ไหม: องค์ประกอบและโครงสร้าง คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้
Silk: Compositions and Structures, Properties and Applications

หยาดพิรุณ บุญสด[1], ประสงค์ สีหานาม[2*]
Yardpiroon Boonsod[1], Prasong Srihanam[2*]

Received: 12 September 2011; Accepted: 14 December 2011

บทคัดย่อ

ได้รวบรวมรายงานเกี่ยวกับไหมซึ่งเป็นชีววัสดุที่เกี่ยวข้องกับชีวิตมนุษย์มายาวนาน ในส่วนของลักษณะทั่วไปของไหม องค์ประกอบและโครงสร้าง คุณสมบัติที่สำคัญ และการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเส้นไหม ไหมจัดเป็นโปรตีนเส้นใยธรรมชาติที่มีคุณสมบัติดีเยี่ยมเป็นเอกลักษณ์ ภายในเส้นไหมประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ เซริซิน ซึ่งประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีขั้วในปริมาณสูง จึงสลายในตัวทำละลายมีขั้ว เช่น น้ำร้อน กรด เบส หรือเอนไซม์ย่อยโปรตีนได้ง่ายกว่าไฟโบรอิน ที่เป็นเส้นใยหลักและละลายได้ยากในตัวทำละลายดังกล่าว ยกเว้น ในสารละลายเกลือ กรดหรือเบสเข้มข้น เนื่องจากประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วต่ำในปริมาณสูงเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ทำให้ไหมมีความแข็งแรงสูง และไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์ จึงมีการนำไฟโบรอินมาใช้ประโยชน์หลากหลาย เช่น ส่วนผสมในเครื่องสำอางป้องกันน้ำ วัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์และระบบนำส่งสารออกฤทธิ์ไปยังอวัยวะเป้าหมาย ซึ่งถือเป็นการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากไหมนอกเหนือจากการเป็นสิ่งทอหรือวัสดุเสริมความแข็งแรง ส่วนเซริซินนิยมนำไปเป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง อาหาร และเครื่องดื่มเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและส่งเสริมสุขภาพที่ดี จึงกล่าวได้ว่าไหมเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีคุณค่าและสำคัญต่อชีวิตมนุษย์

คำสำคัญ: การประยุกต์ใช้ คุณสมบัติ โครงสร้าง ไหม องค์ประกอบ

Abstract

This review aims to report about silk which is a biomaterial connected to human life over a long pericd of time. The scope of content included general features, composition and structures, characteristics and applications. Silk is a natural protein fibers produced from silkworms. It is a unique fiber with excellent properties. Each silk fiber is composed 2 main proteins, sericin and fibroin. The sericin is comosed of a high content of hydrophilic amino acids. This makes it easy for it to dissolve in hydrophilic solvents such as hot water, acid, base or protease enzymes, except in concentrated salt, acid or base solutions compared with other fibroin. Silk fiber has high strength and biocompatibility. Recently, silk fibroin has been applied as biomaterial and the delivery system of active ingredients. Sericin is regularly added in cosmetics, food and drinks for enhancing food nutrition and good health. Therefore, it was suggested that silk is a valuable and important natural material in human life.

Keywords: application property structure silk composition

---

[1] *นิสิตปริญญาโท [2], ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาเคมีและศูนย์นวัตกรรมความเป็นเลิศทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150*

[1] *Master Degree Student, [2] Asst.Prof., Department of Chemistry and the Center of Excellence for Innovation in Chemistry , Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.*

* *Corresponding author : Prasong Srihanam, Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.*

