

4. PEMBAHASAN

4.1. Keberadaan Pustaka

Pustaka-pustaka yang ditemukan untuk digunakan sebagai bahan dalam menulis *review* ini sebagian besar terdiri dari jurnal-jurnal penelitian, sedangkan jurnal *review* yang digunakan dalam jumlah sangat sedikit. Jurnal-jurnal penelitian paling banyak dijumpai adalah jurnal berbahasa Inggris dibandingkan yang berbahasa Indonesia, dimana jurnal berbahasa Indonesia yang dijumpai paling banyak dengan peringkat S2, sedangkan jurnal berbahasa Inggris paling banyak yaitu memiliki peringkat Q2. Jurnal-jurnal penelitian masih dijumpai hingga tahun terbit 2021, hal ini membuktikan bahwa dengan adanya ilmu dan teknologi yang terus berkembang mendorong semakin banyaknya peneliti yang melakukan penelitian terkait pengolahan limbah kulit pisang untuk menghasilkan berbagai macam produk yang bernilai tinggi.

Jurnal-jurnal penelitian yang dijumpai memiliki bahasan yaitu terkait keberadaan kehilangan dan limbah buah pisang yang di dalamnya menjelaskan tahapan terjadinya kehilangan atau dihasilkan nya limbah, serta penyebab terjadinya kehilangan dan limbah buah pisang di sepanjang rantai pasok pangan, disebutkan juga kuantitas limbah yang dihasilkan, karakteristik, potensi kimia, dan zat gizi yang terkandung pada limbah buah pisang.

Jurnal-jurnal lain yang dijumpai dalam jumlah lebih banyak yaitu membahas terkait pengolahan kembali limbah kulit pisang menghasilkan produk-produk bernilai tinggi atau disebut dengan valorisasi limbah, dimana di dalamnya sebagian besar menjelaskan metode atau cara pengolahan limbah kulit pisang dengan berbagai macam perlakuan yang kemudian membandingkan hasil dari berbagai perlakuan tersebut untuk memperoleh perlakuan paling optimal serta dihasilkan produk terbaik yang disertai dengan penjelasan karakteristik produk. Selain membahas proses pengolahan limbah kulit pisang, di dalam beberapa jurnal juga menyebutkan atau menjelaskan apa saja yang menjadi kelebihan dan kekurangan yang dijumpai selama proses pengolahan baik dari metode yang digunakan, karakteristik atau sifat, maupun kandungan kulit pisang yang dimanfaatkan dalam pengolahan serta produk

valorisasi yang dihasilkan, dimana poin-poin ini yang nantinya akan dijabarkan dalam pembahasan sebagai peluang dan tantangan selama valorisasi limbah kulit pisang.

4.2.Keberadaan Limbah

Kehilangan dan limbah buah pisang dapat terjadi di sepanjang tahapan rantai pasok pangan, yang terdiri dari 5 tahapan penting yaitu tahap produksi di pertanian, kolektor, grosir atau *wholesaler*, retail, dan konsumsi (Kikulwe *et al.*, 2018). Kehilangan buah pisang lebih banyak terjadi pada tahapan produksi di pertanian sedangkan limbah buah pisang banyak dihasilkan dimulai dari tahap retail hingga konsumsi, seperti yang dijelaskan dalam (Rezaei & Bin Liu, 2017) bahwa faktor terjadinya kehilangan buah pisang adalah berkaitan dengan sistem operasional selama di lahan pertanian hingga transportasi seperti tidak optimal nya sistem produksi dan rantai pasok, yang disebabkan keterbatasan manajerial dan teknis seperti kurangnya fasilitas, penyimpanan dan penanganan yang kurang tepat, infrastruktur, dan pengemasan, sedangkan faktor penyebab limbah buah pisang yaitu terkait sistem pengendalian yang buruk selama pemasaran seperti manajemen stok yang buruk, atau dikarenakan perilaku manusia yang sengaja membuang sehingga menghasilkan limbah di tahap konsumsi. Buah pisang berada di urutan pertama sebagai penghasil massa limbah tertinggi diantara 20 jenis sayur dan buah yang terjadi di tahapan *retailers* dalam penelitian Mattson *et al.* (2018) di Swedia, disebutkan massa limbah buah pisang sebesar 6,4 ton dari total 68 ton limbah sayur dan buah yang berarti menyumbang 9,4% dari total berat limbah sayur dan buah, didukung oleh hasil penelitian Kuyu & Yetenayet (2017) di Ethiopia menyebutkan bahwa terjadinya kehilangan buah pisang paling tinggi di tahapan *retailers* yaitu sebesar 56,2%. Dalam penelitian Rattanapan & Weerawat (2020) terkait limbah buah pisang yang dihasilkan pada saat berada di industri pengolahan pisang, dimana dihasilkan 81% limbah dari buah pisang yang masuk untuk diolah diakibatkan karena tidak memenuhi syarat penerimaan buah.

Kehilangan buah pisang di tahapan produksi disebabkan karena terjadinya pematangan pada buah pisang atau disebabkan juga oleh adanya pencurian buah pisang selama berada di lahan pertanian. Faktor utama penyebab kehilangan pada tahapan kolektor adalah terjadinya kerusakan berupa memar yang terjadi selama pengangkutan menuju pengumpulan atau

pengumpulan buah pisang yang saling menumpuk sehingga terkena gesekan atau tekanan, faktor lain yaitu pematangan pada buah pisang, maupun penyimpanan yang terlalu lama sebelum didistribusikan sehingga buah pisang mengalami pematangan terlebih dahulu. Kehilangan pada saat berada di tahapan grosir atau *wholesaler* dikarenakan adanya kecurangan berupa pencurian oleh pedagang, pematangan buah pisang, dan juga mengalami kerusakan berupa memar yang terjadi selama transportasi dari kolektor. Pematangan pada buah pisang dapat menyebabkan terjadinya kehilangan, karena karakteristik buah pisang yang bertekstur lunak terutama pada saat sudah matang sehingga lebih mudah mengalami kerusakan selain itu buah pisang matang lebih cepat membusuk, demikian buah pisang yang sudah rusak terutama memar akan cepat mengalami perubahan warna dan infeksi oleh mikroorganisme sehingga cepat membusuk. Kehilangan buah pisang paling banyak terjadi pada saat berada di lahan pertanian yaitu tahap produksi, karena sering terserang hama dan penyakit, praktik pertanian yang buruk, serta penyimpanan yang terlalu lama disebabkan petani mencari dan menentukan pasar terlebih dahulu, sedangkan di tahap kolektor jarang terjadi kehilangan karena membutuhkan waktu lebih singkat dalam menangani hasil panen buah pisang disebabkan jarak yang dekat untuk menghubungkan antara petani ke grosir (Kikulwe *et al.*, 2018). Dalam penelitian Kuyu & Yetenayet (2017) disebutkan bahwa kehilangan buah pisang terjadi di tahapan panen dimana tergolong sebagai tahapan produksi, pasca panen yang meliputi penanganan, penyimpanan, dan transportasi dari petani untuk didistribusi, pada saat pengemasan dan distribusi ke *retailers* dan yang menjadi penyebab kehilangan pada penelitian ini adalah buah pisang mengalami kerusakan, sesuai dengan yang dijelaskan dalam FAO (2011) bahwa kehilangan pada tahap pasca panen adalah akibat kerusakan seperti terkena hama dan penyakit atau dirusak oleh jamur.

Limbah buah pisang di tahap retail dapat diakibatkan oleh adanya sistem pengendalian buah pisang selama pemasaran yang buruk seperti suhu dan kelembapan tempat buah pisang diletakkan kurang memadai, pengemasan buah pisang kurang baik, serta kurangnya pengetahuan konsumen maupun pegawai akan pengendalian pangan sehingga berperilaku tidak bijaksana terhadap buah pisang yang dipasarkan, contohnya dapat dilihat pada penelitian Ramirez *et al.* (2021) dimana limbah buah pisang paling banyak dihasilkan

dikarenakan mengalami kerusakan berupa memar akibat terlalu sering disentuh oleh konsumen sebagai bentuk perilaku selektif konsumen dengan memeriksa tingkat kematangan buah pisang yang hendak dibeli. Berdasarkan penelitian Acevedo *et al.* (2021) dan Rattanapan & Weerawat (2020), limbah buah pisang juga dapat terjadi pada saat berada di industri pengolahan pisang yang dimana penyebabnya adalah penolakan buah pisang karena buah mengalami kerusakan selama distribusi sehingga tidak memenuhi kriteria pada saat *grading* di tahap penerimaan oleh industri, penelitian Kuyu & Yetenayet (2017) membahas terkait karakteristik yang dimiliki buah pisang yaitu kadar air tinggi sehingga bertekstur lunak yang menyebabkan buah pisang mudah mengalami kerusakan baik secara mekanis maupun mikroba pada saat transportasi jarak jauh menggunakan truk yang menyebabkan buah pisang terkena tekanan, terpapar sinar matahari dan angin dalam waktu yang lama, terguncang pada saat berada di dalam *box*, sesuai dengan penjelasan oleh R, Arivazhagan & Geetha (2018) bahwa limbah buah pisang dapat terjadi pada tahap distribusi yaitu selama pengiriman terjadi kerusakan fisik akibat menempuh perjalanan panjang serta metode pengemasan kurang memadai.

Kulit buah pisang menjadi salah satu limbah yang dihasilkan dari bagian buah pisang, data penelitian Sagar *et al.* (2018) menyebutkan bahwa kulit buah pisang menyumbang 35% dari total limbah buah pisang yang dihasilkan, dari hasil penelitian Acevedo *et al.* (2021) yaitu kulit buah pisang menyumbang 7,25 kg dari total 18,14 kg buah pisang atau sekitar 40% dari total buah pisang. Berdasarkan penelitian Acevedo *et al.* (2021), kulit pisang kaya akan senyawa karbon seperti selulosa (7,6-9,6%), hemiselulosa (6,4-9,4%), pektin (10-21%), lignin (6-12%), klorofil, pati (0,78 mg/100 g), serat (11,95 mg/100 g), protein (4,77 mg/100 g), kalsium (0,36 mg/100 g), fosfor (0,23 mg/100 g), lipid (1,15 mg/100 g), seng (0,17 mg/100 g), abu (1,71 mg/100 g), seperti dalam Happi Emaga *et al.* (2008) yaitu kulit pisang mengandung serat pangan yang tinggi terutama serat tidak larut yang terdiri dari selulosa, lignin, hemiselulosa, dan β -glukan, sedangkan serat larut yaitu pektin dan gum, dan zat gizi mikro seperti natrium, kalsium, fosfor, besi, magnesium, seng, kalium. Penelitian Sagar *et al.* (2018) menjelaskan bahwa kandungan total serat pangan pada kulit pisang sebesar 50% yang dimana terbagi menjadi serat tidak larut dan serat larut dengan perbandingan 5,46:1,

selain itu tinggi akan dopamin, l-dopa, senyawa fenolik karotenoid (xantofil, laurat, dan palmitat), dan antosianin, seperti yang dijelaskan dalam teori Pelissari *et al.* (2014) yaitu kulit pisang memiliki kandungan senyawa penting seperti delphinidin, sianidin, dan termasuk antosianin yang tergolong sebagai pigmen, kandungan karotenoid diantaranya β -karoten, α -karoten, dan xantofil, serta dopamin dan L-dopa yang termasuk dalam katekolamin.

