

บทที่ 2

ทฤษฎี

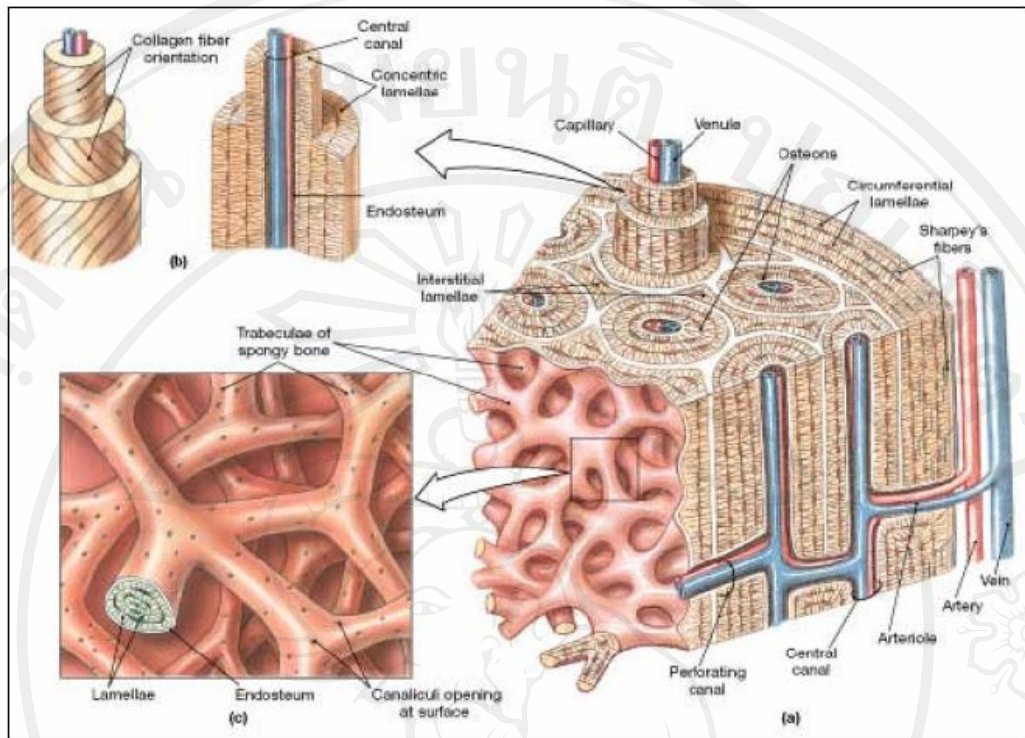
2.1 กระดูก

กระดูกเป็นเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างซับซ้อนมาก องค์ประกอบหลัก คือ คอลลาเจนไฟเบอร์ ประมาณ 20% โดยน้ำหนัก แคลเซียมฟอสเฟตประมาณ 70% โดยน้ำหนัก น้ำ และสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น โปรตีน น้ำตาล และไขมัน ประมาณ 10% โดยน้ำหนัก คอลลาเจนมีเนื้อพื้น (matrix) ซึ่งอยู่ในรูปโมโครไฟเบอร์ลักษณะเหมือนตาข่าย และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 100-2,000 nm ทำให้ยากที่จะสังเกตเห็นคอลลาเจนได้อย่างชัดเจน ส่วนแคลเซียมฟอสเฟตจะอยู่ในรูปผลึก และ อณูฐานของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เป็นองค์ประกอบที่ช่วยทำให้กระดูกแข็งแรง ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์มีรูปร่างเป็นแผ่น หรือเข็ม ยาวประมาณ 40-60 nm กว้างประมาณ 20 nm และหนาประมาณ 1.5-5 nm จะฝังตัวขนานกับคอลลาเจนไฟเบอร์ ส่งผลให้ทิศทางส่วนใหญ่ของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์อยู่ในแนวแกนยาวของคอลลาเจนไฟเบอร์ แสดงดังรูป 2.1 [2, 15, 16]

2.1.1 การเจริญ และพัฒนาของกระดูก

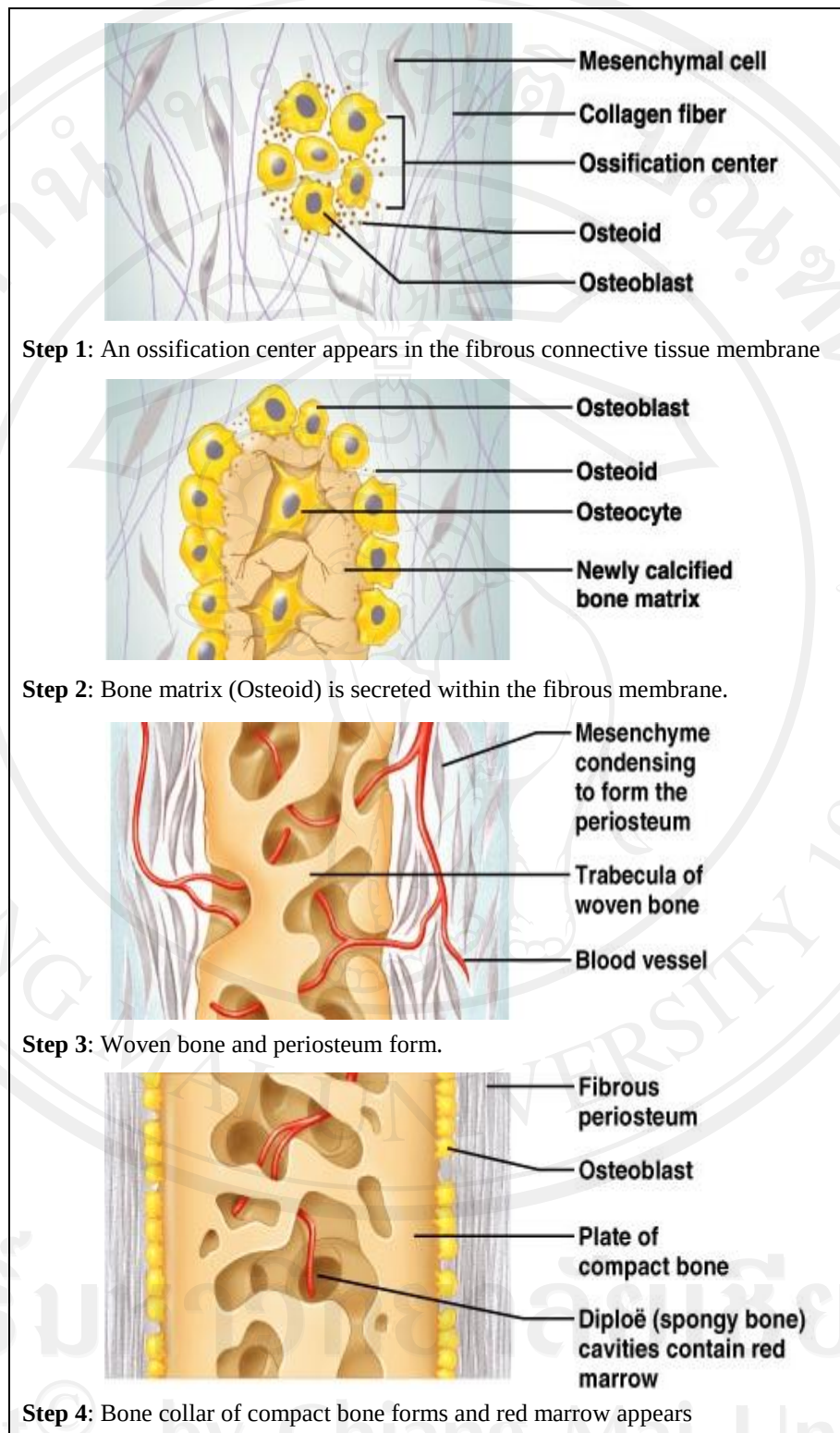
การเจริญ และพัฒนาของกระดูกจะเริ่มตั้งแต่ช่วงที่อยู่ในครรภ์ โดยกระบวนการสร้างเนื้อกระดูก (ossification) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ [17] คือ

1) Intramembranous ossification เป็นกระบวนการอันเกิดจากการรวมตัวของกลุ่มเซลล์มีเซนไคม์ (mesenchymal cells) ซึ่งจะสร้างเนื้อคอลลาเจนไฟเบอร์ ประกอบด้วย เส้นเลือดเล็กๆ ไฟโบรบลาสต์ และเซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูก โดยที่เซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูก (osteoprogenitor cells) จะเกิดการแบ่งตัวมากขึ้น แล้วเปลี่ยนแปลงกลายเป็นเซลล์ออสติโอเบลาสต์ (osteoblast cells) มีหน้าที่สะสมสารอินทรีย์ให้กลายเป็นเนื้อกระดูก และเปลี่ยนเป็นเซลล์ออสติโอไซต์ (osteocyte cells) ในเวลาต่อมา โดยกระบวนการนี้จะเกิดในช่วงการพัฒนาร่างกายของตัวอ่อนในครรภ์มารดา (embryonic development) จากนั้นกระดูกส่วนใหญ่จะเจริญโดยเยื่อหุ้มกระดูก (periosteal new bone formation) ทำให้กระดูกมีความกว้างเพิ่มขึ้น สามารถพบในบริเวณที่กระดูกเป็นแผ่นเรียบ เช่น กระดูกขากรรไกรล่าง กระโหลกศีรษะ เป็นต้น จะไม่พบเฟสของกระดูกอ่อนเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ ซึ่งการเจริญ และพัฒนาของกระดูกจากกระบวนการ Intramembranous ossification แสดงดังรูป 2.2

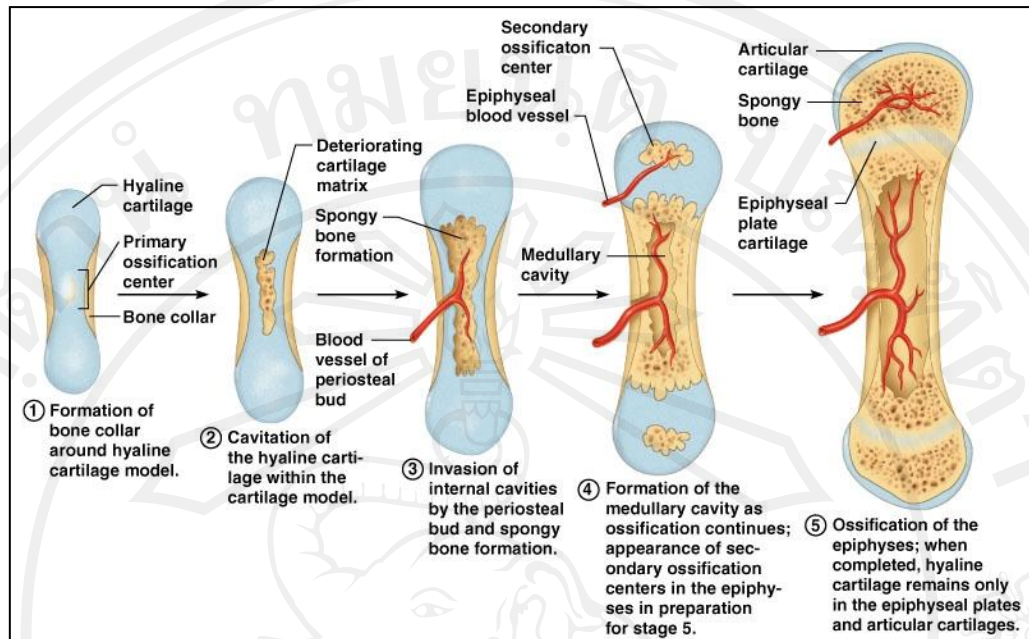


รูป 2.1 ลักษณะทางกายวิภาคของกระดูก (a) ลักษณะกระดูกเนื้อโปร่ง กระดูกเนื้อแน่น และโพรงไขกระดูก (b) การจัดเรียงตัวของคอลลาเจนไฟเบอร์ใน Adjacent lamellar (c) ลักษณะของกระดูกโปร่ง [14]

