

**REDUKSI KEBUTUHAN OKSIGEN KIMIWI DENGAN KARBON
AKTIF DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT YANG
TERMODIFIKASI H_2SO_4 , H_2O_2 DAN $ZnCl_2$**

*Reduction Chemical Oxygen Demand with Activated Carbon From Empty
Oil Palm Fruit Bunches Modified H_2SO_4 , H_2O_2 and $ZnCl_2$*

**Putut Waskito
H012192004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

**REDUKSI KEBUTUHAN OKSIGEN KIMIWI DENGAN KARBON AKTIF
DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT YANG TERMODIFIKASI
 H_2SO_4 , H_2O_2 DAN $ZnCl_2$**

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Magister Kimia

Disusun dan diajukan oleh

PUTUT WASKITO

H012192004

kepada

**PROGRAM MAGISTER KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

TESIS

**REDUKSI KEBUTUHAN OKSIGEN KIMIWI DENGAN KARBON
AKTIF DARI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT YANG
TERMODIFIKASI H_2SO_4 , H_2O_2 DAN $ZnCl_2$**

PUTUT WASKITO

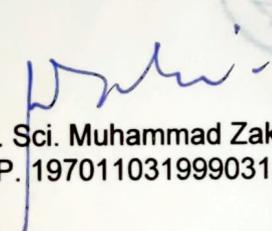
NIM: H012192004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam
rangka Penyelesaian Studi Program Magister Kimia Fakultas Matematika
dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin
pada tanggal 24 Februari 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

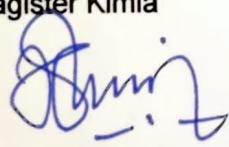
Pembimbing Pendamping


Dr. Sci. Muhammad Zakir, S.Si., M.Si
NIP. 197011031999031001


Prof. Dr. Paulina Taba, M. Phil
NIP. 195711151988102001

**Ketua Program Studi
Magister Kimia**

**Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin**


Dr. Hasnah Natsir, M.Si
NIP. 196203201987112001


Dr. Eng. Amiruddin, M.Si
NIP. 197205151997021002

**PERNYATAAN KEASLIAN TESIS
DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Putut Waskito
NIM : H012192004
Program Studi : Magister Kimia

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul “Reduksi Kebutuhan Oksigen Kimiawi Dengan Karbon Aktif Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Yang Termodifikasi H_2SO_4 , H_2O_2 dan $ZnCl_2$ ” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Sci. Muhammad Zakir, S.Si., M.Si sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phil sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* sebagai aritkel dengan judul “*Chemical Oxygen Demand Removal Modified of Activated Carbon with H_2SO_4 from Oil Palm Fruit Bunches*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 14 Februari 2023



Putut Waskito

NIM: H012192004

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim.

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, serta karunian-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “**Reduksi Kebutuhan Oksigen Kimiawi Dengan Karbon Aktif Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Yang Termodifikasi H_2SO_4 , H_2O_2 Dan $ZnCl_2$** ” sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Sains (M.Si) pada Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada **Bapak Dr. Sci Muhammad Zakir, S.Si., M.Si dan Ibu Prof. Dr. Paulina Taba, M.Phill** yang telah memberikan begitu banyak bantuan, masukan dan saran, motivasi untuk penulis mulai dari penyusunan proposal, penelitian, hingga penyusunan tesis ini. Kesempatan ini juga, penulis dengan segala kerendahan hati mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Hasnah Natsir, M.Si selaku Ketua Program Studi Magister Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Universitas Hasanuddin.
2. Prof. Dr. Ahyar Ahmad, Bapak Dr. Syarifuddin Liong, M.Si., Ibu Indah Raya, M.Si selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan dalam penyusunan proposal hingga tesis penulis.
3. seluruh analis laboratorium yang senantiasa membantu penulis selama proses penelitian.
4. seluruh dosen dan staf Departemen Kimia dan Fakultas yang senantiasa membantu dan berkontribusi terhadap penulis selama mene
5. seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis sadar bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak. Akhir kata, semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi diri penulis pribadi maupun pembaca. Aamiin.

Penulis

Putut Waskito

ABSTRAK

Putut Waskito. Reduksi Kebutuhan Oksigen Kimiawi Dengan Karbon Aktif Dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Yang Termodifikasi H_2SO_4 , H_2O_2 dan $ZnCl_2$ (dibimbing oleh **Muhammad Zakir** dan **Paulina Taba**).

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit yang diaktifasi dengan asam posfat (H_3PO_4) dan dimodifikasi dengan asam sulfat (H_2SO_4), asam peroksida (H_2O_2) dan seng klorida ($ZnCl_2$), waktu optimum, pH optimum dan model kinetika adsorpsi dalam penurunan kadar Kebutuhan Oksigen Kimiawi (KOK). Karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi dikarakterisasi menggunakan titrasi boehm, *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *Scanning Electron Microscope* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Surface Area Analyzer* (SAA). Kemampuan karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi sebagai adsorben untuk menurunkan kadar KOK dipelajari sebagai fungsi waktu. Kinetika adsorpsi ditentukan dengan menggunakan model orde satu semu dan orde dua semu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu optimum dan pH optimum dari karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi adalah 90 menit dan pH 2. Model kinetika adsorpsi mengikuti model kinetika orde dua semu.

Kata kunci: Adsorpsi, Kebutuhan Oksigen Kimiawi, Karbon Aktif, Modifikasi, Tandan Kosong Kelapa Sawit

ABSTRACT

Putut Waskito. Reduction Chemical Oxygen Demand with Activated Carbon From Empty Oil Palm Empty Fruit Bunches Modified H_2SO_4 , H_2O_2 and $ZnCl_2$ (supervised by **Muhammad Zakir** and **Paulina Taba**).

This study aims to determine the characteristics of activated carbon from oil palm empty fruit bunches activated with phosphoric acid (H_3PO_4) and modified with sulfuric acid (H_2SO_4), peroxy acid (H_2O_2) and zinc chloride ($ZnCl_2$), optimum time, optimum pH and adsorption kinetics model in decreasing concentration *Chemical Oxygen Demand* (KOK). Activated carbon and modified activated carbon are characterized using boehm titration, *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *Scanning Electron Microscope* (SEM), *X-Ray Diffraction* (XRD) and *Surface Area Analyzer* (SAA). The ability of activated carbon and modified activated carbon as adsorbents to reduce KOK levels was studied as a function of time. Adsorption kinetics were determined using pseudo-first-order and pseudo-second-order models. The results showed that the optimum time and optimum pH of activated carbon and modified activated carbon were 90 minutes and pH 2. The adsorption kinetics model followed the pseudo second order kinetics model.

