



Potensi Polisakarida dari Limbah Buah-buahan sebagai Koagulan Alami dalam Pengolahan Air dan Limbah Cair: *Review*

Hans Kristianto*, Angelica Jennifer, Asaf Kleopas Sugih, Susiana Prasetyo
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan
Jl. Ciembuleuit No. 94 Bandung 40141

*Alamat korespondensi: hans.kristianto@unpar.ac.id

(Submisi: 13 Juli 2020; Revisi: 18 Agustus 2020; Penerimaan: 30 Agustus 2020)

ABSTRACT

Nowadays, various studies related to utilization of biobased materials as natural coagulants have been explored. Based on the source, natural coagulants can be classified as animal, vegetable, or microbial based. Furthermore, based on the active ingredients, it can be classified as protein, polyphenols, and polysaccharides. Polysaccharides are abundant natural ingredients and are often found in plants or animals. In this study, we focused on polysaccharides, especially those from fruit waste, such as seeds and fruit peels. It is known that around 25-30% of the total weight of fruit is generally wasted, even though it contains phytochemicals and various active ingredients that can be utilized, especially as a natural coagulant. This review will focus on the use of pectin and starch from fruit waste as natural coagulants for water-wastewater treatment. Generally, pectin is commonly found in the skin of fruits as part of the cell wall structure, while starch is found in fruit seeds as food reserves. To be used as a natural coagulant, pectin or starch need to be extracted first. In particular, starch needs to be modified either physically or chemically. The coagulation mechanism of pectin and starch usually follows the interparticle bridging mechanism. The use of pectin and starch from fruit waste needs to be explored and further investigated, to substitute the use of chemical coagulants.

Keywords: *coagulation; fruit waste; natural coagulant; polysaccharides*

ABSTRAK

Dewasa ini berbagai studi terkait pemanfaatan bahan alam sebagai koagulan alami telah banyak dieksplorasi. Berdasarkan sumbernya, koagulan alami dapat digolongkan berbasis hewani, nabati, maupun mikrobial, sementara berdasarkan bahan aktifnya dapat digolongkan sebagai protein, polifenol, dan polisakarida. Polisakarida merupakan bahan alam yang berlimpah dan seringkali dijumpai pada tumbuh-tumbuhan dan hewan. Pada kajian ini difokuskan pada polisakarida terutama yang berasal dari limbah buah-buahan yang tidak termanfaatkan, seperti biji dan kulit buah. Diketahui sekitar 25-30% dari total berat buah pada umumnya terbuang, padahal memiliki kandungan fitokimia dan berbagai bahan aktif yang

dapat dimanfaatkan, salah satunya sebagai koagulan alami. Pada tinjauan ini akan difokuskan pada pemanfaatan pektin dan pati dari limbah buah-buahan sebagai koagulan alami untuk pengolahan air dan limbah cair. Secara umum pektin umum dijumpai pada bagian kulit buah-buahan sebagai bagian dari struktur dinding sel, sementara pati umum dijumpai pada biji buah-buahan sebagai cadangan makanan. Untuk dapat dimanfaatkan sebagai koagulan alami, pektin ataupun pati perlu diekstrak terlebih dahulu, dan pati secara khusus perlu dimodifikasi baik secara fisika maupun kimia. Secara umum mekanisme koagulasi oleh pektin dan pati mengikuti mekanisme *interparticle bridging*. Pemanfaatan pektin dan pati dari limbah buah-buahan perlu dieksplorasi dan diteliti lebih lanjut, agar dapat mensubstitusi penggunaan koagulan kimia secara komersial.

Kata kunci: koagulasi; koagulan alami; limbah buah-buahan; polisakarida

1. Pendahuluan

Koagulasi dan flokulasi merupakan teknologi pengolahan air dan limbah cair yang paling umum digunakan. Dalam prosesnya, digunakan berbagai garam logam seperti alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), ferro, atau ferri sulfat ($\text{FeSO}_4\text{--Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), serta koagulan polimer anorganik seperti *polyaluminium chloride* (PAC), poliferri sulfat (PFS), polimer aluminium ferri sulfat (PAFS), atau polimer organik sintesis seperti poliakrilamida (Sillanpaa dkk., 2018). Koagulan tersebut telah umum digunakan dan memiliki beberapa keunggulan seperti pH optimum di kisaran pH netral, dengan dosis yang dibutuhkan relatif kecil, selain efektivitasnya yang telah diketahui dalam pengolahan air–limbah cair (Kumar dkk., 2017). Akan tetapi terdapat beberapa kelemahan, yaitu menurunnya pH air yang telah diolah, menghasilkan lumpur hasil pengolahan dalam jumlah besar, harga yang cukup tinggi, ketersediaannya yang tidak merata, serta berpotensi menyebabkan penyakit saraf seperti *Alzheimer's* (Yin, 2010). Oleh karena itu dibutuhkan teknologi alternatif yang menjawab berbagai kekurangan tersebut, salah satunya koagulan alami.

Koagulan alami merupakan bahan aktif koagulan yang berasal dari sumber alami. Pemanfaatan koagulan alami berbasis tumbuhan diketahui telah dikenal sejak ribuan tahun yang lalu di India, Afrika, dan Cina (Sutherland dkk., 1990; Asrafuzzaman dkk., 2011). Pemanfaatan koagulan alami memiliki beberapa keuntungan, antara lain harga relatif murah, bahan baku mudah didapat, dapat terurai (*biodegradable*), lumpur hasil proses tidak tergolong limbah bahan beracun dan berbahaya (B3) serta dihasilkan dalam jumlah yang lebih sedikit, dan toksisitas yang rendah (Freitas dkk., 2018). Melihat keuntungan tersebut, koagulan alami berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai teknologi tepat guna untuk pengolahan air demi mencapai pemerataan ketersediaan air bersih. Meskipun demikian, pemanfaatan koagulan alami memiliki kekurangan yaitu dibutuhkan beberapa tahap persiapan dan perlakuan yang variatif, bergantung pada sumber bahan aktif koagulan alami, sebelum dapat digunakan sebagai koagulan (Ang dkk., 2020).

Jika dikelompokkan berdasarkan bahan aktifnya, koagulan alami dapat digolongkan menjadi protein, polifenol, dan polisakarida (Kristianto, 2017). Protein pada umumnya

berasal dari kacang-kacangan pangan atau nonpangan yang dapat digunakan menjadi koagulan setelah melalui tahapan pengeringan, pengecilan ukuran, ekstraksi protein, dan pemurnian (Kristianto dkk., 2019a). Beberapa jenis sumber protein yang telah dieksplorasi antara lain: *Moringa oleifera* (Sotheeswaran dkk., 2011; Kristianto dkk., 2018), *Vicia faba* (Kukic dkk., 2015), *Arachis hypogaea* (Birima dkk., 2013), *Leucaena leucocephala* (Kristianto dkk., 2019b), *Glycine max* (Mbogo, 2008), dan lain sebagainya. Sekalipun memberikan kinerja koagulasi yang baik dan pemrosesannya yang relatif sederhana, pemanfaatan ekstrak protein sebagai koagulan alami memiliki tantangan tersendiri, yaitu proses pemurnian protein dari ekstrak yang relatif rumit, sehingga berpotensi meningkatkan biaya produksi jika dikomersialisasi (Choy dkk., 2014).

Dari berbagai jenis polifenol, tanin merupakan bahan aktif yang dimanfaatkan sebagai koagulan alami. Tanin, atau dikenal sebagai asam tanat merupakan polifenol yang larut di dalam air yang banyak mengandung gugus fungsional seperti hidroksil atau karboksil (Bele dkk., 2010). Tanin yang diekstrak dari kulit pohon akasia (*Acacia mearnsii*), pinus, dan eukaliptus, serta kayu pohon *quebracho* (*Schinopsis balansae*; *Schinopsis lorentzii*) (Grenda dkk., 2018) telah dimanfaatkan sebagai koagulan komersial dengan merek dagang seperti Tanfloc, Silvafloc, dan Aquapol. Meskipun telah dikomersialisasi, pemanfaatan polifenol sebagai koagulan alami masih relatif terbatas.

