

TINJAUAN POTENSI PEREKAT PATI SORGUM DAN KITOSAN DALAM PRODUKSI PAPAN PARTIKEL RAMAH LINGKUNGAN

Rosalia Sira Sarungallo^{1*}, Muh. Wihardi Tjaronge¹, Ahyar Ahmad² dan Muralia Hustim³

^{1*}Program Studi Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino Km. 6, Gowa
e-mail: rsarungallo@yahoo.com

¹Program Studi Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino Km. 6, Gowa
e-mail: tjaronge@yahoo.co.jp

²Departemen Kimia FMIPA, Universitas Hasanuddin, Jl. Perintis Kemerdekaan Km. 10, Makassar
e-mail: ahyarahmad@gmail.com

³Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino Km. 6, Gowa
e-mail: muraliahustim@ft.unhas.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kesadaran lingkungan dan kebutuhan industri terhadap produk ramah lingkungan telah meningkatkan perhatian mengembangkan alternatif perekat alami yang dapat menggantikan perekat sintesis berbasis formaldehida. Produk kayu rekayasa banyak digunakan dalam industri konstruksi, umumnya diproduksi menggunakan perekat berbasis formaldehida yang memiliki dampak merugikan terhadap lingkungan. Artikel ini bertujuan untuk meninjau potensi penggunaan pati sorgum yang dimodifikasi dengan kitosan sebagai perekat ramah lingkungan dalam produksi papan partikel. Kelemahan utama pati sorgum, yaitu sifat hidrofiliknya yang tinggi dan kekuatan mekanik yang rendah, dapat diatasi melalui berbagai metode modifikasi kimia, seperti oksidasi, esterifikasi, eterifikasi, dan penggunaan *cross-linking*. Modifikasi kimia tersebut bertujuan untuk meningkatkan hidrofobisitas, kekuatan mekanik, serta ketahanan perekat terhadap kelembapan. Pati sorgum yang dikombinasikan dengan kitosan, yang memiliki sifat antimikroba dan kemampuan membentuk ikatan hidrogen dengan substrat kayu, dapat meningkatkan sifat adhesi perekat, ketahanan termal, dan stabilitas dalam kondisi lingkungan yang basah. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan yang telah dimodifikasi memenuhi standar kekuatan mekanik yang dibutuhkan dalam produksi papan partikel, biodegradabilitas dan sifat non-toksik, sehingga lebih aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Dengan demikian, kombinasi pati sorgum dan kitosan yang dimodifikasi memiliki potensi besar untuk menggantikan perekat sintesis dalam industri kayu, serta berkontribusi pada pengurangan emisi bahan kimia berbahaya dan limbah industri yang sulit terurai.

Kata kunci: Pati sorgum, kitosan, perekat alami

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan industri terhadap perekat sintesis berbasis formaldehida telah menimbulkan kekhawatiran akan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Emisi *Volatile Organic Compounds* (VOCs) yang berbahaya, resistensi terhadap proses biodegradasi, dan kesulitan dalam daur ulang merupakan beberapa masalah utama yang terkait dengan perekat jenis ini. VOCs, atau senyawa organik volatil, adalah zat kimia yang mudah menguap dan dapat mencemari udara serta berkontribusi pada pembentukan ozon troposfer dan berkontribusi pada pemanasan global (Kristak et al., 2023; Vineeth and Gadhve, 2020). Dalam industri konstruksi, papan partikel merupakan salah satu produk kayu rekayasa yang paling banyak digunakan karena sifatnya yang kuat, ringan, dan mudah dibentuk (Poletto et al., 2020; Uemura Silva et al., 2021). Perekat yang digunakan dalam pembuatan papan partikel berperan dalam menentukan kualitas dan daya tahan produk akhir. Saat ini penggunaan perekat sintesis berbasis formaldehida telah menjadi sorotan karena dampak negatifnya terhadap lingkungan. Untuk mengatasi isu-isu tersebut, industri perekat terus mengembangkan perekat alternatif yang lebih ramah lingkungan. Perekat berbasis biopolymer berpotensi untuk menggantikan perekat sintesis dalam industri konstruksi. Dengan sifatnya yang dapat diperbarui dan mudah terurai, perekat biopolimer tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga membuka peluang untuk menghasilkan produk konstruksi yang lebih berkelanjutan (Gadhve et al., 2019; Triveni Soubam and Arun Gupta, 2021). Perekat biopolymer umumnya terbuat dari bahan-bahan alami seperti pati, kitosan, dan protein nabati, yang membuatnya lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan perekat sintesis berbasis formaldehida. Meskipun demikian, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti pengembangan formulasi untuk mencapai kinerja adhesi yang setara dengan perekat sintesis, serta ketersediaan bahan baku dalam skala besar dan harga yang kompetitif (J. Li et al., 2022; Siebert and Wilker, 2019; Solt et al., 2019).

Perekat biopolimer, yang terbuat dari pati sorgum dan kitosan, memiliki potensi besar sebagai alternatif perekat sintesis alami. Kandungan amilosa pada pati sorgum memberikan sifat adhesif yang baik (Peiris et al., 2021; Yan et al., 2023), sementara kitosan, sebagai polimer alami dengan sifat antimikroba, meningkatkan daya tahan perekat terhadap degradasi biologis memberikan kekuatan dan fleksibilitas (Confederat et al., 2021; Matica et al., 2019).

Meskipun pati memiliki potensi sebagai bahan perekat yang ramah lingkungan, terdapat juga kelemahannya seperti sifat hidrofilik yang tinggi, kekuatan adhesi yang rendah, dan rentan terhadap serangan mikroba merupakan kendala utama yang perlu diatasi. Gugus hidroksil (-OH) pada molekul pati menyebabkan pati mudah menyerap air, sehingga mengurangi daya tahan perekat dalam kondisi lembab. Demikian juga dengan struktur polimer pati yang relatif lemah dan kurangnya interaksi kovalen dengan substrat juga berkontribusi pada kekuatan adhesi yang rendah. Selain itu, material berbasis pati rentan terhadap serangan jamur dan bakteri karena pati merupakan sumber makanan bagi berbagai jenis mikroorganisme, yang dapat menyebabkan degradasi dan penurunan kinerja (Maulana et al., 2022; Zhang et al., 2019). Mengatasi kelemahan pati tersebut dan dan untuk meningkatkan potensinya sebagai bahan perekat, perlu diatasi melalui modifikasi dan formulasi, seperti oksidasi, esterifikasi, eterifikasi, dan penambahan cross-linker, untuk meningkatkan hidrofobisitas, kekuatan mekanik, dan kompatibilitas dengan substrat (Peidayesh et al., 2021; X. Wang et al., 2020). Kitosan yang berasal dari kulit udang dan kerang, dapat bersinergi dengan pati sorgum untuk pembuatan perekat. Kitosan memiliki gugus amino yang bersifat basa, sehingga dapat berinteraksi dengan berbagai jenis substrat dan meningkatkan kekuatan adhesi (Boudouaia et al., 2019; Ningsi et al., 2019). Kombinasi pati sorgum dan kitosan dalam formulasi perekat dapat mengatasi kelemahan masing-masing komponen, menghasilkan perekat dengan kinerja yang lebih baik. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau potensi penggunaan pati sorgum dan kitosan sebagai perekat alternatif yang ramah lingkungan dalam pengembangan papan partikel.