Keywords: Adsorption, Chemical Oxygen Demand, Activated Carbon Modification, Empty Palm Oil Bunches

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMBUTAN.....	i
HALAMAN PENGANTAR.....	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iv
PRAKATA.....	iv
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR SIMBOL/SINGKATAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kelapa Sawit	6
2.2 Limbah Cair.....	8
2.3 Kebutuhan Oksigen Kimiawi (KOK).....	11
2.4 Karbon Aktif.....	12
2.5 Adsorpsi	15
2.6 Karakterisasi Karbon Aktif	16

2.6.1 <i>Fourier-Transform Infrared Spectroscopy</i>	16
2.6.2 <i>X-Ray Diffraction</i>	17
2.6.3 <i>Scanning Electron Microscope</i>	18
2.6.3 Luas Permukaan Karbon Aktif	19
2.7 Kerangka Pikir.....	20
2.8 Hipotesis.....	21
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	22
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	22
3.2.1. Alat Penelitian	22
3.2.2. Bahan Penelitian.....	22
3.3. Prosedur Penelitian.....	23
3.3.1 Preparasi Sampel	23
3.3.2 Karbonisasi Tandan Kosong Kelapa Sawit	23
3.3.3 Aktivasi Karbon Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	23
3.3.4 Modifikasi Permukaan Karbon	24
3.3.5 Pembuatan Larutan Pereaksi.....	24
3.3.6 Karakterisasi Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi	25
3.3.7 Pembuatan Pereaksi Pengukuran KOK	27
3.3.8 Penentuan Nilai KOK Limbah Cair dengan Refluks Tertutup Secara Spektrofotometri Metode SNI 6989.2:2019	28
3.3.9 Penentuan Waktu Optimum	29
3.3.10 Penentuan pH Optimum	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Karakterisasi Kadar Abu dan Kadar Air.....	31
4.2 Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR	32
4.3 Karakterisasi Gugus Fungsi Asam dan Basa Total dengan Metode Titration Boehm	35

4.4 Karakterisasi Morfologi Karbon dengan SEM	36
4.5 Karakterisasi Karbon dengan XRD	37
4.6 Karakterisasi Luas Permukaan Karbon.....	38
4.7 Penentuan Waktu Optimum	41
4.8 Penentuan pH Optimum	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	48
5.1 Kesimpulan	48
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49
LAMPIRAN.....	58

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Komposisi Kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	8
2. Standar Baku Mutu Air Limbah Industri Kelapa Sawit.....	10
3. Standar Nasional Indonesia Karbon Aktif	14
4. Hasil Pengukuran Kadar Air dan Kadar Abu Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi	32
5. Perbandingan Bilangan Gelombang Pita Serapan Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi	34
6. Data Struktur Pori Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi	39
7. Adsorpsi Dalam Waktu Optimum 90 Menit	42
8. Nilai Parameter Kinetika Adsorpsi oleh KATKKS, KAM H ₂ SO ₄ , KAM H ₂ O ₂ dan KAM ZnCl ₂	44
9. Adsorpsi Dalam pH Optimum	46

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Tandan Kosong Kelapa Sawit	6
2. Struktur Penyusun Lignoselulosa	7
3. Karbon Aktif	13
4. Spektrum FTIR Karbon Aktif	17
5. Difraktomogram XRD Karbon Aktif	18
6. Analisis Morfologi Karbon Aktif Dengan SEM	18
7. Grafik Isoterm Adsorpsi-Desorpsi N ₂ Karbon Aktif	19
8. Kerangka Pikir Penelitian	20
9. Skema Pembuatan Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi.....	30
10. Reaksi aktivasi KTKKS dengan Aktivator Asam Posfat.....	31
11. Perbandingan Serapan Bilangan Gelombang Pita Serapan KATKKS, KAM H ₂ SO ₄ , KAM H ₂ O ₂ dan KAM ZnCl ₂	33
12. Data Hasil Pengukuran Gugus Aktif Dengan Metode Titrasi Boehm. .	35
13. Morfologi Permukaan (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan KAM ZnCl ₂	37
14. Spektrum XRD karbon aktif, KAM H ₂ SO ₄ , KAM H ₂ O ₂ , dan KAM ZnCl ₂	38
15. Hubungan Tekanan Relatif Terhadap Volume N ₂ yang Terserap pada (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	39
16. Hubungan Diamter Pori Terhadap Volume N ₂ yang Teradsorpsi Oleh (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	40
17. Jumlah Senyawa Organik Yang Diadsorpsi Oleh (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	41
18. Efisiensi Adsorpsi oleh (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ ,(c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	43
19. Grafik Kinetika Orde Satu Semu oleh (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	43
20. Grafik Kinetika Adsorpsi Dua Semu oleh (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	44
21. Hasil Adsorpsi Berdasarkan Nilai pH oleh (a) KATKKS, (b) KAM H ₂ SO ₄ , (c) KAM H ₂ O ₂ dan (d) KAM ZnCl ₂	45

22. Efisiensi Adsorpsi Dengan Pengaruh pH oleh KATKKS, KAM H ₂ SO ₄ , KAM H ₂ O ₂ dan KAM ZnCl ₂	46
--	----

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Diagram Alir Penelitian	58
2. Skema Prosedur Kerja Penelitian	59
3. Perhitungan Pembuatan Larutan Peraksi	69
4. Perhitungan Kadar Air	71
5. Perhitungan Kadar Abu	73
6. Perhitungan Titrasi Boehm	75
7. Data Absorbansi Untuk Penentuan Waktu dan ph Optimum Dalam Menurunkan Kadar KOK	83
8. Data Hasil Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi oleh Karbon Aktif Dalam Penurunan Kadar KOK.....	84
9. Data Hasil Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi oleh Karbon Aktif Modifikasi dengan H ₂ O ₂ Dalam Penurunan Kadar KOK.....	84
10. Data Hasil Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi oleh Karbon Aktif Modifikasi dengan ZnCl ₂ Dalam Penurunan Kadar KOK.....	85
11. Data Hasil Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi oleh Karbon Aktif Modifikasi dengan H ₂ SO ₄ Dalam Penurunan Kadar KOK	86
12. Data Hasil Penentuan pH Optimum Adsorpsi Oleh Karbon Aktif	86
13. Data Hasil Penentuan pH Optimum Adsorpsi Oleh KAM H ₂ SO ₄	87
14. Data Hasil Penentuan pH Optimum Adsorpsi Oleh KAM ZnCl ₂	87
15. Data Hasil Penentuan pH Optimum Adsorpsi Oleh KAM H ₂ O ₂	88
16. Contoh Perhitungan Nilai Parameter Kinetika Orde Satu Semu	89
17. Contoh Perhitungan Nilai Parameter Kinetika Orde Dua Semu	90
18. Hasil Analisis FTIR.....	91
19. Hasil Analisis BET-BJH.....	95
20. Foto Hasil Analisis SEM.....	107