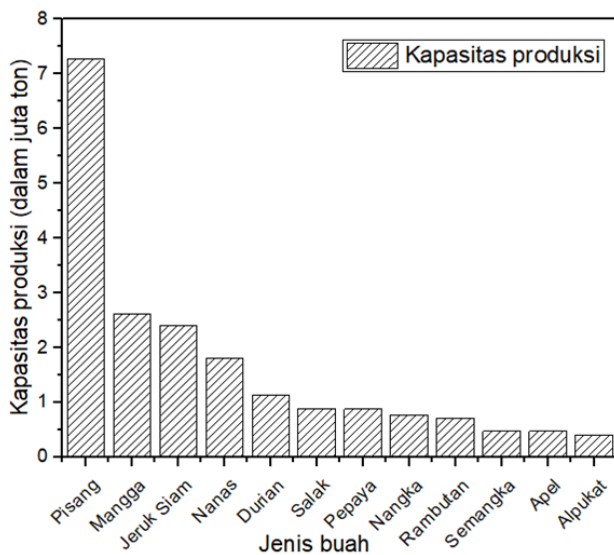
Di sisi lain, polisakarida yang relatif berlimpah menjadi alternatif yang menarik untuk dimanfaatkan sebagai koagulan alami. Polisakarida dapat diperoleh baik dari sumber

hewani, mikroorganisme, maupun tumbuhan. Kitosan dari limbah cangkang udang-udangan, alginat dan karaginan dari alga, *xanthan gum* dari *Xanthomonas campestris* merupakan contoh polisakarida nontumbuhan yang telah digunakan dalam pengolahan air dan limbah cair (Saranya dkk., 2014; Oladoja dkk., 2017c). Pati yang berasal dari beras, gandum, jagung, dan sagu telah dicoba dan berhasil digunakan sebagai koagulan alami (Teh dkk., 2014; Aziz dan Sobri, 2015; Choy dkk., 2016), akan tetapi pati tersebut merupakan sumber pangan, Oleh karena itu diperlukan eksplorasi polisakarida yang berasal dari sumber nonpangan (Kristianto, 2017). Limbah dari bahan pangan secara umum, termasuk di dalamnya buah-buahan terdapat dalam jumlah yang melimpah. Diketahui bahwa di dalam limbah tersebut banyak mengandung komponen yang dapat dimanfaatkan termasuk polisakarida. Pada tinjauan ini, difokuskan pada pemanfaatan polisakarida dari limbah buah-buahan terutama pada pektin dan pati yang umum dijumpai dan lebih mudah diekstraksi dibandingkan selulosa ataupun hemiselulosa. Ekstraksi pektin dan pati, modifikasi, pemanfaatan sebagai koagulan alami, serta tantangan dan peluang pengembangan lebih lanjut diuraikan dalam tinjauan ini. Setelah pendahuluan (Bagian 1), pada Bagian 2 disajikan data produksi buah-buahan di Indonesia beserta potensi limbahnya, sementara Bagian 3 mendiskusikan struktur dan sifat polisakarida pada limbah buah-buahan, secara khusus pektin dan pati. Bagian 4 mendiskusikan metode ekstraksi pektin dan pati, serta pemrosesan pektin dan pati sehingga dapat digunakan sebagai koagulan. Sementara mekanisme dan kinerja koagulan dari pektin

dan pati dan tantangan pengembangannya disajikan pada Bagian 5 dan 6.

2. Produksi Buah-buahan di Indonesia dan Limbahnya

Indonesia sebagai negara agraris memiliki produksi di bidang pertanian dan perkebunan yang besar. Sebanyak 55 juta hektar lahan di Indonesia diperuntukkan pada bidang ini (Quincieu, 2015), sehingga Indonesia juga dikenal sebagai salah satu produsen buah tropis terbesar di ASEAN (Ahmad dan Chua, 2013). Selain itu jumlah varietas buah-buahan yang diproduksi juga sangat beragam. Berdasarkan data Biro Pusat Statistik (BPS), terdapat 26 jenis buah-buahan yang terdata (BrPS, 2020). Beberapa jenis buah-buahan dengan kapasitas produksinya pada tahun 2018 disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kapasitas produksi beberapa jenis buah-buahan di Indonesia pada tahun 2018 (diadaptasi dari (BPS, 2020))

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pisang merupakan varietas buah yang paling banyak diproduksi, disusul oleh mangga, jeruk, nanas dan durian. Buah-buahan lain

diproduksi dengan kapasitas di bawah 1 juta ton pada tahun 2018.

Tabel 1. Kandungan pektin dan pati dari beberapa limbah buah-buahan

Jenis buah	Bagian buah	Perolehan Pektin	Perolehan Pati	Pustaka
Pisang	kulit	10,3-21,7%	-	(Emaga dkk., 2008)
Mangga	kulit	16,5-31,1%	-	(Yashoda dkk., 2005)
	biji	-	21%	(Saadany dkk., 1980)
Jeruk	kulit	25-35%	-	(Ciriminna dkk., 2015)
Nanas	ampas	13,78%	-	(Karim dkk., 2014)
Durian	kulit	10,25%	-	(Wai dkk., 2010)
	biji	-	11,03%	(Zamri dkk., 2018)
Nangka	biji	-	54%	(Choy dkk., 2017)

Pada umumnya bagian yang dapat dikonsumsi hanya berupa daging buah, sehingga akan meninggalkan kulit dan bijinya sebagai limbah. Menurut Sagar, dkk (2018) sekitar 25-30% berat dari total buah akan terbuang sebagai limbah. Bahkan pada beberapa buah seperti nangka, manggis, dan rambutan, total limbah dari kulit dan biji dapat mencapai 50-70% berat (Sagar dkk., 2018). Limbah kulit dan biji buah tersebut seringkali tidak dimanfaatkan, padahal memiliki kandungan seperti karbohidrat, protein, lemak, dan polifenol yang berpotensi untuk digunakan lebih lanjut pada berbagai aplikasi. Kandungan pati dan pektin dari limbah buah-buahan yang umum dijumpai di Indonesia, disajikan pada Tabel 1. Dapat dilihat secara umum kandungan pektin dan pati cukup besar, yaitu berkisar antara 10-30% untuk pektin, dan 10-50% untuk pati, bergantung pada jenis dan bagian buah yang diekstrak.

3. Jenis dan Kandungan Polisakarida pada Limbah Buah-buahan

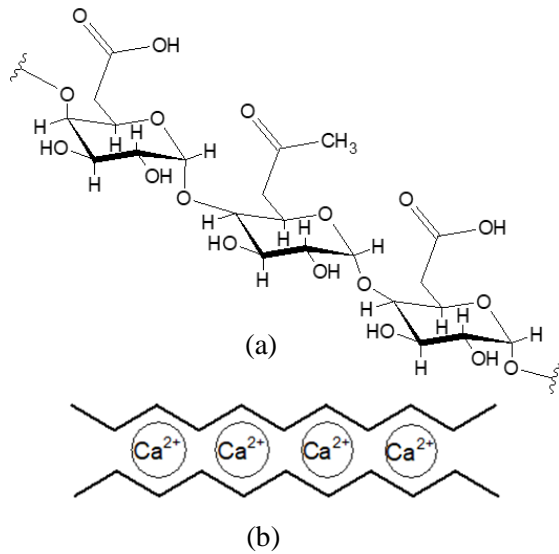
Polisakarida merupakan polimer dari monosakarida yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik. Secara umum berdasarkan fungsinya, polisakarida pada tumbuhan dapat digolongkan menjadi polisakarida struktur dan cadangan makanan. Polisakarida struktur merupakan polisakarida yang berfungsi membentuk jaringan kerangka tumbuhan, yaitu seperti selulosa, hemiselulosa, dan pektin (Held dkk., 2014), dengan pektin berkontribusi pada kekuatan dan ketahanan dinding sel (Robledo dan Vázquez, 2019). Sementara itu polisakarida sebagai cadangan makanan pada tumbuhan umum dijumpai sebagai pati, yang merupakan hasil fotosintesis tumbuhan dan berguna untuk menyuplai glukosa pada saat penyemaian biji (Vilaplana dkk., 2018).

3.1 Pektin

Pektin merupakan heteropolisakarida yang tersusun atas α -D-(1,4) galakturonan dan rhamnogalakturonan (Schols dan Voragen, 1996) dengan cabang gula netral seperti rhamnosa, arabinosa, galaktosa, dan xilosa (Vanitha dan Khan, 2019). Homogalakturonan (HG) merupakan polimer asam galakturonat yang terikat melalui ikatan α -1,4 glikosidik, dengan ilustrasi disajikan pada Gambar 2a. Pada umumnya monomer asam galakturonat pada struktur HG dapat teresterifikasi oleh gugus metil, yang digambarkan oleh nilai derajat metilesterifikasi (DM). Derajat metilesterifikasi dapat didefinisikan sebagai jumlah asam galakturonat yang dapat teresterifikasi, dengan asumsi satu monomer dapat teresterifikasi satu kali. Berdasarkan nilai DM-nya, pektin dapat digolongkan menjadi *low methoxy pectin* (LMP), jika DM <