2. SIFAT PATI SORGUM

Biji sorgum mengandung pati dengan persentase 55,6-75,2% (Palacios et al., 2021), dengan karakteristik yang mirip dengan maizena (Shaikh et al., 2019; Sira and Amaiz, 2004). Pati sorgum memiliki kandungan amilosa dan amilopektin yang mempengaruhi sifat fisikokimianya, termasuk kemampuan adhesinya. Kandungan amilosa dalam genotipe sorgum bervariasi, antara 24-33% amilosa, lebih rendah dibandingkan dengan pati jagung. Amilosa berkontribusi pada pembentukan struktur gel dan stabilitas pasta, di mana peran amilosa dalam aplikasi terkait proses gelatinisasi dan retrogradasi, yang mempengaruhi sifat fisikokimia pati sorgum (Zhu, 2014). Proses gelatinisasi dan retrogradasi pati sangat mempengaruhi sifat adhesifnya. Gelatinisasi yang tidak sempurna dapat menyebabkan adhesi yang lemah, sedangkan retrogradasi yang berlebihan dapat menyebabkan pembentukan struktur yang keras dan rapuh. Namun, gugus hidroksil (-OH) pada pati menyebabkan sifat hidrofilik yang tinggi, yang berpotensi menurunkan ketahanan perekat di lingkungan yang lembab (Htet et al., 2022). Untuk mengatasi hal ini, modifikasi kimia melalui esterifikasi, eterifikasi, dan penambahan cross-linker telah dikembangkan untuk meningkatkan hidrofobisitas dan kekuatan adhesi pati (L. Chen et al., 2021). Selain itu, pati sorgum memiliki sifat *shear-thinning* (*breakdown*) dan viskositas puncak yang relatif lebih tinggi tetapi suhu pasta lebih rendah dibandingkan dengan pati jagung (Ai et al., 2011). Sifat *shear-thinning*, yaitu penurunan viskositas dengan peningkatan laju geser (Duan et al., 2024). Pati sorgum menunjukkan sifat penipisan geser (*shear-thinning*), yang dibutuhkan untuk menjaga kinerja perekat dengan menurunkan viskositas saat diterapkan tekanan selama proses pembuatan, sehingga memudahkan penyebaran dan penetrasi perekat (Ishaq et al., 2024). Sifat rheologi pada pati sorgum, yaitu viskositas puncak dan *breakdown*, menunjukkan potensi dalam aplikasi perekat industri. Meski belum ada pembahasan spesifik tentang sifat penipisan geser, viskositas pati sorgum dapat menyesuaikan selama proses aplikasi perekat terutama untuk pembuatan papan partikel. Modifikasi kimia ini pada pati sorgum berpotensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk sebagai bahan perekat, film kemasan, dan bahan pengisi. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kondisi reaksi modifikasi kimia, sehingga diperoleh sifat fisikokimia pati yang sesuai untuk aplikasi spesifik. Potensi pati sorgum sebagai bahan baku perekat alami dapat ditingkatkan, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan perekat sintesis yang berasal dari petrokimia.

3. KITOSAN SEBAGAI AGEN PENGHUBUNG

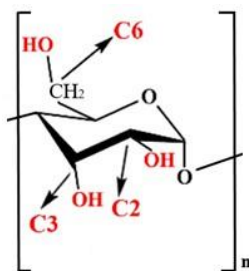
Kitosan, polimer alami yang diperoleh dari deasetilasi kitin (biasanya dari kulit udang dan kerang), memiliki sifat antimikroba dan bioaktif yang dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan perekat terhadap degradasi biologis. Gugus amino pada kitosan memungkinkan interaksi kimia yang kuat dengan substrat, memperkuat ikatan antara pati dan substrat (Mulaudzi et al., 2022). Kitosan memiliki sifat daya rekat yang kuat. Kemampuan kitosan untuk membentuk ikatan hidrogen dan ikatan ionik dengan berbagai substrat menjadikannya bahan yang ideal untuk aplikasi sebagai perekat. Daya rekat yang kuat dapat dimanfaatkan dalam pembuatan *bioadhesive*, di mana kitosan digunakan untuk mengikat komponen bersama-sama dalam formulasi yang ramah lingkungan.

Kitosan adalah padatan amorf berwarna putih kekuningan dengan sifat polielektrolit, sehingga dapat terionisasi dalam larutan. Dalam larutan, terutama dengan asam asetat, kitosan berperilaku sebagai asam poli, menunjukkan tingkat ionisasi yang dapat dimodelkan secara matematis, mengungkapkan konstanta disosiasi nyata sekitar 6,44 (Giraldo and Rivas, 2021). Karena memiliki gugus amino bebas, kitosan bersifat basa dan dapat berinteraksi dengan senyawa lain melalui ikatan ionik atau ikatan hidrogen. Gugus amino bebas dalam struktur kitosan memberikan karakteristik khas sebagai polielektrolit. Dalam lingkungan asam, gugus amino bebas dapat mengalami protonasi, sehingga meningkatkan kelarutan kitosan dalam air dan memperluas fungsionalitasnya dalam berbagai aplikasi,

seperti pembentukan film dan agen pengikat. Memiliki sifat-sifat tersebut, kitosan sangat berpotensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi industri yang memerlukan bahan perekat yang kuat dan ramah lingkungan.

