



JURNAL NURSE

Halaman Jurnal: <https://ejournal.stikeskesosi.ac.id/index.php>
 Halaman Utama Jurnal: <https://ejournal.stikeskesosi.ac.id/index.php/Nurse>



LITERATURE REVIEW: POLIMER DAN KOMPOSIT ALAM SEBAGAI BAHAN PENYEMBUHAN LUKA

Desnita Fitri^a

^a Profesi Ners, Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Kesetiakawanan Sosial Indonesia, DKI
Jakarta, Indonesia

e-mail: desnita.fitri@stikeskesosi.ac.id

No Tlp WA : 085753740095

ABSTRACT

Wound repair is a complex and tightly regulated physiological process, involving the activation of various cell types throughout each subsequent step (homeostasis, inflammation, proliferation, and tissue remodeling). Any impairment within the correct sequence of the healing events could lead to chronic wounds, with potential effects on the patient's quality of life, and consequent fallouts on the wound care management. Nature itself can be of inspiration for the development of fully biodegradable materials, presenting enhanced bioactive potentialities, and sustainability. Naturally-derived biopolymers are nowadays considered smart materials. They provide a versatile and tunable platform to design the appropriate extracellular matrix able to support tissue regeneration, while contrasting the onset of adverse events. In the past decades, fabrication of bioactive materials based on natural polymers, either of protein derivation or polysaccharide-based, has been extensively exploited to tackle wound-healing related problematics. However, in today's World the exclusive use of such materials is becoming an urgent challenge, to meet the demand of environmentally sustainable technologies to support our future needs, including applications in the fields of healthcare and wound management. In the following, we will briefly introduce the main physicochemical and biological properties of some protein-based biopolymers and some naturally-derived polysaccharides. Moreover, we will present some of the recent technological processing and green fabrication approaches of novel composite materials based on these biopolymers, with particular attention on their applications in the skin tissue repair field. Lastly, we will highlight promising future perspectives for the development of a new generation of environmentally-friendly, naturally-derived, smart wound dressings.

Keywords: wound healing, dressings; polymer; composite; nature

ABSTRAK

Perbaikan luka adalah proses fisiologis yang kompleks dan diatur secara ketat, yang melibatkan aktivasi berbagai jenis sel di setiap langkah berikutnya (homeostasis, peradangan, proliferasi, dan model jaringan). Setiap gangguan dalam urutan yang benar dari peristiwa penyembuhan dapat menyebabkan luka kronis, dengan efek potensial pada kualitas hidup kesabaran, dan konsekuensi pada manajemen perawatan luka. Alam itu sendiri dapat menjadi inspirasi untuk pengembangan bahan yang sepenuhnya dapat terurai secara hayati, menghadirkan potensi bioaktif yang ditingkatkan, dan keberlanjutan. Biopolimer yang diturunkan secara alami saat ini dianggap sebagai bahan pintar. Mereka menyediakan platform serbaguna dan merdu untuk merancang matriks ekstraseluler yang sesuai yang mampu mendukung regenerasi jaringan, sambil membedakan timbulnya efek samping. Dalam dekade terakhir, fabrikasi bahan bioaktif berdasarkan polimer alami, baik dari turunan protein atau berbasis polisakarida, telah dieksploitasi secara ekstensif untuk mengatasi masalah terkait penyembuhan luka. Namun, di Dunia saat ini penggunaan eksklusif bahan tersebut menjadi tantangan mendesak, untuk memenuhi permintaan teknologi ramah lingkungan

Received Agustus 30, 2021; Revised September 2, 2021; Accepted September 22, 2021

untuk mendukung kebutuhan masa depan kita, termasuk aplikasi di bidang perawatan kesehatan dan manajemen luka. Berikut ini, kami akan secara singkat memperkenalkan sifat fisika-kimia dan biologis utama dari beberapa biopolimer berbasis protein dan beberapa polisakarida yang diturunkan secara alami. Selain itu, kami akan menyajikan beberapa pemrosesan teknologi terbaru dan pendekatan fabrikasi hijau dari bahan komposit baru berdasarkan biopolimer ini, dengan perhatian khusus pada aplikasinya di bidang perbaikan jaringan kulit. Terakhir, kami akan menyoroti perspektif masa depan yang menjanjikan untuk pengembangan generasi baru pembalut luka cerdas yang ramah lingkungan, diturunkan secara alami.