2) Endochondral ossification เป็นกระบวนการอันเกิดจากการรวมตัวของกลุ่มเซลล์มีเซนไคม์ซึ่งเข้าไปแทนที่เซลล์กระดูกอ่อนผ่านทางเส้นเลือด โดยเริ่มจากส่วนกลางของกระดูกซึ่งเป็นจุดสร้างกระดูกปฐมภูมิ เมื่อกลุ่มเซลล์มีเซนไคม์พัฒนาไปเป็นเซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูกแล้วจะกลายเป็นเซลล์ออสติโอคลาสต์ โดยมีหน้าที่สะสมสารอนินทรีย์บนกระดูกอ่อน และเซลล์ออสติโอคลาสต์ซึ่งทำหน้าที่ทำลายทราบีคิวลา (trabeculae) ของกระดูกอ่อน และกระดูกบางส่วน จากนั้นเซลล์ออสติโอไซต์จะสร้างกระดูกที่เจริญเติบโตเต็มที่ (lamellar bone) เข้าไปแทนที่ นอกจากนี้พบว่าการสร้างกระดูกทุติยภูมิที่บริเวณปลายกระดูก การสร้างกระดูกทั้งสองจุดจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งมาบรรจบกันที่แนวแผ่นอีพิไฟเซียล (epiphyseal plate) จะเริ่มสร้างหลังคลอดจนกระทั่งเข้าสู่วัยผู้ใหญ่ แนวดังกล่าวนี้จะถูกแทนที่ด้วยกระดูกทั้งหมด แม้ว่าการเจริญพัฒนาของกระดูกจะหยุดไปแล้ว แต่ยังคงมีกระบวนการก่อรูปของกระดูกอย่างต่อเนื่อง เพื่อซ่อมแซมความเสียหายเล็กน้อยๆ ของกระดูก เช่น บริเวณกระดูกที่มีการแตกหัก เป็นต้น และเป็นการรักษาระดับแคลเซียมในกระแสเลือดอีกด้วย การเจริญและพัฒนาของกระดูกในกระบวนการดังกล่าวแสดงดังรูป 2.3



รูป 2.2 การเจริญ และพัฒนาของกระดูกในกระบวนการ Intramembranous ossification [18]



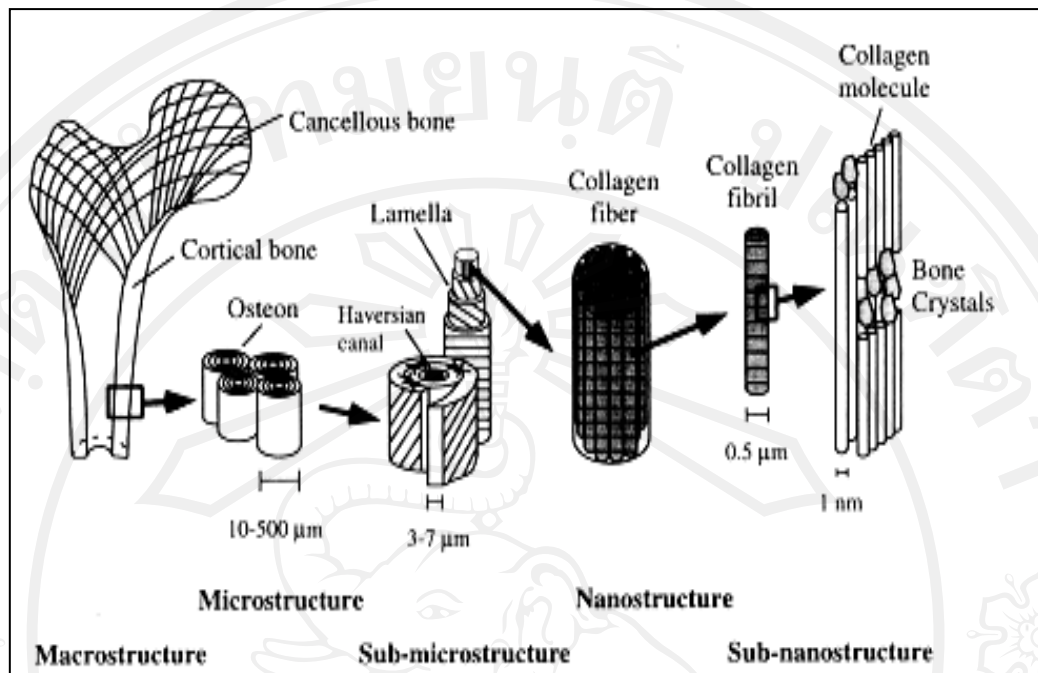
รูป 2.3 การเจริญ และพัฒนาของกระดูกในกระบวนการ Endochondral ossification [19]

2.1.2 ส่วนประกอบของกระดูก

กระดูกที่เติบโตเต็มที่ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กระดูกเนื้อแน่น (compact bone) และกระดูกเนื้อโปร่ง (cancellous bone) [14]

1) กระดูกเนื้อแน่น ช่วยทำให้กระดูกแข็งแรง ซึ่งแบบจำลองลำดับโครงสร้างกระดูกมนุษย์ในกระดูกเนื้อแน่นแสดงดังรูป 2.4 โดยคอลลาเจนไฟเบอร์จะจัดเรียงตัวอยู่ภายใน lamellar sheets หนาประมาณ 3-7 nm (4-20 แผ่น) จัดเรียงตัวในลักษณะที่เป็นวงแหวนรอบช่องฮาเวอร์เซียน (harversian canal) แล้วเกิดเป็นเซลล์กระดูก พื้นที่หน้าตัดของกระดูกเนื้อแน่นจะแสดงให้เห็นเซลล์ของกระดูกที่มีลักษณะทรงกระบอก การส่งถ่ายสารอาหารจะทำโดยระบบที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างคานาlikuไล (canaliculi) และลาคุนาร์ (lacunar) แล้วเกิดการแตกแขนงของหลอดเลือดไปตามท่อที่ตั้งฉากกับกระดูกซึ่งเรียกว่า Volkman's canal โดยจะเชื่อมอยู่กับโพรงไขกระดูก ระบบที่เชื่อมต่อกันนี้จะเต็มไปด้วยของไหลของร่างกาย และมีปริมาตรสูงสุดถึง 19% ของร่างกาย

2) กระดูกเนื้อโปร่ง ประกอบด้วย เซลล์กระดูกลักษณะเป็นหลอด และแผ่นเชื่อมโยกันเป็นโครงข่ายแสดงดังรูป 2.5 โดยกระดูกที่มีโครงสร้างคล้ายหลอดจะพัฒนาบริเวณที่มีความกดดันต่ำ ทำให้มีความหนาแน่นต่ำ และมีรูพรุนเปิด ส่วนกระดูกที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความกดดันสูง ทำให้มีความหนาแน่นสูง และมีรูพรุนปิด



รูป 2.4 แบบจำลองแสดงลำดับโครงสร้างกระดูกของมนุษย์ในกระดูกเนื้อแน่น [14]



รูป 2.5 ลักษณะโครงสร้างของกระดูกโปรง [20]

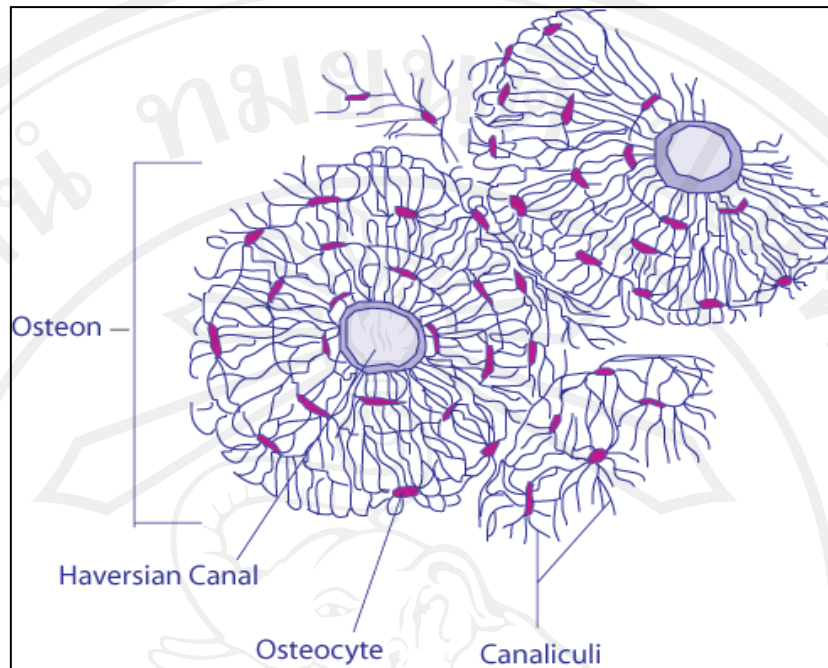
2.1.3 เซลล์ของกระดูก [17]

เนื้อเยื่อกระดูก ประกอบด้วย เซลล์กระดูกที่มีต้นกำเนิดมาจากเมโซเดิร์ม (mesoderm) สามารถแบ่งตามรูปร่าง ลักษณะ หน้าที และตำแหน่งที่พบได้ 4 ประเภท คือ

