

Sifat Nilai Tambah Membran Selulosa Terjana Semula: Suatu Ulasan (Regenerated Cellulose Membrane and Its Added Value: A Review)

NUR JANNAH MD HASSAN¹, KUSHAIRI MOHD SALLEH^{2,3,*}, SARANI ZAKARIA¹ & NURSYAMIMI AHMAD GHAZALI¹

¹*Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia*

²*Bioresource Technology Division, School of Industrial Technology, Universiti Sains Malaysia, Penang 11800, Malaysia*

³*Renewable Biomass Transformation Cluster, School of Industrial Technology, Universiti Sains Malaysia, Penang 11800, Malaysia*

Diserahkan: 24 Ogos 2021/Diterima: 15 Februari 2022

ABSTRAK

Atas ketersediaan bahan mesra alam yang kian pesat untuk pelbagai institusi ekonomi, kini bahan biopolimer bukanlah alternatif asing bagi menggantikan polimer sintetik. Pengolahan sifat kimia selulosa merupakan salah satu langkah ke arah kemapanan yang dapat memenuhi kehendak pasaran yang dahagakan sumber alam yang lestari. Selulosa terbukti memupuk kos penghasilan yang rendah, tidak toksik, mudah diolah dan kepelbagaian produk yang terjana daripadanya. Antara produknya ialah membran selulosa terjana semula (MSTS), bebenang, hidrogel dan aerogel. Walau bagaimanapun, keterbatasan produk yang dijana semula daripada selulosa terutamanya MSTS memerlukan pengubahsuaian fizikal mahupun kimia, serta bahan tambah yang lain untuk meningkatkan kefungsiannya. Antara bahan tambah MSTS seperti kitosan, nanozarah perak dan grafin oksida memberi sifat yang berbeza mengikut kehendak industri. Oleh itu, fokus utama ulasan kajian ini adalah bagi melihat kebaikan nilai tambah MSTS yang diolah daripada segi sifat fizikal, mekanikal, kimia, antibakteria dan biodegradasinya. Seterusnya, melihat aplikasi MSTS yang telah diubah suai terhadap industri khususnya perubatan, pertanian dan perawatan air.

Kata kunci: Antibakteria; penghasilan; produk berasaskan biosumber; produk hijau

ABSTRACT

Due to the increasing availability of environmentally friendly materials for various economic institutions, now biopolymer materials are not a foreign alternative to replace synthetic polymers. The processing of the chemical properties of cellulose is one of the steps towards sustainability that can meet the needs of a market for sustainable natural resources. Cellulose was proven to cultivate low production costs, non-toxic, easy to process, and a variety of products generated from it. Among its products are regenerated cellulose membranes (RCM), threads, hydrogels, and aerogels. However, the limitations of products regenerated from cellulose especially RCM required physical and chemical modification and other additives to enhance its functionality. Among RCM additives such as chitosan, silver nanoparticles and graphene oxide impart different properties according to industry requirements. Therefore, the main focus of this study was to study the value-added benefits of processed RCM as well as its effectiveness in terms of physical, mechanical, chemical, antibacterial and biodegradable properties. Furthermore, the application of RCM has been modified to industries particularly medicine, agriculture and waste water treatments are further evaluated.

Keywords: Antibacterial; bioresource based products; green products; production

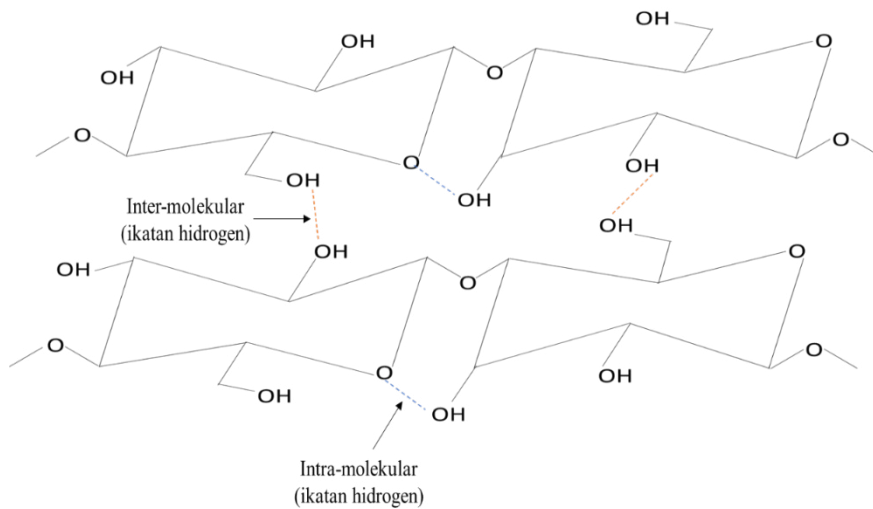
PENGENALAN

Lignoselulosa adalah bahan alternatif yang berpotensi menghasilkan pelbagai produk bagi menggantikan bahan polimer sintetik. Secara umum, biojisim lignoselulosa

merupakan komponen organik yang terdiri daripada tiga komponen utama iaitu selulosa (35-50%), hemiselulosa (20-35%) dan lignin (10-25%) (Cutrim et al. 2019). Ia merupakan sumber alternatif bagi menghasilkan bahan api dan kimia yang boleh diperbaharui (Abdel-Hamid

et al. 2013). Selulosa ($C_6H_{10}O_5$)_n adalah bio-polimer organik dengan unit monomer glukosa yang terikat pada ikatan 1,4-β-D-anhidroglukopiranososa yang sangat kuat bersama dengan hemiselulosa dan lignin yang berfungsi sebagai komponen utama kepada struktur tumbuhan

(Jayasekara & Ratnayake 2019). Selulosa kebiasaannya mempunyai darjah pempolimeran (DP) sekitar 300 hingga 15000, bergantung kepada sumber selulosa itu sendiri (Brigham 2018). Rantaian polimer selulosa terikat secara ikatan hidrogen seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 (Hangasky et al. 2020).



RAJAH 1. Rantaian selulosa yang panjang mengandungi unit-unit glukosa

Selulosa ialah bahan semula jadi yang boleh diekstrak daripada pelbagai sumber yang boleh diperbaharui seperti pokok, spesies akuatik (tunikat) dan alga, kulat, bakteria dan ameba (Kumar et al. 2018). Selulosa juga dikenali sebagai bahan semula jadi yang murah, mempunyai ketumpatan yang rendah, sangat mudah diekstrak berbanding dengan komponen lignoselulosa yang lain, tidak toksik, bioserasi, sifat mekanikal yang baik dan kestabilan kimia yang tinggi yang membolehkan ia sesuai digunakan dalam pelbagai bidang.

Walau bagaimanapun, selulosa masih belum dapat dimanfaatkan dalam pelbagai bidang kerana kesukaran untuk melarutkannya akibat daripada ikatan hidrogen intra- dan intermolekul yang kuat pada struktur kimia selulosa (Bajpai 2016). Namun, proses pelarutan tetap boleh berlaku dengan bantuan pelarut yang cekap yang mampu mengaruhkan ikatan hidrogen selulosa. Selulosa yang terlarut yang dijana semula berpotensi untuk dihasilkan kepada produk yang berkualiti serta mesra alam. Selulosa yang dijana semula mempunyai struktur kekisi yang berbeza dikenali sebagai selulosa II. Dalam penghasilan selulosa terjana semula (selulosa II), selulosa asli (selulosa I) perlu melalui proses pelarutan menggunakan pelarut yang sesuai dan diikuti dengan

penghasilan semula selulosa (selulosa II) melalui proses penggumpalan (Pérez & Samain 2010; Sirviö & Lakovaara 2021). Pelarut selulosa yang sering digunakan ialah pelarut yang beralkali seperti pelarut akueus NaOH/urea (Salleh et al. 2019).

Antara produk yang boleh dihasilkan daripada selulosa terjana semula adalah membran selulosa terjana semula (MSTS) (Kaco et al. 2017; Mazlan 2019), benang selulosa (Zhang et al. 2019), hidrogel dan aerogel (Zainul Armir et al. 2022). Sifat kebolehlenturan selulosa menjadikan ia sebagai salah satu polimer yang mempunyai banyak manfaat dalam menghasilkan kepelbagaian produk untuk pelbagai industri seperti pembungkusan untuk menghasilkan produk kosmetik, farmaseutikal, sungkup pertanian dan perawatan air (Sharif et al. 2020). Antara semua produk selulosa terjana semula, MSTS mempunyai potensi yang baik untuk dikomersialkan. Pada masa kini, penggunaan utama MSTS banyak bertumpu kepada industri perawatan air dan pembungkusan.