Penelitian-penelitian yang ada masih banyak membahas limbah yang dihasilkan dari bagian tanaman pisang secara keseluruhan, dan masih sangat sedikit penelitian yang membahas keberadaan limbah buah pisang terlebih lagi bagian kulitnya yang menjadi fokus valorisasi pada penulisan *review* ini. Dibutuhkan penelitian yang terfokus pada keberadaan limbah buah pisang atau limbah kulit buah pisang baik secara global atau terkhusus yang terjadi di Indonesia, yang terutama membahas kuantitas limbah yang dihasilkan di setiap tahapan rantai pasok pangan. Keberadaan limbah kulit buah pisang berpeluang tinggi untuk industrialisasi, dengan alasan kuantitasnya yang berlimpah bahkan sudah diprediksi akan terus terjadi peningkatan 1,5% per tahun untuk produksi dan konsumsi buah pisang hingga tahun 2028, faktor lain adalah karakteristik dan kandungan gizi serta potensi kimia yang tinggi pada kulit buah pisang berpeluang untuk diolah menghasilkan produk bernilai tinggi baik yang dapat diaplikasikan di bidang pangan maupun non pangan, hal ini juga didukung dengan sudah banyaknya dijumpai penelitian-penelitian terkait pengolahan kulit buah pisang menjadi berbagai macam produk yang sebagian besar masih dilakukan dalam skala laboratorium oleh sebab itu kini hanya perlu dikembangkan untuk industri skala besar.

4.3. Status Valorisasi

Pengolahan limbah kulit pisang hingga saat ini lebih banyak menghasilkan produk bernilai tinggi untuk aplikasi di bidang non pangan dibandingkan aplikasi bidang pangan. Produk valorisasi untuk aplikasi di bidang pangan sendiri paling banyak yaitu menghasilkan tepung kulit pisang dan ekstrak pektin kulit pisang, sedangkan untuk aplikasi bidang non pangan produk valorisasi yang dihasilkan paling banyak adalah biosorben. Belum dijumpai penelitian yang menganalisis harga produksi beserta harga jual produk pengolahan limbah kulit pisang yaitu tepung kulit pisang, ekstrak pektin kulit pisang, dan biosorben kulit pisang, namun berdasarkan pencarian melalui pemasaran *online* tepung kulit pisang memiliki harga jual berkisar Rp.10.000,00/kg nya, sedangkan pektin kulit pisang memiliki nilai jual mencapai Rp.300.000,00/kg nya, dan belum dijumpai penjualan biosorben kulit pisang. Dalam hal ini tepung, ekstrak pektin, serta biosorben yang terbuat dari kulit pisang dapat dikatakan sebagai produk valorisasi karena memiliki nilai ekonomi dan guna yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan baku nya yaitu kulit pisang tanpa pengolahan.

4.3.1. Tepung Kulit Pisang

Berdasarkan penelitian-penelitian yang sudah ada, tepung kulit pisang dibuat melalui rangkaian tahapan secara umum yang diawali dengan pencucian kulit pisang, pemotongan kulit pisang, lanjut dengan pengeringan kulit pisang, penghancuran kulit pisang yang sudah menjadi kering, diakhiri dengan pengayakan kulit pisang yang sudah dalam bentuk tepung. Ditemukan adanya variasi metode pengeringan kulit pisang selama penelitian pembuatan tepung kulit pisang, dimana akan memberikan pengaruh terhadap karakteristik tepung yang dihasilkan. Metode pengeringan yang diterapkan pada berbagai penelitian, masih banyak dilakukan secara konvensional yaitu melalui pengeringan di bawah sinar matahari atau penjemuran (*sun drying*), memanfaatkan alat pengering seperti oven, atau didiamkan dalam suhu ruang, hal ini sesuai dengan Nurani & Yuwono (2014) bahwa proses pengeringan diperlukan untuk mengubah bahan baku ke dalam bentuk tepung dengan kadar air yang rendah, dapat dilakukan secara konvensional yaitu penjemuran maupun menggunakan alat pengering biasa. Pengeringan dengan sinar matahari (*sun drying*) membutuhkan waktu hingga 5 hari, sedangkan dengan oven rata-rata dilakukan pada suhu 40-60°C yang sesuai

dengan teori Walter & Purcell (1980) dan membutuhkan waktu maksimal 2 hari. Metode pengeringan lainnya yaitu menggunakan oven vakum (*vacuum drying*), oven *microwave* (*microwave drying*), *dehumidifier air drying*, dilakukan di tempat teduh (*shade drying*), pelarutan dengan nitrogen dan dikeringkan menggunakan *freeze dryer* (*freeze drying*).

Beberapa perlakuan diberikan pada kulit pisang sebelum dilakukan pengeringan yaitu perendaman kulit pisang pada berbagai jenis larutan seperti larutan asam sitrat, perasan jeruk nipis, dan larutan natrium tiosulfat. Perendaman dalam larutan penting dilakukan untuk memperoleh tepung kulit pisang yang berwarna cerah, disebabkan metode pengeringan yang dilakukan masih banyak secara konvensional yaitu dikeringkan di bawah sinar matahari (*sun drying*) dimana lebih rentan terjadinya pencoklatan enzimatis akibat kehadiran oksigen di ruang terbuka yang dibutuhkan oleh fenolase untuk terjadinya reaksi pencoklatan (*browning*) (Walter & Purcell, 1980).

Tepung kulit pisang yang dihasilkan memiliki karakteristik yaitu berbentuk serbuk, berwarna coklat, dan rasa sedikit getir. Dijelaskan oleh Ernawan *et al.* (2019) bahwa teknologi penepungan memiliki prinsip memperkecil ukuran bahan baku sehingga mengubah bentuk bahan baku menjadi lebih halus atau bubuk, oleh sebab itu bentuk serbuk merupakan bentuk umum dari tepung yang dihasilkan dari proses pengolahannya. Dalam penelitian Agama *et al.* (2016) diperoleh bahwa tepung kulit pisang memiliki kapasitas retensi air yang semakin meningkat seiring meningkatnya suhu perlakuan, yaitu 3,5 gram air/gram berat kering pada suhu 65°C dan meningkat menjadi 8,8 gram air/gram berat kering pada suhu 90°C, serta kapasitas retensi minyak yang tinggi dibandingkan *by-product* jenis buah lainnya yaitu antara 2,2-4,1 gram minyak/gram berat kering. Kapasitas retensi air pada tepung kulit pisang disebabkan adanya denaturasi protein serta ketidakteraturan susunan molekul pati dan non pati pada dinding sel, yang menandakan pengikatan air oleh makromolekul tersebut karena bebas nya gugus OH. Faktor lain yang menentukan kapasitas retensi air tepung kulit pisang diantaranya ukuran partikel, pH, gaya ionik, dan mikrostruktur serat (panjang dan porositas) (Nelson, 2001), sedangkan kapasitas retensi minyak tepung kulit pisang dipengaruhi oleh kandungan pati terutama amilosa pada tepung (Espinosa *et al.*, 2009). Berikut merupakan gambar tepung kulit pisang dari salah satu hasil penelitian.



Gambar 18. Tepung Kulit Pisang

Sumber: Anwar *et al.* (2021)

Kandungan zat gizi tepung kulit pisang terdiri dari karbohidrat yang berkisar 50-80%, 2-5% kadar lemak, 5-10% kadar protein, kadar air kurang dari 10%, 22,2% kadar abu, kadar serat berkisar 40% dimana lebih tinggi serat pangan tidak larut dibandingkan serat pangan larut, dengan serat kasar kurang lebih 10%, kandungan karoten yaitu 136,61 dan 15,62 mg/100 g antosianin, serta aktivitas antioksidan yang cukup tinggi yaitu 61,26%. Keberadaan karbohidrat pada tepung kulit pisang juga disebutkan dalam hasil penelitian Bakar *et al.* (2020) bahwa kandungan total pati tepung kulit pisang yaitu sebesar 41,4 %, dimana pati tergolong sebagai karbohidrat yaitu polimer dari glukosa yang tersusun dari amilosa dan amilopektin yang biasanya dijumpai di berbagai sumber pangan seperti umbi-umbian, biji-bijian, sayuran, dan termasuk buah (Jacobs & Delcour, 1998). Aktivitas antioksidan yang tinggi pada tepung kulit pisang, karena mengandung senyawa polifenol yaitu senyawa antioksidan paling banyak yang dijumpai secara alami pada tanaman (Cairns, 2003).

Hingga saat ini pengolahan limbah kulit pisang menjadi tepung kulit pisang masih belum diproduksi oleh industri pangan dalam skala besar karena kurang diminati oleh para pelaku industri, dengan alasan seperti yang dijelaskan sebelumnya yaitu terkait penerimaan konsumen terhadap karakteristik tepung kulit pisang itu sendiri dimana masih memiliki warna coklat atau gelap serta timbul rasa pahit, sehingga menjadi pertimbangan industri

untuk memproduksi tepung kulit pisang. Produksi tepung kulit pisang masih lebih banyak dilakukan dalam skala industri rumah tangga untuk membangun wirausaha kecil, selain itu kegiatan bertujuan untuk menerapkan pemberdayaan masyarakat dalam mengolah limbah menghasilkan produk baru yang memiliki nilai jual tinggi. Produk-produk yang sudah ada dengan menggunakan bahan tepung kulit pisang berdasarkan penelitian-penelitian yang dijumpai diantaranya *fish patty*, *cake*, biskuit, kefir susu kambing, sosis ayam, rissoles bebas gluten, *cookies*, dan *balady flat bread* yang dibuat melalui pencampuran tepung kulit pisang dengan bahan-bahan lainnya dan dilanjut dengan metode pengolahan masing-masing jenis produk seperti salah satunya pemanggangan.

4.3.2. Ekstrak Pektin

Pektin merupakan salah satu komponen utama penyusun serat pangan kulit pisang, yaitu senyawa polisakarida kompleks dengan kandungannya adalah asam D-galakturonat (Tarigan *et al.*, 2012). Pektin pada kulit pisang dapat diperoleh melalui metode ekstraksi, yaitu memisahkan senyawa pektin dari senyawa polisakarida lainnya yang ada pada dinding sel tanaman seperti selulosa dan hemiselulosa (Prasetyowati, 2009) menggunakan jenis pelarut tertentu (Wilson *et al.*, 2000), yaitu yang paling banyak digunakan pada penelitian adalah pelarut air yang tergolong sebagai pelarut amfiprotik dan asam hidroklorat atau HCl sebagai pelarut asam. Ekstraksi pektin pada umumnya menggunakan pelarut asam organik seperti asam malat, asam sitrat, asam tartrat, asam laktat, asam asetat, asam fosfat, maupun asam mineral yang lebih murah dan mudah didapatkan yaitu asam hidroklorat atau asam klorida, asam nitrat, dan asam sulfat (Tuhuloula, 2013).

