บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อวัยวะในร่างกายของมนุษย์ประกอบไปด้วยเนื้อเยื่อต่างๆ มากมาย เนื้อเยื่อแข็งนั้นก็เป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในร่างกายที่ทำหน้าที่เป็นแกนหลักในการยึดส่วนประกอบของเนื้อเยื่อต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน โดยทั่วไปคือ กระดูก รวมถึงข้อต่อต่างๆ เนื้อเยื่อแข็งจัดได้ว่าเป็นวัสดุประกอบ (Composite) ที่มีองค์ประกอบทางเคมีทั้งภาคอินทรีย์ และภาคอนินทรีย์ ผสมกันอยู่ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางจุลภาคจะพบว่าประมาณ 60 ถึง 70% ของส่วนที่เป็นของแข็งนั้นประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆ ที่มักอยู่ในรูปของไอออน อาทิ Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, Fe^{2+}, HPO_4^{2-}, CO_3^{2-}, F^{-}, Cl^{-} เป็นต้น องค์ประกอบที่เหลือนั้นเป็นพวกคอลลาเจนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เมื่อพิจารณาในส่วนของแร่ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกระดูกนั้น จะประกอบด้วยแคลเซียมฟอสเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก มีส่วนของคาร์บอเนตอยู่พอประมาณและไอออนอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย [1]

ในอดีต ความผิดปกติของอวัยวะภายในร่างกายของมนุษย์อาจเกิดได้จากสาเหตุหลายประการ เช่น กรรมพันธุ์ อุบัติเหตุ การติดเชื้อ เป็นต้น หากสาเหตุต่างๆ ดังกล่าวทำให้เกิดความเสียหายต่ออวัยวะส่วนใดจนไม่สามารถใช้งานได้ดังเดิม หรือปกติเหมือนมนุษย์ทั่วไป ก็ยากที่จะเยียวยารักษาให้ฟื้นคืนสภาพเดิมได้ ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีด้านวัสดุที่ใช้สำหรับผลิตเครื่องมืออุปกรณ์หรืออะไหล่ทางการแพทย์เจริญก้าวหน้าขึ้น จึงได้มีการวิจัยและพัฒนากันอย่างกว้างขวางโดยนักวิทยาศาสตร์ นักวิจัย อีกทั้งยังรวมถึงแพทย์เองด้วย นวัตกรรมทางด้านวัสดุเหล่านี้จะช่วยยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ทางด้านสุขภาพให้ดีขึ้น กล่าวคือ สามารถซ่อมแซม ปรับปรุงและเปลี่ยนทดแทนอวัยวะหรือชิ้นส่วนต่างๆของร่างกาย ที่ได้รับความเสียหายอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ให้สามารถทำงานได้โดยมีหน้าที่ใช้สอย (Function) เหมือนหรือใกล้เคียงกับอวัยวะจริงของเดิมที่ได้รับความเสียหาย วัสดุที่นำมาใช้ในวัตถุประสงค์เหล่านี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของวัสดุทางการแพทย์ (Biomaterial)

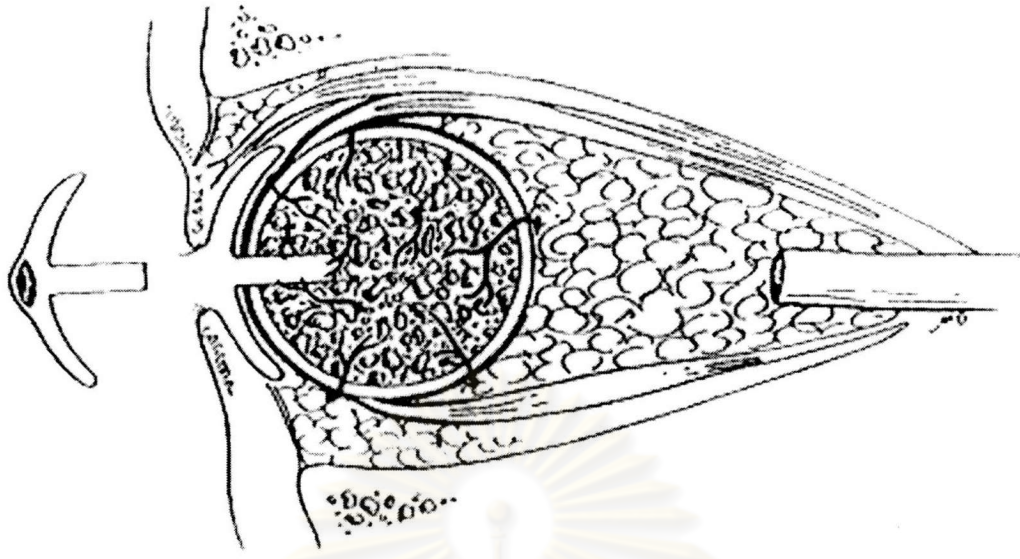
วัสดุทางการแพทย์ ดังที่ทราบกันแล้วว่าเป็นวัสดุที่นำมาใช้ซ่อมแซม ปรับปรุง หรือเปลี่ยนทดแทนอวัยวะแต่ละส่วนของมนุษย์ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งของร่างกาย ด้วยเหตุนี้ วัสดุทางการแพทย์จึงต้องมีสมบัติเชิงกลและเชิงกายภาพซึ่งใกล้เคียงกับอวัยวะในแต่ละส่วนของมนุษย์ที่ต้องการทดแทนมากที่สุด สามารถปรับ

