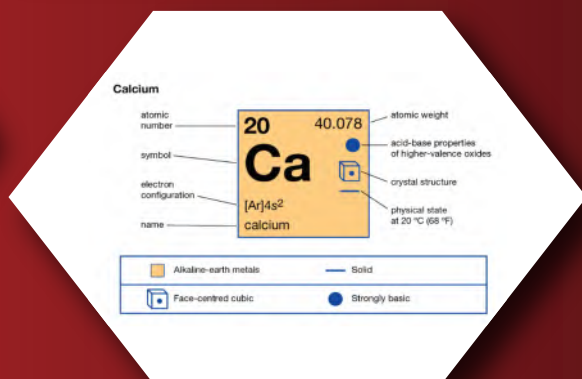
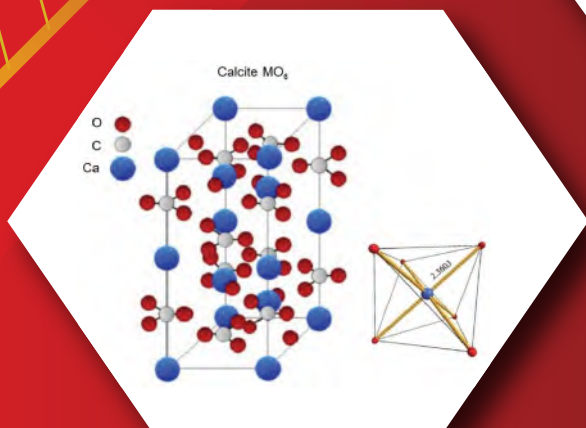
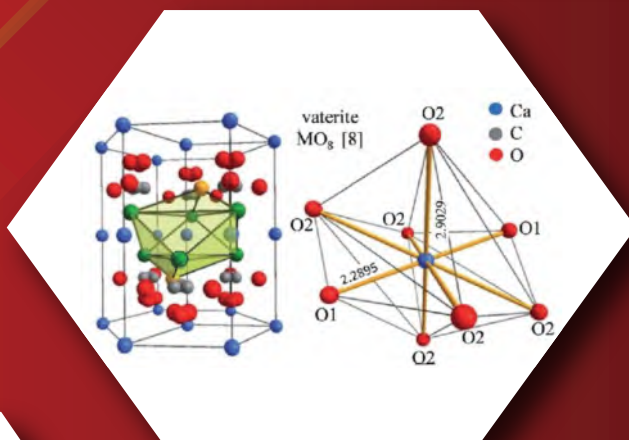
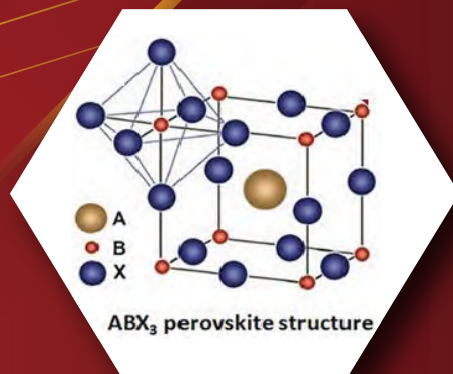


นวัตกรรม เชิงวิศวกรรมวัสดุ และงานวิจัย

(Innovative Materials Engineering and Research)



นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

นวัตกรรมเชิงวิศวกรรมวัสดุและงานวิจัย

(Innovative Materials Engineering and Research)

รศ.ดร. นุชนภา ตั้งปริบูรณ์

นวัตกรรมเชิงวิศวกรรมวัสดุและงานวิจัย
(Innovative Materials Engineering and Research)

จัดทำโดย รศ.ดร. นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ISBN ๙๗๘-๖๑๖-๖๒๙-๘๓๕-๒

พิมพ์ครั้งที่ ๑
จำนวนพิมพ์ ๕๐๐ เล่ม
ปีที่พิมพ์ พ.ศ. ๒๕๖๘
จำนวน ๖๓๘ หน้า

พิมพ์ที่ สำนักพัฒนาการเรียนรู้ตลอดชีวิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เลขที่ ๕๐ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ ๑๐๙๐๐
โทรศัพท์ ๐-๒๙๔๒-๘๐๔๙

คำนำ

ในยุคที่เทคโนโลยีและภาคอุตสาหกรรมมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง งานด้านนวัตกรรมเชิงวิศวกรรมวัสดุและงานวิจัยได้มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบผลิตภัณฑ์ การควบคุมกระบวนการผลิต คุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรม ตลอดจนการบริหารจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน ความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างระดับจุลภาคและระดับอะตอม สมบัติทางฟิสิกส์และเคมี กระบวนการแปรรูปวัสดุ และสมรรถนะภายใต้เงื่อนไขการใช้งานต่างๆ จึงเป็นองค์ประกอบพื้นฐานและรากฐานที่สำคัญในการศึกษาและการวิจัยในสาขาวิศวกรรมวัสดุ

หนังสือ “นวัตกรรมเชิงวิศวกรรมวัสดุและงานวิจัย” เล่มนี้จัดทำขึ้นเพื่อรวบรวมและถ่ายทอดองค์ความรู้เชิงระบบด้านวิศวกรรมวัสดุทั้งในมิติของทฤษฎีพื้นฐานและทฤษฎีขั้นสูงเพื่อการประยุกต์ใช้งาน โดยเน้นการใช้คำศัพท์ทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง ครอบคลุมงานวิศวกรรมวัสดุหลัก ได้แก่ โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) เนื้อหายังบูรณาการแนวคิดด้านนวัตกรรม การพัฒนาวัสดุใหม่ และการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับแนวทางอุตสาหกรรมสีเขียว (Green Industry) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) เนื้อหาของหนังสือได้นำเสนอกิจกรรมนวัตกรรมและกรณีศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุรีไซเคิลจากภาคอุตสาหกรรม ชุมชน และครัวเรือน มาใช้เป็นวัสดุทางเลือก ทั้งในฐานะวัตถุดิบ สารประกอบ สารเติมแต่งหรือสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุแม่เหล็ก วัสดุแสง ฉนวนความร้อน พลาสติกชีวภาพ และวัสดุทางการแพทย์ โดยมุ่งเน้นการลดต้นทุนการผลิต ลดปริมาณของเสีย และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งล้วนเป็นแนวทางที่สนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืนทั้งในมิติของงานด้านวิศวกรรมและสิ่งแวดล้อม

ผู้เขียนได้เรียบเรียงเนื้อหาโดยอ้างอิงจากประสบการณ์ตรงในการศึกษา ค้นคว้า วิจัย ตลอดจนจากตำราและแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เชื่อถือได้ เพื่อให้หนังสือเล่มนี้สามารถใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ที่มีคุณภาพสำหรับนักศึกษา อาจารย์ นักวิจัย และบุคลากรในภาคอุตสาหกรรมที่สนใจศาสตร์ด้านวิศวกรรมวัสดุ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า หนังสือเล่มนี้จะสามารถเป็นประโยชน์ในการเสริมสร้างองค์ความรู้ พัฒนาทักษะ และส่งเสริมการประยุกต์ใช้วัสดุวิศวกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัย รับไว้ด้วยความเคารพ และยินดีรับข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาในโอกาสต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนอย่างอบอุ่น ตลอดกระบวนการเขียนและเรียบเรียงหนังสือเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วง ซึ่งผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์แก่ผู้อ่านและผู้สนใจศึกษาด้านนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุในอนาคต

ขอขอบพระคุณบรรพคณาจารย์ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์อันทรงคุณค่าในการเขียนและจัดทำหนังสือเล่มนี้ รวมทั้งท่านกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการประเมินผลงานเพื่อยกระดับคุณภาพวิชาการของหนังสือเล่มนี้ให้เป็นประโยชน์แก่บัณฑิต-นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งท่านศาสตราจารย์อาวุธโสที่ให้คำชี้แนะอันมีคุณค่าในการพัฒนาเนื้อหาให้ครบถ้วนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ทั้งคณาจารย์ บุคลากร และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกในทุกขั้นตอนจนหนังสือเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นอกจากนี้ผู้เขียนขอขอบคุณเจ้าของผลงานทุกท่านและนิสิตที่ร่วมงานวิจัยได้เผยแพร่องค์ความรู้ ตำรา และเอกสารทางวิชาการทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งผู้เขียนได้นำข้อมูลเหล่านั้นเพื่อการอ้างอิงและรวบรวมไว้ในหนังสือเล่มนี้ตามเอกสารอ้างอิงท้ายเล่ม เพื่อให้เนื้อหา มีความถูกต้อง ครบคลุม และเป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้น

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทนำ วัตถุประสงค์	1
บทที่ 1 แนวคิดและความหมายของนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Concepts and Definitions of Innovative Materials Engineering	2
บทที่ 2 กระบวนการผลิตด้านนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Manufacturing Processes for Innovative Materials Engineering	64
บทที่ 3 องค์ประกอบเฟสและเฟสไดอะแกรมที่สัมพันธ์กับนวัตกรรม วิศวกรรมวัสดุ Phase Composition and Phase Diagrams for Innovative Materials Engineering	200
บทที่ 4 สมบัติทางกลที่สัมพันธ์กับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Mechanical Properties Related to Innovative Materials Engineering	230
บทที่ 5 สมบัติทางไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Electrical Properties Related to Innovative Materials Engineering	264
บทที่ 6 สมบัติทางแสงที่สัมพันธ์กับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Optical Properties for Innovative Materials Engineering	318
บทที่ 7 สมบัติทางแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับวิศวกรรมวัสดุ Magnetic Properties for Innovative Materials Engineering	352
บทที่ 8 สมบัติทางความร้อนที่สัมพันธ์กับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Thermal Properties for Innovative Materials Engineering	392
บทที่ 9 เทคโนโลยีการเคลือบผิวเพื่อเพิ่มคุณลักษณะและสมบัติที่ดีกับ นวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Surface Coating Technology to Enhance Properties in Innovative Materials Engineering	422

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทที่ 10	445
การวิเคราะห์และทดสอบนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Characterization and Testing of Innovative Materials Engineering	
บทที่ 11	472
การพัฒนานวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Innovations in Materials Engineering	
บทที่ 12	508
การพัฒนาวัสดุทดแทนสำหรับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ Development of Alternative Materials to Support Innovations in Materials Engineering	
เอกสารอ้างอิง	583
ภาคผนวก 1	599
ค่าคงตัวทางฟิสิกส์	
ภาคผนวก 2	600
ความหนาแน่นของวัสดุ	
ภาคผนวก 3	601
โครงสร้างและสมบัติของธาตุบางชนิด	
ภาคผนวก 4	603
สัญลักษณ์และคำย่อที่สำคัญ	
ภาคผนวก 5	607
ขนาดตะแกรงร่อนมาตรฐาน U.S.	
ภาคผนวก 6	608
ดัชนีหักเหของแสง	
ภาคผนวก 7	609
อุณหภูมิวิกฤติของสารตัวนำยิ่งยวด (Superconductor)	
ภาคผนวก 8	609
สมบัติของเฟอร์ไรต์แมกเนติก เฟอร์ไรต์ และ การ์เน็ต	
ภาคผนวก 9	610
อุณหภูมิเนล (Néel temperature) แอนไทเฟอร์ไรต์แมกเนติก	
ภาคผนวก 10	611
สมบัติของเฟอร์ไรต์อิเล็กทรอนิกส์	
ภาคผนวก 11	612
สมบัติทางกลของวัสดุเซรามิก	
ภาคผนวก 12	613
สมบัติทางความร้อนและทางไฟฟ้าของวัสดุเซรามิก	
ภาคผนวก 13	614
การวัดอุณหภูมิในเตาเผาด้วย Cone	
ดัชนี	616

วัตถุประสงค์ของหนังสือ "นวัตกรรมเชิงวิศวกรรมวัสดุและงานวิจัย"

1. เพื่อศึกษาคำจำกัดความ ขอบเขต และความหมายของนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ ตลอดจนบทบาทของวัสดุในระบบอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างระดับอะตอมและระดับจุลภาค ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและกฎเกณฑ์การจำแนกประเภทของวัสดุวิศวกรรม เช่น โลหะ เซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสม (Composite Materials)
3. เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจกระบวนการผลิตและการแปรรูปวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม
4. เพื่อศึกษาหลักการของเฟสและองค์ประกอบเฟส รวมถึงการวิเคราะห์เฟสไดอะแกรมที่มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุในกระบวนการผลิต
5. เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล ทางไฟฟ้า ทางแสง ทางแม่เหล็ก และทางความร้อนของวัสดุ เพื่อประเมินศักยภาพการใช้งานภายใต้เงื่อนไขต่างๆ
6. เพื่อส่งเสริมความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการพัฒนาและออกแบบนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ โดยเน้นการวิจัยและการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและชุมชน
7. เพื่อส่งเสริมการพัฒนาวัสดุทดแทนและวัสดุชีวภาพจากวัสดุชีวภาพ วัสดุเหลือใช้ หรือวัสดุจากการรีไซเคิลเพื่อสนับสนุนการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่อย่างยั่งยืนในอนาคต

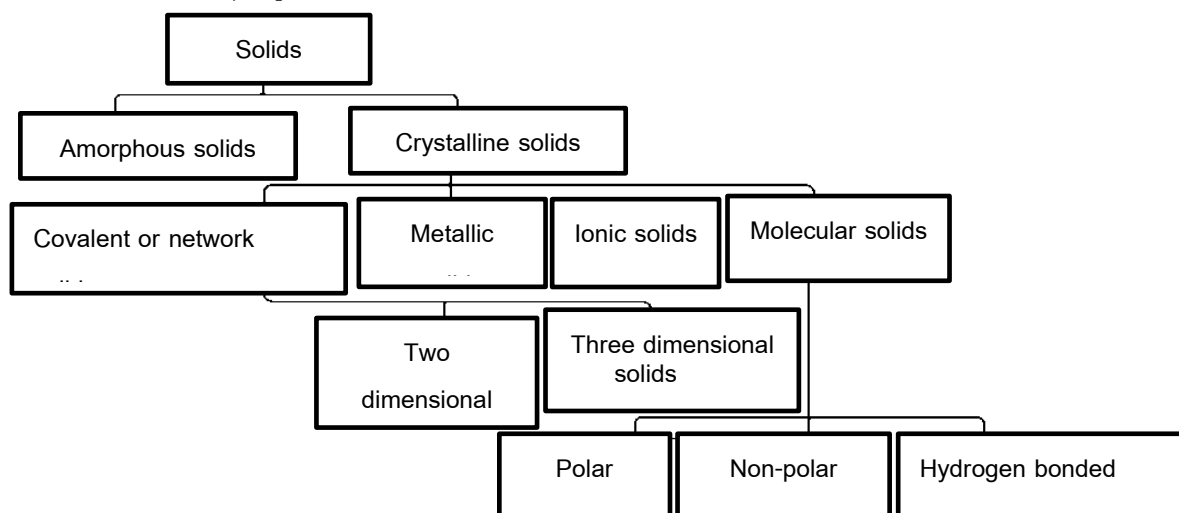
<

บทที่ 1

แนวคิดและความหมายของนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุ

(Concepts and Definitions of Innovative Materials Engineering)

วิศวกรรมวัสดุ (Materials Engineering) เป็นสาขาทางวิศวกรรมศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้าง สมบัติ การแปรรูป และการประยุกต์ใช้งานของวัสดุ ในระดับอะตอม โมเลกุล ไปจนถึงระดับมหภาค โดยมุ่งเน้นความสัมพันธ์ระหว่าง องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างภายในและสมบัติของวัสดุ ทั้งในเชิงกายภาพ เคมี และกลศาสตร์ เพื่อออกแบบและพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในสาขาต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิต, พลังงาน, ยานยนต์, การแพทย์, อิเล็กทรอนิกส์, และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างเฉพาะที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงฟังก์ชัน เช่น ความแข็ง, ความเหนียว, ความต้านทานการกัดกร่อน, การนำไฟฟ้า, ความสามารถในการดูดซับแสงหรือพลังงานแม่เหล็ก วิศวกรรมวัสดุจึงต้องอาศัยองค์ความรู้สหวิทยาการ ได้แก่ ฟิสิกส์, เคมี, คณิตศาสตร์, ชีววิทยา, ธรณีวิทยา, การแพทย์, เกษตรกรรม, วิศวกรรมเครื่องกล, วิศวกรรมไฟฟ้า, วิศวกรรมเคมีและปิโตรเคมี, วิศวกรรมก่อสร้าง, และเทคโนโลยีสารสนเทศ เป็นต้น เพื่อก่อเกิดนวัตกรรมและเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมวัสดุ โดยมุ่งเน้นการพัฒนางานวัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็ง (solid state) มีโครงสร้างเฉพาะแต่ละชนิดวัสดุ ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพการจำแนกวัสดุของแข็ง (Solid materials) ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ขอบเขตของนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุครอบคลุมตั้งแต่การศึกษาองค์ประกอบขั้นพื้นฐานของวัสดุไปจนถึงการออกแบบและการควบคุมกระบวนการผลิตเป็นไปตามหลักการและทฤษฎีทางด้านวิศวกรรมวัสดุเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นต่อการใช้งานด้านต่างๆ โดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักได้ดังนี้

- **โครงสร้างของวัสดุ (Structure of Materials):** การจัดเรียงตัวของอะตอม โมเลกุล หรือผลึก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ
- **สมบัติของวัสดุ (Properties of Materials):** เช่น สมบัติทางกล (Mechanical), ทางไฟฟ้า (Electrical), แม่เหล็ก (Magnetic), ความร้อน (Thermal), แสง (Optical)

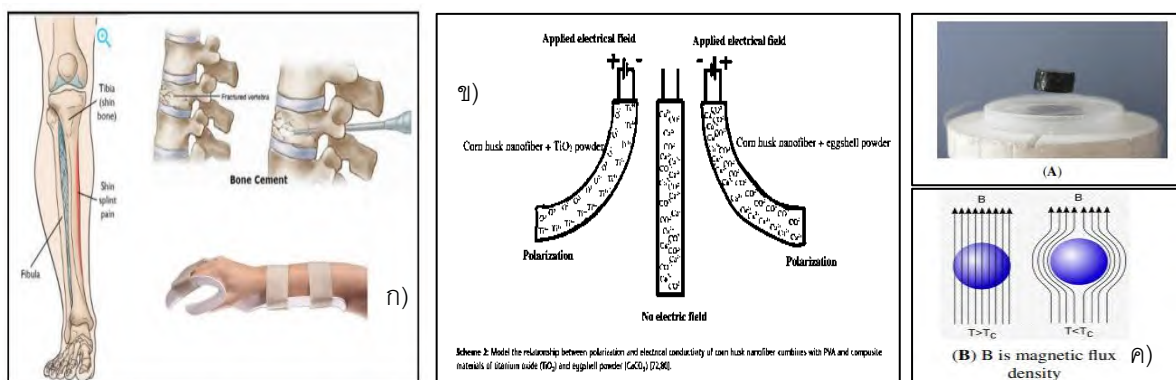
- กระบวนการผลิตและแปรรูปวัสดุ (Processing): เช่น การขึ้นรูป การอบร้อน การเชื่อม การรีด การเคลือบผิว การสังเคราะห์วัสดุใหม่
- การประยุกต์ใช้งานวัสดุ (Applications): การเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมหรือข้อกำหนดการใช้งานเฉพาะทาง

ดังนั้นวัสดุมีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนเทคโนโลยีและนวัตกรรมของโลกยุคปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กลง ฉลาดขึ้น ตอบสนองรวดเร็ว และประหยัดพลังงาน ล้วนต้องอาศัยความรู้ด้านนวัตกรรมวัสดุ การออกแบบ และการคัดเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม วัสดุชีวภาพทางการแพทย์และวัสดุนำส่งยาสมัยใหม่ก็เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งที่สำคัญและเห็นผลอย่างชัดเจนที่แสดงถึงความก้าวหน้าในงานวิจัยด้านวิศวกรรมวัสดุ ดังนั้นการพัฒนานวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุจึงเป็นรากฐานสำคัญที่ก่อให้เกิดประโยชน์ในหลายด้านดังต่อไปนี้

ลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ โดยการพัฒนาวัสดุทดแทน วัสดุรีไซเคิล และวัสดุชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1.2ก (จากงานวิจัยพัฒนาวัสดุชีวภาพโบนีเมนต์ไฮดรอกซีอะพาทาइट)¹⁹⁸ รูปที่ 1.2ข (จากงานวิจัยพัฒนาวัสดุแอคชูเอเตอร์ actuator)¹⁶ และรูปที่ 1.2ค (จากงานวิจัยพัฒนาวัสดุซูเปอร์คอนดักเตอร์หรือวัสดุตัวนำยิ่งยวด)¹⁸⁵ ซึ่งเป็นผลจากการวิจัยด้านนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุจากเปลือกไข่

เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดของเสีย ลดต้นทุนการผลิต ยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ **เพิ่มความปลอดภัย** และ **ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม** ตัวอย่างเช่น การพัฒนาวัสดุทดแทนที่ได้จากเปลือกไข่ เส้นใยจากธรรมชาติ และเศษแก้ว

ส่งเสริมการออกแบบผลิตภัณฑ์สมัยใหม่ เช่น รถยนต์ไฟฟ้า เครื่องบินน้ำหนักรเบา เซนเซอร์อัจฉริยะ และวัสดุซูเปอร์คอนดักเตอร์



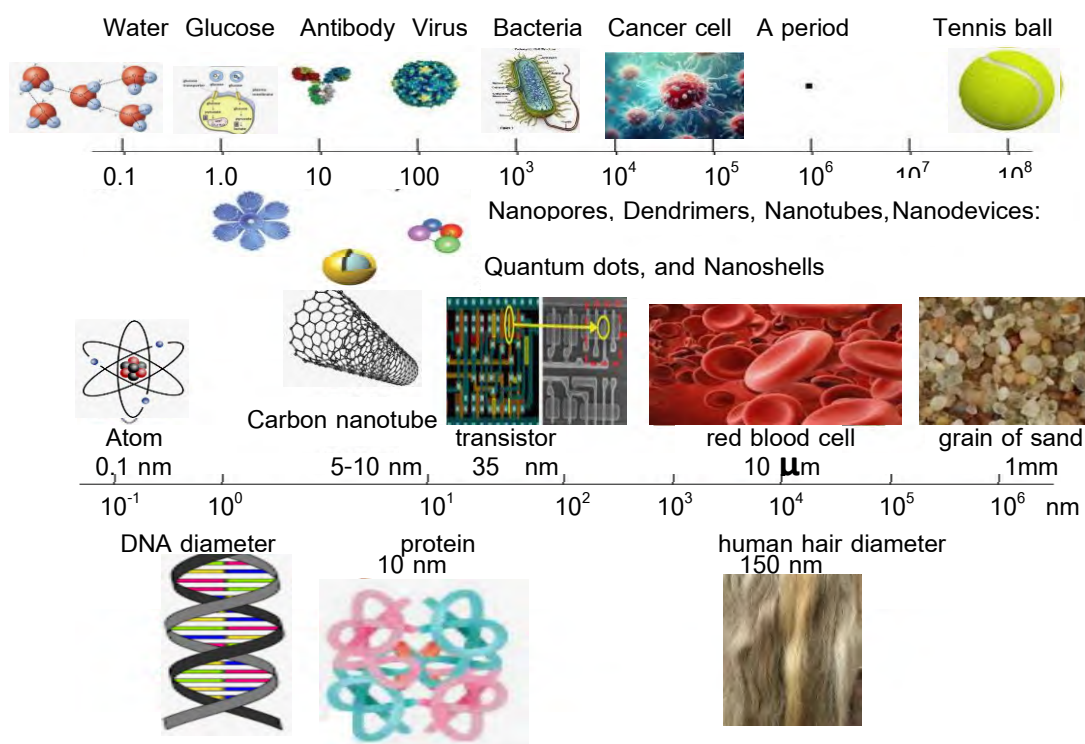
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการพัฒนาวัสดุทดแทนและวัสดุรีไซเคิล: ก) วัสดุชีวภาพโบนีเมนต์ไฮดรอกซีอะพาทาइट)¹⁹⁸, ข) วัสดุแอคชูเอเตอร์ actuator¹⁶ และค) วัสดุซูเปอร์คอนดักเตอร์¹⁸⁵ ที่มา Waibanthao, P. et al.¹⁹⁸, Bunprasert, P. et al.¹⁶, Toumvong, W. et al.¹⁸⁵

หลักการพื้นฐานของการพัฒนานวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุคือองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญ 4 ประการที่สัมพันธ์กัน ดังต่อไปนี้

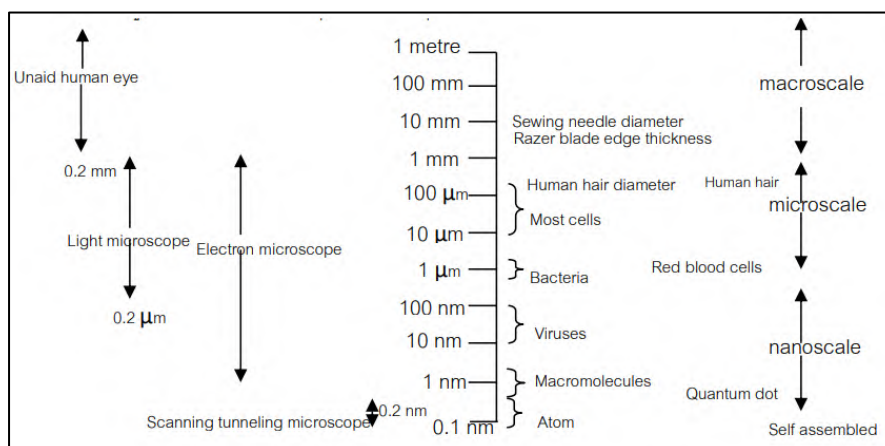
- โครงสร้าง (Structure)
- กระบวนการผลิต (Processing)

- สมบัติของวัสดุ (Properties)
- สมรรถนะการใช้งาน (Performance)

นอกจากโครงสร้างพื้นฐานของการพัฒนานวัตกรรมวัสดุแล้ว **ขนาดอนุภาคของวัสดุ** ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อสมบัติและการประยุกต์ใช้งาน วัสดุสามารถมีขนาดได้ตั้งแต่ระดับอังสตรอม นาโนเมตร ไมโครเมตร มิลลิเมตร ไปจนถึงขนาดใหญ่เช่นติเมตร ดังรูปที่ 1.3 และ 1.4 เมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลงจนถึงระดับนาโนจะทำให้สมบัติต่างๆ ของวัสดุเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน เช่น มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น ความแข็งแรง ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้เปิดโอกาสในการพัฒนานวัตกรรมวัสดุกับเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้อย่างกว้างขวาง

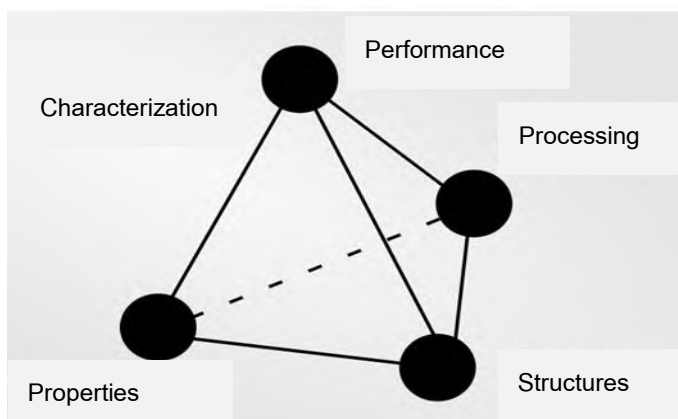


รูปที่ 1.3 ตัวอย่างวัสดุที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ที่มา Richard P. Feynman, 2003⁴¹



รูปที่ 1.4 การจัดลำดับขนาดอนุภาคของวัสดุ ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

จากรูป 1.3 และ 1.4 กล่าวได้ว่าขนาดวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติและคุณลักษณะของวัสดุในหลายด้าน ความแตกต่างของขนาดทำให้วัสดุแสดงพฤติกรรมที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงทั้งทางฟิสิกส์ เคมี และกลศาสตร์ ดังนั้น การทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโครงสร้างของวัสดุกับสมบัติที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตที่เหมาะสมดังรูปที่ 1.5 จึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการออกแบบและพัฒนาวัสดุนวัตกรรมวัสดุให้มีสมบัติเฉพาะตามต้องการ