Potensi yang ditunjukkan oleh MSTS menyebabkan kajian terhadapnya semakin berkembang dan pelbagai. Kebiasaannya proses penghasilan MSTS adalah melalui kaedah viskosa dan larutan kuprammonia (Azahari et al. 2017). Akan tetapi, proses ini menyebabkan

pencemaran alam yang menghasilkan bahan toksik dan gas daripada sistem kitar semula. Penyelesaian kepada permasalahan ini adalah penggunaan pelarutan organik diaplikasikan seperti pelarut akueus NaOH/Urea (Baharin et al. 2018; Padzil et al. 2015), cecair ionik (ILs) dan N,N-metilmorfolin-N-oksida (Rosenau et al. 2002). Namun begitu, selulosa yang dijana semula kepada MSTs mempunyai sifat kimia, fizikal dan mekanikal yang tidak stabil, bergantung kepada kualiti selulosa itu sendiri, jenis pelarut dan agen penggumpal yang digunakan. Perkara ini boleh diatasi dengan penambahan nilai ke atas MSTs melalui kaedah perawatan, pengubahsuaian kimia dan penggunaan bahan tambah dalam menghasilkan MSTs yang lebih berkualiti. Oleh itu, ulasan ini adalah berfokus kepada beberapa kajian penghasilan MSTs yang memberi nilai tambah terhadap sifat fizikal, kimia, mekanikal, antibakteria dan biodegradasi yang boleh dilakukan ke atas MSTs.

MEMBRAN SELULOSA TERJANA SEMULA (MSTs)

Pada masa kini, peningkatan populasi dunia mendesak saintis untuk menghasilkan produk berasaskan bahan semula jadi yang mapan untuk mengurangkan kebergantungan kepada produk berasaskan petroleum. Pemprosesan untuk menghasilkan MSTs memainkan peranan yang signifikan kerana penghasilan MSTs yang baik dapat diaplikasikan dalam industri yang pelbagai terutamanya teknologi pemisah dan penulenan untuk pemisahan gas dan rawatan kumbahan (Huang et al. 2021; Karimi & Hassanajili 2017; Livazovic et al. 2015), teknologi perubatan untuk penyembuhan luka dan kejuruteraan tisu (Chen et al. 2020; In Kim & Kim 2018).

Proses penjanaan semula selulosa merupakan kaedah tipikal bagi menghasilkan MSTs. Pembuktian utama bagi penjanaan semula selulosa ialah kajian tentang perbandingan struktur selulosa asli (selulosa I) dan selulosa II (Atalla & VanderHart 1984). Dalam penghasilan selulosa terjana semula (selulosa II), selulosa asli perlu melalui proses pelarutan menggunakan pelarut yang sesuai dan diikuti dengan proses penggumpalan sebelum ia dijana semula sepenuhnya kepada MSTs (Pérez & Samain 2010). Pelarut selulosa yang sering digunakan ialah pelarut terbitan dan tak-terbitan. Perbezaan di antara kedua pelarut tersebut, pelarut terbitan secara amnya dikenali sebagai pelarut selulosa secara pengubahsuaian kimia manakala pelarut tak-terbitan tidak melibatkan pengubahsuaian (Sen et al. 2013). Kedua-dua pelarut mengubah suai ikatan hidrogen pada tulang belakang selulosa secara gabungan tindak balas sterik dan mengurangkan kumpulan -OH yang ada

pada selulosa untuk menghalang pembentukan semula ikatan hidrogen di antara makromolekul selulosa (El Seoud & Heinze 2005).

Selulosa yang berjaya dilarutkan kemudiannya menjalani proses penggumpalan selulosa dan ia merupakan kaedah yang terakhir bagi menghasilkan MSTs. Selain daripada proses pelarutan, morfologi MSTs, sifat fizikal dan mekanikal MSTs sangat bergantung kepada kawalan mekanisme penggumpalan. Kebiasannya penggumpal yang sering digunakan adalah air (penggumpal semula jadi) kerana melibatkan kos yang rendah dan selamat. Keberkesanan air sebagai penggumpal juga diolah kepada keadaan yang berbeza merangkumi suhu, pergerakan air serta ketulenan air itu sendiri. Ini dibuktikan oleh kajian Li et al. (2012) yang mengkaji suhu air sebagai pemboleh ubah. Mereka mendapati air sebagai agen penggumpal berpotensi mengeluarkan larutan untuk membentuk selulosa terjana semula dengan baik pada suhu air yang kurang daripada 50 °C. Hakikatnya, selulosa terlarut juga boleh dijana kepada MSTs dengan kaedah penggumpalan menggunakan kelembapan udara persekitaran. Namun kaedah ini mengambil masa yang panjang serta menghasilkan MSTs yang tidak berkualiti. Akibat daripada kekurangan yang ditunjukkan oleh air sebagai agen penggumpal untuk meningkatkan keberkesanan proses penggumpalan, penggunaan agen penggumpal berasid telah dilaporkan. Kajian Azahari et al. (2017) dan Mazlan et al. (2019) menunjukkan bahawa medium berasid (asid sulfurik) sangat cekap sebagai agen penggumpal pada kawalan suhu dan kepekatan asid. Semakin meningkat suhu dan masa agen penggumpal berasid, semakin menurun sifat mekanik MSTs. Ini jelas menunjukkan potensi MSTs boleh dipertingkatkan jika pengolahan teknik yang sejajar dengan kehendak industri dapat dipenuhi tanpa mengganggu sifat fizikal, mekanikal dan kimia yang dikehendaki.

Seperti yang dimaklumkan, sifat fizikal, mekanikal dan kimia MSTs yang berbeza bergantung penuh kepada jenis selulosa, teknik pelarutan dan penggumpalan yang digunakan (Azahari et al. 2017). Meskipun setiap faktor ini dioptimumkan, pengubahsuaian terhadap MSTs masih perlu dilakukan bagi menambah baik sifat MSTs dan seterusnya memenuhi kehendak pasaran semasa. Pengubahsuaian yang dimaksudkan termasuklah penggunaan bahan tambah selepas proses pelarutan, serta perawatan kimia mahupun fizikal terhadap MSTs yang telah dihasilkan. Ini kerana, sifat MSTs akan berubah dengan ketara apabila wujudnya perawatan kimia mahupun fizikal yang dilakukan ke atasnya. Justeru,

pelbagai kajian telah dilakukan dalam proses penjanaaan semula bagi mendapatkan morfologi dan ciri-ciri MSTs dengan sifat nilai tambah yang dikehendaki (Azahari et al. 2017; Padzil et al. 2015; Yan et al. 2021). Oleh itu, seksyen selanjutnya akan memfokuskan kepada potensi nilai tambah yang boleh dilakukan kepada MSTs.

SIFAT NILAI TAMBAH KE ATAS MSTs

Sifat nilai tambah MSTs ke atas sifat fizikal, mekanikal, kimia dan biodegradasi berfokus kepada kesan pelarut yang digunakan, kesan penggumpal (asid), kesan bahan tambah yang dikenakan semasa dan selepas penghasilan MSTs.

SIFAT FIZIKAL

Sifat fizikal merangkumi aspek morfologi (keliangan dan interhubung), kelutsinaran, sensitiviti terdapat kelembapan dan kadar penyerapan air. Setiap daripada sifat fizikal ini dipengaruhi sepenuhnya oleh proses pra-rawatan selulosa, pelarutan, penggumpalan, bahan tambah dan perawatan kimia mahupun fizikal terhadap MSTs. Kajian Gan et al. (2015b) menghasilkan MSTs daripada selulosa kenaf yang terawat secara hidroterma yang memberikan kesan ke atas morfologi dan saiz keliangan MSTs. Keputusan kajian beliau menunjukkan saiz liang setiap sampel MSTs yang secara terawat hidroterma lebih besar daripada MSTs tanpa pra-rawatan. Hal ini diperjelaskan dengan masa tindak balas pra-rawatan hidroterma selulosa yang meningkat dari 30 min hingga 5 jam dengan saiz liang MSTs selulosa membesar berkadar langsung dengan masa pra-rawatan. Fenomena ini disebabkan oleh berat molekul sampel selulosa terawat berkurang berkadar langsung dengan masa pra-rawatan hidroterma yang mengakibatkan rangkaian padatan berkurang apabila selulosa terlarut dijana semula kepada MSTs. Oleh itu, morfologi selulosa membuktikan dengan berat molekul yang lebih rendah menyumbang pada saiz liang MSTs yang lebih besar. Keputusan kajian Gan et al. (2015b) membuktikan pengolahan struktur MSTs boleh dilakukan seawal bahan mentah selulosa itu sendiri. Kawalan kepada struktur keliangan MSTs menambah peluang ia untuk digunakan secara meluas dalam industri penyampaian ubat, media optik, biomembran, pemisahan, rawatan air, penjerapan dan pembungkusan. Apabila perubahan kepada keliangan MSTs berlaku, maka perubahan kepada sifat fizikal juga akan berlaku. Sebagai contoh, apabila keliangan MSTs meningkat, sifat kelutsinarannya akan meningkat, lebih sensitif kepada kelembapan, serta mempunyai

kapasiti penyerapan air yang lebih tinggi.

Mohamed et al. (2015) telah berjaya menghasilkan MSTs yang bersumberkan selulosa daripada surat khabar yang telah dikitar semula. Daripada keputusan pemerhatian imbasan mikroskop elektron (SEM), MSTs yang dihasilkan menunjukkan struktur yang asimetri padat dan homogen yang terdiri dengan ukuran saiz liang bersaiz nano dan peratus keliangan masing-masing 2.48 ± 0.41 nm dan $41.03 \pm 2.37\%$. Oleh itu, MSTs dengan saiz keliangan nano memberi nilai tambah kepada MSTs untuk digunakan sebagai ultrapenurasan (1 nm hingga 0.1 mm). Selain itu, MSTs yang dihasilkan mempunyai sifat hidrofilik yang mempunyai nilai sudut sentuhan pada permukaan MSTs $55.68 \pm 3.83^\circ$. Di samping itu, kajian ini memberikan alternatif untuk kitar semula kertas dan mungkin menangani masalah produk sampingan yang timbul daripada kitar semula kertas. Pengolahan sifat fizikal terutamanya morfologi MSTs memberi ruang dan peluang untuk ia diaplikasikan ke dalam bidang yang lebih kritikal dan berimpak tinggi. Kajian ini memberikan kaedah yang menjanjikan penghasilan MSTs dengan struktur yang padat, simetri dan menerapkan pendekatan fabrikasi hijau.

