

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ \*  
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ  
วพช  
อว 12

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรง  
ตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์ 7 ว.

เรื่องที่ 1

การศึกษาวิจัยวิธีการหาค่าประกอบจนวนกันความร้อน  
ชนิดแคลเซียมซิลิเกต

นางสุจินต์ พราวพันธ์  
นักวิทยาศาสตร์ 6 ว.

ฝ่ายวิเคราะห์และทดสอบ  
ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

ศูนย์วิจัยและบริการ  
ตาม พ.ร.บ. อนุรักษ์และส่งเสริมการบริการ พ.ศ. 2540

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรง  
ตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์ 7 ว.

เรื่องที่ 1

การศึกษาวิจัยวิธีการหาค่าประกอบจนวนกันความร้อน

120/  
เลขที่ กพช  
0572  
เลขที่บัญชี 10001  
วันที่ 14 พ.ค. 94

ชนิดแคลเซียมซิลิเกต

ด้วยอำนาจ  
จาก  
จ.น.

นางสุจินต์ พราวพันธุ์  
นักวิทยาศาสตร์ 6 ว.

ฝ่ายวิเคราะห์และทดสอบ  
ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเซรามิก  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ  
กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

## บทคัดย่อ

ปัจจุบันการใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียพลังงานมีความจำเป็นมากขึ้น ทั้งที่ใช้ภายในบ้านและในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ ฉะนั้นการผลิตฉนวนกันความร้อน ก็จะแตกต่างกันไปตามลักษณะของการใช้งานแต่ละประเภท วัสดุที่นำมาใช้ผลิตฉนวนกันความร้อนมีหลายชนิด ทั้งที่ได้มาจากทรัพยากรธรรมชาติ พืช หรือจากวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น มีทั้งลักษณะที่เป็นเส้นใย ผง เกล็ด หรือเม็ดเล็ก ๆ ในการผลิตจะใช้วัตถุดิบมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแข็งแรงให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ในการศึกษาวิเคราะห์เพื่อวินิจฉัยองค์ประกอบของฉนวนกันความร้อนในครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ฉนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate insulation) หมายเลขปฏิบัติการ RQ 600 ซึ่งต้องวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบทั้งส่วนที่เป็นผงและเป็นเส้นใย โดยต้องใช้ทั้งการทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หาค่าองค์ประกอบทางเคมีและใช้เครื่องมือพิเศษคือ กล้องจุลทรรศน์แบบแสง , SEM , XRD , FTIR และ EDS พบว่าตัวอย่างประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ปริมาณร้อยละ 65.2 แคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณร้อยละ 6.1 ควอทซ์ ปริมาณร้อยละ 5.9 เส้นใยเซลลูโลส ปริมาณร้อยละ 7.2 และออกไซด์อื่น ๆ ปริมาณร้อยละ 14.7 ไม่พบเส้นใยแอสเบสตอส

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูป	ก
คำนำ	1
- เหตุผลและความเป็นมา	2
- วัตถุประสงค์	11
- ประโยชน์ที่ได้รับ	11
- ระยะดำเนินการ	11
วัสดุและอุปกรณ์	11
วิธีการทดลอง	14
ผลการทดลอง	22
วิจารณ์ผลการทดลอง	37
สรุปผลการทดลอง	40
คำขอบคุณ	41
เอกสารอ้างอิง	42

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายเส้นใยของตัวอย่าง	25
รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายเส้นใยเยื่อกระดาษ	26
รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างเผาที่ 575 องศาเซลเซียส	27
รูปที่ 4 แสดง EDS spectrum ของเส้นใยตัวอย่าง	28
รูปที่ 5 แสดง IR spectrum ของเส้นใยตัวอย่าง	29
รูปที่ 6 แสดง IR spectrum ของเส้นใยเยื่อกระดาษ	29
รูปที่ 7 แสดง IR spectrum ของเส้นใยแอสเบสตอส	30
รูปที่ 8 แสดง IR spectrum ของเส้นใยแก้ว	31
รูปที่ 9 แสดง IR spectrum ของเส้นใยแร่	31
รูปที่ 10 แสดง XRD diffractogram ของตัวอย่างเริ่มต้น	32
รูปที่ 11 แสดง XRD diffractogram ของตัวอย่างเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส	33
รูปที่ 12 แสดง XRD diffractogram ของตัวอย่างเฉพาะเส้นใย	34
รูปที่ 13 แสดงภาพถ่ายของเส้นใยแอสเบสตอสชนิดต่าง ๆ	35
รูปที่ 14 แสดงภาพถ่ายของเส้นใยแก้วและใยแร่	36

## คำนำ

โลกกำลังพัฒนาไปในทุก ๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาเพื่อประหยัดพลังงานได้แก่พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ในการพัฒนาเหล่านี้จะพบว่าฉนวนกันความร้อนได้มีบทบาทอย่างมากต่อการป้องกันการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนออกไป ฉนวนกันความร้อนนั้นวันจะมีบทบาทสำคัญต่อมนุษย์มากขึ้น โดยเฉพาะในบ้านเรือนที่อยู่อาศัยจำเป็นต้องมีหลังคาหรือฝ้าที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการความร้อนจากหลังคาบ้านแผ่รังสีความร้อนมายังตัวบ้านเพื่อไม่ให้อุณหภูมิภายในบ้านสูง และเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้าเวลาใช้เครื่องปรับอากาศ นอกจากนี้ฉนวนกันความร้อนยังได้ถูกพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกด้วย เช่น นำไปเป็นฉนวนสำหรับท่อส่งความร้อน เป็นฉนวนในเตาหลอมโลหะเพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนในเตาหลอม ฯลฯ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำเอาวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีหลายชนิดมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อน แต่ก็มีวัสดุหลายชนิดที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีแต่มีอันตรายต่อผู้ใช้และคนงานที่นำเอาวัสดุนั้นไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ฉนวนกันความร้อน เช่น เส้นใยแอสเบสตอส (asbestos fiber) เส้นใยแก้ว (glass fiber) ฯลฯ ดังนั้นในหลายประเทศได้มีการห้ามนำเอาเส้นใยเหล่านี้ไปใช้งานแล้ว เช่น ในประเทศญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกาห้ามนำเอาเส้นใยแอสเบสตอสนี้ไปใช้งาน แต่สำหรับประเทศไทยมีการห้ามนำเข้าเฉพาะเส้นใยแอสเบสตอส ชนิด โครซิโดไลต์ (crocidolite) ส่วนชนิดอื่น ๆ หากจะนำเข้ามาในประเทศไทยในรูปวัตถุดิบต้องได้รับอนุญาตการนำเข้าจากกระทรวงอุตสาหกรรมเสียก่อน อย่างไรก็ตามก็ตีฉนวนกันความร้อนที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ถึงแม้จะมีเส้นใยแอสเบสตอสผสมอยู่ด้วยไม่ต้องขออนุญาตแต่จะมีผลต่อการจัดประเภทพิภพอัตราภาษีศุลกากรที่ต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการจัดเก็บภาษีศุลกากร

## เหตุผลและความเป็นมา

กรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นหน่วยงานที่ให้บริการการวิเคราะห์ตัวอย่างสินค้าที่ส่งมาจากหน่วยงานต่างๆ รวมทั้งตัวอย่างสินค้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศและเป็นปัญหาในการจัดประเภทพิกัตอัตราภาษีศุลกากรดังเช่น ตัวอย่างฉนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมซิลิเกตที่ส่งมาจากกรมศุลกากร โดยมีคำถามดังนี้

1. ตัวอย่างนำมาจากแคลเซียมซิลิเกต หรือเส้นใยอนินทรีย์ชนิดอื่นใดในปริมาณ ร้อยละเท่าใด
2. มีเส้นใยแอสเบสตอสผสมอยู่หรือไม่ หากมีผสมอยู่จะมีปริมาณเท่าใด

จากการศึกษาการจัดประเภทพิกัตอัตราภาษีศุลกากรพบว่า จาก Explanatory note จะพบว่า มีประเด็นที่เป็นสาระสำคัญดังนี้คือ

- ประเภทพิกัตที่ 68.06 เป็นประเภทพิกัตของฉนวนกันความร้อน (heat insulating) ฉนวนกันเสียง (sound insulating) ฉนวนดูดซับเสียง (sound absorbing) ซึ่งทำด้วยวัสดุที่ได้จากแร่ (mineral materials) เช่น ซิลิเซียสฟอสซิล (siliceous fossil) แมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate) เป็นต้น รวมถึงฉนวนที่มีส่วนผสมของใยซีโลหะ (slag wool) ใยแร่ (mineral wool) ใยเซรามิก (ceramic wool) โดยที่ในประเภทพิกัตนี้จะมีแอสเบสตอสปนอยู่ได้ในอัตราส่วนที่ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

- ประเภทพิกัตที่ 68.08 เป็นประเภทพิกัตของ ฉนวนกันความร้อน ฉนวนกันเสียงและฉนวนดูดซับเสียงที่ทำด้วยวัสดุที่ได้จากพืช (vegetable materials) เช่น ทำจาก เส้นใยเซลลูโลส เส้นใยไม้ ชันไม้ ชีเลื่อย ฯลฯ อัดเข้ากับสารยึด เช่น ซีเมนต์ ปูนพลาสเตอร์ หรือโซเดียมซิลิเกต และอาจมีสารเติมที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แมกนีไซด์ ทราช หรือเส้นใยแอสเบสตอสปนอยู่ได้

- ประเภทพิกัตที่ 68.12 เป็นประเภทพิกัตของวัสดุที่ทำด้วยแอสเบสตอส รวมถึงฉนวนกันความร้อนที่ได้จากการผสมกันระหว่าง แอสเบสตอสกับแมกนีเซียมคาร์บอเนต เส้นใยเซลลูโลส ชีเลื่อย หินพิมมัส อลูมินัมออกไซด์ ใยแก้ว คอร์ก ฯลฯ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีแอสเบสตอสมากกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากการจัดประเภทพิกัตของศุลกากรจะพบว่า มีประเด็นที่จะแบ่งประเภทพิกัตออกจากกันได้ดังนี้

1. ปริมาณของแอสเบสตอสที่มากกว่าร้อยละ 5 จะเป็นตัวชี้ความแตกต่างระหว่างประเภทพิกัตที่ 68.12 ออกจากประเภทพิกัตที่ 68.06 และ 68.08
2. ปริมาณของแอสเบสตอสที่น้อยกว่าร้อยละ 5 จะต้องดูส่วนผสมอื่น ๆ เช่น ถ้ามีส่วนผสมที่ทำด้วยวัสดุที่ได้จากพืชเป็นหลักจะจัดเป็นของตามประเภทพิกัตที่ 68.08
3. แต่ถ้ามีส่วนผสมที่เป็นวัสดุได้จากแร่ธรรมชาติเป็นหลัก หรือมี mineral wool , slag wool , ceramic wool ผสมอยู่จะจัดเป็นของตามประเภทพิกัตที่ 68.06

ดังนั้นเพื่อการวินิจฉัยที่ถูกต้องและครบถ้วน ในการวิเคราะห์และทดสอบจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งจะต้องวิเคราะห์องค์ประกอบทั้งหมดของตัวอย่าง ทั้งส่วนที่เป็นเส้นใย ตัวยึด และ ส่วนผสมอื่น ๆ ไม่นับเฉพาะเส้นใยแอสเบสทอสเพียงอย่างเดียว ซึ่งองค์ประกอบทุกองค์ประกอบของตัวอย่าง จะมีผลต่อการจัดพิกัดอัตราภาษีศุลกากรที่แตกต่างกันทั้งสิ้น

### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อนเป็นฉนวนที่จัดทำขึ้นมาเพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งต้องมีคุณสมบัติเป็นตัวนำความร้อนที่เลว มีค่าการนำความร้อนต่ำ ฉนวนกันความร้อนที่จัดทำขึ้นมาจะมีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ดีเพียงใดขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ในการจัดทำเป็นฉนวนกันความร้อน โดยปกติแล้ววัสดุที่จัดนำมาทำเป็นฉนวนกันความร้อนจะมีลักษณะเป็นรูพรุน ทั้งนี้เพราะว่าการที่เป็นรูพรุนจะทำให้มีช่องว่างที่เป็นอากาศอยู่ภายในรูพรุนเหล่านั้น อากาศจัดเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีประเภทหนึ่งเพราะอากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ คือมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.02 วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าการที่ฉนวนกันความร้อนนั้นจะดีหรือไม่ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของรูพรุนเหล่านั้นด้วย กล่าวคือรูพรุนเหล่านั้นมีลักษณะปิดหรือเปิด ทั้งนี้ถ้ารูพรุนมีลักษณะเป็นแบบปิดจะทำให้อากาศที่อยู่ภายในรูพรุนเหล่านั้นไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำกว่าอากาศที่เคลื่อนที่ได้ ทำให้มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี นอกจากนี้ยังพบว่า การที่วัสดุที่นำมาจัดทำเป็นฉนวนมีขนาดเล็กและมีรูพรุนที่มีลักษณะปิดอยู่ภายในจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าวัสดุที่มีขนาดใหญ่ การที่รูพรุนภายในวัสดุมีลักษณะปิด เมื่อนำไปจัดทำเป็นฉนวนกันความร้อน ถ้านำส่วนภาคตัดขวางไปศึกษาด้วยกล้องจะพบว่ารูพรุนเหล่านั้นมีลักษณะเป็นเซลล์โดยที่มีผนังเซลล์ติดกันและในช่องว่างภายในเซลล์จะเป็นโพรงอากาศทำหน้าที่เป็นฉนวนป้องกันการแผ่รังสีความร้อน

คุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนของวัสดุที่นำมาจัดทำเป็นฉนวนยังขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในปริมาตรของอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุที่จัดทำเป็นฉนวนในหนึ่งหน่วยปริมาตรของฉนวนกันความร้อน กล่าวคือถ้าอัตราส่วนในปริมาตรของอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุที่จัดทำเป็นฉนวนมีค่าสูง จะทำให้ได้ฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าฉนวนมีค่าอัตราส่วนในปริมาตรของอากาศที่อยู่ภายในรูพรุนต่อปริมาตรของวัสดุที่จัดทำเป็นฉนวนต่ำ และถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงมากจนกระทั่งเปรียบเสมือนว่ามีผนังของเซลล์น้อยมากแต่จะมีแต่เพียงโพรงอากาศขนาดใหญ่อยู่ภายในฉนวนกันความร้อน จะทำให้คุณสมบัติในการแผ่รังสีความร้อนของผนังเซลล์ถูกตัดทิ้งไป ซึ่งฉนวนกันความร้อนลักษณะนี้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การจลความร้อนเท่ากับอากาศ จะจัดเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการที่ฉนวนกันความร้อนมีรูพรุนเป็นจำนวนมากจะทำให้ได้ฉนวนกันความร้อนที่มีค่าความหนาแน่นในเชิงปริมาตร (bulk density) ต่ำ



