

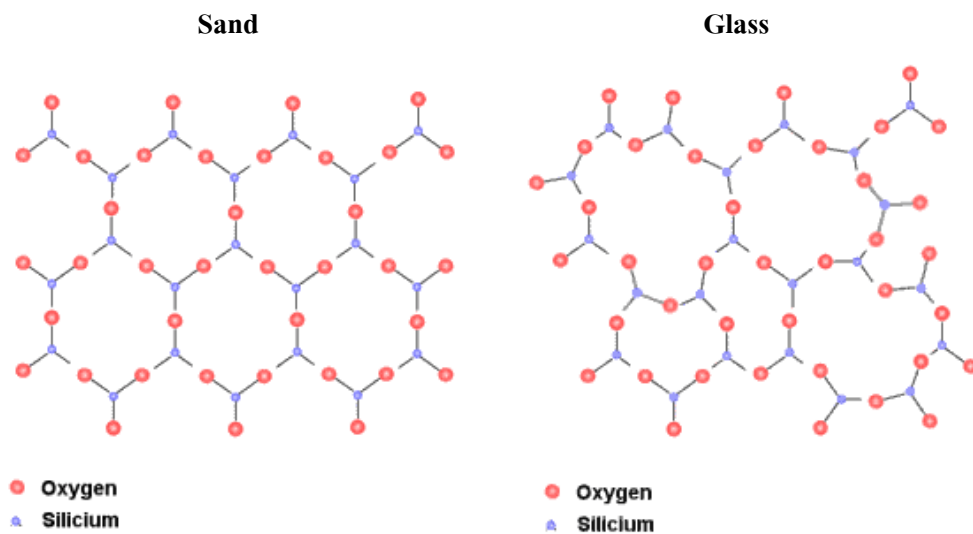
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 แก้ว (Glasses)

2.1.1 คำนิยามของแก้ว (Definitions of glasses) [9]

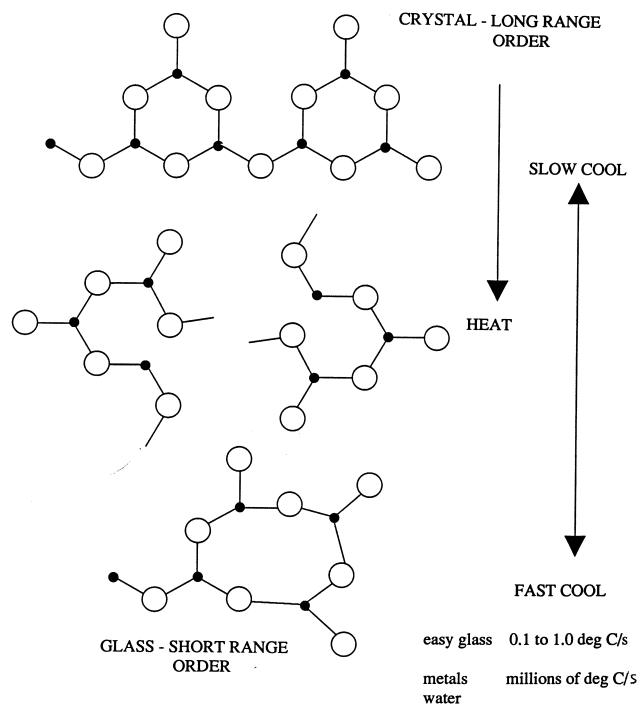
แก้วไม่มีความเป็นผลึกเหมือนของแข็งทั่วไปและมีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลว นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มจึงถือว่าแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสสาร นอกเหนือจากของเหลว (liquid) ของแข็ง (solid) และก๊าซ (gas) ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของทราย (sand) ที่เป็นผลึกของสารซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งแตกต่างจากแก้วที่ประกอบไปด้วยอะตอมของ Si และ O ที่เรียงตัวกันแบบสุ่ม (random disordered arrangement)



รูป 2.1 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ [10]

นักวิทยาศาสตร์ผู้มีความเชี่ยวชาญทางด้านแก้วหลายท่านพยายามให้คำนิยามที่เหมาะสมที่สุดของแก้ว ตามที่พื้นฐานความรู้ และมุมมองที่ต่างกัน จนสรุปคำนิยามของแก้วไว้เป็นมาตรฐานตาม ASTM standards ไว้ว่า “แก้วคือผลิตภัณฑ์สารอนินทรีย์ของการหลอมซึ่งได้ถูกทำให้เย็นตัวลง

เป็นภาวะแข็งเกร็ง (rigid condition) โดยไม่มีการตกผลึก” สมบัติที่สำคัญที่สุดของแก้วคือ ความโปร่งใส ซึ่งเกิดเนื่องจากแก้วปราศจากขอบของเกรน (grain boundary) และสิ่งแปลกปลอม (inclusion) ที่เป็นเหตุของการกระเจิงของแสง (scattering of light) ซึ่งแตกต่างจากเซรามิก (ceramic) โดยทั่วไปที่มีขอบเกรนและรูพรุน ทำให้เซรามิกทึบแสง ถึงแม้ว่าเซรามิกส่วนใหญ่จะมีความเป็นฉนวนเหมือนแก้วซึ่งมีค่าช่องว่างของพลังงาน (energy gap) ระหว่างแถบการนำ (conduction band) และแถบเวเลนซ์ (valence band) ที่มากกว่า 1 อิเล็กตรอน โวลต์เหมือนกันก็ตาม

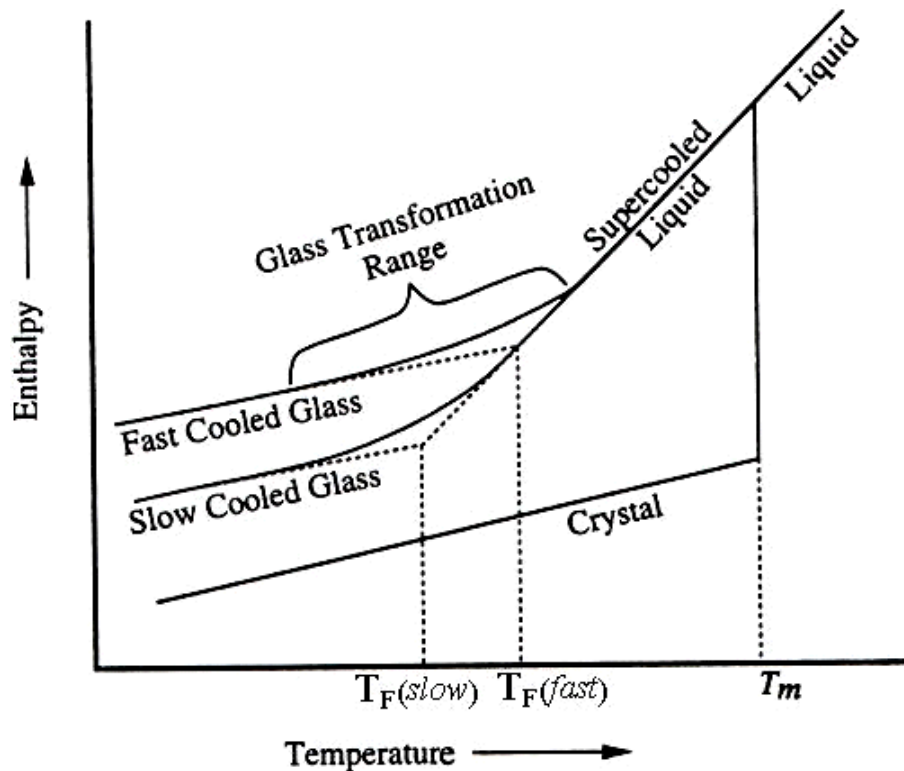


รูป 2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้วหลังจากการทำ

ให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน

[9]

การทำให้เกิดแก้ว (glass formation) มาจากการหลอมของแข็งที่เป็นผลึกที่อุณหภูมิสูง และเมื่อทำให้เย็นตัวลงแบบเร็ว อะตอมของแก้วจะถูกตรึงให้อยู่ในสถานะแบบไม่มีระเบียบหรือแบบสุ่ม ดังรูปที่ 2.2 และอะตอมจะเรียงตัวกันอย่างเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (perfect crystal arrangement) เมื่อทำให้เย็นตัวลงแบบช้า นอกจากนี้ แก้วยังมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา คือ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของแก้ว (glass transformation behavior) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ เรียกว่า บริเวณการแปลงเฟสของแก้ว (glass transformation region) ดังรูปที่ 2.3



รูป 2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอนทัลปี (enthalpy) ของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว [9]

บริเวณการแปลงเฟสของแก้วเป็นช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกับการตกผลึก (crystallization) ของของแข็งโดยทั่วไปที่เกิดขึ้นที่จุดหลอมเหลวของสาร (melting point; T_m) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีกับอุณหภูมิมิ่พฤติกรรมเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณกับอุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันดีว่าของเหลวส่วนใหญ่ เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว นั่นคือ ทั้งเอนทัลปีและปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย เมื่อของเหลวถูกลดอุณหภูมิลง เอนทัลปีก็จะลดลงจนเมื่อมาถึงจุดหลอมเหลวก็จะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ถ้าของแข็งมีการตกผลึก การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีหรือปริมาตรของสารก็จะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous change) ซึ่งจะเกิดขึ้น ณ จุด T_m ของสาร หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงก็จะเริ่มช้าลงอย่างคงที่ จนถึงอุณหภูมิห้อง (room temperature) และสารที่ได้จะกลายเป็นผลึกของแข็ง (crystalline solid) แต่ถ้าของเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงโดยที่ไม่มีการตกผลึก ณ จุด T_m ของเหลวจะกลายเป็นของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด (supercooled liquid) ที่มีความหนืดสูง (high viscosity) การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีหรือปริมาตรจะเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous) จนถึงช่วงที่เรียกว่า บริเวณการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (glass transformation range) การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีเทียบกับอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ สังเกตได้จากความชันของกราฟเปลี่ยนไปจากช่วงการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง สารที่ได้