50%, dan *high methoxy pectin* (HMP) untuk DM \geq 50% (Yapo dan Gnakri, 2014). Derajat metilesterifikasi dari pektin menentukan sifat fisik dari pektin, terutama sifat gelnya. *High methoxy pectin* dapat membentuk gel dalam kehadiran *co-solute*, seperti sukrosa, yang menurunkan aktivitas air dan pH asam, sehingga memaksa terjadinya interaksi antara rantai HG melalui ikatan hidrogen antara gugus karboksilat terprotonasi dan alkohol sekunder, atau melalui interaksi antar gugus fungsi metil ester pada HG (Yapo dan Gnakri, 2014). Berbeda dengan HMP, LMP membutuhkan kehadiran kation *multivalent* seperti Ca^{2+} . Pembentukan gel pada LMP mengikuti model *egg box*, disajikan pada Gambar 2b, dengan Ca^{2+} berfungsi sebagai jembatan antara monomer asam galakturonat pada rantai HG. Rhamnogalakturonan I (RG-I) merupakan rantai *backbone* yang tersusun atas α -L-rhamnosa dan α -D- asam galakturonat secara bergantian. Rhamnogalakturonan I pada umumnya memiliki struktur bercabang dengan α -L-arabinosa dan β -D-galaktosa yang terikat pada rhamnosa di rantai utama (Habtemariam, 2019). Rhamnogalakturonan II (RG-II) merupakan struktur pektin yang kompleks, dapat tersusun atas *backbone* α -D- asam galakturonat dengan cabang oligosakarida. Cabang oligosakarida tersebut dapat tersusun atas 12 macam monomer gula seperti D-asam glukoronat, L-rhamnosa, D-galaktosa, L-arabinosa, dan L-fukosa (O'Neill dkk., 2004). Homogalakturonan menyusun 60-65% dari total pektin, sementara RGI sebesar 20-35%, dan RGII sekitar 10% (Munarin dkk., 2012). Pektin umum dijumpai pada berbagai limbah buah-buahan, antara lain kulit jeruk (*Citrus sinensis*), kulit pisang (*Musa sp*), kulit lemon (*Citrus limon*), kulit

mangga (*Mangifera indica*), kulit durian (*Diriop zibethinus*), kulit nangka (*Artocarpus heterphyllus*), ampas tomat, dan lain-lain (Venkatanagaraju dkk., 2019).

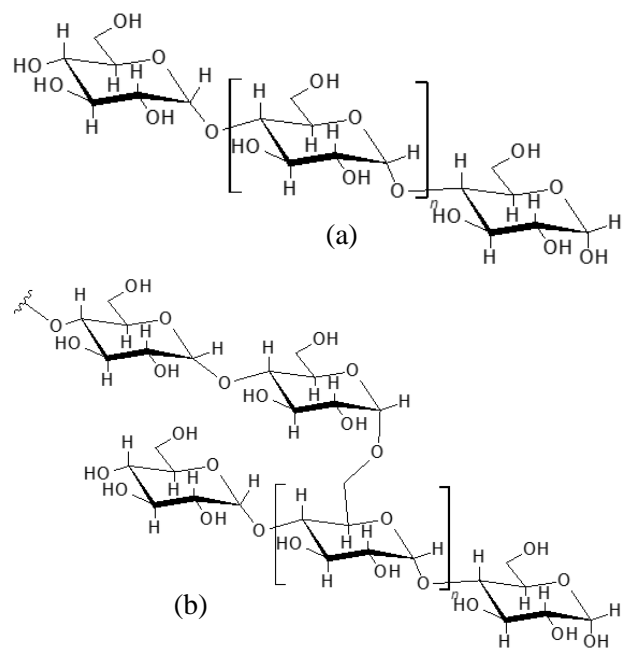


Gambar 2. Struktur homogalakturonan (a), ilustrasi model egg box (b) (diadaptasi dari: Robledo and Vázquez,(2019)

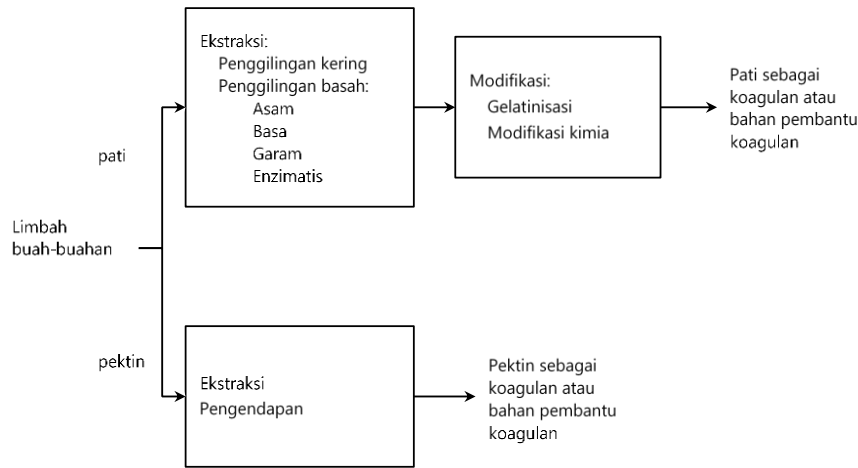
3.2 Pati

Seperti yang telah dijelaskan pada awal bagian 3, pati merupakan polisakarida yang berfungsi sebagai cadangan makanan yang digunakan oleh tumbuhan. Pada umumnya pati banyak terdapat pada bagian lembaga biji, kacang-kacangan, dan juga umbi (Vilaplana dkk., 2018). Pati sendiri terdiri atas amilosa dan amilopektin. Amilosa merupakan polimer glukosa yang memiliki struktur yang lurus dan terhubung dengan ikatan α -1,4 glikosidik, sementara amilopektin merupakan struktur bercabang yang terikat pada α -1,6 (Zobel, 1988). Ilustrasi struktur pati disajikan pada Gambar 3. Selain itu diketahui pula

bahwa pada umumnya rantai amilosa dapat tersusun atas 500 sampai 2000 unit glukosa, sementara amilopektin memiliki rantai yang relatif pendek, yaitu 18-25 unit (Egharevba, 2020). Secara keseluruhan amilosa dan amilopektin membentuk struktur granula pati. Secara visual granula pati dapat berbentuk bulat, lonjong, poligonal, sampai tidak beraturan, dengan ukuran 0,1 sampai 200 μm (Pérez dkk., 2009). Granula pati juga memiliki sifat semikristalin, dengan kristalinitas antara 15-45%. Lebih lanjut berdasarkan kristalinitasnya pati dibedakan menjadi tipe A yang umum dijumpai pada serealia, tipe B pada umbi-umbian, dan tipe C pada kacang-kacangan (Bertoft, 2017).



Gambar 3. Struktur amilosa (a) dan amilopektin (b) (diadaptasi dari: Egharevba, 2020)



Gambar 4. Skema tahapan persiapan pati dan pektin sebagai koagulan alami

Berbagai penelitian terkait karakterisasi pati yang berasal dari biji buah-buahan telah dilakukan. Secara umum diketahui bahwa pati biji buah-buahan tergolong pati tipe A (Hudak, 2018; Lee dkk., 1999; Madruga dkk., 2014; Shahrin dkk., 2018) dengan ukuran dan bentuk yang variatif dan ukuran rata-ratanya sebagai berikut: biji buah nangka (bulat; 7-11 μm) (Madruga dkk., 2014), biji durian (poligonal; rata-rata 4,4 μm) (Tongdang, 2008), biji lengkeng (poligonal, 20 μm) (Hudak, 2018), biji mangga (oval, 16 μm), biji rambutan (bulat, 7,6-8,7 μm) (Oates dan Powell, 1996).

4. Perlakuan Polisakarida sebagai Koagulan Alami

Pada umumnya baik pati maupun pektin dari limbah buah-buahan tidak dapat langsung digunakan sebagai koagulan alami. Dibutuhkan beberapa tahapan bergantung pada bahan aktif yang ingin diperoleh. Secara umum baik pektin maupun pati perlu diekstrak dari bahan bakunya (Choy dkk., 2017; Kebaili dkk., 2018). Akan tetapi, setelah diperoleh, ekstrak pati perlu dimodifikasi secara fisika, ataupun kimia sebelum dapat digunakan (Choy dkk., 2016; Yusoff dkk.,

2018). Sementara itu, pektin sudah dapat langsung digunakan sebagai koagulan alami. Skema sederhana perlakuan pati dan pektin dari limbah buah-buahan disajikan pada Gambar 4.