Pelarut asam disarankan untuk digunakan dalam mengekstraksi pektin salah satunya pada kulit pisang karena mampu memutuskan ikatan antara selulosa dengan asam pektinat melalui pemisahan ion bivalen, serta mengubah protopektin menjadi pektin larut air melalui reaksi hidrolisis, jenis pelarut asam yang paling banyak digunakan adalah asam hidroklorat atau asam klorida karena jenis asam mineral dapat mempercepat pelepasan ion H^+ sehingga lebih cepat terjadinya reaksi hidrolisis yang mengubah protopektin menjadi pektin kemudian menggabungkan molekul pektin yang satu dengan yang lain hingga terbentuk jaringan pektin, penggunaan asam hidroklorat juga dikarenakan asam mineral memiliki harga yang

lebih murah (Tuhuloula, 2013). Ekstraksi dengan pelarut asam mampu menghasilkan pektin dengan nilai *galacturonic acid content* (GalA) yaitu 42-47% yang menunjukkan tingginya kandungan pektin, dijelaskan bahwa pektin merupakan susunan dari rantai asam galakturonat dengan kandungan gugus metil ester atau metoksil sehingga jumlah asam galakturonat berarti menggambarkan total pektin yang juga menunjukkan tingkat kemurnian pektin (Featherstone, 2015), hal ini membuktikan kulit pisang sebagai sumber pektin (Willats *et al.*, 2006).

Pengendapan pektin yang terlarut setelah ekstraksi dilakukan melalui penggumpalan pektin menggunakan alkohol, dimana terjadi dehidrasi oleh alkohol yang mengganggu kestabilan antara pektin dengan air yang pada akhirnya menyebabkan pektin menggumpal. Alkohol dipilih sebagai bahan pengendap pektin juga dengan alasan alkohol memiliki berat molekul rendah sehingga mudah bereaksi dengan air melalui ikatan hidrogen, yang mengurangi jumlah ion atau air yang berada di sekitar pektin (Nurbaya *et al.*, 2018).

Metode ekstraksi yang digunakan sangat penting untuk diperhatikan dengan mempertimbangkan sifat bahan yang menjadi sumber pektin yaitu kulit pisang serta sifat dari pektin itu sendiri, karena akan mempengaruhi jumlah, struktur, dan juga sifat kimia pektin yang diperoleh (Wang *et al.*, 2002). Proses ekstraksi juga dipengaruhi oleh preparasi bahan, dimana mengubah kulit pisang ke dalam bentuk bubuk atau disebut tepung dapat mempercepat ekstraksi melalui perluasan area untuk terjadinya kontak antara bahan dengan pelarut (Megawati & Elfi, 2016). Ekstraksi pektin kulit pisang paling banyak menggunakan metode konvensional yaitu melalui pemanasan langsung dengan pelarut tertentu yang dilakukan menggunakan alat pemanas seperti *hot plate stirrer* dan *shaker waterbath*, sedangkan metode modern atau canggih dapat dilakukan dengan memanfaatkan pemanas yang bersumber dari radiasi gelombang mikro disebut dengan metode MAE (*Microwave-Assisted Extraction*), radiasi gelombang ultrasonik yaitu UAE (*Ultrasound-Assisted Extraction*), SWE (*Subcritical Water Extraction*), atau dengan metode air panas terkompresi yang disebut juga dengan *hot compressed water* memiliki prinsip pemanasan menggunakan pelarut air pada suhu sangat tinggi dan waktu singkat (Rasidek *et al.*, 2018). Di bawah ini

adalah gambar dari ekstrak pektin yang dihasilkan antara yang menggunakan teknologi konvensional dengan teknologi MAE berdasarkan salah satu penelitian.



Gambar 19. Ekstrak Pektin dengan Ekstraksi Konvensional

Sumber: Megawati & Elfi (2016)



Gambar 20. Ekstrak Pektin dengan Ekstraksi MAE

Sumber: Megawati & Elfi (2016)

Ekstraksi pektin kulit pisang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu waktu ekstraksi, suhu ekstraksi, dan rasio kulit pisang dengan pelarut. Kondisi-kondisi inilah yang berpengaruh terhadap karakteristik pektin yang dihasilkan yaitu diantaranya DE (Derajat Esterifikasi) dan DM (Derajat Metilasi), dimana DE menunjukkan keberadaan ester asetat dan karboksi asetat

yang terhubung pada salah satu alkohol sekunder asam galakturonat (Sulihono *et al.*, 2012), sedangkan DM mengacu pada keberadaan metoksil ester dalam pektin yang disebut juga dengan rasio asam galakturonat termetilasi terhadap asam galakturonat (Liauw *et al.*, 2008). Berdasarkan karakteristik ini, maka pektin tergolong menjadi dua jenis yaitu pektin metoksil tinggi atau HM (*High Methoxyl*) dengan DE dan DM \geq 50% yaitu menunjukkan bahwa lebih dari 50% gugus karboksil pektin termetilasi, sedangkan pektin metoksil rendah dikenal sebagai LM (*Low Methoxyl*) memiliki DE dan DM $<$ 50%. Pektin HM sendiri dibagi lagi berdasarkan kemampuan pembentukan gel nya menjadi kelompok *set* cepat dan *set* lambat, dengan perbedaan yaitu pektin HM *set* cepat (DE $>$ 72%) membutuhkan suhu lebih tinggi dan waktu lebih lama untuk membentuk gel dibandingkan dengan pektin HM *set* lambat, dimana HM *set* lambat (DE 58-65%) membutuhkan ion kalsium (Ca^{2+}) dalam pembentukan gelnya (Tuhuloula *et al.*, 2013).

Ekstrak pektin dari kulit pisang ini sudah diaplikasikan di bidang pangan, dengan kelebihan yang dimiliki diantaranya mengurangi waktu memasak bahan pangan, meningkatkan tekstur, warna, dan umur simpan pangan (Rivadeneira *et al.*, 2020). Berdasarkan artikel jurnal penelitian yang ditemukan diantaranya sebagai pengemulsi pada *salad cream*, pengental minuman, serta pembuatan *edible film*, berkaitan dengan sifat gel yang baik pada pektin sehingga dapat diaplikasikan sebagai bahan penstabil dan pengental atau pembentukan gel pada makanan maupun minuman (Wilat *et al.*, 2006). Peran pektin sebagai pengental makanan dapat meningkatkan viskositas bahan yang berdampak pada melambatnya laju konsumsi pangan namun meningkatkan efek kenyang setelah konsumsi makanan atau minuman, sehingga dapat membawa manfaat bagi kesehatan konsumen (Zhu *et al.*, 2013), seperti pada hasil penelitian Rivadeneira *et al.* (2020) dimana pektin meningkatkan tekstur minuman sari buah yang dimana semakin kental.

Pektin juga dapat digunakan sebagai pengganti lemak pada beberapa produk makanan seperti margarin dan mayones (Brejnholt, 2009), sama halnya dengan hasil penelitian Maneerat *et al.* (2017) yaitu pembuatan *salad cream* melalui substitusi lemak dengan ekstrak pektin kulit pisang menurunkan viskositas *salad cream* akibat menurunnya pula kandungan lemak sehingga berpengaruh pada tekstur, sifat kerekatan, ketebalan, dan *body salad cream* dimana

menjadi lebih *creamy* dan lembut. *Salad cream* yang dihasilkan dengan penambahan ekstrak pektin memiliki warna lebih gelap, yang disebabkan larutan ekstrak pektin kulit pisang sudah berwarna coklat kemerahan sehingga *salad cream* yang dihasilkan turut menjadi merah kecoklatan. Sifat gel pada pektin juga berperan penting sebagai bahan pembuatan *edible film*, yaitu bahan pelindung makanan yang berbentuk lapisan tipis berfungsi untuk menahan terjadinya perpindahan oksigen, cahaya, air, lemak, serta membawa bahan yang ditambahkan pada makanan. *Edible film* memiliki kelebihan yaitu dapat langsung dikonsumsi bersama dengan makanannya, ramah lingkungan, menjaga sifat makanan, memberi pewarna dan flavor, menambah nutrisi makanan, sebagai antioksidan dan antimikroba (Nugroho *et al.*, 2013).

Tepung kulit pisang memiliki nilai pH yang menyerupai standar tepung terigu, sehingga dapat menggantikan gandum pada produk makanan tanpa harus mengubah pH keseluruhan bahan pangan, selain itu karakteristik tepung kulit pisang yang memiliki kapasitas menahan air yang tinggi menyebabkan produk makanan seperti adonan mie dengan tepung kulit pisang lebih getas akibat mengalami pembengkakan, sedangkan kapasitas menahan lemak yang rendah menjadikan tepung kulit pisang baik diaplikasikan pada produksi pangan melalui penggorengan atau *deep-fried coated product* karena dapat mengurangi penyerapan minyak oleh makanan (Dom *et al.*, 2021). Secara keseluruhan makanan dengan penambahan tepung kulit pisang memiliki karakteristik tekstur menjadi lebih keras, berwarna gelap, serta aroma dan rasa yang masih kurang disukai oleh konsumen, contohnya adalah pada hasil penelitian pembuatan *balady flat bread* dengan substitusi tepung kulit pisang memiliki nilai sensori yaitu rasa yang semakin diminati, meningkatkan tingkat kekenyalan roti, tekstur yang kurang lembut, aroma menyerupai kulit pisang, warna roti gelap, bentuk roti tidak berbeda jauh dengan tanpa menggunakan tepung kulit pisang, serta meningkatnya kandungan serat roti (Eshak, 2016), pembuatan *cookies* dengan penambahan tepung kulit pisang memiliki warna yang semakin gelap, semakin keras, tingkat penerimaan rasa dan aroma oleh konsumen sangat rendah (Alam *et al.*, 2020).

Berkembangnya variasi makanan saat ini memunculkan berbagai macam industri yang bergerak di bidang pangan, sehingga semakin banyak yang membutuhkan pektin dalam

proses produksinya yang berakibat pada meningkatkan kebutuhan akan pektin. Di pasar global sendiri pektin memiliki nilai jual 1 miliar USD pada tahun 2019, dan diperkirakan mencapai 1,9 miliar USD pada tahun 2025 (Markets and Markets, 2019). Hingga saat ini belum dijumpai industri penghasil pektin di Indonesia sehingga menyebabkan Indonesia masih memperoleh bahan pektin secara import yang mengakibatkan nilai jual tinggi.