จะเป็นของแข็งไม่มีผลึก (non-crystalline solid) หรือแก้ว นั่นเอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการเกิดแก้วกับการเกิดผลึกจึงต่างกันโดยสิ้นเชิง พิจารณาการกลายเป็นของแข็งแบบแก้ว ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงบริเวณการแปลงเฟสของแก้วจะเป็นช่วงแบ่งระหว่างความเป็นของเหลวและของแข็งต่างกับการเป็นผลึกที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ T_m ของสาร ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงพยายามนิยามอุณหภูมิกำหนดหนึ่งซึ่งเรียกว่าอุณหภูมิฟิคทีฟ (Fictive temperature; T_f) ขึ้นมาเพื่อใช้แทนช่วงบริเวณการเปลี่ยนสถานะของแก้ว ซึ่งก็คือจุดตัดของเส้นที่ลากมาจากเส้นกราฟช่วงของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด และเส้นกราฟช่วงที่แก้วเริ่มเย็นตัวอย่างช้าๆ ณ อุณหภูมินี้เอง โครงสร้างของแก้วจะเหมือนกับของเหลวที่อยู่ในภาวะสมดุล (equilibrium liquid) ดังนั้น โครงสร้างของแก้วก็น่าจะแตกต่างกัน ถ้ามี T_f ต่างๆ กันถึงแม้จะเป็นแก้วชนิดเดียวกันก็ตาม กล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า แก้วที่ได้จากการทำให้เย็นตัวลงในอัตราเร็วที่ต่างกันแบบช้าๆ (slow cooled glass) หรือแบบรวดเร็ว (fast cooled glass) ก็จะได้แก้วที่มีเอนทัลปีหรือปริมาตรสุดท้ายต่างกันมากที่สุด ซึ่งเป็นผลทำให้แก้วที่เย็นตัวอย่างช้าๆ จะมีความเสถียรในโครงสร้างมากกว่าแก้วที่เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของแก้วเกิดขึ้นเป็นช่วงของอุณหภูมิ ไม่ใช่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เพื่อความสะดวกในการใช้เทอมที่เหมาะสม จึงมีการนิยามอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (glass transformation temperature หรือ glass transition temperature; T_g) ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวคือ อุณหภูมิที่เส้นกราฟของการวิเคราะห์เชิงความร้อน หรือเส้นกราฟของการขยายตัวทางความร้อนของแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงนั่นเอง

ส่วนประกอบหลักทางเคมี (chemical composition) ของแก้วมาจากวัตถุดิบหลัก 3 ชนิดคือ ฟอเมอร์ (former) ฟลักซ์ (flux) และสารช่วยให้เสถียร (stabilizer) ซึ่งมีความสำคัญในการสร้างแก้ว และโครงสร้างของแก้ว

1. ฟอเมอร์ เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของแก้ว ได้แก่สารเคมีชนิดใดก็ตามที่สามารถหลอมและเย็นตัวลงกลายเป็นแก้วได้จะเรียกว่าเป็นฟอเมอร์ทั้งหมด เช่น ดินจากเปลือกโลกถ้าหลอมด้วยความร้อนที่เหมาะสมก็สามารถเย็นตัวกลายเป็นแก้วได้ และทราย เป็นต้น
2. ฟลักซ์ คือสารช่วยหลอม ซึ่งจะเป็นตัวช่วยทำให้ฟอเมอร์หลอมในอุณหภูมิที่ต่ำลงเพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต หรือ เถ้าโซดา (soda ash) โพแทช (potash, K_2O) และ ลิเทียมคาร์บอเนต (lithium carbonate, Li_2CO_3) เป็นต้น แต่การใส่ฟลักซ์ก็มีข้อเสียคือจะทำให้แก้วไม่เสถียรทางเคมี กล่าวคือละลายน้ำได้ง่ายขึ้น หรือมีการตกผลึกที่ไม่ต้องการ

3. สารช่วยให้เสถียร เป็นสารที่เมื่อผสมกับฟอสเฟตและฟลักซ์แล้วจะช่วยให้แก้วที่ผลิตได้ไม่ละลาย ไม่ร่วนและไม่แตกออกจากกัน โดยจะไปช่วยยึดให้โครงสร้างของแก้วคงอยู่ไม่บอบสลายและผสมเป็นเนื้อเดียว ได้แก่ หินปูน ตะกั่วเหลือง (litharge) อะลูมินา (alumina) และ แมกนีเซียม (magnesia) เป็นต้น

ความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (glassforming ability) และความเสถียรของแก้ว (glass stability) ขึ้นอยู่กับเรื่องของการตกผลึก ถ้าแก้วมีความสามารถในการจะเกิดแก้วได้ดีจะต้องมีความต้านทานในการตกผลึกในขั้นตอนที่น้ำแก้วหลอมเย็นตัวลงได้ดี ในขณะที่ความเสถียรของแก้วนั้น ขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการตกผลึกของแก้วในขั้นตอนที่ทำให้ความร้อนแก่แก้วจนหลอม ดังนั้น ความสามารถในการเกิดแก้วได้ดีจะมีความสำคัญต่อกระบวนการการหลอมแก้วในเบื้องต้น ส่วนความเสถียรของแก้วจะมีความสำคัญในกระบวนการการขึ้นรูปใหม่ของแก้วที่มีอยู่แล้ว (reforming of an existing glass)

2.1.2 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว (Kinetic theories of glass formation)

[9]

ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว ระบุว่าวัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดแก้วได้ ถ้าสามารถทำให้เย็นตัวได้อย่างรวดเร็วพอที่จะหลีกเลี่ยงการตกผลึก ดังนั้น ทฤษฎีนี้จึงให้ความสำคัญกับกลไกในการตกผลึกของสาร ซึ่งเป็นการรวมกระบวนการที่สำคัญสองกระบวนการเข้าด้วยกันคือ

1. การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)
2. การเติบโตของผลึก (crystal growth)

2.1.2.1 การเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation)

การเกิดนิวเคลียสผลึกแบ่งออกเป็นสองชนิดหลักคือ

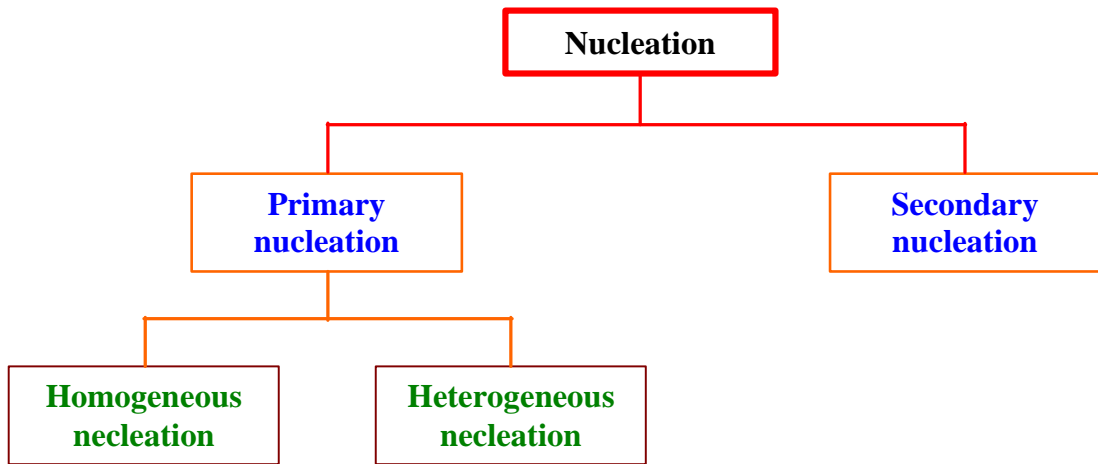
1. การเกิดนิวเคลียสผลึกปฐมภูมิ (primary nucleation) คือ กรณีของการเกิดนิวเคลียสผลึกทุกกรณีในระบบที่ไม่ประกอบไปด้วยสารที่เป็นผลึกอยู่ก่อน ซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิดย่อย คือ

ก. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous nucleation) การเกิดนิวเคลียสผลึกโดยไม่มีอาศัยสิ่งที่มีอยู่ก่อนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำแก้วหลอม

ข. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous nucleation) นิวเคลียสผลึกเกิดจากสิ่งที่มีอยู่ก่อนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำแก้วหลอม อาทิ ผนังเตา (furnace wall) สิ่งแปลกปลอมที่ไม่ละลาย (insoluble inclusions) หรือแม้กระทั่งพื้นผิวอิสระ (free surface)

2. การเกิดนิวเคลียสผลึกทุติยภูมิ (secondary nucleation) คือ การที่มีผลึกปรากฏอยู่ในระบบที่อิมพัลส์ยิ่งยวดเพื่อสร้างนิวเคลียสทุติยภูมิต่อไป

แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสได้แสดงไว้ ดังรูปที่ 2.4



รูป 2.4 แผนภาพแสดงชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation) [9]

ในการศึกษาเรื่องการเกิดนิวเคลียสผลึก คำว่านิวเคลียสในที่นี้คือนิวเคลียสของผลึก (crystal nucleus) ซึ่งแตกต่างไปจากนิวเคลียสของอะตอม (atomic nucleus) โดยการเกิดนิวเคลียสผลึกนั้นจะถูกต่อต้านด้วยเครื่องขวางกั้นสองชนิด คือ

1. เครื่องขวางกั้นอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic barrier) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระ (free energy) ที่เปลี่ยนไปในระบบเมื่อมีการเกิดนิวเคลียสขึ้น
2. เครื่องขวางกั้นจลนพลศาสตร์ (kinetic barrier) เกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการในการเคลื่อนที่ของมวลหรือการจัดเรียงตัวใหม่ในช่องว่าง เพื่อให้การเติบโตของอนุภาคที่เป็นระเบียบ (หรือผลึก) เกิดขึ้นได้ จากของเหลวที่ไม่เป็นระเบียบ