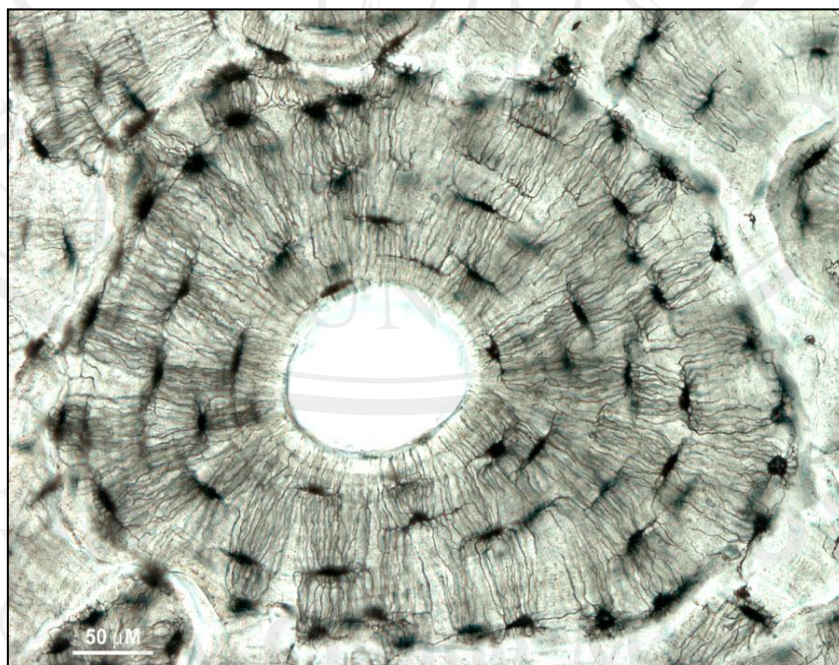
1) เซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูก พบอยู่ในเยื่อหุ้มภายในกระดูก (endosteum) ลักษณะเซลล์เป็นรูปกระสวย มีนิวเคลียสเดียว เมื่อไม่ถูกกระตุ้นใดๆ จะคงรูปเป็นเซลล์ต้นกำเนิดของกลุ่มเซลล์มีเซนไคม์อยู่ แต่เมื่อถูกกระตุ้น เช่น กระดูกแตกหัก เป็นต้น เซลล์นี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วไปเป็นเซลล์ออสติโอบลาสต์

2) เซลล์ออสติโอบลาสต์พัฒนามาจากเซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูก ลักษณะเซลล์เป็นรูปทรงลูกเต๋า หรือทรงกระบอก เซลล์จะมีการยื่นไซโทพลาสซึม (cytoplasm) ออกไปติดต่อกับเซลล์ข้างเคียง ช่องที่ติดต่อกันนี้ เรียกว่า คานาlikuไล ส่วนเซลล์ออสติโอบลาสต์จะอยู่ในช่องที่เรียกว่า ลากูนา เซลล์ปลอกคอ (cytoplasm process) ที่แทรกอยู่ในคานาlikuไลจะทำหน้าที่นำอาหารมาเลี้ยงเซลล์ โดยติดต่อกับหลอดเลือดในช่องฮาวเวิร์เชียนที่อยู่ในคานาlikuไล ซึ่งอาหารที่นำมาเลี้ยงเซลล์ประกอบด้วย โปรตีนที่ได้มาจากกระแสเลือด ภาวะของเซลล์ออสติโอบลาสต์ในขณะนี้จะเรียกว่า ออสติโอไซต์ ปกติจะใช้เวลาประมาณ 3 วัน เซลล์ชนิดนี้จะทำหน้าที่สร้างโปรตีนที่เรียกว่า ออสติอยด์ (osteoid) ซึ่งโปรตีนดังกล่าวจะสะสมสารอนินทรีย์ให้กลายเป็นเนื้อกระดูกในเวลาต่อมา และคอยควบคุมการแลกเปลี่ยนอิเล็กโทรไลต์ระหว่างของเหลวที่อยู่นอกเซลล์ (extracellular fluid) เช่น พลาสมา (plasma) กับ ของเหลวภายในกระดูก (bone fluid) เซลล์ชนิดนี้จะอยู่บริเวณรอยต่อของออสติอยด์ และมีความหนาประมาณ 2-10 μm นอกจากนี้พบว่าเซลล์ออสติโอบลาสต์ 1 ตัว สามารถสร้างออสติอยด์ได้ประมาณ 470 $\mu\text{m}^3/\text{วัน}$ [21] ในกระดูกจะมีอัตราการสร้างออสติอยด์เท่ากับอัตราการสะสมแร่ธาตุของออสติอยด์ ปกติออสติอยด์ใช้เวลาในการสะสมแร่ธาตุประมาณ 10 วัน แต่ถ้าร่างกายอยู่ในสภาวะไม่แข็งแรงจะมีการสร้างออสติอยด์ลดลง

3) เซลล์ออสติโอไซต์ เป็นเซลล์กระดูกที่เจริญเต็มที่แล้ว รูปร่างของเซลล์จะขึ้นอยู่กับอายุของ osteon และภาวะทางสรีรวิทยาของเซลล์ในขณะนั้น (physiologic status) มีนิวเคลียสเดียว เซลล์ออสติโอไซต์มีเซลล์ปลอกคออันเดียว หรือหลายอันก็ได้ และจะแผ่ออกไปยังเซลล์ปลอกคอของเซลล์ออสติโอไซต์ตัวอื่นได้ ทำให้ครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่า 90% ของการเรียงตัวของเซลล์ และเป็นตัวควบคุมการแลกเปลี่ยนอาหาร แร่ธาตุ ระหว่างเลือด และของเหลวในกระดูก จากการทดลองสนับสนุนว่า เซลล์ชนิดนี้สามารถทำหน้าที่ได้ทั้งการสร้าง และทำลายกระดูก และช่วยรักษาปริมาณแคลเซียมในซีรัมให้คงอยู่ในสภาวะปกติได้ด้วย แสดงดังรูป 2.6 และ 2.7



รูป 2.6 ระบบการลำเลียงอาหารในกระดูกอสติโอไซต์ที่อยู่ในลาอูนาร์โดยมีคานาไลคิวไลเป็นทาง
ลำเลียงอาหาร โดยรับมาจากช่องฮาเวอร์เซียน [22]



รูป 2.7 ส่วนประกอบของเซลล์กระดูกอสติโอไซต์ [23]

4) เซลล์ออสติโอคลาสต์ เป็นเซลล์ที่เจริญมาจากเซลล์ต้นกำเนิดของเม็ดเลือดในไขกระดูก มีหลายนิวเคลียส และมีไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ขนาดใหญ่ มีหน้าที่สลายแร่ในกระดูก และสารประกอบที่อยู่ระหว่างเซลล์กระดูก โดยจะพบบริเวณผิวกระดูกที่มีการละลายอยู่ในแอ่งที่เรียกว่า Howship's lacuna เซลล์ออสติโอคลาสต์จะทำงานร่วมกับเซลล์ออสติโอไซต์ ในการก่อรูปกระดูก (remodeling) โดยทำให้เกิดการสร้างกระดูก (bone apposition) และการสลายกระดูก (bone resorption) ซึ่งในสภาวะปกติเซลล์ออสติโอคลาสต์จะเกิดการสลายกระดูกต่อวันในอัตราประมาณ $0.50 \mu\text{m}^3$

เมื่อสภาวะปกติกระดูกสามารถรับแรงดึง (tensile strength) ได้ประมาณ 10 kg/m และรับแรงกด (compressive strength) ได้ประมาณ 10 kg/m แต่เมื่อได้รับแรงกระทบกระเทือน กระดูกบริเวณที่รับแรงกดจะมีการทำลายกระดูกเกิดขึ้น ส่วนกระดูกบริเวณที่รับแรงดึงจะมีการสร้างกระดูกเกิดขึ้น ภาวะปกติในผู้ใหญ่กระดูกจะถูกทำลายประมาณ 2% ต่อปี แต่จะมีกระบวนการก่อกระดูกเพื่อซ่อมแซมเสมอ

2.2 วัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูก [24]

2.2.1 สมบัติของวัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูก

สมบัติของวัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูก มีดังนี้

- 1) สามารถเข้ากันได้กับร่างกาย
- 2) สามารถเป็นโครงร่างเพื่อให้เกิดการสร้างกระดูกใหม่ได้
- 3) สามารถทนต่อแรงกดได้สูง
- 4) สามารถย่อยสลายเมื่อถูกแทนที่ด้วยกระดูกจากตัวผู้รับอย่างเต็มที่
- 5) สามารถเหนี่ยวนำให้มีการสร้างกระดูกใหม่ได้
- 6) สามารถยึดติดกับกระดูกจริงได้
- 7) สามารถละลายน้ำได้ เพราะต้องสัมผัสกับเลือด และช่วยให้ก้อนเลือดคงตัวอยู่ได้
- 8) สามารถใช้เป็นสารที่เป็นตัวนำสารชนิดอื่นๆ ได้
- 9) มีรูพรุนเล็กๆ เพื่อเอื้อให้มีการเจริญของกระดูกเข้าไปภายในได้
- 10) มีหลายรูปแบบ และหลายขนาดให้เหมาะสมกับการใช้งาน
- 11) มีลักษณะเป็นสารทึบแสง
- 12) ไม่เป็นพาหะนำโรค
- 13) ไม่ทำให้เกิดอาการแพ้
- 14) ใช้งานง่าย ไม่มีขั้นตอนที่ซับซ้อน

2.2.2 ชนิดของวัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูก [14, 24]

วัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูกมักผลิตจากวัสดุที่มีแคลเซียมเป็นส่วนประกอบ โดยผลิตจากวัสดุที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น กระดูกสัตว์ ปะการัง เป็นต้น สามารถแบ่งวัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูกตามแหล่งที่มาของผู้ให้ และปฏิกิริยาการตอบสนองของภูมิคุ้มกันของผู้รับ ดังนี้

- 1) กระดูกจากตัวผู้ป่วยเอง ถือว่าเป็นวัสดุปลูกถ่ายทดแทนกระดูกที่ดีที่สุดเนื่องจากสามารถให้เซลล์ที่มีชีวิต และไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อต้านจากภูมิคุ้มกันของร่างกาย แต่ต้องมีการผ่าตัดบริเวณอื่นของร่างกาย เพื่อได้ชิ้นกระดูกมาใช้ในการปลูกถ่ายกระดูก
- 2) กระดูกที่ได้จากคู่แฝดที่มาจากไข่ใบเดียวกัน สามารถให้เซลล์ที่มีชีวิต และไม่ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อต้านจากภูมิคุ้มกันของร่างกาย
- 3) กระดูกที่ได้รับการบริจาคจากผู้อื่น จะต้องผ่านกระบวนการทางกายภาพ และเคมี เพื่อลดปฏิกิริยาการต่อต้านจากภูมิคุ้มกันโดยทำลายเซลล์ที่ใช้ในการสร้างกระดูกที่เหลืออยู่ในกระดูกออก กระบวนการที่นิยมใช้ คือ Freeze-dried bone และ Demineralized freeze dried bone
- 4) กระดูกทดแทนจากสัตว์ หรือกระดูกจากการสังเคราะห์ จะต้องผ่านกระบวนการทำให้สะอาดเป็นอย่างดี โดยจะสกัดเอาสารอินทรีย์ออก เพื่อให้กระดูกใหม่เจริญเข้าไปภายในวัสดุทดแทนหลังจากนำไปปลูกกระดูก เรียกว่า Osteoconduction นอกจากนี้ อาจเกิดปรากฏการณ์เหนี่ยวนำให้มีการสร้างกระดูกใหม่ ซึ่งเรียกว่า Osteoinduction ได้อีกด้วย

