

Article

การเพิ่มมูลค่าแป้งมันสำปะหลังโดยใช้การสังเคราะห์ ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Value Addition of Tapioca Starch by Implementing in Environmentally Friendly Synthesis

อนุชิต ฮันเย็ก*

Anuchit Hunyek*

สาขาวิชาศึกษาทั่วไป-วิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์) คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ 77110

Program of General Education-Science (Physics), Faculty of Liberal Arts,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wangklaikangwon Campus,
Huahin District, Prachuap Khiri Khan Province 77110, Thailand

*Corresponding author E-mail: anuchit.hun@rmutr.ac.th

วันที่รับบทความ: 18 เมษายน 2565, วันแก้ไขบทความ: 19 มิถุนายน 2565, วันตอบรับบทความ: 24 มิถุนายน 2565

Received: 18th April 2022, Revised: 19th June 2022, Accepted: 24th June 2022

บทคัดย่อ

แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นเม็ด ภายในบรรจุสายโซ่โมเลกุลที่เป็นโครงข่ายแบบสามมิติ จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่ง เมื่ออยู่ในน้ำที่สถานะสารละลายน้ำแป้งและเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้พันธะของสายโซ่โมเลกุลคลายตัวและดูดซึมน้ำเข้าไป เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและแตกออก สายโซ่โมเลกุลจะหลุดออกมาจากเม็ดแป้ง สมบัติดังกล่าวนี้ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ได้วัสดุที่มีโครงสร้างและสมบัติตามต้องการ แทนสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผ่านขั้นตอนการผลิตซับซ้อนกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพ ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและต้นทุนสูง อีกทั้งไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม บทความนี้จึงได้เรียบเรียงองค์ความรู้ของแป้งมันสำปะหลัง และการประยุกต์ใช้แป้งมันสำปะหลังในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุ

คำสำคัญ: แป้งมันสำปะหลัง, พอลิเมอร์ชีวภาพ, กระบวนการทางเคมี, สารเคเลตติ้ง

Abstract

Granular tapioca starch, containing a three-dimensional network of molecular chains, is classified as a biopolymer. In an aqueous solution at elevated temperature, the bonds of the molecular chains relax and absorb water. The granular starch swell and break, releasing molecular chains from the granular starch. This feature can be useful in chemical synthesis of functional materials with the desired structure and properties. The replacement of synthetic polymers with more complex production processes by biopolymers may reduce energy

consumption and cost. It is also environmentally friendly. This article has compiled the knowledge of tapioca starch and its application in the material synthesis process.

Keywords: Tapioca starch, Biopolymer, Chemical synthesis, Chelating agent

โครงสร้างและสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* crantz) ได้จากรากหรือหัว เป็นอาหารหลักสำหรับคนกว่า 800 ล้านคน ที่อาศัยอยู่บริเวณแถบเส้นศูนย์สูตรของโลก ต้นมันสำปะหลังมีความทนทานสามารถเพาะปลูกได้ในสภาพดินที่หลากหลาย แป้งมันสำปะหลังเป็นอาหารหลักอันดับ 4 ของปริมาณอาหารหลักทั้งหมดทั่วโลก ที่ประมาณ 290 ล้านตันต่อปี โดยส่วนใหญ่เพาะปลูกในบริเวณแอฟริกาตะวันตก แถบเขตร้อนในอเมริกาใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในบรรดาแป้งที่ได้จากพืชและธัญพืชหลาย ๆ ชนิด แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตชั้นดี และมีค่าใช้จ่ายในการเพาะปลูกต่อพื้นที่ต่ำ เมื่อเทียบกับพืชให้แป้งชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้แป้งมันสำปะหลังยังได้มีการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์และอาหารในหลาย ๆ รูปแบบ ตามสมบัติด้านต่าง ๆ แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะเป็นเม็ด ภายในบรรจุโมเลกุลอยู่ 2 ชนิด ซึ่งแบ่งตามการเชื่อมต่อกันของสายโซ่ คือ แบบโซ่ตรง เรียกว่า อะไมโลส (Amylose) และแบบโซ่กิ่ง เรียกว่า อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) นอกนั้นจะเป็นจำพวกลิพิด (Lipid) โปรตีน (Protein) และฟอสเฟส (Phosphate) แป้งที่ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ นอกจากอะไมโลสและอะไมโลเพกทินอยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวร์ (Flour) แต่เมื่อเป็นแป้งที่บริสุทธิ์มากขึ้นจะเรียกว่า สตาร์ช (Starch) นอกจากนี้การกระจายตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกทินตามส่วนต่าง ๆ บนสายโซ่โมเลกุล จะมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้ง [1]

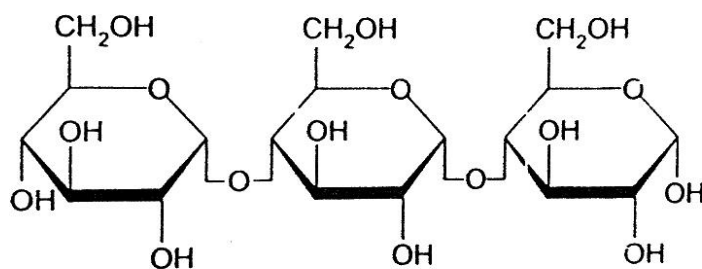
การสังเคราะห์แป้งเกิดได้เฉพาะพืชที่มีสีเขียว ซึ่งส่วนที่เป็นสีเขียวนั้นเป็นสารที่เรียกว่า คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เมื่อมีวัตถุดิบตั้งต้นเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ และมีปัจจัยจากคลอโรฟิลล์กับพลังงานแสงอาทิตย์ หลังจากปฏิกิริยาจะได้กลูโคสและออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ นี่คือการบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ที่สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังรูปที่ 1



