

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini dengan pendekatan eksperimen. Sampel yang digunakan berupa tanah tercemar residu pestisida yang diambil dari Desa Sei Rejo, Dusun II, Kecamatan Sei Rampah, Kabupaten Serdang Bedagai, Provinsi Sumatera Utara. Hasil dari proses remediasi menunjukkan adanya pengaruh kombinasi sodium alginat dengan karbon aktif yang berasal dari tempurung kelapa. Karbon aktif yang berkualitas harus memenuhi standar tertentu agar dapat digunakan sesuai tujuan. Untuk memastikan kualitasnya, dilakukan berbagai uji, meliputi pengukuran kadar air, kadar abu, zat volatil, kadar karbon, serta analisis morfologi pori-pori dengan metode SEM. Sementara itu, untuk menentukan tanah yang baik, harus memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan agar tidak mencemari lingkungan, untuk mengetahuinya sampel tersebut diuji dengan metode *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry/Mass Spectrometry* dan uji parameter pH.

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Karakteristik Karbon Aktif Tempurung Kelapa

Karakterisasi karbon aktif tempurung kelapa ini dilakukan sesuai prosedur SNI 06-3730-1995 tentang persyaratan karbon aktif teknis. Beberapa parameter uji yang dianalisis meliputi kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap dan kadar karbon (Ratnayani, 2017). Hasil dari penelitian yang diperoleh dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Karakterisasi Kadar Karbon Aktif Tempurung Kelapa

Uji Parameter	Nilai Rata-Rata	SNI 06-3730-1995
Kadar Air (%)	11,26%	≤15%
Kadar Abu (%)	6,905%	≤10%
Kadar Zat Mudah Menguap(%)	61,275%	≤25%
Kadar Karbon (%)	31,82%	≥65%

Berdasarkan Tabel 4.1, hasil uji karbon aktif menunjukkan bahwa parameter kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap, dan kadar karbon. Hasil dari kadar air sebesar 11,26%, berada dalam batas yang diizinkan oleh SNI, yaitu maksimum 15%. Kadar air yang sesuai ini merupakan indikator positif karena kelembapan yang rendah sangat penting untuk meningkatkan efektivitas karbon aktif dalam proses adsorpsi. Karbon aktif dengan kadar air yang sesuai akan lebih mampu menyerap kontaminan, karena kelembapan yang tinggi dapat mengurangi kapasitas adsorpsi. Dengan kadar air yang terjaga, sehingga bisa menghasilkan hasil yang lebih optimal dalam pengaplikasian. karbon aktif dengan kadar air yang sesuai dapat lebih efektif dalam mengikat dan mengurangi konsentrasi residu pestisida di dalam tanah.

Kadar abu yang diukur sebesar 6,905% juga memenuhi syarat SNI, yang menetapkan batas maksimum kadar abu sebesar 10%. Meskipun kadar abu ini berada dalam batas yang diperbolehkan, kadar abu yang lebih rendah umumnya lebih baik untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi dari karbon aktif. kadar abu yang lebih rendah akan membuat karbon aktif lebih efisien dalam menyerap residu pestisida, sehingga mempercepat proses pemulihan tanah (Ardiwinata, 2020).

Kadar zat mudah menguap, yang mencapai 61,275%, jauh melampaui batas yang ditentukan oleh SNI, yaitu maksimum 25%. Kadar zat mudah menguap dengan hasil tinggi ini menunjukkan bahwa banyak bahan organik dalam sampel belum terdekomposisi secara optimal selama proses karbonisasi atau aktivasi, yang dapat berpengaruh negatif terhadap kemampuan karbon aktif untuk menyerap kontaminan. Sehingga, kadar karbon yang dihasilkan sebesar 31,82% sangat rendah jika dibandingkan dengan SNI yang biasanya mengharuskan kadar karbon di atas 65% (Kirani, 2023).