4.1 Ekstraksi Pektin

Proses ekstraksi pektin secara konvensional dilakukan dengan menggunakan pelarut air dalam kondisi asam disertai pengadukan. Beberapa jenis asam yang dapat digunakan antara lain asam sulfat, asam nitrat, asam fosfat, asam asetat, asam sitrat, dan asam klorida dengan konsentrasi 0,05 sampai 2 M disertai pemanasan (80-100 $^{\circ}\text{C}$) (Marić dkk., 2018). Penggunaan asam diperlukan untuk membantu memecah struktur sel tumbuhan (Sandarani, 2017) yang memungkinkan pektin berdifusi ke luar bersama pelarut. Konsentrasi asam merupakan faktor yang penting dalam proses ekstraksi pektin. Konsentrasi asam yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi pektin, dikarenakan reaksi hidrolisis yang menyebabkan depolimerisasi pektin menjadi rantai yang lebih pendek ataupun monomernya (asam galakturonat), serta deesterifikasi pada cabang metil pada

struktur pektin. Selain konsentrasi asam, temperatur dan waktu ekstraksi merupakan variabel proses yang saling berinteraksi, sehingga diperlukan optimasi kondisi proses ekstraksi (Chan dan Choo, 2013) untuk setiap bahan alam yang berbeda. Berbagai metode ekstraksi nonkonvensional banyak dikembangkan untuk meningkatkan perolehan, kinetika, ataupun menyasar kondisi ekstraksi yang lebih *mild* dan ramah lingkungan dari proses ekstraksi sebelumnya. Beberapa proses ekstraksi nonkonvensional seperti ekstraksi dengan bantuan gelombang ultrasonik dan gelombang mikro meningkatkan difusi sehingga mempersingkat waktu ekstraksi (Picot-Allain dkk., 2020). Sementara itu ekstraksi dengan bantuan enzim seperti selulase, hemiselulase, polygalacturonase, *xylase*, dan α -*amylase* membantu hidrolisis matriks dinding sel, sehingga meningkatkan permeabilitas sel (Marić dkk., 2018).

4.2 Ekstraksi dan Modifikasi Pati

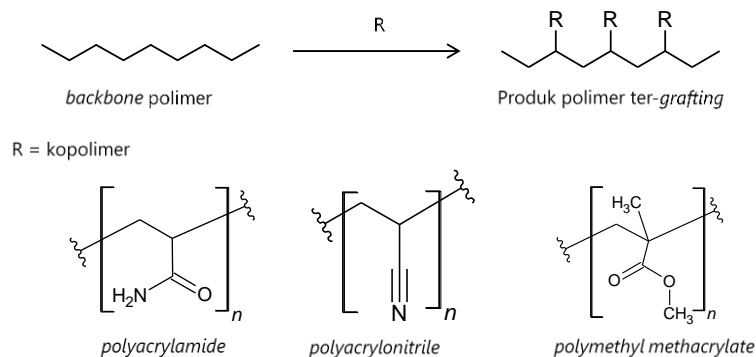
Proses ekstraksi pati dari limbah buah-buahan pada umumnya dapat mengikuti berbagai metode ekstraksi pati dari sereal dan umbi-umbian yang sudah dikenal lebih dahulu (Kringel dkk., 2020). Secara umum, proses ekstraksi dapat dibedakan menjadi penggilingan kering (*dry milling*) dan basah (*wet milling*). Penggilingan kering dilakukan untuk memisahkan biji-bijian seperti jagung berdasarkan bagian-bagiannya, misalkan kulit biji (*bran*), daging biji (*endosperm*), dan benih (*germ*) (Serna-Saldivar, 2010). Daging biji dapat diperoleh dalam bentuk utuh, bubur, ataupun tepung. Sementara itu penggilingan basah lebih dikhususkan untuk memisahkan berdasarkan komponen-komponennya seperti pati, protein, serat, lemak, dsb. Pati

yang diperoleh dari proses penggilingan kering dan basah akan memiliki kemurnian dan karakteristik yang berbeda. Pada ekstraksi pati biji durian yang dilakukan oleh Zamri, dkk. (2018), diperoleh pati dari proses penggilingan kering memiliki perolehan yang tinggi dengan warna kecoklatan dapat berasal dari kulit biji yang ikut terbawa, ataupun kerusakan pada jaringan endosperm yang menyebabkan reaksi oksidatif pencoklatan pada pati (Lattanzio dkk., 2012). Di sisi lain, pati yang diperoleh dari metode penggilingan basah memiliki perolehan yang rendah berwarna putih yang menunjukkan kandungan pati lebih murni (Zamri dkk., 2018). Lebih lanjut, dipaparkan bahwa granula pati yang dihasilkan dari proses penggilingan kering memiliki bentuk tidak teratur dan memiliki cacat dari bentuk yang seharusnya membulat. Hal ini disebabkan oleh gaya mekanis yang berkontak dengan bahan dalam proses penggilingan. Proses penggilingan basah memiliki kemurnian yang lebih tinggi dikarenakan pati akan tersuspensi ke dalam fase cair, sehingga terpisah dari serat kasar, lemak, ataupun pengotor lainnya yang tidak larut di dalam air. Selain penambahan bahan kimia dalam prosesnya berupa basa (NaOH), garam ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), asam (asam askorbat, asam oksalat, asam sitrat) ataupun enzim (α -amilase, pektinase) dapat meningkatkan kemurnian pati yang diperoleh (Kringel dkk., 2020; Palacios-Fonseca dkk., 2013; Zhang dkk., 2019;).

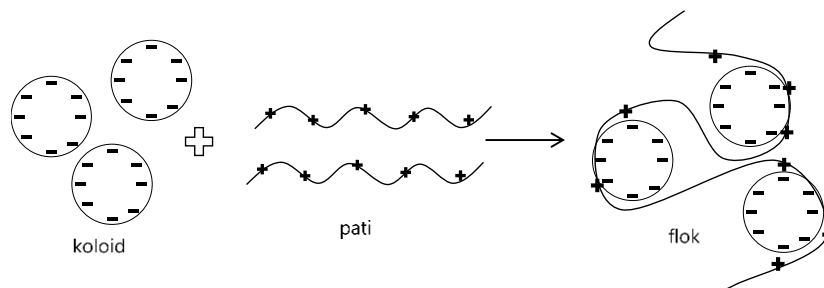
Dalam penggunaannya sebagai koagulan alami, pati tidak dapat digunakan langsung karena pati akan tersuspensi di dalam air sehingga membuat air menjadi keruh. Pada penelitian yang dilakukan oleh Choy, dkk. (2016), penggunaan pati beras, gandum, jagung, dan kentang tanpa perlakuan,

meningkatkan kekeruhan sampai 50% pada larutan limbah sintetik kaolin. Hasil serupa juga diperoleh pada penggunaan pati biji durian, baik yang diperoleh melalui penggilingan kering maupun basah. Pati biji durian memberikan penghilangan warna yang rendah (<10%) dan peningkatan pada nilai *chemical oxygen demand* (COD) sampai 20%, kekeruhan (sampai 80%), dan padatan tersuspensi (sampai 60%) pada saat digunakan dalam pengolahan air lindi (Zamri dkk., 2018). Oleh karena itu, dibutuhkan berbagai perlakuan untuk membuat pati dapat digunakan sebagai koagulan alami. Perlakuan yang paling sederhana adalah gelatinisasi pati. Pada mulanya, amilosa berada di dalam struktur granula pati sehingga tidak dapat berinteraksi dengan partikel koloid. Setelah melalui proses gelatinisasi, granula pati akan mengembang

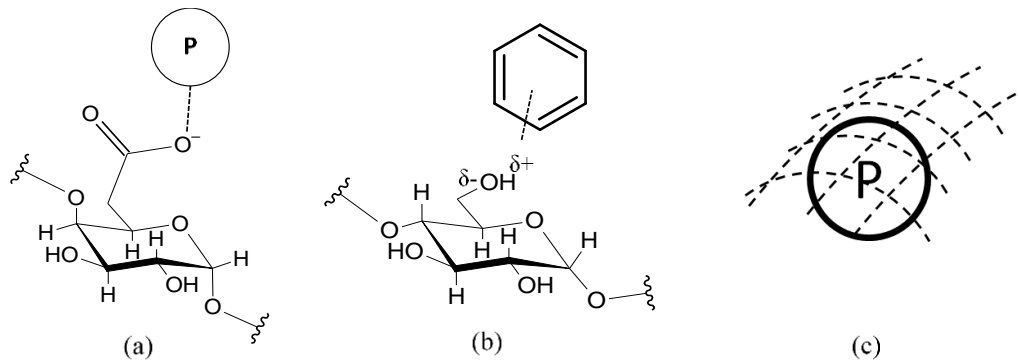
dan pecah, sehingga amilosa keluar dari granula pati, sehingga dapat berinteraksi dengan partikel koloid sebagai koagulan melalui mekanisme *interparticle bridging* (Choy dkk., 2016). Perlakuan lain yang umum digunakan adalah pencangkokan (*grafting*) kopolimer ke dalam struktur *backbone* pati, sehingga menghasilkan polimer yang bermuatan. Beberapa kopolimer yang umum digunakan antara lain: *polyacrylamide*, *polyacrylonitrile*, *polymethyl methacrylate*, dan lain-lain (Srinivasan, 2013). Struktur pati yang sudah di-*grafting* menjadi polielektrolit kationik yang dapat bekerja dengan efektif sebagai koagulan melalui mekanisme netralisasi muatan dan *interparticle bridging* (Oladoja dkk., 2017a). Ilustrasi proses *grafting* dan kopolimer yang umum digunakan disajikan pada Gambar 5



Gambar 5. Ilustrasi proses *grafting* dan beberapa struktur kopolimer (diadaptasi dari (Bhattacharya dan Misra, 2004; Lee dkk., 2014)



Gambar 6. Ilustrasi mekanisme *interparticle bridging* (diadaptasi dari: Choy dkk., 2015)



Gambar 7. Ilustrasi interaksi pektin dengan koloid (a), pati dengan inti aromatik benzena (b), dan koagulasi gel pektin (diadaptasi dari Okuda dkk., 2001; Yin, 2010); P adalah partikel koloid

5. Mekanisme dan Kinerja Polisakarida sebagai Koagulan

Koloid dapat terdestabilisasi oleh koagulan melalui mekanisme koagulasi seperti netralisasi muatan, *interparticle bridging*, kompresi lapisan ganda, dan *sweep flocculation*. Di antara 4 mekanisme tersebut, *interparticle bridging* merupakan mekanisme yang umum dijumpai pada proses koagulasi dengan polisakarida. Molekul polisakarida yang berupa polimer dengan rantai panjang akan teradsorpsi pada permukaan koloid. Bagian "ekor" yang tidak teradsorpsi di partikel koloid tersebut dapat mengadsorpsi partikel koloid lain sehingga menjembatani antar partikel koloid sehingga membentuk flok yang dapat mengendap. Ilustrasi mekanisme *interparticle bridging* disajikan pada Gambar 6.