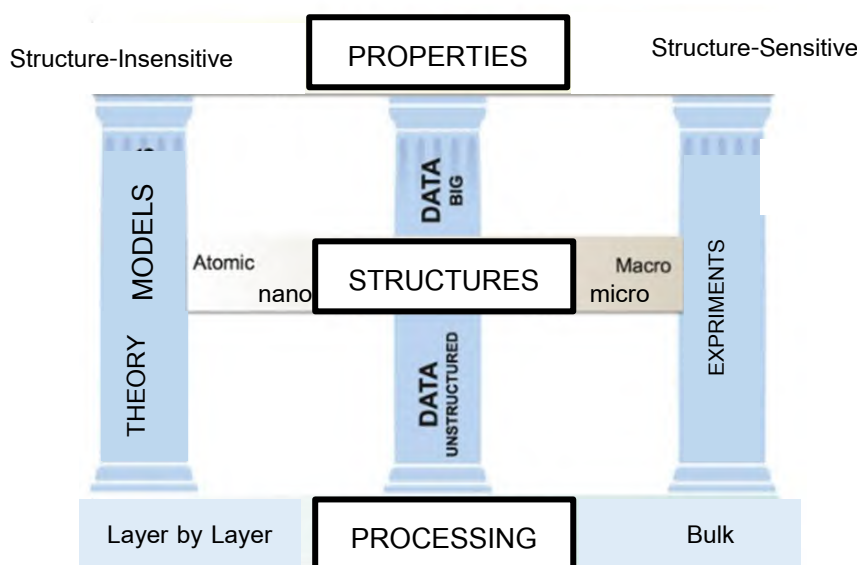


รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ของวัสดุ-โครงสร้าง-กระบวนการผลิต-และสมบัติของวัสดุ ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

เนื่องจากพื้นฐานของโครงสร้างวัสดุส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางไฟฟ้า, ทางแสง, ทางแม่เหล็ก, ทางความร้อน, และทางกล การศึกษานวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุจึงเป็นศาสตร์สหสาขาที่ต้องอาศัยความรู้จากหลายแขนง เช่น ฟิสิกส์ เคมี คณิตศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ชีวภาพ เพื่อนำมาวิเคราะห์และทำความเข้าใจคุณลักษณะ, ชนิด, ประเภท, และสมบัติเฉพาะของวัสดุในแต่ละชนิด การทำความเข้าใจวัสดุอย่างลึกซึ้งซึ่งจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการวิเคราะห์และทดสอบด้วยเครื่องมือและเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมสมัยใหม่ เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างภายในวัสดุกับสมบัติเชิงหน้าที่ได้อย่างชัดเจนเพื่อนำไปสู่การพัฒนาองค์ความรู้ เพื่อสร้างวัสดุนวัตกรรมวัสดุใหม่ที่มีสมบัติตอบสนองต่อความต้องการในภาคอุตสาหกรรม เทคโนโลยีสมัยใหม่ และวิทยาการขั้นสูง ทั้งยังสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ลดต้นทุนการผลิต เพิ่มความคุ้มค่าในการใช้งาน และยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ขององค์ความรู้พื้นฐานนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุกับทฤษฎี โมเดลต่างๆที่เกี่ยวข้องดังรูปที่ 1.6

การพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุใหม่ที่มีสมบัติเฉพาะทางและมีความโดดเด่นมากยิ่งขึ้นสามารถดำเนินการได้บนพื้นฐานของความรู้และความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่าง "โครงสร้าง-กระบวนการผลิต-คุณสมบัติ" ของวัสดุ ดังรูป 1.6 ที่แสดงการเชื่อมโยงองค์ประกอบทั้งสามในลักษณะบูรณาการ ทั้งนี้เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์สมบัติวัสดุจึงมีความจำเป็นในการควบคุมและปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องการความทนทาน ความปลอดภัย และอายุการใช้งานที่ยาวนาน นอกจากนี้ความเข้าใจในระดับโครงสร้างตั้งแต่ระดับอะตอม นาโนเมตร ไปจนถึงไมโครเมตร มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อสมบัติในระดับมหภาค (macroscale) ของวัสดุในการควบคุมและออกแบบโครงสร้างผลิตภัณฑ์ จึงกล่าวได้ว่าองค์

ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับนวัตกรรมวิศวกรรมวัสดุในทุกระดับจึงเป็นหัวใจสำคัญของการวิจัยและการพัฒนาในสาขาวิศวกรรมวัสดุ



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ของกระบวนการผลิต โครงสร้าง และสมบัติของผลิตภัณฑ์ ที่มา นุชนา ตั้งบริบูรณ์

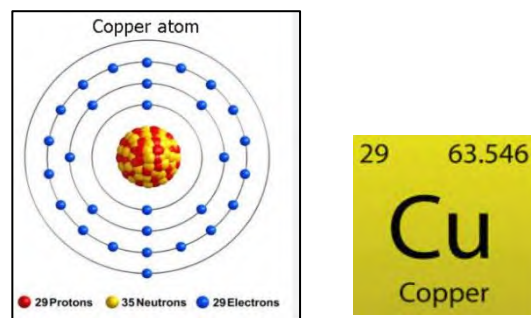
โครงสร้างของวัสดุถือเป็นพื้นฐานสำคัญที่ควรทำความเข้าใจในเบื้องต้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายในมีผลโดยตรงต่อสมบัติของวัสดุทั้งในระดับจุลภาคและมหภาค โดยทั่วไปวัสดุสามารถมีขนาดอนุภาคแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมวัสดุ เช่น การสังเคราะห์, การสกัด, การบดย่อย, หรือเทคนิคทางวิศวกรรมอื่นๆ กระบวนการเหล่านี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะพื้นฐานของวัสดุ การศึกษาวิศวกรรมวัสดุในขั้นต้นจึงควรเริ่มจากการทำความเข้าใจเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มจากการจำแนกประเภทของวัสดุตามหลักการพื้นฐานของสาขาวิศวกรรมวัสดุ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นหมวดหมู่ใหญ่ ๆ ดังนี้

1. วัสดุโลหะ (Metallic Materials)

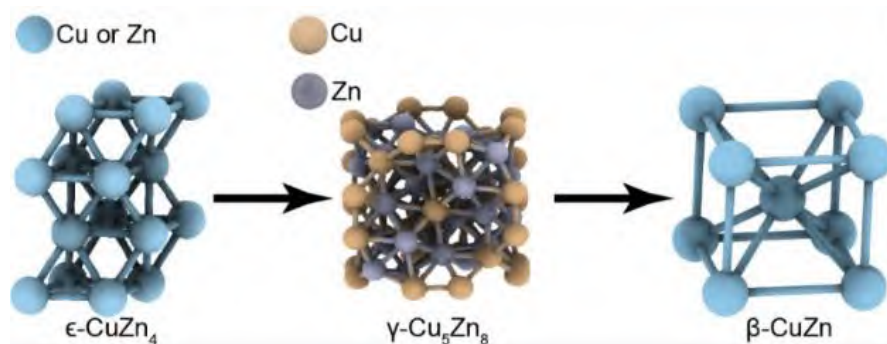
วัสดุโลหะเป็นวัสดุที่มีการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมด้วยพันธะโลหะ (Metallic Bonding) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโลหะที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในโครงสร้าง ส่งผลให้วัสดุโลหะมีสมบัติของการนำไฟฟ้าและนำความร้อนดี รวมถึงมีความเหนียวและความแข็งแรง วัสดุโลหะสามารถจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ดังนี้

1.1 โลหะบริสุทธิ์ (Pure Metals) เป็นโลหะที่ประกอบด้วยธาตุเพียงชนิดเดียว ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเฉพาะตัวและสามารถใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในกระบวนการผลิตอัลลอย ตัวอย่างของโลหะบริสุทธิ์ ได้แก่ ทองแดง (Cu), ทองคำ (Au), สังกะสี (Zn), เหล็ก (Fe), ไททาเนียม (Ti), และเงิน (Ag) ดังตัวอย่างอะตอมทองแดงใน รูปที่ 1.7

1.2 โลหะผสมหรืออัลลอย (Alloys) เป็นวัสดุโลหะที่ประกอบด้วยธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป โดยอาจมีโลหะเป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุอื่นเป็นธาตุผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะหลัก เช่น เพิ่มความแข็งแรง ความทนทานต่อการกัดกร่อนหรือการปรับสมบัติทางแม่เหล็กและทางไฟฟ้า ตัวอย่างอัลลอย ได้แก่ ทองเหลือง (Brass), นาก, นิกโครม, บรอนซ์และแมกนีเซียมอัลลอย รูปที่ 1.8 แสดงตัวอย่างทองเหลือง

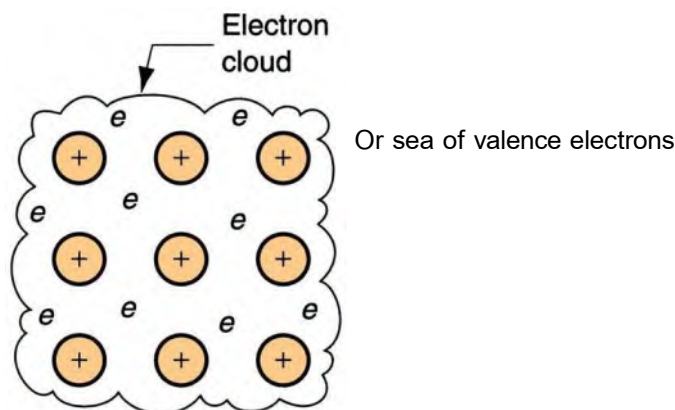


รูปที่ 1.7 โครงสร้างอะตอมของธาตุทองแดงบริสุทธิ์ ที่มา William D.²⁰⁷ และ Wang et al.²⁰⁰



รูปที่ 1.8 โครงสร้างอะตอมของทองเหลือง ที่มา Wang et al.¹⁹⁹⁻²⁰⁰

การยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมในโลหะเกิดจากพันธะโลหะ (Metallic Bonding) ซึ่งมีคุณลักษณะเฉพาะตัวคือเวเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอมโลหะจะไม่ถูกยึดไว้กับอะตอมใดอะตอมหนึ่งโดยเฉพาะแต่จะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในโครงสร้างผลึกโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "ทะเลอิเล็กตรอน" (sea of electrons) หรือ "กลุ่มหมอกของอิเล็กตรอน" (electron cloud) ดังแสดงในรูปที่ 1.9 ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้ส่งผลให้โลหะมีสมบัติพิเศษหลายประการ เช่น การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อย่างอิสระสามารถถ่ายเทพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังส่งผลให้โลหะมีความเหนียว (ductility) และสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้โดยไม่แตกหักเมื่อถูกแรงกระทำ

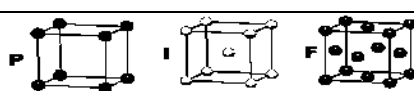
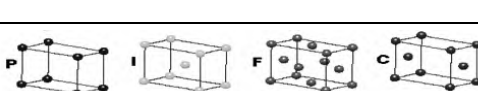
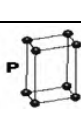
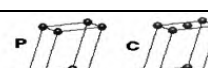
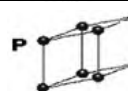


รูปที่ 1.9 การจัดเรียงอิเล็กตรอนของพันธะโลหะ ที่มา ASM International³⁷

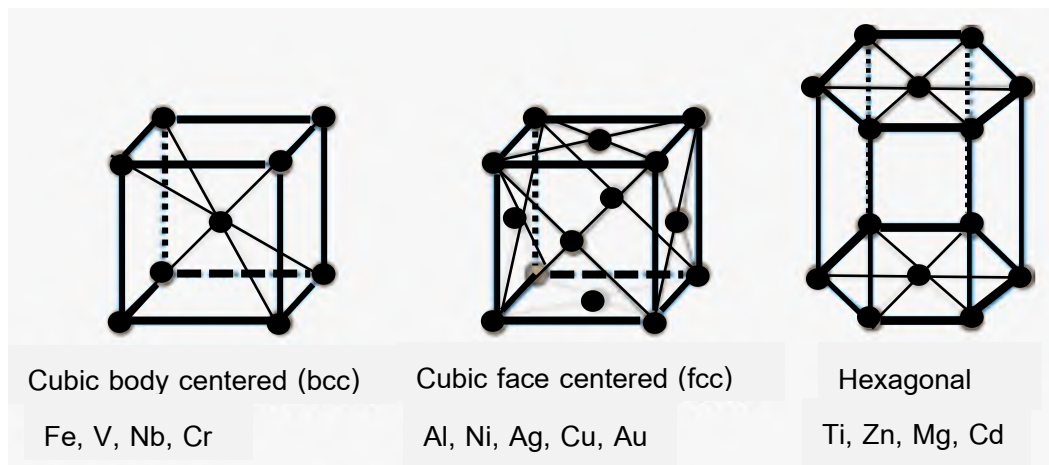
การจัดเรียงโครงสร้างผลึกของโลหะเป็นไปตามระบบผลึกมาตรฐานที่เรียกว่า "Bravais Lattice" ซึ่งเป็นรูปแบบการจัดเรียงอะตอมในโครงผลึก (crystal lattice) ที่มีความเป็นระเบียบและสามารถมีโครงสร้างซ้ำแบบเดิมได้ในทุกทิศทาง ตามระบบของการจัดเรียงโครงสร้าง Bravais Lattice ซึ่งมีทั้งหมด 14 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 โดยแบ่งตามลักษณะของเซลล์หน่วย (unit cell) และความสมมาตรของโครงสร้าง โดยทั่วไปโครงสร้างผลึกหลักของโลหะที่พบบ่อยมี 3 แบบที่สำคัญ ได้แก่

- **โครงสร้างลูกบาศก์ชิดหน้า (Face-Centered Cubic: FCC)** เป็นโครงสร้างที่อะตอมอยู่ที่มุมทั้งแปดของลูกบาศก์และที่กึ่งกลางของแต่ละหน้า ตัวอย่างวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบ FCC ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), ทองแดง (Cu), ทองคำ (Au), นิกเกิล (Ni)
- **โครงสร้างลูกบาศก์ชิดจุดยอด (Body-Centered Cubic: BCC)** เป็นโครงสร้างที่อะตอมอยู่ที่มุมทั้งแปดของลูกบาศก์และอีกหนึ่งอะตอมอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ ตัวอย่างโลหะที่มีโครงสร้างแบบ BCC ได้แก่ เหล็ก (Fe) ที่อุณหภูมิต่ำ (α -Fe), โครเมียม (Cr), โมลิบดีนัม (Mo), ทังสเตน (W)
- **โครงสร้างหกเหลี่ยมชิดแน่น (Hexagonal Close-Packed: HCP)** เป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงอะตอมหนาแน่นในระนาบหกเหลี่ยม ตัวอย่างวัสดุที่มีโครงสร้างแบบ HCP ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg), สังกะสี (Zn), ไททาเนียม (Ti), โคบอลต์ (Co)

ตารางที่ 1.1 โครงสร้างผลึกตามมาตรฐาน Bravais Lattice ที่มา Shackelford¹⁴⁸

ชนิดของผลึก (Types of Crystal)	แลททิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter)	รูปแบบผลึก
คิวบิก (Cubic)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (Tetragonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เฮกซะโกนอล (Hexagonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมโนคลินิก (Monoclinic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$	
ไตรคลินิก (Triclinic)	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	
ไตรโกนอล (Trigonal)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

ลักษณะการจัดเรียงของอะตอมในแต่ละโครงสร้างส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของโลหะ เช่น ความแข็ง, ความเหนียว และความสามารถในการเปลี่ยนรูป (plastic deformation) ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและเลือกใช้วัสดุในงานวิศวกรรม โครงสร้างผลึกเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เช่น เหล็กสามารถเปลี่ยนจาก BCC เป็น FCC ที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างโครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะแสดงไว้ในรูปที่ 1.10 และรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับชนิดของโครงสร้างผลึกพร้อมตัวอย่างของโลหะในแต่ละประเภท แสดงไว้ในตารางที่ 1.2



รูปที่ 1.10 โครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะบริสุทธิ์ ที่มา Shackelford¹⁴⁸

ตารางที่ 1.2 ตัวอย่างโครงสร้างผลึกของวัสดุโลหะบริสุทธิ์ ที่มา Shackelford¹⁴⁸

<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure^a</i>	<i>Atomic Radius^b (nm)</i>	<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure</i>	<i>Atomic Radius (nm)</i>
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium (α)	HCP	0.1445
Iron (α)	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

^aFCC = face-centered cubic HCP = hexagonal close packed; BCC = body-centered cubic

^b A nanometer (nm) equals to 10^{-9} m; to convert from nanometers to angstrom units (Å) Multiply the nanometer value by 10

จากตารางดังกล่าวข้างต้น วัสดุโลหะส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกที่สามารถจำแนกได้ตามระบบผลึกของ Bravais lattice ซึ่งมีทั้งหมด 14 รูปแบบ แต่ในงานด้านวิศวกรรมวัสดุโลหะ มักพบได้บ่อยใน 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ โครงสร้างลูกบาศก์ชิดหน้า (FCC), ลูกบาศก์ชิดจุดยอด (BCC) และโครงสร้างหกเหลี่ยมชิดแน่น (HCP) โดยโครงสร้างผลึกแต่ละประเภทจะมีจำนวนอะตอมในเซลล์หน่วย (unit cell) และค่ารัศมีอะตอม (atomic radius) ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการคำนวณคุณสมบัติพื้นฐาน เช่น ความหนาแน่นของวัสดุ, การหาปริมาตรของอะตอมในเซลล์ (Atomic Packing Factor, APF), สมบัติทางกล, ทางไฟฟ้า, และทางแม่เหล็ก เป็นต้น

การคำนวณค่าความหนาแน่นเชิงทฤษฎีของโลหะ

$$\rho = \frac{\sum A}{NV} = \frac{\sum A}{(6.02 \times 10^{23})(V' \times 10^{-21})} = \frac{\sum A}{602V'} \quad (1.1)$$

กำหนดให้ ρ = density (g/cm³), n = จำนวนอะตอมต่อหนึ่งเซลล์หน่วย, A = มวลอะตอมของธาตุ (g/mol), N หรือ N_A = เลขอาโวกาโดร (6.022×10^{23} อะตอม/mol) หากค่าปริมาตรเซลล์หน่วย V ได้จากรัศมีอะตอม (r) และรูปแบบของโครงสร้างผลึก อาจต้องแปลงหน่วยจากลูกบาศก์นาโนเมตร (nm³) เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³), $V' =$ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ (nm³), ดังสมการ

$$1 \text{ nm}^3 = 1 \times 10^{-21} \text{ cm}^3 \quad (1.2)$$

และการหาค่า Atomic Packing Factor (APF) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของอะตอมทั้งหมดในหนึ่งเซลล์หน่วย (unit cell) กับปริมาตรของเซลล์หน่วยทั้งหมด ซึ่งใช้ในการบ่งชี้ว่าพื้นที่ในเซลล์หน่วยถูกเติมเต็มด้วยอะตอมมากน้อยเพียงใด โดยไม่พิจารณาช่องว่าง (voids) หรือการซ้อนทับของอะตอมดังสมการ (1.3)

$$\text{APF} = \frac{\text{ปริมาตรของอะตอมในเซลล์หน่วย}}{\text{ปริมาตรของเซลล์หน่วย}} \quad \text{APF} = \frac{n \cdot \frac{4}{3}\pi r^3}{a^3} \quad (1.3)$$

โดยที่ n = จำนวนอะตอมต่อหนึ่งเซลล์หน่วย, r = รัศมีของอะตอม, a = ความยาวของด้านเซลล์หน่วย (unit cell edge length) a จะมีความสัมพันธ์กับรัศมี (r) ที่แตกต่างกันตามประเภทของโครงสร้างผลึก สำหรับ ค่าของ APF สะท้อนถึง **ความหนาแน่นของการจัดเรียงอะตอม** ภายในโครงสร้างผลึก อะตอมโลหะที่มีค่า APF สูงกว่าธาตุที่มีค่า APF น้อยหมายความว่าประสิทธิภาพในการบรรจุอะตอมต่อหน่วยพื้นที่ของธาตุโลหะที่มีค่า APF สูงจะส่งผลดีต่อการจัดเรียงโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าธาตุโลหะที่มีค่า APF น้อย ซึ่งจะส่งผลต่อ **สมบัติด้านอื่นๆของวัสดุด้วยเช่นกัน** ได้แก่ ความหนาแน่น, ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเสียรูป (deformation), และการเลื่อนของระนาบผลึก (slip systems)

2. วัสดุเซรามิก (Ceramic Materials)

วัสดุเซรามิกเป็นวัสดุอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุโลหะและอโลหะ โดยมีพันธะเคมีหลักสองประเภท ได้แก่ พันธะไอออนิก (Ionic Bonding) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding) การจำแนกประเภทวัสดุเซรามิกทำได้หลายวิธี เช่น การจำแนกตามชนิดพันธะหลักของโครงสร้างทางเคมี การจำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี การจำแนกตามสูตรทางเคมี และการจำแนกตามลักษณะโครงสร้างผลึก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 การจำแนกวัสดุเซรามิกตามโครงสร้างสารประกอบทางเคมี ดังนี้คือ

2.1.1 เซรามิกออกไซด์ (Oxide Ceramics): เช่น ซิลิกา (SiO₂), อะลูมินา (Al₂O₃), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂), เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เป็นต้น

2.1.2 เซรามิกคาร์ไบด์ (Carbide Ceramics): เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เป็นต้น

2.1.3 เซรามิกไนไตรด์ (Nitride Ceramics): เช่น ซิลิคอนไนไตรด์ (Si₃N₄), โบรอนไนไตรด์ (BN)

2.1.4 เซรามิกคลอไรด์ (Chloride Ceramics): เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2), โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl), คอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2), แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl_2) เป็นต้น

2.1.5 เซรามิกไอโอไดด์ (Iodide Ceramics): เช่น โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI), ลิเทียมไอโอไดด์ (LiI) เป็นต้น

2.1.6 เซรามิกซัลไฟด์ (Sulfide Ceramics): เช่น ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS), แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), ตะกั่วซัลไฟด์ (PbS) เป็นต้น

2.1.7 เซรามิกฟลูออไรด์ (Fluoride Ceramics): เช่น แคลเซียมไดฟลูออไรด์ (CaF_2), แบเรียมฟลูออไรด์ (BaF_2) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบเซรามิกในรูปแบบเชิงซ้อน เช่น กลุ่มซัลเฟต ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต CaSO_4 , คอปเปอร์ซัลเฟต CuSO_4 , กลุ่มไนเตรต เช่น โพแทสเซียมไนเตรต KNO_3 , แคลเซียมไนเตรต $\text{Ca(NO}_3)_2$, และกลุ่มฟอสเฟต เช่น แคลเซียมฟอสเฟต $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, แคลเซียมไฮดรอกซีฟอสเฟตหรือไฮดรอกซีอะพาทาइट $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ เป็นต้น

2.2 การจำแนกตามพันธะหลัก (Primary bonding) ได้แก่ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ โดยหลักการพิจารณาค่าผลต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) ของธาตุที่ประกอบกัน ดังนี้:

	4.0	1.7	0.4	0
	Ionic bond		Polar covalent bond	Non-polar covalent bond
Percent ionic	100%	50%	5%	0%
Percent covalent	0%	50%	75%	100%

รูปที่ 1.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีกับการเกิดพันธะไอออนิก ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

พันธะไอออนิก (Ionic Bonding): เกิดขึ้นเมื่อค่าผลต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตี (EN) ระหว่างธาตุทั้งสองที่ทำให้เกิดสารประกอบมีค่าสูง ทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากธาตุที่มีค่า EN ต่ำไปยังธาตุที่มีค่า EN สูง คำนวณได้จากการนำค่า EN ของแอนไอออนลบกับค่า EN ของแคตไอออน หากมีค่ามากกว่า 1.7 สารประกอบนั้นมีความเป็นไอออนิกมากกว่าโควาเลนต์ ตัวอย่างเช่น ตะกั่วออกไซด์ (PbO), อะลูมินา (Al_2O_3), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2), เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นต้น ทำให้เซรามิกมีโครงสร้างพื้นฐานของการเกิดพันธะหลักแบบไอออนิก (Ionic bonding) เนื่องจากทฤษฎีหลักที่สำคัญ 2 ประการคือ 1. การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างแคตไอออนและแอนไอออน (Electron transfer between cation and anion) ตามการจัดเรียงอิเล็กตรอนตามระดับชั้นพลังงาน s, p, d, f เป็นต้น เป็นไปตามสมการ $2n^2$ โดยที่ n คือ 1, 2, 3,... หมายถึงคาบหรือระดับชั้นพลังงาน และ 2. การเกิด

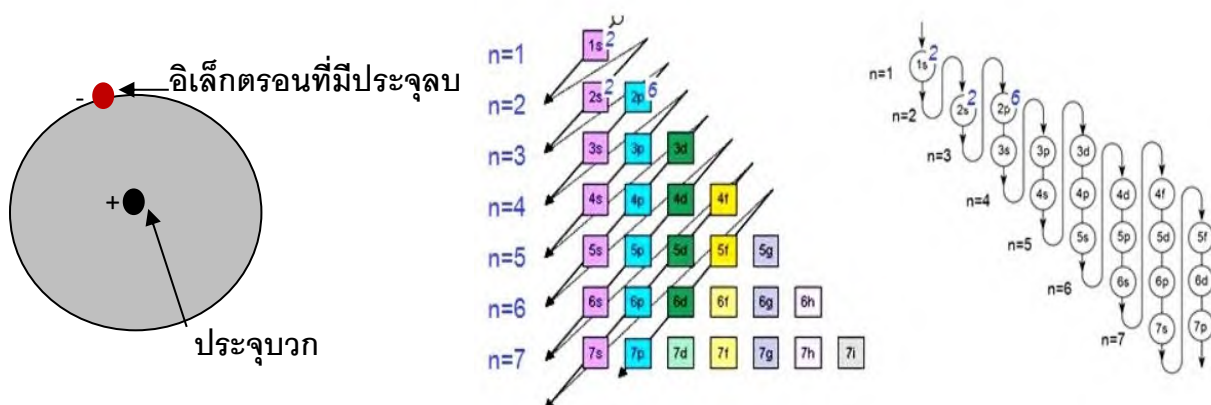
สารประกอบตามแรงยึดเกาะที่เป็นไปได้เนื่องจากค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุตามตารางธาตุ เช่น Na (0.9), Ti (1.5), Fe (1.8), Ca (1.0), O (3.5) เป็นต้น

พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding): เกิดขึ้นเมื่อค่าผลต่างของอิเล็กโตรเนกาติวิตีระหว่างธาตุทั้งสองมีค่าน้อย ทำให้เกิดการแชร์อิเล็กตรอนระหว่างอะตอม ตัวอย่างเช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC), ซิลิคอนไนไตรด์ (Si₃N₄), อะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) เป็นต้น

โดยการพิจารณาว่าเซรามิกจะมีพันธะหลักชนิดใด จำเป็นต้องทราบ**โครงสร้างอะตอม (Atomic Structure)** ของธาตุที่มีในโครงสร้างสารประกอบเซรามิกนั้นก่อนและ**จัดเรียงอิเล็กตรอน** อะตอม (Atom) ซึ่งเป็นหน่วยพื้นฐานที่สุดของสารที่ประกอบด้วยอนุภาคย่อย 3 ชนิด ได้แก่

- โปรตอน (Proton) มีค่าประจุเป็นบวก อยู่ในนิวเคลียส
- นิวตรอน (Neutron) ไม่มีค่าประจุ อยู่ในนิวเคลียส
- อิเล็กตรอน (Electron) มีค่าประจุเป็นลบ โคจรรอบนิวเคลียสตามระดับชั้นพลังงาน

นิวเคลียสของอะตอมอยู่ที่ศูนย์กลางแสดงค่าของมวลโดยส่วนใหญ่ของอะตอม ขณะที่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยมาก แต่มีบทบาทสำคัญในการเกิดพันธะทางเคมีและสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 โครงสร้างอะตอมและการจัดเรียงอิเล็กตรอนตามระดับชั้นพลังงาน ที่มา Norton¹¹⁴

การจัดเรียงอิเล็กตรอนตามระดับชั้นพลังงาน (Electron Configuration) อิเล็กตรอนในอะตอมจะถูกจัดเรียงอยู่ในระดับพลังงาน (Energy Levels) หรือที่เรียกว่า **ชั้นพลังงานหลัก (Principal Energy Levels)** ซึ่งมีค่าระบุด้วยเลขควอนตัมหลัก n ($n = 1, 2, 3, \dots$) ในแต่ละระดับพลังงาน จะมี **ออร์บิทัล** ย่อย ได้แก่

- s (sharp)
- p (principal)
- d (diffuse)
- f (fundamental)

จำนวนอิเล็กตรอนสูงสุดที่สามารถอยู่ในแต่ละระดับพลังงานหลักสามารถคำนวณได้จากสูตร: $2n^2$ ดังตัวอย่างในตารางที่ 1.3

อิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) คือ ความสามารถของอะตอมของธาตุหนึ่งในการดึงดูดอิเล็กตรอนเข้าหาตนเองเมื่อเกิดพันธะเคมีร่วมกับอะตอมของธาตุอื่น พัฒนาแนวคิดโดย Linus Pauling ซึ่งได้จัดทำสเกลเพื่อเปรียบเทียบค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุต่าง ๆ เรียกว่า Pauling Scale

ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีถูกพิจารณาเพื่อ:

- การพยากรณ์ชนิดของพันธะในสารประกอบ เช่น พันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ หรือพันธะโลหะ
- ประเมินความเสถียรของสารประกอบ
- ใช้อธิบายการเกิดวัสดุเซรามิกหรือโครงสร้างผลึกของวัสดุ

ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity, EN) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของอะตอมในการที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนเข้าหานิวเคลียสของอะตอมตัวเองทำให้เกิดพันธะเคมี (chemical bond) ระหว่างแคตไอออนและแอนไอออน จากตารางธาตุและข้อมูลประกอบแสดงการคำนวณค่าความแตกต่าง EN ของธาตุที่สร้างพันธะกัน ทำให้จำแนกชนิดพันธะได้ ตัวอย่างการคำนวณค่าผลต่างอิเล็กโตรเนกาติวิตี (ΔEN) โดยการนำค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีของธาตุแต่ละชนิดที่มีอยู่ในสูตรโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบนั้นๆ หักกลับกันได้ค่าเท่าไรก็พิจารณาตามช่วงที่ปรากฏค่านั้นตามหลักเกณฑ์ ตัวอย่างเช่น สารประกอบโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) คือการพิจารณาผลต่างค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี 3.0 (EN ของ Cl) $- 0.9$ (EN ของ Na) $= 2.1$ ดังนั้นโซเดียมคลอไรด์คือสารประกอบที่มีพันธะไอออนิก

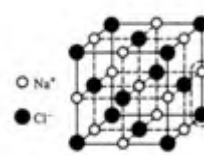
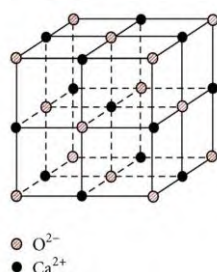
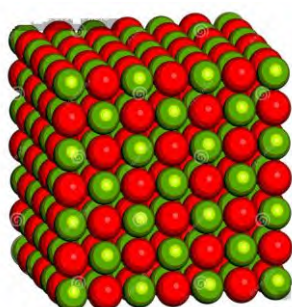
การประยุกต์ใช้อิเล็กโตรเนกาติวิตีในงานวิศวกรรมวัสดุ

1. **การพยากรณ์ชนิดของพันธะ:** ความแตกต่างของค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีระหว่างธาตุสองชนิดสามารถใช้คาดการณ์ชนิดของพันธะได้:
 - ถ้า $\Delta EN > 1.7 \rightarrow$ **พันธะไอออนิก** เช่น อะลูมินา (Al_2O_3), แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น
 - ถ้า $\Delta EN = 0.5-1.7 \rightarrow$ **พันธะโควาเลนต์มีขั้ว (polar covalent)** เช่น กรดไฮโดรคลอริก (HCl), กรดไฮโดรเจนโบรไมด์ (HBr), คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) เป็นต้น
 - ถ้า $\Delta EN < 0.5 \rightarrow$ **พันธะโควาเลนต์ไม่มีขั้ว (non-polar covalent)** เช่น ก๊าซคลอรีน (Cl_2), ก๊าซฟลูออรีน (F_2), ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นต้น
2. **การออกแบบการผลิตวัสดุผสมหรือการสร้างสารประกอบเซรามิก:**
 - ในวัสดุเซรามิก เช่น Al_2O_3 หรือ SiC ค่า EN ของธาตุแต่ละตัวมีผลต่อการเกิดพันธะที่แข็งแรงและความเสถียรของโครงสร้างผลึก
3. **การออกแบบวัสดุเซมิคอนดักเตอร์:** ค่า EN มีผลต่อ band gap และคุณสมบัติไฟฟ้า เช่น ในวัสดุกึ่งตัวนำประเภท Si, Ge, หรือ GaAs เนื่องจาก Band gap คือ พลังงานช่องว่างระหว่างแถบเวเลนซ์ (valence band) และ แถบการนำไฟฟ้า (conduction band) ในโครงสร้างพลังงานของของแข็ง โดยเฉพาะในวัสดุกึ่งตัวนำและฉนวนไฟฟ้า ซึ่งระบุถึง พลังงานขั้นต่ำที่อิเล็กตรอนต้องมีเพื่อการเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำไฟฟ้าและทำให้วัสดุนั้นนำไฟฟ้าได้มีหน่วย: อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ตัวอย่างเช่น ซิลิกอน (Si) มี band gap ≈ 1.1 eV แก้วหรือเพชร (ฉนวนไฟฟ้า) มี band gap > 5 eV

2.3 การจำแนกตามสูตรโครงสร้างทางเคมี การจำแนกวัสดุเซรามิกจากสูตรโครงสร้างทางเคมี โดยทั่วไปวัสดุเซรามิกมักพบอยู่ในรูปของสารประกอบระหว่างธาตุโลหะ (M) และธาตุอโลหะ (X) ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบทั่วไปได้หลายโครงสร้างดังต่อไปนี้:

2.3.1 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี MX เมื่อ M คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO), แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), ซีเซียมคลอไรด์ ($CsCl$), แคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) สารประกอบเหล่านี้มีโครงสร้างผลึกที่สอดคล้องกับระบบผลึกของ Bravais Lattice โดยมีลักษณะเฉพาะดังนี้:

- **โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$):** มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ชิดหน้า (Face-Centered Cubic: FCC) ซึ่งในหนึ่งยูนิตเซลล์ประกอบด้วย 8 ไอออน คือ 4 ไอออนของ Na^+ และ 4 ไอออนของ Cl^- ที่เรียงตัวอย่างสมมาตรภายในเซลล์หน่วย (unit cell) ดังรูปที่ 1.14
- **ซีเซียมคลอไรด์ ($CsCl$):** มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ธรรมดา (Simple Cubic หรือ BCC structure) โดยลักษณะจำเพาะภายในยูนิตเซลล์ประกอบด้วย Cs^+ และ Cl^- อย่างละหนึ่งไอออน จัดเรียงโครงสร้างในลักษณะไอออนสลับกันอยู่บริเวณศูนย์กลางของลูกบาศก์
- **แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)** มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับ $NaCl$ คืออยู่ในระบบ FCC โดยมีการจัดเรียงไอออนโลหะและอโลหะในตำแหน่งลูกบาศก์ชิดหน้าซึ่งส่งผลให้มีความหนาแน่นของการบรรจุไอออนสูงและมีความเสถียรทางโครงสร้างสูงเช่นกัน ดังรูปที่ 1.14 และ 1.15



2 ไอออนต่อ lattice point

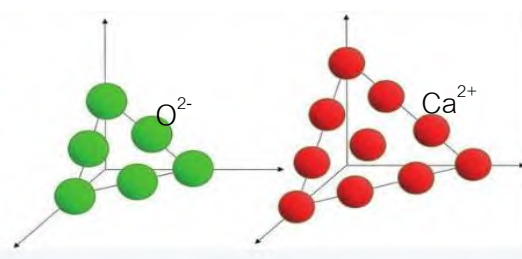
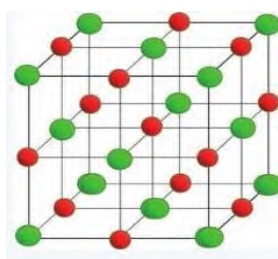
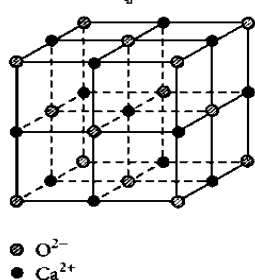
Bravais lattice: FCC

Structure: NaCl-type

Ion/unit cell: $4Na^+ + 4Cl^-$

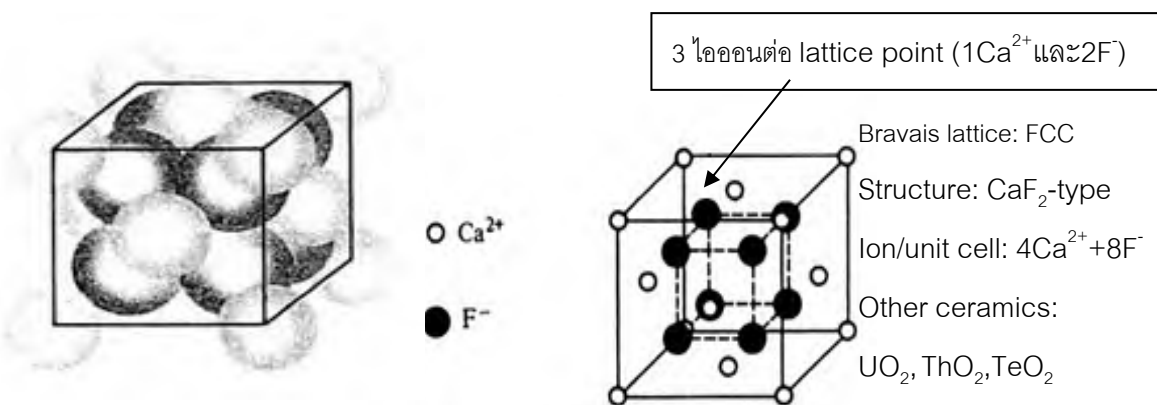
Typical ceramics: MgO , CaO , NiO

รูปที่ 1.14 โครงสร้างผลึกของโซเดียมคลอไรด์ ที่มา Kingery et al.⁷⁹



รูปที่ 1.15 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมออกไซด์ ที่มา Kingery et al.⁷⁹

2.3.2 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี MX_2 เมื่อ M คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ โดยมีอัตราส่วนในสูตรเคมีเป็น 1:2 ตัวอย่างเช่น แคลเซียมไดฟลูออไรด์ (CaF_2) มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ชิดหน้า (Face-Centered Cubic: FCC) โดยในหนึ่งยูนิตเซลล์ประกอบด้วย 4 ไอออนของ Ca^{2+} และ 8 ไอออนของ F^- รวมเป็น 12 ไอออนต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ ตัวอย่างสารประกอบเซรามิกอื่นๆ ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีแบบ MX_2 ได้แก่ ยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2), ทอเรียมไดออกไซด์ (ThO_2), เทลลูเรียมไดออกไซด์ (TeO_2), แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ซิลิกา (SiO_2)

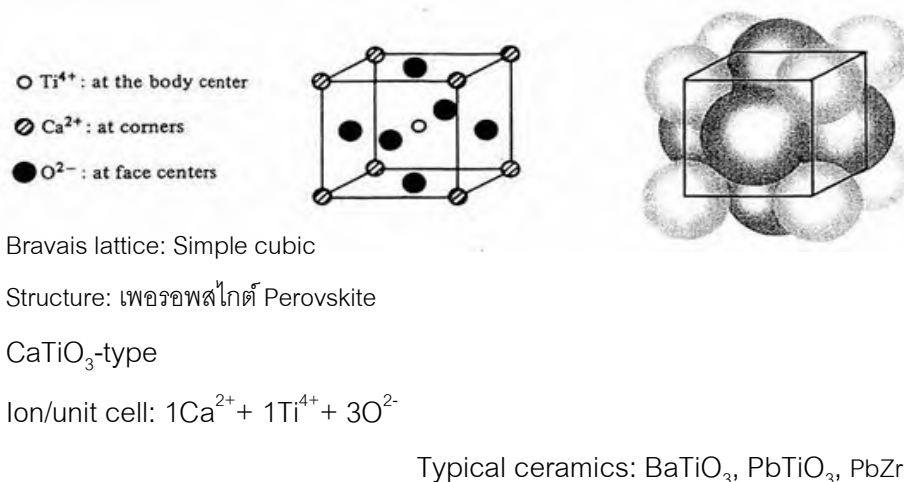


รูปที่ 1.16 โครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียมไดฟลูออไรด์ (CaF_2) ที่มา Kasap⁷⁴

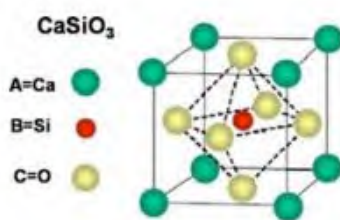
2.3.3 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี M_2X_3 เมื่อ M คือธาตุโลหะ และ X คือ ธาตุอโลหะ โดยมีอัตราส่วนของธาตุโลหะ (M) ต่อธาตุอโลหะ (X) เท่ากับ 2:3 ตัวอย่างที่สำคัญ ได้แก่ อะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งมีความสำคัญในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์, ตัวเร่งปฏิกิริยา, ฉนวนความร้อน และวัสดุชีวภาพ โดยอะลูมินาสามารถพบได้ในรูปของโครงสร้างผลึกแบบคอร์รันดัม (Corundum) ซึ่งมีผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) หรือ รมบโหีตรอล (Rhombohedral) โดยหนึ่งยูนิตเซลล์ประกอบด้วย 12 ไอออนของ Al^{3+} และ 18 ไอออนของ O^{2-} รวมเป็น 30 ไอออน สารประกอบอื่นที่มีโครงสร้างใกล้เคียงกับอะลูมินา ได้แก่ โครมิกออกไซด์ (Cr_2O_3), โกลด์ไตรคลอไรด์ ($AuCl_3$), เหล็กออกไซด์ชนิดแอลฟา ($\alpha-Fe_2O_3$)

2.3.4 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $M'M''X_3$ สารประกอบในกลุ่มนี้ประกอบด้วยธาตุโลหะสองชนิด (M' และ M'') และธาตุอโลหะ (X) โดยเป็นโครงสร้างผลึกที่มีความสำคัญและใช้ประโยชน์ด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าและการเก็บประจุ ถูกจัดกลุ่มเป็นวัสดุเซรามิกอิเล็กทรอนิกส์ (Electro-ceramics) ซึ่งครอบคลุมคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้คือ การเป็นวัสดุนำไฟฟ้า (Conductor), วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric), วัสดุเฟอร์โรอิเล็กตริก (Ferroelectric), วัสดุเพียโซอิเล็กตริก (Piezoelectric) โครงสร้างของสารประกอบเหล่านี้โดยทั่วไปอยู่ในรูปโครงสร้างผลึกที่มีชื่อเรียกว่า เพอโรฟสไกต์ (Perovskite Structure) ซึ่งโครงสร้างผลึกสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ตามอุณหภูมิ เช่น FCC, BCC หรือรูปแบบลูกบาศก์ (Cubic)⁹ ตัวอย่างของสารประกอบในกลุ่มนี้ ได้แก่ แคลเซียมไททาเนต ($CaTiO_3$), แบเรียมไททาเนต ($BaTiO_3$)¹⁵⁷, เลดเซอร์

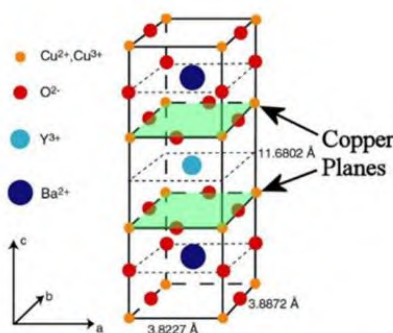
โคเนต (PbZrO_3)¹⁶⁴, เลดไททาเนต (PbTiO_3)¹⁶³ ตัวอย่างโครงสร้างผลึกของ แคลเซียมไททาเนต (CaTiO_3) ประกอบด้วย ไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) อยู่ที่ตำแหน่งมุมของยูนิตเซลล์, ไอออนไทเทเนียม (Ti^{4+}) อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง, ไอออนออกซิเจน (O^{2-}) อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละด้าน (face centers) ดังรูป 1.17 หรือสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์ได้จากการนำเปลือกไข่ทำปฏิกิริยากับซิลิกา ดังรูปที่ 1.18 และสารประกอบเพอร์อฟสไกต์ของ superconductors yttrium calcium barium copper oxide ($\text{YCaBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)¹⁸⁵ สังเคราะห์ได้จากผงเปลือกไข่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO), อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3), และแบเรียมออกไซด์ (BaO) ดังรูปที่ 1.19



รูปที่ 1.17 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมไททาเนต ที่มา Goldstein⁵³ และ Tangboriboon, N.^{163,164}

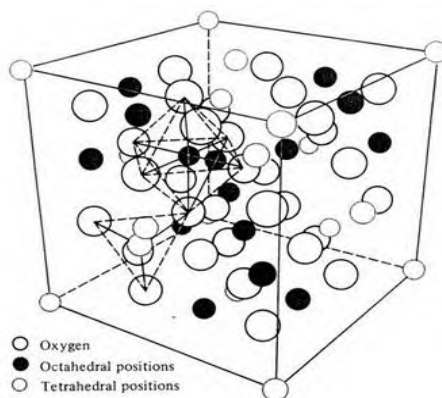


รูปที่ 1.18 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมซิลิเกต ที่มา Tangboriboon, N. et al^{162,167}



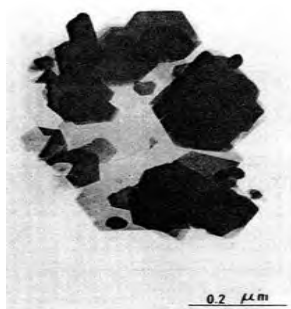
รูปที่ 1.19 โครงสร้างผลึกของวัสดุซูเปอร์คอนดักเตอร์ yttrium calcium barium copper oxide ($\text{YCaBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$) ที่มา Toumvong, W. et al¹⁸⁵

2.3.5 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี $M'M''X_4$ เมื่อ M' และ M'' คือธาตุโลหะ และ X คือธาตุออกซิเจน สารประกอบเซรามิกในกลุ่มนี้ประกอบด้วยไอออนของธาตุโลหะสองชนิด (M' และ M'') และไอออนของธาตุออกซิเจน (X) โดยมีอัตราส่วนสูตรเคมีเป็น 1:2:4 และจัดเป็นกลุ่มสารประกอบที่สำคัญทางด้านวัสดุแม่เหล็ก เช่น วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) และเฟอร์ริแมกเนติก (Ferrimagnetic) เนื่องจากมีโครงสร้างผลึกชนิด **สปินเนล** (Spinel) หรือ **อินเวอร์ตสปินเนล** (Inverse Spinel) ตัวอย่างเช่น แมกนีเซียมอะลูมินา ($MgAl_2O_4$) โครงสร้างประกอบด้วย 14 ไอออนต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ ได้แก่ $2 Mg^{2+}$, $4 Al^{3+}$ และ $8 O^{2-}$, ไอออนของโลหะ M^{2+} จะอยู่ในตำแหน่งเตตระฮีดรอล (Tetrahedral site) ขณะที่ไอออนของโลหะ M^{3+} ประมาณ 2 ใน 3 ของปริมาณจะอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล (Octahedral site) ตัวอย่างสารประกอบอื่นในกลุ่มนี้ได้แก่ $ZnFe_2O_4$, Fe_3O_4 (แมกเนไทต์), $FeNiFeO_4$, $FeMgFeO_4$, $NiAl_2O_4$, $ZnAl_2O_4$, สารประกอบกลุ่มเฟอร์ไรต์ (Ferrite) $FeNiFeO_4$, $NiAl_2O_4$, $ZnAl_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $FeMgFeO_4$, $FeFe_2O_4$ (Fe_3O_4 or Hematite) ดังรูป 1.20

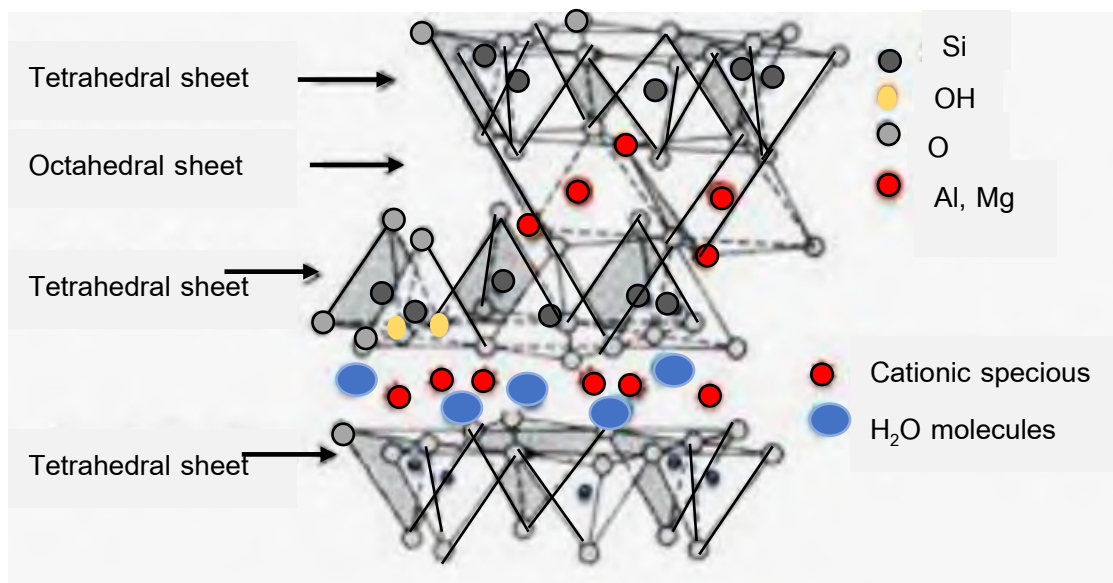


รูปที่ 1.20 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีโครงสร้างสปินเนล (Spinel) ที่มา Goldstein⁵³

2.3.6 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีแบบเชิงซ้อนของแร่ดินขาว (Kaolinite) หรือ **ไฮเดรตอะลูมิเนียมซิลิเกต** ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบ **แผ่นซิลิเกต** (Layered Silicate) ดังรูป 1.21 และ 1.22 โดยมีโครงสร้างผลึกตามระบบแบบ **ไตรคลินิก** (Triclinic) โดยหนึ่งยูนิตเซลล์ของโครงสร้างดินขาวประกอบด้วย 2 โมเลกุล แต่ละโมเลกุลจะมีการเรียงตัวสลับกันของชั้นเตตระฮีดรอล (Tetrahedral layer) และชั้นออกตะฮีดรอล (Octahedral layer) นอกจากนี้ยังมีแร่ดินเชิงซ้อนชนิดอื่นๆ อีกที่พบได้ตามธรรมชาติ และถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเซรามิก เช่น Dickite, Nacrite, และ Halloysite รวมถึงแร่โลหะอื่นที่มีโครงสร้างผลึกใกล้เคียงหรือปะปนอยู่ในธรรมชาติ เช่น แคสซิเทอไรต์ (SnO_2), สติบไนต์ (Sb_2S_3), ไพไรต์ (FeS_2), เฮมาไทต์ (Fe_2O_3), กาลีนา (PbS), สฟาลเอไรต์ (ZnS), แมกเนไทต์ (Fe_3O_4), บอกไซต์ (Al_2O_3), และอาร์เจนไทต์ (Ag_2S)



รูปที่ 1.21 โครงสร้างทางจุลภาคของแร่ดินขาวที่วิเคราะห์ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่มา Ashby, M.F. et al.⁶



รูปที่ 1.22 โครงสร้างของดินขาว (Kaolinite) ที่มา Banno, H.⁹

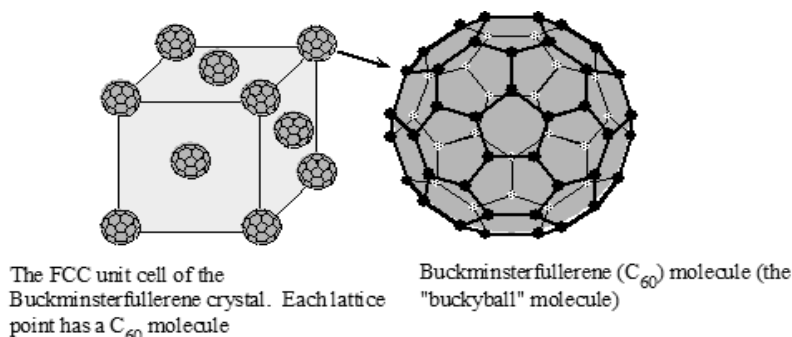
- Dickite: แร่ดินที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างคล้ายกับ Kaolinite⁷⁹
- Nacrite: แร่ดินอีกชนิดหนึ่งที่มีความยาวสูงมากในกลุ่มแร่ดินขาว
- Halloysite: แร่ดินขาวที่มักพบปะปนกับ Kaolinite โดยมีโครงสร้างลักษณะเป็นท่อหรือทรงกระบอกขนาดนาโนเมตร

นอกจากนี้ยังมีแร่หรือสินแร่อื่น ๆ ที่เป็นวัตถุดิบสำคัญของอุตสาหกรรมเซรามิก ได้แก่:

- แคสซิเทอไรต์ (Cassiterite) – แร่ที่มีองค์ประกอบหลักคือ ดีบุกออกไซด์ (SnO_2)
- สติบไนต์ (Stibnite) – แร่ที่มีองค์ประกอบหลักคือ แอนติโมนีไตรซัลไฟด์ (Sb_2S_3)
- ไพไรต์ (Pyrite) – แร่ซัลไฟด์ของเหล็ก (FeS_2) ซึ่งมักพบร่วมกับ เฮมาไทต์ (Fe_2O_3)
- กาลีนนา (Galena) – แร่ซัลไฟด์ของตะกั่ว (PbS)
- สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) – แร่ซัลไฟด์ของสังกะสี (ZnS)
- แมกเนไทต์ (Magnetite) – แร่เหล็กออกไซด์ผสม (Fe_3O_4)
- บอกไซต์ (Bauxite) – แหล่งแร่หลักของอะลูมินา ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)¹²⁹
- อาร์เจนไทต์ (Argentite) – แร่ซัลไฟด์ของเงิน (Ag_2S)

2.3.7 สารประกอบเซรามิกที่เกิดจากธาตุเพียงชนิดเดียวตัวอย่างที่สำคัญในกลุ่มนี้คือ **ธาตุคาร์บอน (C)** มีการจัดเรียงโครงสร้างในลักษณะต่างๆ ภายใต้การยึดเกาะโครงสร้างด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding) ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีหลายรูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างของเพชร (Diamond) โดยที่แต่ละอะตอมของธาตุคาร์บอนจะวางอยู่ในตำแหน่งเตตระฮีดรอล อะตอมคาร์บอนแต่ละตัวเกิดพันธะกับอะตอมคาร์บอนอื่น ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมีความแข็งสูงและเป็นโครงสร้างที่ถูกจัดกลุ่มอยู่ในกลุ่มสารประกอบเซรามิก นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างคาร์บอนที่เป็นแอลลोटโรป (Allotrope) ชนิดอื่นได้อีก เช่น โครงสร้างที่มีคาร์บอนประกอบเป็นจำนวน

60 อะตอม (C_{60}) อยู่ในรูปทรงโค้งปิดประกอบเข้าด้วยกันตามมุมของแลตทิซ มีชื่อเรียกว่าบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน (Buckminsterfullerene) หรือ บัคกี้บอล (Buckyball) หรือ **ฟูลเลอร์รีน (Fullerene)**^{71,159} คือโครงสร้างคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งที่เป็นแอลโลโทรป (Allotrope) ของคาร์บอน มีรูปทรงคล้ายลูกฟุตบอล ดังรูป 1.23



Buckminsterfullerene

รูปที่ 1.23 โครงสร้างบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์รีน (Buckminsterfullerene) หรือบัคกี้บอล (Buckyball) ที่มา Khan et al.⁷⁷

2.3.8 สารประกอบเซรามิกที่เกิดจากธาตุคาร์บอนเพียงชนิดเดียวและมีการยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonding) ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกที่มีคุณลักษณะเฉพาะ คือ **แกรไฟต์ (Graphite)** ซึ่งเป็นแอลโลโทรป (Allotrope) ชนิดหนึ่งของคาร์บอน มีเสถียรภาพสูงภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ในโครงสร้างของแกรไฟต์จะมีอะตอมคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นผลึกรูปหกเหลี่ยมในระนาบ (hexagonal planar arrangement) โดยแต่ละระนาบจะซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ (layered structure) ระหว่างอะตอมภายในชั้นยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรง ขณะที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวลเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งมีพลังงานต่ำ ทำให้แกรไฟต์สามารถเลื่อนไถลได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุหล่อลื่นและทำอุปกรณ์ขั้วอิเล็กโทรด แม้ว่าแกรไฟต์จะไม่ใช้สารประกอบออกไซด์หรือไนไตรด์แบบเซรามิกทั่วไป แต่ด้วยคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีบางประการ เช่น จุดหลอมเหลวสูง ทนความร้อน ความแข็งแรงดี และมีความต้านทานต่อสารเคมี แกรไฟต์จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมขั้นสูงและถูกจัดให้เป็นวัสดุในกลุ่มวัสดุเซรามิก นอกจากนี้ คาร์บอนยังสามารถเกิดการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเป็นแอลโลโทรปชนิดอื่นได้ เช่น **คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon Nanotube)**^{39,159} ซึ่งมีโครงสร้างแบบทรงกระบอกที่ประกอบด้วยแผ่นกราฟีน (Graphene Sheet) ม้วนตัวเป็นท่อในระดับนาโนเมตร โดยมีความสมบัติโดดเด่นทางด้านกลศาสตร์, ไฟฟ้า และความร้อน ทำให้เป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในเทคโนโลยีนาโนและอิเล็กทรอนิกส์^{10,11,159}

