

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Rendemen Alginat Oligosakarida

Rataan rendemen alginat oligosakarida dari rumput laut *Turbinaria murayana* dari berbagai perlakuan dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rendemen Alginat Oligosakarida

Perlakuan	Rataan (%)
A (Metode Enzimatis)	87,85 ^a
B (Metode kimia)	40,51 ^b
C (Metode Fisika)	28,96 ^c
Standar Error (SE)	0,76

Keterangan: a, b, c = berbeda sangat nyata ($P < 0,01$)

Tabel 3 menunjukkan rata-rata rendemen alginat oligosakarida (AOS) yang terdegradasi menggunakan metode yang berbeda (enzimatis, kimia, dan fisika) berkisar antara 28,96%-87,85%. Berdasarkan analisis statistik menunjukkan bahwa perbedaan metode degradasi alginat memberikan pengaruh sangat nyata ($P < 0,01$) terhadap rendemen AOS yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan metode enzimatis, kimia, dan fisika memiliki tingkat efektivitas yang berbeda dalam mendegradasi alginat menjadi AOS. Hasil analisa uji lanjut DMRT menunjukkan bahwa setiap perlakuan memiliki perbedaan yang nyata satu sama lain. Perlakuan A berbeda sangat nyata ($P < 0,01$) dibandingkan dengan perlakuan B dan C sedangkan perlakuan B berbeda sangat nyata ($P < 0,01$) dengan perlakuan C.

Persentase rendemen perlakuan A lebih tinggi dibandingkan perlakuan B dan C yang disebabkan oleh aktivitas enzim alginat liase yang memutuskan ikatan β - (1→4) secara terarah, sehingga menghasilkan AOS dengan derajat polimerisasi yang lebih terkontrol dan kehilangan produk yang relatif rendah. Efektivitas pembentukan AOS tersebut sejalan dengan pendapat Li *et al.* (2016), yang menyatakan bahwa rendemen AOS sangat dipengaruhi oleh aktivitas yang

spesifisitas kerja enzim alginat liase yang digunakan. Ramnani *et al.* (2012), melaporkan bahwa rendemen AOS juga dipengaruhi oleh komposisi rasio mannuronat (M) dan guluronat (G) dalam struktur alginat, sehingga karakteristik substrat turut menentukan jumlah produk yang dihasilkan.

Persentase rendemen perlakuan B lebih rendah dari pada perlakuan A. Hal ini disebabkan pada perlakuan metode kimia menggunakan asam klorida (HCl 3 M), sehingga mempercepat pemutusan ikatan glikosidik $\beta - (1 \rightarrow 4)$ pada rantai alginat dengan konsentrasi asam yang relatif tinggi. Kondisi asam yang kuat menyebabkan pemutusan rantai berlangsung secara acak dan kurang terkontrol, sehingga memicu degradasi lebih lanjut pada unit monomer. Monomer asam uronat bebas tidak bertahan sebagai gula reduksi tunggal, melainkan terkonversi menjadi produk berupa senyawa volatil seperti furoic acid. Proses ini terjadi pada saat pemanasan larutan yang telah dicampurkan dengan HCl 3 M pada suhu 100°C selama 20 menit.

Cairan filtrat yang dikeringkan senyawa tersebut menguap bersama pelarut, dan secara signifikan mengurangi rendemen AOS, hal ini sejalan dengan pendapat Korzycka *et al.* (2021), yang menyatakan bahwa depolimerisasi alginat dengan menggunakan metode kimia menghasilkan distribusi ukuran fragmen yang luas serta memungkinkan terjadinya degradasi lanjutan, sehingga mempengaruhi rendemen akhir oligosakarida. Pada konsentrasi asam yang lebih tinggi, intensitas pemutusan pada segmen G-M meningkat dan mempercepat fragmentasi struktur polimer secara keseluruhan. Peningkatan konsentrasi asam dapat mempercepat proses depolimerisasi dan pada kondisi tertentu dapat meningkatkan jumlah fragmen terlarut. Nainggolan *et al.* (2021), melaporkan bahwa kondisi asam yang

terlalu kuat justru berpotensi menimbulkan degradasi berlebihan. Penggunaan asam klorida (HCl 3 M) dengan kecepatan hidrolisis yang tinggi menyebabkan sebagian produk terurai lebih lanjut dan tidak seluruhnya dapat dipertahankan sebagai alginat oligosakarida sehingga rendemen metode kimia lebih rendah dibandingkan metode enzimatis.