ดังนั้นระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสองชนิดคือ

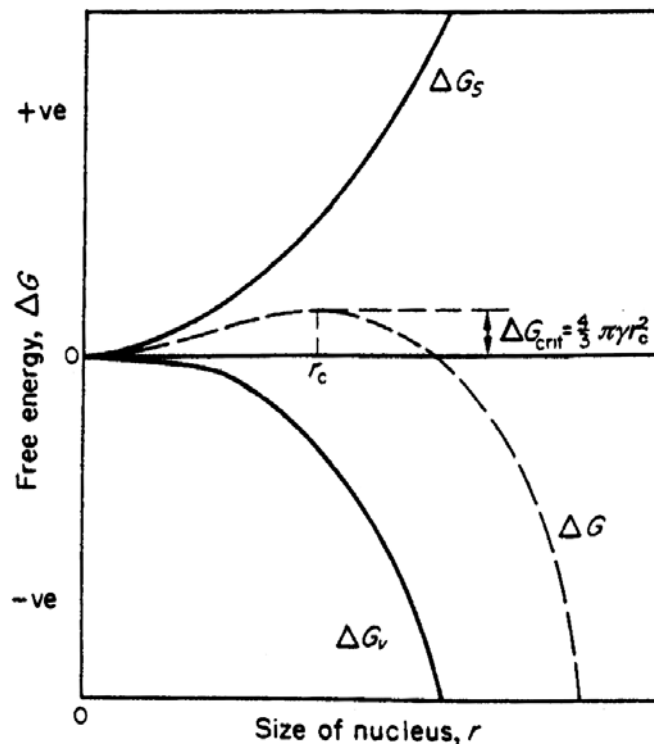
1. พลังงานอิสระ (free energy)
2. พลังงานพื้นผิว (surface energy)

การจัดเรียงตัวของอะตอมในนิวเคลียสจะทำให้พลังงานอิสระเชิงปริมาตร (volume free energy) ลดลงแต่พลังงานพื้นผิวของการเกิดผิวร่วมใหม่ (a new interface) เพิ่มขึ้น ดังนั้นพลังงานอิสระที่เกินมาทั้งหมด (the overall excess free energy) จะมีค่าเป็นไป ดังสมการที่ 2.1

$$\begin{aligned}\Delta G &= \Delta G_{\text{Surface}} + \Delta G_{\text{Volume}} \\ &= 4\pi r^2 \gamma + \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v\end{aligned}\quad (2.1)$$

- โดยที่ ΔG คือ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปต่อหน่วยปริมาตร
 γ คือ พลังงานการเกิดพื้นผิวรวม (the interfacial energy)
 ΔG_v มีปริมาณเป็นลบ (a negative quantity)
 ΔG_s มีปริมาณเป็นบวก (a positive quantity)

เมื่อทำการสร้างกราฟระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปทั้งหมดกับขนาดของนิวเคลียสจะ
 ได้กราฟดังรูปที่ 2.5



รูป 2.5 กราฟระหว่างพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปในการเกิดนิวเคลียสผลึก (ΔG)
 กับขนาดของนิวเคลียส (r) [9]

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปจะผ่านจุดสูงสุดที่ r_c ที่เรียกว่า นิวเคลียสวิกฤต (the critical nucleus)

ถ้าหาอนุพันธ์ของ ΔG (สมการที่ 2.1) ด้วยขนาดของนิวเคลียส r และให้มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 0 \quad (2.2)$$

จะได้ดังสมการที่ 2.3

$$\frac{d\Delta G}{dr} = 8\pi r \gamma + 4\pi r^2 \Delta G_V = 0 \quad (2.3)$$

เมื่อทำการแก้สมการจะได้ r_c ดังสมการที่ 2.4

$$r_c = \frac{-2\gamma}{\Delta G_V} \quad (2.4)$$

และพลังงานอิสระที่จุดวิกฤต (ΔG_{crit}) จะสามารถหาได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังสมการที่ 2.5

$$\Delta G_{crit} = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_V)^2} = \frac{4\pi r_c^2}{3} \quad (2.5)$$

ขนาดของนิวเคลียสวิกฤต r_c เป็นขนาดที่ต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ของนิวเคลียสเสถียร (a stable nucleus) โดยที่

$r > r_c$ เป็นนิวเคลียสเสถียร และจะมีการเติบโตต่อไป

$r < r_c$ เป็นนิวเคลียสที่ไม่เสถียร (unstable nucleus) จะละลายหรือระเหยหายไป (dissolve or evaporate)

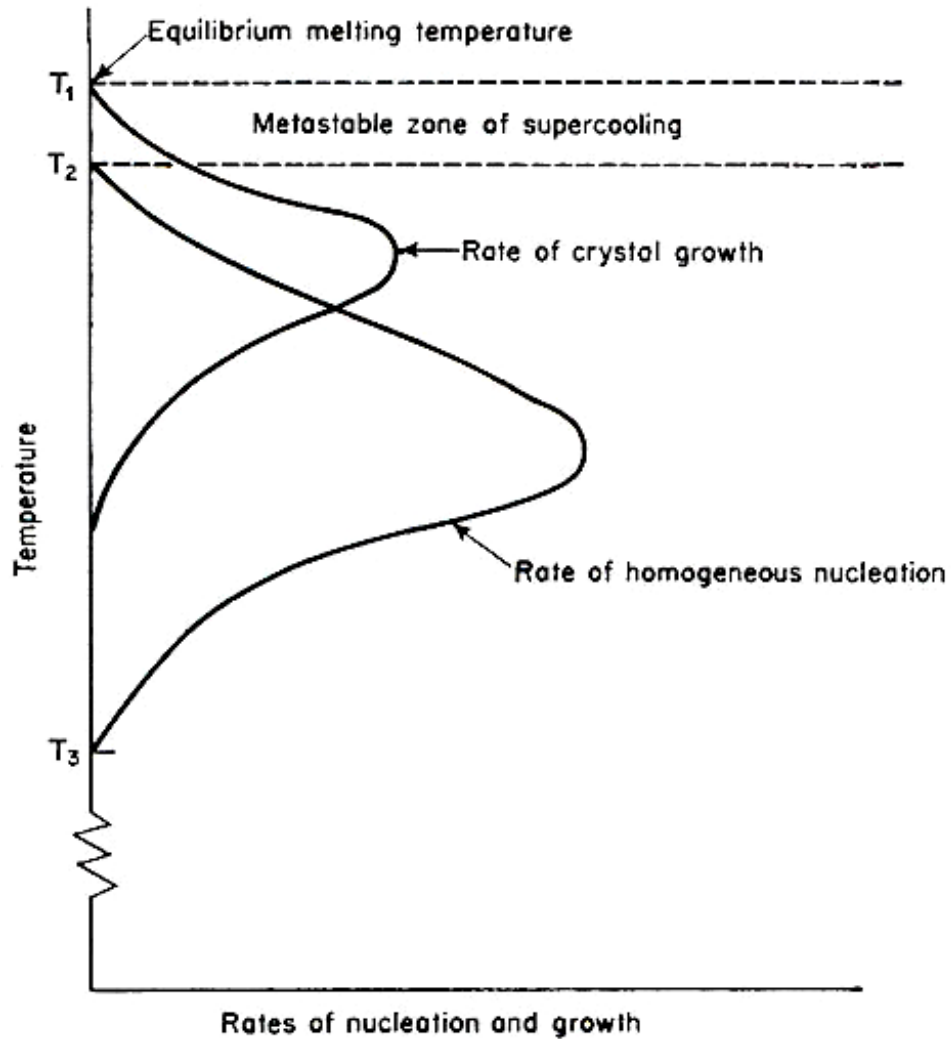
2.1.2.2 การเติบโตของผลึก (crystal growth)

เมื่อนิวเคลียสเสถียรเกิดขึ้นในระบบอิ่มตัวยิ่งยวด (a supersaturated system) หรือระบบเย็นตัวยิ่งยวด (a supercooled system) นิวเคลียสเสถียรเหล่านั้นจะเริ่มเติบโตเป็นผลึกในขนาดที่มองเห็นได้

ได้มีการเสนอความคิดเกี่ยวกับกลไกของการเติบโตของผลึก (crystal growth mechanisms) หลายกลไกดังจะยกตัวอย่างต่อไปนี้

1. ทฤษฎีพลังงานพื้นผิว (Surface energy theories)
มีพื้นฐานมาจากสมมติฐานที่ว่า
'ผลึกจะเติบโตในรูปร่างที่มีพลังงานพื้นผิวน้อยที่สุด'
2. ทฤษฎีชั้นดูดซับ (Adsorption layer theories)
แนวคิดหลักของกลไกการเติบโตของผลึกขึ้นอยู่กับ
'การเกิดขึ้นของชั้นดูดซับของอะตอมที่ของตัวละลาย (solute) หรือ โมเลกุลบนหน้าสัมผัสของผลึก (a crystal face)'
3. ทฤษฎีจลน์ (Kinematic theories)
เกี่ยวข้องกับกระบวนการ 2 กระบวนการในชั้นของผลึกที่เติบโต คือ
 1. การให้กำเนิดขั้น (steps) จากแหล่งกำเนิดบางอย่างบนหน้าสัมผัสของผลึก
 2. มีการเคลื่อนที่ของชั้นผ่านหน้าสัมผัสของผลึก
4. ทฤษฎีปฏิกิริยาการแพร่ (Diffusion reaction theories)
ได้มีการสันนิษฐานในเรื่องของการเติบโตของผลึกว่าเกิดจากการที่
'สสารที่ตกสะสมอย่างต่อเนื่องบนหน้าสัมผัสผลึกด้วยอัตราเร็วที่แปรผันตามกับความเข้มข้นระหว่างจุดที่เกิดการตกสะสมกับเนื้อของสารละลาย (bulk of the solution)'

จากการพิจารณาของเหลวที่มีความหนืดสูง ทำให้สามารถเขียนแผนภาพเค้าร่างไดอะแกรมของอัตราการเกิดนิวเคลียสผลึก (nucleation rate) และอัตราการเติบโตของผลึก (crystal growth rate) เทียบกับอุณหภูมิได้ดังรูปที่ 2.6



รูป 2.6 อัตราการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของผลึกเทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของของเหลวที่มีความหนืดสูง (viscous liquid) [9]

