

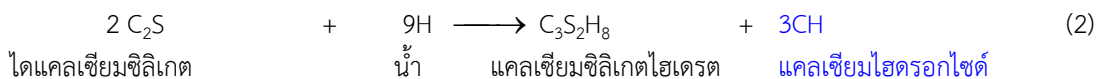
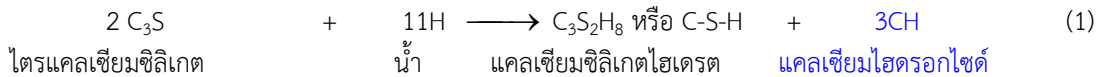
ศักยภาพของเถ้าในการเป็นสารปอซโซลาน

รองศาสตราจารย์ ดร.อุบลลักษณ์ รัตน์ศักดิ์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
คณะกรรมการวิชาการ สาขาคอนกรีต วัสดุและการก่อสร้าง สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

ในปัจจุบัน มีเถ้าทิ้งจากอุตสาหกรรมและการเกษตรหลายชนิดที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และต้องการการกำจัดอย่างถูกวิธี เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม หรือนำไปใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น การกำจัดที่นิยมการนำไปถมที่ อย่างไรก็ตาม ยังมีการนำเถ้าบางชนิดมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เพื่อเพิ่มมูลค่าเถ้าทิ้ง หรือลดต้นทุนการผลิต เช่น นำไปผสมกับปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีต เถ้าทิ้งที่นิยมนำไปใช้ในงานคอนกรีต ส่วนใหญ่ได้แก่เถ้าลอยจากกระบวนการแบบบด และเผาด้วยความร้อนปานกลาง (Pulverized coal combustion, PCC) ซึ่งเหมาะเผาด้วยวิธีการนี้ อย่างไรก็ตาม ยังมีเถ้าทิ้งอื่นที่ได้มีการศึกษานำไปผสมคอนกรีต เช่น เถ้าแกลบ เถ้าชีวมวล และเถ้าลอยจากกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (เผาด้วยความร้อนปานกลาง) โดยทั่วไป การศึกษาความเป็นสารปอซโซลานมักจะแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าเหล่านี้ในคอนกรีต ที่ 25% โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ และวัดค่ากำลังอัดที่อายุ 30 วัน ซึ่งบางครั้งอาจไม่รวดเร็ว และรอผลนานถึง 30 วัน ดังนั้นบทความนี้ จึงเสนอวิธีการศึกษาความเป็นสารปอซโซลานด้วยวิธีการอื่นที่ใช้ระยะเวลาการวิเคราะห์ที่สั้น และบางเทคนิคสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป

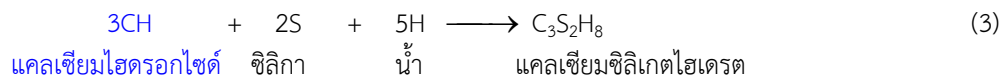
1. องค์ประกอบของเถ้า

องค์ประกอบทางเคมีเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องวิเคราะห์ ในการนำเถ้าทิ้งมาใช้เป็นสารปอซโซลานจะต้องหาปริมาณซิลิกา (SiO₂) และอลูมินา (Al₂O₃) ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งปฏิกิริยาปอซโซลาน จะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ (เมื่อ C แทน CaO, S แทน SiO₂, H แทน H₂O, A แทน Al₂O₃, CH แทน Ca(OH)₂) ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 [1,2]

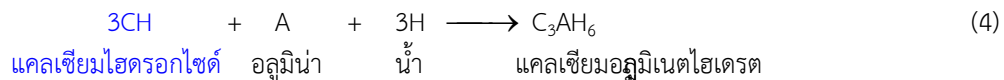


สมการที่ 1 และ 2 แสดงปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยไตรแคลเซียมและไดแคลเซียม ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ที่มีสมบัติให้ค่ากำลังอัดแก่คอนกรีตตามอายุการบ่ม นอกจากนี้ไตรแคลเซียมอลูมิเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรตขึ้นได้เป็นสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตได้เช่นกัน

อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือพอร์ตแลนด์ (Portlandite) เป็นผลิตภัณฑ์รองเสมอ หากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตมีปริมาณมากจะทำให้คอนกรีตมีความคงตัวต่ำ ดังนั้นการใช้สารปอซโซลานในคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเปลี่ยนเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 3