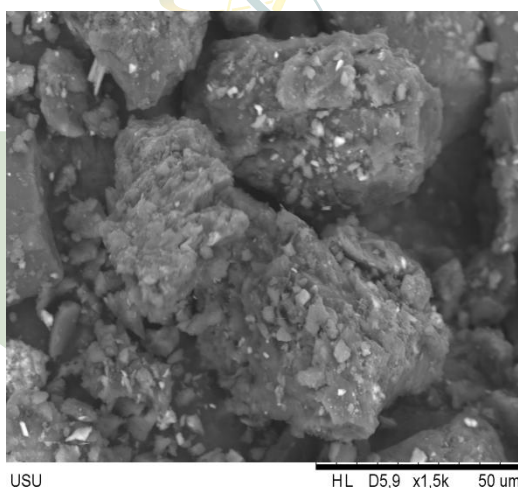
Jumlah zat yang mudah menguap dalam sampel karbon aktif tidak sesuai SNI, hal ini menunjukkan adanya sejumlah besar zat pengotor atau senyawa organik yang belum terurai secara sempurna selama proses karbonisasi. Meskipun terdapat pengotor, karbon aktif sudah dipastikan mampu menyerap dan mengikat beberapa molekul dari suatu media yang terkontaminasi berbahaya bagi lingkungan. Ini menegaskan bahwa karbon aktif tersebut memiliki potensi untuk

digunakan dalam aplikasi remediasi, meskipun perlu dilakukan lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas terhadap karbon aktif tersebut (Muhajir dkk., 2021).

Secara keseluruhan, kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap, dan kadar karbon dari karbon aktif tempurung kelapa memiliki hubungan yang erat karena semua parameter ini mempengaruhi kapasitas adsorpsi karbon aktif.

4.1.2 Karakteristik Mikrostruktur Karbon Aktif Tempurung Kelapa

Karakteristik mikrostruktur karbon aktif tempurung kelapa dilakukan untuk melihat morfologi permukaan karbon aktif dari tempurung kelapa. Hasil yang baik memiliki luas permukaan yang signifikan dan pori yang berlimpah, yang memungkinkan molekul-molekul pestisida yang berada di tanah akan menempel di permukaannya. Struktur permukaan karbon aktif yang berasal dari tempurung kelapa diidentifikasi SEM dengan perbesaran objek 1.500x hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil SEM Permukaan Karbon Aktif Tempurung Kelapa Berdasarkan Perbesaran 1.500x

Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan *software digimizer*, didapatkan hasil pengukuran ukuran diameter pori pada struktur karbon aktif tempurung kelapa bisa dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Hasil Pengukuran Diameter Pori Karbon Aktif Tempurung Kelapa Berdasarkan *Software Digimizer*

Rentang Ukuran Diameter pori (μm)	Rata-Rata Diameter Pori (μm)	Standar Deviasi (μm)
1,000-1,875	1,4094	0,2525

Pori pada karbon aktif dapat dikategorikan berdasarkan ukuran menjadi tiga kelompok utama yaitu mikropori, mesopori, dan makropori. Dengan mikropori yang berukuran kurang dari 2 nanometer (nm) dan sangat cocok untuk mengadsorpsi molekul kecil, seperti gas dan senyawa volatil, karena luas permukaannya yang sangat besar memungkinkan penyerapan yang efisien. Di atas mikropori terdapat mesopori, yang memiliki ukuran antara 2 hingga 50 nm. Pori-pori ini ideal untuk menangkap molekul berukuran sedang, termasuk berbagai jenis polutan organik seperti pestisida dan bahan kimia terlarut, sehingga sangat berharga dalam aplikasi remediasi tanah dan pengolahan air. Terakhir, makropori memiliki ukuran lebih dari 50 nm dan biasanya digunakan untuk mengadsorpsi molekul besar atau partikel, seperti residu pestisida, minyak dan zat organik kompleks (Masthura dkk., 2018).