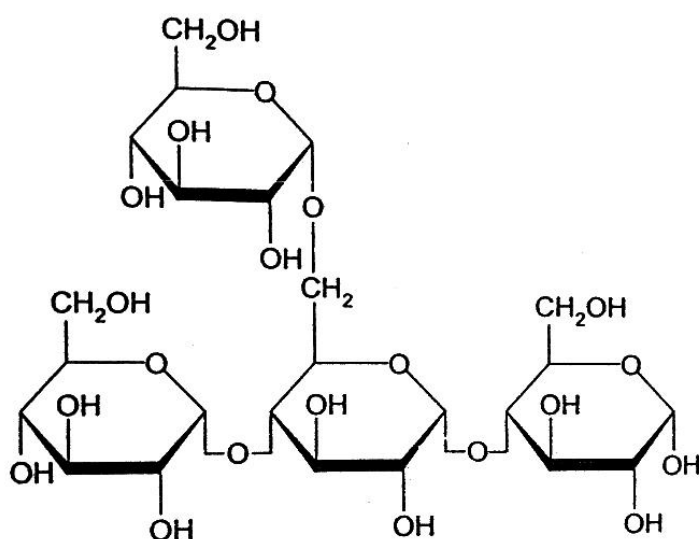
รูปที่ 1 ปฏิกิริยาของกระบวนการสังเคราะห์แสง

เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงแล้ว กลูโคสที่ได้จะเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ผ่านกระบวนการทำงานของเอนไซม์ พอลิเมอร์ที่ได้นี้เรียกว่า “แป้ง” โดยในเวลากลางวันแป้งจะถูกเก็บไว้ที่ใบ แต่พอช่วงเวลากลางคืนแป้งจะถูกเอนไซม์ย่อยเป็นน้ำตาลซูโครส และส่งไปเก็บสะสมตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ในรูปของแป้ง เช่น เมล็ดธัญพืช (สำหรับแป้งมันสำปะหลัง) หัว หรือลำต้น เป็นต้น

แป้งมันสำปะหลังเป็นสารอาหารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่มีส่วนประกอบของไฮโดรเจนและออกซิเจน ที่มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปเป็น $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ เป็นพอลิเมอร์ที่มาจากกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) มีรูปของสายโซ่โมเลกุล 2 ชนิด คือ อะไมโลส ที่เป็นโซ่ตรง แสดงดังรูปที่ 2 และอะไมโลเพกทิน ที่เป็นโซ่กิ่ง แสดงดังรูปที่ 3 โดยแป้งจากแหล่งต่าง ๆ จะมีสัดส่วนของสายโซ่ทั้งสองแบบนี้แตกต่างกัน



รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส (Copyright of ref. [2])



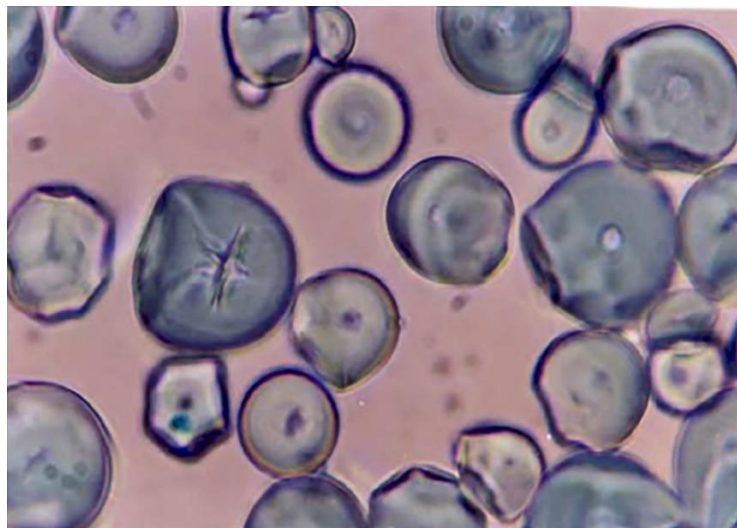
รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพกทิน (Copyright of ref. [2])

แป้งที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก มีโครงข่ายแบบสามมิติ เมื่อนำแป้งมาละลายน้ำ จะเกิดสมบัติการดูดซับน้ำ การพองตัวและละลาย หากเป็นสารละลายน้ำแป้งที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัวเพิ่มขึ้น โมเลกุลอิสระที่อยู่รอบ ๆ เหลือน้อยลง เคลื่อนตัวได้ยากขึ้น ทำให้ส่วนผสมมีความหนืดเพิ่มขึ้น เรียกว่า การเกิดเจลละติไนเซชัน (Gelatinization) ซึ่งทำให้โครงรูปร่างและโครงสร้างของเม็ดแป้งไว้นั้นถึงค่าหนึ่ง ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง หลังจากนั้นเม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว พันธะภายในสายโซ่โมเลกุลถูกทำลายและอ่อนตัวลง ดูดน้ำเข้ามามาก เม็ดแป้งจะมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง ความหนืดและความใสของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแป้งที่มีปัจจัยมาจากชนิดของแป้งและปริมาณสายโซ่โมเลกุลในเม็ดแป้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ขนาดเม็ดแป้ง ปริมาณอะไมโลส การใช้ความร้อน หรือการให้แรงทางกล การวัดหาความหนืดจึงมีความจำเป็นสำหรับเป็นข้อมูลในการเลือกใช้ชนิดแป้งให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โดยมีเครื่องมือวัดความหนืดที่นิยมใช้อยู่หลายชนิด แต่ละชนิดมีหลักการทำงานแตกต่างกัน ได้แก่ เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ (Brookfield

viscometer) เครื่องวัดความหนืดรีโอมิเตอร์ (Rheometer) เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer) และเครื่องความหนืดแบบบราเบนเดอร์ อะมิโลกราฟ (Brabender visco amylograph) เป็นต้น [2]

การวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง อย่างเช่น งานของ Babic และคณะ [3] ได้ศึกษาอิทธิพลของเพกทิน (Pectin) และคาร์ราจีแนน (Carrageenan) ซึ่งมีสมบัติเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ต่อสมบัติทางกายภาพและความร้อน (Thermophysical) และสมบัติการไหล (Rheology) ของแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ การเกิดเจล (Gelatinization) และการคืนตัว (Retrogradation) และกำลังการพองตัว (Swelling power) โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบบรูคฟิลด์ และเครื่องวัดพฤติกรรมเชิงความร้อน (Differential scanning calorimetry, DSC) ได้ผลศึกษาว่าไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิด เป็นตัวหน่วงการคืนตัวของแป้ง ส่วนค่าเอนทัลปีและอุณหภูมิการเกิดเจล ตลอดจนความสามารถในการละลาย ไม่ได้รับอิทธิพลจากไฮโดรคอลลอยด์ ขณะที่ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ ซึ่งคาร์ราจีแนนมีผลมากกว่าเพกทิน และผลจากการเฉือนทำให้ความหนืดลดลง (Shear thinning) ส่วนกำลังการพองตัวมีค่ากระจายตามความเข้มข้นของเพกทิน และคาร์ราจีแนน ที่เปลี่ยนน้อยมาก ณ อุณหภูมิ 75–95 องศาเซลเซียส ส่วน Mishra และคณะ [4] ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และกล้องจุลทรรศน์แสง (Light microscope, LM) พบว่าลักษณะเม็ดแป้งมันสำปะหลังจะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวดังรูปที่ 4 แตกต่างกับแป้งชนิดอื่น และเกือบจะไม่ละลายน้ำเลยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส แต่จะเริ่มละลายน้ำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 ลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แสง (Copyright of ref. [4])