สภาพเข้ากับอวัยวะเดิมของร่างกายได้เป็นอย่างดี และสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อบริเวณที่ทำการปลูกฝัง (Biocompatible) โดยไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากร่างกาย ทำให้เนื้อเยื่อเชื่อมติดกับวัสดุที่ปลูกฝังได้อย่างมีเสถียรภาพ วัสดุทางการแพทย์ที่ได้มีการพัฒนาขึ้นมานั้นแบ่งได้หลายประเภท กล่าวคือ มีตั้งแต่วัสดุประเภทโลหะ พอลิเมอร์ เซรามิกส์ หรือไม่นานมานี้เริ่มมีการพัฒนาวัสดุประกอบ (Composite) ซึ่งมีองค์ประกอบของวัสดุพื้นฐานสามประเภทแรกดังกล่าวตั้งแต่สององค์ประกอบขึ้นไป เพื่อให้ได้สมบัติของวัสดุที่เหมาะสมในการใช้งานทางการแพทย์มากขึ้น เมื่อลองพิจารณาวัสดุแต่ละประเภทจะพบว่า วัสดุจำพวกโลหะ หรือพอลิเมอร์ มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมจำพวกของเหลวในร่างกาย (Biotolerant) แต่มีข้อเสียคือเป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อที่อยู่รอบๆ ซึ่งจะทำให้เนื้อเยื่อเหล่านี้ตาย และทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อกับวัสดุสังเคราะห์ขึ้น ในขณะที่วัสดุจำพวกเซรามิกส์ โดยทั่วไปเมื่อใส่เข้าไปในร่างกายจะไม่ทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อข้างเคียง (Bioinert) จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์มากกว่า [2] ดังนั้นอาจจะเรียกชื่อเซรามิกส์ที่นำไปใช้ในวัตถุประสงค์ดังกล่าวได้ว่า เซรามิกส์ทางการแพทย์ (Bioceramics)

วัสดุทางการแพทย์ในปัจจุบันโดยเฉพาะเซรามิกส์ทางการแพทย์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมานั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงการแพทย์ได้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านการผลิตอวัยวะเทียมภายนอก (Prosthetic) ยกตัวอย่างในกรณีที่ผู้ป่วยสูญเสียอวัยวะส่วนต่างๆ ทั้งในอวัยวะในระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ เช่น แขน ขา ข้อพับ หรืออวัยวะบางส่วนบนใบหน้า เช่น ตา หู จมูก หรือผิวหนังบริเวณใบหน้า ด้านภาชนะบรรจุสารต่างๆ เช่น บรรจุสารเคมี เก็บเอนไซม์หรือแอนติบอดี้ หรือใช้เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ เป็นต้น ด้านอุปกรณ์อื่นๆ เช่น อุปกรณ์วินิจฉัยโรค ใยแก้วนำแสง เทอร์โมมิเตอร์ ทางด้านวงการทันตกรรมก็ได้นำวัสดุทางการแพทย์ไปใช้สำหรับการผลิตฟันปลอม รากฟันเทียม ซีเมนต์สำหรับอุดฟัน รวมทั้งอุปกรณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง อีกด้านหนึ่งคือการประยุกต์ใช้วัสดุทางการแพทย์ในการปลูกฝังเพื่อซ่อมแซมอวัยวะในร่างกายของมนุษย์ เช่น กระดูก ข้อต่อ ข้อพับ ฟัน รวมถึงวัสดุสำหรับการเปลี่ยนลิ้นหัวใจซึ่งใช้คาร์บอนชนิดเคลือบผิว (Coated Carbon) เป็นวัสดุหลัก เมื่อไม่นานมานี้ยังได้เริ่มมีการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุให้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์โดยพัฒนาวัสดุประกอบ (Composite) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้จากการนำเซรามิกส์ทางการแพทย์มาผสมกับวัสดุอื่นๆ อย่างไรก็ตามวัสดุที่สามารถนำไปใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ทางการแพทย์ดังกล่าว มีอยู่เพียงบางชนิดเท่านั้น และเนื่องจากวัสดุที่จะนำมาใช้นั้นต้องเป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลที่ตรงกับข้อกำหนดของวัสดุทางการแพทย์ กล่าวคือ สามารถเชื่อมติดกับเนื้อเยื่อในบริเวณใกล้เคียงได้อย่างมีเสถียรภาพ ปราศจากปฏิกิริยาต่อต้านจากร่างกายของผู้ป่วย รวมทั้งมีสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลที่สามารถ