4. MODIFIKASI KIMIA PATI

Pati adalah homopolisakarida yang terdiri dari unit-unit glukosa dan digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena sifatnya yang *biodegradable* dan ketersediaannya yang melimpah. Pati *native* memiliki kelemahan yang membatasi penggunaannya dalam aplikasi yang membutuhkan kinerja tinggi, seperti perekat. Sifat fisikokimia dari pati *native* yaitu stabilitas termal, kelarutan, dan viskositas, belum memenuhi persyaratan yang diperlukan. Oleh karena itu, modifikasi kimia diperlukan untuk meningkatkan kinerja pati seperti kekuatan adhesi, ketahanan terhadap lingkungan, dan sifat mekanik lainnya. Modifikasi kimia bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat pati, seperti kekuatan ikatan, ketahanan terhadap air, dan kemampuan membentuk film. Melalui modifikasi, pati dapat diubah menjadi bahan perekat yang lebih kuat, fleksibel, dan tahan lama, sehingga dapat bersaing dengan perekat sintetis (Masina et al., 2017). Modifikasi kimia merupakan proses yang melibatkan perubahan struktur molekul pati melalui reaksi kimia dengan tujuan meningkatkan sifat fungsionalnya (Chen et al., 2017). Teknik modifikasi yang umum meliputi oksidasi, esterifikasi, eterifikasi, dan pembentukan ikatan silang (*Cross-linking*). Modifikasi ini umumnya melibatkan reaksi pada gugus hidroksil pati, sehingga mengubah sifat fisikokimia seperti kelarutan, viskositas, dan kemampuan membentuk gel (Haq et al., 2019; Wang et al., 2022; Wang et al., 2023). Ojogbo et al., (2020) lebih lanjut menjelaskan bahwa tujuan utama modifikasi pati adalah untuk memperoleh sifat yang lebih sesuai dengan aplikasi spesifik, baik dengan meningkatkan sifat yang sudah ada maupun dengan terbentuk sifat baru. Setiap metode modifikasi menghasilkan karakteristik pati termodifikasi yang berbeda. Pada modifikasi kimia, terdapat tiga gugus hidroksil (-OH) pada atom karbon C2, C3, dan C6 dari unit glukosa yang dapat disubstitusi oleh gugus fungsi dari reagen kimia, dengan derajat substitusi (DS) maksimal sebesar 3. Reaktivitas gugus -OH bervariasi, di mana gugus -OH pada atom karbon primer (C6) lebih reaktif dibandingkan dengan gugus -OH pada atom karbon sekunder (C2 dan C3) (Chi et al., 2008; Shen et al., 2021). Selain itu, karena adanya tiga gugus hidroksil aktif pada molekul glukosa (C2, C3, dan C6) yang ditunjukkan pada Gambar 1., dimungkinkan untuk melakukan modifikasi kimia pati untuk meningkatkan sifat hidrofobitasnya, sehingga dapat diaplikasikan pada lingkungan dengan kadar air tinggi (Ojogbo et al., 2020; X. Wang et al., 2020; Yun et al., 2021).



Gambar 1. Gugus hidroksil aktif pada molekul glukosa (C2, C3, dan C6)

Pati *native* memiliki sifat hidrofilisitas yang kuat akibat adanya sejumlah besar gugus hidroksil, yang menyebabkan pati rentan terhadap kelembaban dan membatasi penggunaannya dalam berbagai aplikasi industri, termasuk dalam perekat untuk material hidrofobik (Wang et al., 2020). Hidrofilisitas ini juga menyebabkan pati tidak larut dalam air pada suhu kamar, serta cenderung beragregasi dalam media organik karena adanya ikatan hidrogen antarmolekul (Cao et al., 2019). Selain itu, pati yang tidak mudah bercampur dengan bahan yang tidak menyerap air, seperti plastik, menjadi masalah dalam penggunaannya. Mengatasi hal tersebut, dilakukan modifikasi pada pati untuk meningkatkan adhesi antarmuka (Meng et al., 2019).

Oksidasi Pati

Oksidasi adalah salah satu metode modifikasi kimia yang umum diterapkan pada pati untuk meningkatkan sifat fungsionalnya. Proses oksidasi pati menyebabkan perubahan kimia pada molekul pati, yang ditandai dengan pembentukan gugus karbonil (-C=O) dan karboksil (-COOH), yang mengubah sifat fisik dan kimia pati. Reaksi oksidasi dilakukan menggunakan agen pengoksidasi seperti hidrogen peroksida, natrium hipoklorit, atau periodat, yang secara selektif menyerang gugus hidroksil (-OH) pada rantai glukosa pati. Oksidasi meningkatkan kelarutan dan daya serap air dari pati yang dioksidasi. Gugus karbonil dan karboksil yang terbentuk selama proses oksidasi lebih bersifat hidrofilik dibandingkan dengan gugus hidroksil asli, yang menyebabkan peningkatan interaksi antara molekul pati dan air. Kelarutan yang lebih tinggi menyebabkan pati yang dioksidasi digunakan dalam berbagai produk pangan dan farmasi yang memerlukan bahan dengan kemampuan larut yang baik (Haq et al., 2019). Studi oleh Cao et al., (2019) juga menunjukkan bahwa pati yang dioksidasi dengan agen pengoksidasi seperti asam periodat meningkatkan kelarutan dalam air, bahkan pada suhu rendah, sehingga lebih mudah diolah dalam berbagai

aplikasi industri.

Oksidasi pati menghasilkan penurunan viskositas, yang disebabkan oleh pemutusan rantai polimer pati selama proses oksidasi. Pemutusan ini mengurangi berat molekul pati, serta menurunkan viskositasnya saat terdispersi dalam air. Penurunan viskositas dibutuhkan dalam industri makanan, di mana kontrol viskositas diperlukan untuk menghasilkan tekstur produk yang diinginkan. Selain itu, pati yang dioksidasi juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik terhadap retrogradasi, yaitu fenomena di mana molekul pati kembali ke bentuk kristal setelah proses gelatinisasi dan pendinginan (Haq et al., 2019). Liu et al., (2023) dalam penelitiannya menemukan bahwa oksidasi pati dengan reagen Fenton memperkenalkan struktur *cross-linked*, yang meningkatkan stabilitas pati terhadap retrogradasi, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan stabilitas selama penyimpanan. Salah satu keunggulan utama dari pati yang dioksidasi adalah kemampuannya untuk membentuk film yang fleksibel. Gugus karbonil dan karboksil yang terbentuk selama oksidasi membantu meningkatkan daya ikat antar molekul pati, yang menghasilkan film dengan kekuatan mekanis dan kejernihan yang lebih baik. Hal ini sangat penting dalam industri tekstil dan kemasan, di mana film pati yang dioksidasi digunakan sebagai pengganti bahan sintetis dalam aplikasi pengemasan ramah lingkungan (Wang et al., 2020). Menurut Liu et al., (2023), film yang dihasilkan dari pati yang dioksidasi melalui reagen Fenton menunjukkan hidrofobisitas yang lebih tinggi dan kekuatan tarik yang lebih baik, yang meningkatkan ketahanannya dalam kondisi basah dan lebih kompetitif dibandingkan bahan kemasan berbasis minyak bumi. Oksidasi juga mempengaruhi stabilitas termal dari pati. Menurut Liu et al., (2023), pati yang dioksidasi menunjukkan peningkatan stabilitas termal, terutama ketika digunakan sebagai bahan perekat dalam aplikasi kayu. Stabilitas termal yang lebih tinggi menyebabkan penggunaan pati dalam lingkungan dengan suhu tinggi tanpa degradasi yang cepat. Penambahan gugus karbonil dan karboksil membantu memperkuat struktur polimer pati, yang menyebabkan peningkatan suhu dekomposisi termal pada pati yang dioksidasi, dibandingkan dengan pati *native*. Modifikasi oksidatif memperkuat kemampuan ikatan pati, terutama dalam kondisi basah atau lembab, menjadikannya solusi ramah lingkungan untuk perekat kayu yang tahan lama dan tahan air.