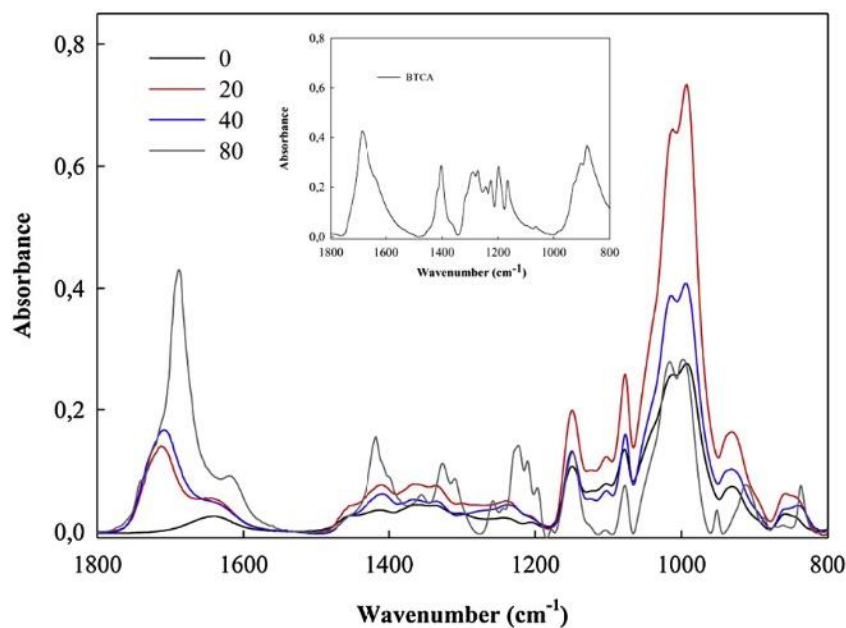
การประยุกต์ใช้แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังมีการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ หลากหลาย ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร เช่น เป็นวัตถุดิบของการผลิตสารให้ความหวาน ฟงซูรส แอล-ไลซีน (L-lysine) และแป้งดัดแปร หรืออุตสาหกรรมกาว กระดาษ สิ่งทอ และไม้อัด การนำแป้งมันสำปะหลังมาใช้ในอุตสาหกรรม จะต้องมีการปรับปรุงหรือดัดแปร เพื่อให้ได้สมบัติตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้ ตัวอย่างเช่น การใช้แป้งมันสำปะหลังในกระบวนการไมโครเอนแคปซูเลชันของเบต้าแคโรทีน (Microencapsulation of beta-carotene) ในงานของ Loksuwan และคณะ [5] ศึกษาเปรียบเทียบแป้งมันสำปะหลังดัดแปร แป้งมันสำปะหลังดิบ และมอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin) (พอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการย่อยโมเลกุลแป้ง) โดยแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมีการกระจายขนาดอนุภาคกว้างกว่าอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังดิบและมอลโทเดกซ์ทริน ส่วนค่าความชื้น (Moisture

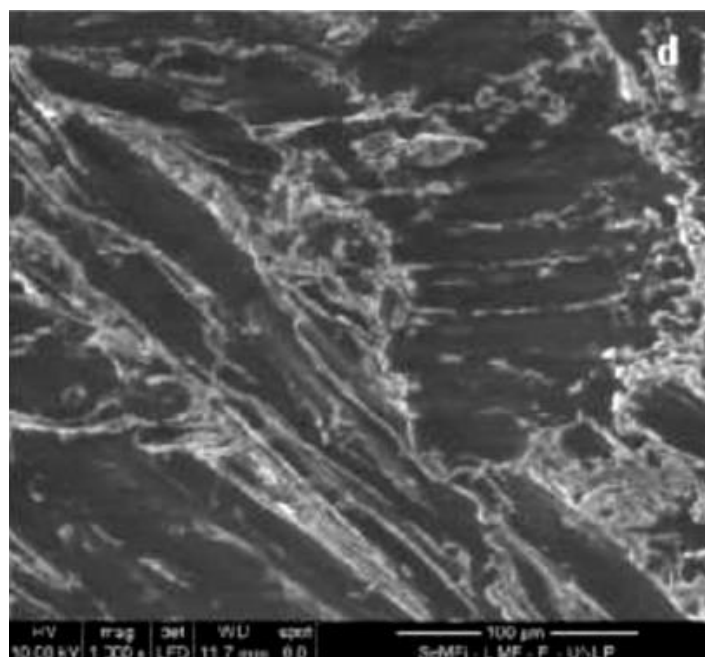
content) และค่าแอกทิวิตีของน้ำ (Water activity, a_w) (น้ำที่พร้อมจะเปลี่ยนเป็นไอ โดยหาได้จากอัตราส่วนความดันไอของน้ำในอาหารต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์) ในกระบวนการไมโครเอนแคปซูเลชัน จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่จะเคลือบ (Wall material) ที่มีความแตกต่างของปริมาณ Total beta carotene และ Surface beta carotene ในแต่ละตัวอย่าง โดย Total beta carotene มีปริมาณสูงสุดสำหรับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ขณะที่มีความต่ำสุดสำหรับมอลโทเดกซ์ทริน ส่วน Surface beta carotene มีปริมาณต่ำสุดสำหรับแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ขณะที่เดียวกันมีความสูงที่สุดสำหรับแป้งมันสำปะหลังดิบ ดังนั้นแป้งมันสำปะหลังดัดแปรจึงมีศักยภาพพอสำหรับใช้เป็นสารเคลือบ หรือการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกจากแป้งมันสำปะหลัง แล้วเสริมแรงด้วยเยื่อเส้นใยเซลลูโลสจากต้นยูคาลิปตัสที่ดัดแปร เพื่อการสะสมซิลิกา (SiO_2) ที่ผิว ในงานของ Raabe และคณะ [6] โดยผสมแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอริน และน้ำ ในสัดส่วน 60/26/14 ตามลำดับ กับเยื่อเส้นใยเซลลูโลสยูคาลิปตัสดัดแปร 5–10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนป้อนเข้าเครื่องอัดรีด (Extruder) แล้วทดสอบสมบัติทางความร้อน ความต้านทานต่อแรงดึง การดูดความชื้น และถ่ายภาพด้วยกล้อง SEM พบว่าอนุภาคของ SiO_2 อยู่บนผิวของเส้นใย และเพิ่มความต้านทานต่อการยึดของเทอร์โมพลาสติกถึง 183 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การดูดความชื้นลดลง 8.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรเยื่อเส้นใยก่อนการผสมมีประสิทธิภาพดีกว่าเยื่อที่ไม่ได้ดัดแปร