Bagi kesan penggumpalan, kajian Azahari et al. (2017) mendapati morfologi dan struktur MSTs bergantung kepada keadaan, sifat dan mekanisme penggumpal. Secara konvensional, larutan penggumpal yang biasa digunakan bagi larutan selulosa untuk membentuk selulosa terjana semula adalah cecair bukan pelarut seperti air atau pelbagai jenis alkohol (Biganska & Navard 2009) yang telah dilarutkan dengan air (Fink et al. 2001). Dalam kajian Azahari et al. (2017), terbukti bahawa penggunaan asid sulfurik (H_2SO_4) sebagai medium penggumpal bagi menggantikan cecair bukan pelarut merupakan medium yang sangat cekap dalam pemprosesan MSTs berdasarkan kawalan penentuan kepekatan H_2SO_4 . Ini dibuktikan pada keputusan morfologi, MSTs yang digumpal H_2SO_4 mempamerkan struktur keliangan yang sekata dan nilai peratus ketelusan cahaya yang paling tinggi. Jadual 1 menunjukkan keputusan pencirian ketelusan cahaya MSTs yang digumpal menggunakan H_2SO_4 pada kepekatan 5, 7, 10 dan 12 (bt.%) pada suhu $24^\circ C$ selama 1 min. Penggumpal dengan kepekatan yang lebih tinggi (12 bt.%) menunjukkan struktur membran yang lebih padat dan ketelusan cahaya yang tinggi. Sama seperti kajian Mazlan et al. (2019) yang membandingkan jenis penggumpal berasaskan sulfat untuk melihat kesannya terhadap sifat fizik MSTs. Berdasarkan difraktogram pembelauan sinar-X (XRD), nilai penghabluran MSTs yang dihasilkan semula dalam air suling adalah 45.4%

sementara H_2SO_4 dan $(NH_4)_2SO_4$ masing-masing adalah 43.7 dan 42.5%. Berdasarkan kajian ini juga, air mempunyai kesan indeks penghabluran yang lebih tinggi pada penyusunan semula selulosa semasa proses penggumpalan berbanding dengan MSTs- H_2SO_4 dan MSTs- $(NH_4)_2SO_4$ walaupun peratus berat bahan kimia yang serupa digunakan semasa penyediaan penggumpalan. Ini disebabkan semasa proses penjanaaan semula dalam

air suling, larutan selulosa menggumpal dengan perlahan dan homogen kerana perbezaan kepekatan penggumpal yang lebih rendah yang menyumbang kepada pemisahan fasa (Li et al. 2012). Selain itu, kepekatan dan suhu penggumpal juga mempengaruhi pembentukan pori membran, membawa kepada pelbagai saiz liang dan kebolehtelapan air (Fu et al. 2014). Oleh itu, larutan penggumpal terbukti memainkan peranan yang sangat

penting dalam penghasilan MSTs (Azahari et al. 2017).

JADUAL 1. Ketelusan cahaya MSTs yang digumpal asid sulfurik pada kepekatan berbeza

Kepekatan asid sulfurik (%)	Ketelusan cahaya (%)
5	23.1
7	36.2
10	41.1
12	37.2

Sumber: Azahari et al. (2017)

MSTs menunjukkan keserasian yang baik dengan pelbagai bahan polimer dan bukan polimer. Kajian Xiong et al. (2010), telah berjaya menghasilkan hibrid MSTs/kitosan. Pengubahsuaian kepada sifat fizikal dapat diperhatikan apabila MSTs yang terhibrid dengan kitosan menunjukkan struktur berliang yang lebih homogen. Ini kerana, pemadatan molekul kitosan pada permukaan dan keratan rentas MSTs lebih ketara berbanding MSTs tanpa kitosan. Molekul kitosan didapati menembusi ke dalam MSTs dan mengikat dengan molekul selulosa kerana tindak balas yang kuat antara dua jenis polimer yang hampir sama sifat molekulnya. Disebabkan struktur fizikalnya yang lebih padat, kekuatan ketegangan MSTs hibrid meningkat dengan ketara. Kajian yang sama yang dilaporkan oleh Cazón et al. (2020) apabila filem selulosa terjana semula (FSTS) yang ditambah dengan kitosan dan alkohol polivinil menunjukkan sifat keterlapan dan ketelusan cahaya yang optimum dan baik. Didapati juga keterlapan dan ketelusan cahaya FSTS tersebut dipengaruhi oleh kandungan kelembapan. Ini disebabkan oleh sifat hidrofilik semula jadi komponen campuran yang digunakan, apabila kelembapan keseimbangan meningkat, kandungan kelembapan FSTS juga meningkat. Sebagai tambahan, keterlapan wap air meningkat dengan kandungan kelembapan meningkat, namun ketelusan cahaya

menunjukkan sifat yang sebaliknya. Memandangkan sifat FSTS yang dinilai merupakan bahan selulosa, ia mempunyai potensi diaplikasi dalam industri makanan. Kajian ini juga membantu untuk menentukan aplikasi yang paling sesuai bagi bahan komposit mengikut keperluan dan keadaan persekitaran.

Secara umumnya, MSTs dikelaskan sebagai membran yang super-hidrofilik. Bergantung kepada penggunaan akhir, jika sifat penyerapan air diperlukan namun pengekalannya kepada kekuatan mekanikal perlu diutamakan, maka nilai tambah MSTs bergantung penuh kepada jangkaan prestasi yang dikehendaki. Apabila MSTs bersentuhan dengan air, ia akan membentuk ikatan hidrogen yang menyebabkan berlakunya kesan pembengkakan MSTs. Maka, jenis penggumpal dan penambahan bahan penambah ke dalam MSTs merupakan faktor yang memainkan peranan penting. Didapati, kepekatan, suhu dan masa pemrosesan, menggunakan jenis pelarut, penggumpal dan aditif yang berbeza perlu dititikberatkan kerana ia juga memberi kesan perubahan sifat fizikal seperti saiz keliangan, ketelusan cahaya dan kehabluran penyerapan air. Contohnya, kajian Zhang et al. (2019) berpendapat ciri utama yang perlu dititikberatkan dalam menghasilkan MSTs sebagai bahan pembungkusan, bio-terkonsumsikan dan penulenan air adalah ciri ketelusan yang tinggi dan kemampuan pemisahan yang

tinggi, proses penyediaannya yang mudah dan mesra alam. Keberhasilan kajian lepas yang memfokuskan sifat fizikal MSTs berkemungkinan dapat diaplikasikan dalam pelbagai industri terutamanya industri penjerapan dan pemisahan.

SIFAT MEKANIKAL

Sifat mekanikal MSTs yang selalu dicirikan dalam kajian lepas termasuklah kekuatan tegangan, modulus Young dan pemanjangan waktu rehat. Nilai tambah kepada sifat mekanikal juga sangat berkait rapat dengan pelbagai faktor antaranya kesan pelarut yang digunakan, agen penggumpalan serta bahan tambah yang dihibridkan dengan struktur matriks selulosa. Apabila setiap faktor ini dioptimumkan, maka nilai tambah kepada sifat mekanikal MSTs akan terserlah. Uji kaji Chen et al. (2012) menggunakan pelarut berion iaitu 1-butyl-3-methylimidazolium klorida sebagai pelarut selulosa. Keputusan kekuatan tegangan bagi MSTs tersebut menunjukkan nilai purata ketegangan dan pemanjangan waktu rehat MSTs masing-masing ialah 170 MPa dan 6.4%. Ini lebih baik daripada MSTs yang dihasilkan dalam larutan NaOH dan larutan NMMO, masing-masing adalah 88.7 dan 133.0 MPa (kekuatan tegangan). MSTs yang dihasilkan dalam kajian ini mempunyai prestasi mekanikal yang baik dan berpotensi untuk digunakan sebagai agen pemisah (Chen et al. 2012). Dalam kajian Zhang et al. (2019), selulosa karbamat (CC) disintesis daripada pulpa selulosa, urea dan pelarutan DMAc digunakan sebagai medium penghasilan MSTs. Jika dibandingkan dengan sorotan kajian sebelum ini, selulosa yang dilarutkan dalam DMAc, proses pelarutannya sederhana, kos yang rendah dan produk sampingan yang dihasilkan sepanjang uji kaji dapat diulang dan digunakan, mencapai perlindungan lingkungan hijau. MSTs yang dihasilkan oleh Zhang et al. (2019) mempunyai kekuatan tegangan 11 MPa pada keadaan kering dan dalam keadaan basah pada kekuatan tegangan 48.5 MPa dan menunjukkan kelutsinaran MSTs yang baik pada keadaan yang kering (Chen et al. 2012). Seperti yang diketahui, MSTs bersifat hidrofilik yang mana sifat ini akan mempengaruhi kekuatan fizikal secara tidak langsung. Meskipun kekuatan tegangan pada keadaan basah dilaporkan lebih tinggi, namun, penyerapan air yang tak terkawal juga boleh menjadi punca utama kepada kemerosotan kekuatan basah MSTs. Pembengkakan yang disebabkan oleh penyerapan air adalah punca utama kepada kemerosotan kekuatan basah.