บทนำ

พอลิเมอร์มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นและมีการนำพอลิเมอร์ไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง[1] โดยทั่วไปพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthetic polymers) ได้แก่ กลุ่ม polyesters (polyglycolide, polylactides, polycaprolactone) และโคพอลิเมอร์ของ polyester เช่น polylactides-co-polyglycolide และอีกประเภทหนึ่งคือ พอลิเมอร์ธรรมชาติ (natural polymer) เช่น โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต[2] พอลิเมอร์ ธรรมชาติได้รับความนิยมมาก ในปัจจุบันมีการศึกษาที่เกี่ยวเนื่องกับคุณสมบัติและการปรับปรุงคุณสมบัติของไหมอย่างแพร่หลาย โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้นและมีความจำเพาะต่อลักษณะงานที่แตกต่างกัน การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากพอลิเมอร์ ธรรมชาติ อย่างหนึ่งที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง คือ เป็นวัสดุทางการแพทย์ในการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนถ่ายเนื้อเยื่อที่ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติที่เรียกว่า “วิศวกรรมเนื้อเยื่อ” (tissue engineering)[3] ข้อดีของการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ คือ สามารถเข้ากับร่างกายได้ดี ไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและไม่ก่อปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์สังเคราะห์ยังคงได้รับความนิยมและนำมาใช้งานเช่นเดิม เนื่องจากสามารถผลิตซ้ำได้ (reproducibility) และผลิตได้ในปริมาณมาก[4] พอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวได้โดยระบบชีวภาพ (biodegradable polymers) ถือเป็นกลุ่มวัสดุที่กำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติดีเยี่ยม โดยเฉพาะความไม่ก่อพิษและไม่ตกค้างในร่างกาย[5,6] พอลิเมอร์ธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวได้ในธรรมชาติ แต่อาจไม่พบคุณสมบัตินี้ในพอลิเมอร์สังเคราะห์ยกเว้นในกลุ่มพอลิเอสเตอร์และโคพอลิเมอร์ ตัวอย่างพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์มากในปัจจุบัน ได้แก่ ไคติน ไคโตซาน เซลลูโลส แป้ง คอลลาเจน เคอราติน และไหม

บทความวิชาการนี้นำเสนอลักษณะทั่วไปของไหม องค์ประกอบและโครงสร้าง คุณสมบัติ และการใช้ประโยชน์จากเส้นไหม ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ ธรรมชาติที่มีประวัติการใช้งานมายาวนานและมีบทบาทต่อวิถีชีวิตของผู้คนมาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันมีการศึกษาและดัดแปลงไหมให้มีรูปแบบหลากหลาย เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่จำเพาะ

ลักษณะทั่วไปของไหม

เส้นไหม เป็นโปรตีนชนิดเส้นใยและส่วนมากผลิตจากแมลงในอันดับ (Order) Lepidopteran วงศ์ (Family) Bombycidae หรือไหมบ้าน (mulberry silk) และ Saturniidae หรือไหมป่า (non-mulberry หรือ wild silk)[7] ไหมบ้านจะกินใบหม่อนเป็นอาหาร ส่วนไหมป่าจะกินใบพืชชนิดอื่น เช่น ใบละหุ่ง หรือใบมันสำปะหลัง[8] วงจรชีวิตของไหมประกอบด้วย 4 ระยะ คือ ระยะไข่ ระยะตัวหนอน ระยะดักแด้ และระยะผีเสื้อ

องค์ประกอบและโครงสร้างของเส้นไหม

เส้นไหมประกอบด้วยโปรตีนหลัก 2 ชนิด คือ ไฟโบรอิน (fibroin) และเซริซิน (sericin)[9] ไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญคือ ไกลซีน (ร้อยละ43) อะลานีน (ร้อยละ30) และเซอรีน (ร้อยละ12)[10] สายโอลิโกเพปไทด์มอนอเมอร์ มีลำดับกรดอะมิโน (ไกลซีน-อะลานีน-ไกลซีน-อะลานีน-ไกลซีน-เซอรีน/ไทโรซีน)$_n$[11] เป็นสัดส่วนของ กรดอะมิโนที่มีขนาดเล็กและไม่มีขั้ว สำหรับปริมาณกรดอะมิโน ที่พบในไหม ไฟโบรอินชนิดต่างๆ ดังปรากฏใน Table 1 ทำให้ไฟโบรอิน ไม่ละลายง่าย จัดเป็นโปรตีนเส้นใย[12] ประกอบด้วยกลุ่มโปรตีนสายหลัก (heavy chain) น้ำหนักประมาณ 350 กิโลดาลตัน และโปรตีนสายรอง (light chain) น้ำหนักประมาณ 25 กิโลดาลตัน และเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ส่วนเซริซินประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีขั้วในอัตราส่วนที่สูง นอกจากไกลซีน อะลานีน และเซอรีนแล้ว เซริซินยังประกอบด้วยกรดกลูตามิก ทรีโอนีนและไทโรซีน[13] กรดอะมิโนเหล่านี้จะก่อเป็นบริเวณอสัณฐาน (amorphous) โครงสร้างเส้นไหมแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ แผ่นบีต้า (β-sheet) เกลียวอัลฟ่า (α-helical) จะอยู่ในส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) และโครงสร้างเกลียวสุ่ม (random coil) จะอยู่ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน โครงสร้างอสัณฐานนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ด้านกายภาพโดยรวมของเส้นไหม[14] และโครงสร้างที่เป็นผลึก เป็นส่วนที่ทำให้เส้นไหมมีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น[15] ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของไหมไฟโบรอินมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ ดังปรากฏใน Table 2