การนำแป้งมันสำปะหลังประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบของกาว ในงานของ Liew และคณะ [7] โดยผสมกับกาวจากสาหร่าย (Seaweed) สัดส่วน 0, 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ เพื่อใช้เป็นสารยึดเหนี่ยวทางชีวภาพ (กาวชีวภาพ) สำหรับกระดานไม้อัด (Particle board) แล้วศึกษาสมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงกล พบว่าค่าความชื้นมากที่สุด เมื่อแป้งมันสำปะหลังเป็นสัดส่วน 25 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการดูดน้ำจะน้อยลงเมื่อเปอร์เซ็นต์แป้งมันสำปะหลังมากขึ้น ขณะที่คามอดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) และมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) มีค่าสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของแป้งที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ Monroy และคณะ [8] ออกแบบและพัฒนาประสิทธิภาพของชิ้นงานจากเศษวัสดุในกระบวนการแปรรูปไม้ โดยดัดแปรแป้งมันสำปะหลังเป็นกาวชีวภาพ ด้วยการเติมกรดพอลิคาร์บอกซิลิก (Polycarboxylic acid) 0–80 เปอร์เซ็นต์ ต่อแป้งมันสำปะหลัง 100 กรัม ได้แก่ กรดซิตริก (Citric acid, CA) หรือกรด 1,2,3,4 Butane-tetracarboxylic (BTCA) ลงในสารแขวนลอยแป้งดิบ 5% w/w เพื่อเป็นฟิลเลอร์ พบว่าสารตัวอย่างที่ได้มีพฤติกรรมเป็นซูโดพลาสติก และการใช้เทคนิคสะท้อนแสงรวมลดทอนร่วมกับเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR) และภาพถ่ายจาก SEM ได้เผยให้เห็นอันตรกิริยาระหว่างสารตั้งต้นที่เป็นเศษวัสดุ (Substrate) และสารยึดเหนี่ยว (Adhesives) รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ในโครงสร้างที่เข้ากันได้ดี ดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งบ่งบอกถึงความแข็งแรงของพันธะการเชื่อมต่อของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและเศษวัสดุ ที่สร้างขึ้นในขั้นตอนการอัดรีด ดังนั้นการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยพอลิคาร์บอกซิลิก ช่วยปรับปรุงความแข็งแรงในการเชื่อมต่อเศษวัสดุในกระบวนการแปรรูปไม้ได้

การใช้เจลจากแป้งมันสำปะหลังปรับปรุงสมบัติความเป็นเจลของเวย์โปรตีนไอโซเลต (Whey protein isolate, WPI) ในงาน Ren และ Wang [9] (โปรตีนสกัดที่มีความบริสุทธิ์ 90 เปอร์เซ็นต์) โดยใช้ชนิดของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเป็นตัวแปรต้น ได้แก่ Acetylated (ATS) Hydroxypropylated (HPTS) และ Cross-linked (CLTS) ได้เป็นเวย์โปรตีนไอโซเลตเติมแป้งดัดแปร (WPI-modified starch) แล้วตรวจสอบสมบัติทางรีโอโลยี ความร้อน และโครงสร้าง พบว่าเวย์โปรตีนไอโซเลตเติมแป้งดัดแปร มีมอดูลัสสะสมสูงกว่าเวย์โปรตีนไอโซเลตบริสุทธิ์ และเจลเวย์โปรตีนไอโซเลตเติมแป้งดิบ และเมื่อให้ความร้อนกับเวย์โปรตีนไอโซเลตเติมแป้งดัดแปร มีผลให้มอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนข้อมูลจาก DSC บ่งชี้ว่าเวย์โปรตีนไอโซเลตเติมแป้งดัดแปรจะมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนสูงกว่าเวย์โปรตีนไอโซเลตบริสุทธิ์ เช่นเดียวกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าเจลเวย์โปรตีนไอโซเลตที่เติมแป้งดัดแปร มีสมบัติเจลดีกว่าเติมแป้งดิบ



รูปที่ 5 สเปกตรัมจาก ATR-FTIR ของกาวชีวภาพที่ผสมกับ BTCA และสอดคล้องกับกรดพอลิคาร์บอกซิลิกบริสุทธิ์ (Copyright of ref. [8])



รูปที่ 6 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของตัวอย่างที่เติม BTCA เท่ากับ 30 เปอร์เซ็นต์ (Copyright of ref. [8])

การเตรียมสารละลายโฟมนาโนคอมโพสิตในงานของ Valencia และคณะ [10] โดยใช้แป้งมันสำปะหลัง และลาโปไนซ์ (Laponite) (สารลดความหนืดจากการเฉือน) แล้วทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องโฮโมจีไนเซอร์