2.3.9 สารประกอบเซรามิกที่มีสูตรทางเคมีเหมือนกันแต่มีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันเรียกว่าเป็นวัสดุที่มีสมบัติ Polymorphism หรือ โพลีมอร์ฟ (Polymorphs) ตัวอย่างสารประกอบเซรามิกชนิดนี้คือ **ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS)** ซึ่งมีโครงสร้างผลึก 2 แบบ ได้แก่

- **โครงสร้างซิงค์เบลนด์ (Zinc Blende)** มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ชิดหน้า (Face-Centered Cubic: FCC) ตามระบบผลึกของ Bravais lattice โดยประกอบด้วย 8 ไอออนต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ ได้แก่ 4 Zn^{2+} และ 4 S^{2-} หรือคิดเป็น 2 ไอออนต่อ lattice point

- **โครงสร้างเวอร์ทไซต์ (Wurtzite)** มีโครงสร้างผลึกแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ตามระบบผลึกของ Bravais lattice โดยประกอบด้วย 4 ไอออนต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ ได้แก่ 2 Zn^{2+} และ 2 S^{2-} นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบเซรามิกชนิดอื่นที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกับซิงค์เบลนด์และเวอร์ทไซต์ เช่น:

CdS (แคดเมียมซัลไฟด์)

ZnO (ซิงค์ออกไซด์)

สำหรับวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductors) ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกับซิงค์เบลนด์¹⁹ ได้แก่

GaAs (แกลเลียมอาร์เซไนด์)

AlP (อะลูมิเนียมฟอสไฟด์)

InSb (อินเดียมแอนติโมไนด์)

ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างธาตุหมู่ III กับหมู่ V ของตารางธาตุ (III-V compounds) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบที่มีโครงสร้างผลึกคล้ายกัน เช่น ZnSe , CdS , HgTe เป็นต้น

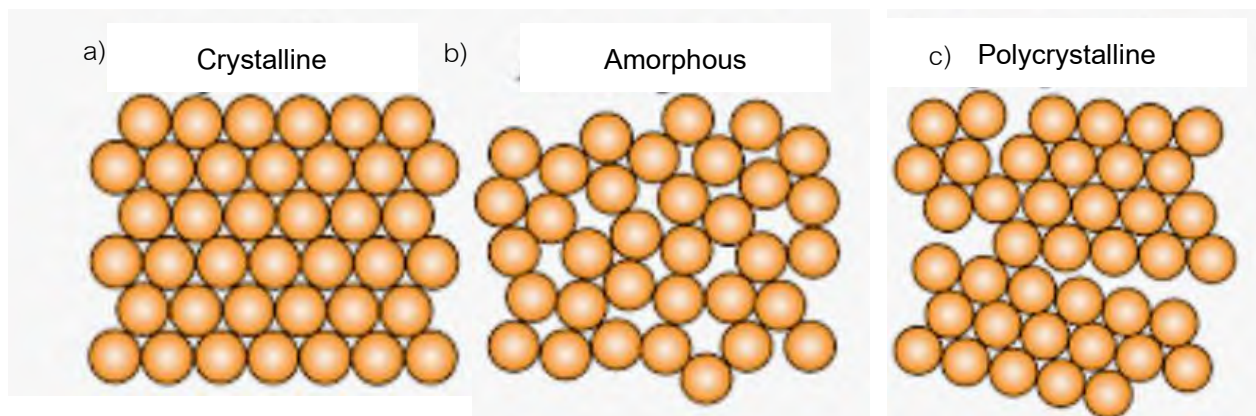
2.4 การจัดแบ่งวัสดุเซรามิกตามลักษณะโครงสร้างผลึก คือ การจำแนกตามลักษณะความมีผลึกในโครงสร้างแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

2.4.1 วัสดุผลึก (Crystalline Materials) หมายถึง วัสดุของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบต่อเนื่องกันในทุกทิศทางและสม่ำเสมอตามความยาวของโครงสร้าง (long-range order) โดยมีโครงสร้างผลึกแน่นอน ตามระบบผลึกของ Bravais lattice³⁰ ดังภาพที่ 1.24a (วัสดุผลึกเดี่ยว) ตัวอย่างของวัสดุผลึกเดี่ยว ได้แก่ วัสดุกึ่งตัวนำ¹⁹ (Semiconductors) เช่น ซิลิกอน (Si), เจอร์เมเนียม (Ge), แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs), แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP), แกลเลียมแอนติโมไนด์ (GaSb), อินเดียมอาร์เซไนด์ (InAs), อินเดียมฟอสไฟด์ (InP), อินเดียมแอนติโมไนด์ (InSb), แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), แคดเมียมซีลีไนด์ (CdSe), แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe), ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS), ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe), ซิงค์เทลลูไรด์ (ZnTe), รวมถึงเพชร (Diamond) และอัญมณี (gemstones) บางชนิด ซึ่งมักเตรียมได้จากกระบวนการทางวิศวกรรมผลึก เช่น Czochralski method ที่ช่วยให้ได้ผลึกเดี่ยวบริสุทธิ์สำหรับการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์

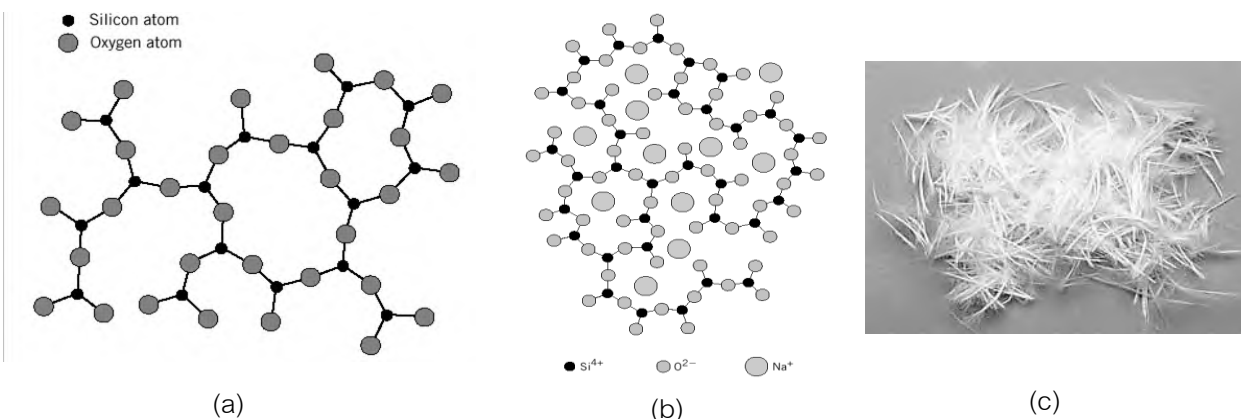
2.4.2 วัสดุอะมอร์ฟัส หรือ วัสดุอสัณฐาน (Amorphous หรือ Non-crystalline Materials) เป็นวัสดุที่ไม่มีระเบียบการจัดเรียงตัวของอะตอมที่แน่นอน และไม่แสดงการเกิดระยะซ้ำ (long-range order) ดังภาพที่ 1.24b ตัวอย่างของวัสดุประเภทนี้ ได้แก่ แก้ว (Glass), เคลือบเซรามิก, เคลือบแก้ว และเซฟไฟร์สังเคราะห์บางชนิด ซึ่งโครงสร้างอะมอร์ฟัสดังกล่าวส่งผลทำให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติโปร่งใสและเหมาะสำหรับการใช้งานด้านแสงหรือออปติก (optics) ดังรูป 1.25 และ 1.26b และการหลอมแก้วที่ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นอะมอร์ฟัสดังรูป 1.27

2.4.3 วัสดุพอลิคริสตัลไลน์หรือ วัสดุผลึกรวม (Polycrystalline Materials) คือ วัสดุของแข็งที่แม้จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นระเบียบในแต่ละเกรนผลึก (grain) แต่โครงสร้างทั้งหมดประกอบด้วยผลึกย่อย

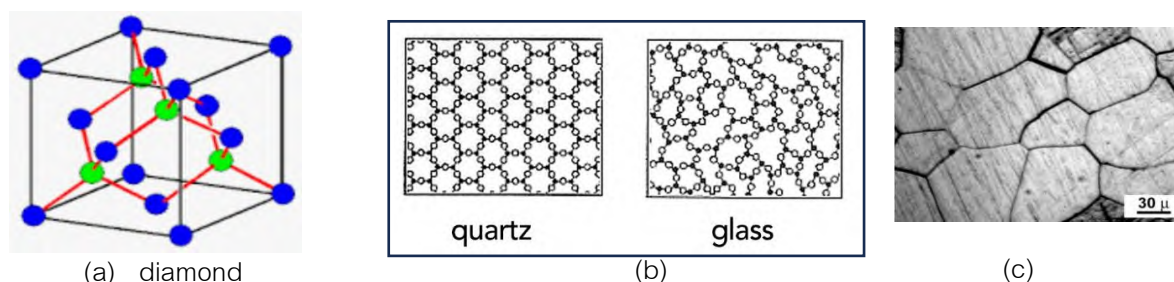
จำนวนมารวมกันอยู่โดยมีแนวเขตผลึก (grain boundary) คั่นระหว่างกัน โดยแต่ละผลึกอาจมีขนาดหรือทิศทางแตกต่างกันและในบางกรณีอาจมีหลายรูปผลึกรวมกันอยู่ในเนื้อวัสดุเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 1.24c ลักษณะเช่นนี้ทำให้วัสดุมีคุณสมบัติแตกต่างจากผลึกเดี่ยว ตัวอย่างเช่น อะลูมินา (Al_2O_3) หรือ กลาสเซรามิก ซึ่งสามารถนำมาใช้ผลิตชิ้นงานที่มีความโปร่งแสงหรือทึบแสงได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตที่ทำให้โครงสร้างกลายเป็นผลึก³⁰



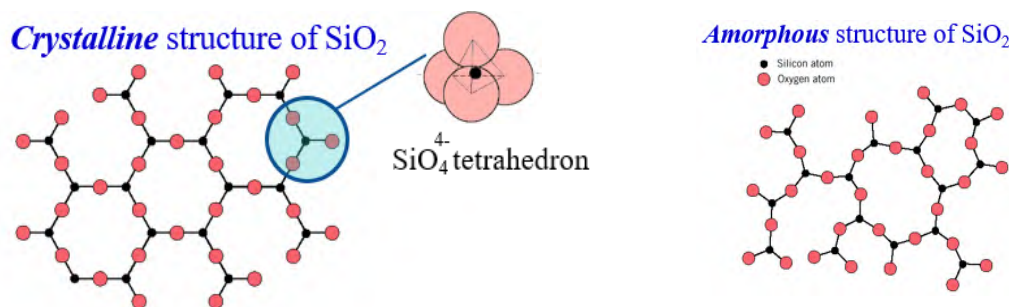
รูปที่ 1.24 การจำแนกวัสดุตามโครงสร้างผลึก: a) โครงร่างผลึกเดี่ยว; b) อะมอร์ฟัส; c) โครงร่างหลายผลึก ที่มา Grodrin⁵⁴



รูปที่ 1.25 โครงสร้างอะมอร์ฟัสหรือโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) ของวัสดุนาโนเซรามิก: (a) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2), (b) แก้วซิลิกา (c) เส้นใยแก้ว ที่มา Marko⁹⁵



รูปที่ 1.26 โครงสร้างผลึก: (a) ผลึกเดี่ยวของเพชร, (b) โครงสร้างผลึกของควอตซ์และอะมอร์ฟัสของแก้ว, (c) โครงสร้างกลุ่มหรือโครงสร้างหลายผลึกของอะลูมินา ที่มา McCauley⁹⁸

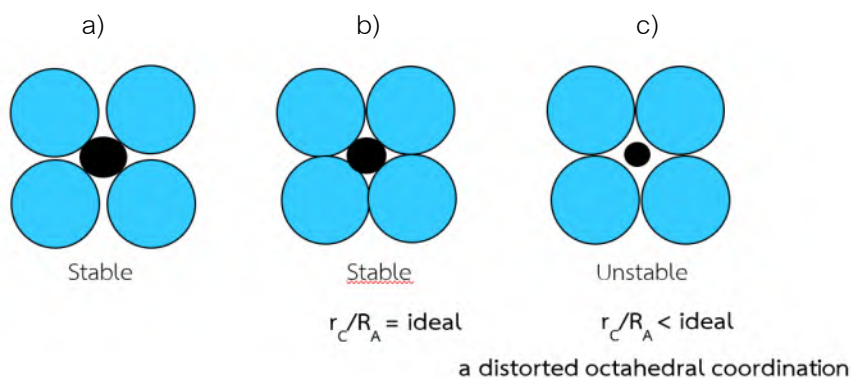


รูปที่ 1.27 โครงสร้างผลึกและโครงสร้างอะมอร์ฟัสของแก้วซิลิกา ที่มา McCOLM⁹⁹

2.4 การจำแนกโครงสร้างเซรามิกตามระบบผลึกบราเวียสแลตทิซ โครงสร้างผลึกตามระบบผลึกแบบบราเวียสแลตทิซ (Bravais Lattice) ประกอบด้วย 7 ระบบผลึก (Crystal systems) 14 รูปแบบตามมาตรฐานยูนิตเซลล์ (Standard unit cells) แสดงดังตารางที่ 1.1 แต่ละระบบของโครงสร้างผลึกประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน 4 ชนิด ได้แก่

- P = Primitive (เรียงตัวที่มุมเท่านั้น)
- I = Body-Centered (มีอะตอมเพิ่มเติมที่ศูนย์กลางของยูนิตเซลล์)
- F = Face-Centered (มีอะตอมที่ศูนย์กลางของแต่ละด้านของยูนิตเซลล์)
- C = Side-Centered หรือ Base-Centered (มีอะตอมเพิ่มเติมที่ศูนย์กลางเฉพาะสองด้านที่ขนานกัน)

การจำแนกโครงสร้างที่ต่างกัันนี้ มีความสำคัญในการอธิบายโครงสร้างของวัสดุเซรามิกและความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น ความแข็ง, ความเปราะ, การนำไฟฟ้า และพฤติกรรมทางกลอื่น ๆ โดยทั่วไปโครงสร้างของวัสดุเซรามิกมีความซับซ้อนเนื่องจากประกอบด้วยแคตไอออนและแอนไอออนทำให้โครงสร้างเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนด้วยพันธะไอออนิก และ/หรือ พันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปสูตรสารประกอบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติและมีความเสถียรจะมีผลรวมของประจุวาเลนซ์เล็กน้อยเท่ากับศูนย์ จากผลรวมของประจุบวกที่มาจากแคตไอออนและประจุลบจากแอนไอออนซึ่งอาจทำให้เกิดโครงสร้างได้หลายแบบที่มีความเสถียรและสามารถใช้ทำนายโครงสร้างสารประกอบเซรามิกได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 1.28 การยึดเกาะของไอออนในโครงสร้างสารประกอบเซรามิก ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

การทำนายความเสถียรของโครงสร้างผลึกเซรามิก จากรูปที่ 1.28 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของวัสดุเซรามิกที่มีลักษณะแตกต่างกันในด้านความเสถียรของการจัดเรียงอะตอม โดยในรูปที่ 1.28a และ 1.28b เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรสูง เนื่องจากอะตอมของแคตไอออน (Cation) และแอนไอออน (Anion) มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะที่แข็งแรงและสมดุลกัน ส่งผลให้โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นมีความมั่นคง ในทางตรงกันข้าม รูปที่ 1.28c แสดงโครงสร้างที่ไม่เสถียร เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแคตไอออนและแอนไอออนต่ำ ส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างอะตอมสูง ซึ่งอาจนำไปสู่การเสียรูปหรือความล้มเหลวของโครงสร้างได้ง่าย เพื่อประเมินความเสถียรของโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิกในเบื้องต้น วิธีการทำนายโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากจำนวนอะตอมที่ล้อมรอบอะตอมศูนย์กลาง (Central atom) หรือที่เรียกว่า เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination Number, CN) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางวิศวกรรมวัสดุ โดยช่วยให้สามารถระบุลักษณะโครงสร้าง สมบัติทางฟิสิกส์ และความเสถียรของสารประกอบได้ รวมทั้งช่วยอธิบายความแข็งแรงของโครงสร้างและสมบัติด้านต่างๆ ได้เพิ่มเติม เช่น สมบัติเชิงกล (ความแข็ง hardness, ความแข็งแรง strength, ความเหนียว ductility, ความเปราะ brittleness, มอดุลัสความยืดหยุ่น Modulus of Elasticity, การรับแรงดัดโค้ง bending), สมบัติทางแสง (ความโปร่งใส transparent, ความโปร่งแสง translucent, ความทึบแสง opaque, ดัชนีหักเหทางแสง refractive index, การโพลาไรซ์ polarization), สมบัติทางไฟฟ้า (การนำไฟฟ้า electrical conductivity, การต้านทานไฟฟ้าหรือฉนวนไฟฟ้า electrical resistance or insulator, การเก็บประจุ charge storage), สมบัติทางแม่เหล็ก (การนำแม่เหล็ก magnetic magnetization, ความไวของการเป็นวัสดุแม่เหล็ก magnetic susceptibility, การเหนี่ยวนำแม่เหล็ก magnetic induction) วิธีการทำนายโครงสร้างและเลขโคออร์ดิเนชันของวัสดุเซรามิกคือการคำนวณค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีแคตไอออนหรือรัศมีของประจุบวกต่อรัศมีแอนไอออนหรือรัศมีของประจุลบดังแสดงในสมการที่ 1.4²⁰³

$$r_c / R_A = \text{ideal} \quad (1.4)$$

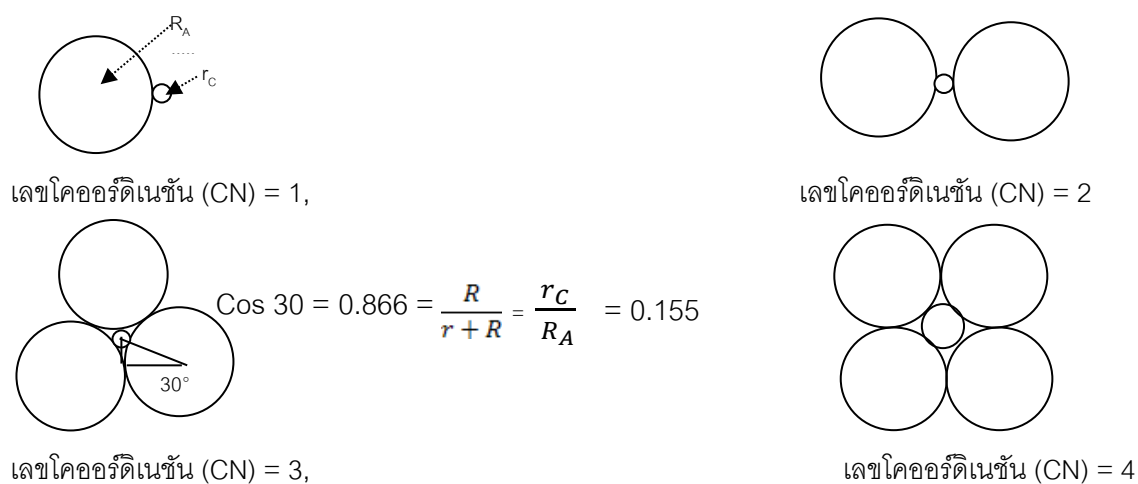
กำหนดให้ r_c คือ รัศมีแคตไอออน และ R_A คือรัศมีแอนไอออน โดยการนำค่าตัวอย่างของรัศมีไอออนที่ปรากฏในตารางที่ 1.4 คำนวณอัตราส่วนรัศมี เพื่อใช้ทำนายโครงสร้างวัสดุเซรามิกได้ในเบื้องต้น แต่ข้อควรระวังคือต้องใช้ค่ารัศมีไอออนในการคำนวณ จากตัวอย่างที่ปรากฏในตารางที่ 1.4 จะมีทั้งค่ารัศมีอะตอมและค่ารัศมีไอออน ให้เลือกใช้ค่ารัศมีไอออน (Ionic radius) สำหรับการแทนค่าในการคำนวณ และหากค่าที่คำนวณได้ไม่สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนรัศมีตามทฤษฎีก็หมายความว่าวัสดุเซรามิกดังกล่าวอาจมีโครงสร้างสารประกอบที่ไม่เสถียร โครงสร้างอาจเกิดความเสียหายได้โดยง่าย ความไม่เสถียรนี้อาจมีสาเหตุจากหลายปัจจัย เช่น ขนาดของอนุภาค อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของวัตถุดิบ ตลอดจนกระบวนการเตรียมหรือการสังเคราะห์วัสดุเซรามิก ที่อาจมีความไม่เหมาะสม ทำให้โครงสร้างผลึกเบี่ยงเบนจากโครงสร้างตามทฤษฎี หรือที่เรียกว่าเกิดข้อบกพร่องของโครงสร้าง (Distortion) ดังความสัมพันธ์ที่ได้ของสมการที่ 1.5

$$r_c / R_A < \text{ideal} \quad (1.5)$$

ตารางที่ 1.4 ตัวอย่างรัศมีไอออนของธาตุบางชนิด ที่มา Goldstein⁵³

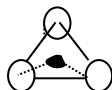
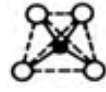
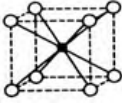
Element	Symbol	Atomic Number	Atomic Weight (amu)	Density of Solid, 20°C (g/cm ³)	Crystal Structure, 20°C	Atomic Radius (nm)	Ionic Radius (nm)	Most Common Valence	Melting Point (°C)
Aluminum	Al	13	26.98	2.71	FCC	0.143	0.053	3+	660.4
Argon	Ar	18	39.95	—	—	—	—	Inert	-189.2
Barium	Ba	56	137.33	3.5	BCC	0.217	0.136	2+	725
Beryllium	Be	4	9.012	1.85	HCP	0.114	0.035	2+	1278
Boron	B	5	10.81	2.34	Rhomb.	—	0.023	3+	2300
Bromine	Br	35	79.90	—	—	—	0.196	1-	-7.2
Cadmium	Cd	48	112.41	8.65	HCP	0.149	0.095	2+	321
Calcium	Ca	20	40.08	1.55	FCC	0.197	0.100	2+	839
Carbon	C	6	12.011	2.25	Hex.	0.071	~0.016	4+	sublimes at 3367 K
Cesium	Cs	55	132.91	1.87	BCC	0.265	0.170	1+	28.4
Chlorine	Cl	17	35.45	—	—	—	0.181	1-	-101
Chromium	Cr	24	52.00	-7.19	BCC	0.125	0.063	3+	1875
Cobalt	Co	27	58.93	8.9	HCP	0.125	0.072	2+	1495
Copper	Cu	29	63.55	8.94	FCC	0.128	0.096	1+	1085
Fluorine	F	9	19.00	—	—	—	0.133	1-	-220
Gallium	Ga	31	69.72	5.90	Ortho.	0.122	0.062	3+	29.8
Germanium	Ge	32	72.64	5.32	Dia.	0.122	0.053	4+	937
Gold	Au	79	196.97	19.32	FCC	0.144	0.137	1+	1064
Helium	He	2	4.003	—	—	—	—	Inert	-272 at 26 atm
Hydrogen	H	1	1.008	—	—	—	0.154	1+	-259
Iodine	I	53	126.91	4.93	Ortho.	0.136	0.220	1 -	114
Iron	Fe	26	55.85	7.87	BCC	0.124	0.077	2+	1538
Lead	Pb	82	207.2	11.35	FCC	0.175	0.120	2+	327

การทำนายรูปร่างโครงสร้างและเลขโคออร์ดิเนชันของวัสดุเซรามิก กรณีของสารประกอบเซรามิกที่มีพันธะไอออนิก ค่ารัศมีของประจุลบ (แอนไอออน) มักมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ เช่น ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน การจัดเรียงอิเล็กตรอนภายในอะตอม และอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแคตไอออน ทำให้ไม่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอน จึงนิยมกำหนดอัตราส่วนรัศมีของไอออนเป็นช่วง ตามค่าที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 1.5 เป็นการทำนายรูปร่างโครงสร้างและเลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination Number: CN) ของวัสดุเซรามิกโดยการใช้อัตราส่วนของรัศมีแคตไอออนต่อแอนไอออน (r_c/r_a) เป็นตัวแปรสำคัญ ทำให้การคาดการณ์โครงสร้างผลึก และ เลขโคออร์ดิเนชัน สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับสูตรโครงสร้างของวัสดุเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 1.29

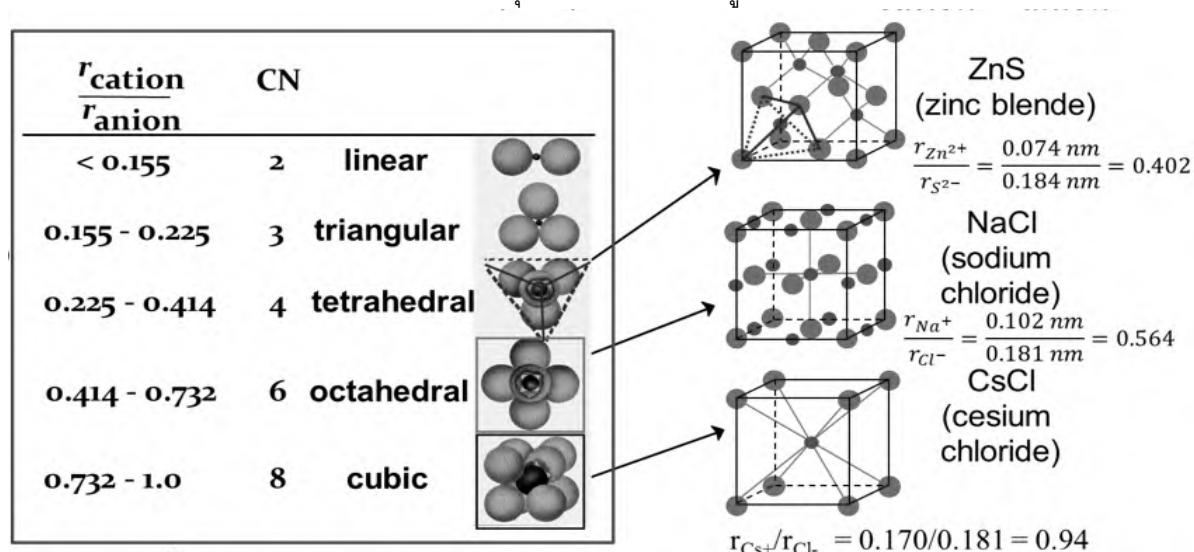


รูปที่ 1.29 การทำนายรูปร่างและเลขโคออร์ดิเนชันของสารประกอบเซรามิก ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ตารางที่ 1.5 การทำนายรูปร่างและเลขโคออร์ดิเนชันของเซรามิก ที่มา Kear et al.⁷⁶

เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number)	อัตราส่วนรัศมีแคตไอออนต่อรัศมีแอนไอออน (r/R)	รูปร่างโคออร์ดิเนชัน (Coordination geometry)	รูปร่าง
2	$0 < \frac{r}{R} < 0.155$		เชิงเส้น (Linear)
3	$0.155 \leq \frac{r}{R} < 0.225$		สามเหลี่ยม (Triangular)
4	$0.225 \leq \frac{r}{R} < 0.414$		เตตระฮีดรอล (Tetrahedral)
6	$0.414 \leq \frac{r}{R} < 0.732$		ออกตะฮีดรอล (Octahedral)
8	$0.732 \leq \frac{r}{R} < 1.000$		คิวบิก (Cubic)
12	1.000	 หรือ	ปิระมิด (Pyramid)

ตัวอย่างแสดงการทำนายโครงสร้างวัสดุเซรามิก ดังแสดงในรูปที่ 1.30



รูปที่ 1.30 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าอัตราส่วนรัศมีเพื่อการทำนายโครงสร้างผลึกของวัสดุเซรามิก ที่มา Norton¹¹⁴
การคำนวณความหนาแน่นและปัจจัยการจัดเรียงตัวของโครงสร้างวัสดุเซรามิก

การคำนวณค่าความหนาแน่นของวัสดุเซรามิก สามารถทำได้เช่นเดียวกับการคำนวณค่าความหนาแน่นของวัสดุโลหะ โดยใช้สมการพื้นฐานดังนี้:

การคำนวณค่าความหนาแน่นต่อยูนิตเซลล์ (Density of unit cell)