การมีรูพรุนในเนื้อของฉนวนกันความร้อน นอกจากจะได้จากการใช้วัสดุที่มีรูพรุนมาจัดทำเป็นฉนวนกันความร้อนแล้วยังพบว่าอาจใช้กรรมวิธีทำให้เกิดฟอง (foaming) โดยการใส่สารที่ทำให้เกิดฟอง หรือใส่สารที่มีคุณสมบัติเป็นกาวลงไปเพื่อยึดให้อนุภาคของวัสดุยึดติดกันไม่แน่นนักและมีฟองอากาศอยู่ภายใน หรือโดยการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นเส้นใยลงไปเพื่อให้เส้นใยยึดติดกันเองและยึดติดกับอนุภาคของวัสดุเพื่อให้อนุภาคแยกออกจากกัน มีช่องว่างเกิดขึ้นแต่ยังคงมีความแข็งแรง

<sup>(7)</sup>ลักษณะของฉนวนกันความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภทหลัก ๆ ตามคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาผลิตและลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังนี้ คือ

1. ฉนวนแบบเกล็ด (Flake insulation) ฉนวนกันความร้อนประเภทนี้จะประกอบด้วยวัสดุที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กหรือลักษณะเป็นเกล็ดเกาะตัวเข้าด้วยกันและเข้าไปอยู่ในช่องอากาศ ทำให้ได้ฉนวนที่มีรูพรุนที่แข็งแรง สามารถใช้งานเป็นท่อฉนวนหรือใช้งานด้านอื่น ๆ ในลักษณะเป็นบล็อกหรือแผ่นอัด วัสดุที่ทำเป็นฉนวนแบบเกล็ดที่รู้จักกันทั่วไปได้แก่ เพอร์ไลท์ (perlite) และเวอร์มิคูไลท์ (vermiculite)

2. ฉนวนแบบเส้นใย (Fibrous insulation) ฉนวนกันความร้อนประเภทนี้จะประกอบด้วยวัสดุที่มีลักษณะที่เป็นเส้นใย โดยที่เส้นใยเหล่านี้จะมีขนาดเล็ก ทำมาจากอินทรีย์วัตถุเช่น เส้นผม เส้นใยพืชต่าง ๆ หรืออาจทำมาจากอนินทรีย์วัตถุเช่น ใยหิน (rock wool) ใยแก้ว ใยซีโลหะ ใยเซรามิก หรือแอสเบสตอส

3. ฉนวนแบบกรานูลาร์ (Granular insulation) ฉนวนกันความร้อนประเภทนี้จะประกอบด้วยวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กและเป็นโพรงหรือกลวง ซึ่งโพรงเหล่านี้จะสามารถถ่ายเทอากาศระหว่างกันได้ วัสดุที่ทำเป็นฉนวนประเภทนี้ได้แก่ แมกนีเซียม หรือแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งได้มาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง หินปูน กับไดอะตอมไมต์ (diatomite) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุน หรือไม้ก๊อกจากพืช (vegetable cork)

4. ฉนวนแบบเซลล์ (Cellular insulation) ฉนวนกันความร้อนประเภทนี้จะประกอบด้วยวัสดุที่มีลักษณะเป็นเซลล์เล็ก ๆ ที่เกาะตัวกัน เซลล์จำพวกนี้อาจทำมาจากแก้ว พลาสติก และยาง ตัวอย่างของฉนวนประเภทนี้ได้แก่ เซลล์ลูการ์กลาส (cellular glass) โพลีสไตรีนโฟม (polystyrene foam)

5. ฉนวนแผ่นบางผิวสะท้อนแสง (Reflective insulation) ฉนวนกันความร้อนประเภทนี้จะประกอบด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนสูง หรือมีสภาพการแผ่รังสีต่ำ

นอกจากนี้ในปัจจุบันจะพบฉนวนกันความร้อนที่ทำมาจากวัสดุที่มีคุณสมบัติต่าง ๆ กัน ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปหรือมากกว่ามารวมกัน เช่นฉนวนกันความร้อนที่มีวัสดุประเภทเส้นใยผสมกับวัสดุประเภทกรานูลาร์เพื่อเพิ่มความทนแรงดึงของผลผลิตที่ได้

## การแบ่งประเภทวัสดุที่ใช้คำนวณความร้อน

การแบ่งประเภทวัสดุที่นำมาจัดทำเป็นฉนวนกันความร้อนสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น แบ่งตามโครงสร้าง รูปร่าง ชนิด ปริมาตร ความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของวัสดุ

การแบ่งตามโครงสร้างสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- วัสดุที่มีลักษณะที่เป็นรูพรุนและเป็นเส้นใย เช่น ใยแร่ , ใยแก้ว ฯลฯ
- วัสดุที่มีลักษณะที่เป็นรูพรุนและเป็นเม็ด เช่น เพอร์ไลต์ , เวอร์มิคูไลต์ , ซิลิกา ฯลฯ
- วัสดุที่มีลักษณะที่เป็นรูพรุนและเป็นเซลล์ เช่น โฟมแก้ว (foam glass) , โฟมพลาสติก (foam plastic) ฯลฯ

การแบ่งตามรูปร่างสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- วัสดุที่มีลักษณะที่เป็นชั้น เช่น เป็นแผ่น เป็นก้อน เป็นทรงกระบอก ฯลฯ
- วัสดุที่มีลักษณะที่เป็นเกลียว เช่น เป็นฝั้น เป็นแถบ
- วัสดุที่มีลักษณะที่เป็นเส้น (cord) เช่น cord , plaits

การแบ่งตามแหล่งกำเนิด ได้แก่ วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์

- วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น เส้นใยเซลลูโลส ฯลฯ
- วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น แคลเซียมซิลิเกต เวอร์มิคูไลต์ ใยแก้ว ใยแร่ ฯลฯ

การแบ่งตามค่าการนำความร้อน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- วัสดุที่มีค่าการนำความร้อน ชนิด A คือเป็นชนิดที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ
- วัสดุที่มีค่าการนำความร้อน ชนิด B คือเป็นชนิดที่มีค่าการนำความร้อนปานกลาง
- วัสดุที่มีค่าการนำความร้อน ชนิด C คือเป็นชนิดที่มีค่าการนำความร้อนสูง

ค่าการนำความร้อนของวัสดุทั้ง 3 ชนิดแสดงอยู่ในตารางที่ 1

อย่างไรก็ดีในการจัดวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนกันความร้อนต้องคำนึงถึงหลักเกณฑ์เป็น

### 4 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- วัสดุนั้นมีค่าการนำความร้อนเป็นอย่างไร
- มีค่าความหนาแน่นมวลเป็นอย่างไร
- มีค่าการอัดแน่นของมวลสารเป็นอย่างไร
- จะนำวัสดุนั้นไปทำเป็นฉนวนประเภทใด

ตารางที่ 1 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุทั้ง 3 ชนิด

ชนิดของวัสดุ	คุณสมบัติในการนำความร้อน	ค่าการนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิไม่เกิน , องศาเซลเซียส		
		25	125	300
A	การนำความร้อนต่ำ	0.05	0.07	0.11
B	การนำความร้อนปานกลาง	0.10	0.12	0.16
C	การนำความร้อนสูง	0.15	0.18	0.23

ในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่นำไปเป็นฉนวนกันความร้อนชนิดที่แบ่งออกเป็นตามประเภทแหล่งกำเนิด ซึ่งได้แก่วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์

#### วัสดุชนิดที่เป็นสารอินทรีย์

วัสดุที่นำไปใช้ทำฉนวนกันความร้อนชนิดที่เป็นสารอินทรีย์ที่ได้มาจากธรรมชาติมีอยู่หลายชนิด เช่น มาจากพวกแหล่งจำพวกพืช ได้แก่ เศษไม้ (เช่น ชี้เลื่อย เปลือกไม้ ฯลฯ) จากถ่านไม้ หรือจากขนสัตว์ จากสารเคมีจำพวกโพลีเมอร์

ข้อเสียของฉนวนกันความร้อนที่ทำจากสารอินทรีย์คือสารอินทรีย์บางชนิดสลายตัวได้ง่ายต่อการถูกทำลายด้วยแมลงบางชนิด เช่น มด ปลวก และสิ่งที่สำคัญที่สุดคือติดไฟได้ ดังนั้นในการผลิตฉนวนกันความร้อนที่ได้จากสารอินทรีย์จึงต้องมีการป้องกัน เช่น มีการเติมยาบางชนิดเพื่อป้องกันแมลง หรือมีการเติมสารที่หน่วงไฟไหม้ (fire retardant) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของฉนวนกันความร้อน และต้องมีการป้องกันการดูดความชื้น ตัวอย่างของฉนวนประเภทนี้ได้แก่

#### ฉนวนที่ทำจากเส้นใยเซลลูโลส (Cellulosic fiber)

แผ่นฉนวนที่ได้จากเยื่อไม้ส่วนใหญ่เป็นฉนวนที่ใช้กันความร้อนและเสียง เตรียมได้โดยการนำเอาไม้มาบดและตีให้แตกเป็นเส้นใย จากนั้นนำไปผสมกับกาวหรือตัวประสานอื่น ๆ แล้วนำไปขึ้นรูปและผ่านการอบความร้อน โดยปกติแล้วจะมีการอบซึม (impregnate) ด้วยสารที่หน่วงไฟไหม้ และมีการเติมพาราฟิน เรซิน น้ำมัน หรืออื่น ๆ ลงไปผสมกับเส้นใยเพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำ แผ่นฉนวนที่ได้จากเยื่อไม้จะมีค่าความหนาแน่นมวล 250 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร มีค่าการนำความร้อนไม่มากกว่า 0.07 วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะทำผลิตภัณฑ์ที่มีความยาว 1200 - 3000 มิลลิเมตร กว้าง 1200 ถึง 1600 มิลลิเมตร และหนา 8 - 25 มิลลิเมตร และที่ผิวอาจจะมีการทาสีไว้เพื่อตกแต่งให้สวยงาม

นอกจากนี้ยังจะพบชนิดที่มีการใช้ซีเมนต์มาผสมด้วย วิธีการเตรียมทำได้โดยการนำเอาเยื่อไม้ไปอบ จากนั้นนำไปเคลือบผิวด้วยแคลเซียมคลอไรด์ หรือน้ำแก้ว (water glass) จากนั้น

นำไปผสมกับซีเมนต์ให้เป็นสารละลายชั้นหนืด นำเข้าแบบพิมพ์และตัดให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 3 - 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนวนประเภทนี้จะมีอยู่ 4 แบบ คือแบบที่มีค่าความหนาแน่นมวลเป็น 300 , 350 , 400 และ 500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ มีค่าการดูดความชื้นไม่มากกว่าร้อยละ 20

### วัสดุชนิดที่เป็นสารอินทรีย์

ในการปรับปรุงคุณภาพและการพัฒนาจนทนกันความร้อนเพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมนั้น พบว่าการใช้วัสดุที่ได้มาจากแหล่งแร่ธรรมชาติต่าง ๆ พบว่ามีข้อดีคือไม่ถูกเผาไหม้ไฟ มีความต้านทานต่อไฟไหม้ได้สูง และมีอายุการใช้งานได้ยาวนานกว่าเส้นใยที่ได้จากพืช วัสดุที่ได้จากแหล่งแร่ธรรมชาติต่าง ๆ เหล่านี้ได้แก่ ฝอยซีโลส และแอสเบสตอส ตัวอย่างของจนวนประเภทนี้ เช่น

#### จนวนที่ทำจากแอสเบสตอส (asbestos)

แอสเบสตอสเป็นชื่อของไฮดรอกซิลิเกตที่ได้จากธรรมชาติ มีลักษณะเป็นเส้นใย มีคุณสมบัติทางกายภาพในการทนต่อความร้อนได้สูง ทนต่อสารเคมี และมีความต้านทานต่อไฟฟ้าและความร้อนสูง มีความสามารถที่ทำให้เป็นเส้นใยขนาดเล็ก ๆ ได้ จากคุณสมบัติทางกายภาพดังกล่าวจึงมีการนำเอาแอสเบสตอสมาทำเป็นจนวนกันความร้อน จนวนกันไฟฟ้า เช่น ใช้ทำเป็นกระเบื้องหลังคา ฝักันความร้อน เป็นสารที่ใช้เติมลงในปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ปูนที่มีคุณสมบัติเป็นจนวนกันความร้อน

แอสเบสตอสที่พบในธรรมชาติสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

- กลุ่มเซอร์เพนทีนส์ (serpentine) แอสเบสตอสในกลุ่มนี้ได้แก่ คริโซไทล์ (chrysotile) ลิซาร์ดไต์ (lizardite) และแอนติโกไลต์ (antigorite) ซึ่งมีโครงสร้างในการจัดการเรียงตัวของอะตอมเหมือนเคโอลินิต์ (kaolinite) และในกลุ่มนี้มีเพียงเฉพาะคริโซไทล์เท่านั้นที่มีโครงสร้างเป็นเส้นใย

- กลุ่มแอมฟีโบล (amphiboles) แอสเบสตอสในกลุ่มนี้ได้แก่ โครซิโดไลต์ (crocidolite) อะโมไซต์ (amosite) แอนโทฟิลไลต์ (anthophyllite) เทรโมไลต์ (tremolite) และแอกทีโนไลต์ (actinolite) สำหรับแร่แอกทีโนไลต์และเตรโมไลต์ไม่ค่อยมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ

จากส่วนประกอบทางเคมีสามารถเขียนสูตรของแอสเบสตอสชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

คริโซไทล์	$Mg_3((OH)_4Si_2O_5)$
แอนโทฟิลไลต์	$(Mg, Fe)_7((OH)Si_4O_{11})_2$
เตรโมไลต์	$Ca_2(Mg, Fe)_5((OH)Si_4O_{11})_2$

แอกทีโนไลต์	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5((\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$
โครซิโดไลต์	$\text{Na}_2\text{Fe}_5((\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$
อะโมไซต์	$\text{MgFe}_6((\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{11})_2$

ฉนวนแอสเบสทอสโดยทั่วไปแล้ว จะประกอบด้วยเส้นใยหนึ่งชนิดหรือมากกว่านั้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยชนิดคริโซไทล์ อะโมไซต์ โครซิโดไลต์ นอกจากบางกรณีเท่านั้นที่จะมี เทรโมไลต์ แอกทีโนไลต์ แอนโทฟิลไลต์ แต่ชนิดคริโซไทล์จะเป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุดในการ ทำฉนวนกันความร้อน และจะมีการเติมสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์หนึ่งชนิดหรือมากกว่า เช่น เติมเยื่อกระดาษ ขนสัตว์ ใยสังเคราะห์ต่าง ๆ หินปูน ยิปซัม เพอร์ไลต์ ไดอะตอมไมต์ แมกนีไซต์ ไมกา เป็นต้น ในการทำเป็นฉนวนกันความร้อนจะทำให้หลายลักษณะเช่น ทำเป็น เส้น (cordboard) , แผ่น (slab) และปล้อง (segment) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการ ศึกษาพบว่าแอสเบสทอสเป็นอันตรายต่อร่างกาย โดยเฉพาะทำให้เกิดโรคแอสเบสทอสสิส (asbestosis) ทำให้ในหลายประเทศได้ยกเลิกการใช้ฉนวนที่มีแอสเบสทอสเป็นองค์ประกอบ