Table 1 Amino acid compositions in silk fiber extracted from mulberry silk (*Bombyx mori*), and non-mulberry silk (*Samia cynthia ricini*, *Antheraea pernyi* and *Antheraea yamamai*) (g/100 g of fibroin).

Amino acid	*B. mori*	*S. c. ricini*	*A. pernyi*	*A. yamamai*
Glycine	42.9	33.2	26.7	26.1
Alanine	30.0	48.4	48.1	48.1
Serine	12.2	5.5	9.1	9.0
Tyrosine	4.8	4.5	4.1	3.9
Aspartic acid	1.9	2.7	4.2	4.5
Arginine	0.5	1.7	2.9	3.5
Histidine	0.2	1.0	0.8	0.8
Glutamic acid	1.4	0.7	0.8	0.7
Lysine	0.4	0.2	0.2	0.1
Valine	2.5	0.4	0.7	0.7
Leucine	0.6	0.3	0.3	0.3
Isoleucine	0.6	0.4	0.4	0.4
Phenylalanine	0.7	0.2	0.3	0.2
Proline	0.5	0.4	0.3	0.4
Threonine	0.9	0.5	0.5	0.6
Methionine	0.1	Trace	Trace	Trace
Cystein	Trace	Trace	Trace	Trace
Tryptophan	-	0.3	0.6	0.7

Source: Zhao and Asakura.[16]

Table 2 Mechanical properties of silk compared to some biodegradable polymers.

Source of biomaterial	Modulus (GPa)	UTS (MPa)	Strain at break (%)
Bombyx mori silk (with sericin)	5-12	500	19
B. mori silk (without sericin)	15-17	610-690	4-6
B. mori silk	10	740	20
Nephila clavipes silk	11-13	875-972	17-18
Collagen	0.0018-0.046	0.9-7.4	24-68
Cross-linked collagen	0.4-0.8	47-72	12-16
Polylactic acid	1.2-3.0	28-50	2-6

GPa = Gigapascal ($x10^9$)

UTS = Ultimate tensile strength

MPa = Megapascal ($x10^6$)

Source: Kundu et al.[17]

คุณสมบัติของเส้นไหม

ความแข็งแรง/ความยืดหยุ่น

ไหมมีความแข็งแรงสูงและสามารถยืดหยุ่นได้ดี จากรายงานพบว่า เส้นไหมมีความแข็งแรงตั้งแต่ 4.8 จิกะปาสคาล (GPa; $x10^9$) ขึ้นไป ความแข็งแรงของเส้นไหมขณะเปียกจะลดลงร้อยละ 15-20 เมื่อเทียบกับเส้นไหมแห้ง ในส่วนของความยืด เส้นไหมสามารถยืดหยุ่นได้ตั้งแต่ร้อยละ 35 และพบว่าเส้นไหมสามารถหดกลับคืนได้ถึงร้อยละ 92[10]