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าอัตราการเติบโตของผลึกจะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ T_1 ที่เรียกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวสมดุล (equilibrium melting temperature) ในขณะที่อัตราการเกิดนิวเคลียสผลึก จะเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T_2) ทำให้เกิดโซนกึ่งเสถียรของการเย็นตัวยิ่งยวด (metastable zone of supercooling) ระหว่าง T_1 และ T_2 ซึ่งเป็นโซนที่ไม่มีการเกิดนิวเคลียสผลึกในของเหลวหรือน้ำ แก้ว เมื่อของเหลวถูกทำให้เย็นตัวผ่านโซนกึ่งเสถียรนี้จากช่วงอุณหภูมิ T_1 ถึง T_3 ลงอย่างรวดเร็ว จึงมีโอกาที่ของเหลวจะไม่เกิดการตกผลึกและกลายเป็นแก้วได้ สารที่มีโซนกึ่งเสถียรของการเย็นตัวยิ่งยวดที่กว้าง ส่วนใหญ่แล้วเป็นสารที่มีความหนืดสูง (viscous liquid)

2.2 กระดูกเทียมสังเคราะห์ (Synthetic Bone Substitute Materials)

2.2.1 คุณสมบัติและประเภทของกระดูกเทียมสังเคราะห์ [11-12]

กระดูกเทียมสังเคราะห์จากวัสดุที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบ จะผลิตมาจากวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น กระดูกสัตว์ หรือ ปะการัง (coral) หรือสังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุหลายชนิดให้มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทดแทนกระดูกได้ เช่น แก้วเซรามิกไบโอแอคทีฟ (bioactive glass ceramics) เป็นต้น

คุณสมบัติที่เป็นที่ต้องการของกระดูกเทียมสังเคราะห์ควรมีดังนี้

1. ความสามารถที่เข้ากับเนื้อเยื่อกระดูกในร่างกายได้ (biocompatibility) จะทำให้มีการเจริญของเนื้อเยื่อผสมผสานเข้าไปภายในกระดูกเทียมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะส่งผลให้มีการสร้างเนื้อเยื่อไฟเบอร์รอบๆ กระดูกเทียมที่ใส่ทดแทน

2. ความสามารถที่จะถูกสลายโดยกลไกต่างๆภายในร่างกาย (biodegradability) จะทำให้กระดูกเทียมที่ใช้ถูกกำจัดออกไปเรื่อยๆ จากตำแหน่งที่ใส่หลังจากที่มีการเจริญของเนื้อเยื่อกระดูกเข้าไปแทนที่ จนในที่สุดเมื่อหมดหน้าที่แล้วกระดูกเทียมที่ดีจะต้องสามารถถูกร่างกายสลายและกำจัดออกไปได้หมด อัตราการสลายตัวของกระดูกเทียมที่ดีจะต้องสอดคล้องกับอัตราการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อกระดูกที่เข้าไปแทนที่ เพราะหากการสลายตัวเกิดเร็วเกินไป การเจริญเติบโตของกระดูกเข้าไปแทนที่ยังไม่มากพอที่จะทำหน้าที่แทน จะทำให้บริเวณที่ใส่กระดูกเทียมขาดความแข็งแรงและเกิดการแตกหักได้เมื่อได้รับแรงกระทำ แต่ถ้าการสลายตัวเกิดช้าเกินไปหรือไม่มีการสลายตัว กระดูกเทียมนั้นจะกลายเป็นตัวขัดขวางการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อกระดูก ทำให้ไม่สามารถเจริญเข้าไปแทนที่ได้ ซึ่งจะมีผลต่อชีวกลศาสตร์ของกระดูกส่วนนั้นในระยะยาว

3. ความแข็งแรงและทนต่อแรงกดได้สูง (high strength and compressive strength) เพราะกระดูกเทียมส่วนใหญ่ถูกพัฒนามาเพื่อแก้ปัญหาส่วนของกระดูกที่บดพร่องไป ดังนั้นกระดูกเทียมที่ใส่ทดแทนจะต้องพิจารณาถึงความแข็งแรงของสารที่ใช้ โดยเฉพาะเมื่อกระดูกต้องรับน้ำหนัก ถึงแม้จะมีคุณสมบัติอื่นดีแต่โครงสร้างเปราะโอกาสจะประยุกต์ใช้ก็มีจำกัด เมื่อเทียบกับสารอื่นที่มีความแข็งแรงของโครงสร้างดีกว่า

4. ความสามารถในการเหนี่ยวนำให้เนื้อเยื่อโดยรอบตรงตำแหน่งที่ได้รับการทดแทน ให้มีการเจริญเข้าไปในกระดูกเทียม (osteoinductive capability) ความสามารถนี้สำคัญและมีความพยายามในการพัฒนาให้กระดูกเทียมมีคุณสมบัตินี้ แต่ความสามารถนี้ยังไม่ประสบความสำเร็จ

เท่าที่ควร จึงต้องมีการผสมสาร หรือ ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเข้าไปเพื่อให้มีความสามารถนี้ เช่นการใช้ไขกระดูก ใช้ส่วนประกอบบางส่วนของไขกระดูกหรือเลือดของผู้รับเอง เป็นต้น

5. รูพรุน (pore) คืออีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระดูกเทียม แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100-350 ไมโครเมตร ซึ่งทำหน้าที่เป็นโครงร่าง (scaffold) เพื่อให้เกิดการสร้างกระดูกใหม่ และ รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 40 ไมโครเมตร ซึ่งจะเอื้อให้มีการเจริญของกระดูกเข้าไปภายในได้

กระดูกเทียมสังเคราะห์โดยทั่วไปมีให้เลือกหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถจำแนกได้ 4 กลุ่มหลักคือ

1. เซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate ceramic) เป็นวัสดุที่นิยมใช้ทำกระดูกเทียมสังเคราะห์ เพราะมีโครงสร้างใกล้เคียงกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของกระดูกของสิ่งมีชีวิต

2. แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นกระดูกเทียมที่ผลิตจากวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ปะการัง กระจุกงัว เป็นต้น

3. พอลิเมอร์คอมโพสิต (composite polymer) เป็นกระดูกเทียมสังเคราะห์ที่ผลิตจากพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายตัว ผลิตและพัฒนามาใช้ในวงการทันตกรรม จะมีแกนกลางเป็นพอลิเมอร์เคลือบด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide)

4. แก้วเซรามิกชีวภาพ (bioactive glass ceramics) มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา ถูกนำมาใช้ในงานศัลยกรรมกระดูก และ ศัลยกรรมตกแต่ง เช่น คอ หู จมูก

2.2.2 เซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต [12]

เซรามิกแคลเซียมฟอสเฟต เป็นวัสดุที่นิยมใช้ทำกระดูกเทียมที่นิยมมาก โดยเฉพาะ 2 กลุ่มหลักคือ ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งวัสดุพวกนี้จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเหนียวนำไปเนื้อเยื่อกระดูกโดยรอบตรงตำแหน่งที่รับให้มีการเจริญเข้าไปในกระดูกเทียมนั้น โดยแคลเซียมจะถูกนำไปเติมในช่องว่างกระดูก (bone defect) ที่เอารอยโรคออกไปแล้ว โดยหวังผลให้มีการเจริญของกระดูกใหม่ ซึ่งกระดูกเทียมนี้อาจเป็น โครงร่างให้กระดูกใหม่เจริญเข้าไปภายใน

2.2.2.1 ไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นส่วนประกอบที่เป็น สารอนินทรีย์ (inorganic) ของกระดูกและฟัน มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ เป็นวัสดุที่เข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ และสามารถเชื่อมกัน

ได้กับทั้งกระดูกและเนื้อเยื่ออ่อน (soft tissue) คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีผลต่ออัตราการสลายด้วย

- คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ อัตราส่วนของแคลเซียมต่อฟอสเฟต ความบริสุทธิ์ของสาร การทดแทนด้วยไอออน (ion) ในตัวไฮดรอกซีอะพาไทต์เอง และสภาวะความเป็นกรดเบสหรือ pH ของบริเวณที่นำไฮดรอกซีอะพาไทต์มาทดแทน
- คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เช่น อนุภาค (particle) หรือ แท่ง (molded in form) ความมีรูพรุน ความหนาแน่น ความเป็นผลึก (crystalline) ความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ถ้าเป็นผลึกขนาดใหญ่จะสลายได้ยากกว่าผลึกขนาดเล็ก ถ้าเป็นอสัณฐานจะสลายง่ายกว่า

ความมีรูพรุน คือสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของกระดูกเทียม เพราะ จะช่วยให้เส้นเลือดเจริญเข้าไปได้ง่ายขึ้น รูพรุนขนาด 150-200 ไมโครเมตรเป็นขนาดที่เหมาะสมที่จะช่วยให้กระดูกมีการเจริญเข้าไปและมีการสะสมแร่ธาตุเป็นกระดูกที่สมบูรณ์ แต่ถ้ารูพรุนจำนวนมากเกินไปจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อยู่ติดกระดูกจริงจะมี osteoblast สร้างคอลลาเจน (collagen) ขึ้นมาเป็นชั้นของ glycoaminoglycan อยู่ระหว่างผิวของของไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบ กับ เซลล์สร้างกระดูก ทำให้เกิดการเชื่อมกันของกระดูกเทียมกับเมทริกซ์ (matrix) ของกระดูกที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ ซึ่งชั้นของ glycoaminoglycan นี้ จะเหมือนกับสารที่เป็นโครงสร้างของกระดูกธรรมชาตินั่นเอง การสะสมของแร่ธาตุต่างๆต่อมาบนชั้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นพวกคาร์บอเนต (carbonate) เหมือนของไฮดรอกซีอะพาไทต์ของกระดูกธรรมชาตินั่นเอง หรืออาจอธิบายได้ว่าจะมีการสะสมของอะพาไทต์ (apatite) หลังจากมีการใส่วัสดุกระดูกเทียมลงไปในพื้นที่นั้น และจะเป็นชั้นที่ช่วยให้มีการดูดซึมโปรตีน มีการสร้างกระดูกตามมา ช่วยให้เกิดการเชื่อมต่อกระดูกใหม่กับกระดูกธรรมชาติ