Persentase perlakuan C lebih rendah dibandingkan perlakuan A dan B hal ini disebabkan oleh mekanisme degradasi pada metode fisika yang bergantung pada energi panas melalui pemanasan pada suhu $\pm 100^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam dalam sistem terbuka, tanpa adanya katalis enzim ataupun kimia. Meskipun peningkatan suhu dapat meningkatkan energi kinetik molekul dan memperbesar frekuensi tumbukan antar partikel, energi yang dihasilkan pada kondisi tersebut belum cukup kuat untuk memutuskan ikatan glikosidik $\beta - (1 \rightarrow 4)$ secara efektif dan terarah. Setelah pengendapan dengan alkohol 96%, cairan oligosakarida dipisahkan dari endapan yang terbentuk melalui proses penyaringan.

Penelitian Aida *et al.* (2010), yang menunjukkan bahwa depolimerisasi AOS menggunakan metode fisika bergantung pada penggunaan suhu pada saat degradasi. Suhu 100°C tanpa tekanan tambahan, proses degradasi cenderung lebih lambat dan kurang efisien dibandingkan kondisi hidrotermal dengan suhu tinggi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa persentase rendemen AOS yang diperoleh melalui metode enzimatis lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya seperti menurut Addina dkk. (2020), rendemen AOS sebesar 85,46%, sedangkan menurut Afni dkk. (2017), melaporkan rendemen sebesar 38,33%. Selain itu, rendemen AOS yang dihasilkan melalui metode kimia pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian yang dilaporkan

oleh szekalska *et al.* (2021), dengan rendemen AOS sebesar 28,1%. Pada metode fisika, rendemen AOS yang dihasilkan dalam penelitian juga lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Aida *et al.* (2010), yang melaporkan rendemen AOS sebesar 20%.

4.2 Kadar Air Alginat Oligosakarida

Rataan kadar air AOS dari rumput laut *Turbinaria murayana* dari berbagai perlakuan dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kadar Air Alginat Oligosakarida

Perlakuan	Rataan (%)
A (Metode Enzimatis)	12,22 ^b
B (Metode kimia)	5,56 ^c
C (Metode Fisika)	19,79 ^a
Standar Error (SE)	0,48

Keterangan: a, b, c = berbeda sangat nyata ($P < 0,01$)

Tabel 4 menunjukkan rata-rata kadar air AOS yang didegradasi menggunakan metode yang berbeda (enzimatis, kimia, dan fisika) berkisar antara 5,56%-19,79%. Berdasarkan analisis statistik menunjukkan bahwa perbedaan metode degradasi alginat memberikan pengaruh sangat nyata ($P < 0,01$) terhadap kadar air AOS yang dihasilkan. Hasil analisa uji lanjut DMRT menunjukkan bahwa setiap perlakuan memiliki perbedaan yang nyata satu sama lain. Perlakuan A berbeda sangat nyata ($P < 0,01$) dibandingkan dengan perlakuan B dan C sedangkan perlakuan B berbeda sangat nyata ($P < 0,01$) dengan perlakuan C. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap metode degradasi menghasilkan karakteristik struktur molekul yang berbeda, khususnya dalam hal tingkat paparan gugus hidrofilik, sehingga berpengaruh terhadap kapasitas bahan dalam menyerap dan mempertahankan air.

Perlakuan A (metode enzimatis) menghasilkan kadar air pada tingkat sedang, hal ini disebabkan degradasi yang berlangsung secara enzimatis terjadi

secara spesifik dan terarah karena enzim alginat liase memutus ikatan $\beta - (1 \rightarrow 4)$ pada titik tertentu. Proses ini mengubah air terikat dengan matriks gel menjadi air bebas yang mudah dievaporasi oleh aliran udara konstan dari *food dehydrator*, serta penggunaan enzim alginat liase menyebabkan cincin gula murni masih utuh pada AOS. Proses ini menyebabkan sebagian besar gugus hidrofilik seperti gugus hidroksil (-OH) bebas, tersedia untuk berinteraksi dengan air. Keberadaan gugus fungsional ini menyebabkan AOS mudah menyerap kembali kelembapan udara pasca pengeringan sehingga menghasilkan AOS dengan kemampuan retensi air berada pada tingkat menengah. Sejalan dengan pendapat Zhu *et al.*(2018), bahwa alginat liase mendegradasi alginat secara spesifik sehingga menghasilkan AOS dengan uraian rantai yang lebih terkontrol tanpa merusak struktur polimer secara signifikan. Manteanu *et al.*(2018), menyatakan bahwa kondisi dan metode pengeringan berkontribusi terhadap kadar air akhir bahan.