Faktor proses penggumpalan antara yang memberi kesan terhadap sifat mekanikal MSTs. Sebagai

contoh, kepekatan dan masa proses penggumpalan menyumbang kepada sifat mekanikal MSTs. Ini juga telah dibuktikan oleh kajian Azahari et al. (2017) dengan keputusan nilai tegangan MSTs-H₂SO₄ yang paling rendah (5 bt%) adalah sebanyak 41.86 MPa dan kepekatan yang paling tinggi (12 bt%) adalah 18.1 MPa. Pada kepekatan H₂SO₄ yang tinggi, proses penggumpalan berlaku dengan pantas menyebabkan interaksi fizikal antara makromolekul selulosa terlarut gagal membentuk struktur yang matriks yang baik seterusnya mengganggu kekuatan tegangan MSTs. Selain itu, kekuatan tegangan juga bergantung kepada jenis asid yang digunakan. Uji kaji Mazlan et al. (2019) menunjukkan keputusan kekuatan tegangan MSTs yang digumpal dalam air suling adalah yang tertinggi (34.23 MPa) berbanding MSTs yang digumpal larutan 5 bt% H₂SO₄ (27.24 MPa) dan 5 bt% (NH₄)₂SO₄ (24.15 MPa). Nilai tegangan yang lebih tinggi menunjukkan bahawa MSTs memiliki struktur morfologi yang homogen dan nilai kehabluran yang tinggi. Proses penggumpalan menggunakan air menunjukkan hasil kekuatan tegangan yang terbaik kerana penggumpalan selulosa yang berlaku secara perlahan membentuk struktur yang lebih homogen. Akan tetapi, perbezaan ketara bagi kajian Azahari et al. (2017) yang menyatakan penggunaan 5 bt% H₂SO₄ merupakan medium penggumpal yang optimum untuk dijadikan agen penggumpal manakala Mazlan et al. (2019) membuktikan proses penggumpalan menggunakan air suling menghasilkan MSTs yang paling tinggi nilai tegangannya. Secara kesimpulannya, jenis penggunaan penggumpalan adalah faktor pendorong untuk pembentukan MSTs yang baik sifat fizikalnya.

Li et al. (2019) telah melakukan pengubahsuaian permukaan pengaminan ke atas MSTs dan kekuatan tegangan berjaya ditingkatkan, MSTs yang diubah suai menunjukkan sifat mekanik yang lebih tinggi dengan kekuatan tegangan 65.2 hingga 93.5 MPa, nilai modulus 2004 hingga 3647 MPa dan pemanjangan pada tahap rehat 2.9 hingga 15.0% berbanding dengan membran selulosa bakteria lain yang dilaporkan dalam penerbitan sebelumnya (Fernandes et al. 2013). Sifat mekanikal MSTs yang diubah suai dapat memastikan jangka hayat yang panjang dan prestasi yang baik secara berterusan. Tambahan pula, ketebalan membran meningkat selepas pengubahsuaian dengan agen gandingan aminosilana yang berkemungkinan besar disebabkan oleh pembentukan struktur rangkaian silan 3D di permukaan gentian. Nilai tambah ini memungkinkan MSTs untuk digunakan dalam industri pembungkusan aktif.

MSTs juga boleh diubah suai sifat mekanikalnya

menggunakan radiasi gelombang mikro dan ditambah nilainya dengan grafin oksida (GO) menggunakan kaedah campuran-cecair (Gan et al. 2015a). Apabila peningkatan tambahan aditif GO ke dalam MSTS, peningkatan kekuatan tegangan meningkat daripada 40.8 ke 50.9 MPa berlaku bersamaan dengan 1.5 hingga 2.0 kali ganda daripada MSTS tanpa pengubahsuaian manakala nilai modulus meningkat daripada 275 kepada 525%. Ini menunjukkan penambahbaikan sifat mekanikal MSTS berlaku setelah penambahan aditif GO. Secara amnya, meskipun penambahan GO ke dalam MSTS meningkatkan modulus dan kekuatan tegangan tetapi secara beransur-ansur ia juga melemahkan pemanjangan semasa rehat. Maka, keterbatasan penggunaan bahan tambah perlu dinilai agar sifat mekanikal yang dikehendaki dapat diperoleh. Kekuatan tegangan yang ditunjukkan oleh MSTS dengan menggunakan bahan tambah dapat menyaingi kekuatan tegangan yang ditawarkan oleh membran berasaskan bahan minyak fosil.

Seterusnya keberhasilan uji kaji Cazón et al. (2020) dalam menghasilkan FSTS yang ditambah kitosan dan alkohol polivinil terbukti dapat memberi sifat

mekanikal yang baik untuk diaplikasikan dalam pelbagai industri. Pembuktian telah ditunjukkan melalui analisis tegangan dan tusukan dalam pelbagai persekitaran kelembapan relatif (RHeq). Kekuatan tegangan dalam uji kaji bergantung kepada kandungan kelembapan atau aktiviti air apabila nilai tegangan FSTS meningkat daripada 8.63 hingga 72.77 MPa dengan peningkatan penambahan kitosan dan alkohol polivinil. Didapati juga kandungan kelembapan FSTS yang tinggi meningkatkan kerintangan sifat daya paksinya. Selain itu, kesan pemplastik FSTS meningkatkan mobiliti rantaian polimer yang memudahkan penyusunan semula rantaian polimer semasa perubahan bentuk paksi, mengurangkan kerapuhan dan meningkatkan nilai kekuatan letusan.

Secara kesimpulannya, kekuatan mekanikal bagi MSTS bergantung penuh kepada jenis pelarutan, penggumpalan dan penambahan aditif seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2. Walau bagaimanapun, faktor cara penyediaan juga penting bagi memastikan penghasilan MSTS yang baik seperti kepekatan, suhu dan masa proses, penggumpal dan agen nilai tambah. Sifat mekanikal MSTS amat penting untuk menentukan potensi MSTS dalam pelbagai kegunaan bahan dan menjanjikan penggantian membran yang dihasilkan daripada polimer

sintetik.

JADUAL 2. Pengubahsuaian ke atas MSTS yang memberi perubahan kepada nilai tegangan

Sumber Selulosa	Pelarut	Penggumpal	Aditif	Perawatan	Nilai ketegangan (MPa)	Rujukan
Jerami gandum	1-butyl-3-metilmidazolium klorida	Air	-	-	133	Chen et al. (2012)
Kenaf	NaOH/urea	5-12 bt.% H ₂ SO ₄	-	-	41.86-18.10	Azahari et al. (2017)
Linter kapas	NaOH/urea	Air suling, 5 bt.% H ₂ SO ₄ , (NH ₄) ₂ SO ₄	-	-	34.23, 27.24, 24.15	Mazlan et. al (2019)
Linter kapas	AmimCl	Air	-	Permukaan pengaminan	93.5	Li et al. (2019)
Kenaf	NaOH/urea	Air	GO	Gelombang mikro	50.9	Gan et al. (2015)

SIFAT KIMIA

Nilai tambah yang boleh dilakukan terhadap MSTS melalui sisi sifat kimia ialah fotomangkin dan biomimik (sensitif dan responsif terhadap pH). MSTS

tanpa bahan aditif tidak mempunyai sifat fotomangkin namun struktur fizikalnya yang berliang membolehkan ia menjadi perumah kepada bahan fotomangkin seperti titanium dioksida (TiO₂) (Yan et al. 2017). Penumpuan kajian vis-fotomangkin TiO₂ yang didorong oleh cahaya

sederhana semakin mendapat perhatian. Namun, TiO_2 memerlukan medium perantara (perumah) yang serasi tanpa mengganggu potensi fotomangkin yang disasarkan. Medium perantaraan atau perumah kepada proses ini mestilah tidak mengganggu tindak balas namun bertindak sebagai penstabil kepada tindak balas. Ciri ini dipenuhi oleh MSTs kerana kehadiran kumpulan berfungsi hidroksil selulosa yang mudah diolah sebagai templat tindak balas serta mewujudkan interaksi fizikal dengan bahan tambah. Objektif utama makalah Mohamed et al. (2016) adalah ingin menjadikan MSTs sebagai bio-templat untuk pertumbuhan *in-situ* dengan sinar cahaya diubah suai titania mesoliasing bagi menggalakkan pertumbuhan struktur nano TiO_2 . Pencirian FTIR dijalankan bagi mengkaji permukaan kimia MSTs yang terdop-C TiO_2 mesoliasing yang diperolehi daripada pertumbuhan *in-situ* sol-gel di dalam MSTs. Jalur penyerapan pada 891 cm^{-1} dapat diperhatikan pada MSTs yang merujuk kepada regangan C-O-C pada glukosa daripada selulosa. Namun begitu, jalur 891 cm^{-1} mula menyusut apabila nanorod TiO_2 terhasil pada struktur molekul MSTs kerana kehadiran kepekatan HNO_3 yang tinggi dalam sistem tindak balas tersebut. Dapat disimpulkan bahawa MSTs memainkan peranan penting dalam pembentukan nanorod TiO_2 mesoliasing di bawah persekitaran berasid dan seterusnya sesuai digunakan sebagai perumah kepada bahan fotomangkin. Sama seperti kajian Yan et al. (2017), mereka telah berjaya menghasilkan MSTs yang ditambah dengan TiO_2 bagi menghasilkan dwifungsi MSTs iaitu penyerapan dan penguraian fotomangkin. Ini dibuktikan apabila pengekal struktur nano-penghabluran TiO_2 semasa struktur penghabluran selulosa selulosa I menjadi selulosa II. Seterusnya, keupayaan MSTs mengambil alih fotomangkin secara beransur dalam jangka masa melebihi 20 jam. Ini disebabkan oleh radikal yang terbentuk oleh pengujaan di bawah pencahayaan UV akan mengoksidakan molekul metilena biru (MB) terdekat yang telah diserap sepenuhnya ke dalam MSTs.