2.2.2.2 ไตรแคลเซียมฟอสเฟต

ไตรแคลเซียมฟอสเฟต มีสูตรทางเคมีคล้ายไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่ไม่ได้เป็นส่วนประกอบธรรมชาติของกระดูก มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ รูปแบบที่นำมาใช้เป็นกระดูกเทียมสังเคราะห์มี 2 รูปแบบด้วยกัน คือ แอลฟา-ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (α -Tricalcium phosphate: α -TCP) และ บีต้า-ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -Tricalcium phosphate: β -TCP) ซึ่งจะมีสูตรทางเคมีเหมือนกันแต่เมื่ออยู่ในร่างกายแล้วจะแตกต่างกันโดยที่ α -TCP จะสลายช้ากว่า และสามารถตรวจพบได้เมื่อเวลาผ่านไปหลายปี แต่ β -TCP จะสลายได้หมดภายในเวลา 8-12 เดือน และถูก

แทนที่ด้วยกระดูกทั้งหมด แต่ ไตรแคลเซียมฟอสเฟตมีข้อจำกัดคือ ไม่ทนต่อแรงอัดและสูญเสียได้ง่ายเมื่อเทียบกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งจะทนต่อแรงอัด และสลายตัวช้ามากหรือไม่มีการสูญเสียเลย

ปรกติกระดูกเทียมสังเคราะห์ที่มีส่วนประกอบเป็นแคลเซียมและฟอสเฟต จะไม่มีการสลายตัวหมดที่แท้จริง แต่จะเป็นการแตกสลายเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ จากปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี และความเร็วในการแตกสลายจะขึ้นกับความหนาแน่นของวัสดุเองด้วย ความร้อนและกระบวนการทำให้กระดูกเทียมปราศจากเชื้อก่อนนำมาใช้ สามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีได้ และทำให้อัตราการสูญเสียเปลี่ยนไปได้ด้วย การสลายตัวของไตรแคลเซียมฟอสเฟต จะเกิดค่อนข้างเร็ว พื้นที่ผิวของไตรแคลเซียมฟอสเฟตจะไม่มีพวกอะพาไทต์เหลืออยู่ แต่จะทำหน้าที่เป็นโครงร่างเอื้อสำหรับการเจริญของกระดูกใหม่เข้าไปภายใน ส่วนมากไตรแคลเซียมฟอสเฟตจะนำไปใช้ในบริเวณที่ต้องการซ่อมสร้างกระดูก โดยหวังว่ากระดูกเทียมจะค่อยๆ สูญสลายไปและถูกแทนที่ด้วยกระดูกใหม่ตามมา

2.3 รูพรุน (pore) [7, 12, 13]

2.3.1 กระบวนการสร้างกระดูกในรูพรุน [12]

การสร้างกระดูกในรูพรุนของกระดูกเทียมแคลเซียมฟอสเฟต จะพบได้ตรงกลางของรูพรุน บริเวณใกล้เคียงกับเส้นเลือด central vessel ที่เจริญจากกระดูกจริงเข้าไปหรือพบที่ผิวของกระดูกเทียม ในระยะแรกรูพรุนนี้จะเต็มไปด้วยเนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่อยู่กันอย่างหลวมๆ และมีเส้นเลือดขนาดใหญ่ผนังบางอยู่ตรงกลาง มีไฟโบรบลาสต์อยู่รอบๆ จะพบ mononuclear cell ในส่วนที่มีการดูดซึม (resorption) นอกจากนี้รอบๆ mononuclear cell จะพบ collagen bundle ยื่นออกมาจากกระดูกเทียม เข้าไปยังเนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่อยู่ในรูพรุน คล้ายกับว่า mononuclear cell จะต้องมีการสูญเสียไปก่อนถึงจะมีการสร้างคอลลาเจนตามมา เพราะจากการศึกษาภาคตัด (section) ของบริเวณนี้ไม่พบเซลล์ที่ไม่มีชีวิตหรือเซลล์ที่ถูกทำลายเลย รูพรุนบางอันของกระดูกเทียมจะเต็มไปด้วยกระดูก โดยที่ผิวด้านในของรูพรุนจะพบ osteoid และ osteoblast lamina limitans (strongly starred line) พบได้บ่อยระหว่างชั้นของกระดูกเทียม และกระดูกที่สร้างใหม่

2.3.2 กระบวนการสร้างรูพรุน (Preparation methods) [7]

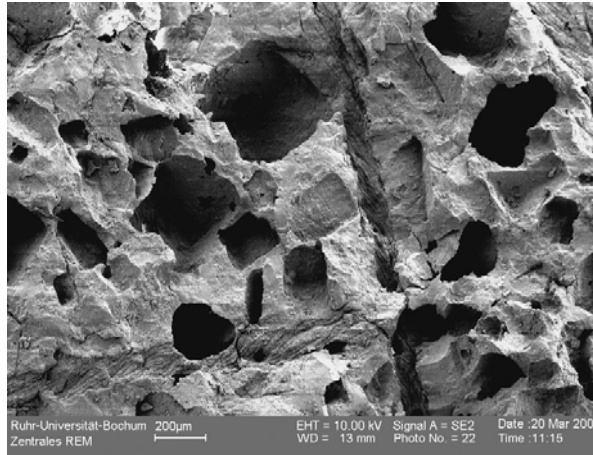
กระบวนการสร้างรูพรุนมีด้วยกันหลายวิธี จะแตกต่างกันไปตามวิธีการและลักษณะของรูพรุน โดยวิธีการต่างๆจะถูกเลือกใช้ตามความเหมาะสมคือ สามารถควบคุมการเกิดรูพรุน ได้ โครงสร้างรูพรุนที่ต่อเนื่อง มีความแข็งแรงเชิงกล และ สมบัติของพื้นผิวที่ดี สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 วิธีด้วยกันคือ

1. การสร้างรูพรุนโดยการระเหยออกของสารที่สามารถระเหยได้ในระหว่างกระบวนการเผาผนึก (Formation of porous structure using pore-creating volatile particles which burn away during sintering)

สารที่สามารถระเหยได้ เช่น พาราฟิน แนฟธาซีน คาร์บอน แป้ง แป้งสาลี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ โพลีเมอร์ โดยจะผสมสารจำพวกนี้ลงไปผง (powder) หรือของผสม (slurry) ของสารสร้างกระดูก จากนั้นนำไปเผาได้ในกระบวนการเผาผนึก ก็จะได้รูพรุนเกิดขึ้น ซึ่งวิธีการนี้สามารถควบคุมสมบัติของรูพรุนเช่น จำนวน ขนาด ลักษณะ และ การกระจายได้ โดยการควบคุมชนิด ปริมาณ และ สมบัติ ของสารที่สามารถระเหยได้ กลไกการเกิดรูพรุนมาจากกระบวนการทางกายภาพ (physical process) คือ การระเหย (evaporation) กับ การระเหิด (sublimation) และปฏิกิริยาทางเคมี (chemical reaction) คือ การเผาไหม้ (combustion) กับ การสลายตัว (pyrolysis) เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่ได้จากกระบวนการนี้จะอยู่ในช่วง 0.1-5000 ไมโครเมตร

2. การสร้างรูพรุนโดยใช้สารที่สามารถละลายได้ในน้ำโดยไม่ใช้การเผาผนึก (Formation of porous structure via admixture of water-soluble porogens with powder without sintering process)

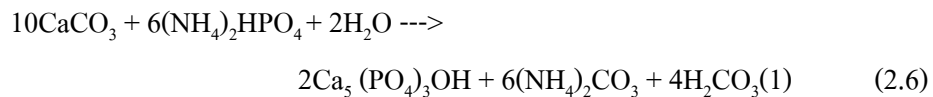
ประกอบด้วยการนำผลึกของเกลือและพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้มาผสมกับสารสร้างกระดูก จากนั้นก็ใช้กระบวนการ cold-isostatic pressing เพื่อทำให้เกิดรูพรุน นั่นคือทำให้เกลือและพอลิเมอร์ละลายออกจากสารสร้างกระดูกด้วยน้ำ โดยปราศจากกระบวนการทางความร้อน โดยวิธีการนี้จะให้ โครงสร้างรูพรุนที่ต่อเนื่อง และมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 250-400 ไมโครเมตร รูพรุนที่เกิดจากวิธีการนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 2. 7



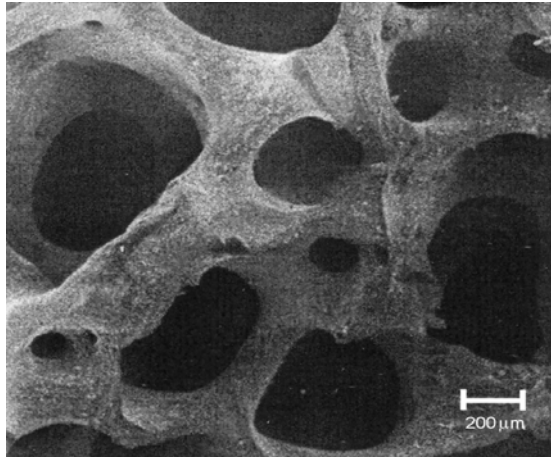
รูป 2.7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูพรุนที่เกิดจากการละลายออกของเกลือและ PVA [7]

3. การสร้างรูพรุน โดยการเปลี่ยนแปลงจากโครงร่างปะการังหรือกระดูกธรรมชาติ (Conversion of marine coral skeleton and natural bone)

โครงร่างสามมิติของปะการังสามารถใช้เป็นแม่แบบสำหรับสร้างโครงร่างที่มีรูพรุน วิธีคือใช้หลักการ hydrothermal ในการเปลี่ยน แคลเซียมคาร์บอเนตในโครงร่างปะการังไปเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในที่ที่มีไอออนฟอสเฟต โดยที่ ไดแอมโมเนียไฮโดรเจนฟอสเฟต จะเป็นที่ยอมรับสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดของไอออนฟอสเฟต ดังสมการ 2.6