4.3.3. Biosorben

Biosorben merupakan produk hasil pengolahan limbah kulit pisang paling banyak diteliti yang tergolong sebagai non pangan berdasarkan aplikasinya, memiliki fungsi untuk meminimalisasi berbagai zat pencemar seperti keberadaan ion logam pada bahan pencemar limbah berbagai industri yaitu industri *alloy*, logam, baterai, pelapisan logam, semen, cat, maupun zat warna pada limbah industri tekstil. Dampak buruk yang dapat ditimbulkan dari akumulasi ion logam berat pada limbah industri yang terbuang begitu saja berupa keracunan maupun berbagai gangguan pada tubuh apabila dikonsumsi oleh manusia yang memungkinkan terjadi melalui rantai makanan, seperti yang disebutkan pada teori Palar (1994), keberadaan zat warna dalam jumlah berlebih di lingkungan juga dapat menimbulkan berbagai macam penyakit (Wijaya *et al.*, 2006), oleh sebab itu berbagai upaya sudah dilakukan untuk mengatasi keberadaan logam berat maupun zat warna seperti menggunakan penukar ion, pengendapan elektrolisis, maupun penyerapan oleh karbon aktif, namun metode-metode ini membutuhkan biaya yang sangat tinggi. Ekstraksi zat pencemar menggunakan material padat melalui mekanisme adsorpsi dapat menjadi solusi dikarenakan kelebihan yang dimiliki yaitu mudah dilakukan, tidak memerlukan pengoperasian rumit, sederhana, waktu singkat. Pemanfaatan limbah organik yang berasal dari kulit pisang sebagai media penyerapan ion logam yang kemudian disebut sebagai biosorben, dapat menjadi solusi karena biayanya yang murah serta mudah untuk diperoleh (Vilardi *et al.*, 2017).

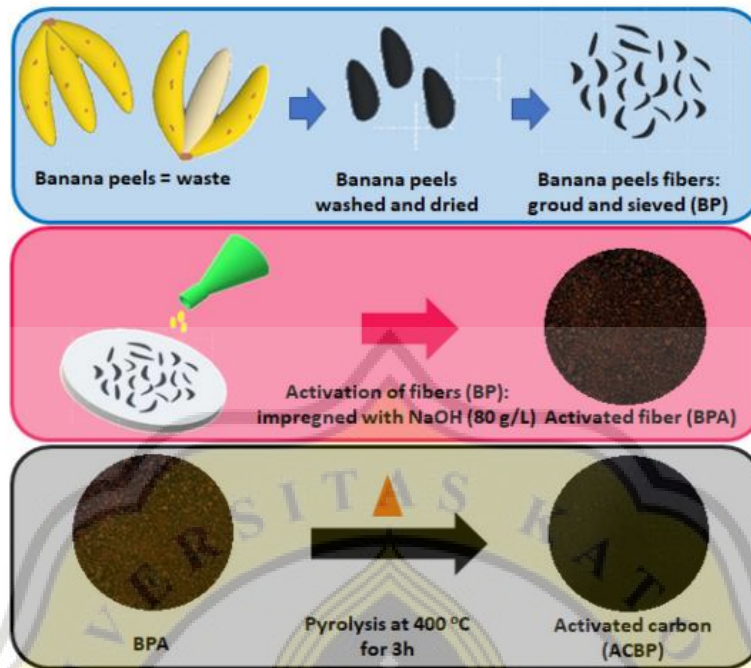
Disebutkan pada hasil tabel pemetaan bahwa metode pengolahan limbah kulit pisang menghasilkan biosorben diawali dengan transformasi kulit pisang menjadi bentuk bubuk yang disebut juga sebagai tepung kulit pisang, dengan cara kulit pisang dicuci terlebih dahulu, diperkecil ukurannya melalui pemotongan, dikeringkan yang sebagian besar menggunakan oven, dihancurkan melalui penggilingan atau blender, dan diayak. Alasan

transformasi kulit pisang menjadi tepung terlebih dahulu untuk dijadikan sebagai biosorben adalah lebih mudah untuk diolah menjadi produk lain sehingga mempermudah produksi biosorben dari kulit pisang, selain itu dapat meningkatkan daya adsorpsi oleh kulit pisang yang berbentuk bubuk (Pangastuti *et al.*, 2013). Pengolahan berikutnya adalah aktivasi kulit pisang dengan cara perendaman tepung kulit pisang dalam berbagai macam larutan, yang paling banyak digunakan adalah larutan NaOH dan H₃PO₄ (asam fosfat). Aktivasi perlu dilakukan dengan tujuan untuk memperbesar ukuran pori-pori pada permukaan kulit pisang sehingga berpengaruh pada peningkatan kemampuan adsorpsi oleh kulit pisang, dimana larutan NaOH dipilih sebagai bahan pengaktivasi karena memiliki sifat basa kuat yang mampu melarutkan senyawa-senyawa organik pada kulit pisang atau bahan-bahan pengotor yang menyumbat pori-pori permukaan kulit pisang, sehingga dengan terbukanya pori-pori kulit pisang dapat membuka situs aktif kulit pisang dan berpengaruh terhadap luas permukaan dimana semakin besar, semakin besar luas permukaan adsorben maka semakin tinggi juga kapasitas adsorpsi oleh kulit pisang (Purnama *et al.*, 2015). Asam fosfat atau H₃PO₄ juga dapat digunakan sebagai aktivator yang bersifat asam, dimana disarankan digunakan pada bahan yang kaya akan serat seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dimana kulit pisang sebagai sumbernya (Kardiman *et al.*, 2020). Aktivator bersifat asam lebih baik dibandingkan larutan basa, dikarenakan dapat membuka pori-pori lebih besar sehingga kapasitas adsorpsi pun lebih besar (Hsu & Teng, 2000).

Tepung kulit pisang yang sudah dilakukan perendaman dalam larutan aktivator, dicuci hingga netral kemudian dikeringkan hingga menjadi tepung kulit pisang teraktivasi. Kulit pisang yang sudah teraktivasi selanjutnya dilakukan pengujian adsorpsi melalui pencampuran dengan larutan mengandung zat pencemar yang diujikan dan diakhiri dengan analisis daya adsorpsi menggunakan alat seperti yang paling banyak digunakan yaitu spektrofotometer UV-VIS (*Ultra Violet-Visible*) atau spektrofotometer AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*), dimana spektrofotometer UV-VIS digunakan baik pada pengujian adsorpsi zat pencemar berupa logam maupun zat pewarna, sedangkan spektrofotometer AAS hanya dapat digunakan pada analisis daya adsorpsi zat pencemar logam, dikarenakan spektrofotometer UV-VIS merupakan alat yang berfungsi mengukur dan menganalisis

kandungan suatu senyawa kimia baik secara kualitatif (menurut puncak yang dihasilkan oleh spektrum suatu unsur) maupun kuantitatif (nilai absorbansi yang berasal dari spektrum suatu unsur) (Day *et al.*, 1983), sedangkan spektrofotometer AAS memiliki prinsip kerja analisis suatu unsur yaitu melalui penyerapan cahaya oleh atom logam pada panjang gelombang tertentu (Skoog *et al.*, 2000).

Metode lain yang digunakan dalam mengolah limbah kulit pisang menjadi biosorben adalah mengubah nya terlebih dahulu menjadi biochar (*bio charcoal*) atau karbon aktif melalui pembakaran pirolisis atau karbonisasi, yang kemudian biochar inilah yang digunakan sebagai adsorben, namun metode ini masih lebih sedikit diterapkan dalam mengolah limbah kulit pisang menjadi biosorben dibandingkan dengan langsung menggunakan tepung kulit pisang teraktivasi. Biochar sendiri merupakan padatan dengan pori-pori yang bersumber dari bahan-bahan kaya akan karbon baik jenis tumbuhan, hewan, maupun barang tambang, diperoleh melalui proses pirolisis atau karbonisasi yaitu pemanasan bahan pada suhu tertentu biasanya antara 400-600°C dalam keadaan oksigen berjumlah sangat terbatas, yang biasanya dilakukan menggunakan *furnace* (Kirk-Othmer, 1992). Proses karbonisasi akan menguraikan senyawa organik yang menyusun bahan, menghasilkan uap asam asetat, hidrokarbon, tar-tar, maupun methanol, dan meninggalkan padatan yaitu karbon berupa arang, dimana karbon aktif mengandung senyawa karbon sebesar 85-95%. (Cheresmisinoff, 1993). Pada gambar di bawah ini dijelaskan skema produksi biosorben dari kulit pisang melalui karbonisasi.



Gambar 21. Skema Produksi Biosorben Kulit Pisang melalui Karbonisasi

Sumber: Maia *et al.* (2021)

Hingga saat ini pengolahan limbah kulit pisang menjadi biosorben dan pengaplikasiannya dalam skala industri masih belum dijumpai, namun sudah sangat banyak yang melakukan penelitian terkait kemampuan kulit pisang dalam mengadsorpsi zat-zat pencemar, dan yang paling banyak dilakukan penelitian adalah cemaran dalam bentuk ion logam diantaranya Cd, Mn, Cr, Sr, Pb, Co, Cu, Fe, Zn, Hg, Fe, sedangkan cemaran lainnya yaitu agen antibakteri tetrasiklin, zat pewarna seperti rhodamin B, metilen biru, RB5 (*reactive black 5*) dan CR (*congo red*), maupun minyak pada lingkungan perairan. Penelitian yang sudah ada sebagian besar membahas daya adsorpsi kulit pisang terhadap zat pencemar, membandingkan hasil dari berbagai macam perlakuan yang bertujuan untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi adsorpsi oleh kulit pisang seperti waktu adsorpsi, ukuran biosorben, kecepatan agitasi, konsentrasi zat pencemar, pH, dan juga suhu, dengan demikian dapat mengetahui perlakuan terbaik untuk menghasilkan biosorben kulit pisang dengan hasil yang maksimal.

4.4. Tantangan

4.4.1. Tepung Kulit Pisang

Produksi tepung kulit pisang dari limbah kulit pisang masih memiliki tantangan berkaitan dengan penerimaan oleh konsumen, dimana masih memiliki rasa getir atau pahit, menurut Sirait (2007) rasa pahit dihasilkan akibat kandungan senyawa fitokimia berupa saponin, dimana saponin memiliki rasa pahit atau getir, selain itu tannin pada kulit pisang memberikan rasa pahit atau sepat, tepung kulit pisang memiliki warna coklat atau gelap yang belum memenuhi syarat mutu tepung terigu yaitu berwarna putih (Aryani *et al.*, 2018). Warna coklat yang dihasilkan berhubungan dengan metode pengolahan berupa pengeringan yang digunakan, dimana metode yang masih banyak digunakan pada berbagai penelitian adalah pengeringan kulit pisang secara konvensional dengan sinar matahari (*sun drying*) yang membutuhkan waktu hingga 5 hari atau dengan alat oven yang membutuhkan waktu maksimal selama 2 hari (Arifiyana & Vika, 2020), dengan demikian metode pengeringan yang digunakan menjadi tantangan dalam memproduksi tepung kulit pisang.