รองรับการทำงานของอวัยวะเดิมได้ ดังนั้นวัสดุที่ใช้ในการผลิตอวัยวะเทียม หรือชิ้นส่วนอวัยวะเทียมจึงมีราคาที่ค่อนข้างแพงมาก [3]

ตัวอย่างประเด็นด้านหนึ่งในวงการแพทย์ที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน คือ ปัญหาด้านวัสดุและกระบวนการที่ใช้ผลิตลูกตาเทียม (Eye Implant) ปัญหาในส่วนนี้เกิดขึ้นจากการมีผู้ป่วยที่ต้องสูญเสียดวงตา ทั้งที่เกิดจากอุบัติเหตุ และเกิดจากโรคที่เกี่ยวกับดวงตา เช่น โรคมะเร็ง โรคต้อ เป็นต้น ซึ่งเป็นต้นเหตุให้สูญเสียการมองเห็นและต้องควักลูกตาของผู้ป่วยออก ในอดีตนั้น เมื่อควักลูกตาออกแล้วก็จะปล่อยทิ้งไว้เป็นโพรงว่างๆ เป็นผลให้กล้ามเนื้อบริเวณรอบๆ ดวงตาบีบตัวยุบลงมา ทำให้หนังตาบริเวณด้านนอกหย่อนหดตัวลง ส่งผลให้ผู้ป่วยสูญเสียบุคลิกภาพจนอาจจะกลายเป็นปมด้อยของผู้ป่วยได้ จึงได้มีการพัฒนาการรักษาโดยการฝังลูกตาเทียม วัสดุที่นำมาใช้ในตอนแรกเริ่มคือลูกแก้ว แต่ปัญหาที่พบก็คือ สามารถเคลื่อนไหวได้เพียงเล็กน้อยและไม่เป็นธรรมชาติ และที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ลูกแก้วลื่นหลุดทะลักออกจากเบ้าตาได้ง่าย หรืออาจเลื่อนเข้าไปข้างในโพรงตาทำให้ไม่มีร่องเบ้าตา ด้วยเหตุผลที่ว่า ลูกแก้วนั้นมีน้ำหนักมาก และมีลักษณะผิวที่เรียบลื่น ทำให้เส้นเลือดจากเนื้อเยื่อข้างเคียงไม่สามารถยึดเกาะได้อย่างมั่นคง จึงได้มีผู้วิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุที่จะนำมาใช้ผลิตลูกตาเทียม โดยทดลองเปลี่ยนวัสดุชนิดอื่นอีกกว่า 25 ชนิด และมีรูปทรงกว่า 45 แบบ แต่ปรากฏว่าไม่ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1989 จักษุแพทย์ศัลยกรรมตกแต่ง Arthur C. Perry จากซานดิเอโก ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ประดิษฐ์ลูกตาเทียมที่ผลิตจากสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดมีรูพรุนจากหินปะการัง (Coralline Hydroxyapatite, cHAp) ซึ่งพบว่าได้ผลที่น่าพอใจมาก สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของวัสดุชนิดก่อนๆ กล่าวคือ สามารถขจัดปัญหาเกี่ยวกับการยึดเกาะกับเนื้อวัสดุกับเส้นเลือดของเนื้อเยื่อใกล้เคียงได้เป็นอย่างดี เนื่องจาก cHAp มีรูพรุน เป็นผลให้เส้นเลือดสามารถงอกเข้าไปยึดเกาะภายในรูพรุนได้ ดังนั้นจึงสามารถยึดลูกตาเทียมได้อย่างมั่นคง และเลื่อนหลุดออกได้ยาก หลังจากผ่าตัดฝังลูกตาเทียมแล้ว 6 เดือน จะต้องทำการผ่าตัดครั้งที่สองเพื่อเจาะรูที่ลูกตาเทียม และรออีก 2 เดือนเพื่อให้เยื่อผิวงอก จากนั้นจึงใส่ตาปลอมครอบแบบมีก้านเสียบ (Motility Eye Prosthesis) ทำให้ตาเทียมเคลื่อนไหวได้อย่างเป็นธรรมชาติมากที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.1 อย่างไรก็ตาม ลูกตาเทียม cHAp นี้มีราคาแพง โดยต้องนำเข้าจากต่างประเทศลูกละประมาณ US$1,000 ดังนั้นในวงการแพทย์ไทยจึงได้มีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อการผลิตลูกตาเทียมจากสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ราคาไม่แพงเพื่อสามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ โดยมีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ป่วยยากไร้ซึ่งมีอยู่จำนวนไม่น้อยในประเทศไทย [4]