Membran penjerapan telah berjaya diaplikasikan dalam teknologi pemisah dan ia mempunyai kumpulan berfungsi pada permukaan MSTs tersebut. Ini memberikan kebaikan kepada industri bioperubatan, biokimia dan sains sekitar. Oleh itu, kajian Xiong et al. (2010) telah berjaya menghasilkan hibrid MSTs/kitosan yang dijana semula daripada larutan selulosa alkali daripada kitosan yang berasid. Keberhasilan MSTs/kitosan hibrid ini dibuktikan apabila ia menolak ion Cu^{2+} pada $\text{pH} = 5$ melalui kaedah pengukuran sifat pemisah. Penyelidikan terperinci menunjukkan

bahawa mekanisme penolakan MSTs ini boleh menjadi gabungan nano-penurasan dan ion Cu^{2+} kompleks dengan kumpulan amino. Kumpulan amino daripada molekul kitosan yang diresapi boleh bertindak balas proton ke darjah yang berbeza, menjadikan hibrid MSTs/kitosan sensitif terhadap pH. Ini membuktikan, MSTs dapat dijana dalam keadaan berasid dan MSTs/kitosan hibrid boleh diaplikasikan dalam bidang teknologi pemisahan. Seterusnya, kajian Yang et al. (2019) juga telah berjaya menghasilkan filem selulosa yang ditambah nilai kitosan (FSTS/kitosan) yang responsif terhadap pH. Dalam kajian tersebut dinyatakan bahawa FSTS/kitosan adalah tidak toksik, bioserasi, biodegradasi dan bahan alternatif bagi proses lepas perlahan kitosan. Ini dibuktikan dalam ujian pembengkakan FSTS/kitosan pada pH 3 dan 5 adalah tinggi kerana kesan osmotik berbeza yang bergerak antara fasa gel dan larutan yang telah dijelaskan dalam teori Gibbs Donnan. Tambahan pula, pH responsif untuk FSTS/kitosan menunjukkan mikrostruktur yang lebih baik kerana dikaitkan dengan interaksi hidrofobik dalam FSTS/kitosan. Namun begitu, ujian FESEM mengesahkan bahawa penambahan kitosan mengganggu struktur halus lamela selari, melemahkan prestasi mekanikal FSTS/kitosan. Maka dengan itu, kajian bagi FSTS/kitosan masih perlu diteruskan lagi sehingga boleh diaplikasikan dalam bidang perubatan khususnya bagi produk pembalut luka.

Kekotoran pada membran merupakan salah satu permasalahan bagi aplikasi membran itu sendiri. Justeru, kajian Huang et al. (2021) berjaya menghasilkan MSTs hibrid separa organik apabila penghasilannya ditambah nilai zirkonium dioksida (ZrO_2) yang bersifat hidrofilik bagi langkah mengurangkan permasalahan kekotoran MSTs tersebut. Ini dapat dibuktikan apabila analisis kerintangan MSTs terhadap asid dan alkali meningkat selepas direndam selama lima hari dalam larutan pH 10, fluks MSTs dan MSTs/ ZrO_2 mencapai 447.13 dan 412.7 $\text{L/m}^2\text{h}$ dengan penambahan ZrO_2 . Secara terperinci, MSTs/ ZrO_2 mempunyai prospek aplikasi yang lebih luas dalam bidang rawatan air. Membran yang disediakan dalam kajian ini boleh menambah baik penggunaan bahan membran yang boleh terurai dalam proses pemisahan membran yang hijau dan bersih dan menggalakkan pembangunan yang mampan.

Secara kesimpulannya, MSTs yang telah diubah suai menunjukkan perubahan yang baik terhadap sifat kimianya sebagai fotomangkin dan medium yang sensitif serta responsif terhadap pH. Ini dapat menyumbang kepada industri sistem perawatan air dan sektor

perubahan.

SIFAT ANTIBAKTERIA

Sifat antibakteria bahan telah banyak dipraktikkan sebagai nilai tambah kepada sesuatu produk. MSTs juga tidak terkecuali dalam kancah teknologi termaju ini. MSTs tanpa bahan tambah tidak dapat memberikan sifat antibakteria malahan ia boleh menjadi perumah kepada bakteria kerana kewujudan monomer selulosa iaitu glukosa. Akan tetapi, sifat ini boleh diubah dengan bahan tambah yang bersesuaian yang dibantu oleh keserasian MSTs dengan bahan yang lain. Keberhasilan Chook et al. (2014) dalam menghasilkan MSTs yang ditambah nanozarah perak (AgNP) dan AgNP-grafin oksida (AgGO) memberikan sifat antibakteria kepada MSTs. Melalui ujian antibakteria yang dijalankan terhadap MSTs, dengan kepekatan AgGO yang lebih rendah, MSTs/AgGO terbukti berjaya menghalang pertumbuhan kedua-dua *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli* dengan lebih cekap berbanding MSTs/AgNP, MSTs yang ditumbuhkan kembali dengan AgGO mempunyai banyak potensi dalam pelbagai aplikasi seperti pembalut luka dan rawatan air. Kajian Benavente et al. (2017) mendapati penambahan AgNP terhadap MSTs menjadikan MSTs sebagai medium yang mapan bagi menyingkirkan bakteria dalam sistem penulenan air. Ini disebabkan keperluan air minuman yang semakin meningkat dan pencemaran alam semula jadi yang mendorong pengembangan sistem penulenan baru untuk rawatan air dalam kejuruteraan membran. Kajian Benavente et al. (2017) dan Chook et al. (2014) mempunyai persamaan kerana penambahan aditif AgNP memberikan sifat antibakteria sebagai nilai tambah kepada MSTs. Meskipun begitu, uji kaji Chook et al. (2014) lebih berpotensi dalam membasmi bakteria kerana dengan penambahan GO, ia mampu menghindarkan berlakunya pengagregatan dan menambah baik kestabilan koloid AgNP.

Penambahan bahan biopolimer seperti kitosan dalam sistem matriks MSTs juga telah dilaporkan. Uji kaji Weng et al. (2017) mendapati bahawa dengan penambahan kitosan ke dalam MSTs, nano-penurasan yang dihasilkan daripada MSTs bukan sahaja memberikan kesan terhadap sifat fizikal, mekanikal dan kimia malah dapat memberikan nilai tambah antibakteria. Ini dapat dibuktikan berdasarkan ujian zon perencatan dilakukan bagi menilai keupayaan antibakteria membran dengan mengukur ukuran zon halo. Hasil ujian tersebut, MSTs yang ditambah kitosan menunjukkan kehadiran zon perencatan walhal MSTs yang tidak dicampurkan kitosan tidak menunjukkan sebarang perubahan berlaku.

Ini menunjukkan sifat antibakteria berjaya dilakukan ke atas MSTs/kitosan. Mekanisme aktiviti antibakteria melibatkan interaksi molekul kitosan bercas positif dengan membran sel bakteria bercas negatif, yang menyebabkan kehilangan kebolehtelapan membran dan kebocoran komponen intrasel dan kemudian pembasmian *E. coli* berlaku. Keserasian bahan di antara MSTs dengan kitosan memberikan penunjuk kepada sifat kebolehlenturan MSTs dengan bahan polimer yang lain. Selain daripada kitosan, bahan aditif lain juga didapati mampu memberikan sifat antibakteria kepada MSTs. Zhang et al. (2020) menghasilkan MSTs yang ditambah dengan poli-iodida (MSTs/PEI) dan direndam di dalam larutan akueus *Lugol* (I₂-KI) bagi memberikan sifat antibakteria kepada (MSTs/PEI/I). Ujian mikrobiologi menunjukkan bahawa MSTs/PEI/I mempunyai aktiviti antibakteria yang sangat baik terhadap *E. coli* dan *S. aureus*, yang sepenuhnya dapat membasmi kedua-dua bakteria dalam masa 0.5 min meskipun selepas penyimpanan selama 30 hari. MSTs/PEI/I yang dihasilkan menunjukkan kestabilan dan kebolehgunaan semula yang baik untuk pelbagai aplikasi perubatan. Selain penggunaan bahan aditif, pengubahsuaian permukaan pengamiran juga memberikan sifat antibakteria kepada MSTs yang dibuktikan melalui tiga pencirian antibakteria iaitu kaedah kiraan koloni, ujian resapan cakera dan ujian zon perencatan. Nisbah pembasmian bakteria oleh MSTs terhadap bakteria Gram-positif (*S. aureus* dan *B. subtilis*) mencapai hampir 100% (Li et al. 2019). Khususnya, MSTs yang direndam dalam larutan N-[3-(trimethoxysilyl)propyl] etilenadiamina yang mempunyai tiga kumpulan metoksi, jumlah kumpulan amino tertinggi dan rantai aminoalkil terpanjang adalah yang paling berkesan terhadap bakteria Gram-positif. MSTs ini menunjukkan potensi dalam menghasilkan bahan pembungkusan aktif untuk aplikasi komersial.