21. Hasil Analisis XRD	111
22. Foto Dokumentas Penelitian	113

DAFTAR SIMBOL/SINGKATAN

BET	<i>Brunaure-Emmet-Teller</i>
BJH	<i>Barret Joyner Hallanda</i>
TKKS	<i>Tandan Kosong Kelapa Sawit</i>
KATKKS	<i>Karbon Aktif Tandan Kosong Kelapa Sawit</i>
KAM	Karbon Aktif Modifikasi
KOK	Kebutuhan Oksigen Kimiawi
KOB	Kebutuhan Oksigen Biologi
KTTKS	Karbon Tandan Kosong Kelapa Sawit
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
FTIR	<i>Fourier Transfor Infra Red</i>
KOK	Chemical Oxygen Demand
PAC	<i>porous activated carbon</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
UV-Vis	<i>Ultra Violet Visible</i>
SAA	<i>Surface Area Analyzer</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri yang sedang berkembang di Indonesia adalah industri minyak kelapa sawit. Kelapa sawit merupakan tanaman perkebunan penghasil minyak industri, minyak makanan dan biodiesel. Industri minyak kelapa sawit mengalami perkembangan yang tinggi, hal ini dibuktikan dari peningkatan luas area perkebunan kelapa sawit yang terus meningkat (Pakpahan dan Firdaus, 2020; Gamaralalage dkk., 2018).

Peningkatan luas area perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai rata-rata laju pertumbuhan sebesar 7,89% dari tahun 2014 hingga tahun 2018 dengan penambahan sebesar 3.571.549 hektar. Tahun 2018 total luas area perkebunan kelapa sawit tercatat mencapai 14.326.350 hektar. Peningkatan luas area perkebunan ini diikuti juga dengan peningkatan produksi minyak kelapa sawit atau *Crude Palm Oil* (CPO) (Yanti dan Hutasuhut., 2020). Produksi CPO mengalami peningkatan dengan rata-rata laju pertumbuhan sebesar 11,48% per tahun (Gamaralalage dkk., 2018).

Pengolahan limbah industri kelapa sawit di Indonesia menimbulkan berbagai masalah lingkungan seperti pencemaran lingkungan perairan (Lee, dkk., 2014; Lam dkk., 2019). Umumnya perkebunan kelapa sawit di Indonesia menggunakan metode penggilingan basah dalam aktivitas pengolahan kelapa sawit. Metode penggilingan basah akan membutuhkan banyak air selama proses berlangsung, yang berdampak pada peningkatan limbah cair hasil pengolahan kelapa sawit. Hal ini memberikan ancaman terhadap lingkungan, dimana limbah cair tersebut akan berpotensi menjadi bahan pencemar karena kandungan bahan organik yang tinggi yang ditunjukkan oleh nilai Kebutuhan Organik Kimia (KOK) yang tinggi (Muliari dkk., 2020; Ananda dkk. 2018; Andika dkk., 2020; Obidzinski, dkk., 2012). Salah satu lingkungan yang dapat terganggu dari adanya peningkatan

aktivitas perkebunan kelapa sawit adalah aliran sungai yang berada di sekitar perkebunan.

Nilai KOK dalam perairan dipengaruhi oleh kandungan fosfat, nitrat dan amonia yang terkandung dalam suatu perairan. Meningkatnya nilai KOK dalam suatu lingkungan perairan akan mengakibatkan gangguan keseimbangan ekosistem dan matinya organisme perairan. Sehingga peningkatan nilai KOK akan mempengaruhi indeks kualitas air (Mohan dkk., 2005). Nilai KOK dijadikan sebagai salah satu parameter pencemaran air yang menunjukkan jumlah oksigen di perairan yang digunakan untuk mendegradasi bahan organik (Muliari dkk., 2016; Ananda dkk. 2018; Andika dkk., 2020). Beberapa metode yang dapat digunakan dalam mengurangi bahan organik dalam perairan adalah penggunaan filtrasi, biofilter (Dayanti dan Herlina, 2018) dan adsorpsi (Pungut dkk., 2021).

Adsorpsi menunjukkan potensi yang baik dalam penyisihan KOK air limbah dibandingkan metode yang lain karena metode ini sederhana, memiliki efisiensi serta efektifitas yang tinggi dan biaya yang diperlukan relatif rendah. Penggunaan teknik adsorpsi membutuhkan adanya suatu adsorben. Adsorben pada umumnya membutuhkan material yang berpori dan memiliki luas permukaan yang tinggi (Beyan dkk., 2021; Devi dkk., 2008; Stawinski dkk., 2017)

Karbon aktif merupakan senyawa amorf yang dihasilkan dari pengolahan senyawa berbahan dasar karbon yang memiliki derajat porositas yang tinggi dan luas permukaan yang besar, sehingga karbon aktif dapat dijadikan sebagai adsorben yang efektif (Suliestyah dan Astuti, 2021). Karbon aktif dapat digunakan untuk mengadsorpsi gas dan senyawa kimia tertentu (Shofiyani dkk., 2019; Beyan dkk., 2021). Sintesis karbon aktif dapat dilakukan dengan aktivasi kimia yang melalui tahapan pencucian, pengeringan, pengecilan ukuran, perendaman dengan pelarut aktivasi dan karbonisasi (Kristianto 2017; Esterlita & Herlina, 2015).