ผลลัพธ์คือ จะได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีรูพรุน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 200-500 ไมโครเมตร มีความพรุนประมาณ 50-65% แต่ปะการังในทะเลเป็นอุปสรรคสำหรับการนำมาใช้ เพราะมีปริมาณจำกัด จึงได้หันมาใช้กระดูกจากธรรมชาติแทน โดยจะต้องผ่านกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ออกก่อน ก่อนที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการ จะได้รูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100-1500 ไมโครเมตร มีความเป็น interconnecting สูงและสามารถเหนี่ยวานการเกิดเนื้อเยื่อให้เจริญเข้าไปได้ดี เช่น Endobon[®] ดังรูป 2.8



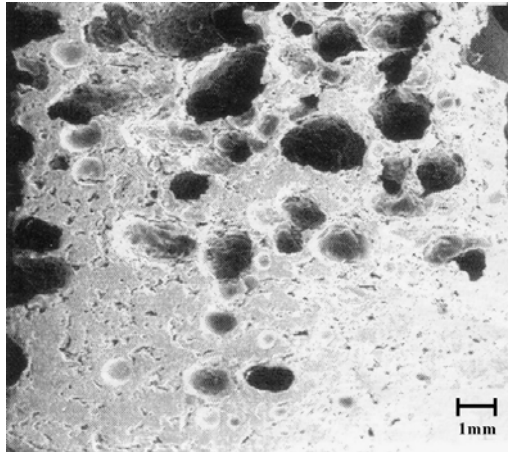
รูป 2.8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูพรุนของ Endobon® [7]

4. การสร้างรูพรุนด้วยเทคนิคเซรามิกโฟม (Ceramic forming technique)

เทคนิคเกิดจากการทำให้เกิดเป็นโฟมของสารแขวนลอยเซรามิกหรือการบวมของเซรามิก ก่อนการเผาด้วยปฏิกิริยาทางเคมีคือการระเหยของก๊าซ โดยใช้ สารอินทรีย์ หรือ อนินทรีย์เป็น แหล่งกำเนิดก๊าซ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และผงฟู เพิ่มลงใน ของผสม ไฮดรอกซีอะพาไทต์ แล้วกวนให้เป็นโฟม จากนั้นก็นำไปเผาผนึก มีการเรียกเทคนิคนี้อีกอย่างว่า เทคนิค โฟม-เจด วิธีการนี้จะส่งเสริมการเกิดโครงร่างเชื่อมโยง โดยวิธีการนี้จะได้รูพรุนขนาดเฉลี่ย 150 ไมโครเมตร และได้รูพรุนเชื่อมโยงขนาดเฉลี่ย 40 ไมโครเมตร วิธีการนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ ผลิตโครงร่างจากเซรามิกที่มีความแข็งแรงสูง แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือจะไม่ได้รูพรุนที่มีการ กระจายไม่สม่ำเสมอและลักษณะไม่เหมือนกัน (non-uniform)

5. การสร้างรูพรุนด้วยวิธี polymeric sponge (Polymeric sponge method)

การสร้างรูพรุนเซรามิกด้วยวิธีนี้ คือการใช้โครงร่างจำลองฟองน้ำพอลิเมอร์ สำหรับการสร้างเซรามิกรูพรุน ซึ่งประกอบด้วยวัสดุจำลองพอลิเมอร์ตาข่ายมีสมบัติที่รู้แน่นอน เช่น ขนาด รูพรุนที่สามารถควบคุมได้ และ รูปแบบเซรามิกที่ซับซ้อนที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ วิธีการคือ การชุบของผสมที่ต้องการสร้างรูพรุนให้ชุ่มบนวัสดุจำลองพอลิเมอร์ แล้วนำไปเผาเพื่อ กำจัดพอลิเมอร์ออก วิธีการนี้จะได้เซรามิกที่มีโครงร่างเชื่อมโยงที่ดี แต่ความแข็งแรงที่ได้จะต่ำ รูพรุนที่ได้แสดงดังรูป 2.9



รูป 2.9 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงรูพรุนที่เกิดจากวิธี polymeric sponge [7]

2.4. การบูร (Camphor) [13]





รูป 2.10 ลักษณะของต้นการบูร และผงการบูร [14]

การบูร ได้จากการสกัดสารจากลำต้น ใบ และยอดอ่อนของต้นอบเชยจีน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cinnamomum camphora* (L.) J.S. Presl ในวงศ์ Lauraceae มีชื่อสามัญว่า camphor เป็นต้นไม้ขนาดกลาง สูงประมาณ 10-15 เมตร ลำต้นและกิ่งเรียบ ใบเป็นมัน เป็นรูปไข่ กว้างประมาณ 2-7 เซนติเมตร และยาวประมาณ 5-8 เซนติเมตร ใบอ่อนมีลักษณะเป็นเกล็ดเรียบ สีเหลืองน้ำตาล หุ้มดอกสีนวลๆ เป็นพุ่ม ดังรูปที่ 2.12 เดิมถิ่นกำเนิดของจะอยู่ที่ ญี่ปุ่น มาเลเซีย จีน อินเดีย ไต้หวัน ทุกส่วนของการบูรจะมีกลิ่นหอมโดยเฉพาะที่รากและโคนต้น มีกลิ่นหอมมากกว่าส่วนเมื่อนำส่วนต่างๆของการบูรมากลั่นจะได้น้ำมันหอมระเหย สามารถใช้เป็นยาระงับเชื้ออย่างอ่อน ยากระตุ้นหัวใจ ขับลม ขับเสมหะ ขับปัสสาวะ แก้ปวด ทำยาทาถูปวด แก้ปวดตามข้อ เป็นอันตรายถ้ารับประทาน อาจเกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังที่บอบบางแพ้ง่าย ดวงตาและระบบหายใจ ข้อมูลพื้นฐาน

ทางกายภาพและทางเคมีของการบูรแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นข้อมูลจากฐานข้อมูลของ Materials safety Data Sheet (MSDS)

ตาราง 2.1 ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพและทางเคมีของการบูร [13]

| Camphor | |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Molecular formula |  $C_{10}H_{16}O$ |
| NFPA |  |
| Systematic name | 1,7,7-trimethylbicyclo [2.2.1] heptan-2-one |
| Other names | 2-bornanone, 2-camphanone bornan-2-one, Formosa |
| Molecular mass | 152.23 g/mol |
| Appearance | White or colorless crystals |
| Density and phase | 0.990, solid |
| Solubility in water | 0.12 g in 100 ml |
| Melting point | 179.75 °C |
| Boiling point | 204 °C |
| Thermal dynamic data | Solid, liquid, gas |
| Vapour density | 5.2 (air = 1) |
| Vapour pressure | 12 Hg at 80 °C |

จากตารางที่ 2.1 จะพบว่าการบูรเป็นสารอินทรีย์มีจุดเดือดที่ 204 องศาเซลเซียส ณ จุดเดือดนี้เองการบูรจะเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำเหมาะสมสำหรับเป็นสารที่สามารถระเหยได้ในกระบวนการสร้างรูปพูนสำหรับแก้ระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมฟอสเฟตออกไซด์ที่มีสมบัติทางความร้อนต่ำ

2.5 เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในปี ค.ศ. 1998 Uo และ คณะ [4] ได้ทำการศึกษาสมบัติและความเป็นพิษของแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ (P_2O_5 -CaO- Na_2O) ที่สามารถละลายน้ำได้ งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นการศึกษาศสมบัติของแก้วระบบนี้ได้ครบคลุม ในการวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ที่มีอัตราส่วนที่แตกต่างกันถึง 25 อัตราส่วน เพื่อศึกษาองค์ประกอบที่เหมาะสมในการทำให้เกิดแก้ว แล้วนำไปศึกษาสมบัติการละลาย และภาวะความเป็นพิษต่อเซลล์ จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนในงานวิจัยนี้ พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (T_g) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) แสดงดังตารางที่ 2.2 นอกจากนี้การศึกษาศสมบัติการละลาย (dissolution properties) ของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาใน 2 ระบบคือ ศึกษาการละลายในน้ำกลั่น และการละลายในสารละลายจำลองคล้ายกับของเหลวของมนุษย์ (simulate body fluid: SBF) จากการศึกษาสมบัติการละลายพบว่า ฟอสฟอรัสออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์มีผลต่อการละลายทั้งในน้ำกลั่น และ SBF โดยที่เมื่อลดปริมาณฟอสฟอรัสออกไซด์และเพิ่มแคลเซียมออกไซด์ จะทำให้การละลายของแก้วลดลง เพราะไอออน Ca^{2+} จะไปสร้าง cross-link ระหว่าง non-bridging ของออกซิเจน ของโครงสร้างฟอสเฟต ดังรูป 2.13 ทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มขึ้น และแนวโน้มการละลายของแก้วสูตรนี้จะเหมือนกันทั้งในน้ำกลั่นและ SBF (ดังรูป 2.14) แต่การละลายจะเกิดในน้ำกลั่นได้เร็วกว่าใน SBF เพราะใน SBF จะองค์ประกอบของไอออน Na^+ Ca^{2+} และ HPO_4^{2-} อยู่ด้วย ซึ่งเป็นไอออนชนิดเดียวกับที่ละลายจากแก้วโดยเฉพาะถ้ามีไอออน Na^+ และ HPO_4^{2-} สูง จึงไปยับยั้งการละลายของแก้ว โดยเฉพาะยับยั้งการละลายของแก้วที่มีอัตราส่วนของโซเดียมสูง ซึ่งจะสามารถละลายได้ดี และได้มีการศึกษาสภาพความเป็นพิษ (cytotoxicity) ด้วยการเพาะเลี้ยงเซลล์เนื้อเยื่อมนุษย์ (human pulp cell) บนชิ้นงานแก้ว 0.1 กรัม ในสารละลาย α -minimum essential medium (α -MEM) รวมถึงวัด pH ของสารละลาย α -MEM พบว่า สภาพความเป็นพิษจะลดลงเมื่อมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น จะเห็นได้จากการเจริญเติบโตของ human pulp cell ที่เพิ่มขึ้นบนชิ้นงานแก้วที่มีแคลเซียมออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังรูป 2.15 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งจากตารางที่ 2.3 นี้เองจะพบว่าสภาพความเป็นพิษจะลดลงเมื่อลดปริมาณฟอสฟอรัสออกไซด์ แต่ จะลดลงถึงระดับหนึ่งเท่านั้น เพราะ ในช่วงประมาณร้อยละ 50 โดยโมล ของ P_2O_5 จะได้ค่า pH ที่วัดจาก α -MEM เป็นกลางเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในร่างกายโดยไม่เป็นอันตราย