2.2.3 หลักชีววิทยาของการปลูกกระดูก [25-28]

เมื่อมีการปลูกกระดูกจะมีการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาเกิดขึ้น 3 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

- 1) Osteogenesis หมายถึง กระบวนการสร้างกระดูกใหม่ขึ้นจากเซลล์ออสติโอเบลาสต์ในกระดูกที่นำไปปลูก หรือจากเซลล์ต่างๆ บริเวณรับการปลูกกระดูก (recipient site) กระบวนการนี้จะพบได้ในการปลูกกระดูกที่มีเซลล์ที่มีชีวิตอยู่ (autologous bone) เท่านั้น
- 2) Osteoconduction หมายถึง กระบวนการที่เซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูก เซลล์ที่อยู่รอบๆ หลอดเลือด และหลอดเลือดฝอยของบริเวณรับการปลูกกระดูก เจริญงอกเข้าไปในกระดูกที่นำไปปลูก และเกิดการแบ่งเซลล์ สร้างเซลล์กระดูก และสร้างกระดูกขึ้นภายในกระดูกที่นำไปปลูก โดยที่กระดูกที่นำไปปลูกมีสภาพเหมาะสมในการเป็นโครงให้เซลล์กระดูก และหลอดเลือดฝอย เจริญงอกเข้าไปได้ กระบวนการนี้จะไม่เกิดขึ้นเมื่อนำเอากระดูกปลูกถ่ายที่กำจัดโปรตีน และปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องออก

3) Osteoinduction หมายถึง กระบวนการที่บริเวณรับการปลูกระดูกตอบสนองต่อการปลูกระดูก โดยมีเซลล์ที่ทำหน้าที่สร้างกระดูกเพิ่มขึ้น และมีการสร้างกระดูกในเวลาต่อมา กระบวนการนี้มีขั้นตอนซับซ้อน มีความเกี่ยวข้องกับเซลล์ และสารหลายชนิด ซึ่งถูกควบคุมจากฮอร์โมน และสารกระตุ้นการเจริญเฉพาะที่ (local growth factors)

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการ Osteoinduction ที่สำคัญ ได้แก่

(1) Chemotaxis เป็นกลไกของเซลล์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างกระดูกของบริเวณที่รับการปลูกระดูกเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในบริเวณที่จะสร้างกระดูก โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีหลายตัวบริเวณนั้น เรียกว่า Cell adhesion protein สารที่มีอิทธิพลสูง ได้แก่ ไฟโบรเนคติน (fibronectin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีโมเลกุลประมาณ 450 K-dalton เซลล์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างกระดูก ได้แก่ เซลล์ต้นกำเนิดเซลล์กระดูกที่อยู่ในไขกระดูกของบริเวณกระดูกที่รับการปลูกระดูก เป็นต้น

(2) Mitosis เป็นเซลล์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างกระดูก จะมีทั้งเกิดจากการรวมตัวกัน และแบ่งตัวเพิ่มจำนวน โดยพบได้จากการสร้างสาร DNA ใหม่ๆ เพิ่มขึ้น

(3) Differentiation เป็นระยะที่เซลล์สร้างกระดูกเกิดการรวมตัว แบ่งตัว และเจริญเติบโตจนกระทั่งพัฒนาเป็นกระดูกอ่อน ตามด้วยหลุดเลือดฝอยงอกเข้ามาเลี้ยง และเกิด Endochondral ossification กลายเป็นเนื้อเยื่อกระดูก จากนั้นมีการก่อรูปกระดูก และพัฒนาไขกระดูกตอนท้าย

2.2.4 มาตรฐานสมบัติวัสดุตามเกณฑ์ ASTM [29]

- 1) วัสดุจะต้องไม่มีสารอินทรีย์
- 2) ต้องจำกัดความเข้มของโลหะหนักที่พบภายในวัสดุ ดังนี้

(1) As	3	ppm
(2) Cd	5	ppm
(3) Hg	5	ppm
(4) Pb	30	ppm
(5) โลหะหนักรวมทั้งหมดต้องไม่เกิน	50	ppm
- 3) โลหะ และออกไซด์ทั้งหมดต้อง $\leq 0.1\%$
- 4) 95% ของวัสดุมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์
- 5) มีการยืนยันความเข้ากันได้กับร่างกายสิ่งมีชีวิต
- 6) มีการควบคุมกระบวนการผลิต

2.3 สารเคลือบฟอสเฟต

ปัจจุบันสารเคลือบฟอสเฟตกำลังเป็นที่สนใจในการทำวิจัย และพัฒนาในสาขาชีววัสดุ (biomaterials) เพื่อการประดิษฐ์วัสดุฝังในขึ้นมาใช้ในงานทางคลินิก โดยเฉพาะวัสดุเซรามิกชีวภาพ (bioceramics) ได้รับการอนุญาตให้สามารถใช้ทดแทนส่วนต่างๆ ของร่างกาย สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ [30-33]

1. วัสดุที่ไม่มีอิทธิพลใดๆ ต่อเนื้อเยื่อที่อยู่รอบๆ (bioinert) วัสดุกลุ่มนี้ถูกใช้งานด้วยการฝังเข้าไปในร่างกายสิ่งมีชีวิต เรียกว่า In vivo tests โดยวัสดุเซรามิกกลุ่มแรกที่ถูกใช้ในงานคลินิก คือ อะลูมินา และเซอร์โคเนีย

2. วัสดุที่สามารถยึดติดกับเนื้อเยื่อของกระดูกได้ (bioactive) เมื่อวัสดุกลุ่มนี้สัมผัสกับของเหลวในร่างกายจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้กระดูกงอกขึ้นมาใหม่เพื่อทดแทนกระดูกส่วนที่เกิดความบกพร่อง เรียกว่า In vitro tests โดยวัสดุเซรามิกที่จะนำไปใช้งานในกลุ่มนี้ ได้แก่ สารประกอบในกลุ่มเคลือบฟอสเฟตต่างๆ สารประกอบเคลือบฟอสเฟตชีวภาพ เกลือฟอสเฟตของเคลือบที่มีการนำมาใช้งาน และไม่เป็นพิษในทางชีววัสดุ และอื่นๆ แสดงดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สารประกอบเคลือบฟอสเฟตที่มีการใช้งานในชีววัสดุ [34]

Name and chemical formula	Abbreviation	Type of material and utilization
Hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	HAP	— Ceramic — Plasma sprayed coatings — Composites — Drug carrier
Calcium deficient apatites	ns-HAP	— Low temperature coating — Composites — Drug carrier
α and β tricalcium phosphates $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	α and β TCP	— Ceramics — Composites — Plasma coating cements — Drug carrier

ตาราง 2.1 การใช้งานของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตชีวภาพชนิดต่างๆ (ต่อ) [34]

Name and chemical formula	Abbreviation	Type of material and utilization
Dicalcium phosphate dehydrate $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	DCPD	— Cements
Anhydrous dicalcium phosphate CaHPO_4	DCPA	— Cements
Octocalcium phosphate $\text{Ca}_8(\text{PO}_4)_4(\text{HPO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	OCP	— Cements
Tetracalcium phosphate $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$	TTCP	— Cements
Amorphous calcium phosphate	ACP	— Cements — Drug carrier — Low temperature coating

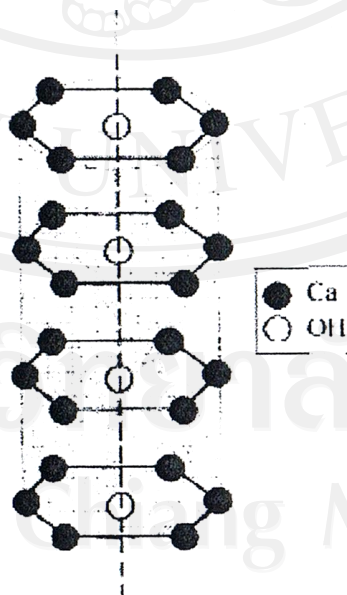
2.4 ไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นเซรามิกชนิดหนึ่งที่มีการตอบสนองแบบว่องไวทางชีวภาพ และมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกระดูก หรือเนื้อเยื่อแข็งชนิดอื่นของสัตว์มีกระดูกสันหลัง เช่น ฟันแบ่งเนื้อเยื่อแข็งเป็น 3 ชนิด ดังนี้ ชนิดแรก คือ เคลือบฟัน (enamel) เป็นส่วนที่มีความแข็งมากที่สุดในร่างกาย มีผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ถึง 97% โดยน้ำหนัก มีสารอินทรีย์ และน้ำ 3% โดยน้ำหนัก ชนิดที่สอง คือ เนื้อฟัน (dentine) เป็นส่วนที่คล้ายกับกระดูกมากที่สุด และชนิดที่สาม คือ รากฟัน ประกอบด้วย ผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ 45% โดยน้ำหนัก สารอินทรีย์ และน้ำ 55% โดยน้ำหนัก เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นสื่อทำให้เกิดการขยายตัวของเซลล์กระดูก เมื่อถูกปลูกฝังภายในเนื้อกระดูก [35-39]

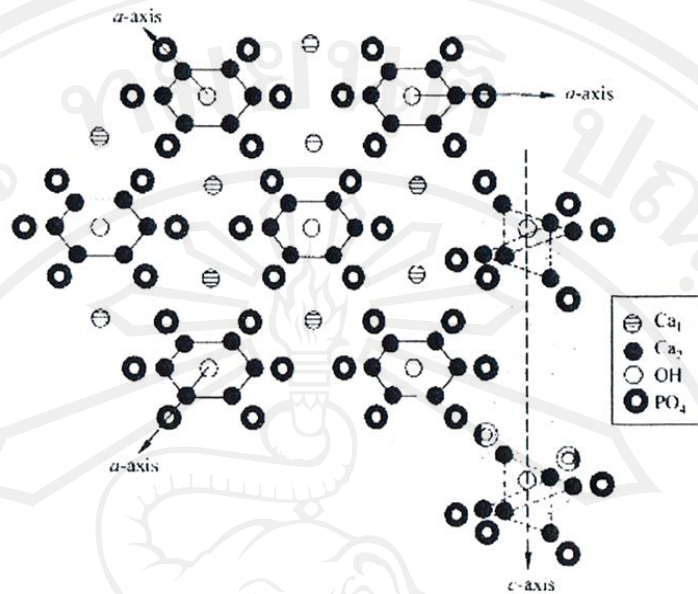
2.4.1 โครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์ [38, 40, 41]

ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีสูตรโมเลกุลเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ประกอบด้วย Ca^{2+} , PO_4^{3-} และ OH^- มีอัตราส่วนต่อโมลของ Ca:P เท่ากับ 1.67 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์ แสดงดังรูป 2.8 โดยมี Ca^{2+} บรรจุอยู่ในผลึกรูปแท่ง และมี OH^- ล้อมรอบอยู่ด้านข้าง โครงสร้างของไฮดรอกซีอะพาไทต์อยู่ในระบบของผลึก hexagonal rhombic prisms ด้วย space group $\text{P6}_3/\text{m}$ ลักษณะเฉพาะของการจัดเรียงตัวตามระนาบแกน c ในแนวตั้ง ถึงระนาบแกน a เสมอ เป็นแนวเดียวกันทั้ง 3 ระนาบทำมุมกัน 120° เท่ากัน และมีขนาดของหน่วยเซลล์ ($a = 9.441 \text{ \AA}$, $c = 6.882 \text{ \AA}$) ในแต่ละระนาบของหน่วยเซลล์ที่มีขนาดเล็กที่สุด มารวมตัวกันได้เป็นผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ แสดงดังรูป 2.9 ตามตำแหน่งของหน่วยเซลล์ แคลเซียมอะตอมทั้งหมด 10 อะตอม สามารถแยกเป็น 2 ประเภท คือ Ca_1 และ Ca_2 แคลเซียมอะตอม 4 อะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง Ca_1 ซึ่งวางอยู่ตรงตำแหน่งของออกตรองอีครอล

แคลเซียมอะตอม 6 ตัวอยู่ที่ตำแหน่ง Ca_2 ซึ่งวางอยู่ที่มุมของผลึก hexagonal และมี OH^- ล้อมรอบไว้ แต่แคลเซียมอะตอมทั้ง 6 อะตอม ไม่ได้เรียงตัวอยู่ในระนาบเดียวกัน ในแต่ละการจัดเรียงตำแหน่งรูปสามเหลี่ยมที่ $z = 0.25$ และที่ $z = 0.75$ OH^- จะวางอยู่ตรงแนวศูนย์กลางทางแนวตั้งของผลึก Hexagonal และแคลเซียม Ca_2 ทั้ง 6 อะตอมกับอะตอมของฟอสเฟตทั้ง 6 อะตอมมีการจัดเรียงแบบขดเกลียวจากระดับ $z = 0.25$ และที่ $z = 0.75$ และเรียงตัวเป็นสามเหลี่ยม 2 ตัว กลุ่มของหมู่ฟอสเฟตทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความเสถียร



รูป 2.8 โครงสร้างแลตทิซของผลึกอะพาไทต์อย่างง่าย [38]

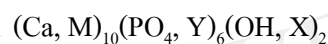


รูป 2.9 การจัดเรียงอะตอมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ [38]

2.4.2 การถูกแทนที่ของหมู่อะพาไทต์ [42, 43]

สมบัติทางชีววิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตต่างจากไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์ ดังนี้ ความเป็นปริมาณสารสัมพันธ์ องค์ประกอบ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล เนื่องจากมีโอกาสเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้

สูตรโมเลกุลที่เหมาะสมของไฮดรอกซีอะพาไทต์ทางชีววิทยา คือ

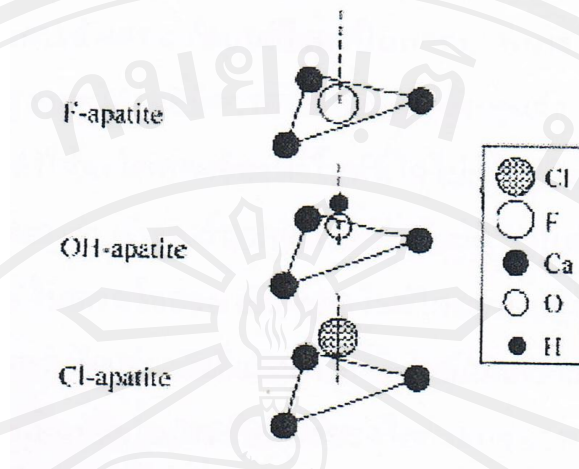


M แทนไอออนบวก เช่น Mg^{2+} Na^+ K^+ Sr^{2+} Ba^{2+} เป็นต้น

Y แทนไอออนลบ เช่น CO_3^{2-} H_2PO_4^- HPO_4^{2-} SO_4^{2-} เป็นต้น

X แทนไอออนลบ เช่น F^- Cl^- CO_3^{2-} เป็นต้น

ตัวอย่างเช่น เมื่อ F^- แทนที่หมู่ OH^- ในโครงสร้างของอะพาไทต์เกิดเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ และเมื่อ Cl^- แทนที่หมู่ OH^- ในโครงสร้างอะพาไทต์เกิดเป็น $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$ แต่ตำแหน่งของ OH^- Cl^- และ F^- ในโครงสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความแตกต่างกันดังรูป 2.10 แม้ว่าอะตอมของ OH^- Cl^- และ F^- จะวางตามแนวแกน c ที่ศูนย์กลางสามเหลี่ยมของอะตอมแคลเซียม



รูป 2.10 ตำแหน่งของ F OH และ Cl ที่จุดศูนย์กลางระหว่างอะตอมของแคลเซียม [43]

2.4.3 ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากวัสดุธรรมชาติ [44]

ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากวัสดุธรรมชาติได้มาจากกระดูกสัตว์เหลือทิ้งในกระบวนการผลิตอื่นๆ ซึ่งทำให้ประหยัดต้นทุนการผลิต และไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา โดยสามารถเตรียมได้หลายวิธี ดังนี้

1) การเตรียมด้วยด่าง (alkaline hydrothermal hydrolysis) ปฏิกริยาเกิดขึ้นในหม้อต้มแรงดันสูง และอบด้วยเตาไมโครเวฟ วิธีการนี้สามารถผลิตผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ในระดับนาโนเมตรได้

2) การเตรียมโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติ (subcritical water) เป็นการสกัดโปรตีนด้วยเทคนิคแรงดันต่ำ ซึ่งจะให้ความร้อนภายใต้แรงดัน ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้งานจะต่ำกว่าอุณหภูมิค่าวิกฤตของน้ำ การเพิ่มของอุณหภูมิจะเกิดการเปลี่ยนขั้วของตัวทำละลายทำให้โมเลกุลของน้ำไม่มีขั้ว อีกทั้งแรงตึงผิว ความหนืด และค่าคงที่ทางไฟฟ้าของน้ำจะลดลงด้วย การสกัดโดยใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติที่อุณหภูมิ 275°C มีประโยชน์ในการสกัดคอลลาเจน และสารอินทรีย์อื่นๆ

3) การเตรียมด้วยกระบวนการทางความร้อน (thermal decomposition) สามารถผลิตผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์รูปแท่งขนาดนาโนเมตรได้ และมีปริมาณมากกว่าการเตรียมด้วยด่าง และใช้น้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤติ

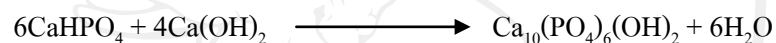
กระบวนการเตรียมทั้งหมดดังที่กล่าวข้างต้นนี้เป็นการสกัดเอาสารอินทรีย์ออกจากเนื้อของกระดูกสัตว์

2.4.4 การสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ [45-51]

ลักษณะเฉพาะของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้มีฐานวิทยาศาสตร์ ปริมาณสารสัมพันธ์ และระดับขั้นของการเกิดผลึกเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการสังเคราะห์นั้นๆ โดยกระบวนการสังเคราะห์ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) กระบวนการสังเคราะห์แบบแห้ง (dry chemical method)

การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์แบบแห้งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมกับฟอสฟอรัสในสถานะของแข็ง ซึ่งมีข้อดี คือ ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้เป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์ และมีความเป็นผลึกสูง ส่วนข้อเสีย คือ ปฏิกิริยาจะเกิดที่อุณหภูมิสูง และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน กระบวนการนี้จะเริ่มด้วยการนำสารตั้งต้นผสมกัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด และเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950°C สามารถแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ



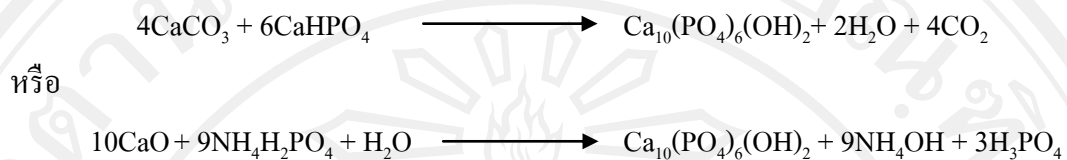
2) กระบวนการสังเคราะห์แบบเปียก (wet chemical method)

ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวสูง และง่ายต่อการเป็นสารละลายอิมัลชัน แต่กระบวนการนี้จะไม่เป็นไปตามปริมาณสารสัมพันธ์ เนื่องจากการปนเปื้อนของไอออนกลุ่มต่างๆ เช่น คาร์บอเนตไอออน ไฮโดรเจนฟอสเฟตไอออน โพแทสเซียมไอออน โซเดียมไอออน ไนเตรตไอออน และคลอไรด์ไอออน โดยมีสาเหตุมาจากความสามารถในดึงไอออนต่างๆ ของกลุ่มอะพาไทต์ ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระบวนการนี้ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

(1) ปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล เป็นปฏิกิริยาระหว่างสาร 2 ชนิด ที่มีลักษณะเฉพาะทางกายภาพแตกต่างกัน เช่น สารละลาย หรือแร่ธาตุ ทำปฏิกิริยากันภายใต้แรงดัน และอุณหภูมิสูง แล้วเกิดการสร้างผลึกขึ้นมา ซึ่งการสร้างผลึกขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้าง และพฤติกรรมของสารแต่ละชนิด กระบวนการนี้ทำให้ระดับขั้นของการเกิดผลึกมีสูง และอัตราส่วนต่อโมลระหว่าง Ca:P มีความเป็นปริมาณสารสัมพันธ์มากขึ้น เพราะเฟสที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ เช่น เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต ไตรแคลเซียมฟอสเฟต และเตตระแคลเซียมฟอสเฟต สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ภายใต้สภาวะของกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล

โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดที่อุณหภูมิ 275°C ภายใต้แรงดันไฮโดร 12,000 psi (1 psi = 0.070 kg/cm²) ผลของปฏิกิริยาทำให้ได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีกลุ่มของคาร์บอเนตไอออน เข้ามาร่วมด้วย แต่ลักษณะผลึกที่เกิดมีความสมบูรณ์ และต่อเนื่องกัน การหลีกเลี่ยงการถูกแทนที่

ด้วยคาร์บอเนตไอออน ทำได้โดยการผสมแคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต หรือแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟตซึ่งสามารถเติมลงในส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนต ตามสมการ ดังนี้