รูปที่ 1.1 ลูกตาเทียม cHAp ชนิดมีรูพรุนของจักษุแพทย์ศัลยกรรมตกแต่ง Arthur C. Perry หลังผ่าตัดฝัง 6 เดือน เพื่อเจาะรู และเตรียมใส่ตาปลอมครอบชนิดมีก้านเสียบ [3]

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับวัสดุทางการแพทย์ ได้มีการค้นพบว่า สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite, HAp) เป็นสารที่มีความคล้ายคลึงกับโครงสร้างทางเคมีของกระดูกมากที่สุด ซึ่งมีแคลเซียมฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบหลักในองค์ประกอบทางเคมีภาคอนินทรีย์ สารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นพบได้ตามธรรมชาติในหินปะการัง ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายกับกระดูก อย่างไรก็ตาม เมื่อลองพิจารณาอย่างละเอียดจะพบความแตกต่างระหว่างหินปะการังกับกระดูก กล่าวคือ กระดูกนั้นยังมีสารอินทรีย์อื่นๆ รวมอยู่ด้วยอีกหลายชนิด แต่ในหินปะการังนั้นไม่มีสารอินทรีย์รวมอยู่ด้วย สารอินทรีย์ในกระดูกจะทำให้กระดูกอ่อนโค้งไปตามรูปร่างท่าทางต่างๆ และสารอินทรีย์อีกเช่นกันช่วยทำให้กระดูกในท่าทางต่างๆ กลับมาสู่สภาพเดิม ช่วยทำให้คนหรือสัตว์ลุกขึ้นยืนหรือเดินได้ [5] จากการศึกษาวิจัยพบว่า สารไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความสามารถในการเข้าไปอยู่ร่วมกับร่างกาย (Biocompatible) และมีปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อใกล้เคียง (Bioactive) ได้เป็นอย่างดี จึงกล่าวได้ว่า เป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ดีที่สุดและเป็นที่นิยมอย่างมากในวงการแพทย์และวิทยาศาสตร์ เป็นผลให้มีการนำสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปประยุกต์ใช้ในด้านการผลิตอวัยวะเทียมหรือสารเคลือบผิวอวัยวะเทียมต่างๆ อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถสรุปตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นจากสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ดังต่อไปนี้

- <u>ลูกตาเทียม</u> สามารถผลิตได้จากสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ชนิดที่มีรูพรุน เพื่อให้เส้นเลือดที่อยู่บริเวณโดยรอบสามารถงอกทะลุเข้าไปเพื่อยึดเกาะได้

- <u>วัสดุสังเคราะห์เพื่อใช้ทดแทนกระดูกและซีเมนต์กระดูก</u> เนื่องจากกระดูกของคนเรามีสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นเฟสหลักที่พบ จึงสามารถนำสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปใช้ในการรักษาความบกพร่องเกี่ยวกับกระดูกของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี อาทิเช่น การเสริมกระดูกเพื่ออุดรูพรุนที่เกิดขึ้น การบำบัดรักษากระดูกที่แตกให้สมานติดกัน หรือการเปลี่ยนทดแทนกระดูกที่สูญเสียไปในระหว่างผ่าตัดรักษาอาการบาดเจ็บที่รุนแรงหรือการกำจัดเนื้องอก เป็นต้น ในกรณีนี้จะนิยมใช้สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอเนตผสมอยู่เล็กน้อยและมีระดับความเป็นรูปผลึกต่ำ เพื่อให้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับกระดูกธรรมชาติมากขึ้นและมีสมบัติการละลายตัวที่ดีขึ้น
- <u>วัสดุสังเคราะห์ด้านทันตกรรม</u> ได้แก่ ฟันปลอม ซีเมนต์สำหรับอุดฟัน รากฟันเทียม และวัสดุเคลือบผิวส่วนประกอบอวัยวะเทียมของฟัน ผลิตภัณฑ์จากสารไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถใช้ซ่อมแซมหรือทดแทนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากฟันนั้นจัดว่าเป็นกระดูกเช่นกัน และมีสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก อย่างไรก็ตาม สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่นำมาใช้ในด้านนี้ควรต้องมีการแทนที่ด้วยไอออนของฟลูออไรด์เข้าไปในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ต้านทานต่อกรดที่เกิดจากอาหารได้ดียิ่งขึ้น กล่าวคือ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานภายในช่องปาก
- <u>ข้อตะโพกเทียม</u> เป็นข้อต่อใหญ่ที่ใช้ในการรับน้ำหนักของร่างกายในเวลาเดิน โดยได้มีการพัฒนาวัสดุที่ใช้มาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งปัจจุบันซึ่งข้อตะโพกเทียมนั้นผลิตจากไททาเนียมเคลือบผิวด้วยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์เพื่อให้เกิดปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพกับกระดูก
- <u>วัสดุเคลือบผิวอวัยวะเทียมอื่นๆ</u> สารไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถนำไปใช้เคลือบผิวอวัยวะเทียมที่ทำจากวัสดุอื่นๆ ซึ่งต้องมีการเชื่อมต่อกับกระดูกและฟัน ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ข้อต่อ หรือข้อพับต่างๆ เป็นต้น เพื่อช่วยให้เกิดปฏิสัมพันธ์ทางชีวภาพและเกิดการเชื่อมต่อกับกระดูกที่แข็งแรงขึ้น