สูตรการคำนวณหาค่าความหนาแน่น

$$\text{ความหนาแน่น, } \rho = \frac{\text{มวล(Mass)}}{\text{ปริมาตร(Volume)}} = \frac{\text{Mass of atoms in unit cell}}{\text{Volume of an unit cell}} = \frac{(n/N_A)}{V_C} x A \quad (1.6)$$

n = จำนวนอะตอม (หรือจำนวนไอออนรวม) ต่อหนึ่งยูนิตเซลล์

A = มวลอะตอม (Atomic weight) หน่วยเป็นกรัม/โมล

N_A = ค่าคงที่อาโวกาโดร (Avogadro's number) = 6.022×10^{23} อะตอม/โมล

V_C = ปริมาตรของยูนิตเซลล์ หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

การคำนวณค่าการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนภายในยูนิตเซลล์ เพื่อใช้ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างวัสดุ มีการกำหนดวิธีคำนวณค่าความหนาแน่นการจัดเรียงโครงสร้างไว้ 2 ประเภท คือค่า APF (Atomic Packing Factor) สำหรับวัสดุโลหะ และค่า IPF (Ionic Packing Factor) สำหรับวัสดุเซรามิก

1. ค่า APF (Atomic Packing Factor) ใช้สำหรับการคำนวณค่าความหนาแน่นของโครงสร้างผลึกชนิดวัสดุโลหะที่มีการจัดเรียงอะตอมอย่างหนาแน่น

แต่การคำนวณค่าการจัดเรียงไอออนภายในโครงสร้างต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ของสารประกอบเซรามิกจะแตกต่างจากวัสดุโลหะ โดยการคำนวณจากค่าที่เรียกว่า Ionic Packing Factor (IPF) ดังสมการ 1.7 และ 1.8

2. ค่า IPF (Ionic Packing Factor) เพื่อการประเมินความหนาแน่นของการจัดเรียงไอออนต่อหนึ่งยูนิตเซลล์ในวัสดุเซรามิกที่มีพันธะไอออนิก โดยพิจารณาจากจำนวนและปริมาตรของแคตไอออนและแอนไอออนภายในยูนิตเซลล์:

$$IPF = \frac{\text{ปริมาตรไอออนต่อยูนิตเซลล์ (Volume of ions per unit cell)}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งยูนิตเซลล์ (V_{unit cell})}} \quad (1.7)$$

$$IPF = \frac{N_{\text{cation}} \cdot \frac{4}{3}\pi r_{\text{cation}}^3 + N_{\text{anion}} \cdot \frac{4}{3}\pi r_{\text{anion}}^3}{a^3} \quad (1.8)$$

$N_{\text{cation}}, N_{\text{anion}}$ = จำนวนของไอออนแต่ละชนิดในเซลล์หน่วย

$r_{\text{cation}}, r_{\text{anion}}$ = รัศมีของไอออน (ในหน่วยนาโนเมตรหรือพิโกเมตร)

a = ความยาวของขอบเซลล์หน่วย (unit cell parameter)

ตัวอย่างการคำนวณ Ionic Packing Factor (IPF) สำหรับวัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างเพอโรฟสไกต์ ABX_3

สูตรคำนวณตามโครงสร้างเพอโรฟสไกต์พื้นฐาน (ABX_3):

- A-site cation: อยู่ที่มุมของเซลล์หน่วย (corner positions)
- B-site cation: อยู่ตรงกลางของเซลล์ (body center)
- X-site anion เช่น O^{2-} อยู่ที่กึ่งกลางของขอบ (face center)

ตัวอย่าง: Calcium Titanate ($CaTiO_3$) ที่มีโครงสร้างผลึก: Cubic Perovskite

ความยาวของเซลล์หน่วย $a = 3.89 \text{ \AA} = 3.89 \times 10^{-8} \text{ cm}$

รัศมีไอออน: $r_{Ca^{2+}} = 1.34 \text{ \AA}$, $r_{Ti^{4+}} = 0.605 \text{ \AA}$, $r_{O^{2-}} = 1.40 \text{ \AA}$

ขั้นตอนการคำนวณ

1. คำนวณปริมาตรของไอออนทั้งหมดใน 1 เซลล์หน่วย

ตารางที่ 1.6 ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรไอออนในเซลล์หน่วย ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ไอออน	จำนวนในเซลล์	รัศมี (Å)	ปริมาตร ($V = \frac{4}{3}\pi r^3$)
Ca^{2+} (A-site)	1	1.34	$V_{Ca^{2+}} = \frac{4}{3}\pi(1.34)^3$
Ti^{4+} (B-site)	1	0.605	$V_{Ti^{4+}} = \frac{4}{3}\pi(0.605)^3$
O^{2-} (X-site)	3	1.40	$V_{O^{2-}} = 3 \times \frac{4}{3}\pi(1.40)^3$

$$V_{Ca^{2+}} = \frac{4}{3}\pi(1.34)^3 \approx 10.08 \text{ \AA}^3$$

$$V_{Ti^{4+}} = \frac{4}{3}\pi(0.605)^3 \approx 0.925 \text{ \AA}^3$$

$$V_{O^{2-}} = 3 \times \frac{4}{3}\pi(1.40)^3 \approx 34.52 \text{ \AA}^3$$

ผลรวมปริมาตรไอออนทั้งหมดในโครงสร้าง 1 เซลล์หน่วย $V_{\text{ions}} = 10.08 + 0.925 + 34.52 \approx 45.53 \text{ \AA}^3$

2. คำนวณปริมาตรของเซลล์หน่วย (Unit cell) $V_{\text{cell}} = a^3 = (3.89)^3 = 58.85 \text{ \AA}^3$

3. คำนวณ IPF

$$\text{IPF} = \frac{V_{\text{ions}}}{V_{\text{cell}}} = \frac{45.53}{58.85} \approx 0.774 \text{ หรือ } 77.4\%$$

สรุปผลการคำนวณ ค่า IPF ของโครงสร้าง CaTiO_3 มีค่าประมาณ 0.77 แสดงได้ว่าไอออนในโครงสร้างวัสดุเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบเพอรอฟสไกต์มีการอัดเรียงตัวของไอออนต่อยูนิตเซลล์ค่อนข้างแน่นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างอื่น

- ค่า IPF ที่สูง (มากกว่า 0.7) บ่งชี้ถึง **โครงสร้างที่อัดเรียงตัวแน่น เสถียร และแข็งแรง** ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุในงานอิเล็กทรอนิกส์ พลังงาน และวัสดุทนไฟ
- ในเพอรอฟสไกต์บางชนิด เช่น MAPbI_3 (เมทิลแอมโมเนียมตะกั่วไอโอไดด์) ซึ่งใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ารัศมีของ A-site เป็นโมเลกุลอินทรีย์ IPF จะต้องคำนวณแบบเฉลี่ยเชิงปริมาตร^{20,35}

ตัวอย่างการคำนวณค่า IPF (Ionic Packing Factor) ของวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างแบบ **สปินเนล (Spinel Structure)** ซึ่งเป็นวัสดุที่พบได้บ่อยในวัสดุเซรามิกแม่เหล็ก เช่น เฟอไรต์ (Ferrite) และมีความสำคัญในงานวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, ไมโครเวฟ, และแม่เหล็กถาวร

ตัวอย่างการคำนวณ IPF ของวัสดุแม่เหล็กสปินเนล: แมกนีไซต์เฟอไรต์ (MgFe_2O_4) โครงสร้างสปินเนลแบบพื้นฐาน (AB_2O_4): A: ไอออนโลหะชนิดสองวาเลนซ์ (Mg^{2+}), B: ไอออนโลหะชนิดสามวาเลนซ์ (Fe^{3+}), O: แอนไอออนออกซิเจน (O^{2-}), มีโครงสร้างผลึกลูกบาศก์แบบ FCC (face-centered cubic)

ภายในหนึ่งเซลล์หน่วยมี $\text{Mg}^{2+} = 8$ ตำแหน่ง A-site, $\text{Fe}^{3+} = 16$ ตำแหน่ง B-site, $\text{O}^{2-} = 32$ แอนไอออนใน FCC

เซลล์หน่วย (unit cell) ของสปินเนลมีไอออนรวม 56 ไอออน/เซลล์

ตารางที่ 1.7 การคำนวณปริมาตรไอออนในเซลล์หน่วยของแมกนีไซต์เฟอไรต์ (MgFe_2O_4) ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ไอออน	รัศมีไอออน (Å)	จำนวนในเซลล์
Mg^{2+}	0.72 Å	8
Fe^{3+}	0.645 Å	16
O^{2-}	1.40 Å	32

ขั้นตอนการคำนวณ

1. คำนวณปริมาตรของไอออนในเซลล์ $V = \frac{4}{3}\pi r^3$

2. ปริมาตรของไอออนทั้งหมดใน 1 เซลล์หน่วย

$$\text{Mg}^{2+} (8 \text{ ตัว}): V_{\text{Mg}^{2+}} = 8 \cdot \frac{4}{3}\pi (0.72)^3 = 8 \cdot 1.563 = 12.50 \text{ \AA}^3$$

$$\text{Fe}^{3+} (16 \text{ ตัว}): V_{\text{Fe}^{3+}} = 16 \cdot \frac{4}{3}\pi (0.645)^3 = 16 \cdot 1.124 = 17.98 \text{ \AA}^3$$

$$\text{O}^{2-} (32 \text{ ตัว}): V_{\text{O}^{2-}} = 32 \cdot \frac{4}{3}\pi (1.40)^3 = 32 \cdot 11.49 = 367.68 \text{ \AA}^3$$

รวมปริมาตรทั้งหมดของไอออน:

$$3. \text{ คำนวณปริมาตรของเซลล์หน่วย (} V_{\text{ions}} = 12.50 + 17.98 + 367.68 = 398.16 \text{ \AA}^3$$

$$V_{\text{cell}} = a^3 = (8.39)^3 = 590.49 \text{ \AA}^3$$

$$4. \text{ คำนวณ IPF} \quad \text{IPF} = \frac{V_{\text{ions}}}{V_{\text{cell}}} = \frac{398.16}{590.49} \approx 0.674 \text{ หรือ } 67.4\%$$

ค่า Ionic Packing Factor ของ MgFe_2O_4 มีค่าประมาณ 0.674 หรือ 67.4% แสดงว่าโครงสร้างสปีเนลมีการอัดเรียงตัวของไอออนค่อนข้างแน่นหนาคล้ายกับโครงสร้างของเกลือแกง NaCl และเหมาะกับการนำไปใช้ในงานด้านวัสดุแม่เหล็กและวัสดุเซรามิกนำไฟฟ้า

- ค่า IPF อาจแตกต่างกันไปตามขนาดและชนิดของไอออนแต่ละชนิด หากมีการเติมธาตุอื่นลงในสูตรโครงสร้างเพื่อการแทนที่ (doping) เช่น Ni^{2+} เติมแทนที่ตำแหน่งของ Zn^{2+} จะมีผลต่อความหนาแน่นและการอัดเรียงตัวของโครงสร้าง
- ข้อมูลที่ได้จากค่า IPF ช่วยวิเคราะห์ **ความเสถียรของผลึก, ความพรุน, และคุณสมบัติด้านแม่เหล็ก**

3. วัสดุพอลิเมอร์ (polymeric materials)

วัสดุพอลิเมอร์สามารถจำแนกได้หลายวิธีเช่นเดียวกับวัสดุเซรามิก เช่น การจำแนกตามแหล่งวัตถุดิบพอลิเมอร์, ตามลักษณะโครงสร้างผลึก, ตามลักษณะการจัดเรียงมอนอเมอร์ในโครงสร้างโมเลกุลและการจัดแบ่งตามการจัดเรียงรูปร่างของสายโซ่โมเลกุล โดยมอนอเมอร์มีการยึดเกาะกันด้วยพันธะหลักชนิดโคเวเลนต์ (Covalent bond)^{6,32}

3.1 การจำแนกตามแหล่งวัตถุดิบพอลิเมอร์ (Classification by Raw Material Sources)

3.1.1 พอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural Polymers) คือพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตหรือสิ่งแวดล้อมมักมีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนและย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ^{46,53,56} ดังรูป 1.31 ตัวอย่างเช่น

คาร์โบไฮเดรต เช่น เซลลูโลส (cellulose), แป้ง (starch), ไกลโคเจน

โปรตีน เช่น เคซีนในนม, ไหม (silk), ขนสัตว์

กรดนิวคลีอิก เช่น ดีเอ็นเอ (DNA), อาร์เอ็นเอ (RNA)

พอลิไอโซพรีน เช่น ยางธรรมชาติ (natural rubber)

ไบโอพอลิเมอร์อื่นๆ เช่น ไคติน (chitin), ไคโตซาน (chitosan)^{58,61} จากเปลือกหุ้มของสัตว์ทะเล

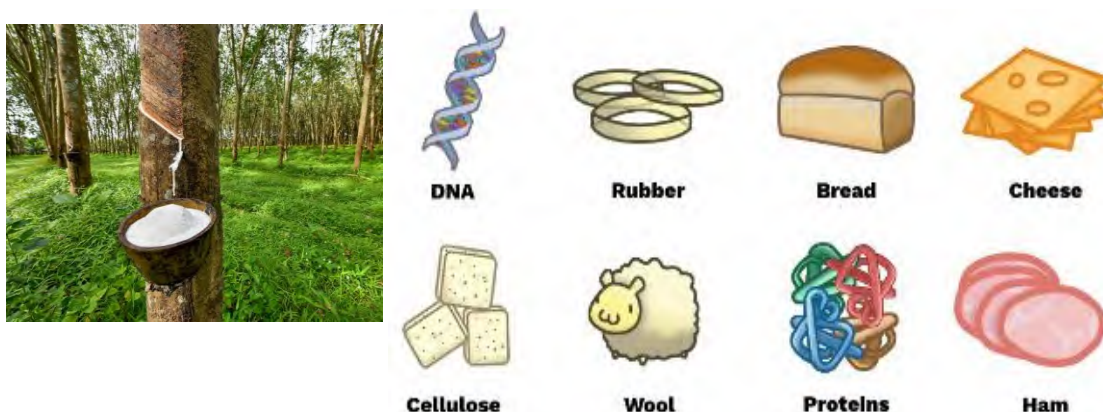
3.1.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers) คือพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการหรือในอุตสาหกรรม มีลักษณะเด่นคือมักมีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้านทนสารเคมีได้ดี ราคาถูก สามารถปรับแต่งได้ตามการใช้งาน โดยแบ่งตามกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ไรเซชันได้ 2 ชนิดคือ addition polymerization และ condensation polymerization ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.32 และ 1.33

Addition Polymerization เช่น พอลิเอทิลีน (PE), พอลิสไตรีน (PS), พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC), พอลิโพรพิลีน (PP)^{62,65}

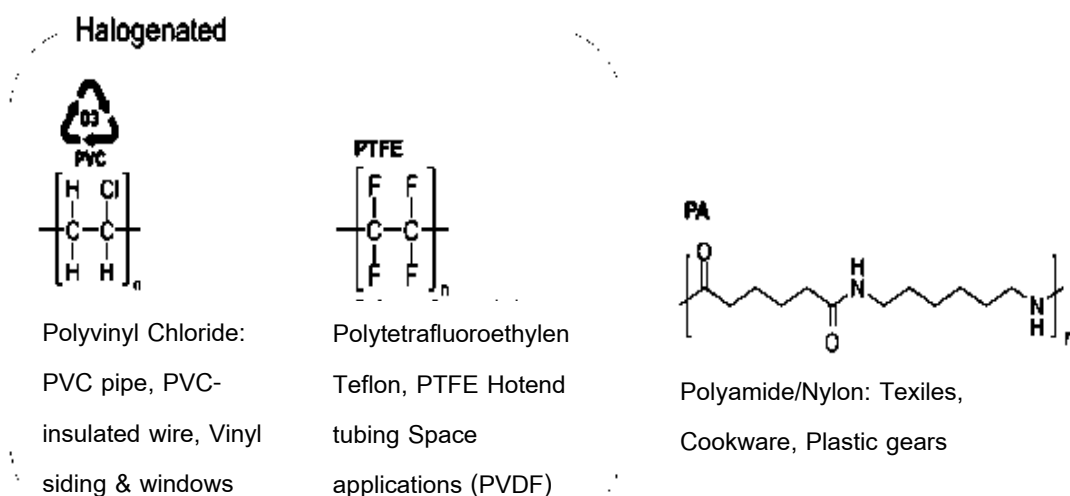
Condensation Polymerization เช่น ไนลอน (Nylon), พอลิเอสเตอร์ (PET), พอลิยูรีเทน (Polyurethane), เมลามีนฟอรัลดีไฮด์⁶⁰

3.1.3 พอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์ (Semi-synthetic Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการปรับแต่งหรือดัดแปลงโครงสร้างของพอลิเมอร์ธรรมชาติโดยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้มีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะด้าน โดยมีจุดเด่นคือเป็นการใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติเป็นฐานแล้วทำการปรับแต่งให้เหมาะกับการใช้งานทางอุตสาหกรรม เช่น สิ่งทอ, ยา, วัสดุทางการแพทย์, ที่สามารถย่อยสลายได้ดีในธรรมชาติมากกว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไป ตัวอย่างพอลิเมอร์กึ่งสังเคราะห์มีดังนี้

- ไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose): ได้จากการเติมกรดไนตริกลงในเซลลูโลสใช้ทำฟิล์ม พลาสติกเคลือบ
- เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate): ใช้ทำแว่นตา, ไฟเบอร์, ฟิล์ม
- เรยอน (Rayon): เส้นใยเซลลูโลสแปรรูปใช้ทอผ้า



รูปที่ 1.31 ตัวอย่างแหล่งที่มาของพอลิเมอร์จากธรรมชาติ ที่มา Ashby⁶

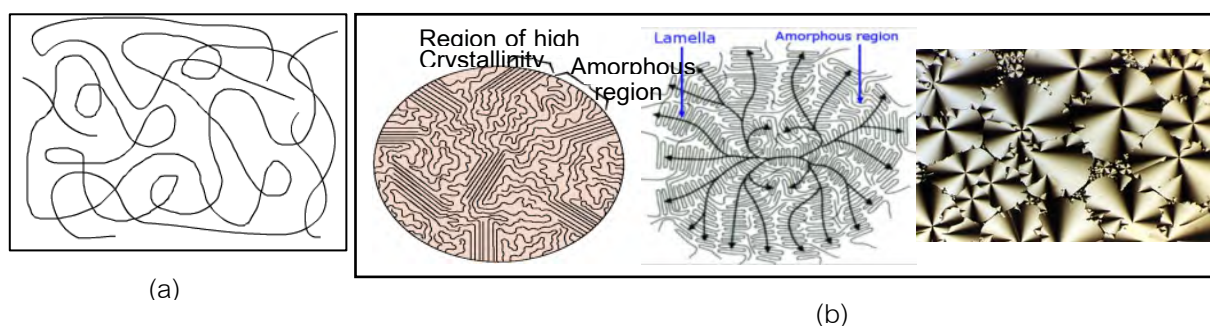


รูปที่ 1.32 ตัวอย่างพอลิเมอร์สังเคราะห์จากกระบวนการทางอุตสาหกรรม ที่มา Ashby⁶

3.2 การจัดแบ่งพอลิเมอร์ตามลักษณะโครงสร้างผลึก แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

3.2.1 พอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous polymer) คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลไม่เป็นระเบียบ ไม่สม่ำเสมอ มีความหนาแน่นต่ำ โปร่งใส ไม่มีจุดหลอมเหลวที่แน่นอน มีความเหนียวและความยืดหยุ่นในบางกรณี ดังรูป 1.33a

3.2.2 พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) คือวัสดุพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลบางส่วนแบบผลึก (Crystalline part) เรียกโครงสร้างผลึกนี้ว่าลามลลา (Lamella) และมีโครงสร้างบางส่วนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous matrix) ปะปนอยู่ด้วยกัน ทำให้ได้โครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์ที่เรียกว่า Spherulite หรือ พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline) ส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์นี้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ทนความร้อนหรือรับแรงทางกลสูงขึ้น ด้านทานการซึมผ่านโมเลกุลขนาดเล็กหรือด้านทานตัวทำละลายได้ดีกว่าพอลิเมอร์อสัณฐาน ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นแต่จะมีสมบัติทางแสงลดลง อาจมีลักษณะโปร่งแสงหรือทึบแสง ดังรูป 1.33b



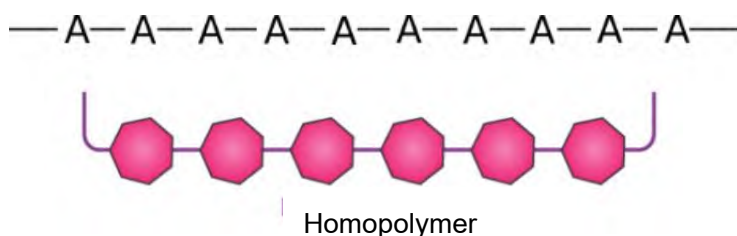
รูปที่ 1.33 การจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลของโครงสร้างวัสดุพอลิเมอร์: (a) พอลิเมอร์อสัณฐาน และ (b) พอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline) ที่มา ASM International³⁷

3.3 การจำแนกวัสดุพอลิเมอร์ตามลักษณะการจัดเรียงมอนอเมอร์ในโครงสร้างโมเลกุล โดยใช้เกณฑ์การจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ตามการจัดเรียงมอนอเมอร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ โฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) และ โคพอลิเมอร์ (Copolymer)

3.3.1 โฮโมพอลิเมอร์คือพอลิเมอร์ที่เกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ประกอบด้วยหน่วยซ้ำหรือมอนอเมอร์ (Monomer) ชนิดเดียวกันตลอดทั้งโครงสร้างโมเลกุล ดังรูปที่ 1.34 ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน (มอนอเมอร์คือ เอทิลีน), พอลิไวนิลคลอไรด์ (มอนอเมอร์คือ ไวนิลคลอไรด์), พอลิโพรพิลีน (มอนอเมอร์คือ โพรพิลีน), แป้งและไกลโคเจนมีมอนอเมอร์เป็นกลูโคส, ยางธรรมชาติมีไอโซพรีนเป็นมอนอเมอร์ ตัวอย่างมอนอเมอร์ของโฮโมพอลิเมอร์แต่ละชนิดดังต่อไปนี้

- **พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)** มอนอเมอร์ คือ เอทิลีน ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$)
- **พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride, PVC)** มอนอเมอร์ คือ ไวนิลคลอไรด์ ($\text{CH}_2=\text{CHCl}$)
- **พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)** มอนอเมอร์ คือ โพรพิลีน ($\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$)

- แป้ง (Starch) มอนอเมอร์ คือ กลูโคส
- ไกลโคเจน (Glycogen) มอนอเมอร์ คือ กลูโคส
- ยางธรรมชาติ (Natural rubber) มอนอเมอร์ คือ ไอโซพรีน (C_5H_8)

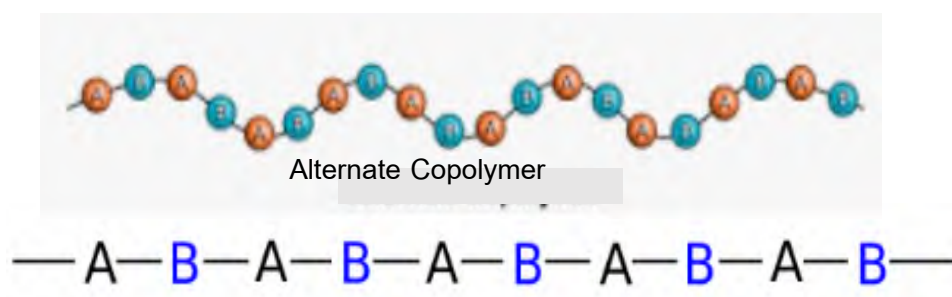


รูปที่ 1.34 โครงสร้างของวัสดุโฮโมพอลิเมอร์ ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

3.3.2 **โคพอลิเมอร์ (Copolymer)** คือวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์มอนอเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปผ่านกระบวนการที่เรียกว่า **โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Copolymerization)** โดยหน่วยมอนอเมอร์เหล่านี้จะถูกรวมอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์เดียวกัน ส่งผลให้ได้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างไปจากพอลิเมอร์ที่ได้จากมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว (โฮโมพอลิเมอร์) แบ่งได้เป็น 4 ชนิด ตัวอย่างของโคพอลิเมอร์ในธรรมชาติและในอุตสาหกรรม ได้แก่

- **โปรตีน** เป็นโคพอลิเมอร์จากกรดอะมิโนหลากหลายชนิด
- **ไนลอน** เกิดจากการดะดิปิก (adipic acid) และเฮกซะเมทิลีนไดอะมีน (hexamethylene diamine)
- **พอลิยูรีเทน (Polyurethane)** เป็นผลจากการรวมตัวของไดไอโซไซยาเนตกับไดออล เช่น 1,2-เอทิลีนไดไอโซไซยาเนต และ 1,2-เอทิลีนไกลคอล

3.3.2.1 **Alternating copolymer** เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีหน่วยมอนอเมอร์ A และ B เรียงสลับกันอย่างเป็นระเบียบตลอดความยาวของสายโซ่โมเลกุล เช่น -A-B-A-B-A-B-A-B- ลักษณะการเรียงตัวแบบนี้ช่วยให้วัสดุมีสมบัติที่สม่ำเสมอและสามารถควบคุมคุณสมบัติได้อย่างแม่นยำ ดังรูป 1.35



รูปที่ 1.35 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด Alternating copolymer ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ตัวอย่างการใช้งาน Alternating Copolymer ในงานวิศวกรรมขั้นสูง^{64,72,75,84,135}

1. วัสดุตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดยืดหยุ่น (Flexible Electronics Conductive Polymers) วัสดุ Alternating Copolymer ของ Pyrrole และ Thiophene ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบยืดหยุ่น, เซ็นเซอร์ทางการแพทย์, และหน้าจอ OLED โครงสร้างแบบสลับของหน่วยที่ให้อิเล็กตรอน (donor) และรับอิเล็กตรอน (acceptor) ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพและให้สมดุลระหว่างความยืดหยุ่นและการนำไฟฟ้า
2. เมมเบรนแยกก๊าซขั้นสูง (High-Performance Gas Separation Membranes) วัสดุ Alternating Copolymer ของ Fluorinated Monomer และ Aromatic Diimide ใช้ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไนโตรเจนหรือการฟอกอากาศ โครงสร้างแบบสลับช่วยควบคุมขนาดและความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซได้อย่างแม่นยำเหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมพลังงาน, อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมสิ่งแวดล้อม
3. วัสดุเรืองแสงในเทคโนโลยีควอนตัมดอต (Quantum Dot LED - QLED) วัสดุ Alternating Copolymer ของ Fluorene และ Benzothiadiazole ใช้ในแผงแสดงผล QLED ที่มีความละเอียดสูง โครงสร้าง alternating ช่วยควบคุมช่องว่างแถบพลังงาน (bandgap) ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลต่อความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมาใช้เป็นวัสดุสร้าง เลเยอร์เปล่งแสง (emissive layer) ที่ให้สีสดใสอย่างแม่นยำ
4. วัสดุโฟโตเรซิสต์ในไมโครลิโทกราฟี (Photoresist for Lithography) วัสดุ Alternating Copolymer ของ m-Cresol และ Formaldehyde Derivatives ใช้ในกระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ระดับนาโนเมตร (Nanoscale semiconductor fabrication) โครงสร้างที่สลับอย่างเป็นระเบียบ ช่วยให้วัสดุตอบสนองต่อแสงได้ดี และมีความละเอียดสูงในการพิมพ์ลวดลายสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิป, วงจร IC, และหน่วยความจำ
5. วัสดุประกอบสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอินทรีย์ (Organic Photovoltaics ชนิด OPV) วัสดุ Alternating Copolymer ของ Donor-Acceptor Units เช่น Diketopyrrolopyrrole (DPP)-based copolymers ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีน้ำหนักเบา, มีความยืดหยุ่น, และโปร่งแสง โครงสร้างแบบ alternating ช่วยปรับความสามารถในการดูดกลืนแสงและเพิ่มการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเหมาะสำหรับผลิตหลังคาพลังงานแสงอาทิตย์, ผนังอาคาร, หรืออุปกรณ์พกพา

ข้อสรุปจุดเด่นของ Alternating Copolymer สำหรับงานวิศวกรรมขั้นสูง

- โครงสร้างแบบสลับช่วยควบคุมสมบัติอิเล็กทรอนิกส์, แสง, ความสามารถในการแยกสารได้อย่างแม่นยำ
- มีการออกแบบเฉพาะทางเพื่อตอบสนองการใช้งานระดับนาโนเทคโนโลยี, โฟโตนิกส์, และพลังงานสะอาด
- เหมาะกับอุปกรณ์ที่ต้องการประสิทธิภาพสูง, น้ำหนักเบา, และมีความยืดหยุ่น

3.3.2.2 Block copolymer เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์แต่ละชนิดมีการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มหรือการจัดเรียงโครงสร้างแบบบล็อกก่อนเกิดการเชื่อมต่อกับกลุ่มมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น -A-A-A-B-B-B-A-A- ลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างนี้ ส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติสองแบบผสมกันและสามารถเกิดการแยกเฟสภายในโครงสร้างวัสดุได้ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการผลิตวัสดุนาโนหลายชนิด ตัวอย่างเช่น^{127-128,140}