ในกรณีเดียวกัน หากอลูมินาในสารปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรตที่เป็นผลิตภัณฑ์เช่นกัน ดังแสดงในสมการที่ 4



ดังนั้น ถ้าทุกชนิดที่จะนำมาเป็นสารปอซโซลานควรตรวจหาองค์ประกอบทางเคมีก่อน เพื่อให้ทราบปริมาณซิลิกาและอลูมินาในแก้ว ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ควบคู่กับการหาร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Loss on ignition, LOI) ซึ่งมีหลายหน่วยงานรับวิเคราะห์ ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแก้ว และวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการผสมคอนกรีตที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

ตารางที่ 1 สัดส่วนองค์ประกอบทางเคมี และค่า LOI ของตัวอย่างแก้ว และวัสดุต่างๆ

องค์ประกอบ (%)	แก้วลอย PCC [3]	แก้วลอยฟลูอิดซ์เบด [4]	แก้วเกลบดำ [5]	ซิลิกาฟุ่ม [6]
SiO ₂	39.5	21.0	87.5	98.2
Al ₂ O ₃	19.5	8.0	2.5	-
CaO	17.3	42.2	0.8	-
Fe ₂ O ₃	14.1	6.9	0.4	-
ออกไซด์อื่นๆ	8.8	20.1	6.7	1.8
LOI	0.8	1.0	2.5	-

จากตารางที่ 1 พบว่าเถ้าลอย PCC เถ้าลอยฟลูอิดไซด์เบด เถ้าแกลบ และซิลิกาฟุ้งมีองค์ประกอบของซิลิกาและอลูมินาที่สามารถเกิดปฏิกิริยาสารปอซโซลาน อย่างไรก็ตาม ไม่นิยมนำเถ้าลอยฟลูอิดไซด์เบดมาผสมกับคอนกรีต เนื่องจากมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และซัลเฟอร์ออกไซด์สูง ซึ่งเกิดจากการพ่นหินปูนไปจับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ และซัลเฟอร์ออกไซด์สูง ทำให้คอนกรีตมีสมบัติด้านความคงตัวและคงทนที่ต่ำ อย่างไรก็ตามวิธีการเผาแบบฟลูอิดไซด์เบดจะเป็นวิธีการเผาที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถกำจัด SOx (โดยการพ่นหินปูนไปจับ) และ NOx (เนื่องจากใช้อุณหภูมิการเผาที่ต่ำ ประมาณ 800-900 °C ทำให้ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซ NOx ออกมา) [7]

2. สันฐานวิทยาของเถ้า

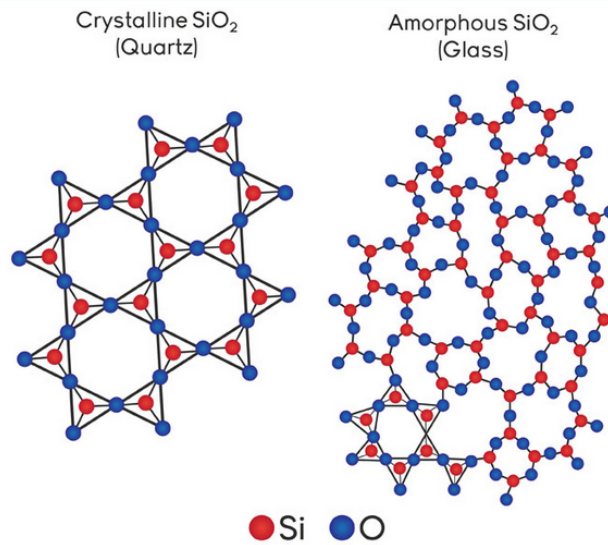
สิ่งที่แสดงว่าเถ้าเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตหรืองานอื่นๆ นั้น คือ ความเป็นอสัณฐานหรือความเป็นแก้ว (Amorphous phase หรือ Glassy phase) คือความไม่เป็นระเบียบของการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลภายในเถ้า และบอกความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมี โดยทั่วไปวัสดุต่างๆ จะมีสมบัติสันฐานวิทยาพื้นฐาน 3 สันฐาน คืออสัณฐาน กึ่งสันฐานหรือกึ่งผลึก และผลึก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