Lebih lanjut, menurut Yin (2010), struktur monomer pada polisakarida memengaruhi proses *bridging* yang terjadi. Pada pektin, interaksi antara pektin dan partikel koloid terjadi antara gugus fungsi asam karboksilat pada struktur asam galakturonat yang terdeprotonasi (Gambar 7a), memungkinkan terjadinya *chemisorption* dilanjutkan *interparticle bridging* (Yin, 2010). Sementara

itu pada proses koagulasi pewarna sintesis, interaksi dapat terjadi antara atom H pada –OH yang cenderung kekurangan elektron dengan elektron π yang beresonansi pada inti aromatis benzena (Yoshida dkk., 1964) yang umum dijumpai pada struktur pewarna sintesis (Gambar 7b). Mekanisme lain yang mungkin untuk koagulasi pektin adalah pemanfaatan sifat pektin yang dapat membentuk gel dengan kehadiran ion bivalen seperti Ca^{2+} (Gambar 2b) hingga pada akhirnya terbentuk struktur gel menyerupai jaring (Sriamornsak, 2003). Menurut Okuda, dkk (2001) struktur menyerupai jaring ini memungkinkan peningkatan efisiensi koagulasi karena dapat memerangkap partikel koloid, serupa dengan mekanisme *sweep flocculation* (Gambar 7c).

Seperti berbagai koagulan pada umumnya, kinerja polisakarida sebagai koagulan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti pH dan dosis koagulan. Mengingat mekanisme koagulasi *interparticle bridging* yang pada umumnya didahului dengan adsorpsi, pH berperan penting dalam muatan polisakarida. Perbedaan muatan antara polisakarida dan koloid memunculkan interaksi elektrostatik (Gambar 6 dan Gambar 7a) yang memungkinkan proses adsorpsi

berlangsung efektif. Oleh karena itu, seringkali informasi terkait titik muatan nol (*point of zero charge* $-p_{zc}$) menjadi penting (Kebaili dkk., 2018). Dosis koagulan merupakan parameter yang sangat dipengaruhi oleh konsentrasi koloid di dalam air yang ingin diolah. Secara umum, pada dosis koagulan yang rendah, tidak terdapat cukup koagulan untuk mengadsorpsi partikel koloid sehingga penghilangan partikel koloid relatif minimum. Terdapat kondisi dosis optimum yang memberikan total muatan *zeta potential* di dalam air mendekati nol. Sementara itu pada penambahan koagulan yang berlebihan, partikel koloid cenderung mengalami restabilisasi akibat kelebihan muatan.

Secara khusus, dalam aplikasi pektin sebagai koagulan alami, konsentrasi ion bivalen seperti Ca^{2+} berpengaruh dalam efektivitas koagulasi. Hal ini terkait dengan sifat pektin yang membentuk gel melalui interaksi *egg box* yang dapat memengaruhi mekanisme koagulasi pektin yang telah dijelaskan sebelumnya. Penelitian secara khusus terkait pengaruh konsentrasi ion Ca^{2+} terhadap kinerja koagulasi pektin belum umum dilakukan. Akan tetapi penelitian serupa dengan alginat, yang memiliki struktur yang mirip dengan pektin (Braccini dan Perez, 2001), telah banyak dipelajari. Pada penelitian Vijayaraghavan dan Shanthakumar (2016), peningkatan konsentrasi Ca^{2+} dari 1 sampai 6 g/L dengan koagulan alginat memberikan peningkatan persentase penghilangan zat warna. Sementara itu pada konsentrasi Ca^{2+} yang rendah, kinerja koagulasi menjadi rendah karena tidak terbentuknya struktur gel (Vijayaraghavana dan Shanthakumara, 2015). Investigasi lebih lanjut terkait fenomena serupa dalam konteks pektin sebagai

koagulan perlu dilakukan. Beberapa penelitian yang memanfaatkan pektin dan pati sebagai koagulan alami disajikan pada Tabel 2.

Berbagai penelitian yang disajikan pada Tabel 2 memiliki cakupan jenis limbah berupa air keruh sintetik (dari bentonit atau kaolin) ataupun air limbah nyata pada skala laboratorium. Menarik untuk dicermati bahwa penggunaan pektin dan pati cukup banyak sebagai bahan pembantu koagulan dibandingkan sebagai koagulan tunggal. Penambahan polimer rantai panjang seperti pati dan pektin membantu proses koagulasi sehingga menurunkan penggunaan koagulan anorganik (alum, $FeCl_3$) sehingga proses pengolahan limbah lebih efektif. Seperti pada penelitian Choy dkk. (2017), penggunaan pati dari biji nangka yang telah digelatinisasi dapat meningkatkan persentase penurunan kekeruhan air sebesar 25% jika dibandingkan alum saja. Hal ini diduga sebagai akibat dari mekanisme *interparticle bridging* yang lebih dominan, membantu pembentukan flok, sehingga menghasilkan efek sinergis dengan koagulan anorganik (Chua dkk., 2020). Di sisi lain, tidak teramati kecenderungan pada dosis ataupun pH koagulasi, karena kedua variabel tersebut sangat bergantung pada jenis koagulan, konsentrasi, dan karakteristik limbah yang diolah.

6. Potensi Pengembangan dan Tantangan

Sekalipun memiliki potensi yang besar, pemanfaatan limbah buah-buahan masih relatif terbatas, terutama jika dibandingkan dengan polisakarida lain yang banyak dipelajari sebagai koagulan alami seperti kitosan (Asif dkk., 2016; Meraz dkk., 2016; Lichtfouse dkk., 2019) ataupun *gum* (galaktomannan) dari biji-bijian (Sanghi dkk.,

2002; Sanghi dkk., 2006; Shak dan Wu, 2014; Subramonian dkk., 2014). Selain itu, pada umumnya studi yang dilakukan terbatas pada pengembangan skala laboratorium baik dengan limbah sintetis maupun limbah nyata. Oleh karena itu eksplorasi bahan baku dan juga pengembangan penelitian ke arah skala pilot dapat mendorong komersialisasi produk. Di sisi lain, ketersediaan bahan baku

relatif dapat terpenuhi dengan memanfaatkan limbah buah-buahan yang berasal dari industri pengolahan produk buah-buahan, seperti buah kaleng, jus, selai, dsb. Selain itu, teknologi ekstraksi dan isolasi pektin serta pati sudah relatif mapan, sehingga tidak menjadi kendala berarti.