นอกจากจะนำไปประยุกต์ใช้เกี่ยวกับอวัยวะเทียมแล้ว สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตปุ๋ยชนิดละลายช้า (Slow-release fertilizer) โดยผสมแร่ธาตุต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชลงไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์สังเคราะห์ในปริมาณสัดส่วนที่เหมาะสม การควบคุมปริมาณแร่ธาตุที่ปล่อยให้กับพืชทำได้โดยการปรับสัดส่วนของส่วนประกอบทางเคมีที่ผสมลงไป

อย่างไรก็ตาม รูปแบบการใช้งานที่แตกต่างกันไป ทำให้ลักษณะเฉพาะตัวต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นลักษณะเชิงกายภาพ เชิงกล เชิงองค์ประกอบย่อยทางเคมี หรือลักษณะโครงสร้างทางเคมีเกิด

ความแตกต่างขึ้นบ้างพอสมควร ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของการนำสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปใช้งานในด้านอวัยวะเทียม อาจจะต้องการสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันไป เช่น ความแข็ง ความเหนียว เป็นต้น สำหรับกรณีของการปลูกถ่ายเนื้อเยื่อกระดูกก็อาจจะต้องเติมสารจำพวกคาร์บอเนตเข้าไป เพื่อให้เกิดความเหมาะสมยิ่งขึ้น [6] ในส่วนของกรณีศึกษาด้านทันตกรรม ในบางครั้งจะเพิ่มไอออนของฟลูออไรด์เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้ดียิ่งขึ้น [1] ในด้านการผลิตลูกตาเทียมนั้นก็ต้องการสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สามารถขึ้นรูปให้เป็นรูพรุนที่เชื่อมถึงกันได้ เพื่อให้เส้นเลือดจากเนื้อเยื่อข้างเคียงสามารถยึดเกาะได้อย่างแน่นหนา [4] ดังนั้น ตัวอย่างที่ได้กล่าวยกขึ้นมานั้นแสดงให้เห็นว่า สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่จะนำไปใช้งานในแต่ละรูปแบบอาจมีความแตกต่างกันไปบ้างสำหรับตัวแปรบางตัวในกระบวนการผลิต

กรรมวิธีการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้น วิธีการดั้งเดิมที่ทำกันในต่างประเทศคือการผลิตสารจากซากสิ่งมีชีวิตในทะเล (Carbonate Skeleton) ซึ่งก็คือซากของหินปะการัง หรือซากสัตว์จำพวกปลาดาว สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตจากวิธีการนี้มีชื่อเรียกว่า Coralline Hydroxyapatite หรือ cHAp วิธีการนี้จะสามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีคุณภาพที่ดี ลักษณะสมบัติทางกลที่ดี มีความแข็งและความเหนียวที่น่าพอใจ ลักษณะโครงสร้างมีรูพรุนขนาดที่เหมาะสมและใกล้เคียงกัน กระจายอยู่สม่ำเสมอทั่วเนื้อวัสดุ ดังนั้น cHAp จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้ผลิตลูกตาเทียม แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้ก็คือยังไม่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย เนื่องจากประสบปัญหาเกี่ยวกับขีดจำกัดด้านเครื่องมือ นอกจากนี้แล้ว หินปะการังที่จะนำมาใช้ในการผลิตก็มีปริมาณจำกัดและหาได้ยากมากขึ้นทุกวัน อีกทั้งวัสดุที่นำเข้าจากต่างประเทศมีราคาแพง ลูกตาเทียมที่ผลิตจาก cHAp มีราคาประมาณ US$1,600 ยิ่งไปกว่านั้นหากใช้ลูกตาเทียมที่นำเข้าแล้วก็จะต้องเสียค่าบริการในการผลิตครอบตาปลอมสำหรับผู้ป่วยแต่ละรายเพิ่มขึ้นข้างละประมาณ 10,000 บาท เนื่องจากในประเทศไทยไม่มีศูนย์ผลิตตาปลอมครอบแบบพิมพ์ตาชนิดมีก้านเสียบ วิธีนี้จึงไม่ได้รับความนิยมมากนัก ดังนั้น จึงได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยวิธีการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบอื่นๆ เพื่อที่จะนำไปใช้ผลิตเป็นลูกตาเทียม เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวควายเพื่อนำมาผลิตลูกตาเทียมที่มีรูพรุนได้สำเร็จ และมีราคาที่ไม่แพงนัก สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตจากวิธีการนี้เรียกว่า Bovine Hydroxyapatite หรือ bHAp แต่วิธีการนี้ก็มีข้อเสียอยู่ตรงที่ bHAp นั้นมีความบริสุทธิ์ต่ำ มีสารเจือปนมาก และมีสมบัติเชิงกลที่ต้องปรับปรุง กล่าวคือ มีความเปราะค่อนข้างมาก อีกวิธีหนึ่งในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์คือการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมี วิธีการนี้จะสามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและตัวแปรต่างๆ ในระหว่างการสังเคราะห์ให้สามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีความบริสุทธิ์ได้มากกว่าวิธีอื่นๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์อื่นๆได้เป็นอย่างดี ในด้านการผลิตลูกตาเทียม วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่นิยมนัก