Bahan yang dapat digunakan dalam pembuatan karbon aktif adalah limbah padat pertanian, seperti ampas tebu, kulit pisang (Legiso dkk., 2019), sabut kelapa (Puspita dkk., 2017), tempurung kemiri (Mendame dkk., 2021). Limbah pertanian lain yang berpotensi untuk dijadikan karbon aktif adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang merupakan salah satu limbah padat yang dihasilkan dari proses industri kelapa sawit.

Industri kelapa sawit menghasilkan tandan kosong sebesar 20-24 ton per hektar dalam satu tahun. Salah satu limbah padat yang dihasilkan dari proses industri kelapa sawit adalah tandan kosong. Tandan kosong belum dimanfaatkan secara maksimal sehingga memiliki potensi sebagai bahan pencemar yang akan menyebabkan bau menyengat dan juga tempat hidup bagi serangga lalat yang dapat mencemari lingkungan sekitar. Limbah TKKS mengandung beberapa senyawa kimia sebagai komponen utama untuk menghasilkan karbon aktif seperti lignin, holoselulosa, selulosa dan hemiselulosa. Selain itu, nilai karbon total tandan kelapa sawit adalah sebesar 88,93% (Gaol dkk., 2013; Hardi dkk., 2020).

Peningkatan kapasitas adsorpsi dapat dilakukan dengan modifikasi adsorben yang akan digunakan. Modifikasi dapat dilakukan dengan menggunakan aktivator pada saat proses sintesis karbon aktif. Salah satu aktivator yang dapat digunakan adalah H_3PO_4 . Aktivator H_3PO_4 banyak digunakan dalam industri pembuatan karbon aktif karena pengolahan limbah yang mudah, biaya relatif rendah dan tingginya rendamen karbon aktif yang dihasilkan. Aktivator H_3PO_4 berperan sebagai katalis asam untuk meningkatkan laju reaksi pemutusan ikatan, hidrolisis, dehidrasi dan kondensasi disertai dengan reaksi pengikatan silang antara asam fosfat dan biopolimer lignoselulosa (Abdelnaeim dkk., 2016; Deyuso dkk., 2014; Meilianti, 2017).

Aktivator H_3PO_4 akan membentuk pori-pori pada karbon aktif yang lebih tinggi melalui reaksi dengan prekursor berbasis karbon aktif yang akan menghasilkan produk berupa partikel yang mudah menguap sehingga pori-pori akan membentuk pada karbon aktif (Deyuso dkk., 2014; Liu dkk., 2010; Rosalina dkk., 2018). Aktivator H_3PO_4 dipilih pada penelitian ini karena senyawa ini memiliki stabilitas termal dan karakter kovalen yang tinggi, selain itu aktivasi arang dengan aktivator H_3PO_4 akan menyebabkan pori-pori permukaan arang menjadi lebih banyak dan teratur. Penggunaan modifikator H_2SO_4 , H_2O_2 dan $ZnCl_2$ berfungsi untuk mengoksidasi permukaan karbon, meningkatkan karakter asam, menghilangkan unsur-unsur mineral dan meningkatkan sifat hidrofilik dari permukaan karbon aktif (Kristianto, 2017; Ismanto, dkk., 2010; Lim, dkk., 2010)

Penelitian penyisihan kadar KOK dengan menggunakan nano karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit telah dilakukan oleh Munandar dkk. (2016). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa proses sintesis karbon aktif dari tandan kosong

kelapa sawit dilakukan dengan aktivasi secara fisik yaitu dilakukan melalui proses pemanasan pada suhu tinggi. Adsorben yang dihasilkan memiliki luas permukaan yang besar dan menghasilkan karbon yang berpori. Berdasarkan uraian sebelumnya, maka penelitian mengenai sintesis karbon aktif akan dilakukan dari tandan kosong kelapa sawit (KATKKS) dan diaplikasikan untuk mengadsorpsi limbah cair. Dimana pada penelitian ini aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan aktivator H_3PO_4 serta modifikator H_2SO_4 , H_2O_2 dan $ZnCl_2$ dengan harapan menghasilkan adsorben yang berpori, memiliki luas permukaan yang besar dan memiliki gugus-gugus yang berkesesuaian yang berfungsi dalam proses adsorpsi.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. bagaimana karakterisasi dari KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 ?
2. berapa waktu optimum adsorpsi limbah limbah cair oleh KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 ?
3. berapa pH optimum adsorpsi limbah limbah cair oleh KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 ?
4. bagaimana kinetika adsorpsi limbah limbah cair oleh KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 ?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menentukan karakteristik dari KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 .
2. menentukan waktu optimum adsorpsi oleh KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 .
3. menentukan pH optimum adsorpsi oleh KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 .
4. menentukan kinetika adsorpsi limbah cair oleh KATKKS, KAM H_2SO_4 , KAM $ZnCl_2$ dan KAM H_2O_2 .

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. mampu memberikan informasi terhadap pembaca dan peneliti lainnya yang akan meneliti dibidang yang sama, yaitu adsorben dari tandan kosong kelapa sawit.
2. mampu memberikan keterampilan serta wawasan tambahan pada peneliti dan pembaca.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