การละลาย

ไฟโบรอินไม่ละลายใน น้ำ แอลกอฮอล์ กรดหรือเบสอ่อน แต่ละลายในกรดหรือเบสแก่ หรือกรดกัดโลหะเข้มข้น เช่น กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) กรดฟอร์มิก (formic acid)[18] เฮกซะฟลูออโรไอโซโพรพานอล (hexafluoroisopropanol; HFIP)[19] นอกจากนี้ไหมไฟโบรอิน ของไหมสามารถละลายในสารละลายเกลือความเข้มข้นสูง เช่น แคลเซียมไนเตรต (calcium nitrate)[20] ลิเธียมโบรไมด์ (lithuim bromide)[7] ในขณะที่เซริซินสามารถสลายได้ในน้ำร้อน สารละลายกรดหรือเบส หรือเอนไซม์ย่อยโปรตีน[21]

ความหนาแน่น

ไหมมีความหนาแน่นสูงกว่าน้ำ เส้นไหมที่มีเซริซินมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,320-1,400 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อกำจัดเซริซินออกความหนาแน่น จะมีค่าลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 1,300-1,380 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร[22]

การสลายตัวทางชีวภาพ

สมบัติในการสลายตัวของไหม ถือว่ามีความสำคัญต่อการนำไปใช้งานโดยเฉพาะในทางการแพทย์[22] เส้นไหมจะสูญเสียความแข็งแรงภายในระยะเวลา 1 ปีเมื่ออยู่ภายในร่างกาย และเมื่อเวลาผ่านไป 2 ปี เส้นไหมจะไม่ถูกจดจำโดยเซลล์ของร่างกาย อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปเอนไซม์ไทโรซิเนส (tyrosinase) ภายในร่างกายจะสามารถย่อยไหมตามกลไกการกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกายได้ จึงถือว่าไหมเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ[8] แต่ในทางตรงกันข้าม เส้นไหมที่อยู่บริเวณเปลือกนอกรังไหมจะมีความคงทนเป็นเวลานาน เนื่องจากว่าหนอนไหมจะสร้างสารที่ยับยั้งเอนไซม์โปรตีนเอส ภายในต่อมไหมและหลั่งออกมาเก็บไว้ที่บริเวณเปลือกนอกรังไหมเพื่อป้องกันไม่ให้เส้นไหมถูกทำลายด้วยเอนไซม์ดังกล่าว[23] การฉายรังสีแกมมาก่อนการทดสอบกับเอนไซม์โปรตีเอส พบว่าช่วยเร่งอัตราการสลายตัวของเส้นไหมได้ แต่การฉายรังสีแกมมาทำให้เซลล์เกาะกับเส้นไหมลดลง[24]

การป้องกันการแพ้หรือการอับเสบ

การอับเสบของเซลล์ เกิดจากการต่อต้านของระบบภูมิคุ้มกันเมื่อมีสิ่งแปลกปลอมเข้าสู่ร่างกาย เซลล์และเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องกับการอักเสบ ได้แก่ เซลล์เม็ดเลือด (เซลล์เม็ดเลือดขาวและเกล็ดเลือด) หลอดเลือด และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ปัจจุบันพบว่า วัสดุทางชีวภาพสามารถป้องกันการแพ้หรือการอับเสบของร่างกายได้ โครงยึด (scaffold) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างไหมไฟโบรอินกับเจลลาตินที่ได้จากการเตรียม โดยใช้เทคนิคการปั่นด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูง (electrospinning) ก่อนนำไปปลูกถ่ายบริเวณใต้ผิวหนัง พบว่า โครงยึดที่เตรียมจากวิธีดังกล่าวสามารถเข้ากับร่างกายได้ดีและคาดว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อเพื่อปลูกถ่ายเส้นเลือดได้[25] เมื่อศึกษาผลของแผ่นฟิล์มไหมต่อการอักเสบของเซลล์ไฟโบรบลาสต์ทั้งในห้องปฏิบัติการ (*in vitro*) และร่างกายสิ่งมีชีวิต (*in vivo*) พบว่า แผ่นฟิล์มไหมช่วยส่งเสริมให้เซลล์มีการเกาะติดและขยายขนาดของเซลล์ได้เป็นอย่างดีโดยภาพรวม โดยไม่ก่อให้เกิดการต่อต้านจากเซลล์อันเป็นสาเหตุของการอักเสบ[26]