เนื่องจากต้นทุนการผลิตสูง การตระเตรียมสารทำได้ครั้งละน้อยๆ ใช้เวลาในการสังเคราะห์นาน และที่สำคัญคือการทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุนนั้นทำได้ยากกว่า [4] อย่างไรก็ตาม สุจินต์ วุฒิชัยวัฒน์ [3] ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคของกระบวนการขึ้นรูปผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ได้จากการผลิตโดยวิธีการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีให้เกิดรูพรุน เพื่อนำไปผลิตลูกตาเทียม ซึ่งปรากฏผลว่าสามารถขึ้นรูปให้เกิดรูพรุนได้ แต่ขนาดของรูพรุนนั้นมีขนาดเล็กเกินไปและไม่ได้เชื่อมต่อถึงกันหมด แม้ว่าการพัฒนาวิธีการขึ้นรูปดังกล่าวอาจจะยังไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตลูกตาเทียมได้ดี แต่ยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตอวัยวะเทียมอย่างอื่นซึ่งต้องการขนาดรูพรุนที่น้อยกว่าได้เป็นอย่างดี และคาดว่าในไม่ช้านี้ น่าจะมีการพัฒนากระบวนการผลิตให้สามารถขึ้นรูปสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดตามต้องการได้สำเร็จ ซึ่งจะทำให้การผลิตลูกตาเทียมด้วยสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีเป็นที่นิยมมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ทั้งสามวิธี จะเห็นได้ว่าวิธีผลิตโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีนั้น สามารถนำไปใช้งานในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ได้กว้างขวางกว่า อันเนื่องมาจากความสามารถในการกำหนดควบคุมสัดส่วนองค์ประกอบของสารสังเคราะห์ที่ดีกว่าวิธีอื่น และความบริสุทธิ์ของสารที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตาม จุดอ่อนของวิธีผลิตโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีนั้นคือต้นทุนที่ค่อนข้างสูง มีจำนวนขั้นตอนการดำเนินงานค่อนข้างมาก ต้องใช้เวลานาน และสามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ออกมาได้ครั้งละน้อยๆ การแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพอย่างหนึ่งคือการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการผลิต หรือปรับปรุงให้ผลิตได้มากขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลาเดียวกัน ดังนั้น การนำระบบควบคุมการผลิตแบบอัตโนมัติเข้ามาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จึงเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิต ไม่เพียงแต่ทำให้ผลิตได้ในปริมาณมากขึ้นรวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ยังสามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอมากกว่าการผลิตโดยใช้มนุษย์ควบคุม เนื่องจากระบบอัตโนมัติสามารถควบคุมการผลิตโดยมีความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ที่สูงกว่าการใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมซึ่งอาจจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจากตัวมนุษย์เอง (Human Error) นอกจากนี้แล้ว ระบบควบคุมการผลิตอัตโนมัติจะช่วยให้มนุษย์ไม่มีความจำเป็นต้องเกี่ยวข้องกับสารเคมีบางชนิดที่อาจจะเป็นทั้งสารตั้งต้น และสารระหว่างปฏิกิริยา ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายหากเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากในระหว่างกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ตัวอย่างเช่น ไอระเหยจากแอมโมเนีย ซึ่งหากสูดดมเข้าไปในปริมาณมากๆ จะทำให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ เป็นอันตรายต่อสุขภาพได้

การผลิตโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยทั่วไปจะแบ่งประเภทของการสังเคราะห์ออกได้เป็น 2 แบบ กล่าวคือ แบบแห้ง และแบบเปียก โดยส่วนใหญ่แล้วมักจะนิยมการสังเคราะห์แบบเปียกมากกว่าแบบแห้ง เนื่องจากการสังเคราะห์แบบแห้งนั้น