1. PS-b-PMMA (Polystyrene-block-Poly(methyl methacrylate)) เป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ใช้กันแพร่หลายในการผลิตวัสดุนาโน เช่น การสร้างลวดลายระดับนาโนเมตร (nanopatterning) บนแผ่นเวเฟอร์สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

- เฟสของ PS และ PMMA จะแยกออกจากกันและจัดเรียงเป็นโครงสร้างต่างๆ เช่น เส้นตรง, จุด, หรือรังผึ้ง
- สำหรับใช้ในเทคโนโลยีลิโทกราฟีระดับนาโน (Nanolithography) เพื่อการผลิตชิป

2. PEO-b-PS (Poly(ethylene oxide)-block-Polystyrene) ใช้ในงานออกแบบโครงสร้างนาโนของวัสดุเมมเบรน (membrane) และในการผลิตนาโนพอร์ส (nanoporous materials)

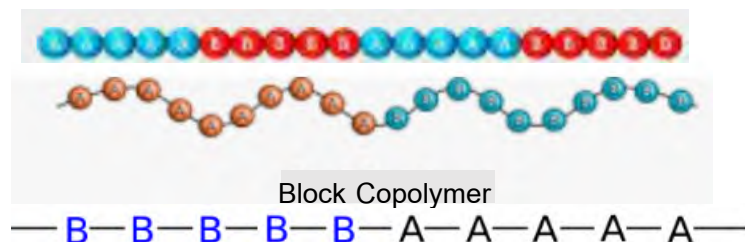
- PEO เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ ในขณะที่ PS ไม่ละลายน้ำ
- สามารถใช้ในงาน การกรองระดับนาโน หรือ เซ็นเซอร์ชีวภาพ ได้

3. Pluronic® (PEO-PPO-PEO triblock copolymer) Pluronic เป็นโคพอลิเมอร์แบบสามบล็อก (triblock) ที่มี PEO (Polyethylene oxide) อยู่ปลายทั้งสองข้าง และ PPO (Polypropylene oxide) อยู่ตรงกลาง

- นิยมใช้ในอุตสาหกรรมนาโนไบโอเทคโนโลยี เช่น ระบบนำส่งยา (drug delivery systems)
- สามารถสร้างไมเซลล์ (micelle) หรือเจลนาโน เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิหรือ pH ที่แตกต่างกัน

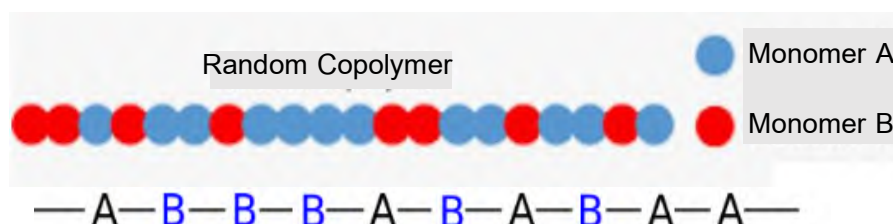
4. PB-b-PEO (Polybutadiene-block-Poly(ethylene oxide)) ใช้สำหรับสร้างโครงสร้างแบบไบเลเยอร์ (bilayer membrane) และนาโนคอนเทนเนอร์ (nanocontainers)

- มีบทบาทในงานชีววิศวกรรม เช่น โมเดลเมมเบรนของเซลล์ หรือ นาโนแคปซูลสำหรับนำส่งยา¹³³



รูปที่ 1.36 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด block copolymer ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

3.3.2.3 Random copolymer โคพอลิเมอร์ชนิดนี้มีการจัดเรียงของมอนอเมอร์ A และ B อย่างสุ่มทั่วทั้งสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น -A-B-A-A-B-B-A-B-A- การจัดเรียงตัวแบบสุ่มของมอนอเมอร์ ช่วยลดการตกผลึกในโครงสร้างวัสดุ ทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นและโปร่งแสงมากขึ้น



รูปที่ 1.37 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด random copolymer ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

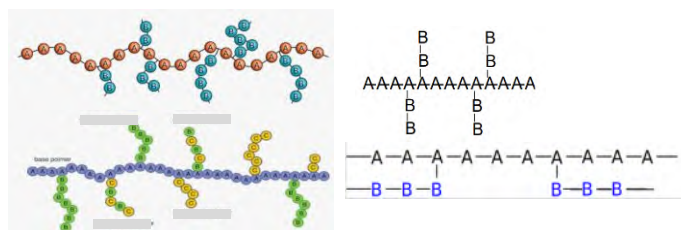
ตัวอย่างผลิตภัณฑ์วิศวกรรมขั้นสูงจาก Random Copolymer^{147, 154}

1. **ฉนวนสายไฟคุณภาพสูง (High-Performance Wire Insulation)** วัสดุ Ethylene-Propylene Random Copolymer (EPR) ใช้ในอุตสาหกรรมไฟฟ้าแรงสูงและรถยนต์ไฟฟ้า (EV) มีความยืดหยุ่นสูง, ทนความร้อน, ทนสารเคมี, มีคุณสมบัติฉนวนไฟฟ้าที่ดีและทนต่อการแตกร้าวจากความเครียด (stress cracking) ได้ดีกว่า polyethylene ปกติ
2. **การผลิตวัสดุทางการแพทย์ (Medical-Grade Injection Molded Parts)** วัสดุ Styrene-Isoprene Random Copolymer ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น **ตัวเชื่อมต่อหลอดเลือด (catheter hubs), ท่อ flexible tubing, หรือชิ้นส่วนข้อต่อพลาสติก ข้อโดดเด่นคือมีความสมดุลที่ระหว่างความใส, ความแข็งแรง, และ** ความยืดหยุ่นผ่านมาตรฐานความปลอดภัยทางชีวภาพ (biocompatibility)
3. **วัสดุเคลือบผิวป้องกันการกัดกร่อน (Anti-Corrosion Coatings)** วัสดุ Fluorinated Random Copolymers เช่น PVDF-HFP (Polyvinylidene fluoride–hexafluoropropylene) มีข้อดีคือ ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมพลังงาน เช่น เคลือบท่อส่งสารเคมี, ถังเก็บ, แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่สามารถทนกรด-ด่างและทนต่อตัวทำละลายได้ดีและมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีจึงใช้ผลิตเมมเบรนเซลล์เชื้อเพลิงและแผ่นแยกแบตเตอรี่
4. **ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ขั้นสูง (High-Performance Packaging Films)** วัสดุ Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Random Copolymer ใช้ในบรรจุภัณฑ์ยา, อาหาร, หรือเซลล์แสงอาทิตย์ (solar panel encapsulant) มีความใส, ทนแรงกระแทก, มีความยืดหยุ่น, และทนทานต่อความชื้น สำหรับ EVA ถูกใช้ในการห่อหุ้มแผงโซลาร์เซลล์เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานและป้องกันรังสี UV
5. **เลนส์แว่นตาแบบกันกระแทก (Impact-Resistant Optical Lenses)** วัสดุ Random Copolymer of Methyl Methacrylate and Butyl Acrylate มีความโปร่งใสสูงเหมือนอะคริลิก, มีความเหนียวเพิ่มขึ้น, ไม่เปราะ และใช้ทำเลนส์นิรภัย, แผ่นปิดหน้าจออิเล็กทรอนิกส์หรือแผ่นป้องกันแรงกระแทกสำหรับอุปกรณ์วิศวกรรม

สรุปสมบัติเด่นของ Random Copolymer มีหลายประการดังนี้

- มีความยืดหยุ่นและความเหนียวที่ดีกว่า homopolymer
- ทนต่อแรงเค้น, ทนสารเคมี, และทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง
- เหมาะสำหรับงานที่ต้องการสมบัติทางกลแบบพิเศษโดยไม่ต้องใช้สารเติมแต่ง

3.3.2.4 Graft copolymer เป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยสายโซ่หลัก (main chain) และสายโซ่ข้าง (side chain) โดยสายโซ่หลักมักประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งและสายโซ่ข้างจะประกอบด้วยมอนอเมอร์อีกชนิดที่แตกต่างกัน การมีสายโซ่ข้างที่แทรกอยู่ในโครงสร้างส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นต่ำ, จุดหลอมเหลวต่ำ, และสามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับความร้อน เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)



รูปที่ 1.38 โครงสร้างของวัสดุโคพอลิเมอร์ชนิด graft copolymer ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในงานวิศวกรรมขั้นสูงจาก Graft Copolymer¹⁹⁵⁻¹⁹⁷ มีดังนี้

1. โครงสร้างรองรับแรงกระแทกในอากาศยาน (Aircraft Impact-Absorbing Components) วัสดุ Graft Copolymer ของสายโซ่หลัก Polybutadiene กับสายโซ่กิ่ง Polystyrene หรือ PMMA ใช้เป็นวัสดุดูดซับแรง (shock-absorbing material) สำหรับชิ้นส่วนที่ต้องรับแรงสั่นสะเทือนหรือแรงกระแทก โครงสร้างสายโซ่กิ่งช่วยเพิ่มความเหนียว, ลดแรงกระแทกได้ดี, และมีน้ำหนักเบา เหมาะกับงานอากาศยานที่ต้องการวัสดุเบาแต่แข็งแรง
2. เคลือบผิววัสดุเพื่อเพิ่มการยึดเกาะ (Surface Functional Coatings) วัสดุ Graft Copolymer ของสายโซ่หลัก Polypropylene กับสายโซ่กิ่ง Maleic Anhydride สำหรับใช้ในการเคลือบโลหะ, พลาสติก, หรือวัสดุผสม (composite) สายโซ่กิ่งช่วยเพิ่มกลุ่มฟังก์ชันที่ทำให้วัสดุสามารถยึดติดกับพื้นผิวอื่นได้ดีขึ้นและใช้ในการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์หรืองานโครงสร้างวิศวกรรมที่มีวัสดุหลายชนิดประกอบกัน
3. วัสดุนั่นกันเสียงและกันแรงสั่นสะเทือน (Vibration-Damping and Acoustic Insulation Materials) วัสดุ Graft Copolymer ของ EVA กับ Polyurethane หรือ Nitrile Rubber สามารถใช้กับโครงสร้างภายในของยานยนต์หรือห้องเครื่องจักรที่ต้องการลดเสียงและลดแรงสั่นสะเทือน สายโซ่กิ่งของพอลิเมอร์ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy dissipation) ที่มีความยืดหยุ่นสูงและอายุการใช้งานยาวนาน
4. วัสดุสมาร์ทเจลในอุปกรณ์การแพทย์ (Smart Hydrogel Materials) วัสดุ Graft Copolymer ของสายโซ่หลัก Polyacrylic acid กับสายโซ่กิ่ง Polyethylene glycol สำหรับใช้เป็นวัสดุเจลเปลี่ยนรูปร่างหรือเปลี่ยนสถานะตามอุณหภูมิหรือค่า pH ใช้ในเซนเซอร์ชีวภาพ (biosensors) หรือ ระบบนำส่งยา (drug delivery systems) โครงสร้างสายโซ่กิ่งช่วยควบคุมการปลดปล่อยยาได้อย่างแม่นยำ
5. วัสดุขึ้นรูป 3 มิติที่เปลี่ยนรูปร่างได้ (4D Printing Materials) วัสดุ Graft Copolymer ที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิหรือแสง เช่น PLA-g-PNIPAM ใช้ในเทคโนโลยี 4D Printing ที่วัสดุสามารถเปลี่ยนรูปร่างเองได้ภายหลังพิมพ์ โครงสร้างสายโซ่กิ่งช่วยให้วัสดุเปลี่ยนสถานะได้ไวและควบคุมได้ง่าย สามารถประยุกต์ใช้งานในทางการแพทย์, วิศวกรรมหุ่นยนต์ หรือโครงสร้างอัจฉริยะ (adaptive structures)

กล่าวโดยสรุปคุณสมบัติเฉพาะของ Graft Copolymer ที่เหมาะกับงานวิศวกรรมขั้นสูงมีดังนี้

- มีความสามารถในการปรับแต่งสมบัติแบบ "ตามสั่ง" ผ่านการเลือกสายโซ่หลักและสายโซ่กิ่ง
- มีความยืดหยุ่น น้ำหนักเบา และสามารถเปลี่ยนรูปได้
- เหมาะกับงานที่ต้องการความหลากหลายของสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อน (thermo mechanical properties)

3.4 การจัดจำแนกพอลิเมอร์ตามรูปร่างของโครงสร้างโมเลกุล พอลิเมอร์สามารถจำแนกได้ตามลักษณะการจัดเรียงของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ, ความแข็งแรง, ความยืดหยุ่น, การหลอมละลาย, และการนำไปใช้งาน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลัก ดังนี้

3.4.1 พอลิเมอร์แบบเส้น (Linear Polymer) พอลิเมอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยสายโซ่หลักที่มอดเมอร์เชื่อมต่อกันในลักษณะเป็นเส้นตรงโดยไม่มีการแตกกิ่ง โครงสร้างแบบเส้นสามารถเรียงตัวกันได้อย่างหนาแน่น

ส่งผลให้วัสดุมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก รวมถึงมีความแข็งแรง, ความเหนียวสูง อย่างไรก็ตามเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถรีไซเคิลได้ โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนซ้ำ

คุณสมบัติเด่น: ความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวสูง มีลักษณะแข็งและเหนียว อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นตัวลง สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์และผ่านการรีไซเคิลได้ด้วยความร้อน

ตัวอย่างวัสดุ:

- **พอลิเอทิลีน (PE):** โครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลเรียงตัวชิดกัน, แข็งแรง, เหนียว, มีลักษณะขุ่น
- **พอลิสไตรีน (PS):** มีการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์ห่างกัน จึงมีลักษณะโปร่งใสมากกว่า
- **พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET):** มีวงแหวนอะโรมาติกในสายโซ่หลัก ทำให้การจัดเรียงแบบผลึกทำได้ยาก โครงสร้างจึงเป็นอะมอร์ฟัส ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะใสมาก



รูปที่ 1.39 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบเส้น ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ตัวอย่างการใช้งานพอลิเมอร์แบบเส้นในงานวิศวกรรมขั้นสูง^{36,45,51,55}

1. การเสริมแรงพอลิเมอร์ด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFRP) วัสดุพอลิเมอร์คือโพลีเอไมด์ (PA), พอลิเอสเตอ์ (PET)

ลักษณะ: พอลิเมอร์แบบเส้นที่มีโครงสร้างแน่นและแข็งแรงถูกนำมาใช้เป็นเมทริกซ์ (matrix) ร่วมกับเส้นใยคาร์บอน

การใช้งาน: ชิ้นส่วนอากาศยาน (เช่น ปีก, เครื่องยนต์, หางเครื่องบิน), โครงสร้างรถยนต์น้ำหนักเบา, อุปกรณ์กีฬา เช่น ไม้เทนนิส ไม้กอล์ฟระดับโปร **ข้อดี:** น้ำหนักเบาแต่รับแรงได้สูง ทนแรงกระแทก

2. ฟิล์มบางพิเศษสำหรับผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Ultrathin Film for Electronics) วัสดุพอลิเมอร์คือพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET)

ลักษณะ: โครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้นที่เรียงตัวเป็นระเบียบสำหรับการผลิตฟิล์มบาง, ความแข็งแรงสูงและโปร่งใส

การใช้งาน: ฟิล์มแสดงผล OLED ฟิล์มกั้นรอยในอุปกรณ์พกพา พื้นผิวโค้งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยืดหยุ่น

ข้อดี: โปร่งใส, ความต้านทานเชิงกลดี, มีความแม่นยำสูงในกระบวนการผลิต

3. วัสดุเกรดยานอวกาศ (Space-Grade Polymer Materials) วัสดุพอลิเมอร์ชนิดพอลิอิไมด์ (Polyimide – PI)

ลักษณะ: พอลิเมอร์แบบเส้นที่มีพันธะแข็งแรงทนต่ออุณหภูมิสูงมาก

การใช้งาน: ฉนวนไฟฟ้าในดาวเทียมและสถานีอวกาศ ฟิล์มเคลือบแผงวงจรที่ต้องทำงานในอุณหภูมิสูง

ข้อดี: คงรูปแม้ที่อุณหภูมิเกิน 400°C และไม่เกิดการเปราะแตกในสภาวะสุญญากาศ

4. วัสดุเส้นใยนาโนสำหรับการแพทย์ (Electrospun Nanofibers)^{29,32,42}

- วัสดุพอลิเมอร์ชนิดพอลิแคพรอแลกโตน (PCL), พอลิแลกติกแอซิด (PLA)

- **ลักษณะ:** พอลิเมอร์แบบเส้นถูกดึงเป็นเส้นใยนาโนเมตรด้วยเทคนิค electrospinning

- การใช้งาน:

- วัสดุรองรับการงอกของเนื้อเยื่อ (tissue scaffold)
- ระบบนำส่งยา (drug delivery systems)

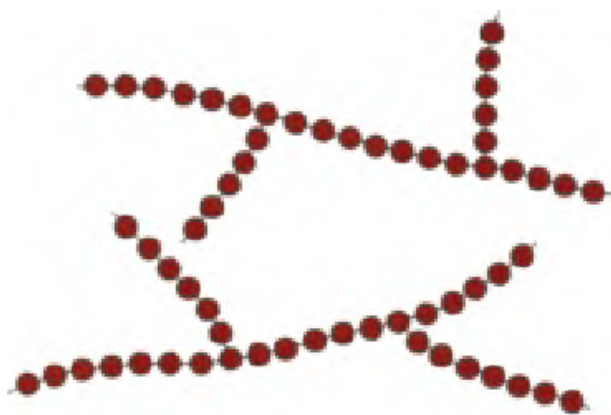
- ข้อดี: ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, มีความพรุนสูง, ช่วยการยึดเกาะและการเจริญเติบโตของเซลล์

ตารางที่ 1.8 สรุปข้อดีของพอลิเมอร์แบบเส้นในงานวิศวกรรมขั้นสูง^{36,45,51,55}

คุณสมบัติ	ประโยชน์ในงานวิศวกรรม
โครงสร้างโมเลกุลแน่น	แข็งแรง รับแรงสูง ใช้ในโครงสร้างพลังงานและการบิน
มีจุดหลอมเหลวแน่นอน	เหมาะกับการขึ้นรูปที่มีความแม่นยำสูง เช่น 3D printing
โปร่งใส	ใช้ทำฟิล์มบางและชิ้นส่วนโปร่งแสงในงานอิเล็กทรอนิกส์
ย่อยสลายได้ (บางชนิด)	ใช้ในการแพทย์และวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

3.4.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง (Branched Polymer) คือ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลซึ่งสายโซ่ของมอนอเมอร์หลักมีการแตกแขนงหรือมี **สายโซ่กิ่ง** (Side chains) ต่อก่อออกมาจากสายโซ่หลัก (Main chain) ซึ่งสายโซ่กิ่งนี้อาจเป็นสายโซ่สั้นหรือสายโซ่ยาวและไม่จำเป็นต้องเรียงตัวอย่างมีระเบียบตลอดทั้งโครงสร้าง สายโซ่หลักมีการแตกแขนงออกเป็นสายโซ่กิ่งในตำแหน่งสุ่ม การแตกแขนงนี้ทำให้โมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตัวชิดกันได้ดี ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ

คุณสมบัติสำคัญของพอลิเมอร์แบบกิ่งมีดังนี้ ความหนาแน่นต่ำเนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลห่างกันมากขึ้น, จุดหลอมเหลวต่ำเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง, ความเหนียวน้อยเนื่องจากโครงสร้างไม่ต่อเนื่องทำให้การรับแรงไม่ดีเท่าพอลิเมอร์แบบเส้น, ความยืดหยุ่นต่ำเพราะสายโซ่กิ่งที่แทรกแซงการเคลื่อนที่ของโมเลกุล, พอลิเมอร์ชนิดนี้จะละลายหรืออ่อนตัวได้เมื่อได้รับความร้อนจึงสามารถรีไซเคิลได้ด้วยความร้อน, โครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส (Amorphous) ที่มีความโปร่งแสงและไม่ตกผลึกง่าย



รูปที่ 1.40 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบกิ่ง ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

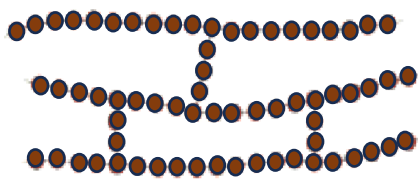
ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบกึ่งที่พบได้ทั่วไป⁴⁷

- LDPE (Low-Density Polyethylene): พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีสายโซ่กิ่งจำนวนมาก มีความแตกต่างจาก HDPE ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง
- Amylopectin (แอมิโลเพกติน): สารประกอบเชิงซ้อนของแป้งที่มีโครงสร้างแตกกิ่งจำนวนมาก
- Branched Polystyrene: ใช้ทำผลิตภัณฑ์ฉนวนในอุตสาหกรรมและบรรจุภัณฑ์ เช่น โฟมที่ขึ้นรูปได้ง่าย

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในวิศวกรรมขั้นสูงของพอลิเมอร์แบบกึ่ง^{47,48}

1. **ฟิล์มบางในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชนิดยืดหยุ่น** พอลิเมอร์แบบกึ่ง เช่น LDPE หรือพอลิเมอร์ร่วม (copolymer) ที่มีโครงสร้างแตกแขนงถูกใช้เป็นวัสดุฐานสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดยืดหยุ่น (flexible electronics) เพราะสามารถดัดโค้งและแปรรูปได้ง่าย
2. **พอลิเมอร์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ** พอลิเมอร์แบบกึ่งมีคุณสมบัติในการไหลและขึ้นรูปดีเยี่ยมเหมาะกับการพิมพ์ 3 มิติที่ต้องการความละเอียดสูงและโครงสร้างซับซ้อน เช่น การผลิตต้นแบบหรือโครงสร้างเบาในงานอากาศยาน
3. **วัสดุบรรจุภัณฑ์พิเศษ (Smart Packaging)** LDPE ที่มีคุณสมบัติกันความชื้น ใช้ทำฟิล์มอาหารและฟิล์มทางการแพทย์ เพิ่มเติมสารเติมแต่งเพื่อให้อบสนองต่ออุณหภูมิหรือความดัน
4. **พอลิเมอร์ดูดซับแรงกระแทก (Impact-absorbing polymer)** พอลิเมอร์แบบกึ่งสามารถปรับความหนืด (viscosity) และการคืนรูปเพื่อใช้เป็นวัสดุกันกระแทก เช่น แผ่นกันกระแทกในหมวกนิรภัยหรือแผ่นรองเข่าในงานวิศวกรรมความปลอดภัย

3.4.3 **พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง (Crosslinked polymer)** คือ พอลิเมอร์ที่สายโซ่โมเลกุลถูกเชื่อมโยงเข้าหากันด้วยพันธะเคมีระหว่างโมเลกุล (crosslinking) ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายสองมิติหรือสามมิติที่ยึดโยงโมเลกุลพอลิเมอร์หลายสายเข้าด้วยกัน ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลและทนความร้อนที่ดีขึ้น **ลักษณะทางโครงสร้างคือ** มีการสร้างพันธะโควาเลนต์ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์และมีการเชื่อมขวางอาจเกิดในระดับน้อย (lightly crosslinked) หรือมาก (highly crosslinked) การเชื่อมโยงอาจเกิดขึ้นได้ระหว่างกระบวนการสังเคราะห์หรือโดยการใช้สารเคมี, ความร้อน, หรือรังสี ดังนั้นจึงเป็นพอลิเมอร์ที่มีจุดเด่นด้านความทนทาน, ความเสถียรทางความร้อน และสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าพอลิเมอร์แบบเส้นหรือแบบกึ่งคือมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง ทนต่อสารเคมี ทนต่อการฉีกขาดและทนต่อเสีรูปถาวร แต่ข้อเสียคือไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลโดยการหลอมได้โดยง่าย ดังนั้นการออกแบบการใช้งานจึงต้องพิจารณาตั้งแต่ต้นทางถึงปลายทาง



รูปที่ 1.41 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง^{179,181}

ตัวอย่างกรณีศึกษาวิจัยจากการวัลคาไนซ์ (Vulcanized Rubber) ยางธรรมชาติ (NR) ด้วยการเติมกำมะถัน (S) แล้วอบด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดการปฏิกิริยา ทำให้โครงสร้างเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูง คงรูปได้ดี เหนียว สำหรับใช้ในการผลิตล้อยางรถยนต์, รองเท้า, ซีลยาง, และฟิล์มถุงมือแบบใช้ครั้งเดียว ดังรูปที่ 1.42



ก)

ข)

ค)

ง)

รูปที่ 1.42 ฟิล์มถุงมือจากกระบวนการจุ่มพิมพ์ในน้ำยางธรรมชาติ ก) แม่พิมพ์เซรามิก, ข) การจุ่มพิมพ์ในน้ำยางธรรมชาติ, ค) การถอดฟิล์มยาง, ง) ฟิล์มถุงมือยาง ที่มา Tangboriboon, N. et al.^{179,181}

พอลิเมอร์ยูรีเทนแบบเทอร์โมเซต (Thermoset Polyurethane) คือพอลิเมอร์ที่มีพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่หลัก ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป ใช้ในการผลิตโฟมกันกระแทก และ วัสดุบุภายในรถยนต์ **อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy Resin)** คือ พอลิเมอร์ที่แข็งตัวผ่านการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโมเลกุล เมื่อทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา (Hardener) นิยมใช้ในงานเคลือบผิว (Coating), วัสดุประกอบในอากาศยาน, และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde) คือพอลิเมอร์เชื่อมขวางที่ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า, ฐานรองวงจรอิเล็กทรอนิกส์, และ ชิ้นส่วนที่ต้องการทนความร้อนสูง

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในวิศวกรรมขั้นสูง^{1,142,183}

1. อุตสาหกรรมการบิน ยานยนต์ ซีลยาง, บูชกันสั่น, และ ยางรถล้อ ใช้ยางวัลคาไนซ์ซึ่งทนต่อแรงกระแทก, ทนความร้อน และทนการสึกหรอจากการใช้งานระยะยาว
2. วัสดุผสมในอากาศยาน (Aerospace Composites) พอลิเมอร์เชื่อมขวาง เช่น อีพ็อกซีเรซิน ถูกใช้ร่วมกับไฟเบอร์ เช่น คาร์บอนไฟเบอร์ หรือเส้นใยแก้ว เพื่อผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง และทนความร้อนสูง
3. วงจรและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวางที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าและทนต่ออุณหภูมิสูง เช่น อีพ็อกซีสำหรับใช้เคลือบแผ่นวงจร (PCB), ตัวต้านทาน, หรือชิ้นส่วนชิป
4. ฟันปลอมและวัสดุทางทันตกรรม พอลิเมอร์แบบเชื่อมขวาง เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) ที่ผ่านกระบวนการ Crosslinking เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ทนต่อการแตกร้าวในฟันปลอมและครอบฟัน^{34,38}

3.4.4 **พอลิเมอร์แบบร่างแห (Network polymer)** คือพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็น **โครงข่ายสามมิติ (3D Network)** โดยการเชื่อมโยงกันระหว่างมอนอเมอร์จำนวนมากด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะเคมีถาวร ซึ่งเกิดขึ้นในหลายทิศทางตลอดโครงสร้าง ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความคงตัวสูงทั้งด้านความร้อน, เชิงกล, และทางเคมี **ลักษณะโครงสร้างคือ เป็นโครงข่าย 3 มิติ** ที่โมเลกุลมอนอเมอร์ทุกโมเลกุลเชื่อมต่อกันโดยตรงมักเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีหลายจุดในมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 2 ตำแหน่ง ไม่สามารถหลอมเหลวหรือขึ้นรูปใหม่ได้เพราะโครงสร้างคงทนถาวรและไม่ไหลตัว

คุณสมบัติเด่นของพอลิเมอร์แบบร่างแห มีความแข็งแรงเชิงกลสูงรองรับแรงกระทำทุกทิศทาง, ความแข็งแรงสูง, เปราะ, ไม่ยืดหยุ่น, และไม่สามารถรีไซเคิลได้ด้วยความร้อน^{22,23}

ตัวอย่างพอลิเมอร์แบบร่างแห

เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ (Melamine Formaldehyde) ใช้ผลิตภาชนะบรรจุอาหาร, ทนความร้อนสูง, และรับแรงกระแทกได้ดี, มีคุณสมบัติเฉื่อยต่อสารเคมี, และมีฉนวน

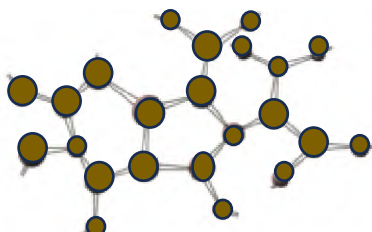
ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (Urea Formaldehyde) นิยมใช้ผลิตกาวที่มีแรงยึดเกาะสูง, ฉนวนไฟฟ้า, และแผ่นไม้อัด มีราคาต้นทุนต่ำ และมีความแข็งแรงสูงหลังการเซตตัว^{22,23}