Makalah Saedi et al. (2021) mendapati penyediaan FSTS dengan penambahan nanozarah zink oksida (ZnOP) memberikan sifat anti-bakteria. FSTS/ZnOP nanokomposit menunjukkan aktiviti perencatan terhadap kedua-dua strain Gram-positif dan Gram-negatif. Aktiviti perencatan yang berkesan terhadap bakteria Gram-positif dengan patogen dan Gram-negatif boleh dicapai dengan menambahkan sekurang-kurangnya 3 bt% ZnOP. Ini menunjukkan bahawa, pengubahsuaian FSTS dengan penambahan minimal 3 bt% ZnOP mampu meningkatkan jangka hayat penggunaan FSTS kerana dengan sifat antibakteria yang optimum berpotensi untuk diaplikasikan dalam industri pembungkusan makanan khususnya dalam

pembungkusan aktif.

Sifat antibakteria ke atas MSTs adalah salah satu sifat yang diperlukan untuk aplikasi pembalut luka, kerana pertumbuhan mikroorganisma dapat direncanakan dengan adanya agen antibakteria yang ditambah ke dalam MSTs. Namun, pertambahan agen antibakteria boleh mempengaruhi struktur morfologi MSTs kerana gangguan boleh berlaku sewaktu proses penggumpalan. Sebagai contoh, AgNP tidak memberikan interaksi kimia mahupun fizikal dengan MSTs kerana tiada kumpulan berfungsi untuk proses tindak balas. Malahan, AgNP boleh mengganggu interaksi fizikal makromolekul selulosa sewaktu penggumpalan. Gangguan ini mempengaruhi sifat fizikal MSTs dan seterusnya menggugat prestasi mekanikalnya. Oleh itu, pertambahan aditif ke dalam MSTs perlulah dioptimumkan pada kadar tertentu tanpa mengganggu sifat yang lain agar nilai komersial dipertingkatkan kepada tahap yang lebih meyakinkan.

SIFAT TERBIODEGRADASI

Penggunaan bahan pembungkusan plastik berlebihan yang sukar untuk dilupuskan telah menimbulkan kebimbangan masyarakat kerana kesan buruk terhadap persekitaran dan ekosistem. Bahan pembungkusan yang sering digunakan ialah filem polietilena (PE) yang tidak sesuai untuk penggunaan jangka panjang kerana sifat terbiodegradasi yang rendah. Oleh itu, kajian mengenai sifat terbiodegradasi MSTs untuk menggantikan bahan pembungkusan sedia ada yang lebih tertumpu dalam bentuk filem. Terminologi MSTs yang telah dikeringkan sering dirujuk sebagai filem selulosa terjana semula (FSTS). Kajian seperti yang telah dijalankan oleh Ichwan dan Son (2012) menghasilkan MSTs untuk aplikasi tertentu contohnya pembungkusan dan agrikultur. Meskipun bahan berasaskan selulosa boleh terdegradasi dengan sendirinya, namun kawalan kepada proses degradasi untuk tempoh masa tertentu memberikan nilai tambah kepada produk terjana semulanya. Hal ini boleh dicapai dengan penambahan sifat antibakteria seperti yang dibincangkan pada subtopik sebelum ini. Selain itu, selulosa yang bersumberkan daripada tumbuhan yang berbeza juga memberikan perbezaan kualiti yang ketara kepada sifat terbiodegradasi MSTs. Oleh itu, kajian keterhadapan oleh Zhao et al. (2019) telah menjalankan ujian biodegradasi ke atas filem daripada sumber selulosa yang berbeza iaitu kulit durian dan selulosa komersial. Keputusan ujian tersebut mendapati kehilangan berat filem daripada kulit durian adalah sebanyak 82% berbanding selulosa komersial sebanyak

61%. Namun begitu, selepas 4 minggu, kedua-dua filem tersebut terbiodegradasi sepenuhnya. Secara ringkasnya, filem selulosa yang dihasilkan daripada kulit durian dianggap sebagai medium pembungkusan yang baik kerana sifat terbiodegradasinya yang tinggi serta bersifat mapan.

Bagi tujuan pertanian, penggunaan sungkup filem yang kuat serta bersifat legap merupakan ciri-ciri utama yang perlu diolah kepada MSTs. Kajian Ning et al. (2021) telah menghasilkan sangkup filem biodegradasi berwarna hitam yang dijana menggunakan selulosa dan humik asid. Berdasarkan keputusan analisis degradasi, selepas 80 hari, filem ditanam di dalam tanah dan berat filem berkurang sebanyak 78.21%. Hal ini membuktikan, MSTs yang diolah untuk mendapatkan nilai tambah yang lain masih boleh didegradasikan pada jangka masa yang singkat. Pembuktian juga telah dilakukan bahawa prestasi degradasi filem yang dihasilkan daripada pelarutan selulosa dan humik asid adalah lebih baik berbanding yang terhasil daripada PE.

Selain itu, kajian Qi et al. (2009) telah berjaya menghasilkan filem yang mampu terbiodegradasi dengan pantas yang bersifat lutsinar dan kefotopendarcahayaan. Sifat terbiodegradasi pantas ini dibuktikan melalui keputusan SEM menunjukkan struktur berliang pada permukaan filem diletakkan bersama kulat miselium telah mereput. Ini menunjukkan bahawa biodegradasi berlaku terhadap filem disebabkan oleh mikroorganisma dan proses ini terjadi secara bertahap. Selepas sembilan hari ditanam, didapati hanya pereputan filem yang berlaku. Setelah satu bulan, tidak ada serpihan filem yang dijumpai di dalam tanah. Hasilnya menunjukkan bahawa mikroorganisma di dalam tanah secara langsung memetabolismakan filem selulosa dan filem tersebut dapat dibiodegradasikan sepenuhnya. Filem yang dihasilkan mampu menunjukkan sifat terbiodegradasi yang lebih pantas berbanding filem yang dihasilkan oleh kajian Zhao et al. (2019) dan Ning et al. (2021).

Maka dengan itu, jenis selulosa, bahan tambah serta perawatan kimia memainkan peranan yang penting dalam menentukan prestasi sifat terbiodegradasi MSTs. Dengan pencemaran alam yang semakin meruncing, dilimpahi pula dengan lambakan produk plastik yang tidak terbiodegradasi serta pengurusan sumber alam yang tidak sistematik, kajian terhadap penggunaan produk terjana semula selulosa terutamanya MSTs dilihat sebagai alternatif yang praktikal dan berdaya saing. Pengkomersialan secara meluas dalam bidang pembungkusan aktif mampu menyelamatkan alam sekitar dan penjanaan ekonomi yang mapan.

APLIKASI BERPOTENSI KE ATAS SIFAT NILAI TAMBAH MSTS

Kepelbagaian proses yang boleh dilakukan terhadap MSTS terbukti memberikan nilai tambah yang baik untuk aplikasi yang berbeza. Antara yang sering mendapat perhatian penyelidik ialah proses perawatan air, pembungkusan dan perubatan termaju. Perlakuan MSTS yang boleh diolah membolehkan sifatnya berubah secara total tanpa mengganggu gugat kualiti akhir produk yang diinginkan. Kelebihan ini menjadikan MSTS berpotensi tinggi sebagai bahan yang lestari dan mapan bagi mengurangkan kebergantungan kepada produk berasaskan minyak galian.

Aplikasi proses rawatan air memerlukan bahan yang mempunyai ketelapan yang tinggi kerana ia mampu mempercepatkan proses pembuangan pepejal terampai yang disebut kumbahan untuk dikembalikan ke persekitaran semula. Dengan pemasukan bahan tambah nanozarah perak (AgNP) ke dalam MSTS, ia memberi manfaat dalam perawatan dan penulenan air seperti yang dibuktikan dalam uji kaji Benavente et al. (2017) dengan penambahan AgNP terhadap MSTS dapat menjadi alternatif yang menarik bagi peranti lain untuk membasmi bakteria dalam sistem pembersihan dan penulenan air (Huang et al. 2014; Jhaveri & Murthy 2016). Keperluan air minuman yang semakin meningkat dan pengurangan rizab semula jadi yang semakin tercemar mendorong saintis untuk mencipta sistem penulenan air baharu untuk rawatan air yang tercemar (r). Tambahan pula, penambahan GO terhadap MSTS (Chook et al. 2014) memberikan alternatif terhadap perawatan penulenan air kumbahan.