#### ฉนวนที่ทำจากใยแร่ (mineral fiber)

ใยแร่หรือมีชื่ออีกชื่อหนึ่งคือหินแร่ (mineral rock) หรือฝอยซีโลหะ (slag wool) ได้ จากการหลอมหินหรือได้จากซีโลหะในการหลอมโลหะ ใยแร่จะมีลักษณะคล้ายใยแก้ว (glass fiber) ความยาวของเส้นใยขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิต มีความยาวตั้งแต่ 20 ถึง 60 มิลลิเมตร และเส้นใยที่ผลิตได้ประมาณร้อยละ 80 จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 7 ไมครอน

ใยแร่ได้ถูกใช้เป็นฉนวนกันความร้อนชนิดอนินทรีย์สารมาเป็นเวลานานแล้วเนื่องจาก ความที่มีราคาถูก และง่ายต่อการนำไปผลิต ฉนวนที่ผลิตจากใยแร่จะเหมาะสำหรับที่นำไปเป็น ฉนวนกันความร้อนที่ใช้งานในอุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 600 องศาเซลเซียส ฉนวนกันความร้อนที่ทำมาจากใยแร่ได้แก่

- ฉนวนที่จัดทำเป็นเสื่อ (mats) ผลิตได้จากการนำเอาเส้นใยแร่มาอัดกันเป็นแผ่น หรือก้อน ใช้ทำเป็นฉนวนวางบนฝ้าเพดาน เป็นฉนวนหุ้มท่อทำความร้อน
- ฉนวนที่จัดทำเป็นแผ่น (slabs) จะมีอยู่ 2 ชนิดคือ
  - ชนิดกึ่งแข็ง (semi-rigid slabs) ผลิตได้จากการนำเอาใยแร่มาพันด้วย ฟิโนลิก เรซิน เพื่อทำเป็นตัวยึด แล้วนำไปขึ้นรูปต่าง ๆ ตามที่ต้องการ
  - ชนิดแข็ง (rigid slabs) ผลิตได้จากการนำเอาใยแร่มาผสมกับบิทูเมน (bitumen) ให้เป็นสารละลายชั้นหนืด (paste) ในบางครั้งที่ต้องการใช้ งานที่อุณหภูมิสูง ๆ จะมีการเติมเบนทอนไนต์ (bentonite) ลงไปด้วย จากนั้นนำไปขึ้นรูปในแบบพิมพ์โดยใช้ระบบสูญญากาศจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถเป็นฉนวนกันความร้อนที่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 600 องศาเซลเซียส

### ฉนวนที่ทำจากใยแก้ว (glass fiber)

ใยแก้วเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อนและทนต่อสารเคมีได้จากการหลอมแก้วแล้วทำให้เป็นเส้นใยออกมา มีค่าการนำความร้อน 0.05 วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไม่ติดไฟ ใยแก้วที่นำไปทำเป็นฉนวนกันความร้อนโดยปกติจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 21 ไมครอน เหมาะนำไปใช้เป็ฉนวนกันความร้อนที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิ - 200 ถึง 450 องศาเซลเซียส กรรมวิธีการผลิตฉนวนกันความร้อนที่ทำจากใยแก้วจะทำได้โดยการนำเอาใยแก้วผสมกับโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่ละลายน้ำ นำไปขึ้นรูป อบด้วยความร้อน จากนั้นตัดให้เป็นรูปร่างที่ต้องการ ฉนวนที่ได้จากใยแก้วส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นฉนวนสำหรับหุ้มท่อ ความเย็นในระบบแอร์

### ฉนวนที่ทำจากเวอร์มิคูไลต์ (vermiculite)

เวอร์มิคูไลต์เป็นแร่ชนิดหนึ่งที่มาจากไมกา(mica) มีลักษณะเป็นเกล็ดเป็นชั้น ๆ ซ้อนกันอยู่ เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 1000 ถึง 1100 องศาเซลเซียส จะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากการไล่น้ำในผลึกออกไป โดยจะขยายตัวมีปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างต่ำ 20 เท่า ในการทำฉนวนกันความร้อนจะใช้เวอร์มิคูไลต์ที่ขยายตัวแล้วซึ่งมีลักษณะสีเหลืองทอง มีค่าความหนาแน่นมวล 80 ถึง 150 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สำหรับเวอร์มิคูไลต์ที่มีขนาด 5 ถึง 10 มิลลิเมตร และมีค่าความหนาแน่นมวลเท่ากับ 200 ถึง 400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร สำหรับเวอร์มิคูไลต์ขนาดละเอียด ข้อเสีย ของเวอร์มิคูไลต์คือที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวได้ และที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสจะหลอมละลายได้

ฉนวนกันความร้อนที่ทำด้วยเวอร์มิคูไลต์โดยปกติแล้วจะได้จากการผสมเวอร์มิคูไลต์กับปูนซีเมนต์เพื่อทำเป็นฉนวนที่ใช้ในการก่อสร้าง บางครั้งผสมเวอร์มิคูไลต์กับปูนซีเมนต์และทรายเพื่อใช้ผลิตเป็นคอนกรีตที่ทนไฟ

### ฉนวนที่ทำจากเพอร์ไลต์ (perlite) หรือซิลิกาโฟม (expanded silica)

ฉนวนชนิดนี้ทำมาจากเม็ดแก้วภูเขาไฟแบบทรายที่ถูกขยายตัวขึ้นจากเดิม 4 ถึง 10 เท่า ทำให้มีโครงสร้างขนาดเล็ก ๆ อยู่ภายใน

โดยปกติจะมีการใช้ซิลิโคนที่ไม่ติดไฟ เคลือบเพอร์ไลต์เพื่อเพิ่มสภาพต้านทานการซึมผ่านของน้ำและป้องกันไม่ให้ความชื้นทะลุผ่านเข้ามาได้ เนื่องจากเพอร์ไลต์เป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่ติดไฟ ฉนวนชนิดเพอร์ไลต์จึงใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง อาจใช้ได้ถึงอุณหภูมิ 980 องศาเซลเซียส

เพอร์ไลต์โฟมอาจนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะได้รูปแบบเป็นคอนกรีตที่เป็นฉนวนที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งถูกนำไปใช้งานในลักษณะวัสดุแผ่นอัดเป็นฉนวนของหลังคา ถ้าเป็นคอนกรีตฉนวนน้ำหนักเบาจะใช้เป็นตาดฟ้า แผ่นพื้น เป็นต้น

### ฉนวนที่ทำจากแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate)

แคลเซียมซิลิเกตได้จากการทำปฏิกิริยากันระหว่างหินปูนและซิลิกาซึ่งได้มาจากดินโดอะตอม เมื่ออบด้วยไอน้ำ ไอน้ำจะเปลี่ยนรูปหินปูนและซิลิกาไปเป็นไฮดรัสแคลเซียมซิลิเกต ฉนวนแคลเซียมซิลิเกตจัดเป็นฉนวนแบบเกรนูลาร์คือประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งเป็นโพรงหรือกลวง ในช่องโพรงเหล่านี้อากาศสามารถถ่ายเทถึงกันได้ แตกต่างจากฉนวนแบบเซลล์ที่อากาศภายในรูพรุนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ฉนวนประเภทนี้เป็นฉนวนที่มีความคงทนและแข็งแรง และสามารถทนต่อการเปียกชื้นได้ดี สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 650 องศาเซลเซียส แคลเซียมซิลิเกตเป็นวัสดุที่ไม่เป็นอันตราย และมีคุณสมบัติต้านทานไฟได้ดี เมื่อเปียกน้ำจะทำให้คุณสมบัติการเป็นฉนวนลดลงแต่เมื่อแห้งคุณสมบัติก็จะกลับมาดีดังเดิมได้ นิยมนำไปใช้งานเป็นฉนวนหุ้มท่อ และภาชนะในขบวนการทางอุตสาหกรรมที่มีอุณหภูมิสูงและต้องใช้เวลาที่การทนแรงอัดสูง

ในปัจจุบันพบว่าได้มีการพัฒนานำเอาเทคโนโลยีและวิชาการใหม่ๆ เข้ามาประยุกต์ในการผลิตฉนวนกันความร้อนเพื่อให้ได้ฉนวนที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ดี มีอายุการใช้งานยาวนาน ทนทาน ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้อยู่อาศัยและคนงานที่ทำการก่อสร้าง และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เช่นการนำเอาฉนวนประเภทเส้นใยมาทำการผสมกับแคลเซียมซิลิเกตเพื่อให้ได้ฉนวนที่มีความทนทานในการใช้งานได้ดียิ่งขึ้น คือทำให้มีค่าการทนต่อการหักงอ (bending strength) สูงขึ้นกว่าการใช้เส้นใยอย่างเดียวเป็นฉนวน หรือการนำเอาเส้นใยตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อให้ได้ฉนวนที่มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนได้ดีขึ้นและมีอันตรายต่อสุขภาพลดลง ดังนั้นในการวิเคราะห์ฉนวนเหล่านี้จะต้องมีการวิเคราะห์ที่ละเอียด ในการวิเคราะห์คุณภาพและปริมาณเส้นใยที่เป็นองค์ประกอบรวมทั้งสารยึดติดทั้งหลายในปัจจุบันยังไม่มีการวิเคราะห์ที่เฉพาะแต่ต้องใช้การวิเคราะห์หลายๆ เทคนิคมาช่วยจึงจะสมบูรณ์

## วัตถุประสงค์

1. วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างจนวนกันความร้อนว่ามีวัสดุชนิดใดเป็นองค์ประกอบอยู่บ้าง
2. วิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีและนำมาประกอบการพิจารณาเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ตามข้อ 1
3. พัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาเส้นใยในตัวอย่าง

## ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบเทคนิคและวิธีการวิเคราะห์แอสเบสทอสในตัวอย่าง
2. ทำให้กรมศุลกากรมีการจัดเก็บภาษีได้ถูกต้องและเป็นการเพิ่มรายได้จากการจัดเก็บภาษีศุลกากร
3. สามารถนำเอาวิธีการวิเคราะห์นี้ไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ตัวอย่างจนวนกันความร้อนชนิดอื่นๆ

## ระยะเวลาในการดำเนินการ

ระยะเวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างจนวนกันความร้อนเริ่มตั้งแต่เดือน สิงหาคม 2537 ถึง เดือน ตุลาคม 2537 รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 3 เดือน

## วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ( X-Ray diffractometer, XRD ) ยี่ห้อ PHILLIPS รุ่น PW 1710
2. เครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM)
3. เครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างแบบอนุภาคด้วยรังสีเอ็กซ์ชนิดกระจายพลังงาน (X-ray microanalysis Energy Dispersive System, X-ray /EDS)
4. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (light microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BH 2
5. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) ยี่ห้อ PERKIN-ELMER รุ่น 1720X
6. เตาหลอมตัวอย่างยี่ห้อคาร์โบไลท์ ( Carbolite ) รุ่น EML ให้อุณหภูมิสูงสุด 1100 องศาเซลเซียส



7. เตาเผาตัวอย่างยี่ห้อคาร์โบไลท์ ( Carbolite ) ให้อุณหภูมิสูงสุด 1400 องศาเซลเซียส
8. เตาอบ ( Oven ) ยี่ห้อ BLUE M ให้อุณหภูมิสูงสุด 275 องศาเซลเซียส
9. ตะเกียงบุนเสน ( Bunsen burner )
10. ถ้วยทองคำขาว ( Platinum crucible ) ที่มีขนาดความจุประมาณ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร
11. แท่นให้ความร้อน ( Hot plate )
12. เครื่องชั่ง ( Balance ) ที่มีความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ SARTORIUS รุ่น 2462
13. เครื่องแก้วชนิดต่างๆที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

### สารเคมีและวิธีเตรียม

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบชนิดรีเอเจนต์เกรด ( reagent grade ) ดังนี้

1. Fusion mixture ใช้ส่วนผสมของ anhydrous sodium carbonate 5 ส่วน และ anhydrous potassium carbonate 7 ส่วน
2. กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น (Hydrochloric acid, HCl)
3. กรดซัลฟูริก เข้มข้น (Sulphuric acid, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
4. กรดไนตริก เข้มข้น (Nitric acid, HNO<sub>3</sub>)
5. กรดไฮโดรฟลูออริก เข้มข้น (Hydrofluoric acid, HF)
6. กรดฟอสฟอริก เข้มข้น (Phosphoric acid, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>)
7. สารละลายแอมโมเนีย (Ammonium solution, NH<sub>4</sub>OH)
8. แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium chloride, NH<sub>4</sub>Cl)
9. แอมโมเนียมไนเตรท (Ammonium nitrate, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)
10. สารละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methyl red indicator) เตรียมโดยละลายเมทิลเรด 2 กรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ ชนิดร้อยละ 95 จำนวน 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร
11. สารละลายอิ่มตัวเมอร์คิวรี (II) คลอไรด์ (Saturated mercuric chloride solution, HgCl<sub>2</sub>)
12. สารละลายสแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride solution, SnCl<sub>2</sub>) ละลายสแตนนัสคลอไรด์ 5 กรัม ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำจนครบ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต้มจนสารละลายใส เก็บในขวดที่ปิดสนิท ใส่ชั้นโลหะดีบุกใส่ลงไปในขวดด้วย
13. สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate solution, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร = 0.004 กรัม เฟอร์ริกออกไซด์

บดโพแทสเซียมไดโครเมตชั้นมาตรฐานหลัก (primary standard) อบที่อุณหภูมิ 180 ถึง 200 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ชั่งโพแทสเซียมไดโครเมตที่อบแล้วให้ได้ปริมาณ 2.4570 กรัม ละลายโพแทสเซียมไดโครเมตในขวดปริมาตร แล้วเติมน้ำให้ได้ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เดซิเมตรพอดี สารละลายนี้ถือเป็นสารละลายมาตรฐานหลัก

14. สารละลายแบเรียมไดฟีนีลามีนซัลโฟเนตอินดิเคเตอร์ (Barium diphenylaminesulphonate indicator) ละลายแบเรียมไดฟีนีลามีนซัลโฟเนต 0.3 กรัม ในน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
15. สารละลายแอมโมเนียมออกซาเลต (Ammonium oxalate solution ,  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) ละลายแอมโมเนียมออกซาเลต 5 กรัม ในน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
16. สารละลายแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Ammonium hydrogen phosphate ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) ละลายแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 10 กรัม ในน้ำ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

## วิธีการทดลอง

ทำการวิเคราะห์และทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของตัวอย่างฉนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมซิลิเกต ( calcium silicate insulation ) หมายเลขปฏิบัติการ RQ 600 ดังรายการต่อไปนี้