(2) ปฏิกริยาไฮโดรไลซิส เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผลิตผงไฮดรอกซีอะพาไทต์จากการย่อยสลายกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตด้วยไอน้ำ ความร้อน และความดัน เช่น ไดแคลเซียมฟอสเฟต ไตรแคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟตอสติฐาน ออกตะแคลเซียมฟอสเฟต แคลเซียมคาร์บอเนต โปแตสเซียมฟอสเฟตคาร์บอเนต และอื่นๆ ทั้งหมดสามารถสลายตัวเกิดเป็นผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอ

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ ปกติจะต่ำกว่า 100°C และสามารถละลายในสารละลายอื่นๆ ได้มากกว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่บริสุทธิ์ ดังนั้นอาจนำไปใช้ร่วมกับกระดูกได้ ตัวอย่างของสมการเป็นดังนี้



อย่างไรก็ตาม ผลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เกิดขึ้นไม่เป็นปริมาณสารสัมพันธ์ และผลึกของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้มีรูปร่างเป็นเข็ม หรือใบมีด ขนาดของผลึกอยู่ในระดับไมโครเมตร นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั่วไปทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงใช้วิธีการสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก หรือไมโครเวฟเพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้น

(3) ปฏิกิริยาการตกตะกอน เป็นปฏิกิริยาที่มีการปรับแต่งด้วยกรด และด่าง เช่น กรดฟอสฟอริก และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงดังสมการ



กระบวนการนี้สามารถปรับแต่งได้โดยการเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อรักษาค่าความเป็นกรดต่างไว้ในปฏิกิริยา และมีผลต่อการเกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์หลังจากแคลไซน์

เช่น ปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไนเตรต กับแอมโมเนียมฟอสเฟต และเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ในปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ ตามสมการดังนี้



แคลเซียมอะซิเตท เป็นสารประกอบอีกตัวหนึ่งซึ่งใช้แทนแคลเซียมคลอไรด์ หรือแคลเซียมไนเตรทในปฏิกิริยาการตกตะกอน อะซิเตทไอออนจะไม่เข้าไปแทนที่กลุ่มอะพาไทต์ แต่จะถูกแทนที่โดยไนเตรทไอออน หรือคลอไรด์ไอออนแทน

ข้อดีของกระบวนการตกตะกอน คือ ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ตั้งแต่ อุณหภูมิห้องประมาณ 24°C ถึง 100°C ทำให้เกิดผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ขนาดนาโนเมตร รูปร่าง คล้ายใบมีด เข็ม แท่ง หรือค่อนข้างกลม ส่วนข้อเสีย คือ มักพบว่าเกิดผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มี ปริมาณแคลเซียมไม่เพียงพอ แต่สามารถปรับความเข้มข้นของแคลเซียมด้วยการควบคุมการแทนที่ จากอะตอมอื่นๆ ในอะตอมของแคลเซียม เช่น อะตอมของสตรอนเทียม แมกนีเซียม แมงกานีส เป็นต้น ส่วนอะตอมของฟอสเฟตก็ถูกแทนด้วยอะตอมของคาร์บอนेट บอเรต แมงกานेट เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม สมบัติของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ เช่น สมบัติความเป็นผลึก และอัตราส่วนโดยโมลของ Ca:P ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารตั้งต้น และความเป็นกรด-ด่างของปฏิกิริยา ปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดช่องว่างภายในแลตทิซของไอออน หรือของอะตอมระหว่าง กระบวนการผลิต ทำให้ผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้ไม่เป็นปริมาณสารสัมพันธ์ และมีความเป็น ผลึกต่ำ

2.4.5 เซรามิกไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์ [36, 52]

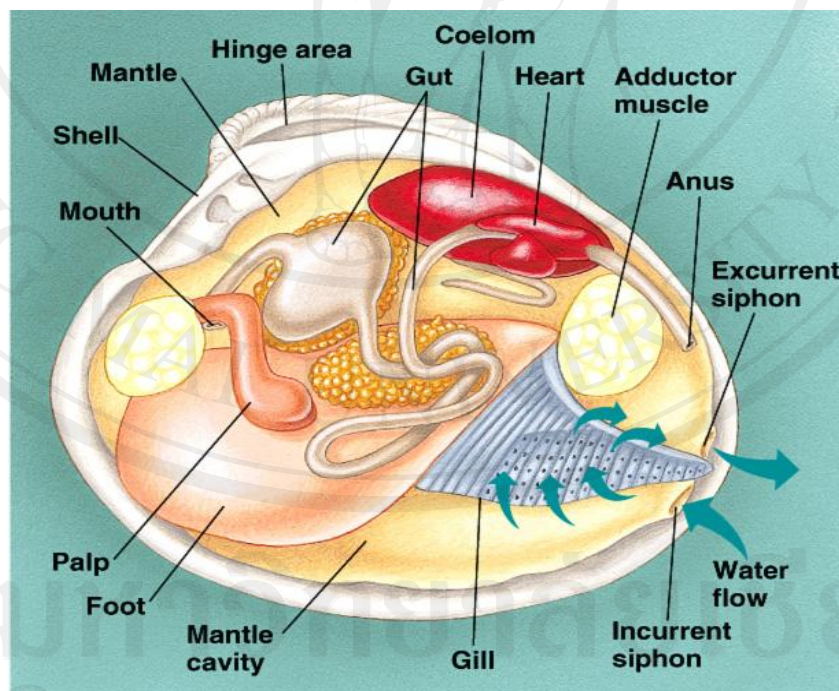
ไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถเชื่อมต่อกับโครงสร้างกระดูกได้ดี แต่เนื่องจากเป็น สารประกอบที่ไม่เสถียรทางความร้อน จะแตกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 800°C - 1200°C ขึ้นอยู่กับ ปริมาณสารสัมพันธ์ และยังไม่สามารถใช้งานในบริเวณที่ต้องรับน้ำหนักความแข็งแรงเชิงกลมากได้ ตัวอย่างการนำไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปใช้งาน ดังนี้

1) เคลือบวัสดุเซรามิกชีวภาพ (bioceramic coating) การใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ในการเคลือบมักจะใช้กับวัสดุฝังในประเภทโลหะ ส่วนใหญ่จะเป็นโลหะผสม titanium/stainless steel เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของพื้นผิว ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในร่างกายแล้วสามารถเข้ากันได้ดีทางชีวภาพกับ ร่างกาย ยกเว้นการเคลือบวัสดุที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และหากอะตอมหลุดออกไปจะเป็นพิษต่อ เนื้อเยื่อ ปัจจุบันในเชิงพาณิชย์ยอมรับเฉพาะการเคลือบไฮดรอกซีอะพาไทต์บนโลหะฝังในด้วยวิธี plasma spraying เท่านั้น

2) อุดซ่อมแซมกระดูกที่แตกหัก หรือติดเชื้อ (bone fillers) ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีรูปแบบที่หลากหลายให้เลือกใช้ เช่น เป็นผง (powders) แท่งสี่เหลี่ยม ทรงกลมที่มีรูพรุน (porous block) ซึ่งใช้ซ่อมแซมกระดูกที่แตกหัก หรือติดเชื้อ โดยจะเป็นโครงร่างของโครงสร้างกระดูก และลดเวลาในการรักษา ในขณะที่อยู่ในระหว่างการวิจัยยังไม่มีนำมาใช้จริงในทางการแพทย์

2.5 หอยแครง

หอยแครงเป็นหอยสองฝาที่มีขนาด และลักษณะเหมือนกัน ส่วนหัวเห็นไม่ชัด เหงือกมีขนาดใหญ่ใช้สำหรับหายใจ และกรองอาหาร มีการผสมพันธุ์ภายนอกตัว เมื่อระยะตัวอ่อนจะเป็นแพลงตอน เปลือกหอยแครงมีลักษณะเฉพาะ คือ มีฟันซี่เล็กๆ เรียงเป็นแถวอยู่บนแนวราบพับ (hinge plate) เปลือกก่อนข้างหนา มีสัน และร่องในแนวตั้ง (radial rib and radial groove) อยู่นอกด้านนอกของเปลือก แมนติลซ่ายขาวไม่เชื่อมติดกัน กล้ามเนื้อยึดเปลือกเจริญดี ไม่มีท่อน้ำ ในเลือดมีสารฮีโมโกลบิน ซึ่งเมื่อรวมกับอากาศจะเป็นสีแดง จึงได้ชื่อ blood clam และมักฝังตัวอยู่ตามหาดเลน หรือโคลนละเอียดในบริเวณชายฝั่งทะเลจนถึงแนวที่อยู่ห่างจากฝั่งออกไปประมาณ 2 km [53]



รูป 2.11 ลักษณะทางชีววิทยาของเปลือกหอยแครง [54]

2.5.1 โครงสร้างของเปลือกหอยแครง

โครงสร้างเปลือกหอยแครง ประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) อยู่ถึง 95% และวัสดุอินทรีย์ปริมาณเล็กน้อย แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุอินทรีย์ที่ได้รับความนิยมสูงว่าเป็นชีววัสดุในธรรมชาติชนิดหนึ่งที่สามารถให้ผลผลิตทางด้านอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น ตัวเติมในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสี และ อุตสาหกรรมทางการแพทย์ การสร้างรูปทรงต่างๆ ของเปลือกหอยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดันตามสภาวะแวดล้อมที่อยู่อาศัย โดยใช้อินทรีย์วัตถุต่างๆ เช่น ออกไซด์ของเหล็ก ซัลไฟด์ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ในการกำหนดการวางตัว และการขยายตัวของผลึก อินทรีย์วัตถุที่ว่าจะถูกผสมเข้ากับสารพอลิเมอร์ ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถผลิตขึ้นเองได้ ผลลัพธ์ของการผสมผสานนี้จะได้วัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน (composite materials) เรียกว่า วัสดุผสม ที่เกิดจากการรวมตัวของอินทรีย์วัตถุ และพอลิเมอร์ เป็นสิ่งที่สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ บางส่วนถูกผลิตขึ้นและพบภายในตัวของสิ่งมีชีวิต เช่น ฟัน และกระดูก เป็นต้น ส่วนที่เหลือถูกสร้างขึ้นจากภายนอก เช่น หินปูนของปะการัง และสปิกูลของฟองน้ำ เป็นต้น [55]

2.5.2 ชั้นของเปลือกหอยแครง [56]

เปลือกหอยแครงประกอบด้วยสารจำพวกแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ และมีสารอื่นๆ เป็นส่วนน้อย เช่น แคลเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมฟอสเฟต แมกนีเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมคาร์บอเนต โปรตีนประเภทคอนไคโอลิน (conchinolim) เป็นต้น โดยชั้นของเปลือกหอยแครง แบ่งออกเป็น 3 ชั้น ดังนี้

1) ชั้นนอกสุด เรียกว่า ชั้นผิวนอก (Periostracum layer) ประกอบด้วย โปรตีนประเภทคอนไคโอลิน เป็นชั้นที่บาง และหลุดได้ง่าย สังเกตได้จากเปลือกหอยแครงที่ถูกทิ้งตามชายหาด หรือเปลือกหอยแครงที่ถูกคลื่นซัด เมื่อถูกทรายขัดสี เปลือกชั้นนี้อาจหลุดหายไปทำให้ไม่สามารถมองเห็นได้