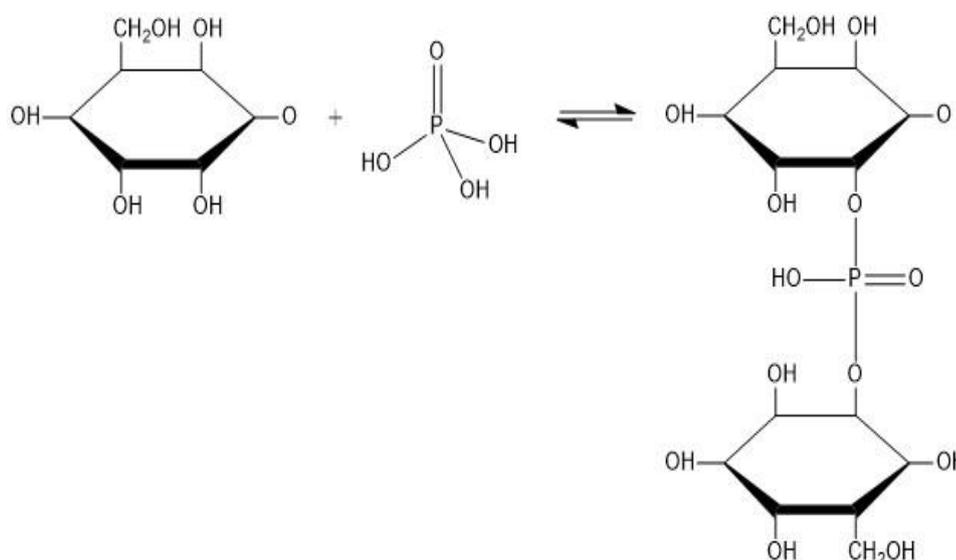
Data-data hasil penelitian yang berkaitan dengan modifikasi permukaan karbon aktif tandan kosong kelapa sawit serta aplikasinya sebagai adsorben untuk menurunkan kadar KOK ditunjukkan dalam bab ini. Karbon aktif modifikasi dihasilkan dari bahan baku tandan kosong kelapa sawit yang telah dikarbonisasi, diaktivasi dengan H_3PO_4 dan dimodifikasi dengan H_2SO_4 , H_2O_2 dan $ZnCl_2$. Karbon aktif modifikasi kemudian digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar KOK. Adsorpsi dengan waktu kontak tertentu, dilakukan terlebih dahulu untuk mencari waktu optimum adsorpsi dan menentukan model kinetika adsorpsi. Kondisi waktu optimum tersebut diaplikasikan untuk menentukan pH optimum adsorpsi. Karakterisasi terhadap karbon aktif modifikasi dilakukan dengan menggunakan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi penyusun karbon, titrasi Boehm untuk mengetahui konsentrasi gugus fungsi, XRD untuk mengetahui struktur kristalit dari karbon, BET untuk mengetahui pori permukaan karbon dan morfologi permukaan dipelajari dengan SEM.



Gambar 9. Skema Pembuatan Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi

Pembuatan karbon aktif termodifikasi dilakukan dengan penambahan modifikator seperti, larutan H_2SO_4 , larutan H_2O_2 dan larutan ZnCl_2 sehingga menghasilkan karbon aktif modifikasi asam sulfat (KAM- H_2SO_4), karbon aktif modifikasi hidrogen peroksida (KAM- H_2O_2) dan karbon aktif modifikasi seng klorida (KAM- ZnCl_2) seperti pada Gambar 9. Modifikasi karbon aktif dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi yang dimiliki oleh karbon aktif.

Karbonisasi pada suhu $700\text{ }^\circ\text{C}$ dilakukan terhadap tandan kosong kelapa sawit yang telah dipreparasi untuk menghasilkan suatu karbon. Selama proses karbonisasi, unsur-unsur bukan karbon seperti hidrogen dan oksigen dikeluarkan dalam bentuk gas dan atom yang terbebaskan membentuk kristal grafit. Karbon yang dihasilkan kemudian diaktivasi dengan menggunakan aktivator asam fosfat (H_3PO_4). Aktivator asam fosfat dengan oksigen yang terkandung dalam lignoselulosa suatu tumbuhan seperti yang terlihat pada Gambar 10 (Hsu dan Teng, 2000).



Gambar 10. Reaksi Aktivasi KTKKS dengan Aktivator Asam Fosfat

4.1. Analisis Kadar Abu dan Kadar Air

Hasil analisis kadar abu dan kadar air dari karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi dari tandan kosong kelapa sawit ditunjukkan pada Tabel 4. Analisis kadar air telah dilakukan terhadap karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi, dimana KATKKS memiliki kadar air sebesar 3,2%. Nilai kadar air setelah modifikasi karbon aktif mengalami penurunan menjadi 2,4% (KAM- H_2SO_4), 2,3%

(KAM-H₂O₂) dan 2,8% (KAM-ZnCl₂). Analisis kadar abu menunjukkan penurunan kadar abu setelah proses modifikasi, dimana KATKKS memiliki kadar abu sebesar 7,8% dan setelah modifikasi menjadi 6,2% (KAM-H₂SO₄), 6,0% (KAM-H₂O₂) dan 6,6% (KAM-ZnCl₂).

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kadar Abu dan Kadar Air dari Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi.

Material	Kadar Abu (%)	Kadar Air (%)
KATKKS	7,8	3,2
KAM-H ₂ SO ₄	6,2	2,4
KAM-H ₂ O ₂	6,0	2,3
KAM-ZnCl ₂	6,6	2,8