Berdasarkan Tabel 4.2, karbon aktif yang diperbesar dengan 1.500x, dengan rentang diameter pori antara 1,000-1,875 μm . Rata-rata ukuran pori yang diukur adalah sebesar 1,4094 μm . Nilai ini mengindikasikan bahwa karbon dengan kapasitas adsorpsi tinggi ini berpotensi untuk menangkap dan mengikat berbagai jenis molekul. Meskipun nilai rata-rata menunjukkan ukuran pori yang relatif kecil, standar deviasi diperoleh adalah 0,2525 μm , menunjukkan adanya perbedaan yang cukup besar dalam ukuran pori. Karbon aktif dengan ukuran pori dalam rentang ini tergolong memiliki makropori, yang merupakan pori-pori dengan diameter lebih besar dari 50 mikrometer. Ukuran pori yang besar ini sangat efektif untuk mengadsorpsi molekul-molekul besar seperti pestisida, senyawa organik kompleks, atau minyak dalam air atau tanah.

Hasil dari analisis morfologi permukaan ini menunjukkan bahwa karbon aktif dapat digunakan secara efektif dalam aplikasi remediasi tanah dan filtrasi, karena kemampuannya untuk menangkap kontaminan yang lebih besar.

4.1.3 Kualitas Tanah Tercemar Residu Pestisida Sebelum Proses Remediasi

Pada penelitian ini, dilakukan pencampuran secara *ex-situ* antara tanah dan pestisida untuk menciptakan kondisi tanah tercemar secara sengaja, yang kemudian diuji sebelum proses remediasi. Sebanyak 1000 gram tanah digunakan sebagai sampel, dan 110 gram pestisida ditambahkan sebagai bahan pencemar. Untuk memastikan distribusi pestisida yang merata di dalam tanah, setiap 1000 gram tanah dicampur dengan 110 gram pestisida. Proses pencampuran dilakukan secara manual dengan hati-hati agar pestisida tersebar secara homogen ke dalam tanah kemudian di jemur di bawah sinar matahari 1-7 jam selama 1-2 hari.

Setelah pencampuran selesai, sampel tanah yang telah terkontaminasi diambil untuk diuji menggunakan instrumen LC-MS/MS (Kromatografi Cair-Spektrometri Massa/Massa). Uji ini bertujuan untuk mendeteksi kandungan residu pestisida dalam tanah dan memastikan bahwa parameter residu pestisida terdeteksi dengan jelas sebelum dimulainya proses remediasi. Pengujian awal ini penting untuk memastikan adanya kontaminasi yang signifikan, sehingga proses remediasi yang dilakukan nanti dapat dievaluasi dengan lebih akurat berdasarkan kadar residu pestisida yang tersisa.

Proses pencampuran secara *ex-situ* dilakukan dengan mencemari tanah secara sengaja menggunakan pestisida dalam jumlah yang telah diukur dengan seksama. Hal ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi tanah yang tercemar pestisida di lapangan, sehingga penelitian dapat dilakukan dalam kondisi yang terkontrol. Pencampuran manual dilakukan agar pestisida dapat tersebar merata di seluruh sampel tanah, memastikan bahwa kontaminasi pestisida seragam dan dapat diukur dengan konsisten di seluruh bagian sampel tanah. Adapun hasil yang didapatkan dari pengujian tanah sebelum diremediasi terdapat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kualitas Tanah Tercemar Residu Pestisida Sebelum Proses Remediasi

No	Parameter	Satuan	Simplo	Duplo	Nilai Rata-Rata	18-12-28/MU/SMM-SIG (LC-MS/MS)
1.	pH	-	6,25	6,25	6,25	-
2.	Glifosat	%	1,68	1,72	1,7	Maks. 0,1%

Pada Tabel 4.3 menunjukkan nilai kadar pH pada tanah residu pestisida dengan kandungan glifosat bahwa nilai yang diperoleh tidak berpengaruh pada Tanah dengan nilai pH rata-rata 6,25, berada di sisi asam, tetapi tidak terlalu asam. Tanah dengan pH seperti ini sering dianggap cocok untuk banyak jenis tanaman, karena kebanyakan tanaman tumbuh dengan baik di tanah yang sedikit asam hingga netral (pH antara 6-7). Namun, beberapa tanaman mungkin memerlukan penyesuaian pH tanah untuk mencapai kondisi optimal dalam pertumbuhan (Karamina, 2017).