Kata kunci: penyembuhan luka, dressing; polimer; komposit; alam

1. PENDAHULUAN

Kulit adalah sistem pertahanan eksternal utama kita, yang bertugas melindungi struktur tubuh bagian dalam kita dari serangan mikroorganisme, dan efek buruk dari lingkungan eksternal. Kulit orang dewasa terdiri dari tiga lapisan: epidermis atau stratum korneum, terutama terdiri dari keratinosit; dermis, jaringan ikat yang kaya akan kolagen; dan hipodermis atau lapisan subkutan, terdiri dari jaringan lemak, yang memberikan isolasi termal dan perlindungan mekanis pada tubuh (Gurtner dkk., 2008).

Luka adalah kerusakan atau cacat pada kulit, yang dapat terbentuk karena kerusakan fisikokimia atau termal. Luka akut menentukan jaringan yang terluka yang membutuhkan masa penyembuhan selama 8-12 minggu, (misalnya, luka bakar, cedera kimia, luka). Sebaliknya, luka kronis adalah akibat dari penyakit, seperti insufisiensi pembuluh darah vena atau arteri, nekrosis tekanan, kanker, dan diabetes (Sen dkk., 2009; Moura dkk., 2013). Mereka membutuhkan waktu penyembuhan yang lebih lama (minggu-bulan hingga tahun) dan seringkali gagal mencapai keadaan sehat yang normal, bertahan dalam kondisi patologis peradangan (Guo dan Dipietro, 2010). Oleh karena itu, penyembuhan luka yang tertunda atau terganggu menimbulkan beban sosial ekonomi yang signifikan pada pasien dan sistem perawatan kesehatan di seluruh dunia, dalam hal biaya pengobatan dan produksi limbah (Sen dkk., 2009).

Wawasan tentang peristiwa biokimia rumit yang diaktifkan selama perbaikan kulit sangat penting untuk merancang pembalut luka yang tepat (Weller dan Sussman, 2006; Gurtner dkk., 2008; Pereira dkk., 2013). Proses penyembuhan dapat dibagi menjadi beberapa tahap yang tumpang tindih: homeostasis, peradangan,

proliferasi, dan pembentukan kembali (Martin, 1997; Gurtner dkk., 2008; Bielefeld dkk., 2013; Das dan Baker, 2016).

Mengingat beberapa mekanisme yang terlibat dalam penyembuhan luka kulit dan interaksi beberapa faktor eksternal, pilihan bahan pembalut yang cocok sangat menarik. Khusus untuk bahan alami biodegradable, degradasinya perlu mengikuti dinamika perbaikan luka, menjamin evolusi penyembuhan fisiologis, dan melepaskan prinsip aktif saat dibutuhkan. Akhirnya, pertimbangan yang tepat harus diberikan pada kelestarian lingkungan dari biomaterial ini, dalam hal pendekatan fabrikasi kimia hijau, dan biodegradasi lengkap tanpa produk sampingan yang berbahaya. Sementara banyak ulasan tentang biomaterial pembalut luka tradisional telah dipublikasikan secara luas (Sell dkk., 2010; Mogo, sanu dan Grumezescu, 2014; Norouzi dkk., 2015; Mele, 2016), dalam tinjauan mini ini kami akan memfokuskan perhatian kami pada sistem aktif terbaru yang diturunkan secara alami, mengejar pencarian manajemen luka yang berkelanjutan secara lingkungan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Jenis penelitian

Penelitian ini menggunakan teknik studi literatur dengan tema penyembuhan luka baik yang tradisional maupun modern. Bersifat deskriptif dengan mencari literatur jurnal internasional.

2.2 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan mencari di google scholar, kemudian dibedakan berdasarkan bahan-bahan penyembuh luka yang telah banyak digunakan untuk penyembuhan luka baik yang dioleskan secara topikal maupun oral.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Strategi penyembuhan luka secara alami

Manajemen luka yang sukses bergantung pada pemahaman proses penyembuhan yang dikombinasikan dengan pengetahuan tentang sifat-sifat berbagai bahan pembalut yang tersedia. Tujuan utama dari setiap perawatan luka adalah untuk memaksimalkan efisiensi perawatan (Weller dan Sussman, 2006). Saat

ini, prosedur perawatan standar terdiri dari menyeka infeksi, membersihkan dasar luka dari puing-puing jaringan, dan menerapkan pembalut (Dreifke dkk., 2015). Dalam kasus lesi kulit yang meluas, penggunaan autograft atau allograft kulit split-thickness mungkin diperlukan, membawa masalah keamanan yang berkaitan dengan penularan penyakit dan penolakan kekebalan.