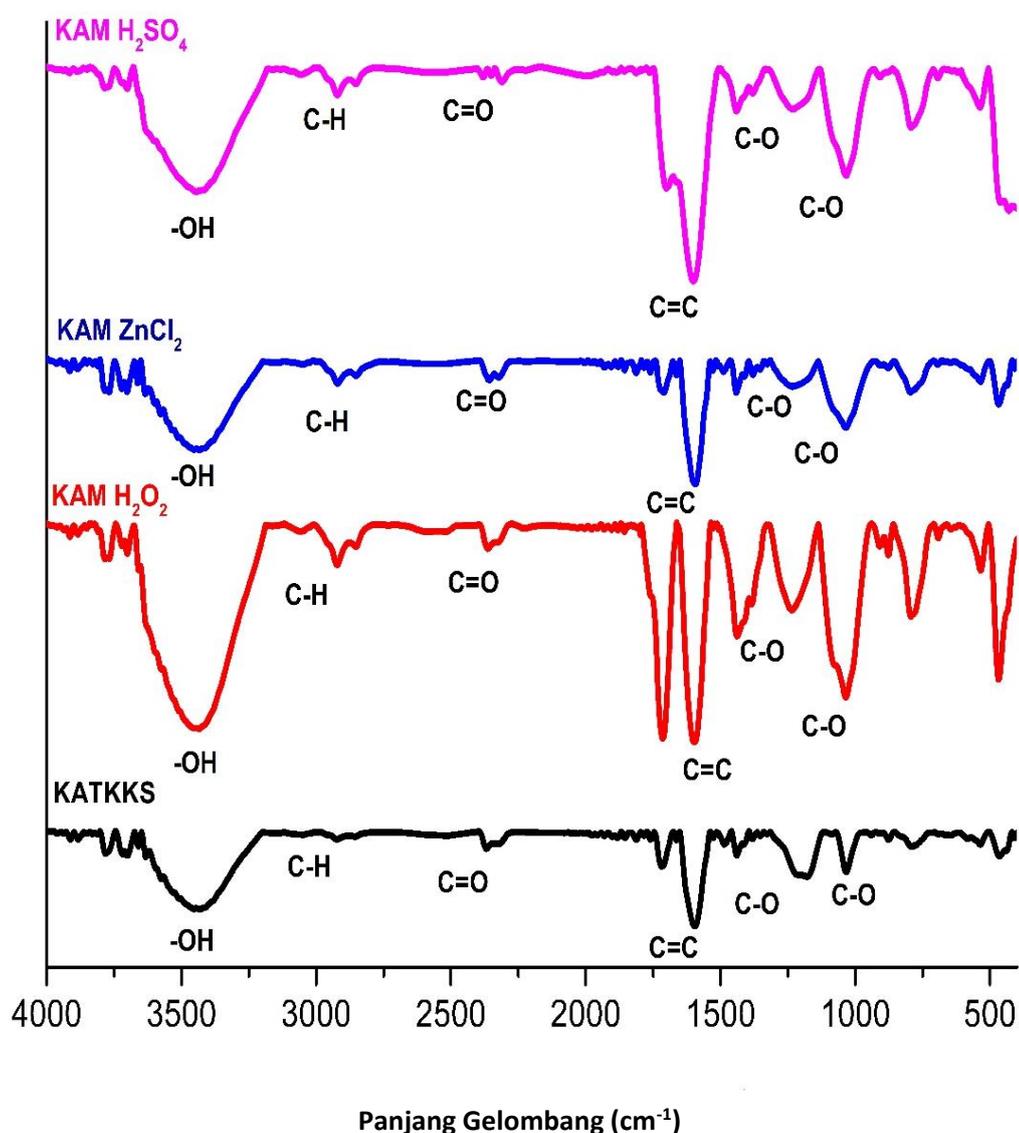
Hasil pengukuran kadar air dan kadar abu dari karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi menunjukkan hasil yang memenuhi syarat berdasarkan SNI No. 06-37730-1995 yang menyatakan bahwa nilai maksimal kadar abu dan kadar air yang dimiliki oleh karbon aktif berturut-turut adalah 10% dan 15%. Kadar abu yang berlebih pada suatu karbon akan menyebabkan penyumbatan pori-pori karbon aktif, sehingga menyebabkan keefektifan penggunaan karbon aktif berkurang (Batu, dkk., 2022)

4.2. Karakterisasi Gugus Fungsi dengan FTIR

Karbon aktif tandan kosong kelapa sawit dan modifikasinya dikarakterisasi dengan menggunakan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi dari bahan tersebut. Hasil analisis spektrum serapan IR yang merupakan vibrasi ikatan dari gugus fungsi dari bahan yang diamati dapat memberikan petunjuk tentang adanya perubahan gugus fungsi dari karbon aktif yang termodifikasi menggunakan H₂SO₄, H₂O₂ dan ZnCl₂. Senyawa akibat modifikasi dengan penambahan zat modifikator Selain itu, gugus fungsi tersebut juga dapat digunakan untuk menduga sifat permukaannya. Spektrum FTIR KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂ ditunjukkan pada Gambar 11.

Hasil analisis spektrum FTIR dari KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂, menunjukkan serapan lebar dengan intensitas kuat pada bilangan gelombang 3400 cm⁻¹ yang menandakan adanya vibrasi rentangan dari gugus O-H alkohol, fenol, atau asam karboksilat. Serapan gugus hidroksil pada KAM-H₂O₂ muncul pada bilangan gelombang 3433,29 cm⁻¹ dengan intensitas yang lebih kuat

dibandingkan yang lain. Serapan yang cukup tajam tersebut kemungkinan berasal dari ikatan hidrogen (Efiyanti, dkk., 2020). Munculnya serapan pada bilangan gelombang sekitar 1200 cm^{-1} yang merupakan vibrasi rentangan dari gugus C-O fenol menunjukkan bahwa gugus hidroksil yang terdeteksi kemungkinan juga adalah gugus hidroksil fenol ini diperkuat dengan munculnya serapan di daerah 1600 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus C=C aromatik dan munculnya overtone pada bilangan gelombang $1760\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan adanya senyawa aromatik. Serapan pada bilangan gelombang $1033,85\text{ cm}^{-1}$ juga merupakan serapan gugus C-O yang kemungkinan berasal dari eter. Serapan gugus C=O juga muncul pada bilangan gelombang 1700 cm^{-1} .



Gambar 11. Perbandingan Serapan Bilangan Gelombang Pita Serapan KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- ZnCl_2 .

Tabel 5. Perbandingan Bilangan Gelombang Pita Serapan Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang cm^{-1}			
	Karbon Aktif	KAM- H_2SO_4	KAM- ZnCl_2	KAM- H_2O_2
O-H	3431,36	3444,87	3433,29	3433,29
C-O	1180,44	1232,51	1234,44	1232,51
C-O-C	1033,85	1033,85	1033,85	1033,85
C=O	1718,58	1699,29	1708,93	1714,72
C=C aromatik	1595,13	1600,92	1591,27	1597,06
C \equiv C	2368,59	2310,72	2357,01	2362,8
C-H (alifatik)	2854,65 dan 2922,16	2852,72 dan 2922,16	2850,79 dan 2920,23	2852,72 dan 2922,16
-CH ₃	1438,9	1440,83	1440,83	1438,9
-CH ₂ -	1381,03	1381,03	1379,1	1384,89