- ตรวจสอบทางกายภาพต่างๆ ได้แก่ ลักษณะ รูปร่าง สี ฯลฯ
- ทดสอบการทนความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ
- ตรวจสอบด้วยการดูลักษณะและองค์ประกอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์
- วิเคราะห์หาโครงสร้างของเส้นใยที่เป็นองค์ประกอบของฉนวนโดย
  - วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางแร่โดยใช้เครื่อง XRD
  - วิเคราะห์หาโครงสร้างโดยใช้เครื่อง FTIR , EDS
- วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี
  - วิเคราะห์หาค่าน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) ที่อุณหภูมิต่างๆ
  - วิเคราะห์หาปริมาณ ซิลิกา (Silica)
  - วิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์ผสม (Mixed oxide)
  - วิเคราะห์หาปริมาณเหล็กออกไซด์ (  $Fe_2O_3$  )
  - วิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( CaO )
  - วิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ( MgO )

### 1. การวิเคราะห์ทางกายภาพ

- 1.1 ตรวจสอบ ลักษณะตัวอย่าง รูปร่าง สี ฯลฯ
- 1.2 ตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆขนาดประมาณ 1X1 เซนติเมตร ใส่ลงในถ้วยพอร์ซเลนซ์แล้วนำไปเผาบนตะเกียงเบนเสนเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- 1.3 ตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆขนาดประมาณ 2 X 2 เซนติเมตร นำไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก
- 1.4 ตัดตัวอย่างออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆขนาดประมาณ 2 X 2 เซนติเมตร นำไปแช่ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น

## 2. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเนื่องจากความร้อน

นำตัวอย่างประมาณ 5 กรัมใส่ลงในถ้วยทองคำขาว นำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 500, 575, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ดูว่าตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

## 3. การตรวจสอบตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

นำตัวอย่างไปทำการกระจายตัวในน้ำโดยการใช้เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer) จนกระทั่งตัวอย่างกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำตัวอย่างไปวางบนแผ่นสไลด์แล้วทำการย้อมสี นำแผ่นสไลด์ที่ได้ไปส่องดูลักษณะเส้นใยและองค์ประกอบอื่นๆภายใต้กล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 10 X 20 เท่า บันทึกผลการตรวจสอบ เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส

## 4. การตรวจสอบตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

ตัดตัวอย่างให้ เป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำไปติดบน STUB รูปร่างกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร โดยใช้กาวชนิดพิเศษ จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองคำโดยใช้เครื่อง ION SPUTTER แล้วนำไปวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด

## 5. การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่างโดยใช้เครื่อง SEM/EDS

การเตรียมตัวอย่างเหมือนในข้อ 4 ที่กล่าวมาแล้ว จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดโดยใช้ Energy dispersive X-Ray เป็นตัวตรวจสอบผลที่ได้เป็นสเปกตรัม

## 6. การวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยในตัวอย่างโดยใช้ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR )

นำตัวอย่างไปกระจายตัวในกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1:1 จากนั้นแยกส่วนที่เป็นเส้นใยที่ไม่ละลายในกรดออกมา ส่วนของเส้นใยด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งตัวอย่างหมดสภาพเป็นกรด (น้ำล้างมีสภาพเป็นกลางต่อกระดาษลิตมัส) อบเส้นใยให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส นำเส้นใยที่อบแห้งประมาณ 2 มิลลิกรัมผสมกับโพแตสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำไปอัดให้เป็นแผ่นในเครื่องอัด จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ได้ผลออกมาเป็นสเปกตรัม

## 7. การวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางแร่ของตัวอย่างและเส้นใยด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

นำตัวอย่าง ที่แยกเอาเฉพาะเส้นใย (ตามกรรมวิธีเช่นเดียวกับข้อ 6 ), ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส และตัวอย่างเริ่มต้น นำมาอัดจนแน่นเป็นแผ่นใน holder ที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ( กว้าง X ยาว ) 2.5 X 1.5 เซนติเมตรแล้วนำไปวัดโดยใช้ หลอด X-Ray เป็นแบบชนิดโคบอลท์ ( Co)เป็นแหล่ง กำเนิดแสง X- Ray โดยให้ความต่างศักย์ ที่หลอด 35 กิโลโวลท์ (KV) ที่กระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมป์ (mA) และใช้ฟิลเตอร์ เป็นชนิด เหล็ก (Iron filter) เป็นตัวกรองแสง วัดทำมุม  $2\theta$  จากมุม  $5^{\circ}$  ถึง  $70^{\circ}$  โดยได้ผลออกมาเป็น สเปกตรัม

## 8. การวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมี

### 8.1 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์

นำตัวอย่างไปทำการบดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ  $105 \pm 5$  องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปใส่เดซิเคเตอร์ (desiccator) ปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง

### 8.2 การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเผา

8.2.1. ชั่งตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 8.1 ประมาณ 2 กรัมใส่ลงในถ้วยทองคำขาว (Platinum crucible) จดน้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งได้อย่างละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

8.2.2. นำถ้วยทองคำขาวไปใส่ในเตาเผา (muffle) ค่อยๆเร่งอุณหภูมิของเตาเผา สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ตัวอย่างอยู่ในเตาเผา ที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

8.2.3. นำถ้วยทองคำขาวออกจากเตาเผาใส่ลงในเดซิเคเตอร์ ปล่อยให้เย็นจนถึง อุณหภูมิห้อง นำถ้วยทองคำขาวไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดนำค่าน้ำหนัก ที่ จดไว้ไปคำนวณหาค่าน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเผาดังนี้

8.2.4 ทำซ้ำเหมือนข้อ 8.2.1. ถึง 8.2.3 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 575, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส

$$\% \text{ น้ำหนักที่หายไปจากการเผา} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

(Loss on Ignition)

A = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา , กรัม

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา , กรัม

### 8.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ ซิลิกา (Silica)

- 8.3.1 ชั่งตัวอย่างที่เตรียมได้ตามข้อ 8.1 โดยละเอียด ประมาณ 0.5000 กรัม ใส่ลงในถ้วยทองคำขาวที่มีส่วนผสมของตัวทำหลอมละลาย (Fusion mixture) รองพื้นอยู่ จากนั้นเติมส่วนผสมของตัวช่วยหลอมละลายประมาณ 5 กรัม ลงไปคลุมตัวอย่างจนมิด
- 8.3.2 นำถ้วยทองคำขาวไปหลอมตัวอย่างบนตะเกียงบุนเสน (Bunsen burner) โดยค่อย ๆ เพิ่มความร้อนของเปลวไฟขึ้นจนกระทั่งตัวอย่างในถ้วยทองคำขาว หลอมละลายหมด
- 8.3.3 นำถ้วยทองคำขาวไปหลอมต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900 ถึง 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 30 นาที
- 8.3.4 นำถ้วยทองคำขาวออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างที่ได้จากการหลอมไปทำการละลาย โดยนำเอาถ้วยทองคำขาวใส่ใน ลงบีกเกอร์ขนาดประมาณ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลาย 1:1 ของ น้ำต่อกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา
- 8.3.5 ต้มสารละลายให้เดือดพอประมาณ (ระวังอย่าให้สารละลายในบีกเกอร์ กระเด็นออก) เมื่อตัวอย่างละลายออกจากถ้วยทองคำขาวจนหมดแล้ว ให้เอาถ้วยทองคำขาวออกจากบีกเกอร์โดยล้างด้วยน้ำกลั่น
- 8.3.6 นำไปประเหยจนแห้งสนิทบนแผ่นให้ความร้อน(hot plate)แล้วทิ้งให้เย็น
- 8.3.7 เติมสารละลาย 1:4 กรดไฮโดรคลอริก ต่อน้ำ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นต้มให้เดือดนำลงจากแท่นให้ความร้อน ปล่อยให้เย็น
- 8.3.8 กรองตะกอนที่ได้โดยใช้กระดาษกรองชนิดไม่มีเถ้า (ashless) เบอร์ 42 เก็บสารละลายที่กรองได้ในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำร้อนจนไม่มีคลอไรด์ออกมากับสารละลายที่ได้จากการกรอง
- 8.3.9 อบตะกอนที่ได้จากการกรองจนแห้งแล้ว เก็บไว้หาค่าซิลิกา ครั้งที่ 1
- 8.3.10 นำสารละลายที่ได้จากการกรองไประเหยให้แห้งบนแผ่นให้ความร้อนตามวิธีในข้อ 8.3.6 ถึง 8.3.8 โดยกรองสารละลายใส่ในขวดปริมาตรขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 8.3.11 อบตะกอนที่ได้จากการกรองจนแห้งแล้วเก็บไว้หาค่าซิลิกาครั้งที่ 2
- 8.3.12 นำสารละลายที่ได้จากการกรองในข้อ 8.3.10 มาทำให้มีปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร เก็บสารละลายไว้ทำการวิเคราะห์หาออกไซด์ของโลหะอื่น ๆ ต่อไป
- 8.3.13 นำเอาตะกอนที่ได้จากการกรองทั้งสองครั้งพร้อมกระดาษกรองมารวมกัน ใส่ลงในถ้วยทองคำขาว จากนั้นนำไปเผาบนตะเกียงบุนเสนโดยใช้ไฟอ่อน ๆ

เพื่อให้กระดาษกรองใหม่หมดก่อน แล้วนำถ้วยทองคำขาวไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

- 8.3.14 นำเอาถ้วยทองคำขาวออกจากเตาเผาแล้วไปใส่ในเตชิกเคเตอร์ ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำไปชั่งอย่างละเอียดแล้วจดค่าน้ำหนักไว้
- 8.3.15 หยด 1 : 9 กรดซัลฟูริกต่อน้ำ ลงในถ้วยทองคำขาวให้ตะกอนเปียกน้ำจาง ชุ่ม และกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำถ้วยทองคำขาวไประเหยให้แห้งบนแท่นให้ความร้อนจนกระทั่งไม่มีควันขาวของกรดเกิดขึ้น นำไปเผาต่อโดยใช้ตะเกียงเบนเสนประมาณ 5 นาที นำไปใส่ในเตชิกเคเตอร์ ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 8.3.15 นำถ้วยทองคำขาวไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด และจดค่าน้ำหนักไว้ นำไปคำนวณหาปริมาณซิลิกาดังนี้

$$\% \text{ ซิลิกา (SiO}_2\text{)} = \frac{A}{B} \times 100$$

A = น้ำหนักที่หายไปหลังจากระเหยด้วยกรด , กรัม

B = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ , กรัม

#### 8.4 การวิเคราะห์หาปริมาณออกไซด์ผสม (Mixed oxide)

- 8.4.1 ปิเปตสารละลายข้อ 8.3.12 มา 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตรเติมน้ำกลั่นลงไป 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 2-3 หยด จากนั้นเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) 1 กรัม คนจนละลาย ต้มสารละลายจนเกือบเดือดเติม เมทิลเรด (methyl red) 2-3 หยด
- 8.4.2 เติมสารละลายแอมโมเนียที่มีความเข้มข้น 6 นอร์มอล ( 6 N  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ลงไปจนกระทั่งสีของเมทิลเรดเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง จากนั้นเติมสารละลายแอมโมเนียเพิ่มอีก 1 หยด อุ้มนบีกเกอร์บนแผ่นให้ความร้อนจนตะกอนรวมตัวกัน
- 8.4.3 กรองตะกอนที่ได้ด้วยกระดาษกรองชนิดไม่มีเถ้าเบอร์ 41 ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร ล้างตะกอนด้วยสารละลาย 2 % แอมโมเนียมไนเตรต ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) จนกระทั่งไม่มีคลอไรด์ออกมา เก็บสารละลายไว้เพื่อนำไปหาออกไซด์ตัวอื่นต่อไป
- 8.4.4 อบตะกอนจนแห้ง แล้วนำไปใส่ในถ้วยทองคำขาวที่ทราบค่าน้ำหนัก
- 8.4.5 นำถ้วยทองคำขาวไปเผาบนตะเกียงเบนเสนโดยใช้ไฟอ่อนจนกระดาษกรองใหม่หมด แล้วนำไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

8.4.6 นำถ้วยทองคำขาวออกจากเตาเผาใส่ลงในเดซิเคเตอร์ ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำไปชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด แล้วนำไปคำนวณหาค่าออกไซด์ผสมดังนี้

$$\% \text{ ออกไซด์ผสม (Mixed oxides)} = \frac{(A - B)}{C} \times 100$$

A = น้ำหนักถ้วยทองคำขาวหลังเผาตะกอน , กรัม

B = น้ำหนักถ้วยทองคำขาว , กรัม

C = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ , กรัม

#### 8.5 การวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

8.5.1 ชั่งตัวอย่างจากข้อ 3.1 โดยละเอียดประมาณ 0.5000 กรัมใส่ลงในถ้วยทองคำขาว

8.5.2 หยดสารละลาย 1:9 กรดซัลฟูริกต่อน้ำ จนตัวอย่างเปียกชุ่ม และเติมกรดไฮโดรฟลูออริกปริมาตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร

8.5.3 นำไประเหยจนแห้งบนแผ่นให้ความร้อน

8.5.4 นำตัวอย่างในถ้วยทองคำขาวละลายใน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรของสารละลาย 10 เปอร์เซนต์ (ปริมาตรต่อปริมาตร) กรดไนตริก

8.5.5 ต้มสารละลายจนเดือดพอประมาณเมื่อตัวอย่างละลายออกจากถ้วยทองคำขาวหมดแล้วนำถ้วยทองคำขาวออกจากบีกเกอร์ ล้างด้วยน้ำกลั่น

8.5.6 กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 แล้วล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วยน้ำร้อน

8.5.7 ทำสารละลายที่ได้จากการกรองให้มีปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเก็บไว้เป็นสารละลายเพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะออกไซด์อื่น ๆ ต่อไป

8.5.8 ปิเปตสารละลายที่ได้จากข้อ 8.5.7 ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในขวดรูปชมภู (Erlenmeyer flask) ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร

8.5.9 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร นำไปต้มให้เดือดบนแท่นให้ความร้อน

8.5.10 เติมสารละลาย สแตนนัสคลอไรด์ ( $\text{SnCl}_2$ ) ที่ละลายจนสารละลายใสไม่มีสีแล้วเติมให้เกินพอ 1 หยด ปล่อยให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง

8.5.11 เติมสารละลายอิมตัวของเมอร์คิวริกคลอไรด์ ( $\text{HgCl}_2$ ) 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าเป็นเวลาประมาณ 1 นาที



- 8.5.12 เติมสารละลาย 1:1 ของกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ต่อน้ำ ปริมาตร 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเติมน้ำจนให้สารละลายมีปริมาตรประมาณ 75 ถึง 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 8.5.13 นำสารละลายที่เตรียมได้ไปติเตรทกับสารละลายมาตรฐานของโปแตสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ที่มีความเข้มข้น 0.05N โดยใช้สารละลาย แบเรียมไดฟีนีลลามีนซัลโฟเนต (Barium diphenylamine sulphonate) เป็นอินดิเคเตอร์ จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีม่วง คำนวณหาปริมาณเหล็กออกไซด์ดังนี้

$$\% \text{เหล็กออกไซด์ (Fe}_2\text{O}_3) = \frac{0.004 \times A}{B} \times 100$$

