1.9797	6.3	2	0	1	Qu
50.14	1.8180	11.3	1	1	2	Qu
54.87	1.6718	4.4	2	0	2	Qu
59.96	1.5416	6.8	2	1	1	Qu

ตาราง 48 แสดงผลการวิเคราะห์สารละลายที่ได้จากการชะล้างสารตัวอย่างเซรามิกส์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 50°C เวลา 10 นาที ด้วยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอม

ตัวอย่าง	เซรามิกส์: กรดไฮโดรคลอริก (g/cm ³)	ความเข้มข้นของธาตุที่ถูกชะล้าง (ppm)		
		Na	K	Fe
SP1	1:10	83.8	15.2	15.3
	1:30	41.7	6.0	6.0
SP2	1:10	84.1	9.6	4.1
	1:30	11.8	0.1	1.2
SP7	1:10	63.8	153.5	50.0
	1:30	7.8	36.5	16.0
ST2	1:10	16.3	166.2	-**
	1:30	16.3	154.3	-**
SB2	1:10	16.3	160.9	61.5
	1:30	15.8	153.0	30.0

** ผลการวิเคราะห์ไม่พบธาตุดังกล่าวเพราะในสารตัวอย่างเซรามิกส์ ST2 ไม่มีแร่เฮมาไทต์

บทที่ 5

สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์ประเภทเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง อิฐและปอร์ซเลน ที่ผลิตในประเทศไทยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าสามารถวิเคราะห์เฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์บางชนิดออกมาได้ง่าย และน่าเชื่อถือเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้จากการผสมสารตัวอย่างขึ้นเอง และจากการพิจารณาสีของสารตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้มาเกี่ยวกับอุณหภูมิในการเผาของเซรามิกส์กับสีของแร่และการเกิดเฟสเชิงผลึกในการเผาแร่ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ ของสารแต่ละชนิดปรากฏว่าได้ผลสอดคล้องกัน โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากสารตัวอย่างเซรามิกส์ส่วนใหญ่มีผลึกของแร่ควอตซ์ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลเด่นชัดมาก ได้ทดลองนำสารตัวอย่างที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ซับซ้อนยากต่อการวิเคราะห์ให้ได้บางตัวอย่างไปชะล้างธาตุที่มีปริมาณน้อยๆ ด้วยกรดไฮโดรคลอริกออกจากสารตัวอย่าง จากตาราง 48 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ธาตุที่ถูกชะล้างในสารละลายด้วยวิธีการดูดกลืนเชิงอะตอมให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างหลังการชะล้างที่มีเส้นรังสีเอกซ์ของผลึกแร่ที่ถูกชะล้างออกไปมีปริมาณลดลง ดังภาพประกอบ 49-54

อภิปรายผลการทดลอง

1. จากข้อมูลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ทั้งหลายในเซรามิกส์จากที่ต่างๆ ในประเทศไทยดังตาราง 9-10 พบว่าสารตัวอย่างกระเบื้องและอิฐ 4 ตัวอย่างคือ ST3 ST4 SB2 และ SB4 ที่มีสีแดงเข้ม เผาที่อุณหภูมิ 800°C มีผลึกของแร่ควอตซ์ (สีขาว) และแร่เฮมาไทต์ (สีแดงเข้ม) เหมือนกัน โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชัดเจน นอกจากนี้ข้อมูลการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกในตาราง 48 แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างอิฐ SB2 มีธาตุเหล็ก (Fe) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผลึกแร่เฮมาไทต์เป็นการสนับสนุนว่าสารตัวอย่างอิฐ SB2 มีผลึกของแร่เฮมาไทต์ประกอบอยู่จริง

สารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา SP7 สีแดงเข้ม พบผลึกของแร่ควอตซ์ แร่แมกนีไทต์ (สีน้ำตาลดำ) แร่ลิวไซต์ (สีขาว) และแร่อะนอร์โทเคลส (สีน้ำตาลแดง) โดยสามารถวิเคราะห์ได้

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชัดเจน เมื่อพิจารณาข้อมูลการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก ในตาราง 48 พบธาตุโซเดียม (Na) ธาตุโพแทสเซียม (K) และธาตุเหล็ก (Fe) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผลึกแร่แมกนีไทต์ แร่ลิไชต์ และแร่อะนอร์ไทต์ เป็นการสนับสนุนว่า สารตัวอย่าง SP7 มีผลึกของแร่เหล่านั้นจริง

สารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา อีฐ และกระเบื้อง จำนวน 4 ตัวอย่างคือ SP5 SP6 SB3 และ ST2 ที่มีสีแดงอ่อน มีผลึกของแร่ควอตซ์ (สีขาว) และแร่อโรเซล (สีน้ำตาลแดง) เหมือนกัน โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชัดเจน กรณีสารตัวอย่าง ST2 เมื่อนำไปชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก พบธาตุโพแทสเซียม (K) ที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของผลึกแร่อโรเซล ดังตาราง 48 เป็นการสนับสนุนว่าสารตัวอย่าง ST2 มีผลึกของแร่อโรเซลประกอบอยู่

กรณีสารตัวอย่างปอร์ซเลน SR สีขาว เผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,350°C ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบผลึกแร่ควอตซ์กับแร่มัลไลต์ (สีขาว) ซึ่งตามทฤษฎีผลึกแร่มัลไลต์ที่มีโครงสร้างแบบอโรมบิก เกิดจากการเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกของแร่เคโอลินต์ที่มีโครงสร้างแบบโมโนคลินิกที่อุณหภูมิสูงกว่า 950°C ซึ่งนับว่าผลการวิเคราะห์นี้มีความสอดคล้องน่าเชื่อถือ สำหรับสารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา SP3 (ฝ่าหม้อดินขาว สีขาวครีม) ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบผลึกแร่ควอตซ์กับแร่มัลไลต์ (สีขาว) ชัดเจน และสารตัวอย่าง SP4 (อ่างล้างปลา) สีแดงอ่อน มีผลึกแร่ควอตซ์และแร่อัลไบต์ (สีแดงอ่อน) โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ชัดเจนเช่นกัน

กรณีของสารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา SP1 (ครก สีน้ำตาล) และ SP2 (กระถางต้นไม้รูปนกยูง สีน้ำตาลดำ) ซึ่งผลิตจากอำเภอด่านเกวียน จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีสีน้ำตาลดำควรมีเหล็กออกไซด์ประกอบอยู่แต่ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ไม่พบผลึกแร่ที่มีเหล็กออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากสารตัวอย่างดังกล่าวจะเผาที่อุณหภูมิ 1,000-1,200°C ซึ่งมีผลทำให้เหล็กออกไซด์ละลายกลายเป็นฟลักซ์ซึ่งมีโครงสร้างอสัณฐานเคลือบผิวสารตัวอย่างที่มีสีน้ำตาลดำ เมื่อพิจารณาข้อมูลการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกในตาราง 48 แสดงให้เห็นว่าสารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา SP1 และ SP2 มีธาตุเหล็กจริง ซึ่งเป็นการยืนยันว่าสารตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา SP1 และ SP2 มีเหล็กออกไซด์ประกอบอยู่

การนำสารตัวอย่างกระเบื้อง ST1 และอีฐ SB1 สีขาว เผาที่อุณหภูมิ 1,100-1,200°C มาวิเคราะห์เพื่อศึกษาว่าสามารถพบผลึกแร่ไทต์ไมต์ประกอบอยู่หรือไม่ เพราะช่วงอุณหภูมิ 870-1,470°C ผลึกแร่ควอตซ์อาจจะมีการเปลี่ยนเฟสเชิงผลึกเป็นผลึกแร่ไทต์ไมต์ที่มีโครงสร้าง

แบบออโรรมบิกก็ได้ แต่ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบผลึกแร่ควอตซ์เพียงอย่างเดียว

2. จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมตัวอย่างมาตรฐานระหว่างแร่ควอตซ์กับแร่เฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์กับแร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์กับแร่เคโอลิไนต์ แร่ควอตซ์กับแร่ลูมินาออกไซด์และแร่ควอตซ์กับแร่เฮมาไทต์ ที่ผสมกันในอัตราส่วน 20:80 50:50 และ 80:20 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สรุปได้ว่า

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารผสมตัวอย่างมาตรฐานระหว่างแร่ควอตซ์กับแร่ลูมินาออกไซด์อัตราส่วน 50:50 และ 80:20 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สังเกตเส้นรังสีเอกซ์ของแร่ลูมินาออกไซด์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ยาก เนื่องจากความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากผลึกแร่ลูมินาออกไซด์มีค่าความเข้มต่ำมากถูกบดบังด้วยความเข้มของเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากผลึกของแร่ควอตซ์ที่มีค่าความเข้มรังสีเอกซ์สูง

ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สารผสมตัวอย่างมาตรฐานระหว่างแร่ควอตซ์กับแร่เฮมาไทต์ ในอัตราส่วน 80:20 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สังเกตเส้นรังสีเอกซ์ของแร่เฮมาไทต์จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ยาก เนื่องจากได้รับผลกระทบจากเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากผลึกของแร่ควอตซ์ที่มีปริมาณสูงเช่นกัน

สำหรับผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแร่ควอตซ์กับแร่เฟลด์สปาร์ แร่ควอตซ์กับแร่แคลไซต์ แร่ควอตซ์กับแร่เคโอลิไนต์ ในอัตราส่วน 80:20 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สังเกตเส้นรังสีเอกซ์ของแร่ที่มีปริมาณน้อยๆ ไม่เด่นชัด เนื่องจากได้รับผลกระทบจากเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากผลึกของแร่ควอตซ์ที่มีปริมาณสูง แสดงให้เห็นว่าในกรณีสารตัวอย่างที่มีผลึกแร่ควอตซ์ปริมาณสูงโอกาสที่จะวิเคราะห์เฟสเชิงผลึกของแร่ที่มีปริมาณน้อยๆ ทำได้ยาก

3. จากการนำข้อมูลการชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกในตาราง 48 มาประกอบการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่โดยเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างชนิดเดียวกันก่อนและหลังการชะล้าง ปรากฏว่าธาตุที่ถูกชะล้างออกไปตามตาราง 48 เป็นส่วนประกอบของแร่ที่มีปริมาณน้อยๆ ในสารตัวอย่างที่มีเส้นรังสีเอกซ์ที่ไม่เด่นชัดและได้รับผลกระทบจากเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากผลึกแร่ควอตซ์ที่มีปริมาณสูง โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่างหลังการชะล้าง แสดงให้เห็นว่าเส้นรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนจากแร่ที่ประกอบด้วยธาตุที่ถูกชะล้างออกไปมีความเข้มลดลงหรือหายไปเลย นับว่าเป็นข้อมูลที่สนับสนุนผลการวิเคราะห์ว่ามีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง และจากข้อมูลในตาราง 48 จะเห็นได้ว่าการใช้อัตราส่วน 1:10 ในบางตัวอย่างชะล้างได้ดีกว่าอัตราส่วน 1:30 และในบางตัวอย่างให้ผลการชะล้างธาตุที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้อัตราส่วน 1:30

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของแร่ในเซรามิกส์ประเภทเครื่องปั้นดินเผา กระเบื้อง อิฐและปอร์ซเลน ที่ผลิตในประเทศไทยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะมีข้อเสนอแนะดังนี้

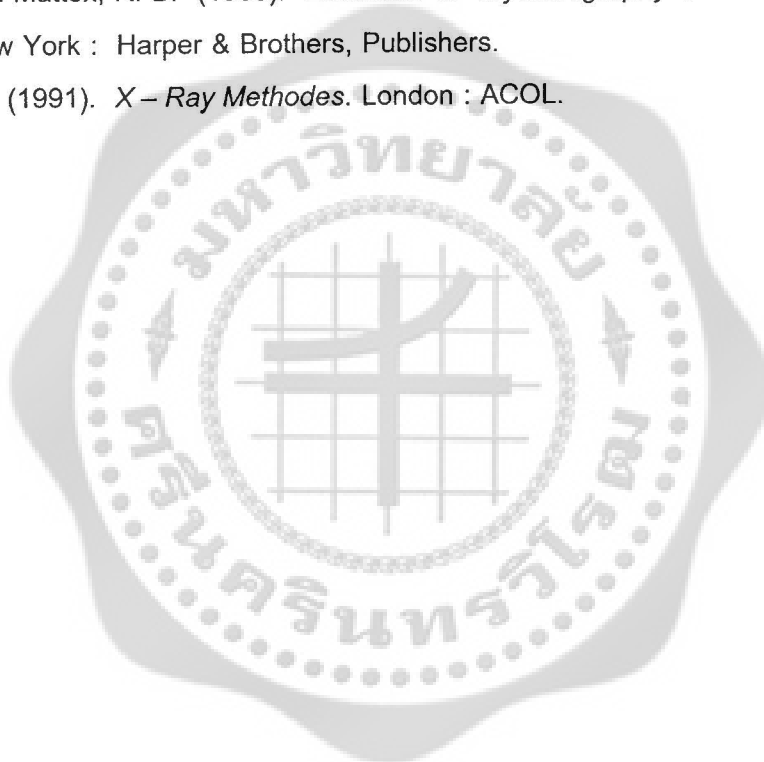
1. ในการเตรียมสารตัวอย่างต้องอาศัยความระมัดระวังในเรื่องการปนเปื้อน การบดสารตัวอย่าง การอัดสารตัวอย่างและความเรียบของผิวหน้าของสารตัวอย่างซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีผลต่อรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏออกมา
2. สำหรับการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเฟสเชิงผลึกของสารตัวอย่างเซรามิกส์ที่มีความซับซ้อนโดยนำสารตัวอย่างดังกล่าวมาชะล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นแล้วนำสารละลายที่ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนเชิงอะตอมซึ่งวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องระมัดระวังในการควบคุมตัวแปรที่มีผลทำให้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้แตกต่างกัน ดังนั้นการตรวจสอบผลการวิเคราะห์อีกวิธีหนึ่งที่น่าเชื่อถือคือการนำข้อมูลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ไปศึกษาความละเอียดของสเปกตรัม (Spectrum refinement) จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ซึ่งต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์แต่ต้องใช้เวลาในการศึกษาวิธีการและทฤษฎีที่ยุ่งยากอีกมาก ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่น่าจะนำมาศึกษาและวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับผลการทดลองในครั้งต่อไป