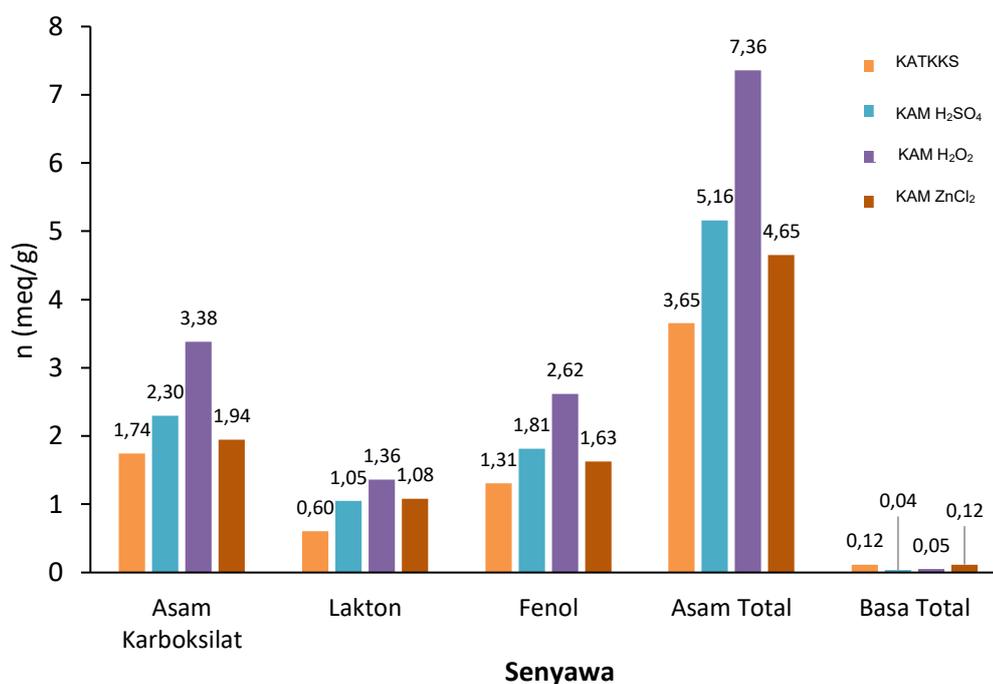
Gugus karbonil pada KAM- H_2O_2 muncul dengan serapan yang kuat dan tajam jika dibandingkan dengan serapan gugus karbonil KATKKS, KAM- H_2SO_4 , dan KAM- ZnCl_2 . Berdasarkan penelitian Riyanto dkk. (2020), pada karbon terdapat serapan pada bilangan gelombang 3429 dan 1574 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus fungsi OH dan C=C. sedangkan karbon aktif dengan aktivator ZnCl_2 memiliki pita serapan pada gelombang 3411, 1582, dan 1243 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus fungsi OH, C=C, dan CO. Hasil analisis FTIR memperlihatkan adanya ikatan O-H, C-O, dan C=O yang menunjukkan bahwa KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- ZnCl_2 , dan KAM- H_2O_2 yang dihasilkan cenderung bersifat polar sehingga dapat digunakan sebagai adsorben.

Perbandingan spektrum FTIR menunjukkan adanya perbedaan intensitas dan geseran bilangan gelombang antara karbon aktif dengan ketiga hasil modifikasinya. Penambahan zat modifikator mampu meningkatkan gugus hidroksil dan karbonil pada karbon aktif dimana hal ini dapat dilihat dari intensitas serapan yang meningkat terutama pada penambahan H_2O_2 dan H_2SO_4 . Peningkatan intensitas puncak serapan pada hasil modifikasi menjadi petunjuk

terjadinya interaksi kimia antara karbon aktif dengan zat modifikator. Oleh karena zat modifikator mampu meningkatkan gugus-gugus polar seperti gugus -OH yang terikat dengan baik pada karbon aktif maka kemungkinan efektivitasnya sebagai adsorben juga akan meningkat. Gugus hidroksil dan karbonil adalah gugus polar yang dapat menyebabkan permukaan karbon aktif bersifat hidrofilik dan keterbasahannya meningkat.

4.3. Karakterisasi Gugus Fungsi Asam dan Basa Total dengan Metode Titrasi Boehm

Karakterisasi dengan menggunakan metode titrasi Boehm dilakukan untuk mengetahui konsentrasi masing-masing gugus dari karbon aktif dan karbon aktif modifikasi. Titrasi Boehm berdasarkan bahwa gugus oksigen pada permukaan karbon aktif memiliki keasaman yang berbeda dan dapat dinetralkan dengan basa yang memiliki kekuatan berbeda pula. Titrasi Boehm mengasumsikan bahwa NaHCO_3 dapat menetralkan gugus karboksil, Na_2CO_3 dapat menetralkan gugus karboksil dan lakton, NaOH dapat menetralkan gugus karboksil, lakton dan fenol, dan HCl dapat menetralkan gugus basa total (Goertzen, 2010; Schönherr, dkk., 2018; Tsechansky dan Graber, 2014). Perbandingan masing-masing gugus fungsi secara kuantitatif dapat diamati berdasarkan data titrasi Boehm pada Gambar 12.



Gambar 12. Data Hasil Pengukuran Gugus Aktif Dengan Metode Titrasi Boehm

Kemampuan adsorpsi dari karbon juga ditentukan oleh gugus-gugus fungsi yang ada pada suatu permukaan karbon. Berdasarkan data diperoleh bahwa konsentrasi total asam meningkat setelah modifikasi dan sebaliknya konsentrasi total basa berkurang. Karakter asam pada permukaan karbon disebabkan karena adanya gugus oksida yang bersifat asam, seperti gugus karboksil, lakton, fenol, karboksil anhidrida, aldehida, karbonil dan eter. Sedangkan karakter basa pada permukaan karbon berhubungan dengan adanya dua tipe struktur, yaitu adanya gugus oksida yang bersifat basa, seperti gugus piron dan chromene serta adanya elektron π (basa Lewis) yang terdelokalisasi pada lapisan grafit karbon. Hal tersebut menunjukkan bahwa permukaan dasar dari karbon aktif mengikuti tipe Lewis. Adanya struktur piron pada poliaromatik dari karbon akan menyebabkan sifat basa tersebut (Li, dkk., 2012; Chen, dkk., 2011; Hammani, dkk., 2020)