A = ปริมาตร  $K_2Cr_2O_7$  ที่ใช้ติเตรท ,  $cm^3$

B = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ , กรัม

#### 8.6 การวิเคราะห์หาปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ )

นำเอาค่าปริมาณออกไซด์ผสมที่วิเคราะห์ได้ในข้อ 8.4 และค่าปริมาณเหล็กออกไซด์จากข้อ 8.5 มาคำนวณหาปริมาณ อลูมิเนียมออกไซด์ ได้ดังนี้

$$\% Al_2O_3 = \% \text{Mixed oxide} - \% Fe_2O_3$$

#### 8.7 การวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ )

- 8.7.1 นำสารละลายที่ได้จากการกรองในข้อ 8.4.3 ไประเหยจนแห้งจนเหลือปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 ลูกบาศก์ เซนติเมตร
- 8.7.2 เติมสารละลาย แอมโมเนียมออกซาลเลต ต้มสารละลายจนเดือด
- 8.7.3 เติมสารละลาย 1:1 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเป็นด่าง โดยจะเปลี่ยนสีของเมธิลเรดจากสีแดงเป็นสีเหลืองแล้วเติมเพิ่มอีก 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้ทั้งคืนเพื่อให้สารละลายตกตะกอนสมบูรณ์
- 8.7.4 กรองตะกอนโดยใช้กระดาษกรองชนิดไม่มีเถ้าเบอร์ 42 ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง
- 8.7.5 นำกระดาษกรองพร้อมตะกอนที่กรองได้ไปอบจนแห้งในตู้อบ จากนั้นนำไปใส่ลงในถ้วยทองคำขาวที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว
- 8.7.6 นำถ้วยทองคำขาวไปเผาโดยใช้ไฟอ่อนบนตะเกียงเบนเสนจนกระทั่งกระดาษกรองถูกเผาไหม้จนหมด จากนั้นนำไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

8.7.7 นำถ้วยทองคำขาวออกจากเตาเผาใส่ลงในเดซิเคเตอร์จนเย็นถึงอุณหภูมิห้อง

8.7.8 นำถ้วยทองคำขาวไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์ดังนี้

$$\% \text{ CaO} = \frac{(A - B)}{C} \times 100$$

A = น.น. ถ้วยทองคำขาวหลังเผาตะกอน , กรัม

B = น.น. ถ้วยทองคำขาวก่อนเผาตะกอน , กรัม

C = น.น. ของตัวอย่างที่ใช้ , กรัม

#### 8.8 การวิเคราะห์หาปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ ( MgO )

8.8.1 นำสารละลายในที่ได้จากการกรองในข้อ 8.7.4 ไปแช่ในน้ำแข็งจนเย็น

8.8.2 เติมสารละลาย แอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนสารละลายให้เข้ากัน

8.8.3 เติมสารละลาย 1: 1 ของน้ำต่อแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนสารละลายบ่อย ๆ ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน

8.8.4 กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองชนิดไม่มีเถ้าเบอร์ 42 แล้วล้างตะกอนด้วยสารละลาย 5 เปอร์เซ็นต์ของแอมโมเนียมไนเตรต

8.8.5 นำกระดาษกรองพร้อมตะกอนที่กรองได้ไปอบจนแห้งในตู้อบ จากนั้นนำไปใส่ลงในถ้วยฟอร์ชเลนที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว

8.8.6 นำถ้วยฟอร์ชเลนไปเผาโดยใช้ไฟอ่อน ๆ บนตะเกียงบุนเสนจนกระทั่งกระดาษกรองถูกเผาไหม้จนหมด จากนั้นนำไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

8.8.7 นำถ้วยฟอร์ชเลนออกจากเตาเผาใส่ลงในเดซิเคเตอร์จนเย็นถึงอุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาเปอร์เซ็นต์แมกนีเซียมออกไซด์ดังนี้

$$\% \text{ MgO} = \frac{(A - B)}{C} \times 100 \times 0.3621$$

A = น.น. ถ้วยฟอร์ชเลนหลังเผาตะกอน , กรัม

B = น.น. ถ้วยฟอร์ชเลนก่อนเผาตะกอน , กรัม

C = น.น. ของตัวอย่างที่ใช้ , กรัม

หมายเหตุ :- ค่า 0.3621 คือแฟกเตอร์ที่เปลี่ยนค่าการคำนวณจากตะกอน  $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$  เป็น MgO

## ผลการทดลอง

## 1. การทดสอบทางกายภาพ

1. ลักษณะตัวอย่าง	<input type="checkbox"/> เป็นแผ่นโค้งขนาด 11.5 X 24.5 X 2.5 นิ้ว สีครีม มีน้ำหนักเบา โดยเนื้อจะมีลักษณะเป็นผงอัดผสมกับเส้นใยจำนวนมาก ไม่แข็งบีแยกออกได้ด้วยมือ
2. เผาตะกอนด้วยตะเกียงเบนเสน	<input type="checkbox"/> ตัวอย่างไหม้เป็นสีดำ ขนาดหดเล็กน้อย
3. แช่น้ำ 1:1 กรดไฮโดรคลอริก	<input type="checkbox"/> มีฟองก๊าซเกิดขึ้นจำนวนมาก สารละลายเป็นสีเหลืองเข้ม โดยยังสังเกตเห็นมีเส้นใยอยู่ในสารละลาย แต่มีบางส่วนละลายไปบ้าง และยังคงมีบางส่วนเป็นตะกอนอยู่ในสารละลาย
4. แช่น้ำในกรดซัลฟูริกเข้มข้น	<input type="checkbox"/> เส้นใยเป็นสีดำ ส่วนที่เป็นผงมีสีเข้มขึ้น

## 2. การทดสอบการทนความร้อน

1. เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ตัวอย่างหดตัวเล็กน้อย เส้นใยยังคงเหลืออยู่บ้าง ลักษณะตัวยึด (binder) เหมือนเดิม ตัวอย่างมีสีครีม
2. เผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ตัวอย่างหดตัวมากขึ้น เส้นใยมองไม่พบลักษณะตัวยึด (binder) เหมือนเดิมตัวอย่างมีสีครีม ร่วนมาก
3. เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ตัวอย่างหดตัวมาก เส้นใยตรวจไม่พบลักษณะตัวยึด (binder) ยึดตัวเกาะเป็นก้อนแข็ง ตัวอย่างมีสีเหลืองอ่อน
4. เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ตัวอย่างหดตัวมาก เส้นใยหมดไป ลักษณะตัวยึด (binder) ยึดตัวเกาะเป็นก้อนแข็งตัวมากขึ้น ตัวอย่างมีสีเหลืองอ่อน

## 3. การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

1. ตัวอย่างเริ่มต้น	<input type="checkbox"/> ทั้งส่วนที่เป็นเส้นใยและเป็นผงยอมสติดได้ เส้นใยที่มองเห็นเป็นเส้นใยที่มีขนาดเดียวกันหมด มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว
2. ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 575 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ไม่พบเส้นใยอยู่ในตัวอย่างส่วนที่เป็นผงยอมสติดได้

## 4. การตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด

1. ตัวอย่างเริ่มต้น	<input type="checkbox"/> ทำการตรวจสอบเปรียบเทียบกับตัวอย่างแอสเบสทอสในห้องปฏิบัติการ พบว่าเส้นใยไม่เหมือนกัน แต่ลักษณะของเส้นใยตัวอย่างเหมือนกับเส้นใยของเยื่อกระดาษตามรูปที่ 1, 2
2. ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ไม่พบเส้นใยเหลืออยู่ในตัวอย่างตามรูปที่ 3

## 5. การวิเคราะห์เส้นใยด้วยเครื่อง EDS

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยการแยกเอาเฉพาะเส้นใยออกมาทำการวิเคราะห์ พบว่าเส้นใยประกอบด้วย คาร์บอน (carbon, C) และออกซิเจน (oxygen, O<sub>2</sub>) ตามสเปกตรัมในรูปที่ 4

## 6. การวิเคราะห์โครงสร้างของเส้นใยโดยใช้ FTIR

ในการทดลองทำการแยกเอาเส้นใยออกจากตัวอย่าง แล้วทำการวิเคราะห์โดยใช้ FTIR เปรียบเทียบกับตัวอย่างแอสเบสทอส เยื่อกระดาษชนิดใยยาว ใยแก้ว และ ใยแร่ ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการตามสเปกตรัมในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 9 จากการวิเคราะห์จะพบว่าเส้นใยในตัวอย่างที่แยกออกมามีสเปกตรัมคล้ายสเปกตรัมในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นสเปกตรัมของเยื่อกระดาษใยยาว (cellulose) และมี peak ที่ตำแหน่งสำคัญ ๆ คือ

Frequency , cm <sup>-1</sup>	functional group
3200 - 3600	stretching vibration ของ hydroxyl groups รวมทั้ง hydrogen bonds
2800 - 3000	stretching vibration ของ CH และ CH <sub>2</sub>
1638	absorbed water
1430	internal information vibration ของ CH <sub>2</sub> ใน CH <sub>2</sub> OH group
1340 - 1400	deformation virbration ของ C-OH และ CH group
1000 - 1200	stretching vibration ของ C-O
700 - 900	deformation virbration ของ CH bonds
400 - 700	deformation virbration ของ hydroxyl group

## 7. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่โดยใช้ X-Ray diffractometer

1. ตัวอย่างเริ่มต้น	<input type="checkbox"/> พบว่าตัวอย่างประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) แคลไซต์ (calcite, $\text{CaCO}_3$ ) และควอทซ์ (quartz, $\text{SiO}_2$ ) ตามรูปที่ 10
2. ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส	<input type="checkbox"/> ตัวอย่างประกอบด้วย วอลลาสโตไนต์ (wallastonite, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) ตามรูปที่ 11
3. เส้นใยที่แยกออกมาจากตัวอย่าง	<input type="checkbox"/> พบว่าสเปกตรัมที่ได้เป็นอสัณฐาน (amorphous) ตามรูปที่ 12

## 8. ผลการวิเคราะห์ทางเคมี

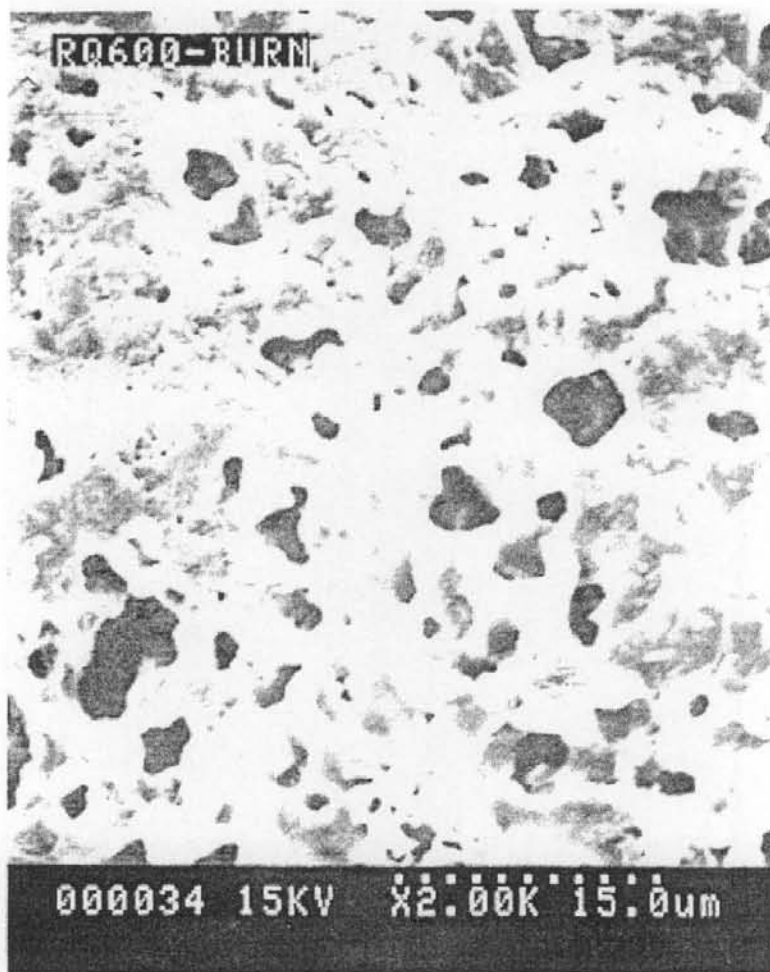
1. น้ำหนักที่หายไปจากการเผา	เปอร์เซ็นต์, %
<input type="checkbox"/> เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	14.7
<input type="checkbox"/> เผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส	15.9
<input type="checkbox"/> เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	18.6
<input type="checkbox"/> เผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	18.8
2. ซิลิกา (silica, $\text{SiO}_2$ )	35.1
3. อลูมินา (alumina, $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	12.1
4. เหล็กออกไซด์ (iron oxide, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	1.4
5. แคลเซียมออกไซด์ (calcium oxide, CaO)	31.4
6. แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO)	1.2