การประยุกต์ใช้ประโยชน์จากเส้นไหม

มนุษย์รู้จักใช้ประโยชน์จากไหมมาตั้งแต่อดีต สำหรับประเทศไทยถือได้ว่าไหมเกี่ยวข้องในวิถีชีวิตผู้คนมายาวนานเช่นกันดังปรากฏหลักฐาน จากการค้นพบมรดกโลกบ้านเชียง จังหวัดอุดรธานี ที่พบเศษเส้นไหมที่มีอายุหลายพันปีรวมอยู่ด้วย ในอดีตไหมถูกนำมาทอเป็นเครื่องนุ่งห่มหรือส่วนประกอบของอุปกรณ์ แต่ปัจจุบันมีรายงานการนำไหมไปใช้ประโยชน์มากขึ้น ได้แก่ ส่วนประกอบในเครื่องสำอาง สารเติมแต่งในอาหารและเครื่องดื่ม[20,27] วัสดุทางการแพทย์[28] โดยเฉพาะในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) การแพทย์ฟื้นฟู (regenerative medicine) การรักษาด้วยยีน (gene therapy) การควบคุมการปลดปล่อยยา (controlled drug delivery) และเทคโนโลยีนาโนชีวภาพ (bionanotechnology)[2]

สิ่งทอ

มนุษย์รู้จักนำเส้นไหมมาทำเป็นสิ่งทอตั้งแต่อดีต เนื่องจากไหมเป็นเส้นใยที่มีเอกลักษณ์โดดเด่น เช่น ความเงางามเบาบาง การระบายอากาศ และความคงทน จัดได้ว่าเป็น

เส้นใยธรรมชาติที่มีคุณค่ามากกว่าเส้นใยชนิดอื่นจนได้ชื่อว่า “ราชินีแห่งเส้นใย” ดังนั้นเส้นไหมจึงมีราคาแพง สิ่งทอที่ทำจากไหมได้รับการยกย่องว่าสวยงามและเป็นที่ต้องการของผู้คน แต่ด้วยข้อจำกัดด้านราคาจึงพบว่า สิ่งทอจากไหมมักจะพบในสังคมคนรวยเป็นส่วนใหญ่ และมักจะสวมใส่ในงานหรือเทศกาลสำคัญ ในทางการค้ามีการนำไหมไปผสมกับวัสดุอื่นเพื่อลดต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตาม การศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มคุณค่าและลักษณะเฉพาะสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับไหมก็ยังปรากฏให้เห็น เช่น การปรับปรุงพื้นผิวผ้าไหม โดยเคลือบเส้นไหมด้วย ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และไทเทเนียมออกไซด์ที่ผสมอนุภาคเงิน (TiO_2@Ag nanoparticles (NPs)) พบว่า ผ้าไหมที่เคลือบด้วย วัสดุทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการป้องกันรังสียูวีดีขึ้นและสามารถป้องกันแบคทีเรีย*Staphylococcus aureus* และ *Pseudomonas* ได้ จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปลอดเชื้อ โรงพยาบาล (hospital sterilization) และการรักษาความสะอาดสิ่งแวดล้อม (environmental clean up) ได้เป็นอย่างดี[29]

เครื่องสำอาง

เซริซินหรือกาวไหม เป็นโปรตีนที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมหลายประการที่สามารถนำไปใช้ในเครื่องสำอาง โดยเฉพาะการเพิ่มความชุ่มชื้น และป้องกันรังสีอุลตราไวโอเลต นอกจากนี้พบว่า เซริซิน เป็นโปรตีนที่สามารถต่อต้านอนุมูลอิสระได้ดี[30] เนื่องจากเซริซินมีสารสำคัญคือ แคโรทีนอยด์และฟลาโวนอยด์ในปริมาณสูง[31] เซริซินสามารถยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ไทโรซิเนส (tyrosinase) ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์สารเมลานิน[32] ดังนั้น จึงนิยมนำเซริซิน มาใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอางสำหรับผิวและเส้นผม[33]เซริซินยังช่วยป้องกันไม่ให้เล็บเปราะ แตกหัก และยังช่วยเพิ่มความเงางามให้กับเล็บอีกด้วย จึงนิยมนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับเล็บ[17] ส่วนไฟโบรอินประกอบด้วยกรดอะมิโนไม่มีขั้วในปริมาณสูงจึงพบว่านิยมผสมไฟโบรอินในเครื่องสำอางที่สามารถป้องกันน้ำได้ เช่น แป้งแต่งหน้าหรือครีมกันแดด