2) ชั้นกลาง เรียก ชั้นแคลเซียม (Prismatic layer) ประกอบด้วย ผลึกรูปต่างๆ กันของสารประกอบแคลเซียม ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลไซต์ (calcite) เป็นชั้นที่หนา และมีความแข็งแรงที่สุดของเปลือกหอยแครง

3) ชั้นในสุด เรียก ชั้นนุ้ก (Nacreous layer) ประกอบด้วยผลึกรูปต่างๆ กันของสารประกอบแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอราโกไนท์ (aragonite) เป็นชั้นที่เรียบ มีสีขาวขุ่น และเป็นมันวาว

2.5.3 ชนิดของหอยแครงที่พบในประเทศไทย [53]

หอยแครงที่พบในประเทศไทยมี 2 สกุล 5 ชนิด มีรายละเอียด ดังนี้

- 1) หอยแครงเทศ (*Anadara grosa*) เป็นหอยแครงที่พบทั่วไป ความยาวของเปลือก คือ 3.81-5.08 cm พบมากบริเวณหาดโคลนละเอียด ในเขตน้ำตื้นชายฝั่งในท้องที่จังหวัดต่างๆ คือ ตรัง จันทบุรี ชลบุรี สมุทรสาคร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สตูล ปัตตานี ตรัง และระยอง
- 2) หอยแครงปู หรือหอยแครงปากมูม (*Anadara nodifera*) คล้ายหอยแครงเทศ แต่มีความยาวริมากกว่าจึงดูคล้ายสีเหลี่ยมผืนผ้า พบบริเวณเดียวกัน
- 3) หอยแครงมัน (*Anadara trocheli*) ลักษณะฝาหอยคล้ายรูปหัวใจ พบมากบริเวณชายฝั่งอันดามันที่มีสภาพเป็นหาดโคลน ตั้งแต่จังหวัดพังงา จนถึงจังหวัดสตูล
- 4) หอยแครงเปี้ยว (*Anadara antoquanta*) มีลักษณะยาวรี มีรอยหยักคล้ายหอยแครงขน แต่ไม่มีขน พบที่จังหวัดชลบุรี และเกาะปราบ จังหวัดสุราษฎร์ธานี
- 5) หอยแครงขน (*Scapharca ineauivalvis*) มีฝาหอยขนาดใหญ่ ฝาทั้งสองข้างไม่เท่ากัน ผิวนอกของเปลือกมีขน พบอาศัยอยู่ตามพื้นโคลนปนทรายในระดับน้ำค่อนข้างลึก พบที่จังหวัดตรัง เพชรบุรี ภูเก็ต และสงขลา

2.5.4 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อหอยแครง [53]

- 1) บริเวณชายฝั่งในช่วงปากแม่น้ำ หรืออ่าว
- 2) ลักษณะพื้นที่เป็นหาดโคลนเรียบ มีความลาดเอียงเล็กน้อยไม่เกิน 15°
- 3) ลักษณะดินเป็นดินเลน หรือโคลนละเอียด หรือดินเหนียวปนโคลน มีความหนาของผิวหน้าดินไม่ต่ำกว่า 40-50 cm พื้นของเลนเหลวทุกระดับ และไม่มีการสะสมของเศษใบไม้
- 4) ความลึกของน้ำประมาณ 0.5-1.0 m
- 5) ความเค็มของน้ำควรเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 10.0-30.0 ppm
- 6) ห่างไกลจากแหล่งมลพิษ เช่น ชุมชน โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.6 แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนตที่พบอยู่ตามธรรมชาติส่วนใหญ่ คือ หินปูน หินอ่อน และเปลือกหอย

1. หินปูน (limestone) คือ หินตะกอนชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย แคลไซต์ (calcite) อยู่ถึง 95% โดยน้ำหนัก และโดโลไมท์ 5% โดยน้ำหนัก อาจเกิดขึ้นจากการทับถมกันของซากเปลือกหอย หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในทะเล การตกตะกอนทางเคมี การตกผลึก และการเกิดผลึกใหม่ ส่วนมากในหินปูนที่พบจะมีซากดึกดำบรรพ์ปรากฏอยู่ [57] หินปูนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของส่วนประกอบ ปริมาณแร่ธาตุ และอายุ

ก) หินปูนจากปะการัง (coral) ปะการังเป็นสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง แต่มีหินปูนเป็นโครงร่างแข็งที่เปรียบเสมือนกระดูก หินปูนจึงทำหน้าที่เป็นส่วนที่รองรับเนื้อเยื่อตัวปะการัง [58] และปะการังหลายๆ ชนิดจะเริ่มก่อตัวรวมตัวกันเป็นแนวปะการังขึ้นมา ซึ่งเรียกว่า แนวปะการัง หรือ แนวหินปูนใต้ทะเลในระดับน้ำตื้นที่แสงแดดส่องถึง นอกจากหินปูนดังกล่าวจะเป็นผลมาจากการเจริญเติบโตของปะการังหลายๆ ชนิดแล้วยังเกิดจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆ อีกหลายชนิดที่มีส่วนเสริมสร้างหินปูนพอกพูนสะสมในแนวปะการัง เช่น สาหร่ายหินปูน หอยที่มีเปลือกแข็ง เป็นต้น

ข) หินปูนโดโลไมท์ (dolomite limestone) เกิดจากหินปูนที่มีอยู่เดิมถูกแทนที่ด้วยธาตุแมกนีเซียม ตะกั่ว และสังกะสี

ค) หินปูนช่วงมหายุค (carboniferous) เกิดในช่วงยุคที่น้ำทะเลไหลท่วมในส่วนบนของแผ่นดิน ทำให้เกิดการทับถมของตะกอนหินปูนที่หนาмаกทั้งส่วนบนแผ่นดิน และในทะเล [59]

ง) หินขอล์ก (chalk) เป็นหินปูนเนื้ออ่อนที่บริสุทธิ์ ประกอบด้วยแร่แคลไซต์ 90-99% ส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมตัวกันของจุลินทรีย์ และสาหร่ายที่มีเนื้อปูนผสมในน้ำตื้น มีเนื้อพรุน ร่วน และมักมีซากสัตว์ที่หาหินตามท้องทะเลติดมาด้วย เช่น แอมโมไนต์ (ammonite) เอไคโนเดิร์ม (echinoderm) และหอยสองฝา (bivalve) นอกจากนี้อาจมีก้อนเชิร์ต และไฟรต์ ปนอยู่ด้วย หินขอล์กอาจเกิดขึ้นได้โดยกระบวนการทางชีวเคมี หรือนินทรีย์เคมีก็ได้ [60]

จ) ดินสอพอง หรือดินมาร์ล (marl) ประกอบด้วยแร่ดิน 65% และหินปูน 35-65% [61] ดินมาร์ลพบได้ทั่วไปในตะกอนทะเลสาบปลายยุคน้ำแข็ง โดยปกติแล้วจะพบการวางตัวอยู่ได้ชั้นฟิต มีลักษณะร่วนซุย [62]

2. หินอ่อน (marble) คือ หินแปรชนิดหนึ่ง ประกอบด้วย หินปูนที่เกิดผลึกใหม่ มีขนาดละเอียดถึงหยาบ โดยปกติจะมีเนื้อผลึกสม่ำเสมอ [63] และมีการกำเนิดจากการเปลี่ยนรูปหินปูนภายใต้ความร้อน และความดัน หินอ่อนที่มีความแข็งสม่ำเสมอสามารถนำมาใช้แกะสลักได้ดีกว่าหินปูน

3. เปลือกหอย (shells) ได้มาจากหอยซึ่งเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในไฟลัมมอลลัสคา (phylum mollusca) มีร่างกายอ่อนนุ่ม แต่สามารถสร้างเปลือกแข็งที่เป็นสารประกอบพวกหินปูน หุ้มอยู่รอบตัว บางชนิดไม่มีเปลือกหุ้มแต่สร้างส่วนแข็งไว้ภายใน ซึ่งก็คือ หินปูน หรือแคลเซียมคาร์บอเนตที่เป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกหอย สารประกอบชนิดนี้เป็นของแข็งสีขาว มีค่าผลคูณของความสามารถในการละลาย (K_{sp}) ในน้ำ ที่อุณหภูมิ 25°C เท่ากับ 8.7×10^{-9} ซึ่งต่ำมาก ทำให้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ การเกิดแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยเป็นปฏิกิริยาทางเคมี ที่เรียกว่า กระบวนการตกตะกอน โดยเกิดจากการรวมตัวของประจุแคลเซียมที่ปลดปล่อยออกมาจากหอย และประจุคาร์บอเนตที่อยู่ในน้ำทะเล แล้วตกตะกอนเป็นของแข็งสีขาวของแคลเซียมคาร์บอเนตออกมา ก่อตัวเป็นเปลือกห่อหุ้มภายนอก [64]

2.7 โครงสร้างของแคลเซียมคาร์บอเนต

โครงสร้างผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตมีโครงสร้างผลึก 3 แบบ ดังนี้ [65-68]

1. แคลไซต์ (calcite) เป็นแร่คาร์บอเนต และเป็นแร่ที่เสถียรที่สุดในกลุ่มแร่ที่มีสูตรโครงสร้างเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต

ก) สมบัติทางกายภาพ

(ก) อยู่ในรูปผลึกระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) ซึ่งสามารถเกิดเป็นรูปผลึกได้มากกว่า 300 แบบ และมีความซับซ้อนมาก แต่ส่วนใหญ่จะพบในรูปผลึกที่เป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือมีลักษณะเป็นแท่งปลายด้านบนแหลม และยาวคล้ายฟันสุนัข เรียก แร่ฟันหมา หรือหินเขี้ยวหมา แสดงดังรูป 2.12

(ข) ค่าความแข็งระดับ 3.0 ตามสเกลของโมห์ส (Moh's scale)

(ค) ค่าความถ่วงจำเพาะ คือ 2.72

(ง) มีความโปร่งใส และโปร่งแสง

(จ) สีที่พบ คือ สีขาว หรือไม่มีสี แต่หากมีการปนเปื้อนจะทำให้มีสีอื่น เช่น สีเทา สีแดง สีเขียว สีเหลือง สีส้ม สีส้มแดง สีน้ำตาล สีดำ เป็นต้น

(ฉ) รอยแยกแนวเรียบเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

(ช) เกิดการหักเหสองแนว

ข) สมบัติทางเคมี

(ก) สูตรเคมี คือ CaCO_3 ประกอบด้วย CaO 56.0% โดยน้ำหนัก และ CO_2 44.0% โดยน้ำหนัก บางชนิดอาจมีแร่ต่างๆ ปนด้วย เช่น แมงกานีส สังกะสี เหล็ก เป็นต้น ซึ่งจะเข้าไปแทนที่ธาตุแคลเซียม ถ้ามีการแทนที่อย่างสมบูรณ์ด้วยธาตุแมงกานีสจะได้เป็นแร่โรโดโครไซต์