มักจะต้องการเครื่องมืออุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากกว่า และโดยปกติจะต้องปรับสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงมาก ในขณะที่การสังเคราะห์แบบเปียกนั้นมักจะเป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิภายในระบบในแต่ละกระบวนการไม่เกิน 100 ^{o}C นอกจากนี้ การสังเคราะห์แบบเปียกนั้นส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาในรูปของสารละลาย จึงทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของไอออนชนิดต่างๆได้ง่าย และเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบทางเคมีตามความต้องการและมีความสม่ำเสมอออกมา จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ได้มีผู้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตออกมาได้ โดยสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีแบบเปียกโดยวิธีการตกตะกอน ทำให้ทราบว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อกระบวนการผลิต ปัจจัยใดบ้างที่จะต้องควบคุมในการผลิต ดังนั้น ปัจจัยเหล่านี้จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบอัตโนมัติที่ช่วยควบคุมการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อไป

การเลือกใช้ระบบอัตโนมัติที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้น จำเป็นต้องมีการพิจารณาระบบที่จะนำไปประยุกต์ใช้ว่ามีลักษณะเป็นอย่างไร ซึ่งจากการพิจารณาจะเห็นได้ว่าการเลือกใช้อุปกรณ์จำพวก Programmable Logic Controller หรือที่เรียกกันว่า PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุมนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจาก PLC นั้นเหมาะสมกับการควบคุมที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลง หรือแก้ไขฟังก์ชันการควบคุมอยู่ตลอดเวลา กล่าวคือ ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จะต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรบางตัวได้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์คือลักษณะสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ตามที่ต้องการ มีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี ขนาดกะทัดรัดกว่าเมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบอื่น ดูแลรักษาง่าย และยังมีราคาค่าใช้จ่ายต่ำ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อนำไปใช้ผลิตวัสดุทางการแพทย์ในรูปแบบต่างๆ เช่น อวัยวะเทียม ลูกตาเทียม การปลูกถ่ายกระดูก วัสดุเกี่ยวกับทันตกรรม เป็นต้น โดยเลือกใช้วิธีผลิตโดยการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีการตกตะกอน ออกแบบระบบอัตโนมัติโดยเลือกใช้อุปกรณ์ PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุมกระบวนการผลิต และควบคุมตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตให้เป็นไปตามที่กำหนด เพื่อให้ได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะสมบัติตามที่ต้องการ อย่างไรก็ดี ระบบที่ออกแบบขึ้นมานั้นเป็นระบบต้นแบบซึ่งเป็นแนวทางของระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่สามารถนำไปพัฒนาระบบให้มีกำลังการผลิต ประสิทธิภาพ และประสิทธิผลที่มากขึ้น กระนั้น ระบบต้นแบบที่ออกแบบขึ้นมาจำเป็นต้องผ่านการทดสอบการใช้งานก่อนว่าสามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ตามข้อกำหนดต่างๆ อย่างสม่ำเสมอหรือไม่ มิฉะนั้นอาจจะต้องมีการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ให้สามารถใช้งานได้อย่างเหมาะสม แล้วจึงจัดทำเป็นคู่มือการใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการจำกัดขอบเขตของการวิจัยสรุปได้ดังนี้ คือ

1. ศึกษาขั้นตอนและปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยใช้วิธีการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีการตกตะกอน สำหรับสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่จะผลิตนั้นเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์ กล่าวคือ ไม่มีการเติมไอออนชนิดอื่นเข้าไปเป็นสารปรุงแต่ง (Additive)
2. ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของระบบอัตโนมัติ สำหรับการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ให้มีความสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติในกระบวนการสังเคราะห์ กำหนดให้เครื่องต้นแบบมีกำลังการผลิตได้ประมาณไม่เกิน 100 กรัมต่อรอบการผลิต โดยพิจารณาความเหมาะสมทางขนาดของระบบอย่างละเอียดในขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการ
3. ออกแบบระบบติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) เพื่อทำให้สะดวกและง่ายแก่การใช้งานของผู้ใช้งานอื่นๆ ในการควบคุมดำเนินงานของระบบและการควบคุมปัจจัยต่างๆ
4. ทดสอบระบบที่ได้สร้างขึ้นในด้านต่างๆ กล่าวคือ ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ระบบอัตโนมัติ ตรวจสอบลักษณะสมบัติในด้านต่างๆ ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้ ได้แก่ ลักษณะเฉพาะตัว ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาค และลักษณะของรูปทรงของผลึก