อสัณฐาน : แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสาร ดังนั้นจะใช้พลังงานไม่มากในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี หรือสลายพันธะ โดยทั่วไป บริเวณผิวของเถ้าลอยจะมีสมบัติอสัณฐาน ส่วนสมบัติความเป็นผลึกของเถ้าลอยจะอยู่ที่แกนกลาง [8]

ผลึก : โมเลกุลจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ และมีการโครงสร้างตะขாய เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล ดังนั้นต้องใช้พลังงานสูงในการแตกสลายพันธะเคมี

กึ่งสันฐานหรือกึ่งผลึก : ในโมเลกุลจะพบทั้งส่วนที่มีการเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบ พบโครงสร้างตะขาย และมีการเรียงตัวแบบไม่มีระเบียบปนกัน

รูปที่ 1 แสดงองค์การการจัดเรียงตัวของซิลิกา (SiO₂) แบบอสัณฐาน ซึ่งพบในซิลิกาฟุ้ง เถ้าแกลบ เถ้าลอยเป็นต้น และการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ เช่นที่พบในทราย ซึ่งแสดงเหตุผลว่าซิลิกาฟุ้ง เถ้าแกลบ เถ้าลอยจะทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าทราย โดยทรายจะเกิดปฏิกิริยาได้ก็ต่อเมื่อทำลายพันธะในโมเลกุล ซึ่งใช้พลังงานและอุณหภูมิสูง ประมาณ 1100 °C เช่นการหลอมทรายเพื่อผลิตน้ำแก้ว (Water glass) สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก้ว ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ หรือในการผลิตจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ต้องการน้ำแก้วเพื่อช่วยในการก่อตัวและเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ละลายได้ (Dissolved silica) ในส่วนผสม [3-6]



รูปที่ 1 การจัดเรียงตัวของซิลิกา (SiO₂) แบบอสัณฐาน และแบบผลึก [9]

3. วิธีการวิเคราะห์ความเป็นอสัณฐาน

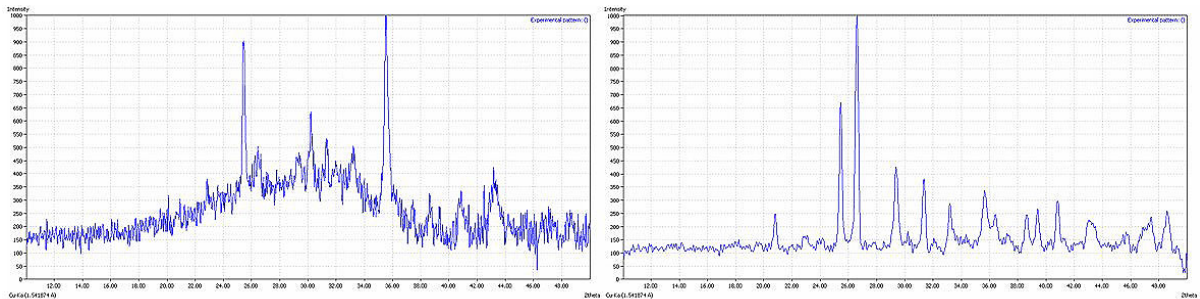
ในการวิเคราะห์ความเป็นอสัณฐานสามารถทำได้ 2 วิธี คือวิธีที่ใช้เครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะ และวิธีพื้นฐานที่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีที่ใช้เครื่องมือวิเคราะห์จะมีความแม่นยำ อย่างไรก็ตาม หากต้องการทราบความเป็นอสัณฐานแบบคร่าวๆ สามารถใช้วิธีพื้นฐานในห้องปฏิบัติการได้ ซึ่งวิธีพื้นฐานจะเน้นที่การวิเคราะห์หาปริมาณซิลิกาอสัณฐานที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้

วิธีที่ใช้เครื่องมือวิเคราะห์เฉพาะ

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชัน (X-ray diffractometry, XRD) ได้ถูกใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาของวัสดุผงหรือเถาทั้งต่างๆ ก่อนนำไปทำปฏิกิริยา หรือหลังจากการทำปฏิกิริยาแล้ว เทคนิคนี้สามารถบอกองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุทั้งเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณ (ขึ้นกับรุ่นและโปรแกรมของเครื่อง) และเป็นที่ยอมรับสำหรับนักวิจัยทางด้านวัสดุศาสตร์ วัสดุที่ใช้หากมีขนาดชิ้นใหญ่ ต้องบดให้มีขนาดเล็กคล้ายแป้ง ใช้ปริมาณ 1-2 ซอนชา (ปริมาณสารตัวอย่างที่ใช้ขึ้นกับรุ่นของเครื่องมือวิเคราะห์)