ตาราง 2.2 แสดงอัตราส่วน อุณหภูมิการแปลงเฟสของแก้ว (T_g) และ อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_x) ของแก้วในอัตราส่วนต่างๆ [4]

Compositions, glass transition temperature T_g and crystallization temperature T_x of prepared glasses (n.d.: not detected)

| Composition | NaO _{0.5} | CaO | PO _{2.5} | Converted as | | | T_g (°C) | T_x (°C) |
|-------------|--------------------|-----|-------------------|-------------------|------|-------------------------------|------------|------------|
| | | | | Na ₂ O | CaO | P ₂ O ₅ | | |
| 0C80P | 20 | 0 | 80 | 20 | 0 | 80 | | |
| 10C80P | 10 | 10 | 80 | 9.1 | 18.2 | 72.7 | 103 | n.d. |
| 20C80P | 0 | 20 | 80 | 0 | 33.3 | 66.7 | 461 | n.d. |
| 0C70P | 30 | 0 | 70 | 30 | 0 | 70 | 81 | n.d. |
| 10C70P | 20 | 10 | 70 | 18.2 | 18.2 | 63.6 | 125 | n.d. |
| 20C70P | 10 | 20 | 70 | 8.3 | 33.3 | 58.4 | 177 | 502 |
| 30C70P | 0 | 30 | 70 | 0 | 46.2 | 53.8 | 505 | 656 |
| 0C60P | 40 | 0 | 60 | 40 | 0 | 60 | 119 | 356 |
| 5C60P | 35 | 5 | 60 | 33.3 | 9.5 | 57.2 | | |
| 10C60P | 30 | 10 | 60 | 27.3 | 18.2 | 54.6 | 219 | 457 |
| 20C60P | 20 | 20 | 60 | 16.7 | 33.3 | 50 | 256 | 545 |
| 30C60P | 10 | 30 | 60 | 7.6 | 46.2 | 46.2 | 462 | 615 |
| 40C60P | 0 | 40 | 60 | 0 | 57.1 | 42.9 | 548 | 687 |
| 0C50P | 50 | 0 | 50 | 50 | 0 | 50 | 185 | 386 |
| 5C50P | 45 | 5 | 50 | 42.9 | 9.5 | 47.6 | | |
| 10C50P | 40 | 10 | 50 | 36.4 | 18.2 | 45.4 | 190 | 500 |
| 20C50P | 30 | 20 | 50 | 25 | 33.3 | 41.7 | 200 | 518 |
| 30C50P | 20 | 30 | 50 | 15.4 | 46.2 | 38.4 | | |
| 40C50P | 10 | 40 | 50 | 7.1 | 57.2 | 35.7 | | |
| 50C50P | 0 | 50 | 50 | 0 | 66.7 | 33.3 | | |
| 0C40P | 60 | 0 | 40 | 60 | 0 | 40 | 280 | 453 |
| 10C40P | 50 | 10 | 40 | 45.5 | 18.2 | 36.3 | 335 | 444 |
| 20C40P | 40 | 20 | 40 | 33.3 | 33.3 | 33.3 | | |
| 0C30P | 70 | 0 | 30 | 70 | 0 | 30 | | |
| 10C30P | 60 | 10 | 30 | 54.5 | 18.2 | 27.3 | | |

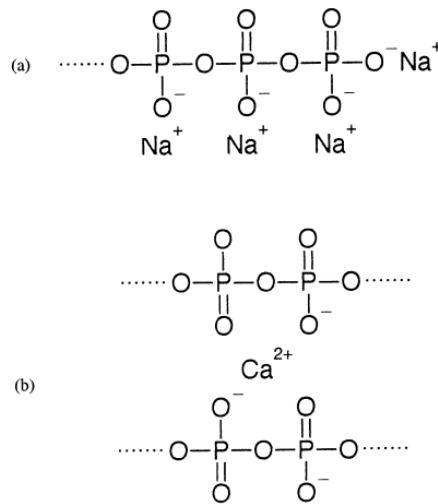
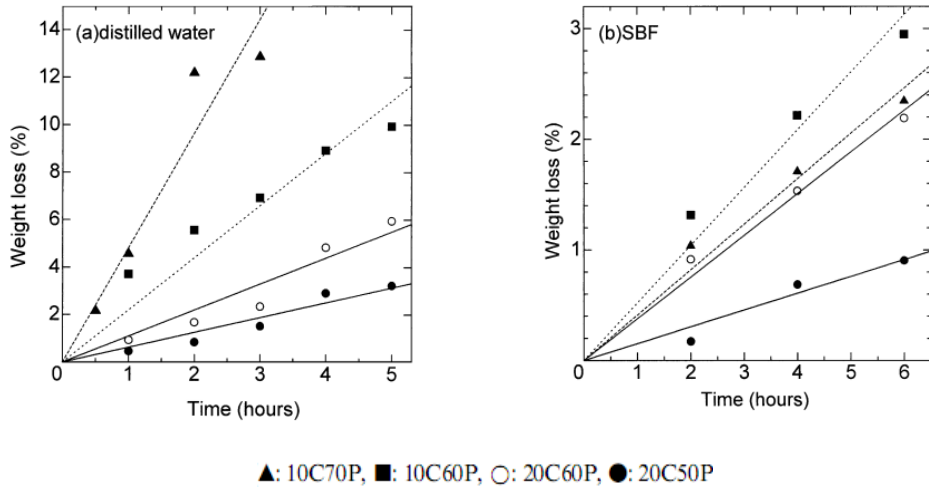


Fig. 8. Schematic representation of phosphate glass structure: (a) chain structure, (b) cross-link formation by Ca^{2+} ion.

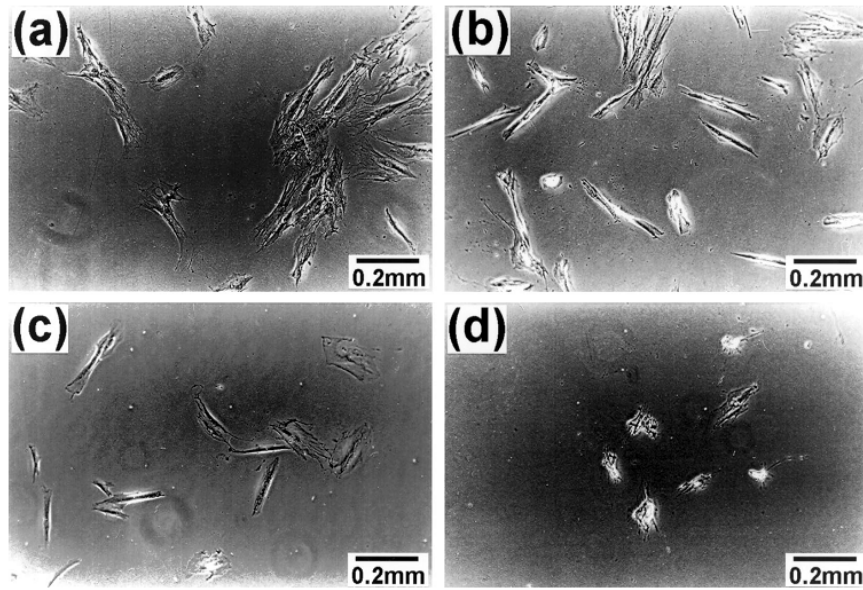
รูป 2.11 แสดงโครงสร้างของแก้วฟอสเฟต (phosphate glass structure) เมื่อ (a) คือ chain structure และ (b) คือ การสร้าง cross-link ด้วยไอออน Ca^{2+} [4]



รูป 2.12 แสดงการลดลงของน้ำหนัก (weight loss) เมื่อแช่อยู่ในน้ำกลั่น (distilled water) และ SBF ที่อุณหภูมิ 37°C [4]

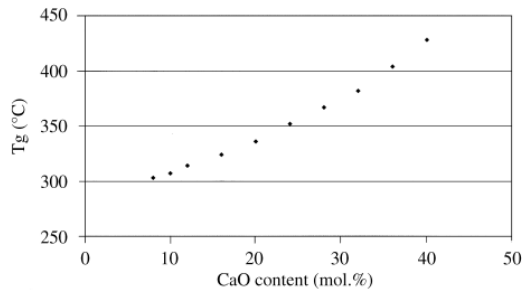
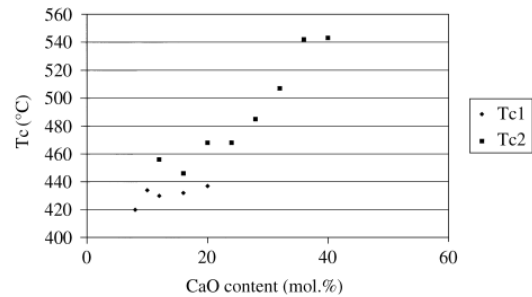
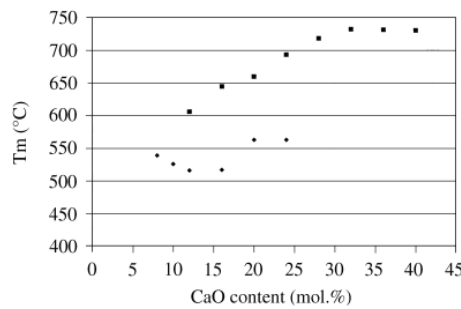
ตาราง 2.3 แสดงอัตราการละลายของแก้วในน้ำกลั่นและ SBF ภาวะความเป็นพิษ และ pH ของ α -MEM หลังจากทดสอบความเป็นพิษ [4]

| Composition | Dissolution rate (g/cm ² ·min) | | | cytotoxicity activity (%) | pH |
|-------------|-------------------------------------------|----------------------|------------------|---------------------------|-----|
| | r_{DW} | r_{SBF} | r_{DW}/r_{SBF} | | |
| 0C80P | f.d. | f.d. | — | 0 | 1.0 |
| 10C80P | 1.7×10^{-7} | 6.7×10^{-8} | 2.5 | 0 | 1.1 |
| 20C80P | 1.3×10^{-8} | 8.0×10^{-9} | 1.7 | 0 | 1.3 |
| 0C70P | f.d. | f.d. | — | 0 | 1.1 |
| 10C70P | 2.2×10^{-7} | 1.8×10^{-8} | 12 | 0 | 1.2 |
| 20C70P | 6.5×10^{-9} | 2.2×10^{-9} | 3.0 | 65 | 4.6 |
| 0C60P | f.d. | 3.5×10^{-6} | — | 0 | 1.4 |
| 5C60P | 1.3×10^{-7} | 3.2×10^{-8} | 3.9 | — | — |
| 10C60P | 9.7×10^{-8} | 2.3×10^{-8} | 4.1 | 0 | 1.6 |
| 20C60P | 4.8×10^{-8} | 1.7×10^{-8} | 2.9 | 0 | 5.6 |
| 0C50P | f.d. | f.d. | — | 14 | 7.2 |
| 5C50P | f.d. | 1.7×10^{-5} | — | — | — |
| 10C50P | 2.8×10^{-8} | 3.2×10^{-9} | 8.9 | 57 | 7.3 |
| 20C50P | 2.0×10^{-8} | 6.7×10^{-9} | 3.0 | 59 | 7.7 |