Esterifikasi Pati

Esterifikasi adalah proses kimia yang melibatkan reaksi antara gugus hidroksil (-OH) pada molekul pati dengan gugus asam organik atau anhidrida asam, menghasilkan ester. Gugus hidroksil molekul pati yang berada pada atom karbon C2, C3, dan C6 dari unit glukosa dapat bereaksi dengan asam organik atau anhidrida. Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai reagen esterifikasi, seperti anhidrida asetat atau anhidrida suksinat, tergantung pada sifat fungsional yang diinginkan. Esterifikasi digunakan untuk meningkatkan hidrofobisitas dan stabilitas termal pati, sehingga dapat diaplikasikan sebagai perekat dalam lingkungan dengan paparan kelembapan atau suhu tinggi. Hidrofobisitas Pati alami bersifat hidrofilik karena keberadaan gugus hidroksil, yang menyebabkan pati menyerap air dengan mudah. Sifat pati dapat menyebabkan masalah karena papan partikel sering kali digunakan di lingkungan yang lembap. Esterifikasi pati mengurangi hidrofilitas dengan menggantikan gugus hidroksil dengan gugus asil yang lebih hidrofobik. Esterifikasi dengan anhidrida suksinat (*Octenyl Succinic Anhydride*, OSA) mengintroduksi gugus suksinil ke dalam molekul pati, memberikan karakteristik hidrofobik pada pati (Torres and De-la-Torre, 2022).

Proses pemadatan pada suhu tinggi menuntut perekat dengan stabilitas termal yang tinggi. Esterifikasi pati, dapat mengurangi kecenderungan degradasi dan menurunkan viskositas, meningkatkan stabilitas termal perekat, sehingga perekat berbasis pati teresterifikasi dapat mempertahankan kekuatan ikatannya selama proses pemanasan, yang dibutuhkan dalam aplikasi industri papan partikel. Esterifikasi menghasilkan penurunan viskositas dan mengurangi perubahan fase yang tidak diinginkan pada suhu tinggi (Wang et al., 2021). Modifikasi esterifikasi meningkatkan kemampuan molekul pati untuk membentuk film yang kuat dan fleksibel. Esterifikasi dengan anhidrida asetat menghasilkan pati terasetilasi yang memiliki kemampuan pembentukan film yang lebih baik, serta memberikan kekuatan mekanik yang lebih tinggi pada perekat (Zuo et al., 2015). Film yang terbentuk dari pati teresterifikasi juga lebih seragam dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap retak dibandingkan film yang terbentuk dari pati *native*. Proses esterifikasi mengubah struktur molekuler pati, sehingga meningkatkan kompatibilitasnya dengan bahan lain yang bersifat hidrofobik, seperti partikel kayu dalam papan partikel. Mekanisme adhesi terjadi melalui pembentukan ikatan kovalen atau ikatan hidrogen antara gugus asil pada pati yang teresterifikasi dengan permukaan partikel kayu. Ikatan hidrogen yang lebih kuat terjadi karena modifikasi pati mengurangi kristalinitas dan meningkatkan kelarutan, sehingga memberikan lebih banyak interaksi antarmolekul pada permukaan kontak (Zuo et al., 2015). Pada suhu tinggi, gugus yang terikat pada pati mengalami *cross-linking*, yang memperkuat jaringan polimer perekat dan meningkatkan kekuatan ikatan antar partikel kayu.

Penggunaan pati teresterifikasi sebagai bahan dasar perekat dalam pembuatan papan partikel memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan perekat berbasis formaldehida atau bahan sintetis lainnya. Pati teresterifikasi ramah lingkungan, dan memiliki biodegradabilitas yang lebih baik, sehingga lebih berkelanjutan dalam industri furnitur dan konstruksi. Selain itu, karena pati teresterifikasi memiliki daya tahan terhadap kelembapan yang lebih tinggi, produk papan partikel yang menggunakan perekat berbasis pati teresterifikasi memiliki umur pakai yang lebih lama, terutama di lingkungan yang lembap atau basah. Penelitian menunjukkan bahwa papan partikel yang

menggunakan perekat berbasis pati teresterifikasi menunjukkan peningkatan kekuatan geser dan ketahanan terhadap pengelupasan, dua sifat penting yang diharapkan dari produk furnitur atau konstruksi (Wang et al., 2021). Perekat ini juga lebih aman digunakan karena tidak mengandung formaldehida, yang merupakan bahan berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Eterifikasi Pati

Eterifikasi adalah proses kimia gugus hidroksil (-OH) pada molekul pati digantikan oleh gugus eter (R-O-R), menjadi sifat baru pada struktur pati. Modifikasi eterifikasi mengurangi kemampuan molekul pati untuk membentuk ikatan hidrogen antarmolekul, sehingga meningkatkan kelarutannya dalam air dan memperbaiki sifat mekaniknya. Reaksi eterifikasi dapat dilakukan menggunakan berbagai reagen, seperti epoksida, alkil halida, atau hidroksipropil, yang menggantikan gugus hidroksil dengan gugus eter yang lebih besar dan lebih fleksibel. Menurut Masina et al. (2017), eterifikasi memperkenalkan gugus eter ke dalam struktur pati, yang dapat meningkatkan kelarutan pati dalam air dan kemampuan interaksi antarmolekulnya dengan partikel kayu. Dalam aplikasi pembuatan papan partikel, dibutuhkan perekat dengan sifat kelarutan yang baik agar dapat diaplikasikan dengan mudah dan menyebar secara merata ke seluruh permukaan kayu. Adanya gugus eter, molekul pati menjadi lebih mudah terdispersi dalam air, yang mempercepat proses pelapisan kayu dengan perekat (Masina et al., 2017). Gugus eter yang ditambahkan selama proses eterifikasi, seperti gugus hidroksipropil atau karboksimetil, mengurangi kemampuan molekul pati untuk beragregasi, sehingga menghasilkan larutan yang lebih homogen dan stabil. Partikel kayu yang digunakan dalam papan partikel umumnya memiliki struktur berpori, yang memerlukan perekat dengan viskositas rendah dan kemampuan penetrasi yang baik untuk memastikan ikatan yang kuat (Ojogbo et al., 2020). Eterifikasi menghasilkan viskositas yang lebih rendah pada larutan perekat, yang memfasilitasi penyebaran perekat ke dalam pori-pori kayu, sehingga menghasilkan ikatan yang lebih kuat dan seragam.