Nilai kadar tanah residu pestisida sebelum dilakukan remediasi dapat dilakukan secara *ex-situ* apakah tanah tersebut dapat terdeteksi sehingga terdapat nilai dari hasil satu kali pengulangan (*simplo*) mempunyai nilai 1,68% dan dua kali pengulangan (*duplo*) 1,72% dengan rata-rata 1,7%. Hasil dari pencemaran residu pestisida tersebut apabila dibandingkan dengan standar metode 18-12-28/MU/SMM/SIG (LC-MS/MS) belum memenuhi dari standar metode tersebut yaitu maksimum sebesar 0,1%.

4.1.4 Kualitas Tanah Tercemar Residu Pestisida Sesudah Proses Remediasi

Proses remediasi tanah yang tercemar residu pestisida dilakukan dengan menggunakan variasi antara sodium alginat dan karbon aktif tempurung kelapa, dengan tujuan untuk mengevaluasi efektivitas setiap variasi komposisi dalam mengurangi kadar kontaminan tersebut. Dalam penelitian ini, digunakan tiga variasi komposisi: Sampel A dengan 0% sodium alginat dan 100% karbon aktif, Sampel B dengan 10% sodium alginat dan 90% karbon aktif, serta Sampel C dengan 20% sodium alginat dan 80% karbon aktif. Perbandingan antara tanah dan adsorben ditetapkan pada rasio 1:1, yang memastikan bahwa setiap gram tanah mendapat cukup adsorben untuk memaksimalkan proses penyerapannya.

Proses remediasi dimulai dengan mencampurkan tanah tercemar dengan komposisi adsorben yang telah ditentukan. Sodium alginat berfungsi sebagai bahan pengikat, yang dapat meningkatkan stabilitas dan distribusi karbon aktif dalam tanah, sementara karbon aktif bertindak sebagai agen adsorben utama yang mampu menyerap residu pestisida. Setelah proses remediasi selesai, kadar residu pestisida dalam tanah diuji kembali menggunakan metode LC-MS/MS untuk menilai sejauh mana kadar kontaminan telah berkurang.

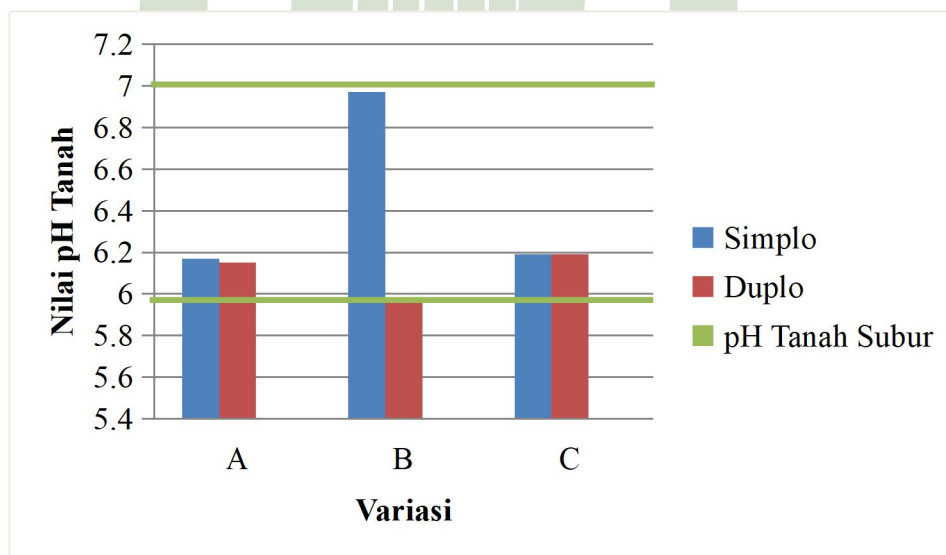
4.1.4.1 Nilai pH Tanah Tercemar Residu Pestisida