Seterusnya, aplikasi MSTS dalam industri pembungkusan juga diberi perhatian oleh para saintis. Maka pengubahsuaian permukaan pengamiran ke atas MSTS menyumbang kepada industri pembungkusan aktif (Li et al. 2019; Saedi et al. 2021). Pembungkusan aktif adalah sistem pembungkusan yang diselaraskan untuk mengekalkan dan meningkatkan sifat kesihatan, sifat organoleptik serta kualiti produk makanan yang dibungkus, sehingga dapat memanjangkan jangka hayatnya. MSTS yang dihasilkan dalam bentuk filem merupakan produk yang diberi perhatian dalam industri pembungkusan kerana ia lebih murah, mudah didapati, bioserasi, terbiodegradasi dan mesra alam. Ini dibuktikan dalam kajian Zhao et al. (2019) dan Huang dan Wang (2022) yang menghasilkan filem yang mempunyai sifat biodegradasi yang baik khususnya untuk penggunaan

aplikasi industri pembungkusan aktif.

Tidak disangkalkan lagi penggunaan MSTS juga penting dalam bidang perubatan termaju terutama dalam produk penyampaian ubat dan pembalut luka. Bagi sistem penyampaian ubat, matlamat utama untuk menjadikan ia ideal adalah ubat disalurkan ke bahagian, masa dan corak pelepasan tertentu. Ini disebabkan perubatan konvensional (tablet dan penyelesaian suntikan) selalunya melebihi dos yang diperlukan (Stamatialis et al. 2008). Maka, aditif AgNP yang ditambah ke dalam MSTS bukan sahaja dapat memberi aplikasi dalam industri perawatan air malahan dapat menyumbang dalam industri perubatan dan berfungsi sebagai medium yang cekap dalam penyampaian ubat. Bagi bidang perubatan, penambahan AgNP ke dalam MSTS memberikan sifat antibakteria dan bioserasi yang baik (Chook et al. 2017). Seterusnya, kejayaan penghasilan MSTS/PEI/I pada kajian Zhang et al. (2020) dikhususkan untuk dijadikan sebagai pembalut luka untuk kerosakan kulit yang disebabkan oleh bisul, kencing manis, luka akibat kebakaran dan luka pembedahan. Kebelakangan ini, banyak kajian menumpukan penambahan kitosan sebagai medium anti-bakteria ke atas MSTS sebagai medium perubatan seperti menghasilkan membran nano-penurasan yang mesra alam (Cheng et al. 2019; Xiong et al. 2010). Maka dapat disimpulkan, MSTS yang telah diubah suai dapat diaplikasikan secara meluas dalam industri perawatan air, pembungkusan dan perubatan. Namun begitu, kajian terhadap pengubahsuaian MSTS masih perlu diteruskan lagi sehingga ia mampu dikomersialkan dan diterima oleh pelbagai sektor industri kerana melihat dari segi sifatnya yang boleh diperbaharui, kestabilan terma yang baik, tidak toksik dan mesra alam.

KESIMPULAN

Kesimpulannya, sifat nilai tambah ke atas MSTS adalah bergantung kepada faktor jenis pelarutan, penggumpalan, tambahan aditif dan perawatan secara kimia ataupun fizikal. Faktor tersebut amat dititikberatkan bagi menghasilkan MSTS yang lebih baik daripada yang dihasilkan sebelum ini. Oleh itu, kajian lepas telah menunjukkan kerberhasilan MSTS setelah diubah suai sebagai medium yang mapan diaplikasikan kerana sumber bahan mentah dan proses pengeluaran yang murah, terbiodegrasi dan mesra alam yang tidak mencemarkan alam. Sifat MSTS yang dihasilkan adalah bergantung kepada kehendak industri terutamanya industri perubatan, perawatan air kumbahan dan pembungkusan.

PENGHARGAAN

Sekalung penghargaan diberikan kepada Kementerian Pengajian Tinggi (KPT) atas sokongan melalui projek Geran Penyelidikan LRGS/1/2019/UKM-UKM/5/1.

RUJUKAN

- Abdel-Hamid, A.M., Solbiati, J.O. & Cann, I.K.O. 2013. Insights into lignin degradation and its potential industrial applications. Dlm. *Advances in Applied Microbiology-Edisi ke-1*. Cambridge: Academic Press Inc. jil. 82. hlm. 1-28.
- Arya, M., Lee, N. & Pellegrino, S. 2017. Crease-free biaxial packaging of thick membranes with slipping folds. *International Journal of Solids and Structures* 108: 24-39.
- Atalla, R.H. & VanderHart, D.L. 1984. Native cellulose: A composite of two distinct crystalline forms. *Science* 223(4633): 283-285.
- Azahari, N.A., Zakaria, S., Kaco, H., Yee, G.S., Chia, C.H., Jaafar, S.N.S. & Sajab, M.S. 2017. Membran selulosa kenaf terjana semula daripada larutan akues NaOH/Urea yang digumpal menggunakan asid sulfurik. *Sains Malaysiana* 46(5): 795-801.
- Baharin, K.W., Zakaria, S., Ellis, A.V., Talip, N., Kaco, H., Gan, S., Zailan, F.D. & Ain Syed Hashim, S.N. 2018. Factors affecting cellulose dissolution of oil palm empty fruit bunch and kenaf pulp in NaOH/urea solvent. *Sains Malaysiana* 47(2): 377-386.
- Bajpai, P. 2016. Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production. Dlm. *Green Chemistry for Sustainability-Edisi ke-1*, disunting oleh Sharma, S.K. Jaipur, India: Springer Nature. hlm. 93.
- Benavente, J., García, M.E., Urbano, N., Moscoso, A. & Hierrezuelo, J. 2017. Inclusion of silver nanoparticles for improving regenerated cellulose membrane performance and reduction of biofouling. *International Journal of Biological Macromolecules* 103: 758-763.
- Biganska, O. & Navard, P. 2009. Morphology of cellulose objects regenerated from cellulose-N-methylmorpholine N-oxide-water solutions. *Cellulose* 16(2): 179-188.
- Brigham, C. Biopolymers: biodegradable alternatives to traditional plastics. 2018. Dlm. *Green Chemistry: An Inclusive Approach*, disunting oleh Török, B. & Dransfield, T. Cambridge: Elsevier Inc. hlm. 753-770.
- Cazón, P., Vázquez, M. & Velázquez, G. 2020. Regenerated cellulose films with chitosan and polyvinyl alcohol: Effect of the moisture content on the barrier, mechanical and optical properties. *Carbohydrate Polymers* 236: 116031.
- Chen, H.Z., Wang, N. & Liu, L.Y. 2012. Regenerated cellulose membrane prepared with ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium chloride as solvent using wheat straw. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 87(12): 1634-1640.
- Chen, J., Zhang, T., Hua, W., Li, P. & Wang, X. 2020. 3D Porous poly(lactic acid)/regenerated cellulose composite scaffolds based on electrospun nanofibers for biomineralization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 585: 124048.
- Cheng, F., Wu, Y., Li, H., Yan, T., Wei, X., Wu, G., He, J. & Huang, Y. 2019. Biodegradable N, O-carboxymethyl chitosan/oxidized regenerated cellulose composite gauze as a barrier for preventing postoperative adhesion. *Carbohydrate Polymers* 207: 180-190.
- Chook, S.W., Chia, C.H., Zakaria, S., Ayob, M.K., Huang, N.M., Neoh, H.M., He, M., Zhang, L. & Jamal, R. 2014. A graphene oxide facilitated a highly porous and effective antibacterial regenerated cellulose membrane containing stabilized silver nanoparticles. *Cellulose* 21(6): 4261-4270.
- Cutrim, F.M., Ramos, E.C.S.S., Abreu, M.C.C., Godinho, A.S., Maciel, A.P., Mendonça, C.J.S. & Cavalcante, K.S.B. 2019. A study of chemical composition and enzymatic hydrolysis of solid organic waste from agrosilvopastoral systems. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 30(9): 1955-1963.
- Fernandes, S.C.M., Sadocco, P., Alonso-Varona, A., Palomares, T., Eceiza, A., Silvestre, A.J.D., Mondragon, I. & Freire, C.S.R. 2013. Bioinspired antimicrobial and biocompatible bacterial cellulose membranes obtained by surface functionalization with aminoalkyl groups. *ACS Applied Materials and Interfaces* 5(8): 3290-3297.
- Fink, H., Weigel, P., Purz, H.J. & Ganster, J. 2001. Structure formation of regenerated cellulose materials from NMMO-solutions. *Progress in Polymer Science* 26(9): 1473-1524. 26(9): 1473-1524.
- Fu, F., Guo, Y., Wang, Y. & Tan, Q. 2014. Structure and properties of the regenerated cellulose membranes prepared from cellulose carbamate in NaOH / ZnO aqueous solution. *Cellulose* 21: 2819-2830.
- Gan, S., Zakaria, S., Chia, C.H., Chen, R.S. & Jeyalaldeen, N. 2015a. Physico-mechanical properties of a microwave-irradiated kenaf carbamate/graphene oxide membrane. *Cellulose* 22(6): 3851-3863.
- Gan, S., Zakaria, S., Chia, C.H., Padzil, F.N.M. & Ng, P. 2015b. Effect of hydrothermal pretreatment on solubility and formation of kenaf cellulose membrane and hydrogel. *Carbohydrate Polymers* 115: 62-68.
- Hangasky, J.A., Detomasi, T.C., Lemon, C.M. & Marletta, M.A. 2020. Glycosidic bond oxidation: structure, function, and mechanism of polysaccharide monooxygenases. Dlm. *Comprehensive Natural Products III: Chemistry and Biology Volume 1*, disunting oleh Liu, H.W. & Begley, T.P. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Ltd. hlm. 298-331.
- Huang, K. & Wang, Y. 2022. Recent applications of regenerated cellulose films and hydrogels in food packaging. *Current Opinion in Food Science* 43: 7-17.
- Huang, X., Tian, F., Chen, G., Wang, F., Weng, R. & Xi, B. 2021. Preparation and characterization of regenerated cellulose membrane blended with ZrO₂ nanoparticles. *Membranes* 12(1): 42.