รูปที่ 1 แสดงภาพถ่าย เส้นใยของตัวอย่าง

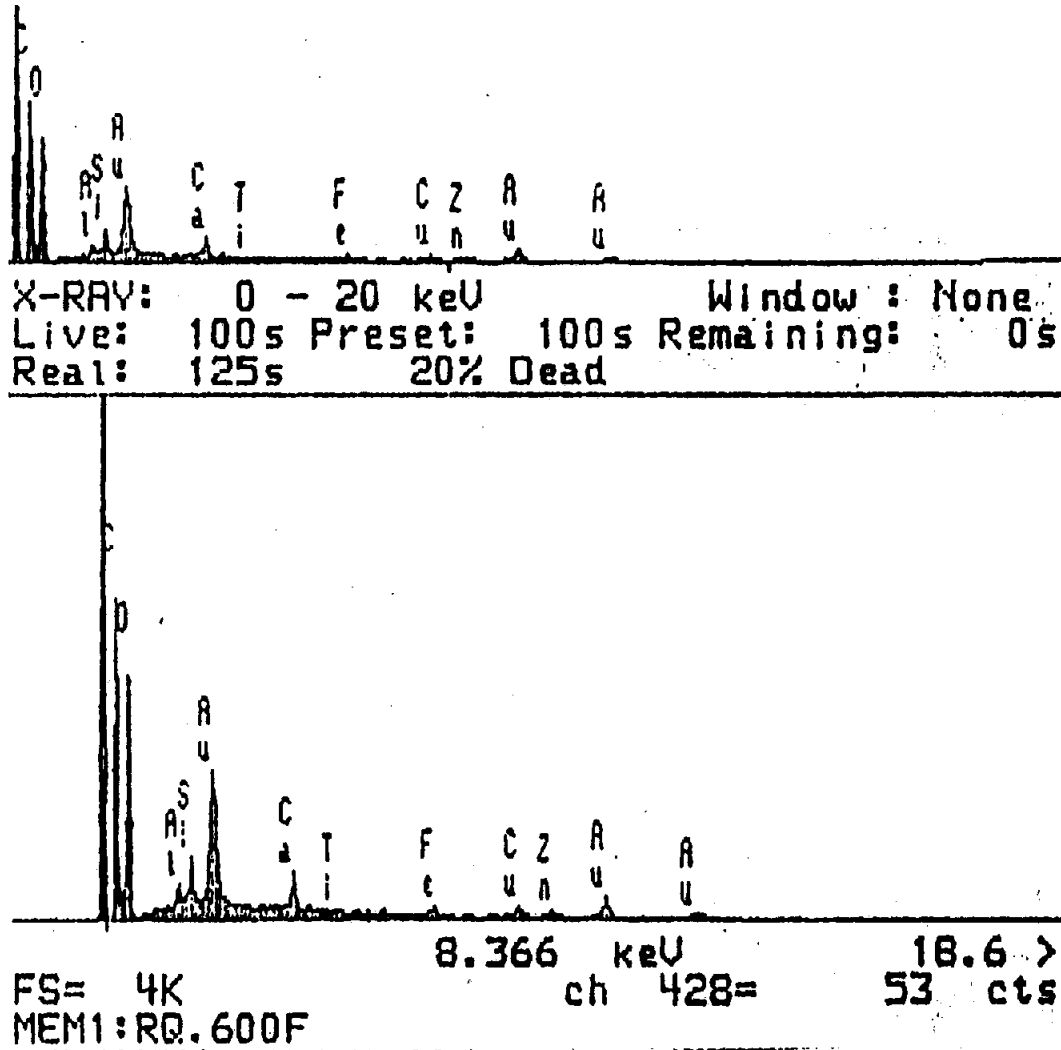


รูปที่ 2 แสดงภาพถ่าย เส้นใยเชื่อมกระดาม

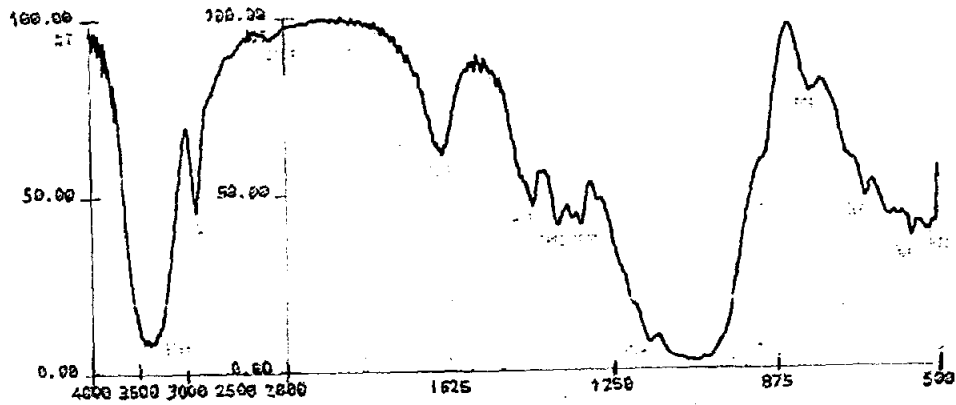


รูปที่ 3 แสดงภาพถ่าย ตัวอย่าง เเผที่ 575 องศาเซลเซียส

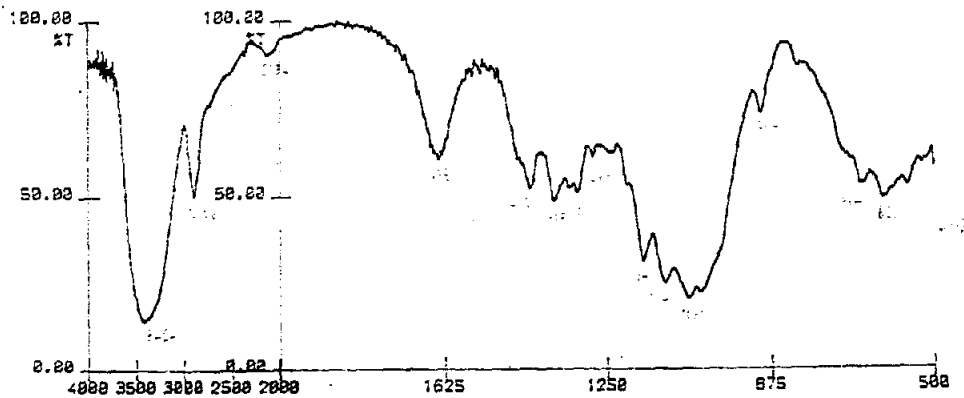




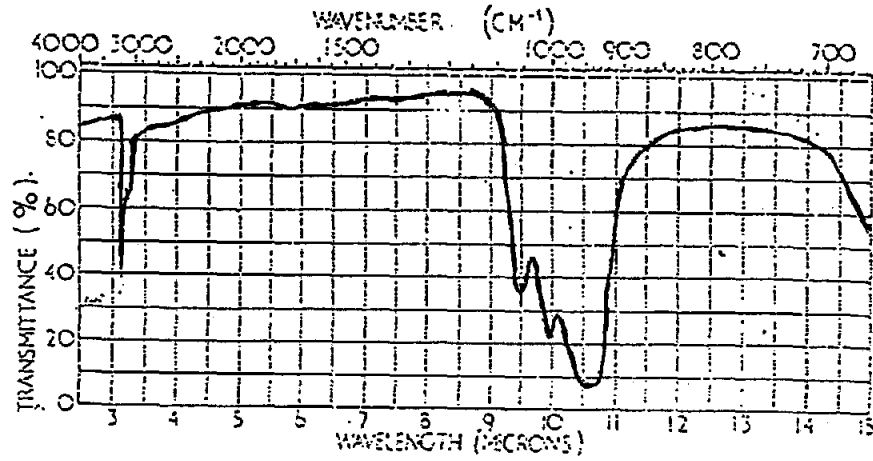
รูปที่ 4 แสดง EDS spectrum ของเส้นใยตัวอย่าง



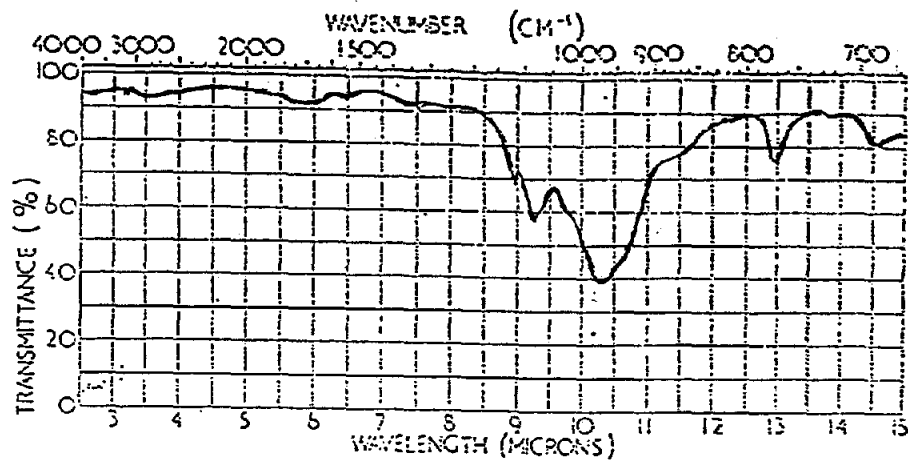
รูปที่ 5 แสดง IR spectrum ของเส้นใยตัวอย่าง



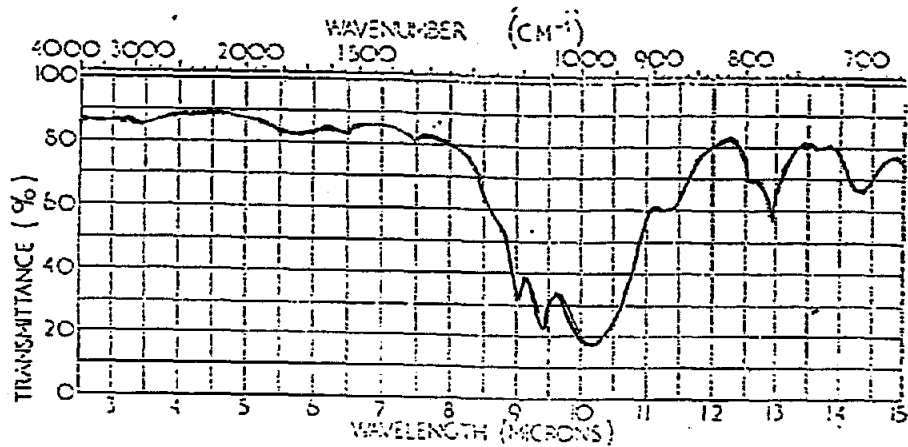
รูปที่ 6 แสดง IR spectrum ของเส้นใยเยื่อกระดาษ



Diag. 4.5 Infrared spectrum of chrysoilite, 2.5-15  $\mu\text{m}$ .

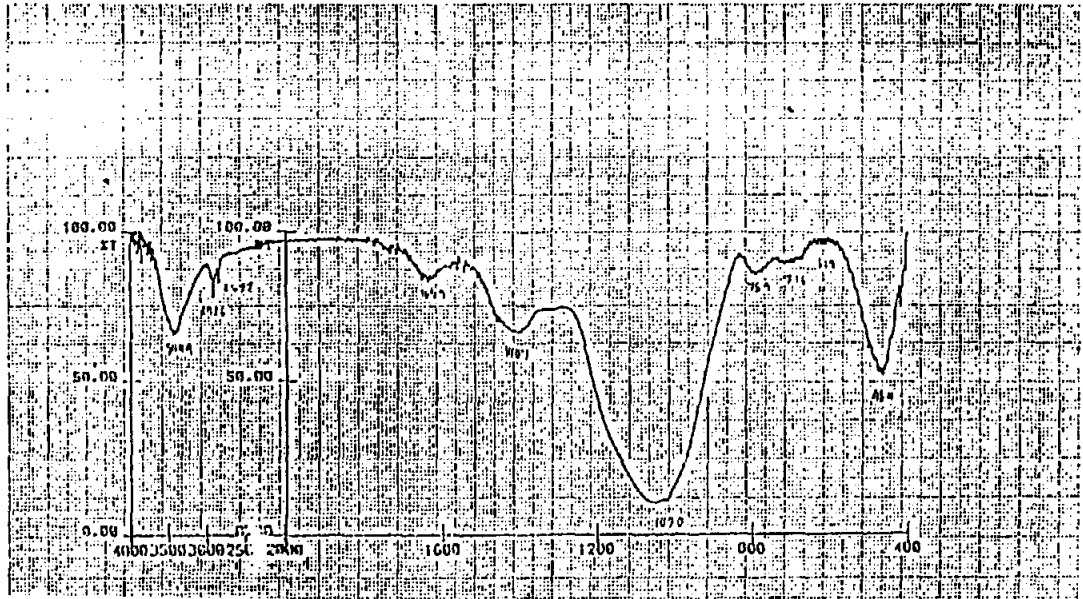


Diag. 4.8 Infrared spectrum of ercidolite, 2.5-15  $\mu\text{m}$ .

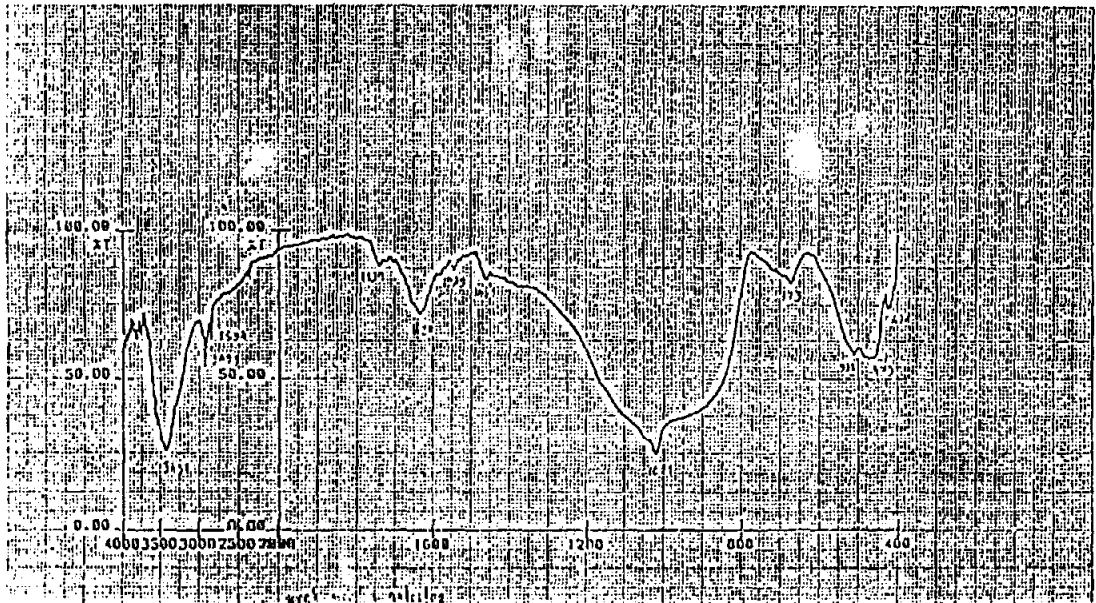


Diag. 4.9 Infrared spectrum of amosite, 2.5-15  $\mu\text{m}$ .