Adapun hasil yang didapatkan dari pengujian kadar tanah tercemar residu pestisida sesudah remediasi yang dilakukan dapat diketahui pada nilai terhadap kualitas tanah sehingga mengetahui seberapa besar penyesuaian nilai pH tanah yang terhadap tanaman yang diinginkan dari hasil uji tanah humus terdapat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengukuran pH Tanah Tercemar Residu Pestisida Sesudah Proses Remediasi

Sampel	pH		
	Simplo	Duplo	Nilai Rata-Rata
A	6,17	6,15	6,16
B	6,97	5,96	6,46
C	6,19	6,19	6,19

Pada Tabel 4.4 menunjukkan nilai kadar kualitas pH tanah residu pestisida dengan kandungan glifosat bahwa nilai yang diperoleh pada sampel A (0%:100%) memiliki nilai pH rata-rata 6,16. Pada sampel B (10%:90%) memiliki nilai pH rata-rata 6,46. Sampel C (20%:80%) memiliki nilai pH rata-rata 6,19 ditunjukkan dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik pH Tanah Sesudah Proses Remediasi

Gambar 4.2 menunjukkan grafik nilai kadar pH tanah pestisida sesudah remediasi bahwa nilai kesuburan tanah 6-7. Nilai pH tanah pada sampel A yaitu tidak berpengaruh pada tanah dengan rata-rata nilai pH sebesar 6,16 yang berada

di sisi asam, tetapi tidak terlalu asam. Sampel B yaitu dengan rata-rata nilai pH sebesar 6,46 berada di sisi asam, tetapi tidak terlalu asam. Sampel C yaitu pada tanah dengan rata-rata nilai pH sebesar 6,19 berada di sisi asam, tetapi tidak terlalu asam (Karamina, 2017).

Kualitas tanah, dengan pH tanah 6-7 tergolong sedikit asam hingga netral, yang merupakan kondisi ideal bagi berbagai jenis tanaman. Pada rentang pH ini, tanah humus ini memiliki ketersediaan nutrisi yang baik dan mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Beberapa jenis tanaman yang tumbuh baik dalam kondisi ini termasuk sayuran seperti tomat pH tanah 6-6,8, bayam pH tanah 6,0-7,5, wortel pH tanah 6-6,8, kubis pH tanah 6,0-7,0, dan kentang pH tanah 5,5-6,5. Selain itu, tanaman buah seperti apel pH tanah 6,0-7,0, strawberry pH tanah 5,5-6,5 (Singh,2020), anggur pH tanah 6,0-7,0, dan melon pH tanah 6,0-7,0 juga berkembang dengan baik pada tanah dengan pH 6-7 (Khan, 2019). Tanaman pangan seperti jagung pH tanah 5,8-7,0, gandum pH tanah 6,0-7,0, dan kedelai pH tanah 6,0-7,0 juga sangat cocok untuk tumbuh di tanah humus dengan pH ini, karena ketersediaan unsur hara makro dan mikro berada pada tingkat optimal untuk diserap oleh akar tanaman (Gupta, 2021).

Tanaman hias seperti bunga mawar pH tanah 6,0-6,5, krisan pH tanah 6,0-7,0, dan lavender pH tanah 6,0-8,0 juga akan tumbuh subur di tanah yang sedikit asam hingga netral. Pada pH ini, unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan kalsium tersedia dalam jumlah yang sesuai, dan tanaman mampu menyerapnya secara lebih efisien. Oleh karena itu, tanah dengan pH 6-7 dianggap sangat mendukung pertumbuhan tanaman yang sehat dan produktif, baik untuk keperluan pertanian pangan, hortikultura, maupun tanaman hias (Kumar, 2022).