สเปกตรัมจากการวิเคราะห์จะบันทึกเป็นพีคในช่วงมุมต่างๆ พีคกว้างแสดงถึงความเป็นอสัณฐาน ส่วนพีคแหลมแสดงถึงความเป็นผลึกของวัสดุ สามารถคำนวณหาปริมาณอสัณฐานอย่างง่ายได้จากนำพื้นที่ใต้พีคฐานกว้างหารด้วยพื้นที่ใต้พีคทั้งหมด หากต้องการความแม่นยำ ต้องทำการเติมสารมาตรฐานลงไป (Internal standard) ได้แก่ α -Al₂O₃ (Corundum) ซึ่งขึ้นอยู่กับรุ่นของเครื่อง XRD ที่ทดสอบ [6]

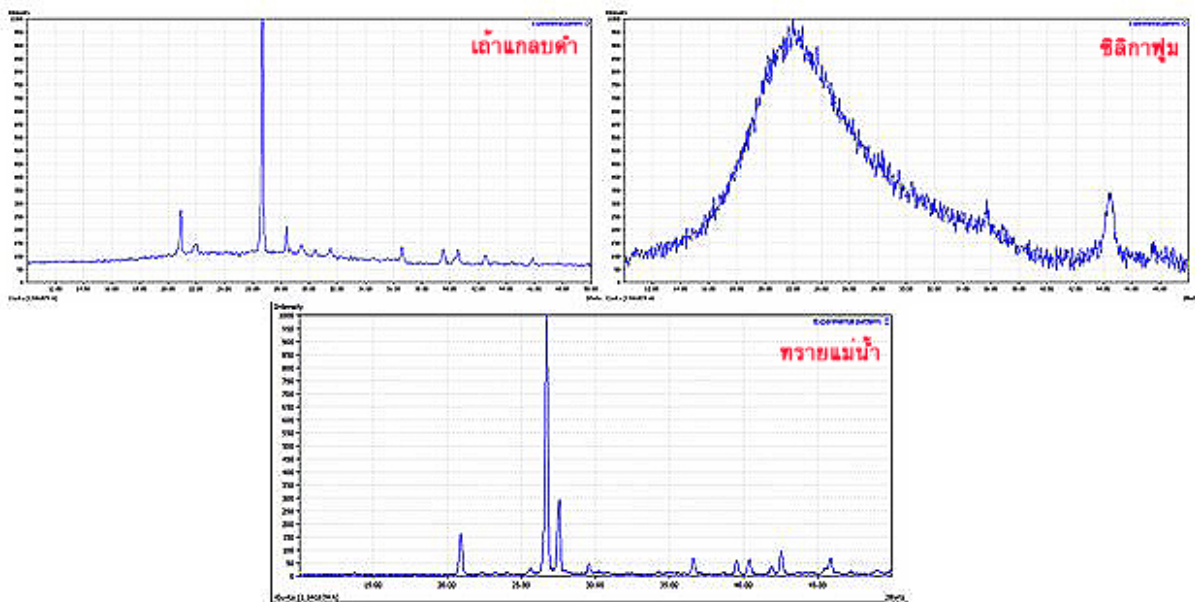
นอกจากนี้ พีคที่ได้จากเครื่อง XRD สามารถนำไประบุเอกลักษณ์ที่มุม 2 θ ต่างๆ ได้ โดยใช้โปรแกรมของเครื่อง XRD หรือโปรแกรมที่สามารถดาวน์โหลดมาจากอินเทอร์เน็ต เช่น โปรแกรม Match! อย่างไรก็ตาม นักวิจัยต้องทราบองค์ประกอบเบื้องต้นในวัสดุที่ทดสอบ เนื่องจากที่ตำแหน่ง มุม 2 θ เดียวกัน สามารถเป็นธาตุต่างๆ ได้หลายธาตุ รูปที่ 2 แสดงสเปกตรัมของเถ้าลอย PCC จากแม่เมาะ และเถ้าลอยจากการเผาฟลูอิดไคซ์เบตจากโรงงานไฟฟ้าชุมชน โดยเถ้าลอย PCC จะมีความเป็นอสัณฐานสูงกว่าเถ้าลอยจากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบต เนื่องจากอุณหภูมิการเผาเถ้าลอย PCC จะสูงกว่า คือประมาณ 1200 °C ในขณะที่การเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบตจะเผาที่ 800-900 °C การเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้ซิลิกาที่เป็นผลึกในถ่านหินเกิดการหลอมละลายเป็นซิลิกาในรูปอสัณฐานหรือแก้วได้ [10] ส่วนรูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมของวัสดุอื่นๆ ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD



(ก) เถ้าลอย PCC จากแม่เมาะ

(ข) เถ้าลอยจากการเผาฟลูอิดไคซ์เบต

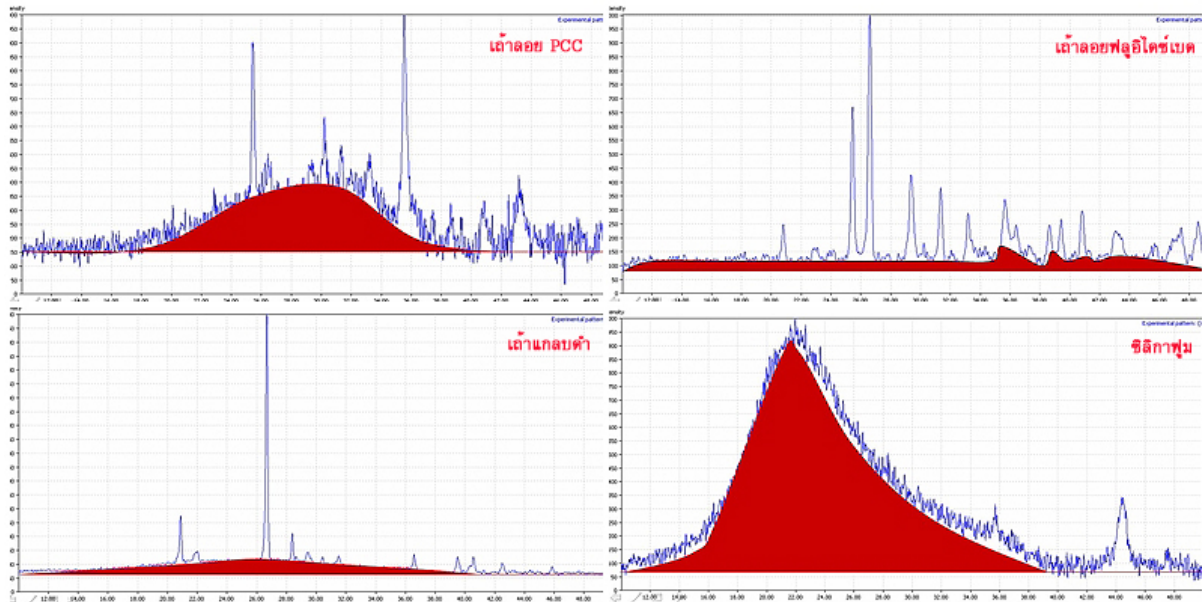
รูปที่ 2 สเปกตรัมของเถ้าลอย



รูปที่ 3 สเปกตรัมของวัสดุอื่นๆ

หากทำการไฮไลต์พื้นที่ใต้พีคเพื่อให้ทราบความเป็นอสัณฐานอย่างคร่าวๆ แบบไม่ใช่โปรแกรมใดๆ สามารถแสดงได้ในรูปที่ 4 โดยพบว่าซิลิกาฟุ่ม และเถ้าลอย PCC มีศักยภาพเป็นสารปอซโซลาน ในขณะที่

แก้ล้อยฟลูอิดซ์เบตและแก้แกลบต้องการการปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน เช่นการบด หรือใช้สารผสมเพิ่ม ส่วนทรายมีผลึกเป็นส่วนประกอบหลัก