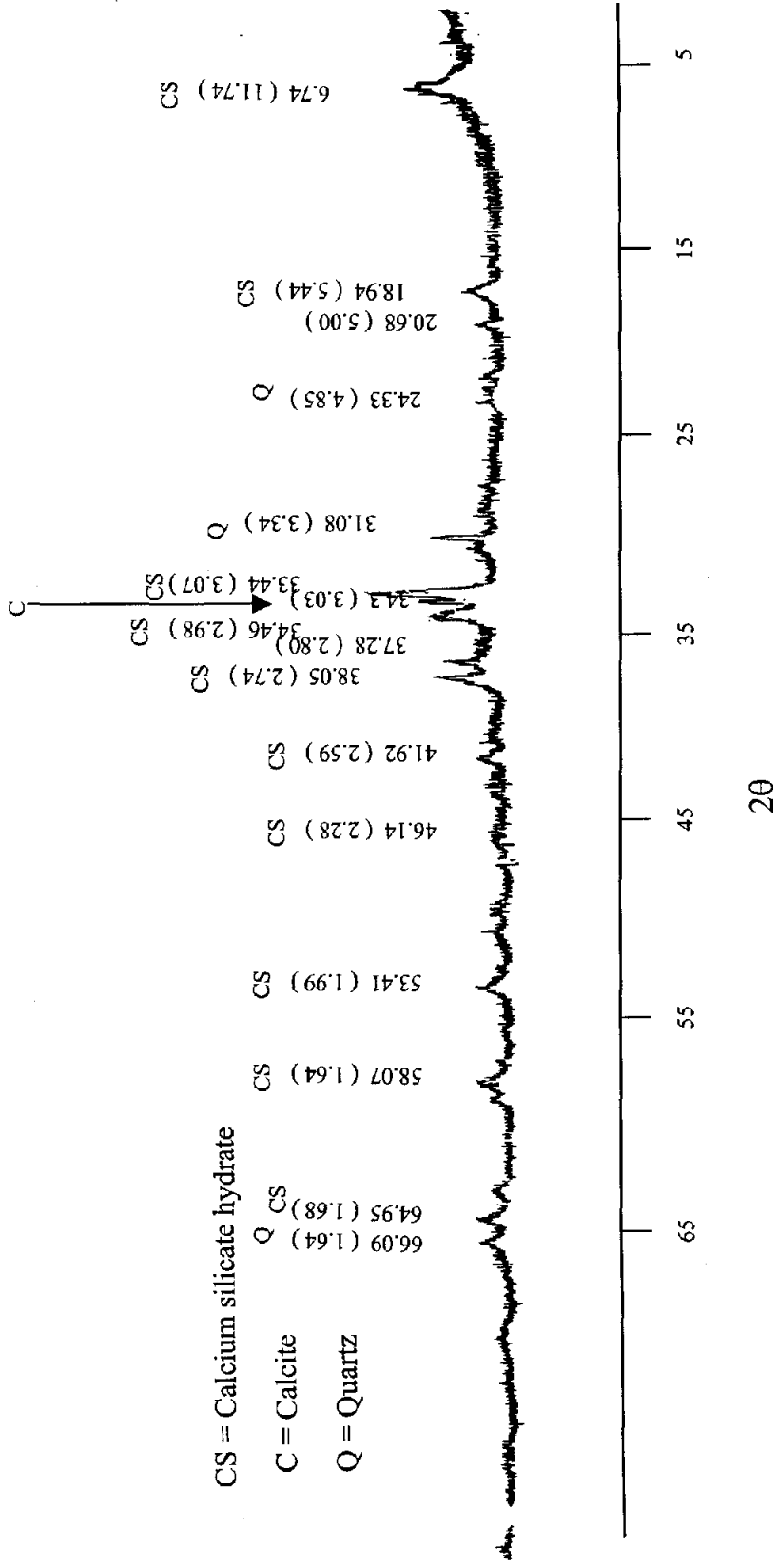
รูปที่ 7 แสดง IR spectrum ของเส้นใยแอสเบสทอส



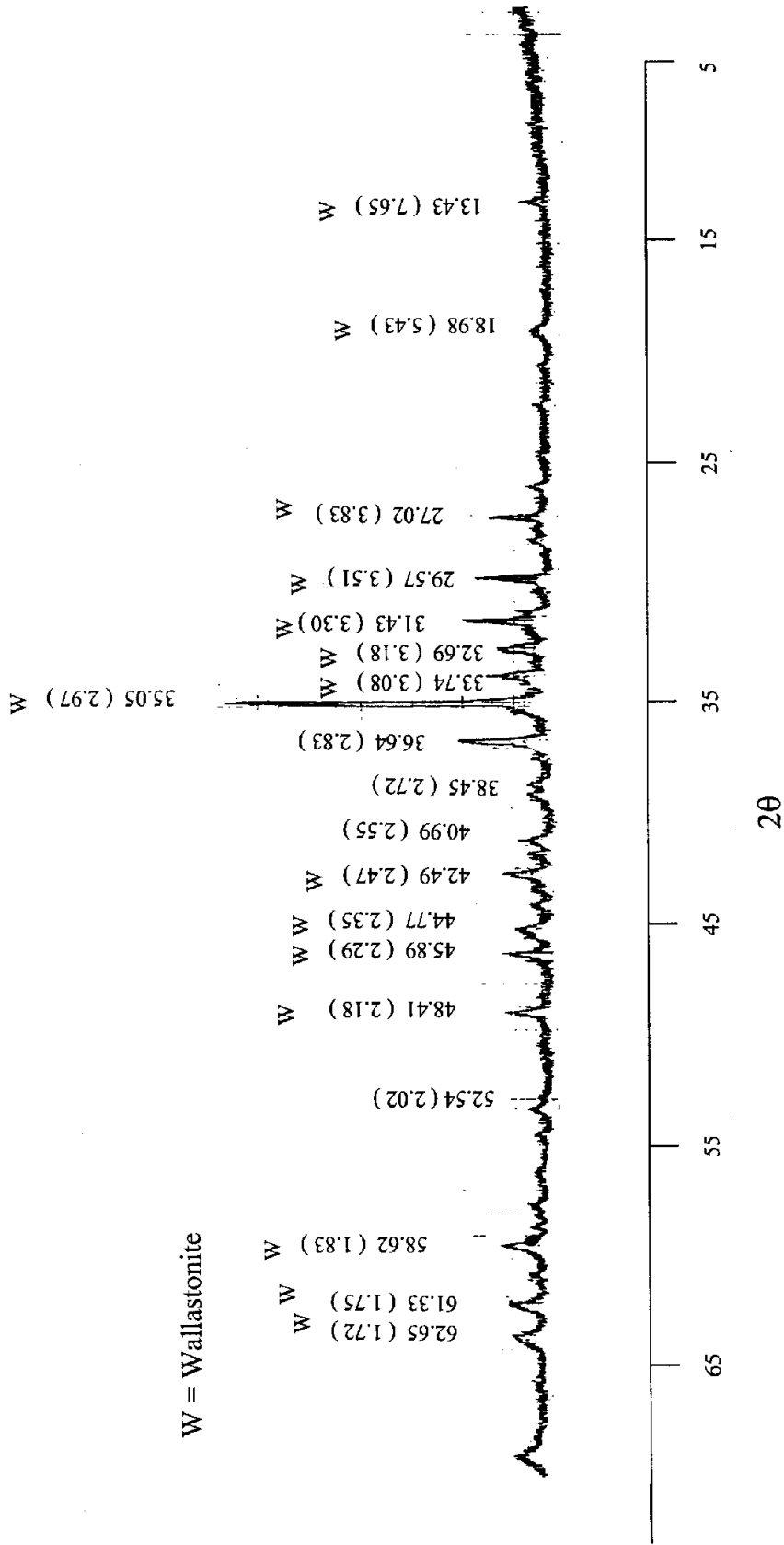
รูปที่ 8 แสดง IR spectrum ของเส้นใยแก้ว



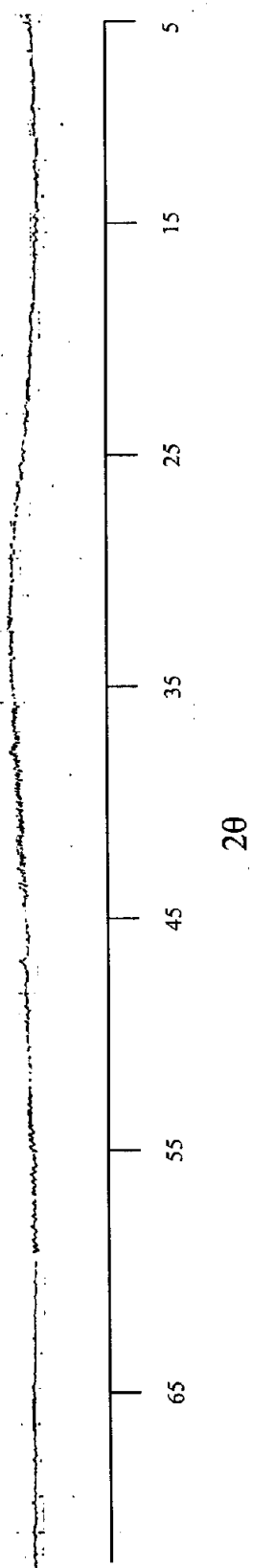
รูปที่ 9 แสดง IR spectrum ของเส้นใยแร่



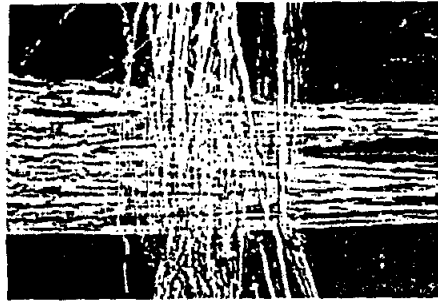
รูปที่ 10 แสดง X-Ray Diffractogram ของตัวอย่างเริ่มต้น



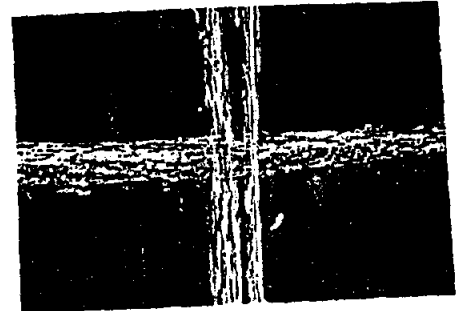
รูปที่ 11 แสดง X-Ray Diffractogram ของตัวอย่างเผาที่ 1100 องศาเซลเซียส



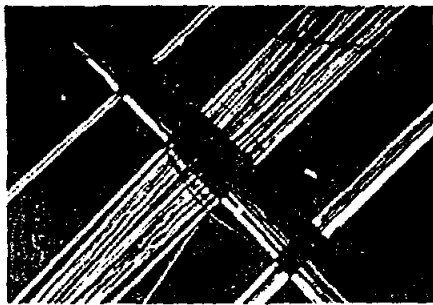
รูปที่ 12 แสดง X-Ray Diffraction ของตัวอย่างเฉพาะเส้นใย



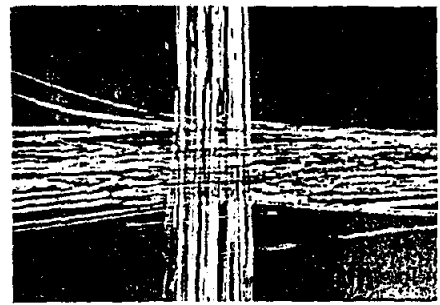
Chrysotile  $\ominus$ CS  
70x 1.605 HD



Anthophyllite  $\ominus$ CS  
70x 1.550 HD



Crocidolite  $\oplus$   
70x 1.550 HD



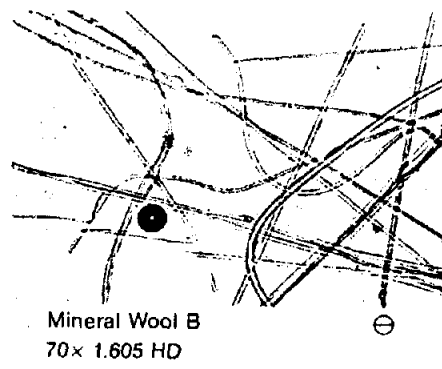
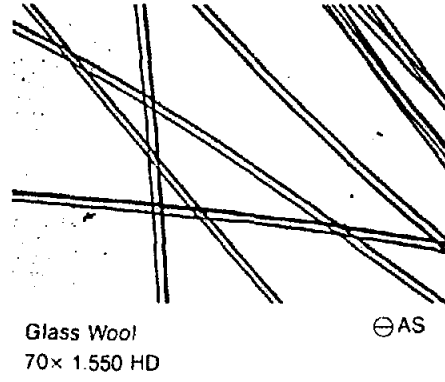
Amosite  $\ominus$ CS  
70x 1.550 HD



Fibrous Tremolite  $\oplus$   
70x 1.605 HD

รูปที่ 13 แสดงภาพถ่ายของเส้นใยแอสเบสตอสชนิดต่าง ๆ





รูปที่14 แสดงภาพถ่ายของเส้นใยแก้วและใยแร่

## วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองวิเคราะห์หาส่วนผสมของวัสดุที่นำมาจัดทำเป็นฉนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมซิลิเกตที่ส่งมาทำการวิเคราะห์นั้น จะต้องใช้วิธีการวิเคราะห์หลายวิธีประกอบกันเพื่อให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความมั่นใจในการสรุปผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

ในการทดสอบทางกายภาพ ตัวอย่างที่ได้รับมามีลักษณะเป็นแผ่นโค้ง สีครีม มีน้ำหนักเบา เนื้อสามารถบีบแตกออกจากกันได้ เมื่อสังเกตดูภายในเนื้อของฉนวนจะพบว่าเนื้อของฉนวนมีลักษณะที่เป็นเส้นใยประกอบอยู่ภายใน และส่วนที่เป็นผงอัดอยู่รวมกัน เมื่อตัดเอาตัวอย่างบางส่วนไปทำการเผาบนตะเกียงเบนเสนพบว่าตัวอย่างใหม่เป็นสีดำได้ และมีขนาดหดเล็กลง แสดงว่าภายในตัวอย่างจะต้องมีองค์ประกอบเป็นวัสดุที่สามารถไหม้ไฟได้ เมื่อนำตัวอย่างบางส่วนไปแช่ในกรด พบว่ามีฟองก๊าซเกิดขึ้นมา เมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นพบว่ามีคุณสมบัติเป็นกรดต่อกระดาษลิตมัสที่เปียกน้ำ ดังนั้นฟองก๊าซที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นฟองของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดกับสารประกอบจำพวกคาร์บอเนต นอกจากนี้ส่วนที่เป็นผงที่อัดอยู่ภายในฉนวนพบว่ามีบางส่วนสามารถละลายได้ในกรด และมีบางส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ สำหรับส่วนที่เป็นเส้นใยยังคงอยู่เหมือนเดิม แสดงว่าเส้นใยที่เป็นองค์ประกอบอยู่สามารถทนต่อกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1 : 1 ในน้ำ เมื่อนำตัวอย่างไปละลายในกรดซัลฟูริกเข้มข้น ส่วนที่เป็นเส้นใยกลายเป็นสีดำ แสดงว่าน่าจะเป็นเส้นใยของสารอินทรีย์

ในการทดสอบการทนความร้อน ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างมีการหดตัวเล็กน้อย เส้นใยที่อยู่ภายในตัวอย่างมีบางส่วนถูกเผาไหม้ไปได้ และยังคงมีบางส่วนที่ยังคงเหลืออยู่ แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 575 องศาเซลเซียส พบว่าไม่สามารถสังเกตเห็นเส้นใยเหลืออยู่ภายในตัวอย่างอีก

จากการทดสอบทางกายภาพและการทนความร้อนจะพบว่าตัวอย่างมีส่วนผสมที่สำคัญอยู่สองส่วนคือ ส่วนที่เป็นเส้นใย และส่วนที่เป็นผง โดยส่วนที่เป็นผง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สีจะเข้มขึ้นและแข็งมากขึ้น ส่วนเส้นใยถูกเผาไหม้ไปที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางแร่โดยใช้ XRD พบว่า ตัวอย่างเริ่มต้นที่มีทั้งส่วนที่เป็นผงและส่วนที่เป็นเส้นใยผสมกันอยู่ ตามรูปที่ 10 ประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (calcium silicate hydrate,  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate,  $\text{CaCO}_3$ ) และควอทซ์ (quartz,  $\text{SiO}_2$ ) โดยตรวจไม่พบ peak ของแอสเบสตอสชนิดโครโซไทต์ อะโมไซต์ โครซิโดไลต์ แอ็กทิโนไลต์และเทรโมไลต์ สำหรับแอสเบสตอสชนิด แอนโทฟิลไลต์ ตรวจไม่พบ peak ที่ชัดเจน เพราะว่า peak สูงสุดของแอนโทฟิลไลต์ จะมีค่า d-spacing  $3.05^\circ\text{A}$  และแมกนีเซีย แอนโทฟิลไลต์ จะมีค่า d-spacing  $3.06^\circ\text{A}$  ซึ่งใกล้เคียงกับ peak d-spacing  $3.07^\circ\text{A}$  ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ peak d-spacing  $3.03^\circ\text{A}$  ของ แคลเซียมคาร์บอเนต จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มเติมโดยการเอาตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของ

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งควรจะหายไปหลังจากการเผา โดยจะกลายเป็นแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมออกไซด์ หรือสารอื่นๆ ปรากฏว่าหลังจากการเผาเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่ามีวอลลาสโตไนต์เกิดขึ้นมาแทน และเพื่อให้แน่ใจเพิ่มขึ้นจึงได้แยกเอาเฉพาะเส้นใยออกไปทดสอบด้วย XRD อีกครั้ง พบว่าให้ผลออกมาเป็น วัสดุฐาน เนื่องจากไม่ปรากฏ peak ใดๆ แสดงว่าที่วินิจฉัย peak ของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและ แคลเซียมคาร์บอเนตนั้น ถูกต้อง และไม่ปรากฏ peak ของแอสเบสทอส

จากการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ทั้งส่วนที่เป็นเส้นใยและส่วนที่เป็นผงสามารถย้อมสีติดได้ และเส้นใยที่มองเห็นเป็นเส้นใยชนิดเดียวกันหมด มีลักษณะ เป็นเส้นใยยาว แสดงว่าเส้นใยที่มีอยู่ในตัวอย่างนี้น่าจะมีเพียงชนิดเดียว และเมื่อเผาที่ 575 องศาเซลเซียสแล้วเส้นใยหมดไป แสดงว่าเส้นใยชนิดนี้เป็นเส้นใยของสารอินทรีย์จึงทนความร้อนได้ไม่เกิน 575 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นเส้นใยแอสเบสทอสซึ่งเป็นเส้นใยอนินทรีย์จะทนความร้อนได้สูงมากกว่า 575 องศาเซลเซียส คือสามารถทนได้ถึงอุณหภูมิกว่า 1000 องศาเซลเซียส จึงจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยการสูญเสียในผลึกเท่านั้น

จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ได้ตรวจสอบตัวอย่างโดยดูลักษณะเส้นใยเพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแอสเบสทอสแบบต่าง ๆ เส้นใยแก้ว เส้นใยแร่ และเส้นใยเยื่อกระดาษ พบว่า ในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงภาพถ่ายของเส้นใยที่ได้แยกออกมาจากส่วนที่เป็นผง จากการดูลักษณะของเส้นใยไม่พบเส้นใยที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงผิวเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของเส้นใยแก้วและเส้นใยแร่ (ตามรูปที่ 14) แสดงว่าในตัวอย่างไม่มีเส้นใยของเส้นใยแก้วและใยแร่ผสมอยู่ จากลักษณะของเส้นใยตัวอย่าง พบว่าเป็นเส้นใยที่มีลักษณะเหมือนกันหมด แสดงว่าน่าจะมีเส้นใยเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างและเส้นใยมีลักษณะแบนเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยของแอสเบสทอสชนิดต่าง ๆ (ตามรูปที่ 13) พบว่าลักษณะของเส้นใยไม่เหมือนกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยของกระดาษชนิดใยยาว (ตามรูปที่ 2) พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน

ในส่วนที่เป็นเส้นใยนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อยืนยันว่าเส้นใยประกอบด้วยเส้นใยชนิดใดอีกโดยได้ทำการแยกเอาส่วนที่เป็นเส้นใยออกจากส่วนที่เป็นผงนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย FTIR ตามรูปที่ 5 และ EDS ตามรูปที่ 4 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS พบว่าเส้นใยมีคาร์บอน (carbon) และออกซิเจน (oxygen) เป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นพวกสารอินทรีย์ไม่พบสารอนินทรีย์ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแอสเบสทอส จากผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR เปรียบเทียบกับเส้นใยแอสเบสทอส ใยแก้ว ใยแร่ เยื่อกระดาษ ตามรูปที่ 6 ถึง 9 พบว่าสเปกตรัมของตัวอย่างตามรูปที่ 5 คล้ายกับสเปกตรัมของเยื่อกระดาษตามรูปที่ 6

จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD , EDS , FTIR ตลอดจนการเผาทั้งในส่วนของตัวอย่างและส่วนของเส้นใยที่แยกออกมาจากตัวอย่าง ทุก ๆ เทคนิคในการวิเคราะห์ไม่มีผลการวิเคราะห์ใดยืนยันว่ามีแอสเบสทอสผสมอยู่ในตัวอย่างเลย แต่ยืนยันว่าตัวอย่างมีเส้นใยทั้งหมดเป็นเส้นใยชนิดเดียวกัน เป็นเส้นใยที่ได้จากสารอินทรีย์ โดยเฉพาะผลจากการวิเคราะห์ด้วย SEM และ FTIR ยืนยันว่าเส้นใยในตัวอย่างเป็นเส้นใยเซลลูโลสชนิดใยยาว

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส ตัวอย่างมีค่าน้ำหนักที่หายไปจากการเผา 14.7 % เส้นใยบางส่วนถูกเผาไหม้ไปแต่ยังมีบางส่วนเหลืออยู่ แต่เมื่อเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส ค่าน้ำหนักที่หายไปจากการเผา 15.9 % เส้นใยถูกเผาไหม้ไปหมด ซึ่งจากการวิเคราะห์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่าเส้นใยที่มีอยู่ในตัวอย่างจัดเป็นเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งจากเอกสารทางวิชาการต่าง ๆ ระบุว่าสารอินทรีย์ประมาณ 500 ถึง 550 องศาเซลเซียส และจากผลวิเคราะห์ด้วย XRD ตัวอย่างประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) จากการศึกษาเพิ่มเติม  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  จะถูกไล่น้ำในผลึก (dehydration) ไปได้ที่อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส

ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปในการเผาจากการเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส จะเกิดจากการสูญเสียในผลึกของ  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และการถูกเผาไหม้ของเส้นใยเซลลูโลส

เมื่อพิจารณาน้ำหนักที่หายไปในการเผาที่อุณหภูมิ 800 และ 1000 องศาเซลเซียส มีค่า 18.6 % และ 18.8 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้ำหนักที่หายไปค่อนข้างคงที่ แต่เมื่อพิจารณาน้ำหนักที่หายไปในการเผาที่อุณหภูมิ 575 ถึง 800 องศาเซลเซียส จะมีค่าน้ำหนักที่หายไปในการเผาเพิ่มขึ้น 2.7 % (18.6 % - 15.9 %) ประกอบกับผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ยังพบว่ามีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และควอทซ์ ( $\text{SiO}_2$ )

ในกรณีของ  $\text{CaCO}_3$  นั้น จะถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิประมาณ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เหลือเป็นแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปในการเผาที่อุณหภูมิ 575 ถึง 800 องศาเซลเซียส จึงน่าจะเป็นค่าของ  $\text{CO}_2$  ที่หายไปซึ่งมีค่า 2.7 %

เมื่อนำค่าของ  $\text{CO}_2$  2.7 % ไปคำนวณเป็นปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่มีในตัวอย่างจะได้  $\text{CaCO}_3$  ประมาณ 6.1 % และจาก ปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  สามารถคำนวณเป็นค่า  $\text{CaO}$  ได้ประมาณ 4.2 % แต่จากผลการวิเคราะห์ทางเคมี ตัวอย่างมี  $\text{CaO}$  ทั้งหมด 31.4 % เพราะฉะนั้นในตัวอย่างจะยังคงมี  $\text{CaO}$  เหลืออยู่ 27.2 % (31.4 % - 4.2 %) ซึ่งเป็น  $\text{CaO}$  ที่เป็นองค์ประกอบของ  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

จากปริมาณ  $\text{CaO}$  27.2 % เมื่อดำเนินการเป็นปริมาณของ  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  จะได้ว่าตัวอย่างประกอบด้วย  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ประมาณ 65.2 % ซึ่งมีน้ำในผลึกอยู่ 1 โมเลกุล ดังนั้นเมื่อดำเนินการเป็นปริมาณน้ำจาก  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  จะมีน้ำอยู่ประมาณ 8.7 %

จากที่กล่าวมาข้างต้นว่าน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นน้ำหนักที่เกิดจากการสูญเสียในผลึกของ  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และเส้นใยถูกเผาไหม้ไป เพราะฉะนั้นจะมีปริมาณเส้นใยเซลลูโลสในตัวอย่างประมาณ 7.2 % (15.9 % - 8.7 %) เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่มีอยู่ในตัวอย่าง 35.1 % เป็น ปริมาณ  $\text{SiO}_2$  จาก  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  และควอทซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เมื่อดำเนินการปริมาณ  $\text{SiO}_2$  จาก  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  จะมีประมาณ 29.2 % เพราะฉะนั้นปริมาณ  $\text{SiO}_2$  จากควอทซ์ จะมีประมาณ 5.9 % (35.1 % - 29.2 %) และตัวอย่างยังประกอบด้วย  $\text{Al}_2\text{O}_3$  12.1 % ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  1.4 % และ  $\text{MgO}$  1.2 %

## สรุปผลการทดลอง

เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่าตัวอย่างจนวนกันความร้อนชนิดนี้มืองค์ประกอบโดยประมาณคือ

เส้นใยเซลลูโลส	7.2 %
แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	65.2 %
แคลเซียมคาร์บอเนต	6.1 %
ควอทซ์	5.9 %
และออกไซด์อื่น ๆ	14.7 %

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจนวนกันความร้อนในครั้งนี้ การวิเคราะห์องค์ประกอบ ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยไม่ค่อยจะมีปัญหามากนัก แต่ใช้การวิเคราะห์ทางเคมีและ XRD ก็สามารถบอกได้ แต่ในส่วนที่เป็นเส้นใยนั้น ต้องใช้เทคนิคและเครื่องมือหลายชนิดในการวิเคราะห์เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ เพราะในการใช้เทคนิคและเครื่องมือแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อจำกัดอยู่ เช่น

การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง สามารถที่จะจำแนกเส้นใยต่างๆได้อย่างรวดเร็ว และสามารถบอกความแตกต่างของเส้นใยได้อย่างชัดเจน แต่ไม่สามารถมองเห็นเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตรได้ และในการวินิจฉัยว่า เส้นใยนั้นเป็นเส้นใยชนิดใด โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีเส้นใยมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไปผสมกันอยู่ การวิเคราะห์ต้องใช้ผู้ที่มีประสบการณ์ในการที่จะแบ่งแยกชนิดเส้นใยที่มีว่าเป็นเส้นใยชนิดใดบ้าง

การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด จะมีประโยชน์มากที่สุดสำหรับการจำแนกชนิดของเส้นใยที่มีขนาดเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ถ่ายภาพได้ดีและชัดเจน สามารถนำไปเปรียบเทียบกับเส้นใยชนิดอื่นๆที่มีการถ่ายภาพเอาไว้ก่อนแล้ว เพื่อเป็นการยืนยันชนิดของเส้นใย แต่ถ้าตัวอย่างอัดผสมกันแน่นมากก็ไม่สามารถที่จะมองเห็นเส้นใยเล็กๆได้

ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ประกอบกับรูปถ่ายจากเครื่อง SEM จะสามารถบอกชนิดของเส้นใยได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เพราะ SEM จะบอกรูปร่างลักษณะของเส้นใยและ XRD จะบอกชนิดของเส้นใยในทางแร่ได้ แต่ XRD ก็มีข้อจำกัด คือ ถ้าเส้นใยในตัวอย่างมีน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะไม่สามารถวัดได้และไม่สามารถจำแนกสารที่ไม่เป็นผลึกได้

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกเฉพาะส่วนที่เป็นเส้นใยออกมาเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD, EDS และ FTIR เพื่อช่วยยืนยันผลอีกทางหนึ่ง เพราะถ้าไม่แยกเฉพาะเส้นใยออกมาส่วนผสมอื่นอาจจะรบกวนผลการวิเคราะห์ของเส้นใยได้

อย่างไรก็ดีในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้วิเคราะห์เฉพาะตัวอย่างจนวนกันความร้อนชนิดแคลเซียมซิลิเกตอย่างเดียวเท่านั้น ไม่ได้มีตัวอย่างจนวนกันความร้อนอื่นๆทำการวิเคราะห์ด้วย และจากการวิเคราะห์เส้นใย ก็พบเส้นใยเพียงชนิดเดียว คือ เส้นใยเซลลูโลส จึงทำให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ไม่มีความหลากหลายในการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นความแตกต่าง แต่อาจใช้การวิเคราะห์นี้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ครั้งต่อไปได้

## คำขอบคุณ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายสุรพันธ์ บริสุทธิ์ ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและพัฒนาเซรามิก ที่กรุณาให้คำแนะนำต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ รวมทั้งขอขอบคุณกองการวิจัยและเพื่อน ๆ ร่วมงานที่มีส่วนช่วยให้ผลงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ทั้งนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณ กรมวิทยาศาสตร์บริการที่เอื้อเฟื้อ วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี ต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนช่วยให้การปฏิบัติงานเสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

1. Bennett , H. and Reed , R.A. Chemical Methods of Silicate Analysis , the British ceramic research association , Academic press , London: 1971 p 62-79.
2. Carroll-Porczynski, Charles Z. Asbestos form rock to fabric: The textile institute, Manchester: 1956. p 12-18.
3. Dryden, J. G. C The efficient use of energy 2<sup>nd</sup> ed Butterworth Scientific, London: 1982 p 410-412,488.
4. Identification of Textile Materials 7<sup>th</sup> ed The textile Institute , Manchester: 1985. P 176 , 178.
5. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology 3<sup>rd</sup> ed V 13 executive edited by Martin Grayson, Awiley interscience publication, John Wiley & sons, New York: 1981 p 591-603.
6. Komar, A. Building material and components translated form the Russian by I. Savin 2<sup>nd</sup> ed, Mir Pubisher, Moscow: 1979 p 392-412.
7. Malloy , John F. Thermal Insulation Van Nostrand Reinhold Company, New York: 1969 p 147-165.
8. McCrone, Walter C. The asbestos particle atlas Ann Arbor Science Publishers, Inc. Michigan: 1980 p. 1-41.
9. Michaels, L. and Chissick, S.S. Asbestos : Properties, Applications and Hazards V.1 , Institute of Laryngology and Otology, John Willy & Sons, London : 1979 p. 45-111.
10. Zhibankov , Rostislav Georgievich. Infrared spectra of cellulose and its derivatives Physics Academy of Sciences of the Belorussian SSR , Consultants Bureau , New York: 1966 p 59-61.