การแพทย์และเภสัชกรรม

เส้นไหมเป็นชีววัสดุที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์และเภสัชกรรมอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฟโบรอิน ทั้งนี้เป็นเพราะไฟโบรอิน คุณสมบัติที่เหมาะสมและยังสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น เจล ผง ฟิล์ม ฟองน้ำ เส้นใยหรือแผ่นเยื่อ[8] ปัจจุบันไหมไฟโบรอินได้ถูกนำไปใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อมากขึ้น และพบว่าไหมไฟโบรอิน ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของเซลล์ไม่ว่าจะเป็นเซลล์กระดูก[34] เซลล์ผิวหนัง[12] หรือเซลล์ประสาท[35] เป็นต้น นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้ไหมไฟโบรอินที่ได้รับความสนใจอย่างมากในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา คือระบบนำส่ง (delivery system) หรือห่อหุ้มยาและสารสำคัญหลากหลายชนิดทั้งที่มีขั้วและไม่มีขั้ว[36-38] เพื่อป้องกันการถูกทำลายโครงสร้างและหน้าที่ และนำส่งถึงอวัยวะเป้าหมายที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ ส่วนเซริซินไม่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์และนำส่งยา ทั้งนี้เป็นเพราะเซริซินสลายตัวง่ายและมีรายงานว่าเซริซินเป็นตัวก่อให้เกิดอาการอักเสบของเซลล์[26]

สารเติมแต่งในอาหารและเครื่องดื่ม

เนื่องจากองค์ประกอบสำคัญของเส้นไหมคือ กรดอะมิโนที่ไม่ก่อให้เกิดพิษต่อร่างกาย ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มหลายชนิดที่มีการเติมโปรตีนไหมร่วมด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเซริซิน ทั้งนี้เป็นเพราะเซริซิน ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่มีขั้วสูงจึงสามารถละลายและผสมเป็นเนื้อเดียวกับอาหารและเครื่องดื่มได้เป็นอย่างดี ส่วนไฟโบรอินไม่นิยมมากนัก ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่เติมโปรตีนไหม ได้แก่ บะหมี่ ก๋วยเตี๋ยว ขนมขบเคี้ยว ลูกอมไอศกรีม เครื่องดื่มดับกระหายหรือเครื่องดื่มชูกำลัง ประเทศที่นิยมใช้ไหมเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เหล่านี้ คือ ญี่ปุ่น ซึ่งถือเป็นประเทศหนึ่งที่มีการประยุกต์ใช้ รวมทั้งการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับไหมมากที่สุด การเติมโปรตีนไหมช่วยเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์ ปริมาณโปรตีนและการส่งเสริมสุขภาพ เช่น สารต้านอนุมูลอิสระและช่วยดูดซึมแร่ธาตุในลำไส้ได้ดีอีกด้วย[39]

จากรายงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมด สรุปได้ว่าไหมเป็นวัสดุชีวภาพที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้เป็นเพราะคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมของเส้นไหมซึ่งสามารถนำมาดัดแปลงและประยุกต์ใช้ให้เหมาะกับงานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ส่วนประกอบของเส้นไหมที่ต่างกันประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ต่างกันจึงเหมาะสำหรับใช้งานที่จำเพาะ โดยเซริซินมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง อาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ ในขณะที่ไฟโบรอินซึ่งเป็นโปรตีนเส้นใยเหมาะที่จะนำไปผลิตเป็นสิ่งทอ อุปกรณ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูง วัสดุทางการแพทย์และเภสัชกรรม ดังที่ปรากฏในบทความนี้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไหมยังมีอย่างต่อเนื่องและมีจำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็น

ว่าไหมเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีคุณค่าและมีความสำคัญต่อวิถีชีวิตของมนุษย์อย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