พอลิเอสเตอร์เรซิน (Unsaturated Polyester Resin) ใช้ในวัสดุผสม (Composite Materials) เช่น แผ่นไฟเบอร์กลาส, ชิ้นส่วนเรือ, แผงตกแต่งที่มีความแข็งแรง ทนสารเคมี และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยแม่พิมพ์

อีพ็อกซีเรซินแบบร่างแห (Thermoset Epoxy Resin) ใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยานและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น แผงวงจรไฟฟ้า(PCB), วัสดุประกอบกับไฟเบอร์เนื่องจากมีโครงสร้างร่างแหจึงทำให้ทนความร้อนสูงและแข็งแรงมาก

ตัวอย่างการใช้งานในวิศวกรรมขั้นสูง^{23,43}

1. **วัสดุผสมในอากาศยาน** พอลิเมอร์แบบร่างแห เช่น **อีพ็อกซีเรซินผสมคาร์บอนไฟเบอร์** ใช้ผลิตโครงสร้างอากาศยานที่ต้องการความแข็งแรง น้ำหนักเบา และทนต่ออุณหภูมิสูง
2. **ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง** ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ และ **อีพ็อกซีเรซิน** ใช้ในงานหุ้มอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนประกอบในระบบไฟฟ้าแรงสูง
3. **วัสดุป้องกันสารเคมีในอุตสาหกรรม** โพลีเอสเตอร์เรซินแบบร่างแหที่เสริมด้วยไฟเบอร์กลาสใช้บุภายในถังเก็บสารเคมี, ท่อส่งของเสีย, หรือระบบกรองน้ำเสีย
4. **วัสดุป้องกันไฟและทนความร้อน** เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ใช้ทำแผ่นกันไฟ, ฉากกันความร้อน, และเฟอร์นิเจอร์ที่ทนเปลวไฟ



รูปที่ 1.43 รูปร่างการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพอลิเมอร์แบบร่างแห ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

4. วัสดุผสมหรือวัสดุคอมโพสิต (Composite materials)

วัสดุผสม หรือวัสดุคอมโพสิต หรือวัสดุประกอบ (composite materials) หมายถึง วัสดุที่ได้จากการผสมผสานวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปซึ่งมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจนในระดับแมโครสโคปหรือไมโครสโคป โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อสร้างวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติเชิงกล (mechanical properties), ทางกายภาพ (physical properties) หรือทางเคมี (chemical properties) ที่ดีขึ้นกว่าวัสดุตั้งต้นอย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบวัสดุผสมอาศัยแนวคิดของการเสริมแรง (reinforcement) และ ตัวกลางยึดประสาน (matrix) ซึ่งทำงานร่วมกัน เพื่อให้เกิดการเสริมสมรรถนะ เช่น ความแข็งแรง, ความเหนียว, ความทนทาน, น้ำหนักเบา, หรือทนต่อการกัดกร่อนและอุณหภูมิสูง^{1,23,89,91}

องค์ประกอบหลักของวัสดุผสม (Phases in Composite Materials) ประกอบด้วย สองเฟสหลักที่มีบทบาทแตกต่างกัน ได้แก่

1. เฟสเสริมแรง (Reinforcement phase หรือ Dispersed Phase) มักเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เช่น ไฟเบอร์, เซรามิก, หรือโลหะ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง, มอดุลัสความยืดหยุ่น, หรือเพื่อเพิ่มความทนทานให้กับวัสดุโดยรวม เป็นเฟสที่ถูกเติมลงในเมทริกซ์เพื่อเพิ่มสมรรถนะเฉพาะด้านของวัสดุผสม โดยมีสมบัติโดดเด่น เช่น ความแข็งแรง, ความแข็ง, ความทนทานต่อการเสียดสี หรือการนำความร้อนที่สูงกว่าเมทริกซ์อย่างมีนัยสำคัญ

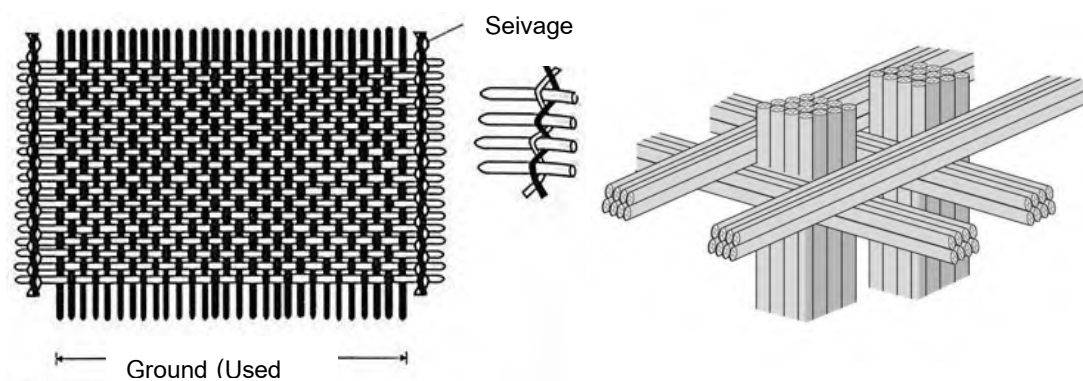
หน้าที่หลักของเฟสเสริมแรง ได้แก่

- เพิ่มความแข็งแรงเชิงกล (strength) และความแข็ง (stiffness)
- ช่วยเพิ่มความทนทานต่ออุณหภูมิ และทนทานต่อการเสื่อมสภาพ
- ลดการเปลี่ยนรูปร่างหรือทนการแตกร้าวของเมทริกซ์
- ปรับแต่งสมบัติเฉพาะทาง เช่น การนำไฟฟ้า, ความหนาแน่น, หรือความเหนียว

การจำแนกรูปร่างและรูปแบบของเฟสเสริมแรง การออกแบบเฟสเสริมแรงมีความหลากหลาย ทั้งในด้านรูปร่าง ขนาด และวิธีการจัดเรียงในเมทริกซ์ ตัวอย่างดังตารางที่ 1.9 และรูปที่ 1.44

ตารางที่ 1.9 รูปร่างของเฟสเสริมแรงในวัสดุผสม ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

รูปร่างของเฟสเสริมแรง	รายละเอียดและตัวอย่าง
อนุภาค (Particles)	อนุภาคทรงกลม เช่น อะลูมินาในอะลูมิเนียม (Al_2O_3/Al)
เส้นใยสั้น (Short fibers)	มีความยาวจำกัด เช่น คาร์บอนไฟเบอร์สั้นในเรซิน
เส้นใยยาว (Continuous fibers)	วางต่อเนื่องในทิศทางเดียวกัน เช่น CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
เส้นใยถักทอ (2D/3D woven fibers)	ถักเป็นผืนเพื่อเสริมแรงหลายทิศทาง เช่น เส้นใยในวัสดุผสมของอากาศยาน
ชั้นเคลือบผิว (Coatings or Laminates)	เช่น การเคลือบเซรามิกบนวัสดุโลหะเพื่อเพิ่มการทนความร้อน
แผ่นประกบหลายชั้น (Sandwich structures)	เช่น พอลิเมอร์-โฟม-พอลิเมอร์ สำหรับวัสดุน้ำหนักเบาแต่แข็งแรง



รูปที่ 1.44 การถักทอของเส้นใยแบบ 3 มิติ (3D) ที่มา Butchosa^{6,17,23,108}

2. **เฟสเมทริกซ์** หรือที่เรียกว่า **เฟสพื้น (Matrix phase)** เป็นวัสดุพื้นฐานหรือวัสดุยึดประสาน ซึ่งทำหน้าที่รับแรงจากภายนอก ถ่ายเทแรงไปยังเฟสเสริมแรง และปกป้องโครงสร้างจากการแตกร้าวหรือเสื่อมสภาพ เป็นเฟสที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างต่อเนื่อง (continuous phase) ซึ่งห่อหุ้มและยึดเกาะเฟสเสริมแรงเอาไว้ โดยเมทริกซ์อาจอยู่ในรูปของวัสดุประเภทโลหะ (metal matrix), พอลิเมอร์ (polymer matrix) หรือเซรามิก (ceramic matrix) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

หน้าที่หลักของเมทริกซ์ ได้แก่:

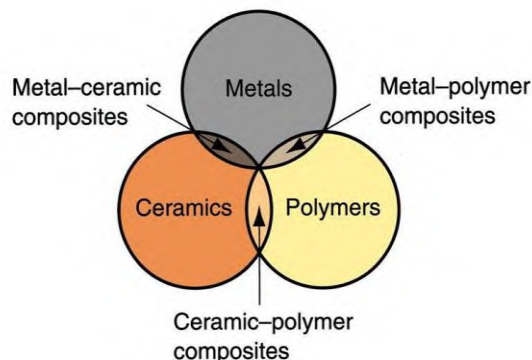
- **ถ่ายเทแรงและกระจายแรง (Load transfer):** รับแรงที่กระทำจากภายนอกและกระจายไปยังเฟสเสริมแรงอย่างทั่วถึง
- **ยึดเกาะโครงสร้าง (Binding):** ทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่ยึดเฟสเสริมแรงไว้กับที่
- **ป้องกันการแตกร้าว (Crack resistance):** ช่วยชะลอการเติบโตของรอยร้าว และลดผลกระทบจากแรงกระแทก
- **เพิ่มเสถียรภาพเชิงความร้อนหรือเคมี (Environmental protection):** ป้องกันเฟสเสริมแรงจากความชื้นและการเกิดออกซิเดชัน หรือทนการกัดกร่อน

วัตถุประสงค์ในการพัฒนาวัสดุผสม เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และความแข็งแกร่งจำเพาะ (specific stiffness), เพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น ทนอุณหภูมิสูง, ทนความชื้น หรือทนการกัดกร่อน, ลดข้อจำกัดของวัสดุตั้งต้น เช่น ความเปราะ หรือการเปลี่ยนรูป, เพิ่มความสามารถเฉพาะทาง เช่น การนำไฟฟ้า, ฉนวนไฟฟ้า, หรือการดูดซับพลังงาน

ตัวอย่างวัสดุผสมผลิตโดยหลักการของ “ระบบวัสดุหลายเฟส” (multi-phase material systems) เพื่อรวมข้อดีของวัสดุหลายชนิดไว้ในวัสดุเดียว โดยปรับปรุงสมบัติให้เหมาะกับการใช้งาน โดยเฉพาะงานด้านอุตสาหกรรมขั้นสูง เช่น อากาศยาน, ยานยนต์ไฟฟ้า, วิศวกรรมชีวเวช, และพลังงานหมุนเวียน ดังรูป 1.45

1. **คอมพอสิตโลหะ-เซรามิก** เช่น อะลูมิเนียมเสริมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC/Al MMCs)^{3,6}
2. **คอมพอสิตพอลิเมอร์-ไฟเบอร์** เช่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP), พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP)¹⁰⁸

3. คอมพอสิตเซรามิก-เซรามิก เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์เสริมอะลูมินา ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$)^{109,110,192}



รูปที่ 1.45 การรวมกลุ่มวัสดุหลักเพื่อการผลิตวัสดุผสม ที่มา นุชนภา ตั้งบริบูรณ์

การพิจารณาคุณลักษณะของเฟสก่อนเลือกใช้ในการผลิตวัสดุผสม โดยการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุผสมให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำความเข้าใจสมบัติพื้นฐานของทั้งเฟสเมทริกซ์ (Matrix Phase) และ เฟสเสริมแรง (Reinforcement Phase) อย่างถี่ถ้วน โดยควรพิจารณาทั้งข้อเด่น (advantages) และข้อด้อย (limitations) ของวัสดุแต่ละเฟส เพื่อให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงสมบัติโดยรวมของวัสดุคอมโพสิตให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน การเลือกเฟสที่เหมาะสมไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มสมรรถนะของวัสดุเท่านั้น แต่ยังช่วยลดข้อจำกัดเดิม เช่น ความเปราะ, การเสียรูปจากความร้อน หรือความสามารถในการรับแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีคุณภาพและมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น

ตัวอย่างการเลือกเฟสในวัสดุผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล, สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกายภาพ

1. วัสดุผสมเมทริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composites: MMCs)

วัตถุประสงค์: เพิ่มความสามารถในการรับแรงทางกล เช่น ความเค้นคราก (Yield strength, σ_y), ลดการเสียรูปจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (เพิ่ม Creep resistance), เพิ่มความทนทานต่อการสึกหรอ, และการใช้งานในสภาวะแวดล้อมรุนแรง ตัวอย่างการใช้งาน: ชิ้นส่วนเครื่องยนต์, เบรก, เฟลาขับในอากาศยานและยานยนต์^{6,108,203,204}

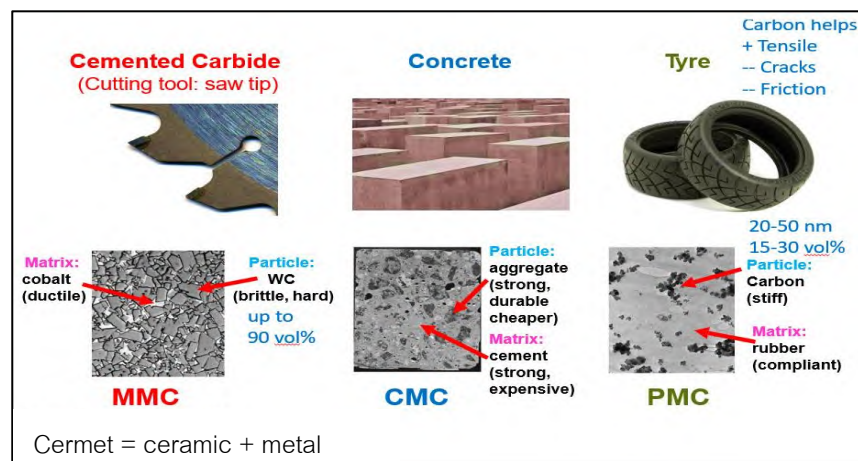
2. วัสดุผสมเมทริกซ์เซรามิก (Ceramic Matrix Composites: CMCs)

วัตถุประสงค์: เพิ่มความเหนียวแตกหัก (Fracture Toughness, K_{IC}) ของเซรามิกซึ่งโดยธรรมชาติจะเปราะ แต่มีความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและทนการกัดกร่อนในสิ่งแวดล้อมรุนแรงได้ดี ตัวอย่างการใช้งาน เช่น ใบพัดเทอร์ไบน์, เบรกเซรามิก, ชิ้นส่วนประกอบในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์

3. วัสดุผสมเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites: PMCs)

วัตถุประสงค์: เพิ่มมอดุลัสความยืดหยุ่น (Young's Modulus, E) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength, TS) ลดการเสียรูปภายใต้การรับแรงคงที่ในสภาวะอุณหภูมิสูง (Creep Resistance) ตัวอย่างการใช้งาน เช่น โครงสร้างอากาศยาน, ใบพัดโดรน, อุปกรณ์การแพทย์, แผ่นรองรับแรงกระแทก

การเลือกใช้วัสดุในแต่ละเฟสของคอมโพสิตควรพิจารณาทั้งในแง่ กลไกของการถ่ายเทแรง, การทำงานร่วมกันของโครงสร้างจุลภาค, และ สภาพแวดล้อมการใช้งานจริง เพื่อให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดกับภารกิจด้านวิศวกรรม ทั้งในเชิงโครงสร้าง (structural) และเชิงหน้าที่ (functional materials) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1.46

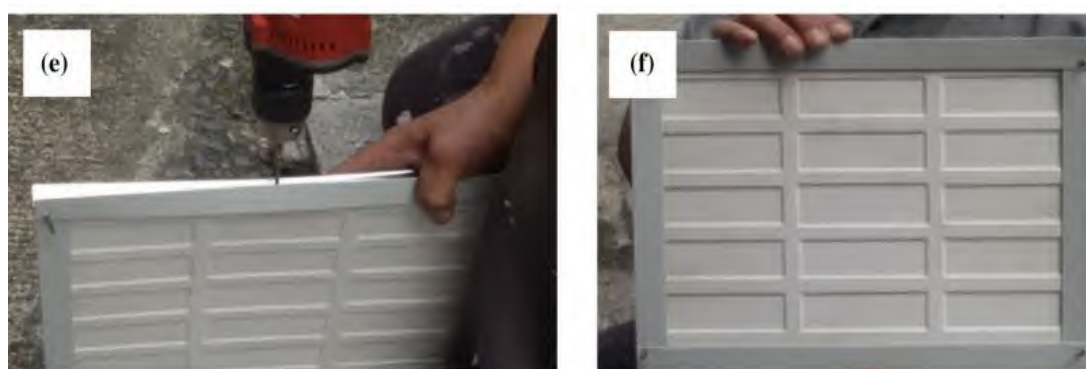


รูปที่ 1.46 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมโพสิตชนิด MMC, CMC และ PMC ที่มา Acquah^{1,6}

ตัวอย่างการผลิตวัสดุผสม

1. **วัสดุผสมเมทริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composites, MMCs):** การเคลือบผิวโลหะด้วยเซรามิก เช่น การเคลือบอีนาเมล (enamel) เพื่อเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อนและการทนความร้อน หรือการใช้ผงเซรามิกชนิดอะลูมินา (Al_2O_3) หรือซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ยึดติดลงบนผิววัสดุรองรับ เช่น กระดาษ หรือ ผ้า เพื่อผลิตกระดาษทราย, ผ้าทราย และแผ่นตัด

2. **วัสดุผสมเมทริกซ์เซรามิก (Ceramic Matrix Composites, CMCs):** เป็นการผลิตคอนกรีตจากส่วนผสมของหลายชนิด เช่น หิน ทราย น้ำ รวมกับซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการใช้งาน หรือการเคลือบผิวผลิตภัณฑ์เซรามิกด้วยเคลือบสี, เคลือบเงา หรือเคลือบทึบ เพื่อเพิ่มความสวยงามและความทนทานต่อการใช้งาน



รูปที่ 1.47 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมโพสิตชนิด CMC ที่มา Tangboriboon, N.^{106,123}

จากรูป 1.47 วัสดุผสมชนิดแผ่นผ้าใยขัดเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว ชิ้นงานตัวอย่างมีความแข็งแรงดี ความเหนียวสูง สามารถเจาะยึดติดกับโครงผ้าอะลูมิเนียมได้ดี เหมาะสำหรับทำแผ่นฉนวนผ้าเพดาน

3. **วัสดุผสมเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites, PMCs):** ตัวอย่างเช่น การเติมซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2), ทัลคัม (Talcum), แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3), หรือซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ลงในยางหรือน้ำยางเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลและความทนทานต่อความร้อนหรือการเคลือบแก้วลงบนผลิตภัณฑ์ที่สัณยต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการเกิดรอยขีดข่วน

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์คอมโพสิตที่พบเห็นทั่วไปคือคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยทราย หิน ปูนซีเมนต์ และน้ำ โดยหินและทรายทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรง เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างอาคาร ส่วนซีเมนต์ทำหน้าที่เป็นเฟสหลักซึ่งผลิตจากกระบวนการเผาคลิ้งเกอร์ (Clinker) ด้วยความร้อนสูง 1400°C ในกระบวนการทางเซรามิกเพื่อให้ได้คลิ้งเกอร์เหมาะสำหรับการก่อสร้าง นอกจากนี้ การสร้างถนนยางมะตอย (Asphalt Mix) ก็เป็นวัสดุผสมชนิดเมทริกซ์พอลิเมอร์ PMC ที่ประกอบด้วยบิตูเมนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบของอุตสาหกรรมปิโตรเลียม มีลักษณะเป็นน้ำมัน เหนียวข้น ความหนืดสูง สีดำ ของกลุ่มพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ถูกใช้เป็นเฟสหลัก และหินกรวดทำหน้าที่เป็นเฟสเสริมแรงให้กับโครงสร้างถนน การคำนวณประสิทธิภาพและสมบัติของวัสดุผสม สามารถทำได้โดยใช้สูตร Upper Bound (Voigt Model) และ Lower Bound (Reuss Model) สำหรับกรณีที่วัสดุคอมโพสิตใช้เฟสเสริมแรงชนิดอนุภาค ดังสมการ 1.9 และ 1.10

ค่าสูงสุดของผลิตภัณฑ์คอมโพสิต
$$E_u = V_m E_m + V_p E_p \quad (1.9)$$

ค่าต่ำสุดของผลิตภัณฑ์คอมโพสิต
$$E_l = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_p}{E_p} \quad (1.10)$$

โดยที่ E_u คือ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นสูงสุด, E_l คือ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นต่ำสุด, V_m คือ ปริมาณส่วนของเฟสหลัก, V_p คือ ปริมาณส่วนของเฟสเสริมแรง, E_m คือ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของเฟสหลัก, และ E_p คือ ค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นของเฟสเสริมแรง สำหรับวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เส้นใยช่วยเสริมแรงสามารถคำนวณค่าการรับแรงดึงได้จากสมการฐาน 1.11

$$TS = k \cdot V_f \cdot TS_f + V_m \cdot TS_m \quad (1.11)$$

โดยที่ TS คือ ค่าการรับแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต, k คือ ค่าคงที่สำหรับการคูณ ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของเส้นใย, V_f คือ ปริมาณส่วนของเส้นใย, TS_f คือ ค่าการรับแรงดึงของเส้นใย, V_m คือ ปริมาณส่วนของเฟสหลัก, และ TS_m คือ ค่าการรับแรงดึงของเฟสหลัก การคำนวณ**ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength)** ของวัสดุคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย (Fiber-Reinforced Composites) ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยส่งผลโดยตรงต่อการเสริมแรงให้กับเมทริกซ์กำหนดเป็นค่าตัวแปร k สามารถพิจารณาค่า k ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับ **การจัดเรียงตัวของเส้นใย (Fiber orientation)** ที่มีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ ดังตารางที่ 1.10

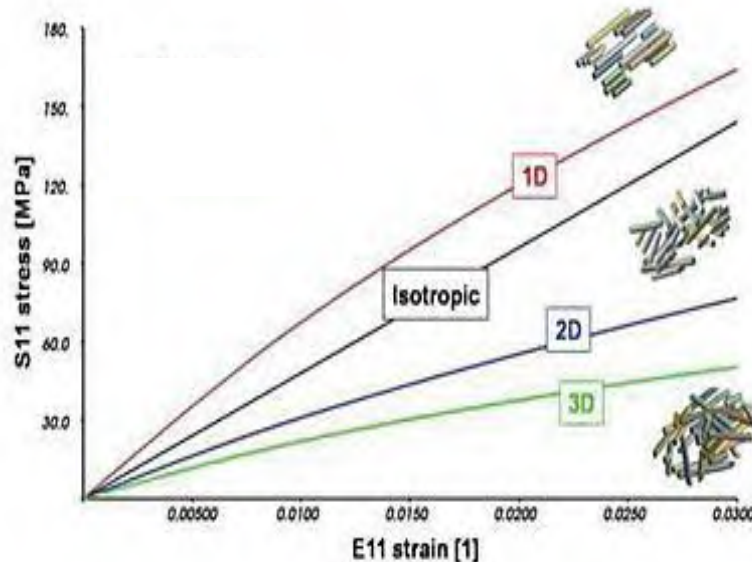
ตารางที่ 1.10 การพิจารณาค่า k ที่ใช้ตามลักษณะการจัดเรียงเส้นใยในเมทริกซ์^{6,203}

ลักษณะการจัดเรียงเส้นใย	ค่า k โดยประมาณ	รายละเอียด
เส้นใยจัดเรียงแบบขนานกับทิศแรง (Unidirectional)	0.9 – 1.0	ได้ประสิทธิภาพสูงสุด
เส้นใยจัดเรียงแบบสุ่ม (Random orientation in 2D)	0.4 – 0.5	ประสิทธิภาพลดลง เพราะการรับแรงไม่ตรง แนวทั้งหมด
เส้นใยจัดเรียงแบบสุ่มใน 3D (Random in 3D)	0.2 – 0.3	ประสิทธิภาพต่ำที่สุด แต่เหมาะสำหรับความ แข็งแรงรอบด้าน
การถักทอ (Woven or Braided fiber)	0.5 – 0.8	สมดุลระหว่างความแข็งแรงและความ ยืดหยุ่น
การจัดเรียงแบบเฉียง ($\pm 45^\circ$ to load)	0.3 – 0.6	เหมาะสำหรับการรับแรงเฉือน

การเลือกวัสดุคอมโพสิตที่เหมาะสม ควรพิจารณาคูสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดและการใช้งานที่ต้องการ เพื่อให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างเหมาะสม ดังรูปที่ 1.48 และตารางที่ 1.11

efficiency factor:

- aligned 1D: $K = 1$ (anisotropic)
- random 2D: $K = 3/8$ (2D isotropy)
- random 3D: $K = 1/5$ (3D isotropy)



รูปที่ 1.48 ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยต่อประสิทธิภาพการรับแรงทางกลของวัสดุคอมโพสิต ($1D > 2D > 3D$) ที่มา Ashby⁶

ตารางที่ 1.11 ทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยส่งผลต่อการรับและกระจายแรงที่ต่างกัน^{6,203}

การจัดเรียงตัวของเส้นใย	ทิศทางความเค้น	ประสิทธิภาพการเสริมแรง (K)
เส้นใยขนานกันทุกเส้น (1D)	ขนานกับเส้นใย	1
	ตั้งฉากกับเส้นใย	0
เส้นใยกระจายตัวในทิศทาง 2D	ทุกทิศทางระนาบ 2D	3/8
เส้นใยกระจายตัวในทิศทาง 3D	ทุกทิศทางระนาบ 3D	1/5

จากผลของค่า k ที่ขึ้นกับทิศทางและรูปแบบการจัดเรียงของเส้นใย พบว่ายิ่งเส้นใยจัดเรียงตัวตรงกับแนวการรับแรงมากเท่าใด ยิ่งทำให้ค่า k สูงมากขึ้น ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการเสริมแรงที่เพิ่มขึ้น การเลือกค่าที่เหมาะสมมีผลต่อการออกแบบวัสดุคอมโพสิตให้ตอบโจทย์การใช้งานในงานวิศวกรรมขั้นสูง จากลักษณะและทิศทางของการจัดเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุคอมโพสิตมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการรับแรงเชิงกลของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปวัสดุคอมโพสิตที่มีการจัดเรียงเส้นใยในทิศทางเดียว (One-dimensional fiber alignment; 1D) จะมีค่าการรับแรงทางกลสูงสุด เนื่องจากเส้นใยทั้งหมดรับแรงในทิศทางเดียวกันได้อย่างเต็มที่ ในขณะที่การจัดเรียงแบบสองมิติ (2D) เช่น การถักทอในระนาบหรือแนวตั้งฉากจะทำให้วัสดุมีสมบัติทางกลที่สมดุลในหลายทิศทาง แต่อาจมีประสิทธิภาพการรับแรงเฉพาะทิศทางที่ต่ำกว่าการจัดเรียงเส้นใยแบบ 1D, ส่วนการจัดเรียงแบบสุ่มในสามมิติ (3D random orientation) แม้จะให้ความแข็งแรงโดยรวมรอบทิศทางที่ดีแต่จะมีค่าความต้านทานต่อแรงกระทำที่ต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแบบ 1D และ 2D ดังรูปที่ 1.48

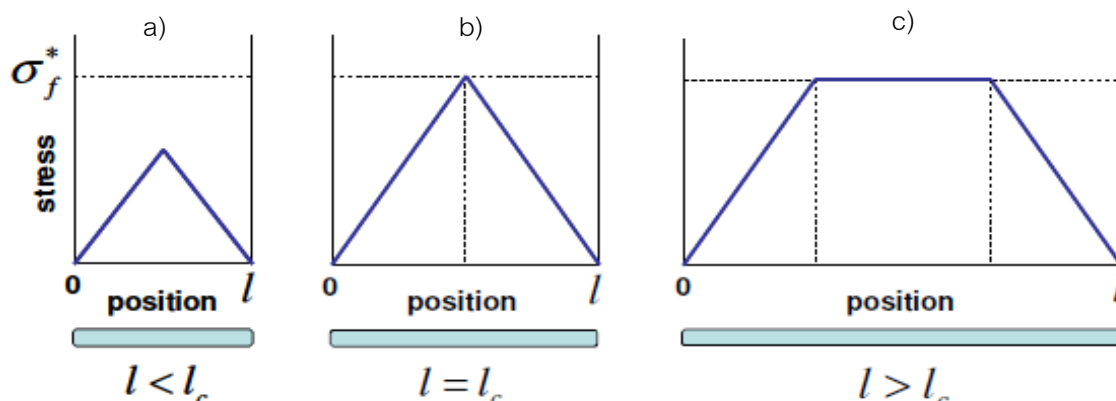
ตัวอย่างการใช้งานในงานวิศวกรรมขั้นสูง^{57,80,119}