Perekat untuk papan partikel harus tahan terhadap suhu tinggi selama proses pemadatan termal, yang biasanya melibatkan tekanan dan panas. Modifikasi eterifikasi menghasilkan peningkatan stabilitas termal karena adanya gugus eter yang lebih stabil terhadap suhu tinggi dibandingkan dengan gugus hidroksil asli pada pati. Hal ini mencegah degradasi molekul pati selama proses pemanasan dan kekuatan ikatan lebih konsisten (Zuo et al., 2015). Eterifikasi meningkatkan kelarutan pati dalam air, dan memperbaiki ketahanan terhadap air dalam produk jadi, seperti papan partikel. Produk papan partikel sering kali terpapar kelembapan dalam penggunaannya, seperti pada furnitur atau bangunan. Perekat yang tereterifikasi menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap air dibandingkan dengan pati *native*, karena interaksi eter yang stabil dengan substrat kayu mencegah degradasi ikatan perekat dalam kondisi lembap (Wang et al., 2021). Eterifikasi juga menghasilkan perubahan struktural yang meningkatkan kemampuan perekat untuk membentuk jembatan hidrogen antara gugus eter pada pati dan gugus hidroksil pada permukaan kayu. Selain itu, proses pengeringan perekat selama pembuatan papan partikel menyebabkan terjadi pembentukan jaringan yang lebih kuat di antara molekul pati yang dieterifikasi, yang mengarah pada pembentukan film yang lebih padat dan lebih stabil. Jaringan menjadi lebih tahan terhadap pergerakan molekul air dan fluktuasi suhu, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap delaminasi (terlepasnya lapisan) selama penggunaan produk papan partikel (Torres and De-la-Torre, 2022). Perekat berbasis pati yang telah dimodifikasi melalui eterifikasi menunjukkan kekuatan adhesi yang lebih baik, ketahanan terhadap kelembapan, dan stabilitas termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan perekat berbasis pati tanpa modifikasi. Hal ini menjadikannya pilihan yang layak untuk digunakan dalam pembuatan papan partikel, terutama di sektor konstruksi dan furnitur. Menurut penelitian oleh Wang et al., (2021), penggunaan perekat berbasis pati yang dieterifikasi menghasilkan papan partikel yang memiliki kekuatan mekanik yang memenuhi atau bahkan melebihi standar industri untuk ketahanan geser dan ketahanan terhadap kelembapan. Penggunaan perekat ini juga dapat mengurangi ketergantungan pada perekat berbasis formaldehida, yang lebih berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Cross-linking Pati

Modifikasi *cross-linking* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan sifat fungsional pati, sehingga lebih sesuai digunakan dalam aplikasi perekat industri, termasuk pada papan partikel. Modifikasi ikatan silang (*cross-link*) antar molekul pati, dapat memperkuat struktur molekuler dan meningkatkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan dengan suhu tinggi dan lembap. Aplikasi perekat pada papan partikel, membutuhkan perekat yang memiliki stabilitas yang baik selama proses pemanasan dan pemadatan, serta daya rekat yang kuat antar partikel kayu. *Cross-linking* pati dapat meningkatkan ketahanan mekanis dan adhesi dalam perekat berbasis pati, yang dapat menggantikan perekat sintesis berbasis formaldehida yang berbahaya bagi lingkungan.

Cross-linking adalah proses di mana molekul pati dihubungkan oleh agen pengikat untuk membentuk jaringan tiga dimensi yang lebih stabil. Proses *cross-linking* mengubah sifat-sifat molekul pati, seperti viskositas, kekuatan mekanis, stabilitas terhadap panas, dan ketahanan terhadap air. Agen *cross-linking* yang umum digunakan adalah *sodium trimetaphosphate* (STMP), *epichlorohydrin* (EPI), dan fosfat. Setiap agen *cross-linking* bekerja dengan cara yang berbeda untuk membentuk jembatan kovalen antar molekul pati, yang mengubah sifat fisik dan kimia pati yang terlibat. *Sodium trimetaphosphate* (STMP) dan *sodium tripolyphosphate* (STPP) membentuk ikatan silang antara

gugus hidroksil dari molekul pati melalui reaksi esterifikasi. Ikatan silang meningkatkan resistensi pati terhadap degradasi termal dan mekanik, sehingga membuat perekat lebih stabil dalam kondisi lingkungan industri yang keras (Sandhu et al., 2021). *Epichlorohydrin* (EPI) bekerja dengan menggantikan gugus hidroksil pati dengan gugus epoksi, yang kemudian bereaksi dengan molekul pati lainnya untuk membentuk ikatan silang. Penggunaan EPI sebagai agen *cross-linking* meningkatkan kekuatan adhesi dan stabilitas termal pati dalam perekat industri (Yu et al., 2024).

Perekat berbasis pati yang di-*cross-link* menunjukkan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan pati *native*, karena jaringan tiga dimensi yang terbentuk melalui *cross-linking* lebih tahan terhadap degradasi pada suhu tinggi. Stabilitas termal ini juga penting untuk mencegah dekomposisi prematur perekat selama proses pemadatan. Sandhu et al., (2021) menunjukkan bahwa pati sorgum yang di-*cross-link* dengan STMP memiliki peningkatan stabilitas termal yang signifikan, ditunjukkan oleh penurunan viskositas breakdown dan peningkatan kekuatan ikatan antar partikel kayu. Stabilitas termal yang lebih tinggi ini mengurangi risiko delaminasi pada papan partikel, sehingga memperpanjang umur produk.

Pati alami memiliki sifat hidrofilik yang kuat karena keberadaan gugus hidroksil, yang menyebabkan absorpsi air berlebihan dan melemahnya ikatan perekat dalam kondisi basah. *Cross-linking* pati mengurangi kemampuan pati untuk menyerap air dengan mengikat sebagian besar gugus hidroksil yang ada, sehingga menghasilkan perekat yang lebih tahan terhadap kelembapan (Yu et al., 2024).

Kekuatan adhesi adalah salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam aplikasi perekat untuk papan partikel. *Cross-linking* pati menghasilkan peningkatan kekuatan mekanik perekat, karena ikatan silang memperkuat struktur granul pati, yang meningkatkan ikatan dengan partikel kayu. Peningkatan kekuatan adhesi ini ditunjukkan oleh uji kekuatan geser (*shear strength*), yang mengukur seberapa kuat perekat menahan tekanan setelah papan partikel dipadatkan. Yu et al., (2024) menunjukkan bahwa perekat berbasis pati yang di-*cross-link* dengan EPI memiliki kekuatan geser kering sebesar 6,46 MPa dan kekuatan geser basah sebesar 1,32 MPa, yang menunjukkan bahwa perekat mampu memberikan ikatan yang kuat bahkan dalam kondisi basah.

Perekat yang di-*cross-link* cenderung memiliki viskositas yang lebih rendah pada suhu aplikasi, tetapi meningkat kembali setelah suhu turun, yang membantu penetrasi yang lebih baik ke dalam pori-pori kayu dan membentuk ikatan yang lebih kuat. Sandhu et al. (2021) menunjukkan bahwa perekat berbasis pati sorgum yang di-*cross-link* menunjukkan perilaku *shear-thinning* yang lebih baik, sehingga perekat menyebar lebih efektif selama aplikasi dan meningkatkan kekuatan ikatan antar partikel kayu.