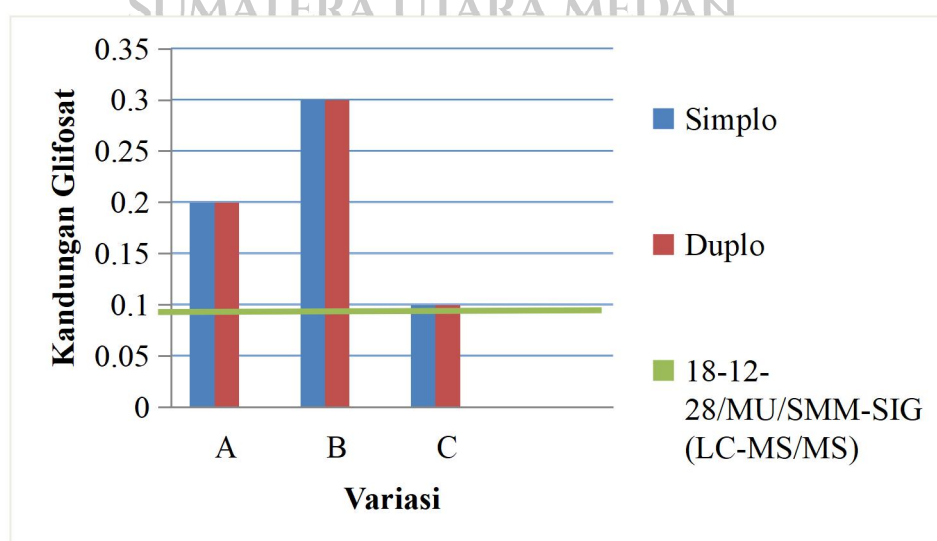
4.1.4.2 Nilai Kadar Tanah Tercemar Residu Pestisida

Nilai hasil kadar tanah tercemar residu pestisida sesudah remediasi serta perubahan sodium alginat dan adsorben karbon aktif berbahan tempurung kelapa pada sampel A, sampel B, dan sampel C dapat dilihat dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Uji Glifosat Tanah Tercemar Residu Pestisida Sesudah Proses Remediasi

Sampel	Hasil Pengujian Kadar Tanah			18-12-28/MU/SMM-SIG (LC-MS/MS)
	Simplo	Duplo	Nilai Rata-Rata	
A	0,2%	0,2%	0,2%	Maks, 0,1%
B	0,3%	0,3%	0,3%	
C	0,1%	0,1%	0,1%	

Pada Tabel 4.5 Nilai hasil pengujian kadar tanah residu pestisida dari hasil setelah remediasi, pada sampel A (0%:100%) memiliki nilai rata-rata 0,2%. Pada sampel B (10%:90%) memiliki nilai rata-rata 0,3%. Pada sampel C (20%:80%) memiliki nilai rata-rata 0,1%. Hasil dari pencemaran residu pestisida sampel A, sampel B dan sampel C, tersebut apabila dibandingkan dengan standar metode 18-12-28/MU/SMM/SIG (LC-MS/MS) pada sampel C telah memenuhi dari standar metode tersebut yaitu maksimum sebesar 0,1%. Variasi pencampuran antara sodium alginat dan karbon aktif tempurung kelapa agar dihasilkan penurunan kadar residu pestisida yang paling optimum adalah 20%:80% (sampel C). Hal ini terlihat dari nilai penurunan kadar pestisida yang lebih tinggi Pada sampel A dan sampel B, tersebut apabila dibandingkan dengan acuan metode 18-12-28/MU/SMM/SIG (LC-MS/MS) melebihi batas dari standar metode tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Kandungan Glifosat

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa nilai kadar tanah residu pestisida pada metode 18-12-28/MU/SMM-SIG (LC-MS/MS) maksimum yaitu 0.1%. Pada sampel C penurunan sebesar 0,1%. Variasi sampel C kadar tanah pestisida memiliki nilai kadar yang rendah sehingga sudah sesuai pada standar metode 18-12-28/MU/SMM-SIG (LC-MS/MS) faktor penyebabnya adalah jumlah karbon aktif tersebut yang digunakan yang lebih banyak dan memiliki daya serap dengan konsentrasi tinggi, sehingga mampu menyerap kadar pestisida yang ada pada tanah. Pada variasi sampel A dan sampel B sudah melewati standar metode 12-28/MU/SMM-SIG (LC-MS/MS) dikarenakan adanya pencampuran variasi antara sodium alginat dan karbon aktif.