Perlakuan B (metode kimia) menunjukkan kadar air lebih rendah dibandingkan perlakuan A dan C. Pada metode ini, pemutusan ikatan glikosidik terjadi secara acak dan lebih intensif akibat larutan asam HCl 3 M yang dipanaskan. Pada proses ini menyebabkan kerusakan struktur cincin gula dan mengeliminasi gugus hidroksil (-OH) yang bersifat hidrofilik, sehingga menurunkan kapasitas hidrasi secara drastis. Kondisi ini juga menyebabkan viskositas pada larutan menjadi rendah akibat hidrolisis total sehingga kemampuan bahan dalam mempertahankan air setelah pengeringan menjadi menurun. Sejalan dengan pendapat Wang *et al.* (2012), menjelaskan bahwa degradasi polisakarida yang berlangsung secara intensif dapat menurunkan kapasitas retensi air karena perubahan struktur molekul yang cukup besar.

Perlakuan C (metode fisika) menghasilkan kadar air tertinggi dibandingkan perlakuan A dan B. Perlakuan suhu 100°C selama 2 jam menyebabkan perubahan konformasi molekul dan meningkatkan sifat amorf bahan, sehingga lebih banyak gugus hidrofilik yang terekspos. Kondisi ini memperbesar peluang interaksi antara molekul dan air, sehingga kemampuan mengikat air meningkat. Zhao *et al.* (2016), melaporkan bahwa perlakuan termal pada polisakarida dapat meningkatkan keterbukaan struktur dan memperbesar kapasitas retensi air akibat perubahan konformasi molekul.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kadar air AOS yang diperoleh melalui metode enzimatik cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan kadar air AOS yang dilaporkan oleh Szekalska *et al.* (2019), yaitu sebesar 9,7%. Pada metode kimia, kadar air AOS yang dihasilkan dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Alfa. (2023), yaitu sebesar 10%. Sementara itu, pada metode fisika, kadar air AOS yang diperoleh pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian yang dilaporkan oleh Kavitha *et al.* (2019), yaitu sebesar 10%. Perbedaan kadar air antara AOS dapat disebabkan oleh perubahan struktur molekul yang terjadi selama proses degradasi serta perbedaan metode degradasi yang digunakan. Selain itu, kondisi dan lama pengeringan, serta faktor lingkungan selama proses pengeringan seperti suhu dan kelembapan udara juga dapat memengaruhi kadar air akhir yang dihasilkan. Hal ini sejalan dengan Subagan dkk. (2020) yang menyatakan bahwa kadar air dipengaruhi oleh lamanya waktu proses serta peningkatan suhu selama proses degradasi.

4.3 Kadar Abu Alginat Oligosakarida

Rataan kadar abu alginat oligosakarida dari rumput laut *Turbinaria murayana* dari berbagai perlakuan dilihat pada Tabel 5

Tabel 5. Kadar Abu Alginat Oligosakarida

Perlakuan	Rataan (%)
A (Metode Enzimatis)	46,28 ^b
B (Metode kimia)	32,84 ^c
C (Metode Fisika)	77,61 ^a
Standar Error (SE)	2,97

Keterangan: a, b, c = berbeda sangat nyata ($P < 0,01$)

Tabel 5 menunjukkan rata-ran kadar abu AOS yang didegradasi menggunakan metode yang berbeda (enzimatis, kimia, dan fisika) berkisar antara 32,84%-77,61%. Berdasarkan analisis statistik menunjukkan bahwa perbedaan metode degradasi alginat memberikan pengaruh sangat nyata ($P < 0,01$) terhadap kadar abu AOS yang dihasilkan. Hasil analisis uji lanjut DMRT menunjukkan bahwa setiap perlakuan memiliki perbedaan yang nyata satu sama lain. Perlakuan A berbeda sangat nyata ($P < 0,01$) dibandingkan dengan perlakuan B dan C, sedangkan perlakuan B berbeda sangat nyata ($P < 0,01$) terhadap perlakuan C.