(Homogenization) ที่ควบคุมความเร็วและเวลาในการกวน ตรวจสอบสมบัติเชิงรีโอโลยีทั้งแบบสั่นไป-กลับ (Oscillatory) และแบบคงตัว (Steady) เพื่อประเมินความสามารถในการเข้าสู่กระบวนการหล่อด้วยมีด (Knife casting) พบว่าความเร็วและเวลาในการกวนส่งผลต่อการกระจายของลาโปโนซ์ การเติมอนุภาคนาโนของลาโปโนซ์ ให้กระจายตัวในแป้งมันสำปะหลัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดคล้ายของเหลว (Liquid-like viscous) เป็นความหนืดแบบยืดหยุ่นคล้ายของแข็ง (Solid-like elastic) และข้อมูลทางรีโอโลยียังบ่งชี้ว่าอนุภาคนาโนของลาโปโนซ์ ช่วยทำให้อันตรกิริยาภายในโซโมเลกุลของแป้งดีขึ้น หรือใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวกลางสำหรับการกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์แมกนีไทต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ในงานของ Chancharoenrith และคณะ [11] เพื่อเป็นตัวรองรับ (Supporters) ตัวเร่งซีเกอร์-แนตตา (Ziegler-Natta) ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต ซึ่งเป็นตัวเร่งในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรส์ และจากการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) โดยใช้การรองรับด้วยตัวเร่งข้างต้น พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีของฟิลเลอร์ใน HDPE เมทริกซ์ โดยบ่งชี้ด้วยค่าความต้านทานต่อการดึงและมอดูลัสที่ดีขึ้น หรือการสังเคราะห์ฟิล์มบางจากแป้งมันสำปะหลัง ในงานของ Boonkanon และคณะ [12] แล้วเจือด้วยอนุภาคนาโนของขมิ้นชัน (Curcumin) ที่สกัดจากผงขมิ้นชัน (Turmeric powder) สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์เปลี่ยนสี (Colorimetric sensor) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อตรวจจับโบรอนจากน้ำเสีย ซึ่งในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตไม้ยางพารา เซนเซอร์ฟิล์มที่ได้มีความเร็วในการตรวจจับขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของขมิ้นชัน

การสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของแป้งมันสำปะหลังกับอนุภาคนาโนอลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นฟิลเลอร์ ในงานของ Sarifudin และคณะ [13] แล้วเปลี่ยนแปลงปริมาณฟิลเลอร์และเมทริกซ์ แต่ควบคุมปริมาณรวมให้คงที่ พบว่าความต้านทานต่อการยืดของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับการเพิ่มขึ้นของอนุภาคนาโนอลูมินา (Al_2O_3) โดยมีสาเหตุมาจากอนุภาคของฟิลเลอร์ที่เป็นเหมือนตัวสร้างความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentrators) ทำให้อนุภาคเกิดเลื่อนตำแหน่งมาเกาะกลุ่มกัน ซึ่งมีผลทำให้วัสดุคอมโพสิตนี้เปราะและแตกง่ายได้ง่าย ทำให้ค่าความสามารถในการยืดจนขาด (Elongation) ลดลงตามปริมาณอนุภาคนาโนอลูมินา ส่วนภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นความเหนียวแน่นระหว่างเมทริกซ์และฟิลเลอร์ ซึ่งมีผลให้มีการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานต่อการยืดและลดค่าความสามารถในการยืดจนขาด

การใช้แป้งมันสำปะหลังในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุ

แป้งมันสำปะหลังถูกนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุด้วยวิธีการทางเคมี ที่สามารถออกแบบควบคุมองค์ประกอบและโครงสร้างในระดับโมเลกุลได้ เช่น วิธีโซล-เจล เป็นกระบวนการสังเคราะห์วัสดุแบบหนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสารละลายเหลว (Solution, Sol) ของสารเริ่มต้น ที่ประกอบด้วยสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ และสารคิเลตติง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็นเจล (Gel) โดยการเตรียมชนิดและปริมาณสารเริ่มต้นที่เหมาะสมสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ จากนั้นจะปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ตามด้วยปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation) ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้สารที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น (สายโซโมเลกุลยาวขึ้น) อย่างเช่น โอลิโกเมอร์ (Oligomer) และออกโซพอลิเมอร์ (Oxopolymer) จนกลายเป็นเจล โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน ระดับการออกซิเดชัน (Oxidation degree) และรัศมีไอออนิก (Ionic radius) [14] เมื่อแห้งสนิทจะได้ผลิตภัณฑ์ผงเพื่อนำไปแคลไซน์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนโมลของน้ำกับสารเริ่มต้น ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของตัวทำละลาย การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ในสภาวะที่ต่างกันจะทำให้โซลและเจลที่ได้ มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน ส่วนวิธีการโซล-เจลแบบจุดติดปฏิกิริยาตัวเอง (Sol-gel auto-combustion) [15,16] ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปจนผลิตภัณฑ์แห้งแล้วติดไฟ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเถ้าถ่าน (Ash) เพื่อนำไปแคลไซน์ ขณะที่วิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) เป็นเทคนิคการสังเคราะห์วัสดุที่อาศัยการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีด้วยการควบคุมความเป็นกรด-เบส (pH) ที่เหมาะสม

ความหนืดเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมองค์ประกอบทางเคมีและป้องกันการตกตะกอนของไอออนโลหะ ซึ่งอธิบายด้วยน้ำหนักโมเลกุลที่หมายถึงจำนวนสายโซโมเลกุล ที่จะแตกต่างกันตามความเข้มข้น (หรือสัดส่วน) ทำให้

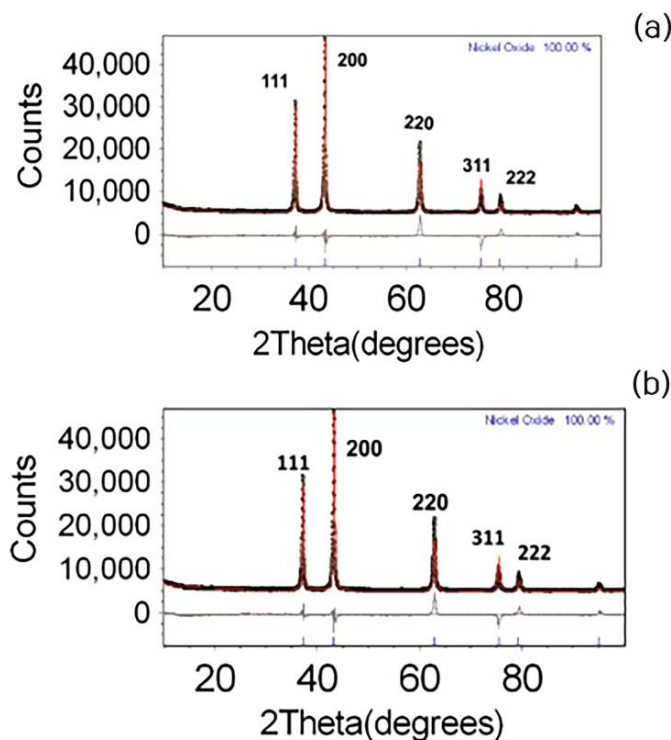
ความสามารถในการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่แตกต่างกัน ยิ่งจำนวนสายโซ่มากหรือยาว จะมีโอกาสเกี่ยวพันได้มากกว่าจำนวนสายโซ่น้อยหรือสั้น แป้งมันสำปะหลังมีสายโซ่อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) อยู่ในเม็ด เมื่อให้ความร้อนพันธะถูกทำลาย น้ำแทรกตัวเข้าไป เม็ดแป้งจะบวมและแตกออก และผลจากการกวนทำให้สายโซ่มีการกระจายและเกี่ยวพันกันเกิดขึ้น ไอออนของโลหะเข้าไปแทรกตัวอยู่ ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ลักษณะการเกี่ยวพันดังกล่าวทำให้เกิดระยะห่าง ช่องว่าง หรือปริมาตรว่าง (Free volume) ภายในสายโซ่ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไอออนของโลหะเข้าไปแทรกตัวอยู่ หากปริมาตรว่างมีมาก กล่าวคือ มีการเกี่ยวพันของสายโซ่น้อย ย่อมทำให้โอกาสที่ไอออนอิสระจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ได้มีจำนวนมาก เมื่อนำไปแคลไซน์จะกลายเป็นคลัสเตอร์ขนาดใหญ่และอาจจะเป็นสารอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการได้ ทำนองเดียวกันถ้าสายโซ่ยาว จะมีการเกี่ยวพันได้มากขึ้น ทำให้ปริมาตรว่างน้อยลง (ความหนาแน่นสูง) เมื่อนำไปแคลไซน์โอกาสที่ไอออนของโลหะจะแทรกตัว จะกลายเป็นคลัสเตอร์ของสารอื่น ๆ น้อยลง โอกาสที่จะได้สารบริสุทธิ์สูง