Pengeringan dengan sinar matahari membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan pengeringan dengan oven, seperti yang dijelaskan oleh Nurani & Yuwono (2014), yaitu konsumsi waktu yang lama menjadi salah satu kelemahan pengeringan konvensional dengan sinar matahari. Konsumsi waktu lebih lama menyebabkan kontak kulit pisang dengan oksigen berlangsung lebih lama, selain itu lambatnya penurunan kadar air selama penjemuran berakibat pada aktifnya enzim pencoklatan yang memicu terjadinya *enzymatic browning* menghasilkan tepung kulit pisang berwarna coklat, dimana *enzymatic browning* sendiri merupakan reaksi pencoklatan yang terjadi akibat adanya reaksi oksidasi antara udara dengan senyawa fenol pada bahan baku yang dikatalisis oleh enzim polifenol oksidase atau fenol oksidase menjadi senyawa quinon yang kemudian mengalami polimerisasi menghasilkan pigmen melaniadin yaitu warna coklat (Mardiah, 1996). Pencoklatan non enzimatis juga dapat terjadi melalui penjemuran, akibat kontak langsung antara oksigen dengan senyawa fenolik yang terkandung pada kulit pisang. Kekurangan lain dari metode pengeringan *sun drying* yaitu suhu dan kecepatan pengeringan tidak dapat diatur, tergantung oleh cuaca yang dapat menghambat produksi tepung kulit pisang, tidak dapat dikendalikannya sanitasi dan

higienitas, proses nya yang lambat dikarenakan membutuhkan waktu lama sehingga besar kemungkinan terpapar mikroorganismenya maupun kotoran serta menghambat jalannya produksi tepung kulit pisang, terlalu lama terpapar panas dari sinar matahari akan menurunkan kandungan gizi pada kulit pisang oleh sebab itu pengeringan dengan *sun drying* masih menghasilkan produk tepung kulit pisang bermutu rendah (Nurhayati & Oktavia, 2014), demikian juga pengeringan melalui pengovenan terhitung memakan waktu yang lama berakibat pada konsumsi energi yang tinggi (Borde & Levy, 2006).

4.4.2. Ekstrak Pektin

Dalam memproduksi pektin dari kulit pisang, yang menjadi tantangan adalah terkait metode yang digunakan yaitu masih banyaknya penggunaan asam sebagai pelarut dalam proses ekstraksi. Penggunaan pelarut asam menghasilkan pektin dengan sifat pengental lebih rendah dibandingkan menggunakan pelarut air, hal ini berkaitan dengan nilai M_v lebih rendah dan DM yang lebih tinggi apabila menggunakan pelarut asam. Semakin lama waktu ekstraksi dengan asam, nilai M_v akan semakin rendah akibat rantai asam galakturonat yang semakin pendek sehingga sifat kekentalan pada larutan juga semakin berkurang (Brejnholt, 2009). Pada penelitian yang sudah ada, ekstraksi banyak menggunakan pelarut asam hidroklorat (HCl), sedangkan ekstraksi pektin dengan pelarut jenis asam mineral yaitu asam hidroklorat bersifat terlalu kuat yang dapat menyebabkan pektin terdegradasi menjadi asam pektat, sehingga menghasilkan pektin dalam jumlah sedikit (Tuhuloula *et al.*, 2013), terlebih lagi pelarut asam hidroklorat atau HCl dapat merusak pektin dan menghasilkan limbah yang bersifat tidak ramah lingkungan serta dapat menyisakan residu pada ekstrak pektin yang nantinya akan diaplikasikan pada pangan salah satunya sebagai bahan tambahan makanan, sedangkan asam hidroklorat sendiri dilarang untuk dikonsumsi karena dapat membahayakan kesehatan (Yeoh *et al.*, 2008).

Tantangan lain yang dijumpai terletak pada metode ekstraksi yang digunakan dalam mengekstrak pektin kulit pisang, dimana masih banyak menggunakan metode konvensional dengan panas berlebih, berakibat pada rusaknya pektin sehingga terjadi penurunan kualitas pektin yang dihasilkan, selain itu membutuhkan waktu ekstraksi lebih lama yang mengakibatkan konsumsi energi semakin tinggi (Sulaiman *et al.*, 2015), menggunakan

banyak pelarut, serta kurang maksimalnya ekstrak pektin yang dihasilkan (Zou *et al.*, 2014). Pektin hasil ekstrak MAE yang sudah dimurnikan memiliki *yield* yang rendah. Ketepatan dan kesesuaian perlakuan yang diberikan selama ekstraksi pektin kulit pisang juga menjadi salah satu tantangan dalam pengolahan limbah kulit pisang, diantaranya peningkatan waktu, suhu ekstraksi, dan rasio kulit pisang dengan pelarut menghasilkan pektin dengan kadar air yang tinggi, dimana semakin tinggi kadar air pektin menyebabkan umur simpan pektin yang semakin pendek berkaitan dengan peningkatan pertumbuhan mikroorganisme memproduksi enzim pektinase yang merusak kualitas pektin (J. Muhmadzadeh *et al.*, 2010). Suhu ekstraksi yang terlalu tinggi justru akan mendegradasi pektin yang terekstrak akibat depolimerisasi berlebih pada rantai asam galakturonat pektin (L. B. Rockland & Nishi, 1980), sedangkan suhu ekstraksi terlalu rendah mengakibatkan kurangnya efisiensi difusi pelarut ke dalam kulit pisang (Tanaid, 2018).

4.4.3. Biosorben

Tantangan yang utama atau paling banyak dijumpai pada pengolahan kulit pisang menjadi biosorben adalah terkait dengan perlakuan yang diberikan selama proses, mencakup ketepatan waktu adsorpsi, ukuran biosorben yang digunakan, kecepatan agitasi atau pengadukan antara larutan zat pencemar dengan biosorben, tingkat keasaman atau pH, maupun konsentrasi zat pencemar. Perlakuan yang terlalu berlebihan atau justru kurang akan menghasilkan kemampuan adsorpsi oleh kulit pisang yang tidak maksimal. Waktu adsorpsi menunjukkan pula waktu kontak antara zat pencemar dengan adsorben yang memberi pengaruh terhadap efisiensi dan kecepatan reaksi adsorpsi (Ozer *et al.*, 1998), dimana waktu adsorpsi yang terlalu lama dapat menyebabkan terjadinya kejenuhan bubuk kulit pisang terhadap zat pencemar, sehingga terjadi desorpsi akibat sudah melemahnya ikatan antara zat dengan biosorben yang menurunkan daya adsorpsi kulit pisang (Hosain *et al.*, 2012). Ukuran biosorben berkaitan dengan kesediaan luas permukaan yang mempengaruhi kapasitas adsorpsi, dimana ukuran biosorben yang terlalu kecil lebih mudah membentuk agregat sehingga menyediakan luas permukaan yang lebih sempit dibandingkan partikel individual, namun biosorben yang berukuran terlalu besar atau kasar juga dapat mengurangi kapasitas adsorpsi (Hosain *et al.*, 2012).

Pengaruh kecepatan agitasi dapat dilihat apabila terlalu lambat dapat menyebabkan akumulasi partikel bubuk kulit pisang yang berakibat pada terhalangnya adsorpsi di permukaan, sedangkan agitasi yang terlalu cepat mengakibatkan laju adsorpsi mengalami peningkatan yang semakin kecil atau menuju konstan (Memom *et al.*, 2008), sedangkan pengaruh tingkat keasaman atau pH larutan khususnya terhadap adsorpsi zat pencemar berupa ion logam yaitu berkaitan dengan disosiasi gugus pada bubuk kulit pisang dan dispersi ion logam di air, yakni pH yang terlalu rendah dapat memicu terjadinya persaingan antara ion positif logam dengan sisi aktif bubuk kulit pisang sehingga menghambat adsorpsi ion logam di permukaan (Quan *et al.*, 2010). Mekanisme yang terjadi saat melihat pengaruh tingkat keasaman larutan terhadap kapasitas adsorpsi adalah semakin asam larutan atau rendahnya pH menyebabkan permukaan biosorben mengalami protonasi atau bermuatan positif yaitu dipenuhi dengan ion H^+ , berakibat adanya gaya tolak dengan ion logam yang juga bermuatan positif karena adanya persaingan ion logam dengan ion-ion H^+ untuk menduduki sisi aktif biosorben, tetapi semakin tinggi pH (>6) menyebabkan penurunan adsorpsi akibat pembentukan kompleks hidrosilasi terlarut oleh ion logam dan kompetitornya terhadap sisi aktif biosorben (Arifiyana & Vika, 2020), namun sebaliknya pada adsorpsi zat pewarna justru dengan peningkatan pH dapat menurunkan adsorpsi zat pewarna yang bersifat anion apabila larut, sehingga peningkatan pH yang meningkatkan jumlah anion pada permukaan biosorben dapat menyebabkan terjadinya tolakan elektrostatis antara biosorben dengan zat pewarna (Aksu & Donmez, 2003), demikian dengan tetrasiklin yang membentuk ion negatif (Hu *et al.*, 2021).

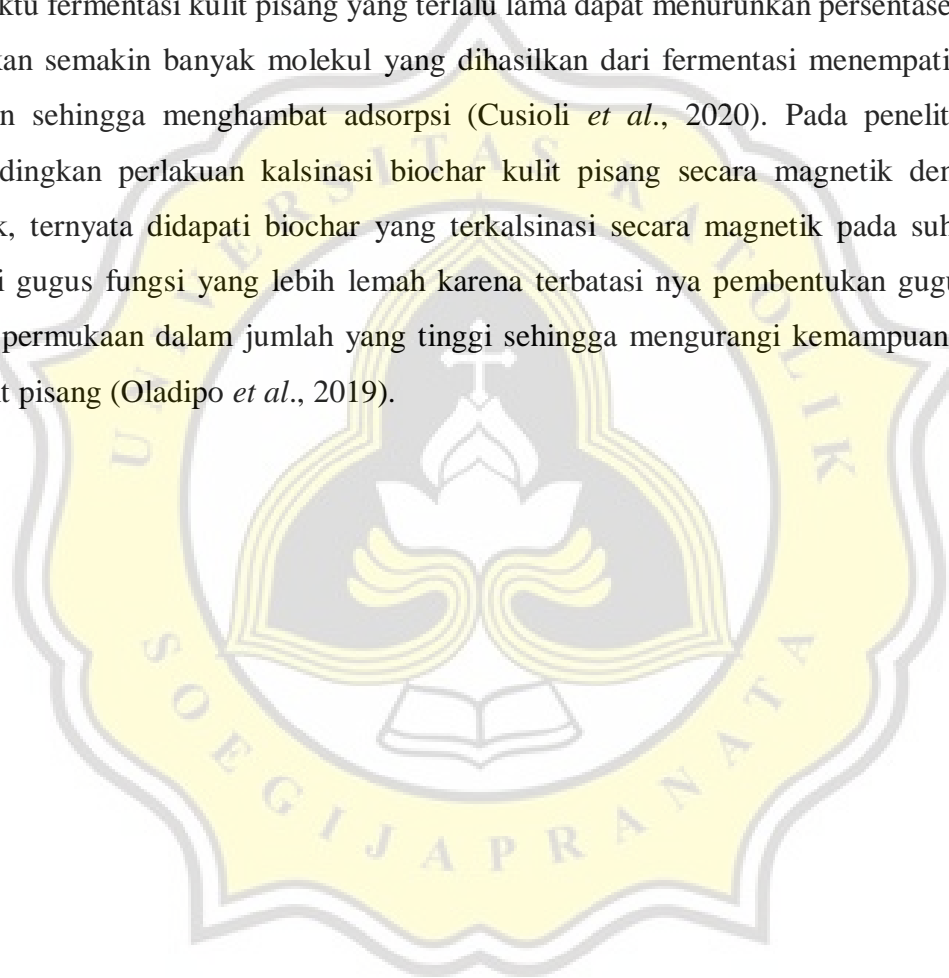
Semakin meningkat konsentrasi zat pencemar maka akan menurunkan daya adsorpsi oleh biosorben, karena semakin banyak zat pencemar yang berdifusi ke permukaan biosorben menyebabkan terjadi penyumbatan sehingga zat pencemar tidak dapat menuju sisi aktif biosorben (Thani *et al.*, 2017). Dapat dilihat diantaranya pada penelitian Maia *et al.* (2021) bahwa dengan semakin tingginya konsentrasi zat pewarna menyebabkan semakin banyak zat pewarna yang teradsorpsi sehingga menyebabkan kejenuhan antara biosorben dengan zat pewarna yang larut sehingga efisiensi adsorpsi menurun, demikian juga terjadi pada ion logam yaitu apabila konsentrasi terlalu tinggi mengakibatkan jumlah ion logam menjadi lebih