Sodium alginat (alginat natrium) adalah polisakarida alami yang diekstraksi dari alga laut dan sering digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai agen pengental, pengemulsi, dan pembentuk gel. Sodium alginat lebih dikenal karena kemampuannya membentuk gel ketika bereaksi dengan ion kalsium. Bahan-bahan ini memiliki struktur pori yang bisa menjebak dan menahan molekul pestisida, sehingga lebih efektif dalam mengurangi konsentrasi pestisida di dalam tanah (Wang dkk., 2023).

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil remediasi dari berbagai variasi pencampuran adsorben terlihat bahwa sodium alginat dan karbon aktif tempurung kelapa efektif untuk menurunkan beberapa parameter. Dengan rentang ukuran diameter pori diperoleh dengan nilai 1,000-1,875 μm dengan rata-rata diameter sebesar 1,4094 μm , perbesaran 1.500x memiliki standar deviasi (0,2525 μm). Hasil penelitian pencampuran sodium alginat dan juga karbon aktif yang berasal dari bahan tempurung kelapa sebelum dan sesudah remediasi ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perbandingan Hasil Pengujian Kualitas Tanah Tercemar Residu Pestisida Sebelum dan Sesudah Proses Remediasi

Variasi	pH	Hasil Pengujian Kadar Tanah (%)
Tanah Residu Pestisida	6,25	1,7
Sampel A	6,16	0,2
Sampel B	6,46	0,3
Sampel C	6,19	0,1

Pada Tabel 4.6, menunjukkan hasil parameter sebelum proses remediasi pada uji pH tanah residu pestisida dengan nilai 6,25. Nilai uji kadar tanah residu pestisida adalah 1,7%. Setelah proses remediasi, parameter uji pH tanah residu pestisida menunjukkan hasil untuk sampel A dengan kadar pestisida 0,2%; sampel B dengan kadar pestisida 0,3%; serta sampel C dengan kadar pestisida 0,1%. Dari ketiga variasi sodium alginat serta karbon aktif berbahan tempurung kelapa, variasi yang optimum terlihat pada sampel C (20%:80%). Hal ini ditunjukkan oleh data pengujian sampel C, yang menunjukkan parameter kadar residu pestisida yang paling rendah setelah proses remediasi bernilai 0,1%, sebanding dengan standar dari metode 18-12-28/MU/SMM-SIG (LC-MS/MS) yaitu maks 0,1%. Berdasarkan hasil penelitian, terjadi penurunan kadar glifosat yang signifikan pada semua variasi sampel. Sampel A yang menggunakan 0% alginat dan 100% karbon aktif mampu menurunkan kadar glifosat sebesar 88,24%. Pada sampel B, dengan komposisi 10% sodium alginat dan 90% karbon aktif, penurunan kadar glifosat tercatat sebesar 82,35%. Sementara itu, sampel C yang menggunakan kombinasi 20% sodium alginat 80% karbon aktif menunjukkan hasil penurunan yang paling signifikan, yaitu mencapai 94,12%. Hasil ini menunjukkan efektivitas kombinasi sodium alginat dan karbon aktif dalam remediasi tanah yang tercemar glifosat. Penggunaan sodium alginat dan karbon aktif tempurung kelapa menghasilkan kualitas tanah tercemar residu pestisida yang lebih efektif, ditandai dengan adanya penurunan kadar glifosat pada seluruh sampel uji.