แป้งมันสำปะหลังสามารถใช้เป็นคิเลตติ้งเอเจนต์ในกระบวนการสังเคราะห์วัสดุด้วยวิธีโซล-เจลได้ เนื่องจากมีส่วนประกอบของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์อยู่ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดความไวของปฏิกิริยา ป้องกันการรวมตัว และควบคุมการตกตะกอน อีกทั้งยังช่วยต่อการแขวนลอยร่วมกับสารตั้งต้นอื่น ๆ เมื่อให้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก็สามารถเปลี่ยนสภาพเป็นเจล โดย Ferreira และคณะ [17] ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) โดยใช้แป้งมันสำปะหลังดิบในกระบวนการโซล-เจล ที่มีการควบคุมขนาดอนุภาค แล้วยืนยันผลด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) และ Raman spectroscopy ว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้เป็นโครงสร้างนาโนซีเรียมออกไซด์ ส่วนการวิเคราะห์ภาพถ่ายกล้อง SEM ร่วมกับผล XRD พบว่าอนุภาคนาโนซีเรียมออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ขนาดผลึกโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 8.1 ถึง 12.7 นาโนเมตร ดังนั้นแป้งมันสำปะหลังจึงมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับใช้สังเคราะห์อนุภาคนาโนซีเรียมออกไซด์ และมีศักยภาพประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ ส่วนการสังเคราะห์แบเรียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้คิเลตติ้งเอเจนต์ออกแทนิก ได้แก่ โคโคซานและแป้งมันสำปะหลัง ในงานของ Syahwin และคณะ [18] ใช้ผล XRD ยืนยันผลของแบเรียมเฟอร์ไรต์พบขนาดผลึกเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ ขณะที่ผลจากเครื่องวิเคราะห์สมบัติแม่เหล็กโดยวิธีการสั่นตัวอย่างภายใต้สนามแม่เหล็ก (Vibrating sample magnetometer, VSM) สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางแม่เหล็ก ได้แก่ ค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (Saturation magnetization, M_s) ค่าแมกนีไทเซชันคงค้าง (Remanent magnetization, M_r) และค่าแรงบังคับทางแม่เหล็ก (Coercive force, H_c) ว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากเติมแป้งลงไป โดยมีค่าทางแม่เหล็กดีที่สุด เมื่อใช้แป้ง 0.5% w/v และน้ำแป้ง 10% v/v

การศึกษาอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่เตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล ในงานของ Ramasami และคณะ [19] ใช้สัดส่วนของนิกเกิลไนเตรตต่อแป้งมันสำปะหลังเป็น 1:0.5 และ 1:1 w/w ข้อมูลจาก XRD แสดงให้เห็นว่าได้นิกเกิลออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นรูปลูกบาศก์ ดังรูปที่ 7 มีขนาดผลึกเฉลี่ย 28 และ 38 นาโนเมตร สำหรับสัดส่วน 1:0.5 และ 1:1 ตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดที่วัดด้วย TEM พบว่าใหญ่กว่า (35 และ 60 นาโนเมตร ตามลำดับ) นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากสเปกโตรมิเตอร์เชิงแสง (Optical spectrometer) พบว่าอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์มีช่องว่างของแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect band gap) ส่วนการศึกษาทางไฟฟ้าเคมีพบอนุภาคนาโนนิกเกิลออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าอยู่ที่ 940 และ 785 mA h/g สำหรับสัดส่วน 1:0.5 และ 1:1 ตามลำดับ และปีเดียวกันงานวิจัยของ Ramasami และ Naika [20] ใช้แป้งมันสำปะหลังในกระบวนการโซล-เจล เพื่อสังเคราะห์สังกะสีออกไซด์ (ZnO) แล้วตรวจสอบโครงสร้างด้วย XRD พบว่าโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล และจากสเปกตรัมของ FTIR แสดงพิกการดูดกลืนที่ 394 และ 508 cm^{-1} เพราะมีการดูดกลืนคลื่นเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (Stretching vibration) ของพันธะสังกะสีและออกไซด์ ส่วนสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดที่วัดจากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเลตและแสงช่วงที่ตามองเห็น (UV/Visible light spectrophotometer, UV/Vis) มีพิกการดูดกลืนสูงสุดที่ 373 นาโนเมตร ขณะที่ภาพถ่ายจากกล้อง SEM แสดงให้เห็นการเกาะกลุ่มกันและมีรูพรุนอย่างธรรมชาติ ส่วนภาพถ่ายจากกล้อง TEM เผยอนุภาคที่เป็นรูปทรงกลมมีขนาด 40–50 นาโนเมตร ขณะที่การทดสอบเป็นตัวเร่งของการสลายเมทิลีนบลูด้วยแสง (Photocatalytic degradation of methylene blue) พบว่า ZnO มีประสิทธิภาพ ในแสงช่วงที่ตา