Hasil penelitian terlihat bahwa persentase kadar abu perlakuan A lebih tinggi dibandingkan perlakuan B, namun lebih rendah dibandingkan perlakuan C, hal ini disebabkan proses degradasi berlangsung secara spesifik melalui aktivitas enzim alginat liase yang memutuskan ikatan $\beta - (1 \rightarrow 4)$ pada rantai alginat, sehingga tidak merusak gugus karboksil (COO^-) pada setiap unit monomer AOS. Gugus karboksil (COO^-) yang masih utuh memiliki kemampuan alami untuk mengikat sebagian sisa mineral. Mineral yang menempel pada gugus karboksil yang menyebabkan kadar abu berada pada tingkat menengah. Hal ini sejalan dengan pendapat Rinaudo *et al.* (2014), yang mengatakan bahwa degradasi AOS

menggunakan metode enzimatis berlangsung tanpa penambahan reagen kimia dalam jumlah besar sehingga tidak menambah sumber mineral baru pada produk, namun sebagian mineral alami yang berasal dari bahan baku rumput laut masih dapat tertinggal pada produk akhir sehingga abu yang dihasilkan tetap terukur.

Perlakuan B lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan C hal ini disebabkan pada metode kimia menggunakan asam kuat seperti HCl 3 M dapat memengaruhi kandungan kadar abu karena asam kuat tersebut mampu melarutkan mineral yang terdapat pada matriks alginat. Mineral seperti Ca^+ , Mg^{2+} , Na^+ , dan K^+ dapat bereaksi dengan HCl membentuk garam klorida yang bersifat mudah larut dalam air. Akibatnya, komponen mineral pada bahan akan berkurang sehingga kadar abu pada produk yang dihasilkan mengalami penurunan. Lee *et al.* (2012), menjelaskan bahwa penggunaan HCl pada proses hidrolisis tidak hanya memutus ikatan glikosidik pada rantai alginat tetapi juga melarutkan sebagian garam mineral yang terdapat pada matriks polisakarida.

Perlakuan C mendapatkan hasil kadar abu lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan A dan B, hal ini disebabkan oleh mekanisme degradasi yang terjadi melalui perlakuan panas tanpa penambahan reagen kimia yang mampu melarutkan komponen mineral. Pada kondisi tersebut mineral alami yang terdapat pada bahan cenderung tetap berada dalam matriks produk sehingga kandungan mineral pada AOS yang dihasilkan relatif tinggi. Berbeda dengan metode kimia yang menggunakan asam kuat sehingga sebagian mineral dapat terlarut, sedangkan pada metode enzimatis proses degradasi berlangsung secara spesifik melalui aktivitas enzim tanpa menyebabkan akumulasi mineral pada produk akhir. Sejalan dengan pendapat Aida *et al.* (2010), yang menyatakan bahwa

depolimerisasi alginat melalui perlakuan hidrotermal menyebabkan pemutusan rantai polimer akibat energi panas tanpa melibatkan reaksi kimia yang dapat menghilangkan komponen mineral dari bahan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kadar abu berdasarkan metode enzimatis AOS yang diperoleh cenderung lebih tinggi dibandingkan kadar abu yang dilaporkan oleh Li *et al.* (2019), yaitu sebesar 24,8%. Herdianto dan Husni. (2019), melaporkan kadar abu yang lebih tinggi yaitu sebesar 33,73%. Pada metode fisika kadar abu yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan kadar abu alginat oleh Maharani dkk. (2017), yaitu sebesar 21,88%, hal dipengaruhi oleh karakteristik mineral yang terdapat pada rumput laut serta jenis larutan yang digunakan selama proses degradasi.



V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa metode enzimatis merupakan perlakuan optimal dalam proses degradasi alginat menjadi AOS dari *Turbinaria murayana* untuk menghasilkan kualitas AOS yang terbaik dengan rendemen 87,85%, kadar air 12,22%, dan kadar abu 46,28%.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian ini penulis memberikan saran yaitu dilakukan penelitian lanjutan mengenai aplikasi AOS dengan metode enzimatis sebagai *feed additive* ke ternak unggas untuk mengetahui pengaruhnya terhadap performa produksi, kesehatan saluran pencernaan dan efisiensi penggunaan pakan.