tinggi dibandingkan sisi aktif biosorben sehingga menurunkan adsorpsi (Oladipo *et al.*, 2019).

Metode yang diterapkan untuk mengolah kulit pisang menjadi biosorben dalam berbagai penelitian masih banyak dilakukan secara langsung menggunakan kulit pisang teraktivasi sebagai adsorben yang dimana justru memiliki kapasitas adsorpsi lebih rendah dibandingkan dengan melakukan pembakaran terlebih dahulu yang menghasilkan bentuk biochar atau karbon aktif dari kulit pisang (Maia *et al.*, 2021). Pembakaran yang dilakukan paling banyak secara konvensional yaitu pirolisis, merupakan teknologi termokimia yang menghasilkan energi melalui konversi biomassa dengan produk sampingannya yang terbagi menjadi 3 macam yaitu padatan berupa biochar, dalam bentuk cair yaitu *bio-oil*, dan gas pirolitik, dimana dilakukan pada suhu lebih dari 300°C selama 4-7 jam dalam kondisi tanpa oksigen atau jumlah sangat terbatas bertujuan untuk mencegah terjadinya pembakaran sempurna menghasilkan abu tanpa terbentuknya arang (Ridhuan & Joko, 2016). Beberapa percobaan melibatkan aktivator pada proses pirolisis yang bertujuan untuk menghasilkan biochar yang memiliki porositas tinggi, dimana aktivator yang dibutuhkan dalam jumlah banyak, selain itu semakin banyak aktivator maka diperlukan makin banyak pula pelarut untuk membersihkan pengotor untuk mendapatkan biochar dengan kemurnian yang tinggi seperti pelarut asam HCl, dimana baik pelarut aktivator maupun pencuci yang apabila terbuang dapat mencemari lingkungan.

Teknologi pirolisis dalam skala industri kurang efisien terutama untuk membuat reaktor dalam skala lebih besar dikarenakan memungkinkan terjadinya *bubbling*, *channeling*, memerlukan biaya yang tinggi berkaitan dengan perlunya penyediaan kondisi kurang oksigen, peralatan yang digunakan sangat besar, serta penggunaan suhu dan waktu retensi yang tinggi sehingga kurang ekonomis (Syamsiro, 2014). Teknologi karbonisasi lain yang digunakan adalah karbonisasi hidrotermal, namun memiliki kelemahan yaitu dapat merusak pori-pori pada permukaan kulit pisang sebagai adsorben sehingga mengurangi kapasitas adsorpsi (Zhou *et al.*, 2017). Namun sayangnya karbonisasi ini menghasilkan abu dengan ukuran partikel yang sangat kecil sehingga sulit untuk *recover* dan digunakan kembali (Negroiu *et al.*, 2021).

Tantangan lain ditemukan *pre-treatment* yang digunakan termasuk aktivasi kulit pisang menggunakan larutan asam atau basa seperti larutan H_3PO_4 maupun $NaOH$, didapati bahwa *pre-treatment* aktivasi kulit pisang dengan metode secara kimia dan fisik seperti autoklaf, penggunaan asam dan alkali, elektrokoagulasi untuk meningkatkan adsorpsi memberikan dampak buruk dengan menghasilkan bahan beracun yang berbahaya bagi lingkungan termasuk manusia (Hashem *et al.*, 2020). *Pre-treatment* secara biologis berupa fermentasi, yaitu waktu fermentasi kulit pisang yang terlalu lama dapat menurunkan persentase adsorpsi disebabkan semakin banyak molekul yang dihasilkan dari fermentasi menempati jaringan biosorben sehingga menghambat adsorpsi (Cusioli *et al.*, 2020). Pada penelitian yang membandingkan perlakuan kalsinasi biochar kulit pisang secara magnetik dengan non magnetik, ternyata didapati biochar yang terkalsinasi secara magnetik pada suhu $800^{\circ}C$ memiliki gugus fungsi yang lebih lemah karena terbatasnya pembentukan gugus fungsi asam di permukaan dalam jumlah yang tinggi sehingga mengurangi kemampuan adsorpsi oleh kulit pisang (Oladipo *et al.*, 2019).



4.5. Peluang

4.5.1. Tepung Kulit Pisang

Kulit pisang sebagai sumber pati berpeluang tinggi untuk dijadikan sebagai tepung yang dapat mensubstitusi penggunaan tepung terigu dimana hingga kini masih menjadi ketergantungan konsumen Indonesia, bahkan Indonesia masih melakukan impor tepung terigu. Dengan produksi dan pengolahan buah pisang yang tinggi di Indonesia menghasilkan limbah kulit pisang dalam jumlah tinggi pula, penerapan pengolahan limbah kulit pisang menjadi tepung kulit pisang dapat sekaligus menyelesaikan persoalan yaitu mengurangi jumlah limbah kulit pisang serta produksi tepung kulit pisang dapat mengurangi impor tepung terigu (Yanuarti, 2016). Produksi tepung kulit pisang dari limbah kulit pisang dalam industri skala besar juga memiliki peluang yang tinggi karena ketersediaan limbah kulit pisang yang melimpah, metode yang mudah, serta penggunaan alat dan bahan mudah dijumpai juga tidak memerlukan biaya yang terlalu tinggi. Faktor lain yang dapat mendukung peluang pengolahan kulit pisang menjadi tepung adalah karena kandungan zat gizinya yang cukup lengkap seperti karbohidrat, protein, lemak, vitamin, dan juga mineral, penggunaan tepung kulit pisang sebagai bahan baku pengolahan pangan dapat menghasilkan berbagai jenis produk makanan dengan nilai gizi tinggi, dengan demikian memiliki nilai lebih sebagai bahan pangan yang memiliki manfaat kesehatan. Kelebihan lain dari tepung kulit pisang adalah sebagian besar karakteristik kulit pisang sudah memenuhi syarat mutu tepung terigu berdasarkan SNI (Standar Nasional Indonesia), diantaranya syarat bentuk, aroma, karbohidrat, lemak, serat pangan, kadar air, kadar abu, maupun keberadaan benda asing (Aryani *et al.*, 2018), tepung kulit pisang tinggi akan vitamin C dan lemak, serta nilai kalori lebih rendah dibandingkan tepung terigu (May *et al.*, 2019).

Perbaikan yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kualitas tepung kulit pisang yang dihasilkan yaitu diperlukannya perlakuan tambahan yang diberikan seperti perendaman dengan beberapa jenis larutan setelah pencucian dan pemotongan kulit pisang yang bertujuan untuk mencegah pencoklatan terutama yang terjadi saat pengeringan, sesuai dengan teori Tranggono & Sutardi (1990) yaitu upaya pencegahan pencoklatan enzimatis salah satunya dilakukan melalui penambahan sulfit maupun asam termasuk asam sitrat untuk mencegah

pencoklatan enzimatik pada bahan pangan. Larutan yang dapat ditambahkan seperti larutan natrium tiosulfat, asam sitrat atau air perasan jeruk nipis, dijelaskan bahwa larutan natrium tiosulfat mengandung gugus sulfidat yang berperan menghambat pencoklatan melalui reaksi dengan gugus karbonil menghasilkan melanoidin yang menghambat produksi warna coklat. Perendaman dalam asam sitrat juga bertujuan untuk mencegah pencoklatan yang terjadi secara enzimatik (Motaghi & Parisa, 2016), dijelaskan oleh Siddiq *et al.* (1992) bahwa asam sitrat berperan sebagai asidulan yaitu penambah asam pada produk pangan yang bekerja melalui penurunan pH jaringan hingga di bawah pH 3, dan berakibat pada lambatnya reaksi pencoklatan enzimatik dikarenakan pH optimum untuk enzim fenolase bekerja adalah 4-7 dan menurun apabila mencapai pH 3. Asam sitrat dapat diperoleh dari sari buah jeruk nipis, dimana sarinya sangat asam mengandung asam sitrat 7-8%, oleh sebab itu hasil perasan jeruk nipis juga dapat digunakan sebagai perlakuan tambahan untuk mencegah terjadinya pencoklatan (Sarwono, 2001).

Peluang perbaikan terhadap metode pengeringan yang masih banyak dilakukan secara konvensional (*sun drying* dan pengovenan), yaitu mengaplikasikan metode pengeringan buatan seperti menggunakan alat pengering, memiliki kelebihan yaitu tidak tergantung cuaca sehingga tidak mengganggu produksi tepung kulit pisang, suhu dan kecepatan pengeringan dapat diatur, terkendalinya sanitasi dan higienitas selama produksi. Pengeringan ini menjadi tahapan penting dalam produksi tepung kulit pisang, karena sangat mempengaruhi biaya produksi dan kualitas produk tepung kulit pisang yang dihasilkan (Nguyen *et al.*, 2016), namun harus diperhatikan bahwa tidak semua metode pengeringan buatan cocok dan baik diaplikasikan pada bahan kulit pisang sehingga harus diteliti dan dikaji metode pengeringan yang paling sesuai dan memberikan hasil terbaik untuk memproduksi tepung kulit pisang, dimana hasil dapat dinilai dari karakteristik dan kandungan gizi tepung kulit pisang.

