

ข
บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ได้พัฒนา หมอนรองเข่าเสมือนจริงสามมิติ ที่เลียนแบบโครงสร้าง สมบัติเชิงกล และชีวเคมี ของหมอนรองเข่ามนุษย์ โดยใช้เทคนิคการพิมพ์สามมิติแบบหัวพิมพ์คู่ จากพอลิคาโพรแลคโตน (PCL) เสริมแรงด้วยนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HA) ร่วมกับไฮโดรเจล ไฮโดรเจลใช้เป็นหมึกพิมพ์ชีวภาพมีสองชนิด ได้แก่ เจลลาตินเมทาคริเลท (GelMA) สำหรับ บริเวณภายนอกที่เลียนแบบสภาพแวดล้อมที่กระตุ้นการสร้างเซลล์คล้ายไฟโบรบลาสต์ และโพลิไวนิลแอลกอฮอล์กราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลท (PVA-g-GMA) ผสมกับ ไหมไฟโบรอินกราฟต์ด้วยไกลซิديلเมทาคริเลท (SF-g-GMA) สำหรับ บริเวณภายในที่เลียนแบบสภาพแวดล้อมที่กระตุ้นการสร้างเซลล์คล้ายคอนโดโรไซต์ นอกจากนี้ยังมีการใส่เซลล์ไฟโบรบลาสต์ (fibroblasts) ในบริเวณภายนอก และเซลล์ต้นกำเนิดคอนโดเจเนติกมนุษย์ (human chondrogenic progenitor cells, HCPCs) ในบริเวณภายใน หมอนรองเข่าที่พิมพ์สามมิติจาก PCL/HA/ไฮโดรเจลนี้ประสบความสำเร็จในการผลิตโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างทางกายวิภาค สมบัติเชิงกล และทางชีวเคมีของหมอนรองเข่ามนุษย์ หมอนรองเข่าสามมิติจาก PCL/HA และ ไฮโดรเจล แสดง สมบัติเชิงกลที่ดี โดยบริเวณภายนอกมีความทนต่อแรงอัด (compressive strength) ที่ 20.67 MPa และความทนต่อแรงดึง (tensile strength) 7.78 MPa ขณะที่บริเวณภายในมีความทนต่อแรงอัด 21.26 MPa และความทนต่อแรงดึง 8.05 MPa ทั้งสอง บริเวณมีความพรุน (Porosity) 34% และแสดงสมบัติการเปียกต่อพื้นผิวที่ดี โดยมีมุมสัมผัส (contact angle) 82.33° สำหรับบริเวณภายนอกและ 37° สำหรับบริเวณภายใน วัสดุผสมนี้แสดงถึงความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี โดยมีการรอดชีวิตของเซลล์มากกว่า 90% นอกจากนี้ PCL/HA/GelMA แสดงการแสดงออกของคอลลาเจนชนิดที่ 1 (COL1A1) ในระดับสูงที่สุด ในขณะที่ PCL/HA/PVA-g-GMA/SF-g-GMA แสดงการแสดงออกของคอลลาเจนชนิดที่ 2 (COL2A1), อะกรีแคน (ACAN) และโปรตีน SRY-box transcription factor 9 (SOX9) ในระดับสูงที่สุด หลังจากเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 28 วัน ซึ่งบ่งชี้ว่า บริเวณภายนอกมีลักษณะคล้ายกับเซลล์ไฟโบรบลาสต์ และบริเวณภายในมีลักษณะคล้ายกับเซลล์คอนโดโรไซต์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของหมอนรองเข่าในร่างกายมนุษย์ ผลการศึกษาเหล่านี้ยืนยันว่าโครงสร้างที่พิมพ์ขึ้นเลียนแบบลักษณะสำคัญของหมอนรองเข่ามนุษย์ ซึ่งเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการทดแทนหมอนรองเข่าที่ได้รับบาดเจ็บหรือเสื่อมสภาพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

In this study, a 3D-printed artificial meniscus was developed to mimic the structure, mechanical properties, and biochemistry of the human meniscus. A dual-nozzle 3D printing technique was employed to fabricate the meniscus from polycaprolactone/nanohydroxyapatite (PCL/HA) and hydrogels. Two specialized hydrogels were used as bioinks: gelatin methacrylate (GelMA) for the outer zone, mimicking a fibrogenic environment and poly(vinyl alcohol) grafted with glycidyl methacrylate and silk fibroin grafted with glycidyl methacrylate (PVA-g-GMA/SF-g-GMA) for the inner zone, replicating a chondrogenic environment. In addition, the 3D-printed PCL/HA/hydrogel was seeded with fibroblasts in the outer zone and human chondrogenic progenitor cells in the inner zone. This research successfully produced a 3D-printed construct composed of PCL/HA/hydrogel that closely mimics the anatomical structure, mechanical properties, and biochemical organization of the human meniscus. The 3D-printed PCL/HA/hydrogel demonstrated mechanical properties with the outer zone achieving compressive strength of 20.67 MPa and tensile strength of 7.78 MPa, while the inner zone exhibited compressive strength of 21.26 MPa and tensile strength of 8.05 MPa. Both zones maintained a porosity of 34% and exhibited high surface wettability, with contact angles of 82.33° for the outer zone and 37° for the inner zone. The composite materials exhibited excellent biocompatibility, with cell viability exceeding 90%. The PCL/HA/GelMA hydrogel showed the highest level of type I collagen (COL1A1) expression, while the PCL/HA/PVA-g-GMA/SF-g-GMA exhibited the highest levels of type II collagen (COL2A1), aggrecan (ACAN), and SRY-box transcription factor 9 (SOX9) expression after 28 days of cell culture, indicating the presence of a fibroblast-like outer region and a chondrocyte-like inner region in the anatomical meniscus. These results confirm that the construct replicates the essential characteristics of the human meniscus, providing a promising solution for enhanced meniscal replacement.