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ จะมีขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สำรวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
   - ศึกษาวิธีการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อพิจารณาถึงลักษณะสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ข้อดี ข้อด้อย ของแต่ละวิธีที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์
   - เลือกและศึกษากระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่จะนำมาพัฒนาระบบอัตโนมัติโดยละเอียด
   - สำรวจเอกสารและสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวกับปัญหาและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ควบคุมการปฏิบัติการโดยมนุษย์
   - ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบอัตโนมัติที่จะต้องนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น อุปกรณ์ PLC การเชื่อมต่อระบบกับคอมพิวเตอร์ เป็นต้น
   - ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์ปฏิบัติการต่างๆ (Hardware) ที่สนับสนุนให้กระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบอัตโนมัติดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลมากที่สุด
2. ทดลองการปฏิบัติงานจริงในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์แบบควบคุมโดยผู้ปฏิบัติการ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของสารเคมีในระบบเพิ่มเติมว่า สารเคมีในระบบมีสภาวะปัญหา และข้อจำกัด ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตอย่างไรบ้างโดยละเอียด เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางที่สำคัญในการออกแบบระบบอัตโนมัติตามกระบวนการดังกล่าว
3. วิเคราะห์และออกแบบระบบอัตโนมัติ ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก
   - การออกแบบระบบเครื่องกลไก (Hardware) จะเกี่ยวข้องกับการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตและกลไกทางกล ที่จะทำให้ขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผล อาทิเช่น ระบบการปรับอุณหภูมิ ระบบการปรับค่า pH ระบบการเติมผสมสารตั้งต้น อุปกรณ์กวนสารเคมี เป็นต้น

- การออกแบบทางด้านระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ (Software) จะเกี่ยวข้องกับการเขียนโปรแกรมเชื่อมโยงภายในระบบอัตโนมัติ เพื่อใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์

4. จัดหาวัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย
5. ประดิษฐ์เครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ระบบอัตโนมัติ ทั้งในด้านระบบเครื่องกลไก และด้านระบบอุปกรณ์ควบคุมและซอฟต์แวร์ซึ่งรวมไปถึงการสร้างระบบติดต่อผู้ใช้งานด้วย
6. ทดสอบผลงานที่ได้จากการออกแบบ ตามประเด็นต่างๆ
   - ทดสอบการทำงานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ระบบอัตโนมัติ
   - ตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ ด้วยวิธีตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction, XRD) และการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนรังสีใต้แดง (Fourier Transformed Infra Red Spectrometry, FT-IR)
   - ตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Laser Analyzer, PSLA)
   - ตรวจสอบลักษณะรูปทรงของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่ผลิตได้จากระบบอัตโนมัติ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope, SEM)
7. วิเคราะห์ผลที่ได้และสรุปผลการดำเนินงานวิจัย
8. จัดทำคู่มือการใช้งานของเครื่องต้นแบบผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ระบบอัตโนมัติ และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. พัฒนาเครื่องต้นแบบของระบบอัตโนมัติที่ใช้ในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากปฏิกิริยาเคมี ที่สามารถผลิตสารที่มีความบริสุทธิ์และเหมาะสมกับการใช้งานทางการแพทย์ อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะสมบัติของสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้เหมาะสมกับรูปแบบการประยุกต์ใช้งานในลักษณะต่างๆ ของวัสดุทางการแพทย์ได้โดยง่าย
2. ช่วยเพิ่มศักยภาพสำหรับวิธีการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากปฏิกิริยาเคมี ลดข้อด้อยในด้านของเวลาที่ใช้ในการผลิต โดยระบบอัตโนมัติสามารถช่วยให้ผลิตได้ในปริมาณที่มากขึ้น และรวดเร็วยิ่งขึ้น จึงทำให้วิธีการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์จากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเคมีจะได้รับความนิยมมากขึ้นกว่าในอดีตที่ผ่านมา
3. การพัฒนาระบบอัตโนมัติในการผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ PLC นั้น จะทำให้ผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีคุณภาพและความสม่ำเสมอมากกว่าการผลิตโดยใช้มนุษย์ควบคุม เนื่องจากระบบอัตโนมัติสามารถควบคุมการผลิตได้ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ที่สูงกว่าการใช้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมซึ่งอาจจะมีความผิดพลาด (Human Error) เกิดขึ้น
4. การพัฒนาระบบการผลิตแบบอัตโนมัติจะช่วยลดผลกระทบของสารเคมีบางชนิดที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น ไอระเหยของแอมโมเนีย เป็นต้น
5. ผลการวิจัยทำให้สามารถผลิตสารไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการนำเข้าสารไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์จากต่างประเทศ
6. ช่วยลดการนำเข้าวัสดุทางการแพทย์ และอุปกรณ์เทียม ที่มีราคาแพงจากต่างประเทศ
7. เครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมา สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องผลิตสารระบบอัตโนมัติที่มีกำลังการผลิตในระดับสูงขึ้น จนกระทั่งพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมต่อไป
8. เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตวัสดุสังเคราะห์สำหรับใช้ในทางการแพทย์
9. เป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่มีข้อจำกัดในกระบวนการผลิต เช่น มีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อน ใช้เวลานาน เป็นต้น หรือข้อจำกัดในด้านอื่นๆ เช่น สารเคมีหาซื้อได้ยาก มีราคาแพง เป็นต้น