Metode pengeringan buatan yang sudah ada dalam penelitian diantaranya dengan radiasi gelombang mikro atau *microwave*, memiliki kelebihan yaitu waktu pengeringan singkat sehingga hemat konsumsi energi dengan kelemahannya yaitu memungkinkan terjadinya hangus pada bahan, degradasi komponen bioaktif, serta pemanasan yang tidak merata (Erbay & Icier, 2009). Dengan demikian berbagai perlakuan yaitu variasi penggunaan daya

microwave perlu diperhatikan untuk memaksimalkan hasil pengeringan, berdasarkan penelitian Vu *et al.* (2016) membuktikan bahwa semakin besar daya maka pengeringan akan berjalan lebih cepat dikarenakan panas yang dihasilkan semakin tinggi yang mempercepat evaporasi molekul air dari dalam kulit pisang ke lingkungan sekitar (Ying *et al.*, 2018), dengan hasil kulit pisang memiliki kadar air (12-14%) dan aktivitas air rendah (0,39-0,44) yang mana dapat mencegah tumbuhnya mikroorganisme dan juga aktivitas enzim maupun oksidasi komponen bioaktif (Leistner, 1992). Penggunaan daya *microwave* yang semakin tinggi dengan waktu lebih singkat menghasilkan kulit pisang kering dengan jumlah antioksidan tinggi. *Microwave drying* memiliki laju pengeringan semakin meningkat seiring peningkatan waktu pengeringan, dibandingkan *shade drying* dengan laju pengeringan yang berfluktuasi sehingga pengeringan lebih cepat apabila menggunakan *microwave drying*. Dijelaskan juga dalam penelitian Anuar *et al.* (2018) bahwa *microwave drying* menghasilkan tepung kulit pisang dengan kadar air lebih rendah dan berpengaruh pada daya alir yang lebih baik namun ukuran partikel kurang homogen dibandingkan menggunakan *shade drying*, dimana daya alir menjadi salah satu syarat sifat tepung yang baik karena mempengaruhi penanganan, maupun distribusi selama pemrosesan di industri pangan (Teunou *et al.*, 1999). Pengeringan vakum memiliki kelebihan yaitu penggunaan suhu lebih rendah serta waktu pengeringan singkat, dipengaruhi oleh penggunaan besarnya suhu dimana semakin tinggi suhu maka pengeringan semakin cepat (Sagar & Kumar, 2010), namun suhu yang terlalu tinggi dan waktu pengeringan terlalu singkat akan menghasilkan kulit pisang dengan kadar air masih tinggi karena suhu yang terlalu tinggi menyebabkan bagian luar kulit pisang sudah mengering terlebih dahulu sehingga menghambat difusi air dari dalam ke permukaan kulit pisang (Garau *et al.*, 2007), serta kandungan senyawa bioaktif juga menjadi rendah. *Dehumidified air drying* dapat mempertahankan warna dan aroma kulit pisang (Inazu *et al.*, 2002), dengan memperhatikan suhu pengeringan dimana semakin tinggi suhu justru mengandung senyawa bioaktif semakin tinggi.

Pengeringan *freeze drying* memberikan hasil kulit pisang dengan kandungan air dan aktivitas air terendah, mampu mempertahankan warna terang kulit pisang, menghasilkan kulit pisang dengan senyawa flavonoid dan proantosianidin tertinggi, sedangkan kulit pisang yang

dikeringkan menggunakan radiasi gelombang mikro mengandung air dan aktivitas air tertinggi, total fenolik dan kapasitas antioksidan tertinggi, dengan demikian pengeringan paling sesuai untuk kulit pisang adalah dengan radiasi gelombang mikro (*microwave drying*) dan *freeze drying* (Vu *et al.*, 2016).

4.5.2. Ekstrak Pektin

Pektin dapat diperoleh dengan memanfaatkan sumber yang ada yaitu salah satunya adalah kulit pisang, sehingga dapat menjadi solusi untuk meminimalkan import pektin dengan memproduksi bahan pektin sendiri tanpa harus melakukan import terutama di Indonesia yang kaya akan sumber nya yaitu kulit pisang. Perbaikan yang dapat dilakukan untuk memaksimalkan upaya ekstraksi pektin dari kulit pisang meliputi penggunaan pelarut, metode ekstraksi yang digunakan, pengoptimalan perlakuan selama ekstraksi. Ekstraksi menggunakan pelarut asam sitrat yang tergolong sebagai pelarut organik memiliki sifat tidak terlalu toksik dibandingkan asam mineral, selain itu tingkat keasaman lebih rendah sehingga tidak menyebabkan degradasi pektin menjadi asam pektat yang berarti menghasilkan pektin dengan yield lebih tinggi (Rungraeng & Supaluck, 2020). Masih banyaknya penelitian ekstraksi pektin kulit pisang menggunakan pelarut asam hidroklorat dibandingkan asam sitrat, sehingga disarankan adanya penelitian lebih mendalam ekstraksi pektin pada kulit pisang menggunakan pelarut asam sitrat, terkait kuantitas dan kualitas pektin yang dihasilkan serta perbandingan dengan menggunakan jenis pelarut asam lainnya.

Ekstraksi dengan metode MAE (*Microwave Assisted Extraction*) yaitu memanfaatkan gelombang mikro, juga dapat menjadi salah satu upaya perbaikan produksi pektin dari kulit pisang, karena sesuai diaplikasikan untuk ekstraksi pektin yaitu senyawa dengan sifat termolabil, dimana metode MAE memiliki kontrol terhadap suhu yang lebih baik, tidak dengan pemanasan yang berlebih, waktu ekstraksi lebih singkat sehingga dapat menghemat konsumsi energi dan juga pektin yang dihasilkan memiliki *yield*, presisi, dan akurasi lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional (Purwanto, 2010). Panas yang bersumber dari radiasi gelombang mikro dapat tertransfer lebih cepat pada pelarut yang mempercepat peningkatan suhu ekstraksi serta tekanan dinding sel bahan yaitu kulit pisang yang menyebabkan dinding sel hancur, sehingga komponen-komponen pada kulit pisang lebih

mudah terlepas, selain itu panas menonaktifkan enzim pektin esterase yaitu enzim yang menghidrolisis ikatan metil ester pada pektin menjadi pektat dan etanol berdampak pada berkurangnya kelarutan pektin, dengan demikian konsentrasi pektin kulit pisang yang diperoleh melalui ekstraksi MAE semakin tinggi (Pongmalai *et al.*, 2015) dengan tingkat kemurnian yang tinggi, faktor lain yang mendorong adalah karena MAE dapat menyebabkan terjadinya kerusakan permukaan bahan lebih intensif sehingga kandungan-kandungan di dalamnya lebih mudah diekstrak (Kaderides *et al.*, 2019). Metode MAE juga berpeluang tinggi untuk diaplikasikan pada produksi pektin kulit pisang dalam skala industri karena memiliki kecepatan ekstraksi tinggi dan biaya yang rendah (Sarker & Nahar, 2012).

Selain metode MAE, metode ekstraksi lain yang dapat menjadi pertimbangan dalam perbaikan adalah metode UAE (*Ultrasound Assisted Extraction*) yaitu ekstraksi yang menggunakan gelombang ultrasonik sebagai sumber energi, dengan cara kerja membuat dinding sel pecah dan mengeluarkan komponen di dalam sel menuju media ekstraksi (Toma *et al.*, 2001). Metode UAE memiliki kelebihan yaitu memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan ekstraksi konvensional yaitu maserasi, dimana waktu ekstraksi menjadi lebih singkat akibat adanya kavitasasi atau pemecahan dinding sel yang diinduksi secara ultrasonik (Shirsath *et al.*, 2012). Gelombang ultrasonik yang dihasilkan akan mempercepat penetrasi dari pelarut ke dinding sel kulit pisang sehingga lebih mudah terjadinya pelepasan komponen dan transfer massa pada kulit pisang (Keil, 2007). Sama halnya dengan MAE, yaitu tidak perlukannya suhu ekstraksi yang terlalu tinggi sehingga cocok untuk senyawa termolabil seperti pektin (Zou *et al.*, 2014), tidak membutuhkan banyak pelarut, serta hasil ekstraksi pektin lebih maksimal (Rostagno & Prado, 2013). Dengan demikian ekstraksi pektin dari kulit pisang dengan metode MAE dan UAE yang merupakan metode ekstraksi non termal yang baik dan sesuai diaplikasikan sehingga berpeluang tinggi untuk memproduksi pektin pada industri pangan.

Perbaikan perlakuan selama ekstraksi yang dapat memaksimalkan hasil ekstraksi pektin kulit pisang diantaranya berkaitan dengan suhu ekstraksi, waktu ekstraksi, rasio antara kulit pisang dengan pelarut, serta jumlah tahapan ekstraksi. Peningkatan suhu ekstraksi pada waktu yang cukup akan meningkatkan laju ekstraksi serta kelarutan pektin sehingga memberikan tingkat

ekstraksi lebih tinggi (Tanaid, 2018), kelarutan pektin semakin meningkat dengan semakin meningkatnya suhu ekstraksi dikarenakan reaksi hidrolisis protopektin menjadi pektin dengan mempermudah difusi pelarut ke dalam jaringan bahan sehingga semakin banyak pektin yang terlarut (Towle & Cristensen, 1973). Penurunan berat ekuivalen pektin terjadi pada saat suhu ekstraksi meningkat, terjadi akibat adanya peningkatan depolimerisasi oleh reaksi hidrolisis pada ikatan glikosidik, selain itu dapat menurunkan laju geser atau *shear rate* yang meningkatkan viskositas pektin kulit pisang (Rasidek *et al.*, 2018). Pengoptimalan ekstraksi juga dapat dilakukan dengan meningkatkan waktu ekstraksi dengan pelarut asam dapat meningkatkan pula jumlah pektin yang dihasilkan yang ditunjukkan dengan meningkatnya DM (derajat metilasi) sehingga semakin berkurangnya kandungan metoksil. Ekstraksi dengan pelarut asam menghasilkan pektin dengan berat molekul rata-rata viskositas (M_v) lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan air sebagai pelarut, disebabkan terjadinya depolimerisasi melalui hidrolisis asam yang menyebabkan rantai asam galakturonat semakin pendek (Diaz *et al.*, 2007), demikian apabila waktu ekstraksi yang semakin panjang maka akan membentuk pektin dengan rantai asam galakturonat yang semakin pendek pula sehingga berat molekul rata-rata viskositas (M_v) semakin kecil.