Penggunaan pati yang di-*cross-link* sebagai bahan perekat dalam pembuatan papan partikel memberikan beberapa keuntungan dibandingkan perekat berbasis formaldehida atau bahan kimia sintesis lainnya. Pati yang di-*cross-link* ramah lingkungan, tetapi juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap air, panas, dan tekanan mekanis, yang sangat penting untuk produk papan partikel yang digunakan di lingkungan konstruksi atau furnitur.

Perekat berbasis pati yang di-*cross-link* memiliki potensi untuk menggantikan perekat sintesis karena sifatnya yang biodegradable dan non-toksik, serta menawarkan kekuatan adhesi yang sama atau lebih tinggi dibandingkan perekat konvensional. Pengembangan perekat berbasis pati dengan modifikasi *cross-linking* dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dari industri kayu dan konstruksi, serta menawarkan produk yang lebih aman bagi konsumen.

Modifikasi Kimia Pati Sorgum dengan Kitosan

Modifikasi kimia pati sorgum dengan kitosan dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti *cross-linking* dan oksidasi, yang bertujuan untuk meningkatkan daya rekat dan ketahanan terhadap kelembapan. *Cross-linking* antara pati sorgum dan kitosan menghasilkan perekat yang lebih stabil, karena ikatan antar molekul lebih kuat, sehingga mengurangi kelemahan pati alami dalam kondisi lembap dan meningkatkan ketahanannya terhadap proses pelapukan. Sandhu et al., (2021) menjelaskan bahwa modifikasi pati sorgum melalui *cross-linking* menggunakan agen *sodium trimetaphosphate* (STMP) menghasilkan peningkatan dalam stabilitas termal dan ketahanan terhadap air, yang penting dalam aplikasi industri perekat. Penambahan kitosan meningkatkan kekuatan adhesi perekat dengan memperkuat ikatan hidrogen antara molekul pati dan substrat kayu, yang meningkatkan kekuatan ikatan pada papan partikel.

Sifat hidrofilik alami pati sorgum menyebabkan perekat berbasis pati mudah menyerap air, yang mengurangi kekuatannya dalam kondisi lembap. Modifikasi dengan menambahkan kitosan mengurangi daya serap air perekat karena kitosan mampu membentuk ikatan silang dengan gugus hidroksil pati, yang membatasi penetrasi air. Penelitian oleh Li et al., (2013) menunjukkan bahwa penambahan kitosan pada film komposit pati meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan menurunkan derajat pembengkakan. Modifikasi pati sorgum dengan kitosan menghasilkan peningkatan kekuatan adhesi pada papan partikel. Kitosan, yang bersifat kationik, berinteraksi dengan gugus karboksil pada pati yang teroksidasi, memperkuat ikatan antara perekat dan partikel kayu. Ji et al., (2020) menunjukkan bahwa interaksi elektrostatik antara pati teroksidasi dan kitosan meningkatkan daya rekat perekat, sehingga memudahkan dalam aplikasi. Sementara Sarungallo et al., (2024) menemukan bahwa modifikasi pati

sorgum dengan kitosan menghasilkan perekat yang memiliki stabilitas mekanik lebih tinggi dibandingkan dengan perekat berbasis pati tanpa modifikasi. Modifikasi kimia pati sorgum dengan kitosan dapat meningkatkan kekuatan mekanik, dan memperbaiki sifat reologi perekat, yang mempengaruhi kemampuannya untuk menyebar secara merata pada permukaan kayu. (Hasan et al., 2020) melaporkan bahwa campuran pati dan kitosan menghasilkan viskositas yang lebih rendah. Hal ini yang memudahkan perekat untuk menyebar dan menembus pori-pori kayu selama proses aplikasi papan partikel, sehingga meningkatkan daya rekat antar partikel kayu.

Modifikasi kimia pati sorgum dengan kitosan menghasilkan perekat yang lebih kuat, tahan air, dan stabil secara termal, sehingga sesuai untuk aplikasi dalam pembuatan papan partikel. Perekat berbasis pati-kitosan sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan efektif dibandingkan perekat berbasis bahan kimia sintetis. Industri perekat dapat memanfaatkan polimer alami menggunakan teknik modifikasi kimia *cross-linking* dan oksidasi, untuk menghasilkan produk yang lebih berkelanjutan dan aman bagi lingkungan.

5. APLIKASI DAN POTENSI PEREKAT BERBASIS PATI SORGUM DAN KITOSAN

Perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan memiliki potensi aplikasi yang luas di berbagai sektor industri, khususnya dalam industri kayu. Kombinasi antara pati sorgum dan kitosan membentuk film biokomposit yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memiliki sifat mekanis dan termal yang unggul. Penelitian oleh Prasetyo et al., (2021) menunjukkan bahwa film biokomposit berbasis pati sorgum dan kitosan mampu meningkatkan kekuatan tarik dan stabilitas termal.

Perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan menunjukkan potensi untuk menggantikan perekat sintetis yang selama ini digunakan dalam pembuatan papan partikel, kayu lapis, dan berbagai produk berbasis kayu lainnya. Papan partikel dan kayu lapis yang diproduksi menggunakan perekat alami memiliki kekuatan mekanik yang memadai serta sifat biodegradabilitas dari perekat alami tersebut memungkinkan limbah kayu yang dihasilkan lebih mudah terurai di lingkungan. Dalam jangka panjang, hal ini dapat membantu mengurangi akumulasi limbah industri kayu yang sulit terurai, serta mengurangi emisi zat berbahaya seperti formaldehida yang dihasilkan oleh perekat sintetis (Sarungallo et al., 2024). Keunggulan utama dari perekat berbasis pati sorgum dan kitosan adalah sifat biodegradabilitas dan non-toksiknya, yang menjadikannya alternatif yang lebih aman dibandingkan perekat berbasis bahan kimia sintetis. Dalam era di mana kesadaran akan dampak lingkungan semakin meningkat, penggunaan bahan perekat alami seperti ini menawarkan solusi berkelanjutan yang dapat mengurangi ketergantungan industri pada bahan berbasis minyak bumi yang sulit terurai. Dengan demikian, penerapan perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan di berbagai sektor industri untuk memenuhi kebutuhan fungsional, serta berkontribusi dalam mengurangi jejak karbon dan dampak lingkungan (Ji et al., 2020).