Tabel 2. Kinerja pektin dan pati dari limbah buah-buahan sebagai koagulan alami

Buah	Bahan aktif	Perlakuan	Limbah	Dosis	pH	% Penurunan	Pustaka
Jeruk (biji dan kulit)	pektin	Ekstraksi: HCl pH 1,5, 1 jam, 80-82 °C Presipitasi: etanol 2 x volume larutan	Limbah sintetis bentonit Turbiditas: 500NTU	6 mg/L	3	Turbiditas: 99,6%	(Kebaili dkk., 2018)
Nangka (biji)	pati	Ekstraksi: NaOH 0,05M, 3 jam Gelatinisasi: 3 g / 100mL air	Limbah sintetis kaolin turbiditas: 165 NTU	Alum: 2,1 mg/L Pati: 60 mg/L	6	Turbiditas: 75%	(Choy dkk., 2017)
Pisang (batang semu)	pati	Ekstraksi: aquades	Limbah cair industri TSS: 8880 mg/L; turbiditas 81250 NTU	300 mL/L	7	TSS: 88,63% Turbiditas: 98,48%	(Alwi dkk., 2013)
Durian (biji)	pati	Ekstraksi: air demineralisasi Modifikasi: <i>cross-linking</i> dengan <i>epichlorohydrin</i> (1,3% b/b)	Air lindi Padatan tersuspensi: 750 mg/L Turbiditas: 243 NTU COD: 3770 mg/L	PAC: 2200 mg/L Pati durian: 400 mg/L	5	padatan tersuspensi: 81,3% Turbiditas: 98,8% COD: 83,8%	(Yusoff dkk., 2018)
Jeruk	pektin	-	Limbah sintetis kaolin 0,4 g/L	Alum: 0,54 mM Pektin: 2,73 mg/L	8,46	Turbiditas: 99,77%	(Ho dkk., 2009)
Jeruk	pektin	-	Limbah sintetis kaolin	FeCl ₃ : 0,69 mM Pektin: 5 mg/L	3	Turbiditas: 94,62%	(Ho dkk., 2010)
Mangga (biji)	pati	<i>Defatting</i> dengan ekstraksi heksana Pengecilan ukuran (75 µm)	Limbah cair Turbiditas: 796 NTU COD: 1000 mg/L BOD: 140mg/L TDS: 1728 mg/L	Bubuk biji: 25mg/L	6,9	Turbiditas: 89,9% COD: 84% BOD:96,45 TDS: 19,2%	(Kuhiyop dkk., 2020)

Investigasi terkait metode dan kondisi modifikasi pati dengan *grafting* merupakan bagian yang perlu dioptimasi, karena proses modifikasi yang cukup rumit, disertai penggunaan bahan kimia dan energi dalam sintesisnya dapat berkontribusi terhadap harga produk koagulan yang diperoleh. Hal ini dikarenakan sisi ekonomis dari produk juga merupakan faktor penting untuk dipertimbangkan, diteliti, dan dioptimasi. Seperti yang diungkapkan oleh Lee (2017) biaya produksi koagulan alami dari okra berkisar 10 kali dan pati yang di-*grafting* 30 kali lebih tinggi dibanding koagulan kimia (\$ 4-5/ kg) (Lee, 2017). Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Guo (2020), biaya pengolahan limbah zat warna biru reaktif (*reactive blue*) dengan menggunakan koagulan alami dari lignin yang di-*grafting* 10 kali lebih tinggi dibandingkan kombinasi *polyaluminium chloride* (PAC) dan *polyacrylamide* (PAM) yaitu sekitar \$0,0054/ ton air limbah.

Studi terkait toksisitas dalam penggunaan produk koagulan berbasis polisakarida, secara khusus untuk produk polisakarida yang di-*grafting* juga perlu diteliti lebih lanjut. Hal ini diakibatkan adanya kemungkinan kandungan monomer, seperti akrilamida, dalam ko-polimer yang bersifat toksik, ataupun adanya risiko degradasi atau hidrolisis polimer sehingga melepaskan rantai-rantai yang lebih pendek ke lingkungan (Xiong dkk., 2018). Lebih lanjut, studi biodegradabilitas dan toksisitas dari lumpur hasil koagulasi juga menjadi penting dalam rangka menunjang keberlanjutan dari pemanfaatannya (Ang dan Mohammad, 2020).

Kombinasi teknologi dalam pengolahan air dan limbah cair juga menjadi potensi

pengembangan dalam pemanfaatan polisakarida sebagai koagulan alami. Antara lain, komposit polisakarida dengan besi oksida nanopartikel (Nsom dkk., 2019), kombinasi koagulasi–ozonasi (Rasool dkk., 2016), koagulasi–adsorpsi (Oladoja dkk., 2017b), membran–koagulasi–filtrasi (Zhao dkk., 2015) merupakan beberapa alternatif kombinasi proses yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa dan efisiensi pengolahan air-limbah cair.

4. Kesimpulan

Pada tinjauan ini telah dibahas mengenai potensi polisakarida, secara khusus pektin dan pati, dari limbah buah-buahan sebagai koagulan alami. Pektin dan pati dapat diekstrak dari kulit atau biji limbah buah dengan menggunakan pelarut air dan kontak secara dispersi. Pektin dapat digunakan langsung sebagai koagulan alami, sementara pati pada umumnya diperlukan modifikasi seperti gelatinisasi dan *grafting*. Pemberian perlakuan pada pati dapat meningkatkan efektivitas kinerjanya. Dalam penggunaannya sebagai koagulan, pH dan dosis koagulan merupakan parameter yang memengaruhi kinerja koagulasi. Selain itu, kehadiran ion bivalen seperti Ca^{2+} dapat berperan dalam proses koagulasi pektin, akibat terjadinya interaksi pektin- Ca^{2+} melalui mekanisme *egg box*. Diperlukan berbagai investigasi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi produksi koagulan alami dari pektin dan pati yang berasal dari limbah buah-buahan agar dapat dikomersialisasi. Selain itu, studi lanjut mengenai dampak lingkungan dan sosial juga perlu dilakukan agar tercapai keberlanjutan melalui penggunaan koagulan alami.

Daftar Pustaka

- Ahmad, I. and Chua, P. C., 2013, Trends in production and trade of tropical fruits in ASEAN countries, *Acta Hort.*, 975, 559-580
- Alwi, H., Idris, J., Musa, M. and Hamid, K. H. K., 2013, A preliminary study of banana stem juice as a plant-based coagulant for treatment of spent coolant wastewater, *Journal of Chemistry*, 2013, No. 165057
- Ang, T.-H., Kiatkittipong, K., Kiatkittipong, W., Chua, S.-C., Lim, J. W., Show, P.-L., Bashir, M. J. K. and Ho, Y.-C., 2020, Insight on extraction and characterization of biopolymers as the green coagulants for microalgae harvesting, *Water*, 12 (5), No. 1388
- Ang, W. L. and Mohammad, A. W., 2020, State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment, *J. Clean Prod.*, 262, No. 121267
- Asif, M. B., Majeed, N., Iftexhar, S., Habib, R., Fida, S. and Tabraiz, S., 2016, Chemically enhanced primary treatment of textile effluent using alum sludge and chitosan, *Desalin. Water Treat.*, 57, 7280-7286
- Asrafuzzaman, M., Fakhrudin, A. N. M. and Hossain, M. A., 2011, Reduction of turbidity of water using locally available natural coagulants, *ISRN Microbiology*, 2011, 1-6
- Aziz, H. A. and Sobri, N. I. M., 2015, Extraction and application of starch-based coagulants from sago trunk for semi-aerobic landfill leachate treatment, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 22, 16943-16950
- Bele, A. A., Jadhav, V. M. and Kadam, V. J., 2010, Potential of tannins: A review, *Asian Journal of Plant Sciences*, 9(4), 209-214
- Bertoft, E., 2017, Understanding starch structure: Recent progress, *Agronomy*, 7(3), No. 56
- Bhattacharya, A. and Misra, B. N., 2004, Grafting: A versatile means to modify polymers: Techniques, factors, and applications, *Prog. Polym. Sci.*, 29(8), 767-814
- Birima, A. H., Hammad, H. A., Desa, M. N. M. and Muda, Z. C., 2013, Extraction of natural coagulant from peanut seeds for treatment of turbid water IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 16, 1-4
- BPS (2020), Tabel dinamis subjek hortikultura, diakses 31 Maret 2020 dari <https://bps.go.id/subject/55/hortikultura.html#subjekViewTab6>.
- Braccini, I. and Perez, S., 2001, Molecular basis of Ca²⁺-induced gelation in alginates and pectins: The egg-box model revisited, *Biomacromolecules*, 2, 1089-1096
- Chan, S.-Y. and Choo, W.-S., 2013, Effect of extraction conditions on the yield and chemical properties of pectin from cocoa husks, *Food Chem.*, 141, 3752-3758
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E. and Ramanan, R. N., 2014, Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification, *J. Environ. Sci.*, 26(11), 2178-2189
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., Yang, B., Phang, S.-M. and Ramanan, R. N., 2017, Isolation, characterization and the potential use of starch from jackfruit seed wastes as a coagulant aid for treatment of turbid water, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 2876-2889
- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y. and Ramanan, R. N., 2015, A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants

- in water clarification, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12, 367-390
- Choy, S. Y., Prasad, K. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E. and Ramanan, R. N., 2016, Performance of conventional starches as natural coagulants for turbidity removal, *Ecological Engineering*, 94, 352-364
- Chua, S.-C., Chong, F.-K., Malek, M. A., Mustafa, M. R. U., Ismail, N., Sujarwo, W., Lim, J.-W. and Ho, Y.-C., 2020, Optimized use of ferric chloride and sesbania seed gum (SSG) as sustainable coagulant aid for turbidity reduction in drinking water treatment, *Sustainability*, 12, Article No. 2273
- Ciriminna, R., Chavarría-Hernández, N., Hernández, A. I. R. and Pagliaro, M., 2015, Pectin: A new perspective from the biorefinery standpoint, *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, 9(4), 368-377
- Egharevba, H. O., 2020, *Chemical Properties of Starch and Its Application in the Food Industry*, IntechOpen, London
- Emaga, T. H., Robert, C., Ronkart, S. N., Wathélet, B. and Paquot, M., 2008, Dietary fiber components and pectin chemical features of peels during ripening in banana and plantain varieties, *Biores. Technol.*, 99, 4346-4354
- Freitas, T. K. F. S., Almeida, C. A., Manholer, D. D., Geraldino, H. C. L., Souza, M. T. F. d. and Garcia, J. C., 2018, Review of Utilization Plant-based Coagulants as Alternatives to Textile Wastewater Treatment. in: S. S. Muthu (Eds.), *Textile Science and Clothing Technology*, Springer Nature, Singapore, pp 27-79.
- Grenda, K., Arnold, J., Hunkeler, D., Gamelas, J. A. F. and Rasteiro, M. G., 2018, Tannin-based coagulants from laboratory to pilot plant scales for coloured wastewater treatment, *BioRes*, 13(2), 2727-2747.
- Habtemariam, S., 2019, *The Chemical and Pharmacological Basis of Okra (Abelmoschus esculentus (L.) moench) as Potential Therapy for Type 2 Diabetes in Medicinal Foods as Potential Therapies for Type-2 Diabetes and Associated Diseases*, Elsevier, Amsterdam, 307-332.
- Held, M. A., Jiang, N., Basu, D., Showalter, A. M. and Faik, A., 2014, Plant cell wall polysaccharides, in: Ramawat K., Mérillon JM. (Eds) *Polysaccharides*, Springer, Cham.
- Ho, Y. C., Norli, I., Alkarkhi, A. F. M. and Morad, N., 2009, Analysis and optimization of flocculation activity and turbidity reduction in kaolin suspension using pectin as a biopolymer flocculant, *Water Sci. Technol.*, 60(3), 771-781.
- Ho, Y. C., Norli, I., Alkarkhi, A. F. M. and Morad, N., 2010, Characterization of biopolymeric flocculant (pectin) and organic synthetic flocculant (PAM): A comparative study on treatment and optimization in kaolin suspension, *Biores Technol*, 101, 1166-1174
- Hu, Z., Zhao, L., Hu, Z. and Wang, K., 2018, Hierarchical structure, gelatinization, and digestion characteristics of starch from longan (*Dimocarpus longan lour.*) seeds, *Molecules*, 23, No. 3262.
- Karim, R., Uddin, M. B. and Jubayer, M. F., 2014, Optimization of pectin isolation method from pineapple (*Ananas comosus L.*) waste, *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 6(2), 116-122.
- Kebaili, M., Djellali, S., Radjai, M., Drouiche, N. and Lounici, H., 2018, Valorization of orange industry residues to form a natural coagulant and adsorbent, *J. Ind. Eng. Chem.*, 64, 292-299.

- Kringel, D. H., Dias, A. R. G., Zavareze, E. d. R. and Gandra, E. A., 2020, Fruit wastes as promising sources of starch: Extraction, properties, and applications, *Starch*, 72 (3-4), No 1900200.
- Kristianto, H., 2017, The potency of indonesia native plants as natural coagulant: A mini review, *Water Conserv. Sci. Eng.*, 2, 51-60.
- Kristianto, H., Paulina, S. and Soetedjo, J. N. M., 2018, Exploration of various Indonesian indigenous plants as natural coagulant for synthetic turbid water, *IJTech*, 9(3), 464-471.
- Kristianto, H., Prasetyo, S. and Sugih, A. K., 2019a, Pemanfaatan ekstrak protein dari kacang-kacangan sebagai koagulan alami, *Jurnal Rekayasa Proses*, 13(2), 65-80.
- Kristianto, H., Rahman, H., Prasetyo, S. and Sugih, A. K., 2019b, Removal of congo red aqueous solution using *Leucaena leucocephala* seed's extract as natural coagulant, *Appl. Water Sci.*, 9(4), No 88.
- Kuhyiop, E. A., Adie, D. B. and Abubakar, U. A., 2020, Application of *Mangifera indica* (mango) and *Phoenix dactylifera* (dates) seeds powders as coagulants in wastewater treatment, *Nigerian Journal of Technology*, 39(1), 269-277.
- Kukic, D. V., Sciban, M. B., Prodanovic, J. M., Tepic, A. N. and Vasic, M. A., 2015, Extracts of fava bean (*Vicia faba l.*) seeds as natural coagulants, *Ecol. Eng.*, 84, 229-232.
- Kumar, V., Othman, N. and Asharuddin, S., 2017, Applications of natural coagulants to treat wastewater – a review, *MATEC Web of Conferences*, 103, 06016.
- Lattanzio, V., Cardinali, A. and Linsalata, V., 2012, Plant Phenolics: A Biochemical and Physiological Perspective, in: Cheynier, V. Sarni-Manchado P. and Quideau S. (Eds.), *Recent Advances in Polyphenol Research.*, John Wiley & Sons Ltd, New Jersey
- Lee, C. S., 2017, Extraction of bio-flocculant from okra using hydrothermal and microwave extraction methods combined with a techno-economic assessment, PhD thesis, University of Nottingham.
- Lee, C. S., Chong, M. F., Robinson, J. and Binner, E., 2014, A review on development and application of plant-based bioflocculants and grafted bioflocculants, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53(48), 18357-18369.
- Lee, S.-G., Kim, H.-S. and Son, J.-Y., 1999, Physicochemical properties of the durian seed starch, *Korean J. Food Sci. Technol.*, 31(6), 1410-1414.
- Lichtfouse, E., Crini, N. M., Fourmentin, M., Zemmouri, H., Nascimento, I. O. d. C., Queiroz, L. M., Tadza, M. Y. M., Corrales, L. A. P., Pei, H., Wilson, L. D. and Crini, G., 2019, Chitosan for direct bioflocculation of wastewater, *Environ. Chem. Lett.*, 17, 1603-1621.
- Madruga, M. S., Albuquerque, F. S. M. d., Silva, I. R. A., Amaral, D. S. d., Magnani, M. and Neto, V. Q., 2014, Chemical, morphological and functional properties of Brazilian jackfruit (*Artocarpus heterophyllus l.*) seeds starch, *Food Chem.*, 143, 440-445.
- Marić, M., Grassino, A. N., Zhu, Z., Barba, F. J., Brnčić, M. and Brnčić, S. R., 2018, An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: Ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction, *Trends Food Sci. Technol.*, 76, 28-37.
- Mbogo, S. A., 2008, A novel technology to improve drinking water quality using natural treatment methods in rural Tanzania, *Environ. Health*, 70(7), 46-50.

- Meraz, K. A. S., Vargas, S. M. P., Maldonado, J. T. L., Bravo, J. M. C., Guzman, M. T. O. and Maldonado, E. A. L., 2016, Eco-friendly innovation for nejayote coagulation–flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements, *Chem. Eng. J.*, 284, 536-542.
- Munarin, F., Tanzi, M. C. and Petrini, P., 2012, Advances in biomedical applications of pectin gels, *International Journal of Biological Macromolecules*, 51(4), 681-689.
- Nsom, M. V., Etape, E. P., Tendo, J. F., Namond, B. V., Chongwain, P. T., Yufanyi, M. D. and William, N., 2019, A green and facile approach for synthesis of starch-pectin magnetite nanoparticles and application by removal of methylene blue from textile effluent, *Journal of Nanomaterials*, 2019, No 4576135.
- O'Neill, M. A., Ishii, T., Albersheim, P. and Darvill, A. G., 2004, Rhamnogalacturonan II: Structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide, *Annu. Rev. Plant Biol.*, 55, 109–139.
- Oates, C. G. and Powell, A. D., 1996, Bioavailability of carbohydrate material stored in tropical fruit seeds, *Food Chem.*, 56(4), 405-414.
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W. and Okada, M., 2001, Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds, *Wat. Res.*, 35(3), 830-834.
- Oladoja, N. A., Unuabonah, E. I., Amuda, O. S. and Kolawole, O. M., 2017a,. Mechanistic Insight into the Coagulation Efficiency of Polysaccharide-based Coagulants, In: *Polysaccharides as a Green and Sustainable Resources for Water and Wastewater Treatment*, SpringerBriefs in Molecular Science, Springer, Cham
- Oladoja, N. A., Unuabonah, E. I., Amuda, O. S. and Kolawole, O. M., 2017b, Operational Principles and Material Requirements for Coagulation/Flocculation and Adsorption-based Water Treatment Operations, In: *Polysaccharides as a Green and Sustainable Resources for Water and Wastewater Treatment*, SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Cham
- Oladoja, N. A., Unuabonah, E. I., Amuda, O. S. and Kolawole, O. M., 2017c, Tapping into microbial polysaccharides for water and wastewater purifications, In: *Polysaccharides as a Green and Sustainable Resources for Water and Wastewater Treatment*, SpringerBriefs in Molecular Science, Springer, Cham
- Palacios-Fonseca, A. J., Castro-Rosas, J., Gomez-Aldapa, C. A., Tovar-Benitez, T., Millan-Malo, B. M., Real, A. d. and Rodriguez-Garcia, M. E., 2013, Effect of the alkaline and acid treatments on the physicochemical properties of corn starch, *CyTA - Journal of Food*, 11(S1), 67-74.
- Pérez, S., Baldwin, P. M. and Gallant, D. J., 2009, Structural Features of Starch Granules I, in: BeMiller, J. and Whistler, R. (Eds.), *Starch: Chemistry and Technology 3rd*, Elsevier, Amsterdam
- Picot-Allain, M. C. N., Ramasawmy, B. and Emmambux, M. N., 2020, Extraction, characterization, and application of pectin from tropical and sub-tropical fruits: A review, *Food Reviews International*, In Press, DOI: 10.1080/87559129.2020.1733008
- Quincieu, E., 2015, Summary of Indonesia's Agriculture, Natural Resources, and