- **แผ่นคอมโพสิตในเครื่องบิน** – ใช้เส้นใยคาร์บอนจัดเรียงแบบ unidirectional ค่า $k \approx 0.95$ เพื่อประสิทธิภาพการรับแรงดึงสูงสุด
- **ชิ้นส่วนโครงสร้างรถยนต์** – ใช้เส้นใยแก้วถักทอ ค่า $k \approx 0.6$ เพื่อสมดุลความแข็งแรงและต้นทุนการผลิต
- **แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์** – ใช้เส้นใยในทิศทางสุ่ม (random) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในทุกทิศทาง ค่า $k \approx 0.3$

นอกจากนี้ การเลือกใช้เส้นใยในวัสดุคอมโพสิตจำเป็นต้องพิจารณา **ค่าความยาววิกฤติของเส้นใย (Critical fiber length)** ซึ่งเป็นค่าที่ระบุว่าเส้นใยจะต้องมีความยาวเพียงพอสำหรับถ่ายเทแรงกระทำระหว่างเฟสเสริมแรง (Fiber) กับเฟสเมทริกซ์ (Matrix) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1.12

$$\text{Critical Fiber Length: } L_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (1.12)$$

dispersed phases strength in tension (σ_f)
 dispersed phases diameter (d)
 shear strength of dispersed phases -matrix interface (τ_c)

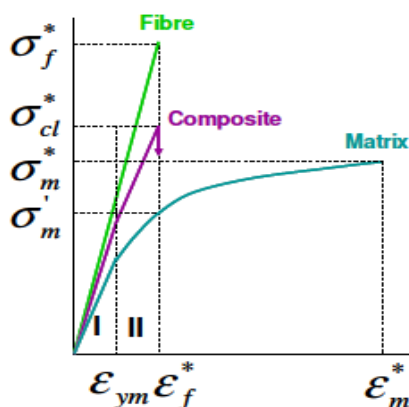


รูปที่ 1.49 การเลือกใช้ความยาวของเส้นใยที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับความยาววิกฤติ ที่มา Ashby⁶

ความยาววิกฤตินี้มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของวัสดุในการรับและกระจายแรง ดังแสดงใน รูปที่ 1.49

- **รูปที่ 1.49a:** หากความยาวของเส้นใย สั้นกว่าค่าความยาววิกฤติ จะทำให้ไม่สามารถถ่ายเทแรงได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุต่ำและเกิดการหลุดร่อนของเส้นใยได้ง่าย
- **รูปที่ 1.49b:** เมื่อความยาวของเส้นใย เท่ากับค่าความยาววิกฤติ วัสดุจะสามารถถ่ายเทแรงได้อย่างพอดี และมีประสิทธิภาพเชิงกลที่เหมาะสม
- **รูปที่ 1.49c:** หากใช้เส้นใยที่มีความยาว มากกว่าค่าความยาววิกฤติจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการเสริมแรง ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ และช่วยยืดอายุการใช้งานได้มากที่สุด

ดังนั้นการออกแบบวัสดุคอมโพสิตจึงควรกำหนดความยาว ความหนา ของเส้นใยให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งานและควรคำนึงถึงพฤติกรรมเชิงกลของระบบวัสดุที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ชนิดของเส้นใยที่เลือกใช้ก็ส่งผลต่อคุณภาพวัสดุคอมโพสิตเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 1.50



- σ_m' ความเค้นของเมทริกซ์เมื่อเส้นใยแตกหัก
- σ_m^* ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
- σ_{cl}^* ความเค้นสูงสุดของคอมโพสิต
- σ_f^* ความเค้นสูงสุดของเส้นใย
- ϵ_{ym} ความเครียด ณ จุดครากของเมทริกซ์
- ϵ_f^* ความเครียดสูงสุดเมื่อเส้นใยแตกหัก
- ϵ_m^* ความเครียดสูงสุดเมื่อเมทริกซ์แตกหัก

รูปที่ 1.50 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงต่อระยะยืดของวัสดุในคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวขนานกันกับทิศทางการรับแรง ที่มา Ashby⁶

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในงานวิศวกรรมของวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย

- ชิ้นส่วนโครงสร้างของยานพาหนะน้ำหนักเบา เช่น เพลารถ, แกนหมุน, ใบพัดของพัดลม, หรือท่อส่งของเหลวแรงดันสูง
- วัสดุเบรกและคลัตช์ (ใช้เส้นใยคาร์บอนหรือใยแก้วเสริมแรง)
- แผงเครื่องจักรและฝาครอบเครื่องกล ที่ต้องการความแข็งแรงและทนแรงสั่นสะเทือน

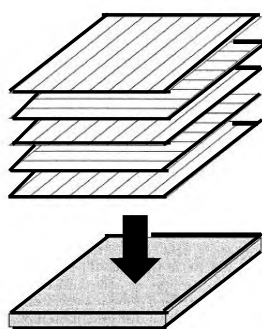
เส้นใยที่นิยมใช้: ใยแก้ว (Glass fiber), ใยคาร์บอน (Carbon fiber), ใยอะรามิด (Kevlar)

- โครงสร้างปีก, ลำตัว, ฝาครอบเครื่องยนต์, ใบพัดเฮลิคอปเตอร์
- ชิ้นส่วนดาวเทียม เช่น แผงโซลาร์เซลล์และแขนยึดอุปกรณ์

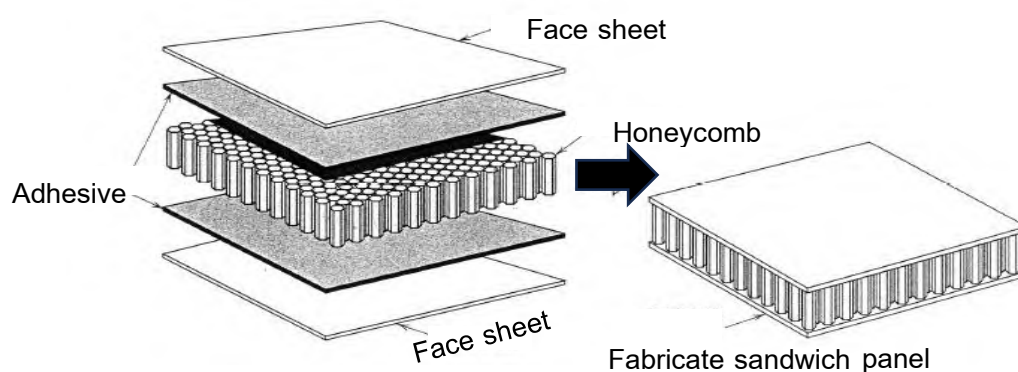
จากวัสดุคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์-อีพ็อกซี (CFRP), คอมโพสิตโพรอน-อีพ็อกซี, หรือคอมโพสิตเคฟลาร์

การออกแบบและการประยุกต์ใช้งานวัสดุผสมกับงานวิศวกรรมขั้นสูงที่เรียกว่า การผลิตวัสดุคอมโพสิตโครงสร้าง (Structural Composites)² มีสองลักษณะดังนี้

1. การเคลือบทับ (Laminate) – การจัดเรียงชั้นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลต่างกัน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการเสียรูป⁵² ดังรูปที่ 1.51
2. แบบแผ่นประกอบแซนด์วิช (Sandwich Panels) – การประกอบวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำระหว่างชั้นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง¹¹² เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและการลดน้ำหนัก ดังรูป 1.52



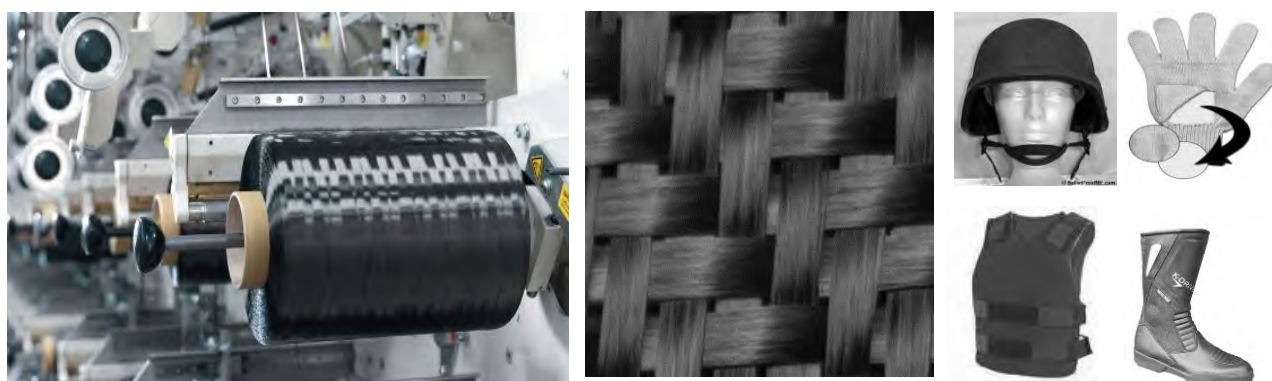
รูปที่ 1.51 วัสดุนาโนคอมโพสิตแบบเคลือบทับหรือลามิเนต ที่มา Courtney²³



รูปที่ 1.52 วัสดุนาโนคอมโพสิตชนิดแผ่นประกอบแบบแซนด์วิช ที่มา Courtney²³

วัสดุคอมโพสิตชนิดโครงสร้างมีข้อดีหลายประการ เช่น น้ำหนักเบา, รูปทรงสูง, มีความยืดหยุ่น, ความแข็งแรงสูง, ทนอุณหภูมิสูง, ทนความร้อน, ทนน้ำมัน และทนการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบรูปร่างและรูปทรงได้ตามต้องการ เช่น ทรงเหลี่ยม, ทรงกลม, ม้วนโค้ง หรือแบบรอยหยักที่เรียกว่าคอรูเกต (Corrugated Core) ตัวอย่างวัสดุโครงสร้างชนิดวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์พอลิเมอร์, วัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เซรามิก, และวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์โลหะดังต่อไปนี้

วัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์พอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites, PMCs) เป็นวัสดุที่มีการใช้งานแพร่หลายเนื่องจากราคาไม่แพงและสามารถขึ้นรูปได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง พอลิเมอร์ที่นิยมใช้เป็นเฟสพื้นมากที่สุดคือ พอลิเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ แต่ยังมีพอลิเมอร์ประเภทอื่นๆ อีก เช่น อีพอกซีซึ่งมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าและสามารถทนความชื้นได้สูงกว่า หรือพอลิไอมิดเรซิน (Polyimide resin) ซึ่งทนความร้อนได้ดีกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป จึงถูกใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 230°C สำหรับพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether etherketone, PEEK), พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (Polyphenylene sulphide, PPS), พอลิอีเทอร์ไอมิด (Polyetherimide, PEI) มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานด้านยานอวกาศ รวมทั้งการใช้เส้นใยเคฟล่า (Kevlar) ที่สามารถรับแรงทางกลสูงมากเพื่อการผลิตวัสดุคอมโพสิต เช่น ถุงมือ หมวก เสื้อผ้า รองเท้า^{108,203} ดังรูปที่ 1.53



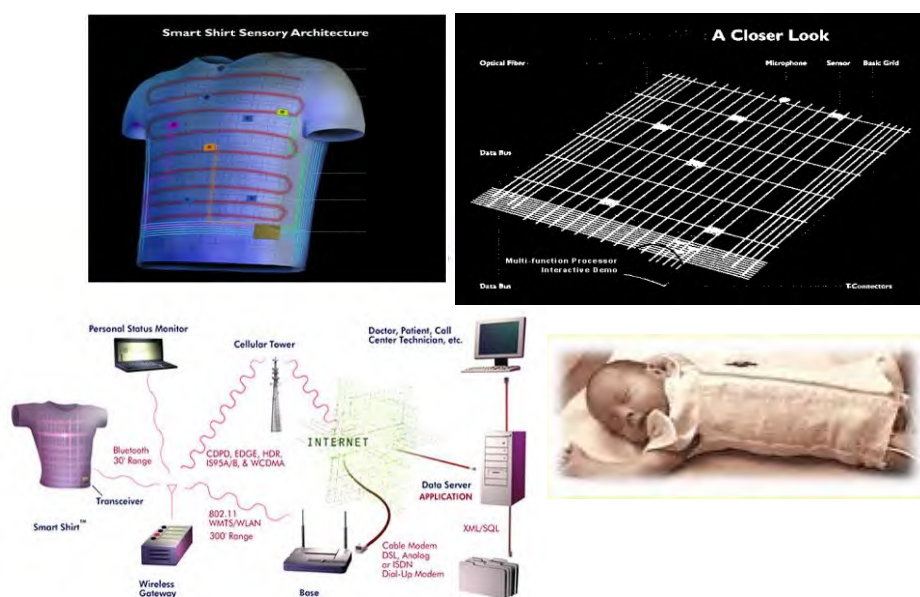
รูปที่ 1.53 การประยุกต์ใช้งานของผลิตภัณฑ์คอมโพสิตเคฟล่าเพื่อผลิต หมวก ถุงมือ รองเท้าและเสื้อกันกระสุนที่มาจาก Kroschwitz et al.⁸⁴

วัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เซรามิก (Ceramic Matrix Composites, CMCs) ถูกพัฒนาเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูงแต่เปราะ แตกหักง่าย โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซรามิก เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) หรือคาร์บอนเพื่อเพิ่มความเหนียวและความทนทานต่อการแตกหัก การประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เซรามิกมีหลายอย่าง เช่น การผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์อากาศยาน,^{92,108} โครงสร้างยานพาหนะ, ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์,¹¹⁵ เครื่องจักร, อุตสาหกรรมสิ่งทอ (เช่น เสื้อผ้าหรือเส้นใยทนความร้อน **เสื้ออัจฉริยะ (Smart shirt)**¹⁰⁸), ด้านการแพทย์สำหรับติดตามผลการรักษาผู้ป่วย, เด็ก, และทารก โดยการติดเซนเซอร์ไว้ภายในเสื้อหรือการผลิตเซนเซอร์เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ, ความร้อน, อัตราการแพร่ก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซอื่นๆ, อุตสาหกรรมกีฬาอาคราที่สามารถทนทานต่อแสงแดด, สะท้อนรังสีอัลตราไวโอเล็ต, เสื้อกันกระสุน, ฉนวนความร้อนสำหรับเครื่องบินและ

อากาศยาน, รถยนต์กันกระสุน, กระฉกกันกระสุน, หมวกนิรภัยรับแรงกระแทก รวมทั้งการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์, อุปกรณ์ทางการแพทย์และทันตกรรม⁸⁶ (เช่น รากฟันเทียม ฟันปลอม) ข้อดีของวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เซรามิก ได้แก่ ความแข็งแรงสูง, การยืดเกาะแน่น, ความเหนียวสูง, ประสิทธิภาพการใช้งานสูง, ลดต้นทุนการผลิตรับแรงกระแทกดี, ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนต่ำ, ทนการกัดกร่อน, น้ำหนักเบา, และมีความสวยงาม ดังมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 1.12

ตารางที่ 1.12 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของวัสดุนาโนเซรามิกคอมโพสิต^{81,85,120,139}

ระบบ	ประโยชน์
Cu-CdO	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (Electrical contact materials)
Al-ZrO ₂	ชิ้นส่วนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Possible use in nuclear reactors)
Be-BeO	ชิ้นส่วนอากาศยานและเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (Aerospace and nuclear reactors)
Co-ThO ₂ , Y ₂ O ₃	วัสดุแม่เหล็กที่สามารถต้านทานการยืดตัว (Possible creep-resistant magnetic materials)
Ni-20% Cr-ThO ₂	ส่วนประกอบของใบพัดในเครื่องยนต์ (Turbine engine components)
Pb-PbO	ขั้วแบตเตอรี่ (Battery grids)
Pt-ThO ₂	ขดลวดไฟฟ้า (Filaments), ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ (electrical components)
W-ThO ₂	ขดลวดไฟฟ้า (Filaments), ขดลวดความร้อนหรือฮีตเตอร์ (Heaters)



รูปที่ 1.54 ผลิตภัณฑ์วัสดุนาโนเซรามิกคอมโพสิตสำหรับการผลิตเสื้ออัจฉริยะสำหรับเด็กและผู้ป่วย ที่มา Saito¹³⁹

สรุปข้อดีของวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์เซรามิก คือ มีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูง, ทนความร้อนเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง, ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี, มีความเสถียรทางเคมีและสามารถคงรูปโครงสร้างได้ดีที่อุณหภูมิสูง, รับแรงกดอัดสูงเหมาะสำหรับใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูง, สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ

วัสดุคอมโพสิตที่เสริมด้วยท่อคาร์บอนนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotube-Reinforced Composites) เป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าสูง เนื่องจากท่อคาร์บอนนาโนมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาตามค่าความหนาแน่นของวัสดุ การเติมท่อคาร์บอนลงในเมทริกซ์วัสดุ เช่น พอลิเมอร์, โลหะ, หรือเซรามิก สามารถเพิ่มความแข็งแรง, ความเหนียว, และสมบัติทางไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ วัสดุคอมโพสิตที่เสริมด้วยท่อคาร์บอนมีการประยุกต์ใช้งานในหลายด้านของอุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, เซนเซอร์, วัสดุโครงสร้าง, และวัสดุสำหรับการแปลงพลังงาน^{22,137,132,139} โดยเฉพาะวัสดุคาร์บอน-คาร์บอนคอมโพสิต (Carbon-Carbon Nano composites)^{131,132} เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่น่าสนใจเนื่องจากมีค่ามอดูลัสรับแรงดึงและความต้านทานแรงดึงสูงที่อุณหภูมิสูงถึง 2000°C วัสดุนี้ยังมีความต้านทานการยืดตัว (Creep), ความทนทานต่อการแตกหัก, การนำความร้อนสูง, และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ สามารถนำไปใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องยนต์หลายอย่าง เช่น ทรานซิสเตอร์, จรวด, และเครื่องบิน ใช้เป็นวัสดุเพิ่มความเสถียรภาพประเภทเบรก, คลัช ให้กับเครื่องบิน, อากาศยาน และรถยนต์สมรรถนะสูง^{108,203} หรือทำแบบพิมพ์อัดร้อน (Hot Isostatic Pressing, Hot pressing) เป็นต้น

วัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composites, MMCs) ข้อโดดเด่นรวมของวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์โลหะชนิดโครงสร้าง (MMC) คือ การทนความร้อนและการทนแรงดึงได้ดีกว่าโลหะทั่วไป, ความแข็งแรงเชิงโครงสร้างสูงกว่าวัสดุเมทริกซ์เดี่ยว, ความต้านทานการสึกหรอและการเสียรูปจากการรับแรงภายนอกดีกว่าและสามารถปรับแต่งสมบัติได้ตามความต้องการใช้งาน เช่น การนำไฟฟ้า หรือการนำความร้อน ตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตเมทริกซ์โลหะ (Metal Matrix Composites: MMCs) ในงานวิศวกรรมขั้นสูง ที่สำคัญมีดังนี้

1. อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ (Al-SiC)^{108,203}

การใช้งาน: โครงสร้างของเครื่องบิน แผ่นเบรกในรถยนต์สมรรถนะสูง ชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เช่น กระบอกสูบ ลูกสูบ

ข้อดี: น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง ต้านทานการสึกหรอและการเสียรูปจากความร้อนดีเยี่ยม เหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะที่มีแรงกระทำสูงและมีความร้อนสะสม

2. ไทเทเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยโบรอน (Ti-Boron fiber)^{108,207,209}

การใช้งาน: โครงสร้างยานอวกาศ, ชิ้นส่วนของดาวเทียมที่ต้องการน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงมาก

ข้อดี: ความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) สูงมาก, ทนต่ออุณหภูมิสูงและสภาพแวดล้อมรุนแรง, และมีความเหนียวมากกว่าวัสดุเซรามิกในระดับเดียวกัน

3. แมกนีเซียมคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน (Mg-Carbon fiber)

การใช้งาน: อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ, โครงสร้างโดรน, หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบาเป็นพิเศษ

ข้อดี: หนึ่งในวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่สุด, มีความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกดี, ลดแรงเฉื่อยในชิ้นส่วนที่หมุนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. ทองแดงเสริมแรงด้วยอนุภาคอะลูมินา (Cu-Al₂O₃)¹⁸⁸

การใช้งาน: ขั้วไฟฟ้าในอุตสาหกรรมพลังงานไฟฟ้า, วัสดุสำหรับงานเชื่อมที่ต้องการทนความร้อน, และทนต่อกระแสไฟฟ้าสูง

ข้อดี: การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนดีมาก, เพิ่มความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อน, มีอายุการใช้งานยาวนานในสภาพแวดล้อมรุนแรง

นอกเหนือจากการจัดแบ่งวัสดุตามกลุ่มของงานวิศวกรรมวัสดุ ได้แก่ โลหะ (Metals), เซรามิก (Ceramics), พอลิเมอร์ (Polymers) และคอมโพสิต (Composites) แล้ว ยังสามารถจำแนกตามโครงสร้างระดับจุลภาคและความเป็นผลึก (Microstructure and Crystallinity) ของวัสดุได้เช่นกัน โดยแบ่งออกเป็น

1. วัสดุที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline Materials)
2. วัสดุที่มีโครงสร้างไร้ระเบียบหรืออะมอร์ฟัส (Amorphous Materials)
3. วัสดุกึ่งผลึก (Semicrystalline Materials)

ยังมีอีกหนึ่งกลุ่มวัสดุซึ่งถูกจำแนกแบบพิเศษตามลักษณะโครงสร้างอะตอมที่มีการเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายสามมิติ (3D Network) เรียกว่า วัสดุที่มีโครงสร้างแบบร่างแห (Network Structure Materials) เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบโครงข่ายสามมิติต่อเนื่องทำให้วัสดุเหล่านี้มีสมบัติแตกต่างจากวัสดุผลึกทั่วไป เช่น ความแข็งแรง, ความเปราะ, ความโปร่งใส, หรือพฤติกรรมทางความร้อน

วัสดุที่มีโครงสร้างแบบร่างแห (Network Structure Materials)

วัสดุที่มีโครงสร้างแบบร่างแห (Network Structure Materials) นี้เป็นกลุ่มพิเศษซึ่งมีบทบาทสำคัญทั้งในเชิงวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์คือเป็นกลุ่มวัสดุที่เชื่อมโยงเป็นโครงข่าย 3 มิติ ที่ไม่มีโครงสร้างหน่วยเซลล์เล็ก ๆ ที่เรียงซ้ำกันอย่างสม่ำเสมอเหมือนในผลึกทั่วไป แต่มีความต่อเนื่องของโครงข่ายพันธะตลอดวัสดุ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์, ทางเคมี และทางกลที่แตกต่างจากวัสดุผลึกหรือวัสดุอะมอร์ฟัสทั่วไป โดยมีลักษณะเด่นร่วมกันดังนี้

- การเชื่อมโยงของโครงข่ายอะตอมต่อเนื่อง เป็นโครงข่าย 2D หรือ 3D ผ่านพันธะหลัก (พันธะโควาเลนต์, พันธะไอออนิก, พันธะไฮโดรเจน)
- ความเสถียรเชิงโครงสร้างสูง ส่งผลให้มีสมบัติการทนความร้อน หรือการทนแรงดึง/แรงกดสูง
- สมบัติเฉพาะตัวชัดเจน: ตัวอย่างเช่น เพชรมีความแข็งที่สุดในธรรมชาติ, น้ำแข็งลอยน้ำได้, แกรไฟต์นำไฟฟ้าเฉพาะในแนวระนาบ
- โครงข่ายอะตอมมีความเสถียรสูง
- ทนต่ออุณหภูมิสูง และมีจุดหลอมเหลวสูง (ขึ้นกับประเภทพันธะภายในโครงข่าย)
- สามารถปรับสมบัติทางกล, ทางไฟฟ้า, และทางความร้อนได้โดยการเติมสารเจือปน
- มีบทบาทสำคัญในงานวัสดุอิเล็กทรอนิกส์, วัสดุเซรามิกพิเศษ, วัสดุนาโน และวัสดุทนไฟ

ตัวอย่างวัสดุที่มีโครงสร้างแบบร่างแห (Network Structure Materials) เช่น น้ำ, น้ำแข็ง, น้ำตาล, เกลือ, เพชร, แกรไฟต์, อัญมณี, ทับทิม, วัสดุกึ่งตัวนำ

เพชร (Diamond) – โครงสร้างร่างแหคาร์บอนแบบ 3 มิติ

ทับทิม (Ruby) และ ไพลิน (Sapphire) – โครงสร้างผลึกของอะลูมินา (Al_2O_3) แบบโครงข่าย⁴

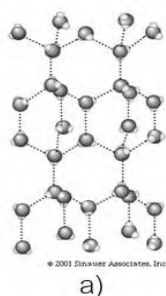
ควอตซ์ (Quartz) – โครงสร้าง SiO_2 แบบร่างแหสามมิติ

โกเมน, เบริล, สปีเนล – โครงสร้างผลึกแบบร่างแหหรือโครงข่ายผลึกที่ซับซ้อน

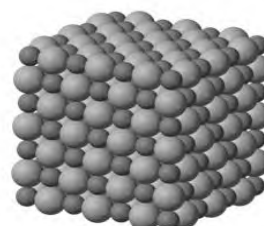
น้ำแข็ง (Ice) เป็นของแข็งที่เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลน้ำ (H_2O) โดยยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) ซึ่งจัดเรียงตัวเป็นโครงข่ายหกเหลี่ยมในรูปแบบสามมิติเป็นตัวเชื่อมโยง ทำให้เกิดช่องว่างในโครงข่าย ดังรูป 1.55a **ลักษณะเด่นคือ** มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเหลว (จึงลอยน้ำได้), ความแข็งต่ำ, โครงสร้างร่างแหไม่แน่นหนาเท่าโลหะหรือเซรามิก **การใช้งาน:** ระบบหล่อเย็น, การศึกษาโครงสร้างของพันธะไฮโดรเจนที่มีช่องว่างในโครงข่ายน้ำแข็ง ทำให้ความหนาแน่นของน้ำแข็งน้อยกว่าน้ำซึ่งเป็นเหตุผลที่น้ำแข็งลอยน้ำได้และเป็นตัวอย่างของวัสดุที่มีโครงสร้างผลึกแบบร่างแหที่เกิดจากพันธะทุติยภูมิ²⁸

น้ำตาล (Sucrose Crystal) น้ำตาลซูโครสสามารถตกผลึกในลักษณะโครงสร้างสามมิติที่โมเลกุลซูโครสเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล แม้ว่าจะจัดเป็นสารอินทรีย์แต่ในรูปโครงสร้างของของแข็งสามารถเกิดโครงสร้างผลึกแบบร่างแหที่มีความต่อเนื่องได้ ดังรูป 1.55b

เกลือ (โซเดียมคลอไรด์, NaCl) โครงสร้างเป็นผลึกลูกบาศก์ (Cubic Crystal Structure) แต่ด้วยการเชื่อมต่อระหว่าง Na^+ และ Cl^- อย่างสมมาตรในรูปแบบเครือข่ายสามมิติ ทำให้มีลักษณะคล้ายร่างแห เป็นวัสดุไอออนิกที่มีจุดหลอมเหลวสูง, แข็งแรง, และเปราะ ดังรูป 1.55c ใช้เป็นตัวอย่างของโครงสร้างร่างแหที่เกิดจากพันธะไอออนิก



b)

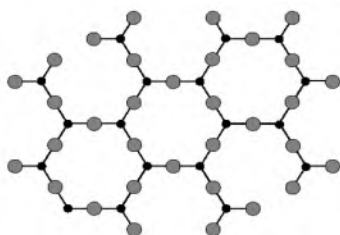


c)

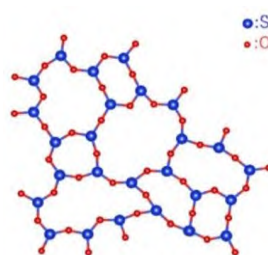
รูปที่ 1.55 วัสดุโครงสร้างแบบร่างแห: a) น้ำแข็ง, b) น้ำตาล, c) เกลือหรือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่มา Norton¹¹⁴

ซิลิกา (Silica Glass, SiO_2) โครงสร้างของแก้วซิลิกาไม่ได้เป็นผลึกแบบสม่ำเสมอ แต่มีการเชื่อมโยงของ SiO_4^{4-} tetrahedra เข้าด้วยกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติแบบไม่เป็นระเบียบ (Random Network) แม้จะไม่มีระเบียบของโครงสร้างเหมือนผลึกแต่ก็มีระเบียบในระดับโมเลกุลจึงจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุโครงสร้างร่างแหชนิดไม่มีรูปผลึกหรือ **อะมอร์ฟัสร่างแห (Amorphous Network)**

a)



b)



รูปที่ 1.56 a) โครงสร้างแบบร่างแหของควอตซ์หรือซิลิกา และ b) อะมอร์ฟัสร่างแหของแก้วซิลิกา^{128,129}