มองเห็น (Visible light) มากกว่าแสงอัลตราไวโอเลต (UV light) เนื่องจากการลดลงของแถบพลังงาน (Band gap) และอีกสองปีถัดมางานของ Ramasami และคณะ [21] ใช้แป้งมันสำปะหลังในกระบวนการโซล-เจล เพื่อสังเคราะห์ ZnO เซ็นเดิม และตรวจสอบขนาดอนุภาคจากผล XRD พบว่าอยู่ที่ประมาณ 45 นาโนเมตร ส่วนภาพถ่ายจากกล้อง SEM และ TEM ช่วยยืนยันว่าอนุภาคของสังกะสีออกไซด์เกาะกันเป็นกลุ่มคล้ายวงกลม และเป็นสายยาว ทั้งนี้สังกะสีออกไซด์ที่ได้ ถูกใช้เป็นตัวเร่งในกระบวนการเกิดไฮโดรเจนจากแสง (Photocatalytic hydrogen generation) ภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตและแสงช่วงที่ตามองเห็น

ขณะที่การสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ (Packaging) สำหรับอาหาร ในงานของ Fadeyibi และคณะ [22] ซึ่งสังเคราะห์ฟิล์มนาโนคอมโพสิตของแป้งมันสำปะหลังผสมสังกะสี (Zinc) และเตรียมอนุภาคนาโน ZnO ด้วยวิธีโซล-เจล กำหนดให้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 4 ถึง 9 นาโนเมตร ปรับเปลี่ยนส่วนผสมแป้งมันสำปะหลังกับอนุภาคนาโนสังกะสี และกลีเซอริน พบว่าการย่อยสลายของฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อยู่ในช่วง 2-3 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนัก ซึ่งบ่งชี้ว่าฟิล์มมีความเสถียรทางความร้อนที่ดี ส่วนค่าการซึมผ่านของออกซิเจนลดลงตามปริมาณอนุภาคนาโนสังกะสี ขณะที่การซึมผ่านของน้ำสูง และเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกลีเซอริน อนุภาคนาโนสังกะสี และความหนา สามารถรักษาคุณภาพอาหารที่บรรจุได้ดี



รูปที่ 7 XRD pattern แสดงตำแหน่งพิกของนิกเกิลออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ใช้สัดส่วนของนิกเกิลในเดรตต่อแป้งมันสำปะหลังเป็น (a) 1:0.5 และ (b) 1:1 ตามลำดับ (Copyright of ref. [19])

Konne และคณะ [23] สังเคราะห์สังกะสี ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้แป้งเป็นตัวควบคุมการตกตะกอนด้วยความเข้มข้นแตกต่างกัน ให้ความร้อนภายใต้สภาวะแก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 2 นาที สังเกตเห็นสีของตัวอย่างเปลี่ยนไปจากน้ำตาลอ่อนเป็นน้ำตาลเข้มในระหว่างการทำปฏิกิริยา ได้สังกะสีออกไซด์ที่ไม่บริสุทธิ์ มีพิกหลักเป็นสังกะสีออกไซด์ และสังกะสีเจือไฮโดรเจนเป็นพิกรอง เนื่องจากการแทรกตัวของไฮโดรเจนภายในแลตติซ สังเกตได้จาก $2\theta = 26.60$ องศา และมีขนาดอนุภาคเมื่อประเมินจากผล XRD คือ 47 และ 30

นาโนเมตร และจากภาพ SEM ปรากฏว่าเป็นรูพรุนเล็ก ๆ มากมาย ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยสเปกโทรเมตรีรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDX) ยืนยันว่า Zn และ O เป็นองค์ประกอบหลัก

นอกจากเป็นสารเคลือบ การใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์อื่น ๆ มีตัวอย่างในงานของ Almeida และคณะ [24] ใช้แป้งมันสำปะหลัง เพื่อเตรียมชิ้นงานอลูมินาเซรามิก รูปร่างต่าง ๆ โดยใช้น้ำและแป้งมันสำปะหลัง เป็นสารอัดตัว (Consolidator) เป็นสารยึดเกาะ (Binder) และสารก่อรู (Pore former) สารแขวนตะกอนคอลลอยด์ (Colloidal suspensions) ถูกเตรียมกับแป้งมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้น 3 ระดับ ปริมาณการกระจายและจุดเกิดเจล (Gel point) ถูกกำหนดด้วยการวิเคราะห์ทางรีโอโลยี สารแขวนตะกอนคอลลอยด์ถูกอัดตัวในแม่พิมพ์ซิลิโคน ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วแกะออก ทำให้แห้งเพื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1200, 1400 และ 1600 องศาเซลเซียส พบว่ามีโครงสร้างรูพรุนที่เห็นได้จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งเกิดจากรูทรงขนาดใหญ่ของอนุภาคแป้งที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของอนุภาคเล็ก ๆ โดยความหนาแน่นและความพรุนเป็นฟังก์ชันกับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