Balutan yang ideal harus menghilangkan eksudat yang berlebihan untuk menghindari maserasi jaringan dan meningkatkan debridemen autolitik, sambil menjaga kelembaban, oksigen yang memadai dan permeabilitas uap air di dalam luka. Itu harus perekat dan fleksibel, untuk mendukung kepatuhan mekanis ke tubuh pasien dan memudahkan aplikasi / pelepasan. Senyawa bioaktif yang dapat dikirim, seperti antibiotik, minyak esensial, dan antioksidan alami, merangsang interaksi pembalut dengan lingkungan mikro luka dan selanjutnya meningkatkan aksi terapeutik melalui aktivitas antimikroba, antijamur, dan antiseptik (Pereira dkk., 2013). Sejumlah teknik fabrikasi, seperti film-casting, electrospinning, self-assembly, freeze-drying, emulsi, microsphere injection, telah digunakan untuk memproduksi pembalut luka, baik berdasarkan makromolekul sintetik atau bahan yang berasal dari alam (Sell dkk. ., 2007, 2010; Wei dan Ma, 2008; Huang dan Fu, 2010; Zhong dkk., 2010; Rieger dkk., 2013; Mogo,sanu dan Grumezescu, 2014; Norouzi dkk., 2015; Liakos dkk. ., 2016; Mele, 2016).

Baru-baru ini, biopolimer alami sebagian besar telah menarik minat komunitas ilmiah. Di atas biokompatibilitas dan biodegradabilitasnya yang terkenal, protein dan polisakarida alami memungkinkan untuk mencapai tingkat biomimikri tertinggi, merekapitulasi fitur biologis dan fisikokimia ECM asli. Kemiripan arsitektur lebih lanjut dapat diperoleh dengan pemrosesan yang sesuai (misalnya, nanofibers, hidrogel seperti spons; Huang dan Fu, 2010; Mogo,sanu dan Grumezescu, 2014; Liakos dkk., 2015; Mele, 2016).

3.2 Biopolimer berbasis protein

3.2.1 Kolagen dan Gelatin

Kolagen adalah protein hewani yang paling melimpah, yang memberikan kekuatan mekanis pada jaringan dan merangsang adhesi dan proliferasi sel (Neel dkk., 2013; An dkk., 2016). Dua puluh sembilan jenis kolagen yang berbeda telah

diidentifikasi, menunjukkan struktur tersier triple-heliks dari sekuens polipeptida (Gambar 2a), tetapi hanya sedikit yang digunakan dalam produksi collagen-based biomaterials. Karena protein yang berasal dari hewan mungkin bertanggung jawab atas reaksi alergi dan transmisi patogen (Koide, 2007), alternatif dibuat dengan kolagen dari ekspresi heterolog pada sel mamalia, serangga dan ragi (Olsen dkk., 2003), atau diproduksi oleh *Escherichia coli* (Pinkas dkk., 2011). Biokompatibilitas dan biodegradabilitas yang tinggi oleh kolagenase endogen membuat kolagen ideal untuk aplikasi biomedis (Parenteau-Bareil dkk., 2010; Chattopadhyay dan Raines, 2014). Selama penyembuhan luka, fibroblas menghasilkan molekul kolagen yang beragregasi membentuk fibril dengan diameter dalam kisaran 10-500 nm. Jaringan fibrosa ini memfasilitasi migrasi sel ke tempat yang terluka, secara aktif mendukung perbaikan jaringan (Baum dan Arpey, 2005).

Sebuah turunan kolagen dengan nilai biomedis yang menjanjikan adalah gelatin. Gelatin diperoleh dengan denaturalisasi kolagen yang tidak lengkap yang diekstraksi dari jaringan ikat, kulit, dan tulang yang mendidih (Jaipan dkk., 2017). Ini telah digunakan untuk membuat membran seperti hidrogel yang kuat (Thanusha dkk., 2018), mikrosfer (Thyagarajan dkk., 2017), spons, dan tikar electrospun (Chen dkk., 2016), untuk aplikasi jaringan dermal dan untuk mengobati luka bakar yang parah. Berbagai kombinasi gelatin dan kitosan yang dimodifikasi telah diusulkan (Han dkk., 2014; Agarwal dkk., 2016), serta campuran dengan poli-vinil alkohol berbasis melalui ikatan silang enzimatis, untuk mendukung kultur dan proliferasi fibroblas (Hago dan Li, 2013). Meskipun penggunaannya agak ekstensif sebagai biomaterial untuk desain perancah, kolagen dan gelatin tetap menjadi bahan berkelanjutan dengan potensi rekayasa tinggi yang belum dijelajahi (Hall Barrientos dkk., 2017; Golser dkk., 2018).