1. Idris R, Glasse MD, Latham RJ, Linford RG, Schlindwein WS. Polymer electrolytes based on modified natural rubber for use in rechargeable lithium batteries. J Power Source. 2001;94:206-211.
2. Nair LS, Laurencin CT. Biodegradable polymers as biomaterials. Polymer. 2007;32: 762-798.
3. Meinel L, Betz O, Fajardo R, Hofmann S, Nazarian A, Cory E, Hilbe M, McCool J, Langer R, Vunjak-Novakovic G, Merkle HP, Rechenberg B, Kirker-Head, C. Silk based biomaterials to heal critical sized femur defects. Bone. 2006;39:922-931.
4. Koh CJ, Atala A. Tissue engineering, stem cell, and cloning: opportunities for regenerative medicine. J Am Soc Nephrol. 2004;15:1113-1125.
5. Bhardwaj N, Kundu SC. Silk fibroin protein and chitosan polyelectrolyte complex porous scaffolds for tissue engineering applications. Carbohyd Polym. 2011;85:325-333.
6. Cheung, HY, Lau KT, Tao XM, Hui D. A potential material for tissue engineering: Silkworm silk/PLA biocomposite. Composite Part B. 2008;39:1026-1033.
7. Mandal BB, Mann JK, Kundu SC. Silk fibroin/ gelatin multilayered films as a model system for controlled drug release. Eur J Pharm Sci. 2009;37:160-171.
8. Altman GH, Diaz F, Jakuba C, Calabro T, Horan RL, Chen J, Lu HH, Richmond J, Kaplan DL. Silk-based biomaterial. Biomaterials. 2003;24:401-416.
9. Yang Y, Zhao Y, Gu Y, Yan X, Liu J, Ding F, Gu X. Degradation behaviors of nerve guidance conduits made up of silk fibroin in vitro and in vivo. Polym Degrad Stab. 2009;94:2213-2220.
10. Bini E, Knight DP, Kaplan DL. Mapping domain structures in silks from insects and spiders related to protein assembly. J Mol Biol. 2004;335:27-40.
11. Lotz B, Cheng Z. A critical assessment of unbalanced surface stresses as the mechanical origin of twisting and scrolling of polymer crystals. Polymer. 2005;46:577-610.
12. Min BM, Lee G, Kim SH, Nam SY, Lee TS, Park WH. Electrospinning of silk fibroin nanofibers and its effect on the adhesion and spreading of normal human keratinocytes and fibroblasts *in vitro*. Biomaterials. 2004;25:1289-1297.
13. Takasu Y, Yamada H, Tsubouchi K. Isolation of three main sericin components from the cocoon of the silkworm, *Bombyx mori*. Biosci Biotechnol Biochem. 2002;66:2715-2718.
14. Tsukada M, Bertholon G. Preliminary study of the physicochemical characteristics of silk sericin. Bull Sci Inst Text Fr. 1981;10:141-154.
15. Wang YZ, Kim HJ, Vunjak-Novakovic G, Kaplan DL. Stem cell-based tissue engineering with silk biomaterials. Biomaterials. 2006;27:6064-6082.
16. Zhao C, Asakura T. Structure of silk studied with NMR. Prog Nucl Magn Reson Spectros. 2001;39: 301-352
17. Kundu SC, Dash BC, Dash R, Kaplan DL. Natural protective glue protein, sericin bioengineered by silkworms: potential for biomedical and biotechnological applications. Prog Polym Sci. 2008;33:998-1012.
18. Dal Pra I, Freddi G, Minic J, Chiarini A, Armato U. Denovo engineering of reticular connective tissue in vivo by silk fibroin nonwoven materials. Biomaterials. 2005; 26:1987-1999.
19. Haider M, Megeed Z, Ghandehari H. Genetically engineered polymers: status and prospects for controlled release. J Contr Release. 2004;95:1-26.
20. Tao W, Li M, Zhao C. Structure and properties of regenerated *Antheraea pernyi* silk fibroin in aqueous solution. Int J Biol Macromol. 2007;40:472-478.
21. Mahmoodi NM, Arami M, Mazaheri F, Rahimi S. Degradation of sericin (degumming) of Persian silk by ultrasound and enzyme as a cleaner and environmentally friendly process. J Cleaner production. 2010;18:146-151.
22. Kaplan DL, Fossey S, Viney C, Muller W. Self-

organization (assembly) in biosynthesis of silk fibers-a hierarchical problem. In: Aksay IA, Baer E, Sarikaya M, Tirrell DA, editors. Hierarechically structured materials. Materials Res Symp Proc. 1992;255:19-29.