บรรณานุกรม

- ทรัพยากรธรณี, กรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2536). แร่. กรุงเทพฯ : ศรีเมืองการพิมพ์.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. (2532). *เซรามิกส์*. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภัทราวรรณ คณะวงศ์. (2542). "เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน", *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. (17) : 52-55.
- สินี วุฒิธรสกล. (2542). "เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน", *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. (16) : 42-46.
- สำเภา จงจิตต์. (2528). *เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์ 461 (ฟิสิกส์สถานะของแข็งเบื้องต้น)*. กรุงเทพฯ. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร.
- อายุวัฒน์ สว่างผล. (2543). *วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์*. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- Bruker AXS. (1999). *D8 X-ray Diffractometer Vol 1*. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.
- Chandler, M. (1967). *Ceramics in the Modern World Man's First Technology Come of Age*. London : Aldus Books.
- Cullity, B.D. (1967). *Elements of X – Ray Diffraction*. London: Addison – Wesley Publishing.
- Cornelius, S. & Hurlbut, JR. (1971). *DANA's Manual of Mineralogy*. New York : John Wiley & Sons.
- Ford, W.E. (1932). *Text Book of Mineralogy*. New York : John Wiley & Sons. Inc.
- Hardy, M. (1992). "X-ray Diffraction Measurement of the Quartz Content of Clay and Silt Fractions in Soils," in *Clay Minerals*. (27): 47-55
- Islam, A.K.M.E. & Lotse, E.G. (1986). "Quantitative Mineralogical Analysis of some Bangladesh Soils with X-ray, Ion Exchange and Selective Dissolution Techniques," in *Clay Minerals*. (21): 31-42
- Khanra, S. and others. (1998). "Studies on the Phase Mineralogy and Leaching Characteristics of Coal Fly Ash," in *Water, Air, and Soil Pollution*. (107): 251-275
- Minichelli, D. (1982). "The Quantitative Phase Analysis of Clay Minerals by X-ray Diffraction : Modern Aspects of Industrial Routine Control," in *Clay Minerals*. (17): 401-408

- Nuffield E.W. (1966). *X-Ray Diffraction Methodes*. New York : John Wiley & Son.
- Read, H.H. (1956). *Rutley's Elements of Mineralogy*. London : Thomsas Murby & Co.
- Sawaoka, A. & Akashi, T. (1984). "Formation Machanism of High Dense Form Boron Nitride under Shock Compression," in *Mat. Res. Soc Symp. Proc.* (24): 365-371
- Schlottz, R. & Uhlig, S. (2000). *Introduction to X-Ray Fluorescence Analysis (XRF)*. Karlsruhe : Bruker Analytical X-Ray Systems.
- Wade, A.F & Mattox, R. B. (1960). *Elements of Crystallography and Mineralogy*. New York : Harper & Brothers, Publishers.
- Whiston, C. (1991). *X – Ray Methodes*. London : ACOL.





ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาววรรณ	ชื่อสกุล	ชูรักษ์	
เกิดวันที่	20	เดือน	มกราคม	พุทธศักราช 2516
สถานที่เกิด	อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง			
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	20/9 ถ.เพชรเกษม ม.1 ต.นาเตย อ.ท้ายเหมือง จ.พังงา 82120			

ประวัติการศึกษา

- | | |
|-----------|---|
| พ.ศ. 2535 | มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสตรีพัทลุง จังหวัดพัทลุง |
| พ.ศ. 2539 | วท.บ. วิทยาศาสตร์ (ศึกษาศาสตร์) จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี |
| พ.ศ. 2546 | กศ.ม. (สาขาวิชาฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