3.2.2 Keratin

Keratin adalah kelompok protein yang tidak larut dan pembentuk filamen yang paling banyak diproduksi di sel epitel mamalia, burung, reptil, dan manusia. Sebagai komponen struktural wol, kuku, tanduk, bulu, dan rambut, mereka memanfaatkan dukungan mekanis dan fungsi pelindung terhadap lingkungan (Reichl, 2009; Wang dkk., 2016). Keratin menghadirkan struktur hierarkis matriks

menengah kompleks (IF)-matriks dan dikategorikan menurut rakitan sekunder rantai polipeptida. -Ker (40–68 kDa) terdiri dari -heliks yang tersusun dalam heterodimer koil melingkar untuk membentuk IF 7-nm, sedangkan -Ker (10–22 kDa) terdiri dari -sheet yang dikemas dalam IF 3-nm. Matriks yang mengandung sulfur tinggi (γ -Ker, di bawah 10 kDa), kaya akan residu sistein, tirosin, glisin, dan fenilalanin, menyajikan bentuk globular.

Namun, berkat sifat biokompatibilitas, biodegradabilitas, dan hemostatiknya, keratin merupakan bahan mentah sekunder hijau yang potensial untuk penyembuhan luka, perbaikan jaringan, penghantaran obat, dan aplikasi kosmetik (Sharma dan Gupta, 2016; Arslan dkk., 2017; Shavandi dkk. al., 2017).

3.3 Senyawa Turunan Polisakarida

3.3.1 Asam Hialuronat

Asam hialuronat (HA) adalah polisakarida non-imunogenik yang terdiri dari asam glukuronat dan unit N-asetil-D-glukosamin (Gambar 2b). Glikosaminoglikan ini merupakan salah satu komponen utama jaringan ikat pada mamalia (Mele, 2016). Karena sifatnya yang higroskopis, HA telah digunakan untuk menyiapkan konstruksi seperti hidrogel, untuk mendukung migrasi keratinosit dan angiogenesis, dan mempromosikan penyembuhan luka tanpa bekas luka (Mogo, sanu dan Grumezescu, 2014; Dreifke dkk., 2015). Berat molekul (MW) memainkan peran kunci dalam proses (Tolg dkk., 2014): produk degradasi MWA rendah ditemukan pro-inflamasi (Campo dkk., 2010; Dreifke dkk., 2015), sementara MWA tinggi tampaknya menghambat pasokan nutrisi. Menariknya, MWA menengah (100-300 kDa) menunjukkan peningkatan kemampuan penutupan luka melalui up-regulasi molekul adhesi (Ghazi dkk., 2012). Selain itu, hidrofilisitas rantai HA memungkinkan pembengkakan jaringan 3D dan pelepasan bertahap senyawa aktif yang dienkapsulasi, menjadikan biomaterial ini cocok sebagai platform pengiriman obat (Maeda dkk., 2014). Serat electrospun berbasis HA, baik murni atau dalam kombinasi dengan biomakromolekul lain (Xu dkk., 2009; Hsu dkk., 2010; Uppal dkk., 2011; Dogan dkk., 2016), telah diusulkan untuk degradasi yang dapat disesuaikan. dan pelepasan berkelanjutan in vitro dan in vivo.

3.3.2 Kitosan

Kitosan (CS), suatu turunan kitin terdeasetilasi yang ditemukan pada eksoskeleton dan cangkang krustasea, merupakan polisakarida linier yang terdiri dari gugus (1-4)-D-glukosamin dan N-asetil-D-glukosamin yang terdistribusi secara acak (Gambar 2b) . Karena sifat intrinsik antijamur, antibakteri, hemostatik, dan muko-perekatnya, kitosan telah banyak dieksploitasi di bidang biomedis untuk perawatan luka dan luka bakar (Dash dkk., 2011; Croisier dan Jérôme, 2013; Norouzi dkk., 2015). ; Zhao dkk., 2015). Beberapa arsitektur dressing telah diusulkan: membran CS-Aloe vera (Wani dkk., 2010), film CS-minyak thyme (Altiok dkk., 2010), spons CS-gelatin (He dkk., 2007), CS- hidrogel sutra (Silva dkk., 2012), film CS-selulosa (Niyas Ahamed dan Sastry, 2011; Romano dkk., 2015a), serat nano minyak kayu manis-CS/polietilen oksida (Rieger dan Schiffman, 2014), dan CS/perancah poli(3-hidroksibutirat-co-3-hidroksivalerat) (Veleirinho dkk., 2012). Selain itu, turunan yang larut dalam air, seperti karboksimetil-CS dan metakrilat glikol CS telah disintesis dan diselidiki untuk aplikasi penyembuhan luka (Romano dkk., 2015b).