23. Kurioka A, Yamazaki M, Hirano H. Primary structure and possible functions of a trypsin inhibitor of *Bombyx mori*. Eur J BioChem. 1999;259:120-126.
24. Kojthung A, Meesilpa P, Sudatis B, Treeratanapiboon L, Udomsangpetch R, Oonkhanond B. Effects of gamma radiation on biodegradation of *Bombyx mori* silk fibroin. Int Biodeter Biodegr. 2008;62:487-490.
25. Wang SD, Zhang YZ, Yin GB, Wang HW, Dong ZH. Fabrication of composite vascular scaffold using electrospinning technology. Mater Sci Eng. 2010; 30:670-676.
26. Meinel L, Hofmann S, Karageorgiou V, Carl KH, McCool J, Gronowicz L, Langer, R, Gordana VN, Kaplan DL. The inflammatory responses to silk films *in vitro* and *in vivo*. Biomaterials. 2005;26;147-155.
27. Vepari CD, Kaplan DL. Silk as a biomaterials. Prog Polym Sci. 2007;32: 991-1007.
28. He J, Wang Y, Cui S, Gao Y, Wang S. Structure and properties of silk fibroin/carboxymethyl chitosan blend films. Polym Bull. 2010;65:395-409.
29. Li G, Liu H, Zhao H, Gao Y, Wang J, Jiang H, Boughton RI. Chemical assembly of TiO_2 and TiO_2@Ag nanoparticles on silk fiber to produce multifunctional fabrics. Adv Colloid Interface Sci. 2011;38:307-315.
30. Sarovart S, Sudatis B, Meesilpa P, Grady BP, Magaraphan R. The use of sericin as an antioxidant and antimicrobial for polluted air treatment. Rev Adv Mater Sci. 2003; 5:193-198.
31. Prommuak C, De-Eknamkule W, Shotipruk A. Extraction of flavonoids and carotenoids from Thai silk waste and antioxidant activity of extracts. Separ Purif Tech. 2008;62:444-448.
32. Siqin Z, Noriyuki Y, Masahiro S, Hiromitsu W, Norihisa K. Inhibitory effects of silk protein, sericin on UVB-induced acute damage and tumor promotion by reducing oxidative stress in the skin of hairless mouse. J Photochem Photobiol B Biol. 2003;71:11-17.
33. Padamwar MN, Pawar AP. Silk sericin and its application: a review. J Sci Ind Res. 2004; 63:323-329.
34. Kim HJ, Kim UJ, Vunjak-Novakovic G, Min BH, Kaplan DL. Influence of macroporous protein-scaffolds on bone tissue engineering from bone marrow stem cells. Biomaterials. 2005;26:4442-4452.
35. Yang Y, Chen X, Duing F, Zhang P, Liu J, Gu X. Biocompatiblity evaluation of silk fibroin with peripheral nerve tissue and cell *in vitro*. Biomaterials. 2007;28:1643-1652.
36. Fang JY, Chen JP, Leu YL, Wang HY. Characterization and evaluation of silk protein hydrogels for drug delivery. Chem Pharm Bull. 2006;54:156-162.
37. Hanawa T, Watanabe A, Tsuchiya T, Ikoma R, Hidaka M, Sugihara M. New oral dosage form for elderly patients. II. Release behavior of benfotiamine from silk fibroin gel. Chem Pharm Bull . 1995;43:872-876.
38. Yan HB, Zhang YQ, Ma YL, Zhou LX. Biosynthesis of insulin-silk fibroin nanoparticles conjugates and *in vitro* evaluation of a drug delivery system. J Nanopart Res. 2008;11:1973-1946.
39. Sasaki M, Yamada H, Kato N. Consumption of silk protein, sericin elevates intestinal absorption of zine, iron, magnesium and calcium in rate. Nutr Res. 2000;20:1505-1511.