- Huang, J., Wang, H. & Zhang, K. 2014. Modification of PES membrane with Ag-SiO₂: reduction of biofouling and improvement of filtration performance. *Desalination* 336(1): 8-17.
- Ichwan, M. & Son, T.W. 2012. Preparation and characterization of dense cellulose film for membrane application. *Journal of Applied Polymer Science* 124(2): 1409-1418.
- In Kim, J. & Kim, C.S. 2018. Harnessing nanotopography of PCL/collagen nanocomposite membrane and changes in cell morphology coordinated with wound healing activity. *Materials Science and Engineering C* 91(2017): 824-837.
- Jayasekara, S. & Ratnayake, R. 2019. Microbial cellulases: An overview and applications. Dlm. *Cellulose*, disunting oleh Pascual, A.R. & Martin, M.E.E. IntechOpen. hlm. 1-21.
- Jhaveri, J.H. & Murthy, Z.V.P. 2016. A comprehensive review on anti-fouling nanocomposite membranes for pressure driven membrane separation processes. *Desalination* 379: 137-154.
- Kaco, H., Baharin, K.W., Zakaria, S., Chia, C.H., Jaafar, S.N.S., Gan, S.Y. & Sajab, M.S. 2017. Preparation and characterization of Fe₃O₄/regenerated cellulose membrane. *Sains Malaysiana* 46(4): 623-628.
- Karimi, M.B. & Hassanajili, S. 2017. Short fiber/polyurethane composite membrane for gas separation. *Journal of Membrane Science* 543: 40-48.
- Kumar, R., Sharma, R.K. & Singh, A.P. 2018. Grafted cellulose: A bio-based polymer for durable applications. *Polymer Bulletin* 75(5): 2213-2242.
- Li, R., Zhang, L. & Xu, M. 2012. Novel regenerated cellulose films prepared by coagulating with water: Structure and properties. *Carbohydrate Polymers* 87(1): 95-100.
- Li, X., Li, H.C., You, T.T., Wu, Y.Y., Ramaswamy, S. & Xu, F. 2019. Fabrication of regenerated cellulose membranes with high tensile strength and antibacterial property via surface amination. *Industrial Crops and Products* 140: 111603.
- Livazovic, S., Li, Z., Behzad, A.R., Peinemann, K.V. & Nunes, S.P. 2015. Cellulose multilayer membranes manufacture with ionic liquid. *Journal of Membrane Science* 490: 282-293.
- Mazlan, N.S.N., Zakaria, S., Gan, S., Hua, C.C. & Baharin, K.W. 2019. Comparison of regenerated cellulose membrane coagulated in sulphate based coagulant. *Cerne* 25(1): 18-24.
- Mohamed, M.A., Salleh, W.N.W., Jaafar, J., Ismail, A.F., Mutalib, M.A. & Jamil, S.M. 2015. Feasibility of recycled newspaper as cellulose source for regenerated cellulose membrane fabrication. *Journal of Applied Polymer Science* 132(43): 42684.
- Mohamed, M.A., Salleh, W.N.W., Jaafar, J., Mohd Hir, Z.A., Rosmi, M.S., Abd. Mutalib, M., Ismail, A.F. & Tanemura, M. 2016. Regenerated cellulose membrane as bio-template for *in-situ* growth of visible-light driven C-modified mesoporous titania. *Carbohydrate Polymers* 146: 166-173.
- Moradian, M., Islam, M.S. & Van De Ven, T.G.M. 2021. Insoluble regenerated cellulose films made from mildly carboxylated dissolving and kraft pulps. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 60(15): 5385-5393.
- Ning, R., Liang, J., Sun, Z., Liu, X. & Sun, W. 2021. Preparation and characterization of black biodegradable mulch films from multiple biomass materials. *Polymer Degradation and Stability* 183: 109411.
- Padzil, F.N.M., Zakaria, S., Chia, C.H., Jaafar, S.N.S., Kaco, H., Gan, S. & Ng, P. 2015. Effect of acid hydrolysis on regenerated kenaf core membrane produced using aqueous alkaline-urea systems. *Carbohydrate Polymers* 124: 164-171.
- Pangon, A., Saesoo, S., Saengkrit, N., Ruktanonchai, U. & Intasanta, V. 2016. Hydroxyapatite-hybridized chitosan/chitin whisker bionanocomposite fibers for bone tissue engineering applications. *Carbohydrate Polymers* 144: 419-427.
- Pérez, S. & Samain, D. 2010. Structure and engineering of celluloses. Dlm. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, disunting oleh Horton, D. Elsevier Inc. hlm. 25-116.
- Qi, H., Chang, C. & Zhang, L. 2009. Properties and applications of biodegradable transparent and photoluminescent cellulose films prepared via a green process. *Green Chemistry* 11(2): 177-184.
- Saedi, S., Shokri, M., Kim, J.T. & Shin, G.H. 2021. Semi-transparent regenerated cellulose/ZnONP nanocomposite film as a potential antimicrobial food packaging material. *Journal of Food Engineering* 307: 110665.
- Salleh, K.M., Zakaria, S., Sajab, M.S., Gan, S. & Kaco, H. 2019. Superabsorbent hydrogel from oil palm empty fruit bunch cellulose and sodium carboxymethylcellulose. *International Journal of Biological Macromolecules* 131: 50-59.
- Sen, S., Martin, J.D. & Argyropoulos, D.S. 2013. Review of cellulose non-derivatizing solvent interactions with emphasis on activity in inorganic molten salt hydrates. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* 1(8): 858-870.
- El Seoud, O.A. & Heinze, T. 2005. Organic esters of cellulose: New perspectives for old polymers. *Advances in Polymer Science* 186: 103-149.
- Sharif, F., Muhammad, N. & Zafar, T. 2020. Cellulose based biomaterials: Benefits and challenges. Dlm. *Biofibers and Biopolymers for Biocomposites: Synthesis, Characterization and Properties*. Springer, Cham. hlm. 229-246.
- Sirviö, J.A. & Lakovaara, M. 2021. A fast dissolution pretreatment to produce strong regenerated cellulose nanofibers via mechanical disintegration. *Biomacromolecules* 22(8): 3366-3376.
- Stamatialis, D.F., Papenburg, B.J., Gironés, M., Saiful, S., Bettahalli, S.N.M., Schmitmeier, S. & Wessling, M. 2008. Medical applications of membranes: Drug delivery, artificial organs and tissue engineering. *Journal of Membrane Science* 308(1-2): 1-34.
- Weng, R., Chen, L., Lin, S., Zhang, H., Wu, H., Liu, K., Cao, S. & Huang, L. 2017. Preparation and characterization of antibacterial cellulose/chitosan nanofiltration membranes. *Polymers* 9(4): 116.

- Xiong, X., Duan, J., Zou, W., He, X. & Zheng, W. 2010. A pH-sensitive regenerated cellulose membrane. *Journal of Membrane Science* 363(1-2): 96-102.
- Yan, E.Y.C., Zakaria, S., Chia, C.H. & Boku, T.R. 2017. Bifunctional regenerated cellulose membrane containing TiO₂ nanoparticles for absorption and photocatalytic decomposition. *Sains Malaysiana* 46(4): 637-644.
- Yan, M., Wu, Y., Lin, R., Ma, F. & Jiang, Z. 2021. Multilevel/hierarchical nanocomposite-imprinted regenerated cellulose membranes for high-efficiency separation: A selective recognition method with Au/PDA-loaded surface. *Environmental Science: Nano* 8(7): 1978-1991.
- Yang, J., Dahlström, C., Edlund, H., Lindman, B. & Norgren, M. 2019. pH-responsive cellulose-chitosan nanocomposite films with slow release of chitosan. *Cellulose* 26(6): 3763-3776.
- Zainul Armir, N.A., Mohd Salleh, K., Zulkifli, A. & Zakaria, S. 2022. pH-responsive ampholytic regenerated cellulose hydrogel integrated with carrageenan and chitosan. *Industrial Crops and Products* 178: 114588.
- Zhang, S., Kai, C., Liu, B., Zhang, S., Wei, W., Xu, X. & Zhou, Z. 2020. Facile fabrication of cellulose membrane containing polyiodides and its antibacterial properties. *Applied Surface Science* 500: 144046.
- Zhang, S., Yu, C., Liu, N., Teng, Y. & Yin, C. 2019. Preparation of transparent anti-pollution cellulose carbamate regenerated cellulose membrane with high separation ability. *International Journal of Biological Macromolecules* 139: 332-341.
- Zhao, G., Lyu, X., Lee, J., Cui, X. & Chen, W.N. 2019. Biodegradable and transparent cellulose film prepared eco-friendly from durian rind for packaging application. *Food Packaging and Shelf Life* 21: 100345.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: kmsalleh@usm.my