3.3.3 Alginat

Alginat (Alg) adalah kopolimer linier asam -D-Mannuronic dan asam -L-Glucuronic (Gambar 2b). Polisakarida ini paling banyak terdapat pada Brown Algae atau diproduksi oleh beberapa bakteri (Khan dan Ahmad, 2013). Ini sangat hidrofilik, biokompatibel, dan mampu menyerap eksudat luka, mempertahankan lingkungan mikro yang lembab (Chiu dkk., 2008). Kombinasi alginat dengan komponen antimikroba dan enzimatik dapat meningkatkan eliminasi jaringan nekrotik dan tubuh mikroba, sedangkan basis polisakarida dapat merangsang proses luka reparatif (Patel dkk., 2007). Pembalut alginat juga berguna sebagai platform pengiriman, untuk memberikan pelepasan zat terapeutik yang terkontrol ke luka yang memancar (misalnya, agen penghilang rasa sakit, antibakteri, dan anti-inflamasi; Maver dkk., 2015; Szekalska dkk., 2016 ; Setti dkk., 2018).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai studi literatur tentang penyembuhan luka tradisional maupun modern diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kelestarian lingkungan saat ini telah menjadi isu penting di depan, dalam upaya untuk menyeimbangkan produktivitas industri dan kemampuan planet untuk menghasilkan sumber daya, dengan netralisasi limbah dan mitigasi proses polusi. Konsumsi material dan energi yang terkait dengan industri perawatan kesehatan, mulai dari proses pembuatan material yang kompleks, hingga pengemasan obat, hingga volume tinggi limbah medis, mungkin sangat berkontribusi untuk meningkatkan polusi secara keseluruhan, dengan dampak negatif yang tidak terduga pada kesehatan manusia
2. Alam sendiri dapat menjadi inspirasi untuk mengembangkan biaya yang kompetitif, konsumsi energi yang rendah dan bahan yang sepenuhnya dapat terurai, menghadirkan kelestarian lingkungan yang lebih besar. Meningkatnya minat komunitas ilmiah dalam penggunaan dressing berbasis protein atau yang diturunkan dari polisakarida sangat mencolok, dan ini mencerminkan perspektif yang berkembang untuk mengembalikan apa yang kita pinjam dari Alam.
3. Biopolimer yang diturunkan secara alami menyediakan platform yang serbaguna, multifungsi, dan dapat disesuaikan untuk merancang lingkungan ekstraseluler yang sesuai, mampu secara aktif membedakan timbulnya infeksi dan peradangan, sambil mempromosikan regenerasi jaringan, dan remodeling bekas luka.

4.2 Saran

Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai data sekunder untuk penelitian selanjutnya untuk menjadi bahan pertimbangan kepada tenaga kesehatan dalam memilih bahan yang digunakan sebagai penyembuh luka baik yang tradisional maupun yang modern