สรุป

การนำแป้งมันสำปะหลังมาเป็นส่วนหนึ่งในการสังเคราะห์วัสดุ นอกจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังส่งผลให้มูลค่าของแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมูลค่าที่เพิ่มขึ้นในที่นี้ หมายถึงสามารถเป็นวัตถุดิบจำเป็นสำหรับผลิตเป็นวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ยังนิยมใช้และหาได้ง่ายตามท้องตลาด แต่ในงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้น ยังคงเป็นการสังเคราะห์วัสดุในระดับห้องปฏิบัติการ การวิจัยในอนาคตจึงมีความจำเป็นต้องวิจัยเพื่อขยายระดับการสังเคราะห์ให้ครอบคลุมการสังเคราะห์ในปริมาณมาก โดยสมบัติไม่ผิดเพี้ยน เพื่อรองรับการป้อนวัสดุสู่ภาคอุตสาหกรรม และแป้งมันสำปะหลังต้องสามารถใช้ในการสังเคราะห์วัสดุได้หลากหลายชนิด ด้วยการปรับปรุงเงื่อนไข ให้สอดคล้องกับปริมาณและสมบัติของวัสดุที่ต้องการ เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และทำการทดลองสังเคราะห์ซ้ำ ๆ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อการสังเคราะห์ในปริมาณมาก และควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้แม่นยำ ส่วนการวิจัยในระยะสุดท้ายต้องวิจัยเพื่อนำวัสดุมาจำหน่าย ต้องศึกษาความซับซ้อนและขีดจำกัดต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ผลกระทบเชิงสังคม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ พร้อมทั้งหาตลาดรองรับผลิตภัณฑ์ และกลุ่มด้านต่าง ๆ ที่นำวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมไปใช้งานจริง โดยเฉพาะกลุ่มวัสดุการแพทย์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัย รหัสโครงการ P-18-51764 และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ภายใต้สัญญาเลขที่ FDA-CO-2562-8904-TH และพื้นที่ในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ซึ่งคอยให้คำชี้แนะและช่วยเหลือการตรวจสอบปรับปรุงต้นฉบับจนสำเร็จเป็นบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. M. Chisenga, T. S. Work, G. Bultosa and B. A. Alimi, "Progress in research and applications of cassava flour and starch: A review", *Journal of Food Science and Technology*, 56, 2799-2813 (2019).
- [2] กล้านรงค์ ศิริโรต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, "เทคโนโลยีของแป้ง", พิมพ์ครั้งที่ 4 (2550), กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- [3] J. Babic, D. Subaric, D. Ackar, V. Pilizota, M. Kopjar and N. N. Tiban, "Effects of pectin and carrageenan on thermophysical and rheological properties of tapioca starch", *Czech Journal of Food Sciences*, 24, 275-282 (2006).
- [4] S. Mishra and T. Rai, "Morphology and functional properties of corn, potato, and tapioca starches", *Food Hydrocolloids*, 20, 557-566 (2006).
- [5] J. Loksuan, "Characteristics of microencapsulated β -carotene formed by spray drying with modified tapioca starch, native tapioca starch and maltodextrin", *Food Hydrocolloids*, 21, 928-935 (2007).
- [6] J. Raabe, A. D. S. Fonseca, L. Bufalino, C. Ribeiro, M. A. Martins, J. M. Marconcini, L. M. Mendes and G. H. D. Tonoli, "Biocomposite of cassava starch reinforced with cellulose pulp fibers modified with deposition of silica (SiO_2) nanoparticles", *Journal of Nanomaterials*, 2015, 493439 (2015).
- [7] K. C. Liew, P. B. D. Ting and Y. F. Tan, "Physico-mechanical properties of particleboard made from seaweed adhesive and tapioca starch flour", *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 15, 199-203 (2018).
- [8] Y. Monroy, S. Rivero and M. A. Garcia, "Sustainable panels design based on modified cassava starch bioadhesives and wood processing byproducts", *Industrial Crops & Products*, 137, 171-179 (2019).
- [9] F. Ren and S. Wang, "Effect of modified tapioca starches on the gelling properties of whey protein isolate", *Food Hydrocolloids*, 93, 87-91 (2019).
- [10] G. A. Valencia, I. C. F. Moraes, L. H. G. Hilliou, R. V. Lourenco and P. J. D. A. Sobral, "Nanocomposite-forming solutions based on cassava starch and laponite: Viscoelastic and rheological characterization", *Journal of Food Engineering*, 166, 174-181 (2015).
- [11] S. Chanchaoenrith, C. Kamonsatikul, M. Namkajorn, S. Kiatisevi and E. Somsook, "Iron oxide/cassava starch-supported ziegler-natta catalysts for *in situ* ethylene polymerization", *Carbohydrate Polymers*, 117, 319-323 (2015).
- [12] C. Boonkanon, K. Phatthanawiwat, W. Wongniramaikul and A. Choodum, "Curcumin nanoparticle doped starch thin film as a green colorimetric sensor for detection of boron", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 224, 117351 (2020).
- [13] J. Sarifudin, M. K. M. Shah, S. Jaapar and S. M. Sapuan, "Experimental analysis tapioca starch reinforced alumina nanoparticle (Al_2O_3) composite", *Journal of Built Environment, Technology and Engineering*, 1, 1-15 (2016).
- [14] Y. Dimitriev, Y. Ivanova and R. Iordanova, "History of sol-gel science and technology (review)", *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 43, 181-192 (2008).
- [15] วิฑูรย์ ตั้งวัฒนกุล, "นาโนสปีเนลเฟอร์ไรต์", *วารสารฟิสิกส์ไทย*, 33, 7-10 (2559).
- [16] วิฑูรย์ ตั้งวัฒนกุล, "อนุภาคแม่เหล็กนาโนจากโซล-เจล", *วารสารฟิสิกส์ไทย*, 33, 11-15 (2559).
- [17] N. S. Ferreira, R. S. Angelica, V. B. Marques, C. C. O. Lima and M. S. Silva, "Cassava-starch-assisted sol-gel synthesis of CeO_2 nanoparticles", *Materials Letters*, 165, 139-142 (2016).
- [18] Syahwin, M. N. Nasruddin, M. Zarlis and B. Sunendar, "Synthesis of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ using templates from starch", *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 513-518 (2017).
- [19] A. K. Ramasami, M. V. Reddy and G. R. Balakrishna, "Combustion synthesis and characterization of NiO nanoparticles", *Material Science in Semiconductor Processing*, 40, 194-202 (2015).
- [20] A. K. Ramasami, H. R. Naika, H. Nagabhushana, T. Ramakrishnappa, G. R. Balakrishna and G. Nagaraju, "Tapioca starch: An efficient fuel in gel-combustion synthesis of photocatalytically and anti-microbially active ZnO nanoparticles", *Material Characterization*, 99, 266-276 (2015).
- [21] A. Ramasami, T. N Ravishankar, G. Nagaraju, T. Ramakrishnappa, S. R. Teixeira and R. G. Balakrishna, "Gel-combustion-synthesized ZnO nanoparticles for visible light-assisted photocatalytic hydrogen generation", *Bulletin of Materials Science*, 40, 345-354 (2017).

- [22] A. Fadeyibi, Z. D. Osunde, G. Agidi, P. A. Idan and E. C. Egwim, "Development and optimisation of cassava starch-zinc-nanocomposites film for potential application in food packaging", *Journal of Food Processing & Technology*, 7, 1-8 (2016).
- [23] J. L. Konne and B. O. Christopher, "Sol-gel syntheses of zinc oxide and hydrogenated zinc oxide (ZnO:H) phases", *Journal of Nanotechnology*, 2017, 5219850 (2017).
- [24] F. A. Almeida, E. C. Botelho, F. C. L. Melo, T. M. B. Campos and G. P. Thim, "Influence of cassava starch content and sintering temperature on the alumina consolidation technique", *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 1587-1594 (2009).