รูปที่ 4 สเปกตรัมของวัสดุต่างๆ ที่ได้ไฮไลต์พื้นที่ได้ฟัก

วิธีพื้นฐานที่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการ

นอกจากเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชันแล้ว ยังสามารถศึกษาค่าการละลายของอออนซิลิกอนกับอลูมิเนียมจากเก้าชนิดต่างๆ โดยวิธีทางเคมี ที่ใช้การชะด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 8 โมลาร์ (8 M NaOH) และนำสารละลายที่ชะได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณอออนซิลิกอนกับอะลูมิเนียม ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น Inductive Coupled Plasma (ICP) หรือทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสีแล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงของสารดังกล่าวด้วยเทคนิค UV spectronic โดยสารเชิงซ้อนซิลิกอนจะวัดที่ความยาวคลื่น 810 nm และอะลูมิเนียมวัดที่ความยาวคลื่น 550 nm [3,11,12]

นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์หาปริมาณความเป็นออสซิลิกอนหรือผลึกได้จากน้ำหนักกากตะกอนที่เหลือจากการชะด้วยสารละลายเฉพาะ [4,13] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมบัติการละลายของซิลิกาในสารละลายชนิดต่างๆ [13]

	8M NaOH	Oleum	Conc. HF	10%w/v HF
ซิลิกาอสัณฐาน	ละลายหมด	ไม่ละลาย	ละลายหมด	ละลายหมด
ซิลิกาผลึก	ละลายบางส่วน	ไม่ละลาย	ละลายหมด	ละลายหมด

จากตารางที่ 2 ทำให้ทราบว่าหากต้องการหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานในแก้วตัวอย่าง สามารถใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซดาไฟ ความเข้มข้น 8 โมลาร์ (8M NaOH) ได้ละลายซิลิกาอสัณฐานออกมาจากแก้วตัวอย่างได้ ซึ่งสารละลายดังกล่าวมีสถานะเป็นเบสแก่ หากใช้สารละลาย 10% HF หรือกรดไฮโดรฟลูออริก หรือที่เรียกว่ากรดกัดแก้ว ซิลิกาทั้งหมดในแก้วจะถูกชะละลายออกมาหมด วิธีการเตรียมสารละลาย 8M NaOH และการหาปริมาณซิลิกาอสัณฐานแบบคร่าวๆ สามารถทำได้ดังต่อไปนี้ [4]

การเตรียมสารละลาย 8M NaOH

- 1) เติมน้ำกลั่นประมาณ 500-700 มล. ลงในภาชนะพลาสติกที่มีขีดบอกระดับ 1000 มล. (1 ลิตร)
- 2) ชั่งแกร์ดโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซดาไฟ 320 กรัม แล้วค่อยๆ เติมน้ำลงในภาชนะพลาสติกที่มีน้ำกลั่น ข้อ 1) ใช้ตะเกียบไม้ค่อยๆ คนจนโซดาไฟละลาย สารละลายจะมีสีขาวขุ่น (ระหว่างคนจะเกิดความร้อนสูง และไอร้อน ดังนั้นควรเตรียมในที่ที่มีอากาศถ่ายเทหรือในตู้ควีน พร้อมทั้งใส่ถุงมือและหน้ากากอนามัยเพื่อความปลอดภัยด้วย)
- 3) รอจนสารละลายเย็น ได้สารละลายใส แล้วจึงเติมน้ำกลั่นให้ถึงระดับ 1 ลิตร ของภาชนะพลาสติก คนให้เข้ากัน และเก็บใส่ขวดพลาสติกที่มีฝาปิด
- 4) สามารถปรับลดปริมาณการเตรียมสารละลาย 8M NaOH ได้ โดยใช้อัตราส่วน โซดาไฟ 320 กรัม ในสารละลายทั้งหมด 1000 มล. เช่นหากต้องการเตรียมสารละลาย 200 มล. จะใช้สูตร

$$\text{ปริมาณโซดาไฟ} = \frac{320}{1000} \times 200 = 64 \text{ กรัม}$$

นั่นคือ ละลายโซดาไฟ 64 กรัมในน้ำ แล้วปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำให้ได้ 200 มล. (ไม่ใช่ละลายโซดาไฟ 64 กรัม ในน้ำ 200 มล.)