รูป 2.13 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แสงแสดงการเจริญเติบโตของ human pulp cell หลังการทดสอบภาวะความเป็นพิษ เมื่อ (a) ตัวควบคุม (b) 10C50P (c) 20C50P และ (d) 0C50P (mol%) [4]

ต่อมา ในปี 2000 Franks และ คณะ [5] ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาขอบเขตทางอุณหภูมิและการเกิดผลึกในแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดอัตราส่วนฟอสฟอรัสออกไซด์ เท่ากับร้อยละ 45 โดยโมล โดยอ้างว่าเป็นอัตราส่วนเหมาะสมสำหรับสมบัติทางชีวภาพของแก้วระบบนี้ และกำหนดช่วงอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์เป็นช่วงร้อยละ 8 - 40 โดยโมล จากนั้นก็นำไปศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วย DTA พบว่าค่าที่สำคัญ 3 ชนิด คือ อุณหภูมิการแปลงเฟสของแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_x) และ จุดหลอมเหลว (T_m) มีค่าไม่สูงนัก ดังรูป 2.16 จากนั้นก็นำแก้วที่ได้ไปผ่านกระบวนการอบอ่อน (annealed) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดแก้ว 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าในปริมาณที่มีอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์มาก จะเกิดเฟสของ NaPO_3 และ $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)_6$ ส่วนแก้วที่มีแคลเซียมมาก จะเกิดเพียงเฟสเดียว คือ $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{PO}_3)_6$

Fig. 2. Variation in T_g with CaO content.Fig. 3. Variation in T_c with CaO content.Fig. 4. Variation in T_m with CaO content.

รูป 2.14 แสดงค่าอุณหภูมิการแปลงเฟสของแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และ จุดหลอมเหลว (T_m) ของแก้วระบบ P_2O_5 -CaO- Na_2O ที่มีอัตราส่วน P_2O_5 ร้อยละ 45 โดยโมล [5]

3 ปีต่อมา Ahmed และ คณะ [14, 15] ได้ทำการศึกษา แก้วฟอสเฟตสำหรับวิศวกรรมเนื้อเยื่อ โดยในครั้งแรก จะกล่าวถึงการสังเคราะห์และคุณสมบัติของแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ และ ในส่วนที่สองกล่าวถึงการสังเคราะห์และคุณสมบัติของเส้นใยแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ ในส่วนแรกนั้นเป็นการศึกษาถึง สมบัติทางความร้อน การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ วิเคราะห์ด้วยนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (NMR Spectroscopy) มีประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบ [16] และความสามารถในการละลาย ซึ่งได้กำหนดช่วงของอัตราส่วนในการศึกษาแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ไว้ดังนี้ฟอสฟอรัสออกไซด์ เท่ากับ ร้อยละ 40, 45 และ 50 โดยโมล และ แคลเซียมออกไซด์ เท่ากับ ร้อยละ 30, 35 และ 40 โดยโมล จากการศึกษาด้านสมบัติทางความร้อน ความสามารถในการละลาย และการเกิดเฟสจากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ได้ผลไม่ต่างจากงานวิจัยของ Uo และ Franks แต่จะพบการเกิดเฟสเพิ่มเติมจากการทดลองของ Franks ในแก้วที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง นั่นคือเกิดเฟสของ CaP_2O_6 (calcium phosphate phase) ซึ่งเป็นเฟสที่น่าสนใจ จากเฟส CaP_2O_6 นี้เองทำให้สามารถจำกัดขอบเขตงานวิจัยได้ดียิ่งขึ้น ถึง

อัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ที่จะใช้ในงานวิจัย ส่วนที่สองนั้นจะกล่าวถึงเส้นใยแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ โดยจะศึกษาด้านสมบัติทางความร้อน ความสามารถในการละลาย และ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยแก้ว โดยผลจากศึกษาในส่วนนี้ในด้านสมบัติทางความร้อน และความสามารถในการละลายไม่ต่างจากส่วนแรก ถึงแม้แก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์นี้จะมีสมบัติทางชีวภาพที่ดี แต่ก็ข้อจำกัดทางด้านสมบัติเชิงกลที่ต่ำ จึงไม่เป็นที่นิยมเท่าแก้วที่มีส่วนประกอบของซิลิกอนออกไซด์เป็นหลัก [17-21] ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า แต่ข้อเสียของแก้วที่มีซิลิกอนออกไซด์คือจะเชื่อมต่อกับผิวของร่างกาย และเป็นสารเคมีที่ไม่ใช่องค์ประกอบของร่างกาย ร่างกายจะต้องกำจัดออกซึ่งจะมีผลต่อร่างกายในระยะยาวเมื่อนำมาใช้กับร่างกาย

จากการค้นคว้าเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง ทำให้จำกัดขอบเขตอัตราส่วนของแก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ เพื่อจะนำไปศึกษาต่อไปโดยพิจารณาจากช่วงที่มีความเหมาะสมของทั้งฟอสฟอรัสออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ โดยจะเลือกศึกษา 3 อัตราส่วนด้วยกัน คือ $(45\text{P}_2\text{O}_5-32\text{CaO}-23\text{Na}_2\text{O})$ $(45\text{P}_2\text{O}_5-36\text{CaO}-19\text{Na}_2\text{O})$ และ $(45\text{P}_2\text{O}_5-40\text{CaO}-15\text{Na}_2\text{O})$ นอกจากนี้เราพบว่างานวิจัยดังกล่าวที่ค้นคว้ามาเป็นการสังเคราะห์แก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ แล้วนำแก้วที่ได้ไปวิเคราะห์หาสมบัติต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความเป็นวัสดุทางชีวภาพ โดยในความเป็นจริงแล้วแก้วที่สังเคราะห์ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง ยังต้องมีขั้นตอนในการขึ้นรูป และ ปรับปรุงลักษณะให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงก่อน ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปอีกครั้งซึ่งเป็นกระบวนการทางความร้อน จะทำให้คุณสมบัติแตกต่างจากเดิมซึ่งเคยเป็นเนื้อแก้ว ในการขึ้นรูปนั้นนอกจากกระบวนการเผาผนึกแล้ว ก็มีกระบวนการอื่นที่น่าสนใจอื่นอีก เช่น กระบวนการโซลเจล (sol-gel) เช่นงานวิจัยของ Carta และ คณะ ในปี ค.ศ. 2007 [22] แต่กระบวนการนี้ ต้องใช้ทักษะในการสังเคราะห์ที่ค่อนข้างสูง ใช้สารเคมีในการทำละลายที่มีราคาแพง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจจะศึกษาเซรามิกที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเผาผนึก โดยใช้แก้วระบบฟอสฟอรัสแคลเซียมโซเดียมออกไซด์ เป็นสารตั้งต้น และคุณสมบัติที่สำคัญอย่างยิ่งคือ เซรามิกควรมีรูพรุนเล็กๆเพื่อเอื้อให้มีการเจริญของกระดูกที่ร่างกายสร้างขึ้นใหม่เข้าไปภายในกระดูกสังเคราะห์และมีความสำคัญต่อกระบวนการ drug delivery ในร่างกาย [6, 23] นอกจากนี้กระบวนการสร้างรูพรุนก็มีมากมายหลายวิธีเพื่อให้ได้รูพรุนในแบบต่างๆ และเหมาะสมสำหรับใช้งาน [24-28] และจากการค้นคว้าหาข้อมูล พบว่า Sopyan และ คณะ [7] ได้รวบรวมกระบวนการที่เป็นที่นิยมในการสร้างรูพรุนหลายๆเทคนิคและรูปแบบต่างๆของรูพรุนที่ได้ แต่ที่น่าสนใจก็คือ เทคนิคการสร้างรูพรุนโดยการระเหยออกของสารที่สามารถระเหยได้ในระหว่างกระบวนการเผาผนึก (sintering) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกการบูร (camphor) เป็นสารอินทรีย์ที่ใช้ใน

การสร้างรูปทรง จากการค้นคว้าข้อมูลพื้นฐานทางความปลอดภัย (Materials Safety Data Sheets: MSDS) พบว่า การบูรมีสมการทางเคมีคือ $C_{10}H_{16}O$ สามารถระเหยได้อย่างสมบูรณ์ที่จุดเดือดเท่ากับ $204\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะใช้กับวัสดุที่มีกระบวนการทางความร้อนต่ำดั่งแก้วทั้งสามสูตรที่เลือกมา

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะพบว่างานวิจัยนี้สามารถสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าในเรื่องวัสดุทางชีวภาพต่อไป อีกทั้ง สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านทางการแพทย์ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อประเทศที่จะลดการนำเข้าวัสดุทางชีวภาพราคาแพงจากต่างประเทศ แต่ก็มีวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าที่ผลิตในประเทศทดแทน และสุดท้ายจะนำมาซึ่งการดำรงชีวิตอย่างเป็นสุขของมนุษย์