- Environment Sector Assessment, Asian Development Bank.
- Rasool, M. A., Tavakoli, B., Chaibakhsh, N., Pendashteh, A. R. and Mirroshandel, A. S., 2016, Use of a plant-based coagulant in coagulation–ozonation combined treatment of leachate from a waste dumping site, *Ecol. Eng.*, 90, 431-437.
- Robledo, V. R. and Vázquez, L. I. C., 2019, Pectin - Extraction, Purification, Characterization, and Applications, in: Masuelli, M. (Eds), *Pectins: Extraction, Purification, Characterization and Applications*. IntechOpen, London
- Saadany, R. M. A. E., Foda, Y. H. and Saadany, F. M. E., 1980, Studies on starch extracted from mango seeds (*Mangifera indica*) as a new source of starch, *Starch*, 32(4), 113-116.
- Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M. and Lobo, M. G., 2018, Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds, their extraction, and possible utilization, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 17(3), 512-531.
- Sandarani, M. D. J. C., 2017, A review: Different extraction techniques of pectin, *J. Pharmacogn. Nat. Prod.*, 3(3), No 1000143.
- Sanghi, R., Bhattacharya, B., Dixit, A. and Singh, V., 2006, *Ipomoea dasysperma* seed gum: An effective natural coagulant for the decolorization of textile dye solutions, *Journal of Environmental Management*, 81(1), 36-41.
- Sanghi, R., Bhattacharya, B. and Singh, V., 2002, *Cassia angustifolia* seed gum as an effective natural coagulant for decolourisation of dye solutions, *Green Chemistry*, 4, 252–254.
- Saranya, P., Ramesh, S. T. and Gandhimathi, R., 2014, Effectiveness of natural coagulants from non-plant-based sources for water and wastewater treatment—a review, *Desalin. Water Treat.*, 52(31-33), 6030-6039.
- Schols, H. A. and Voragen, A. G. J., 1996, Complex pectins: Structure elucidation using enzymes, *Prog. Biotechnol.*, 14, 3–19.
- Serna-Saldivar, S. O., 2010, *Cereal Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes*, CRC Press, Boca Raton
- Shahrim, N. A., Sarifuddin, N. and Ismail, H., 2018, Extraction and characterization of starch from mango seeds, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 1082, Article No 012019.
- Shak, K. P. Y. and Wu, T. Y., 2014, Coagulation–flocculation treatment of high-strength agro-industrial wastewater using natural *Cassia obtusifolia* seed gum: Treatment efficiencies and flocs characterization, *Chemi. Eng. J.*, 256, 293-305.
- Sillanpaa, M., Ncibi, M. C., Matilainen, A. and Vepsalainen, M., 2018, Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review, *Chemosphere*, 190, 54-71
- Sotheeswaran, S., Nand, V., Matakite, M. and Kanayathu, K., 2011, *Moringa oleifera* and other local seeds in water purification in developing countries, *Res. J. Chem. Environ*, 15(2), 135-138
- Sriamornsak, P., 2003, Chemistry of pectin and its pharmaceutical uses: A review, *Silpakorn Univ Int. J.*, 3, 206–228
- Srinivasan, R., 2013, Natural Polysaccharides as Treatment Agents for Wastewater, in: Mishra, A. and Clark J. H., *Green Materials for Sustainable Water Remediation and Treatment.*, Royal Society of Chemistry, London
- Subramonian, W., Wu, T. Y. and Chai, S.-P., 2014, A comprehensive study on coagulant

- performance and floc characterization of natural *Cassia obtusifolia* seed gum in treatment of raw pulp and paper mill effluent, *Industrial Crops and Products*, 61, 317-324.
- Sutherland, J. P., Folkard, G. K. and Grant, W. D., 1990, Natural coagulants for appropriate water treatment: A novel approach, *Waterlines*, 8(4), 30-32.
- Teh, C. Y., Wu, T. Y. and Juan, J. C., 2014, Optimization of agro-industrial wastewater treatment using unmodified rice starch as a natural coagulant, *Industrial Crops and Products*, 56, 17-26.
- Tongdang, T., 2008, Some properties of starch extracted from three Thai aromatic fruit seeds, *Starch/Stärke*, 60, 199-207.
- Vanitha, T. and Khan, M., 2019, Role of Pectin in Food Processing and Food Packaging, in: Masuelli, M., *Pectins: Extraction, Purification, Characterization and Applications*, IntechOpen, London
- Venkatanagaraju, E., Bharathi, N., Sindhuja, R. H., Chowdhury, R. R. and Sreelekha, Y., 2019, Extraction and Purification of Pectin from Agro-Industrial Wastes, in: Masuelli, M., *Pectins - Extraction, Purification, Characterization and Applications*, IntechOpen, London
- Vijayaraghavan, G. and Shanthakumar, S., 2016, Performance study on algal alginate as natural coagulant for the removal of congo red dye, *Desalin. Water Treat.*, 57, 6384-6392.
- Vijayaraghavana, G. and Shanthakumara, S., 2015, Removal of sulphur black dye from its aqueous solution using alginate from *Sargassum sp.* (brown algae) as a coagulant, *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 34(5), 1427-1434.
- Vilaplana, F., Zou, W. and Gilbert, R. G., 2018, Starch and Plant Storage Polysaccharides, in: Lamboni, G. Y. L. X. L., *Bioinspired Materials Science and Engineering.*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey
- Wai, W. W., Alkarkhi, A. F. M. and Easa, A. M., 2010, Effect of extraction conditions on yield and degree of esterification of durian rind pectin: An experimental design, *Food Bioprod. Process*, 88, 209-214.
- Xiong, B., Loss, R. D., Shields, D., Pawlik, T., Hochreiter, R., Zydney, A. L. and Kumar, M., 2018, Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems, *NPJ Clean Water*, 1, Article No 17.
- Yapo, B. M. and Gnakri, D., 2014, Pectic Polysaccharides and Their Functional Properties, in: Ramawat, K. G. and Mérillon J.-M. (Eds), *Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology.*, Springer, Cham. 1729-1749.
- Yashoda, H. M., Prabha, T. N. and Tharanathan, R. N., 2005, Mango ripening—chemical and structural characterization of pectic and hemicellulosic polysaccharides, *Carbohydr Res.*, 340, 1335-1342.
- Yin, C.-Y., 2010, Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment, *Process Biochem.*, 45, 1437-1444.
- Yoshida, Z., Osawa, E. and Oda, R., 1964, Intermolecular hydrogen bond involving a p-base as the proton acceptor. I. Detection by the refractive index method., *J. Phys. Chem. B*, 68(10), 2895-2898.
- Yusoff, M. S., Aziz, H. A., Zamri, M. F. M. A., Suja', F., Abdullah, A. Z. and Basri, N. E. A., 2018, Floc behavior and removal mechanisms of cross-linked *Durio zibethinus* seed starch as a natural

- flocculant for landfill leachate coagulation-flocculation treatment, *Waste Management*, 74, 362-372.
- Zamri, M. F. M. A., Suja, F., Yusoff, M. S., Aziz, H. A. and Bahru, R., 2018, The comparison of *Durio zibethinus* seed starch extraction for landfill leachate treatment, *Mater. Res. Express*, 5, No 075507.
- Zhang, P., Wang, L., Qian, Y., Wang, X., Zhang, S., Chang, J., Ruan, Y. and Ma, B., 2019, Influences of extraction methods on physicochemical and functional characteristics of three new bulbil starches from *Dioscorea opposita thunb. cv. Tiegun*, *Molecules*, 24(12), No 2232.
- Zhao, S., Gao, B., Yue, Q., Sun, S., Song, W. and Jia, R., 2015, Influence of enteromorpha polysaccharides on variation of coagulation behavior, flocs properties and membrane fouling in coagulation-ultrafiltration process, *J. Hazard Mater.*, 285, 294-303.
- Zobel, H. F., 1988, Molecules to granules: A comprehensive starch review, *Starch*, 40(2), 44-50.
-