การหาปริมาณซิลิกาอสัณฐาน [4]

- 1) ชั่งแก้วประมาณ 3 กรัม โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จดบันทึกน้ำหนักแก้วด้วย (หากแก้วมีขนาดใหญ่ให้บดให้มีขนาดเล็ก เช่น แก้วแกลบ) ละลายใน 8M NaOH 30 มล. ที่ใส่ในภาชนะพลาสติก (อัตราส่วนระหว่าง แก้วต่อสารละลาย คือ 1 ต่อ 10)
- 2) ให้ความร้อนแก่สารละลาย โดยแช่ในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 60°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้คนสารละลายเป็นระยะ ด้วยแท่งคนที่ทำจากไม้หรือพลาสติก
- 3) เมื่อครบกำหนด ยกภาชนะออกจากอ่างน้ำร้อน และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 4) ชั่งกระดาษกรองด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง แล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง
- 5) ล้างตะกอนด้วยน้ำอุ่น 2-3 ครั้ง เพื่อล้างสารละลายออกให้หมด
- 6) ครั่งสุดท้ายล้างตะกอนด้วยอะซิโตน เพื่อให้ใส่น้ำออกจากตะกอน แล้วอบที่อุณหภูมิ 70-80 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- 7) นำสารออกมาจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำไปชั่ง (หากนำตะกอนที่ยังร้อนอยู่ไปชั่ง จะทำให้ได้ น้ำหนักน้อยกว่าค่าจริง)
- 8) คำนวณซิลิกาอสัณฐานด้วยสูตรต่อไปนี้

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

เมื่อ A คือน้ำหนักแก้วก่อนชั่งด้วย 8M NaOH (กรัม)

B คือน้ำหนักแก้วหลังอบ เมื่อลบน้ำหนักกระดาษกรองแล้ว (กรัม)

4. บทสรุป

ความเป็นอสัณฐานวิทยาเป็นสมบัติที่สำคัญที่นำมาพิจารณาการนำเข้ามาใช้ประโยชน์ โดยหลักการการเพิ่มความเป็นอสัณฐานวิทยาทำได้โดยการให้ความร้อนเพื่อสลายพันธะเคมี หรือวิธีการทางเคมี หากแก้วตัวอย่างมีความเป็นอสัณฐานอยู่บ้างเล็กน้อย การบดเพิ่มจะช่วยให้แก้วดังกล่าวทำปฏิกิริยามากขึ้นโดยไปเพิ่มพื้นที่ผิว แต่ความเป็นอสัณฐานยังคงเดิม การวิเคราะห์สมบัติความเป็นอสัณฐานวิทยาทำได้โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟคชันที่เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในงานด้านวัสดุศาสตร์ อย่างไรก็ตามสามารถใช้วิธีพื้นฐานที่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการในการวิเคราะห์เบื้องต้นได้เช่นกัน

บรรณานุกรม

- [1] Aitcin PC (1998) *High-performance concrete*, London: E & FN Spon, 591p.
- [2] Hewlett PC (1998) *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th ed., London: Arnold, 1053p.
- [3] Rattanasak U, Chindapasirt P (2009) Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering* 22(12), 1073-1078.
- [4] Chindapasirt P, Rattanasak U (2010, Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer, *Waste Management* 30(4), 667-672.
- [5] Chindapasirt P, Chai Jaturapitakkul, Rattanasak U (2009) Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate, *Fuel* 88(1), 158-162.
- [6] Chindapasirt P, Paisitsrisawat P, Rattanasak U (2014) Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash-silica fume alkali-activated composite, *Advanced Powder Technology* 25(3), 1087-1093.
- [7] Basu P (1999) Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review, *Chemical Engineering Science* 54, 5547-5557.
- [8] Inada M, Tsujimoto H, Eguchi Y, Enomoto N, Hojo J (2005) Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process, *Fuel* 84, 1482-1486.
- [9] NDT Resource Center, <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/solidstate.htm>, Center for NDE, Iowa State University.
- [10] ปริญญา จินดาประเสริฐ (2548) *ถ้อยแถลงในงานคอนกรีต (ฉบับปรับปรุง)*, สมาคมคอนกรีตไทย, 130 หน้า
- [11] Bartram J, Balance R (1996) *Water quality monitoring - A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programs*, UNEP/WHO.
- [12] Roelofs F, Vogelsberger W (2006) Dissolution kinetics of nanodispersed γ -alumina in aqueous solution at different pH: Unusual kinetic size effect and formation of a new phase, *Journal of Colloid and Interface Science* 303, 450-459.
- [13] Phillips DN, Carter J (2003) Analysis of silica fume produced by zircon desilication, *Talanta* 60, 961-968.