6. KESIMPULAN

Perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan memiliki potensi ekonomi dan ramah lingkungan. Penggunaan bahan baku yang berlimpah dan proses produksi yang lebih sederhana dapat mengurangi biaya produksi serta ketergantungan pada bahan impor. Selain itu, sifat biodegradabilitas dari perekat dapat mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan pembuangan limbah konstruksi. Dengan demikian, pengembangan perekat alami dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

- Ai, Y., Medic, J., Jiang, H., Wang, D., and Jane, J. L. (2011). "Starch characterization and ethanol production of sorghum". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7385–7392. <https://doi.org/10.1021/jf2007584>
- Boudouaia, N., Bengharez, Z., and Jellali, S. (2019). "Preparation and characterization of chitosan extracted from shrimp shells waste and chitosan film: application for Eriochrome black T removal from aqueous solutions". *Applied Water Science*, 9(4), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0967-z>
- Cao, C., Nian, B., Li, Y., Wu, S., and Liu, Y. (2019). "Multiple Hydrogen-Bonding Interactions Enhance the Solubility of Starch in Natural Deep Eutectic Solvents: Molecule and Macroscopic Scale Insights". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(45), 12366–12373. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04503>
- Chen, L., Din, Z. ud, Yang, D., Hu, C., Cai, J., and Xiong, H. (2021). "Functional nanoparticle reinforced starch-based adhesive emulsion: Toward robust stability and high bonding performance". *Carbohydrate Polymers*, 269(118270), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118270>
- Chen, Y. F., Kaur, L., and Singh, J. (2017). "Chemical Modification of Starch". In *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00007-X>
- Chi, H., Xu, K., Wu, X., Chen, Q., Xue, D., Song, C., Zhang, W., and Wang, P. (2008). "Effect of acetylation on the properties of corn starch". *Food Chemistry*, 106(3), 923–928. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.002>
- Confederat, L. G., Tuchilus, C. G., Dragan, M., Sha'at, M., and Dragostin, O. M. (2021). "Preparation and Antimicrobial Activity of Chitosan and Its Derivatives: A Concise Review". *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(12), 1–17. <https://doi.org/10.3390/molecules26123694>
- Duan, X., Liu, Q., Zhao, R., Liu, W., Zhang, L., and Hu, H. (2024). "Effects of particle properties, intermolecular forces, and molecular structure on the shear-thickening behavior of waxy starch dispersions". *Carbohydrate Polymers*, 334(122004), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122004>
- Gadhav, R. V., Sheety, P., Mahanwar, P. A., Gadekar, P. T., and Desai, B. J. (2019). "Silane Modification of Starch-Based Wood Adhesive: Review". *Open Journal of Polymer Chemistry*, 09(03), 53–62. <https://doi.org/10.4236/ojpcem.2019.93005>
- Giraldo, J. D., and Rivas, B. L. (2021). "Direct ionization and solubility of chitosan in aqueous solutions with acetic acid". *Polymer Bulletin*, 78(3), 1465–1488. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03172-w>
- Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., Mehmood, S., Bilal-Ul-Amin, Ullah, R. S., Khan, A., and Nazir, A. (2019). "Advances in chemical modifications of starches and their applications". *Carbohydrate Research*, 476, 12–35. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007>
- Hasan, M., Gopakumar, D. A., Olaiya, N. G., Zarlaida, F., Alfian, A., Aprinasari, C., Alfatah, T., Rizal, S., and Khalil, H. P. S. A. (2020). "Evaluation of the thermomechanical properties and biodegradation of brown rice starch-based chitosan biodegradable composite films". *International Journal of Biological Macromolecules*, 156, 896–905. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.039>
- Htet, M. N. S., Wang, H., Tian, L., Yadav, V., Samoon, H. A., and Feng, B. (2022). "Integrated Starches and Physicochemical Characterization of Sorghum Cultivars for an Efficient and Sustainable Intercropping Model". *Plants*, 11(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants11121574>
- Ishaq, M. I., Lestari, E. G., Qonit, M. A., Susilawati, P. N., Widarsih, W., Syukur, C., Herawati, H., Arief, R., Santoso, B., Purba, R., Andoyo, R., Yurzak, Z., Tan, S. S., Musfal, M., Mubarak, S., and Haziman, M. L. (2024). "Sorghum starch review: Structural properties, interactions with proteins and polyphenols, and modification of physicochemical properties". *Food Chemistry*, 463(P1 139810), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139810>
- Ji, Y., Lin, X., and Yu, J. (2020). Preparation and characterization of oxidized starch-chitosan complexes for adsorption of procyanidins". *Lwt*, 117, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108610>
- Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M. A. R., Iswanto, A. H., Reh, R., Sedliacik, J., Savov, V., Taghiyari, H. R., Papadopoulos, A. N., Pizzi, A., and Hejna, A. (2023). "Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review". *Wood Material Science and Engineering*, 18(2), 763–782. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>
- Li, H., Gao, X., Wang, Y., Zhang, X., and Tong, Z. (2013). "Comparison of chitosan/starch composite film properties before and after cross-linking". *International Journal of Biological Macromolecules*, 52(1), 275–279. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.10.016>
- Li, J., Yu, X., Martinez, E. E., Zhu, J., Wang, T., Shi, S., Shin, S. R., Hassan, S., and Guo, C. (2022). "Emerging Biopolymer-Based Bioadhesives". *Macromolecular Bioscience*, 22(2), 1–18. <https://doi.org/10.1002/mabi.202100340>
- Liu, M., Yao, W., Zheng, H., Zhao, H., Shao, R., Tan, H., and Zhang, Y. (2023). "Preparation of a high-strength, hydrophobic performance starch-based adhesive with oxidative cross-linking via Fenton's reagent". *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(P5), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126995>
- Masina, N., Choonara, Y. E., Kumar, P., du Toit, L. C., Govender, M., Indermun, S., and Pillay, V. (2017). "A review of the chemical modification techniques of starch". *Carbohydrate Polymers*, 157, 1226–1236.