(ข) ทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ

ค) การกำเนิด พบได้ทั่วไปในหินชั้น และหินแปร โดยเฉพาะบริเวณที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบ เมื่อได้รับความร้อน และความดันที่เหมาะสมจะกลายเป็นหินอ่อน นอกจากนี้ยังพบแคลไซต์ในโพรงของหินภูเขาไฟ เช่น หินบะซอลต์ เป็นต้น และพบอยู่ในแร่ชนิดอื่น เช่น ฟลูออไรต์ ควอตซ์ แบไรต์ สฟาเลอไรต์ กาลีนา เซเลสไทท์ ซัลเฟอร์ ทอง ทองแดง มรกต อะพาไทต์ ไบโอไทท์ ซีโอไลต์ แร่ตระกูลซิลิเฟต คาร์บอเนต บอเรต แร่โลหะพื้นฐานชนิดต่างๆ ที่เกิดจากน้ำร้อนใต้ผิวโลก เป็นต้น

ง) แหล่งที่พบแคลไซต์ในประเทศไทย ตั้งแต่จังหวัดเชียงราย จนถึงจังหวัดยะลา ยังพบมากที่จังหวัดลพบุรี สระบุรี จันทบุรี กาญจนบุรี ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครสวรรค์ และเพชรบุรี ส่วนในต่างประเทศพบมากที่ประเทศอังกฤษ จีน เม็กซิโก สหรัฐอเมริกา อิตาลี สเปน



รูป 2.12 ลักษณะผลึกแคลไซต์ [69]

2. อราโกไนท์ (aragonite) มาจากชื่อเมืองอรากอน (Aragon) ในประเทศสเปน (Spain) ซึ่งเป็นแหล่งที่พบแร่อรากไนท์ ในลักษณะผลึกแผ่น คล้ายผลึกหกเหลี่ยม ในระบบผลึกเฮกซะโกนอลเป็นครั้งแรก

ก) สมบัติทางกายภาพ

- (ก) ในรูปผลึกระบบออร์โธโรมบิก ลักษณะผลึกเป็นแบบแท่งยาวปลายเรียวแหลม คล้ายแท่งดินสอ มีหน้าตัดตรงปลายบน และปลายล่าง เหมือนรูปจั่ว ถ้าเป็นผลึกแผ่น จะพบรูปหน้าตัดคล้ายหกเหลี่ยมแตกต่างจากระบบรูปผลึกเฮกซะโกนอล บริเวณหน้าตัดของผลึกสังเกตร่องขนานถี่ (striation) ในแนวแกน x
- (ข) มีความกึ่งโปร่งแสง และโปร่งใส
- (ค) สีที่พบ คือ สีขาว สีเหลืองอ่อน และไม่มีสี
- (ง) มีค่าความแข็งระดับ 3.5-4.0 ตามสเกลของโมลส์
- (จ) ค่าความถ่วงจำเพาะ คือ 2.95

ข) สมบัติทางเคมี

- (ก) สูตรเคมี คือ CaCO_3 ประกอบด้วย CaO 56.0% โดยน้ำหนัก และ CO_2 44.0% โดยน้ำหนัก บางชนิดอาจมีแร่ต่างๆ ปนด้วย เช่น สตรอนเทียม ตะกั่ว สังกะสี เป็นต้น แทนที่ตำแหน่งของแคลเซียม
- (ข) เปลี่ยนโครงสร้างจากอรากไนท์เป็นแคลไซต์ที่อุณหภูมิ 400°C ภายใต้การสั่นดาปสมบูรณ์
- (ค) เกิดปฏิกิริยากับกรดเกลือ

ค) การกำเนิด พบน้อยมากเพราะเป็นแร่ที่ไม่เสถียร มักจะพบเกิดใกล้พื้นแผ่นดิน และมีอุณหภูมิต่ำ ในบริเวณที่มีน้ำพุร้อน หรืออาจเกิดร่วมในชั้นของแร่ยิปซัม และแร่เหล็ก หรือเกิดเป็นชั้นของเปลือกหอย ซึ่งทำให้เปลือกหอยมีลักษณะวาวคล้ายเปลือกมุก อาจจะเป็นกระจุกลอยอยู่บนแร่เซอร์เพนทีน หรือในรูพรุนของหินบะซอลต์

ง) แหล่งที่อรากไนท์ในประเทศไทย เกิดได้ทั่วไป ในแหล่งหินปูน หรือในเปลือกหอย ส่วนในต่างประเทศพบที่ประเทศสเปน ฝรั่งเศส ชิลี จะมีลักษณะเป็นผลึกฝาแฝด และประเทศอังกฤษจะพบผลึกลักษณะแบนหนา นอกจากนี้ยังพบอีกหลายรัฐในประเทศสหรัฐอเมริกา



รูป 2.13 ลักษณะผลึกอะลาโกไนท์ [70]

3. วาเทอร์ไรท์ (vaterite) เป็นผลึกที่อยู่ในสถานะระหว่างแคลไซต์ และอราโกไนท์พบได้ระหว่างการตกตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิสูง พบได้น้อย และไม่มีคามเสถียร

2.8 แคลเซียมออกไซด์ [71]

แคลเซียมออกไซด์สามารถเตรียมได้จากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือหินปูนในเตาเผาที่อุณหภูมิ 700°C - 900°C โดยที่ลักษณะผงแคลเซียมออกไซด์จะมีรูปร่างไม่แน่นอน ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงสมการดังต่อไปนี้



จากสมการปฏิกิริยานี้สามารถย้อนกลับได้ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะรวมตัวกับ CaO แล้วกลับไปเป็น CaCO_3 ได้ เนื่องจากความดันที่ได้จากแก๊ส CO_2 ที่อยู่ในสมดุลระหว่าง CaO กับ CaCO_3 นั้นเอง ซึ่งความดันแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันจึงเพิ่มสูงขึ้นด้วย เป็นผลให้ในกระบวนการผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีการดูดเอาแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้นออกจากปฏิกิริยา เพื่อป้องกันปฏิกิริยาย้อนกลับ และเป็นการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ให้มากขึ้นด้วย

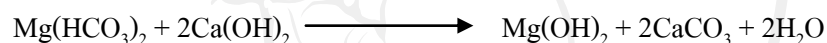
2.9 ประโยชน์ของแคลเซียมออกไซด์ [72-74]

แคลเซียมออกไซด์สามารถนำไปใช้ได้หลายด้าน ดังต่อไปนี้

1. ด้านการเกษตร ช่วยปรับค่าความเป็นกรดต่างในดิน ทำให้แบคทีเรียบางชนิดในดินเปลี่ยนไนโตรเจนให้อยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้พืช รวมทั้งช่วยปรับโครงสร้างดินให้ร่วน ใลพร่วนได้ง่ายขึ้น มาตรฐานแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ในการเกษตร คือ มอก.223-2520 เรื่องวัสดุพวกแคลเซียมออกไซด์เพื่อการเกษตร

2. ด้านการบำบัดน้ำ จะช่วยแก้ปัญหาน้ำกระด้าง โดยจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่เป็นสาเหตุให้น้ำกระด้าง กลายเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำตกตะกอนออกมา แสดงสมการได้ดังนี้

ก) กรดน้ำกระด้างชั่วคราวที่เกิดจากไบคาร์บอเนตของแคลเซียม และแมกนีเซียม



ข) กรดน้ำกระด้างถาวรที่เกิดจากสารประกอบคลอไรด์ สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบไนเตรตของแคลเซียม และแมกนีเซียม



3. อุตสาหกรรมก่อสร้าง นำไปใช้ในงานก่อสร้างได้โดยตรง เช่น การสร้างถนน ใช้เป็นสารตัวเติมในยางแอสฟัลต์สำหรับลาดถนน ใช้ผสมทราย ทำปูนฉาบ ปูนสอสำหรับงานก่อ ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ มีมาตรฐานกำหนดคุณสมบัติของแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้อยู่หลายมาตรฐานทั้งในประเทศ และต่างประเทศ เช่น มอก.241-2520 แคลเซียมออกไซด์เพื่อการก่อสร้าง British standard 890-1972 เรื่อง specification for Building limes เป็นต้น

4. อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้ในการผลิตสารตั้งต้นเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต ดังนี้

ก) ใช้ในกระบวนการย่อย โดยผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โซดาไฟ

ข) ใช้ผลิตสารฟอกขาว (bleaching liquor) โดยเติมคลอรีน ผสมกับแคลเซียมออกไซด์

ค) ใช้ผลิต Satin white โดยผสมอะลูมิเนียมซัลเฟต กับแคลเซียมออกไซด์

ง) ใช้ผลิต precipitated chalk หรือ precipitated calcium carbonate (PPC) ที่ใช้เคลือบกระดาษ โดยการเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป

5. อุตสาหกรรมเคมี ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคมีหลายชนิด ดังนี้

- ก) การผลิตโซดาไฟ โดยใช้แคลเซียมออกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต หรือ โซดาแอช เป็นสารตั้งต้น ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยานี้ คือ โซดาไฟ และแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดตกตะกอน
- ข) ใช้ผลิตสารฟอกขาว (bleaching liquor) โดยเติมคลอรีน ผสมกับแคลเซียมออกไซด์
- ค) ใช้ผลิต Satin white โดยผสมอะลูมิเนียมซัลเฟต กับแคลเซียมออกไซด์
- ง) ใช้ผลิต precipitated chalk หรือ precipitated calcium carbonate (PPC) ที่ใช้เคลือบกระดาษ โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไป

6. อุตสาหกรรมอาหาร ยา เครื่องสำอาง

- ก) ใช้ในการผลิตน้ำตาล โดยทำการเติมแคลเซียมออกไซด์ลงในน้ำเชื่อม เพื่อสะเทินกรด ทำให้สิ่งเจือปนที่ละลายในน้ำเชื่อมตกตะกอน
- ข) ใช้ผลิตสารที่ใช้เติมในผลิตภัณฑ์ เช่น calcium lactate calcium mandelate เป็นต้น
- ค) ใช้ในการผลิตยา ซึ่งแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์สูงตามมาตรฐานที่กำหนด เช่น British pharmacopoeia เป็นต้น

7. อุตสาหกรรมเหล็ก และเหล็กกล้า ต้องใช้แคลเซียมออกไซด์บริสุทธิ์สูง เป็นตัวช่วยดึงสารเจือปนต่างๆ เพื่อผลิตเหล็กคุณภาพสูง

นอกจากนี้ยังมีอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่แคลเซียมออกไซด์เข้าไปเกี่ยวข้อง เช่น เป็นสาร intermediated ในการผลิตสีย้อม เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมยาง เซรามิก เป็นต้น