Peningkatan waktu dan suhu ekstraksi, serta rasio antara kulit pisang dengan pelarut mampu meningkatkan yield pektin dengan kadar abu rendah sebagai kriteria pembentukan gel yang baik, dimana kadar abu menunjukkan kemurnian pektin yaitu semakin rendah kadar abu berarti semakin murni pektin yang dihasilkan (J. Hwang *et al.*, 1992). Ekstrak pektin pada kulit pisang semakin meningkat dengan semakin meningkatnya suhu ekstraksi serta tahapan ekstraksi, dimana ekstraksi dengan multi tahap menghasilkan *yield* pektin lebih tinggi dibandingkan hanya satu tahap ekstraksi dengan alasan ekstraksi satu tahap tidak memungkinkan untuk melarutkan semua ekstrak karena terjadi kesetimbangan antara ekstrak terlarut dengan yang masih tertinggal pada bahan (Bernasconi *et al.*, 1995). Ekstraksi lebih optimal dilakukan dengan banyak tahapan dengan menggunakan pelarut dalam jumlah sedikit pada setiap tahapannya, dimana berdasarkan penelitian Nurhayati *et al.* (2016) ekstraksi optimal tercapai pada jumlah tahapan dua kali dengan waktu ekstraksi yang lebih efisien

4.5.3. Biosorben

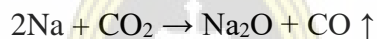
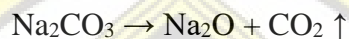
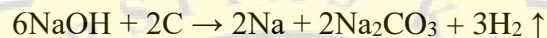
Kulit pisang berpeluang untuk dijadikan biosorben karena mengandung gugus fungsional yaitu gugus hidroksil (-OH), yang dapat mengikat ion logam berat (Castro *et al.*, 2011), dimana gugus fungsional berasal dari polisakarida yang terkandung pada kulit pisang (Jacobs & Delcour, 1998). Gugus hidroksil inilah yang menjadikan kulit pisang dapat dimanfaatkan sebagai bioadsorben atau biosorben logam berat, dimana akan terjadi ikatan melalui gaya *Van der Waals* maupun ikatan hidrogen dengan logam berat. Mekanisme penyerapan ion logam oleh adsorben yaitu dengan mengaktifkan gugus hidroksil yang membentuk kompleks kelat stabil dengan ion logam, selain itu adanya pengaruh pengikatan molekul pada polisakarida yang semakin banyak sehingga semakin mudah terjadinya pertukaran ion seperti yang dijabarkan dalam Jamil *et al.* (2009), pertukaran ion yang terjadi berupa transfer proton (H^+) dari -OH ke larutan sehingga ion logam menggantikan posisi proton melalui kompleks kelat yang terbentuk antara ligan -OH dengan atom pusat logam yang didasari dengan interaksi kuat antara ion logam dengan anion basa kuat seperti -OH (Meri, 2018).

Berdasarkan tantangan paling banyak yang dijumpai dalam mengolah limbah kulit pisang menjadi biosorben, yaitu terkait perlakuan yang diberikan selama pengolahan maka dapat ditemukan juga peluang perbaikan untuk memaksimalkan kemampuan adsorpsi oleh biosorben kulit pisang. Perlakuan ini diantaranya, berkaitan peningkatan waktu adsorpsi yang dapat meningkatkan juga kemampuan adsorpsi, semakin lama waktu kontak antara zat pencemar dengan biosorben maka akan semakin banyak zat pencemar yang diserap akibat banyaknya tumbukan dan interaksi oleh partikel-partikel bubuk kulit pisang terhadap zat pencemar, selain itu semakin lama waktu kontak maka gugus fungsi sudah maksimal untuk menyerap ion logam. Dijelaskan bahwa pada awalnya laju penyerapan meningkat dengan tajam, terkait ketersediaan sisi pengikat pada kulit pisang yang aktif sehingga dengan meningkatnya waktu adsorpsi juga meningkatkan transfer massa yang menyebabkan banyaknya tumbukan antara sisi aktif bubuk kulit pisang dengan zat pencemar (Mahindrakar *et al.*, 2018).

Demikian juga pada adsorpsi zat pencemar berupa minyak, semakin lama waktu kontak maka semakin lama juga terjadinya interaksi antara molekul minyak dengan partikel biosorben yang menyebabkan terjadinya tumbukan memecah tetesan minyak sehingga lebih mudah untuk terjadinya adsorpsi di permukaan biosorben (Thani *et al.*, 2017). Pada penelitian Mahindrakar *et al.* (2018) juga dijelaskan bahwa banyak senyawa volatil yang terlepas dari kulit pisang terkarbonisasi apabila suhu semakin tinggi sehingga semakin banyak pori yang terbuka untuk penyerapan ion logam, dimana adsorpsi ion logam meningkat signifikan ketika suhu di atas 150°C (Ozer *et al.*, 1998), alasan lain adalah mampu memberikan energi yang cukup untuk adsorpsi ion logam pada permukaan biochar (Abdelhafez *et al.*, 2016). Peluang perbaikan perlakuan lainnya yaitu dengan meningkatkan dosis biosorben dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi, dikarenakan semakin banyak sisi aktif yang tersedia untuk mengikat zat pencemar (Thani *et al.*, 2017). Tingkat keasaman yang baik untuk adsorpsi adalah tidak terlalu tinggi dan tidak terlalu rendah, sehingga pH optimum yaitu 5-7 (Mahindrakar *et al.*, 2018). Faktor lain yang mempengaruhi adsorpsi adalah konsentrasi zat pencemar itu sendiri, dimana semakin tinggi konsentrasi zat pencemar maka semakin banyak tumbukan yang terjadi antara partikel bubuk kulit pisang dengan zat pencemar yang meningkatkan kemampuan adsorpsi oleh biosorben. Pemberian larutan aktivasi pada konsentrasi tinggi akan memberikan daya adsorpsi zat warna oleh biosorben yang semakin tinggi pula Kurniati *et al.* (2019).

Mengubah kulit pisang menjadi bentuk karbonnya atau biochar melalui pembakaran pirolisis atau karbonisasi berpeluang meningkatkan kapasitas adsorpsi terkait keberadaan gugus fungsi teroksigenasi, seperti gugus hidroksil, karboksilat, dan karbonil dan adanya mekanisme pertukaran ion dengan gugus fungsi ini (Milhajlović *et al.*, 2016), memiliki luas permukaan yang besar dibandingkan karbon komersial (Li, Yinchun *et al.*, 2016). Biochar memiliki proporsi gugus karboksilat (C=O) lebih tinggi dibandingkan kulit pisang berhubungan dengan terjadinya pemutusan ikatan glikosida pada lignin dan selulosa yang meningkatkan kapasitas adsorpsi (Yusuf *et al.*, 2020). Sifat amorf karbon aktif terdiri dari fragmen karbon mikrokristalin seperti grafit, karbon bidang retikuler tunggal, dan karbon tidak terorganisir secara acak (Selvaraju & Bakar, 2017). Struktur karbon aktif kulit pisang

yang berpori dan heterogen (ukuran berbeda-beda dan bentuk tidak beraturan) menandakan luas permukaan yang besar, terjadi akibat penguapan agen pengaktivasi yaitu NaOH selama karbonisasi sehingga memberikan ruang dan membentuk pori yang baik untuk adsorpsi (Maia *et al.*, 2021). Agen pengaktivasi NaOH dapat meningkatkan ukuran pori-pori pada permukaan kulit pisang disebabkan terjadinya reaksi antara NaOH dengan molekul kimia karbon sehingga menyebabkan separasi dan degradasi lapisan grafis, dimana reaksi yang terjadi adalah reduksi kation Na^+ menjadi natrium karbonat dan reduksi anion hidroksil menghasilkan gas hidrogen, natrium karbonat bereaksi lagi menghasilkan gas karbondioksida dan karbon yang menyebabkan terbentuknya pori-pori (Martins *et al.*, 2015)



Selain aktivator basa NaOH, terdapat juga aktivator asam fosfat mampu menghasilkan rasio H/C, O/C, dan N/C yang lebih tinggi pada biochar menandakan tingginya gugus fungsi hidroksil, karboksil, dan amina yang memicu reaksi elektrostatik antara ion logam dengan permukaan biosorben, selain itu lebih tingginya nilai luas permukaan dan total volume pori yang dapat meningkatkan adsorpsi (Pérez-Marín *et al.*, 2007).

Dengan kelebihan yang dimiliki teknologi karbonisasi yaitu dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi oleh kulit pisang dengan memanfaatkan bentuk biochar atau karbon aktifnya, maka dapat dijadikan peluang pengembangan teknologi pengolahan kulit pisang menjadi biosorben dari yang sebagian besar hanya dilakukan dengan menggunakan langsung tepung kulit pisang teraktivasi. Teknologi karbonisasi hidrotermal dapat menjadi peluang perbaikan dari pirolisis yang masih kurang efisien diaplikasikan pada skala industri. Karbonisasi hidrotermal merupakan pembakaran untuk mengkonversi bahan organik menghasilkan karbon terstruktur dengan suhu dan tekanan tertentu melalui media air di dalam reaktor tertutup, konversi karbon pada bahan organik dapat mencapai 99% menjadi biochar (Hoekman *et al.*, 2011). Kelebihan karbonisasi hidrotermal atau HTC (*hydrothermal carbonization*) adalah penggunaan suhu dan tekanan yang relatif rendah sehingga dapat menghemat energi, mampu

memproduksi biochar bersifat amorf dengan tingginya kandungan materi yang mudah menguap sehingga membutuhkan lebih sedikit aktivator, dengan demikian tidak banyak pembuangan pelarut yang dapat mencemari lingkungan (Hutomo, S.G., 2020).

Pre-treatment aktivasi kulit pisang yang dapat menggantikan metode secara kimia dan fisik seperti autoklaf, penggunaan asam dan alkali, elektrokoagulasi untuk meningkatkan adsorpsi adalah dengan perlakuan kombinasi antara biologis dan mekanis, secara biologis adanya pengaruh enzim yang dihasilkan oleh jamur *Rhizopus microsporus* AH3 terhadap porositas jaringan serat pada kulit pisang dengan mengeliminasi serat yang tidak diinginkan dan mengaktifkan permukaan serat. Enzim yang dihasilkan adalah enzim lignoselulosa yang mendegradasi senyawa kompleks pada dinding sel seperti lignin dan selulosa menjadi senyawa sederhana, sehingga meningkatkan pori-pori dan luas permukaan yang juga meningkatkan adsorpsi (Hasanin *et al.*, 2019). Luas permukaan kulit pisang meningkat setelah fermentasi yang diakibatkan oleh penetrasi miselium jamur dan enzim yang menembus serat sehingga terbentuk lubang atau pori-pori (Hashem *et al.*, 2020).

Penambahan epiklorohidrin dapat meningkatkan ketahanan tepung kulit pisang terhadap asam melalui pembentukan ikatan dengan polisakarida, dengan hasil terbaik yaitu pada perlakuan dosis radiasi 10 kGy, epiklorohidrin berperan sebagai polifungsional monomer yang menjembatani ikatan silang sehingga semakin banyak ikatan yang terbentuk menyebabkan meningkatnya ketahanan rantai polisakarida atau berkurangnya kerusakan, selain itu matriks menjadi semakin kuat, dan meningkatkan kekompakan polimer. Penambahan epiklorohidrin juga berpengaruh terhadap daya serap ion logam, dimana semakin banyak ion logam yang terserap akibat ikatan silang yang terbentuk antara tepung kulit pisang dengan epiklorohidrin Meri (2018).