- <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.094>
- Matica, M. A., Aachmann, F. L., Tøndervik, A., Sletta, H., and Ostafe, V. (2019). "Chitosan as a wound dressing starting material: Antimicrobial properties and mode of action". *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), 1–33. <https://doi.org/10.3390/ijms20235889>
- Maulana, M. I., Lubis, M. A. R., Febrianto, F., Hua, L. S., Iswanto, A. H., Antov, P., Kristak, L., Mardawati, E., Sari, R. K., Zaini, L. H., Hidayat, W., Lo Giudice, V., and Todaro, L. (2022). "Environmentally Friendly Starch-Based Adhesives for Bonding High-Performance Wood Composites: A Review". *Forests*, 13(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/f13101614>
- Meng, L., Li, S., Yang, W., Simons, R., Yu, L., Liu, H., and Chen, L. (2019). "Improvement of Interfacial Interaction between Hydrophilic Starch Film and Hydrophobic Biodegradable Coating". *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(10), 9506–9514. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00909>
- Mulaudzi, T., Nkuna, M., Sias, G., Doumbia, I. Z., Njomo, N., and Iwuoha, E. (2022). "Antioxidant Capacity of Chitosan on Sorghum Plants under Salinity Stress". *Agriculture (Switzerland)*, 12(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101544>
- Ningsi, D. W., Suhasman, and Saad, S. (2019). "Characteristic of Chitosan Adhesive from Shell Shrimp *Litopenaeus vannamei* and Their Application for Producing Particleboard". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 593(1), 1–11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/593/1/012015>
- Ojogbo, E., Ogunsona, E. O., and Mekonnen, T. H. (2020). "Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials". *Materials Today Sustainability*, 7–8, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100028>
- Palacios, C. E., Nagai, A., Torres, P., Rodrigues, J. A., and Salatino, A. (2021). "Contents of tannins of cultivars of sorghum cultivated in Brazil, as determined by four quantification methods. *Food Chemistry*, 337(127970), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127970>
- Peidayesh, H., Heydari, A., Mosnáčková, K., and Chodák, I. (2021). "In situ dual crosslinking strategy to improve the physico-chemical properties of thermoplastic starch". *Carbohydrate Polymers*, 269, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118250>
- Peiris, K. H. S., Wu, X., Bean, S. R., Perez-Fajardo, M., Hayes, C., Yerka, M. K., Krishna Jagadish, S. V., Ostmeyer, T., Aramouni, F. M., Tesso, T., Perumal, R., Rooney, W. L., Kent, M. A., and Bean, B. (2021). "Near infrared spectroscopic evaluation of starch properties of diverse sorghum populations". *Processes*, 9(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/pr9111942>
- Poleto, S. F. S., de Moura Aquino, V. B., Chahud, E., Pinheiro, R. V., Nunes Branco, L. A. M., Silva, D. A. L., de Campos, C. I., Molina, J. C., de Carvalho, C. M., Christoforo, A. L., and Lahr, F. A. R. (2020). "Evaluation of CCB-preserved medium density particleboards under natural weathering". *BioResources*, 15(2), 3678–3687. <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3678-3687>
- Prasetyo, K. W., Syamani, F. A., Amalia, Y. R., Ermawati, R., Fatimah, D., Mailisa, T., Amalia, B., Karima, R., Solikhin, A., Kusumah, S. S., Masruchin, N., Munawar, S. S., Marlina, R., and Subyakto. (2021). "Cassava starch-chitosan-sorghum micro-fibrillated cellulose biocomposite wrapping film to prevent COVID-19 outbreak". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 914(1), 1–12. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/914/1/012075>
- Sandhu, K. S., Siroha, A. K., Punia, S., Sangwan, L., Nehra, M., and Purewal, S. S. (2021). "Effect of degree of cross linking on physicochemical, rheological and morphological properties of Sorghum starch. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100073>
- Sarungallo, R. S., Tjaronge, M. W., Ahmad, A., and Hustim, M. (2024). "Adjustment of temperature and starch concentration in the NaOH hydrolysis process for the development of sustainable adhesives from sorghum starch". *AIP Conference Proceedings*, 3140(1), 2–8. <https://doi.org/10.1063/5.0221170>
- Shaikh, F., Ali, T. M., Mustafa, G., and Hasnain, A. (2019). "Comparative study on effects of citric and lactic acid treatment on morphological, functional, resistant starch fraction and glycemic index of corn and sorghum starches". 135, 314–327.
- Shen, Y., Yao, Y., Wang, Z., and Wu, H. (2021). "Hydroxypropylation reduces gelatinization temperature of corn starch for textile sizing. *Cellulose*, 28(8), 5123–5134. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03852-4>
- Siebert, H. M., and Wilker, J. J. (2019). "Deriving commercial level adhesive performance from a bio-based mussel mimetic Polymer". *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(15), 13315–13323. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02547>
- Sira, E. E. P., and Amaiz, M. L. (2004). "A laboratory scale method for isolation of starch from pigmented sorghum. *Journal of Food Engineering*, 64(4), 515–519. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.11.019>
- Solt, P., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Kantner, W., Moser, J., Mitter, R., and van Herwijnen, H. W. G. (2019). "Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 94, 99–131. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.007>
- Torres, F. G., and De-la-Torre, G. E. (2022). "Synthesis, characteristics, and applications of modified starch nanoparticles: A review". *International Journal of Biological Macromolecules*, 194, 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.187>

- Triveni Soubam, and Arun Gupta. (2021). "Eco-friendly natural rubber latex and modified starch-based adhesive for wood-based panels application- A review". *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, 3(1), 49–53. <https://doi.org/10.54279/mijeec.v3i1.245163>
- Uemura Silva, V., Nascimento, M. F., Resende Oliveira, P., Panzera, T. H., Rezende, M. O., Silva, D. A. L., Borges de Moura Aquino, V., Rocco Lahr, F. A., and Christoforo, A. L. (2021). "Circular vs. linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards". *Construction and Building Materials*, 285, 122906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>
- Vineeth, S. K., and Gadhave, R. V. (2020). "Sustainable Raw Materials in Hot Melt Adhesives: A Review". *Open Journal of Polymer Chemistry*, 10, 49–65. <https://doi.org/10.4236/ojpcchem.2020.103003>
- Wang, N., Li, C., Miao, D., Hou, H., Dai, Y., Zhang, Y., and Wang, B. (2023). "The effect of non-thermal physical modification on the structure, properties and chemical activity of starch: A review". *International Journal of Biological Macromolecules*, 251, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126200>
- Wang, R., Li, M., Liu, J., Wang, F., Wang, J., and Zhou, Z. (2021). "Dual modification manipulates rice starch characteristics following debranching and propionate esterification". *Food Hydrocolloids*, 119, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106833>
- Wang, X., Huang, L., Zhang, C., Deng, Y., Xie, P., Liu, L., and Cheng, J. (2020). "Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review". *Carbohydrate Polymers*, 240(16), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292>
- Wang, Z., Mhaske, P., Farahnaky, A., Kasapis, S., and Majzoobi, M. (2022). "Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review". *Food Hydrocolloids*, 129, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107542>
- Yan, S., Li, Z., Wang, B., Li, T., Li, Z., Zhang, N., and Cui, B. (2023). "Correlation analysis on physicochemical and structural properties of sorghum starch". *Frontiers in Nutrition*, 9(1101868), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1101868>
- Yu, H., Xia, Y., Liu, X., Chen, H., Jin, Z., Wang, Z., and Wang, S. (2024). "Preparation of self-assembled modified reed fiber reinforced starch-based adhesive and the study of cross-linking mechanism". *Industrial Crops and Products*, 211, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118204>
- Yun, L., Liu, C., Li, K., Deng, L., and Li, J. (2021). Structure and properties of corn starch synthesized by using sulfobetaine and deoxycholic acid". *International Journal of Biological Macromolecules*, 183, 1293–1301. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.078>
- Zhang, Y., Zhang, J., Chen, M., Luo, J., Shi, S. Q., Gao, Q., and Li, J. (2019). "A tough, water-resistant, high bond strength adhesive derived from soybean meal and flexible hyper-branched aminated starch". *Polymers*, 11(8), 1–13. <https://doi.org/10.3390/polym11081352>
- Zhu, F. (2014). "Structure, physicochemical properties, modifications, and uses of sorghum starch. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 597–610. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12070>
- Zuo, Y. feng, Gu, J., Qiao, Z., Tan, H., Cao, J., and Zhang, Y. (2015). "Effects of dry method esterification of starch on the degradation characteristics of starch/polylactic acid composites". *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.038>