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan Terimakasih disampaikan kepada Yayasan Kesetiakawanan Sosial Indonesia yang telah memberikan dana penelitian sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, T., Narayan, R., Maji, S., Behera, S., Kulanthaivel, S., Maiti, T. K., et al. (2016). Gelatin/Carboxymethyl chitosan based scaffolds for dermal tissue engineering applications. *Int. J. Biol. Macromol.* 93, 1499–1506.
- Albright, V., Xu, M., Palanisamy, A., Cheng, J., Stack, M., Zhang, B., et al. (2018). Micelle-coated, hierarchically structured nanofibers with dual-release capability for accelerated wound healing and infection control. *Adv. Healthc. Mater.*
- Altıok, D., Altıok, E., and Tihminlioglu, F. (2010). Physical, antibacterial and antioxidant properties of chitosan films incorporated with thyme oil for potential wound healing applications. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 21, 2227–2236.
- Aluigi, A., Varesano, A., Montarsolo, A., Vineis, C., Ferrero, F., Mazzuchetti, G., et al. (2007). Electrospinning of keratin/poly(ethylene oxide) blend nanofibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 104, 863–870.
- Aluigi, A., Vineis, C., Varesano, A., Mazzuchetti, G., Ferrero, F., and Tonin, C. (2008). Structure and properties of keratin/PEO blend nanofibres. *Eur. Polym. J.* 44, 2465–2475.
- Bhowmick, S., Thanusha, A. V., Kumar, A., Scharnweber, D., Rother, S., and Koul, V. (2018). Nanofibrous artificial skin substitute composed of mPEG–PCL grafted gelatin/hyaluronan/chondroitin sulfate/sericin for 2nd degree burn care: *in vitro* and *in vivo* study. *RSC Adv.* 8, 16420–16432.
- Bielefeld, K. A., Amini-Nik, S., and Alman, B. A. (2013). Cutaneous wound healing: recruiting developmental pathways for regeneration. *Cell. Mol. Life Sci.* 70, 2059–2081.
- Boakye, M. A. D., Rijal, N. P., Adhikari, U., and Bhattarai, N. (2015). Fabrication and characterization of electrospun PCL-MgO-Keratin-based composite nanofibers for biomedical applications. *Materials* 8, 4080–4095.
- Fabrication of chitosan/silk fibroin composite nanofibers for Wound-dressing applications. *Int. J. Mol. Sci.* 11, 3529–3539.
- Cairney, J. W. (2005). Basidiomycete mycelia in forest soils: dimensions, dynamics

- and roles in nutrient distribution. *Mycol. Res.* 109, 7–20.
- Campo, G. M., Avenoso, A., Campo, S., Ascola, A. D., Nastasi, G., and Calatroni, A. (2010). Biochimie molecular size hyaluronan differently modulates toll-like receptor-4 in LPS-induced inflammation in mouse chondrocytes. *Biochimie* 92, 204–215.
- Chattopadhyay, S., and Raines, R. T. (2014). Collagen-based biomaterials for wound healing. *Biopolymers* 101, 821–833.
- Chen, J., Liu, Z., Chen, M., Zhang, H., and Li, X. (2016). Electrospun gelatin fibers with a multiple release of antibiotics accelerate dermal regeneration in infected deep burns. *Macromol. Biosci.* 16, 1368–1380.
- Han, F., Dong, Y., Su, Z., Yin, R., Song, A., and Li, S. (2014). Preparation, characteristics and assessment of a novel gelatin – chitosan sponge scaffold as skin tissue engineering material. *Int. J. Pharm.* 476, 124–133. doi: 10.1016/j.ijpharm.2014.09.036
- Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., and Athanassiou, A. (2017). Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Sci. Rep.* 7:41292.
- Hang, Y., Zhang, Y., Jin, Y., Shao, H., and Hu, X. (2012). Preparation of regenerated silk fibroin/silk sericin fibers by coaxial electrospinning. *Int. J. Biol. Macromol.* 51, 980– 986.
- He, L. Z., Liu, Y., and Yang, D. (2007). Preparation and performance of chitosan–gelatin sponge-like wound-healing dressing. *J. Clin. Rehabil. Tissue Eng. Res.* 11, 5252–5256.
- Roh, D. H., Kang, S. Y., Kim, J. Y., Kwon, Y. B., Young Kweon, H., Lee, K. G., et al. (2006). Wound healing effect of silk fibroin/alginate-blended sponge in full thickness skin defect of rat. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 17, 547–552
- Romano, I., Ayadi, F., Rizzello, L., Summa, M., Bertorelli, R., Pompa, P. P., et al. (2015a). Controlled antiseptic/eosin release from chitosan-based hydrogel modified fibrous substrates. *Carbohydr. Polym.* 92, 176– 183.
- Romano, I., Mele, E., Heredia-Guerrero, J. A., Ceseracciu, L., Hajiali, H., Goldoni, L., et al. (2015b). Photo-polymerisable electrospun fibres of N-methacrylate glycol chitosan for biomedical applications. *RSC Adv.* 5, 24723–24728.

- Rouse, J. G., and Van Dyke, M. E. (2010). A review of keratin-based biomaterials for biomedical applications. *Materials* 3, 999–1014. Salati, S., Imporzano, G. D., Menin, B., Veronesi, D., Scaglia, B., Abbruscato, P., et al. (2017). Bioresource technology mixotrophic cultivation of chlorella for local protein production using. *Bioresour. Technol.* 230, 82–89.
- Saul, J. M., Ellenburg, M. D., de Guzman, R. C., and Van Dyke M (2011). Keratin hydrogels support the sustained release of bioactive ciprofloxacin. *Biomed Mater Res Part A* 98A, 544–553.