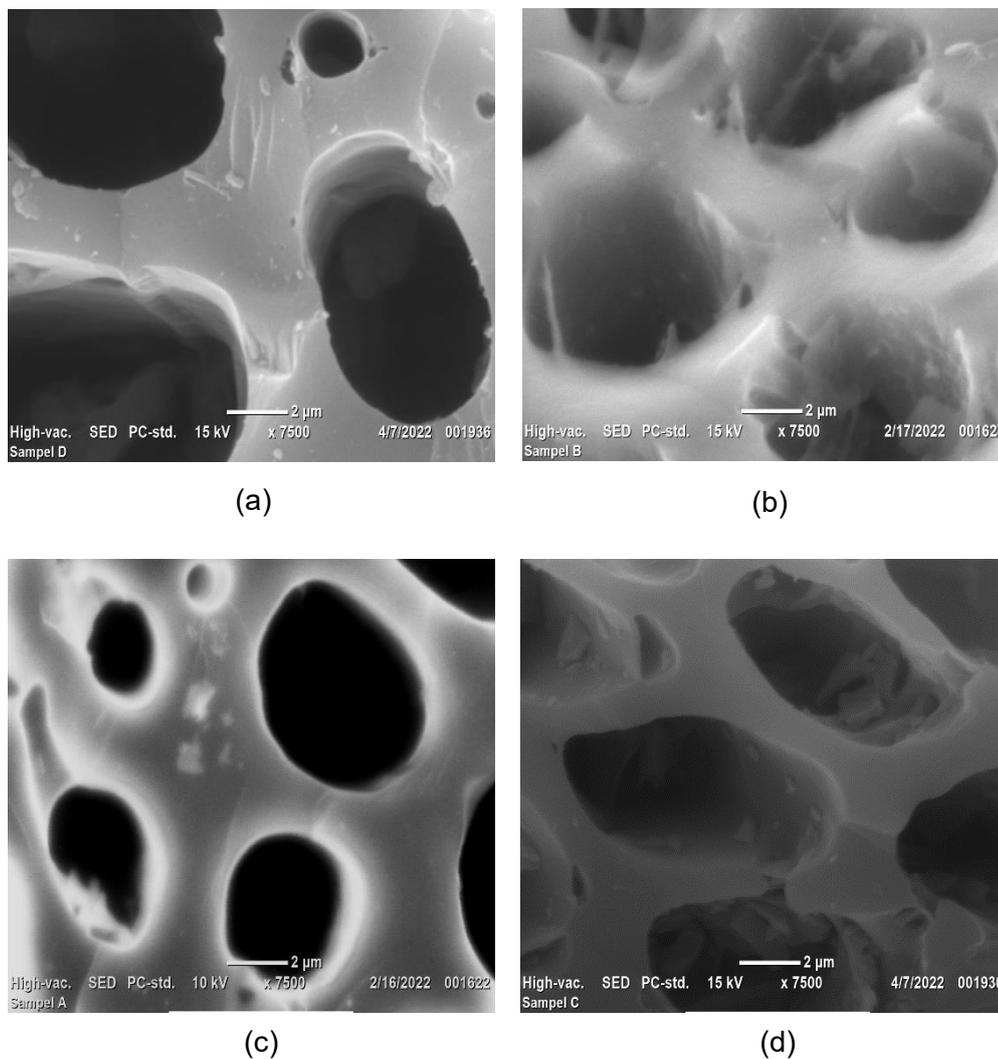
Perubahan gugus fungsi disebabkan penambahan modifikator yang mampu mengoksidasi permukaan karbon. Peningkatan gugus yang mengandung oksigen menyebabkan berkurangnya kepadatan elektron pada permukaan karbon aktif dan mengakibatkan berkurangnya sifat basa dari karbon aktif. Peningkatan gugus aktif yang bersifat asam akan mempengaruhi kemampuan karbon dalam mengadsorpsi suatu senyawa (Yunus dkk., 2020).

4.4. Karakterisasi Morfologi Karbon dengan SEM

Analisis morfologi permukaan karbon sebelum dan sesudah modifikasi dilakukan dengan menggunakan SEM. Modifikasi dengan menggunakan H_2SO_4 ini menyebabkan terjadinya penambahan pori dari karbon TKKS bertambah melalui reaksi pemutusan rantai karbon pada permukaan KAM-sehingga pori-pori yang terbentuk semakin banyak, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 13.

Hasil uji SEM memperlihatkan bahwa karbon aktif dan karbon aktif modifikasi yang diperoleh berbeda. Gambar 13 memperlihatkan bahwa karbon aktif memiliki permukaan pori-pori karbon yang kasar dan belum terbuka secara sempurna serta memiliki struktur pori yang tidak teratur. Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh pengotor yang masih terdapat pada permukaan karbon aktif. Karbon aktif modifikasi memiliki pori-pori karbon yang lebih terbuka, lebih besar dan pori-pori terlihat lebih bersih dan rata bila dibandingkan dengan karbon aktif. Hal tersebut diasumsikan bahwa penambahan modifikator dalam karbon aktif

dapat mempengaruhi bentuk pori-pori permukaan suatu karbon aktif. Hasil Modifikasi memberikan ciri khas tertentu terhadap bentuk pori permukaan karbon

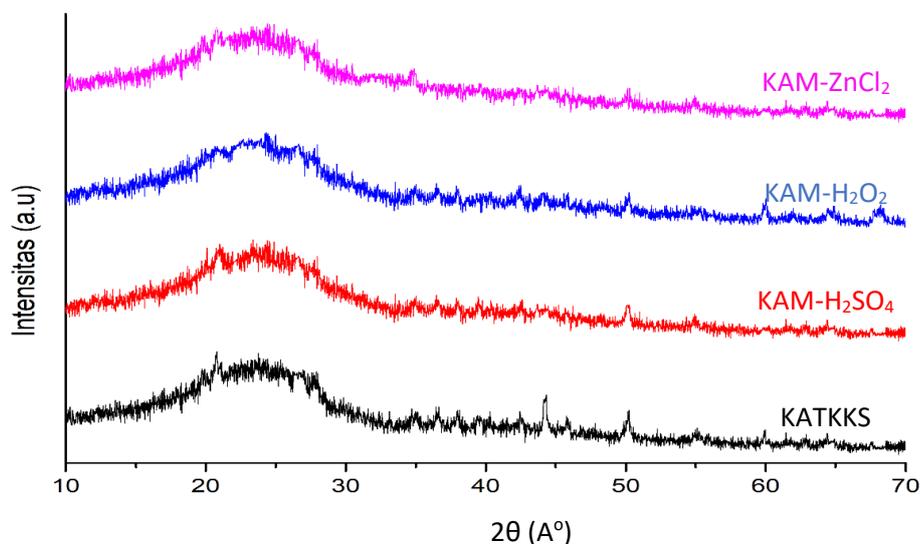


Gambar 13. Morfologi Permukaan (a) KATKKS, (b) KAM-H₂SO₄, (c) KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂

4.5. Karakterisasi Karbon dengan XRD

Analisis menggunakan XRD bertujuan untuk mengidentifikasi mengidentifikasi fasa kristal dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta mengidentifikasi struktur kristal. Karakteristik KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-ZnCl₂, dan KAM-H₂O₂ dalam penentuan struktur kristalit ditentukan menggunakan analisis difraktogram XRD yang disajikan pada Gambar 14.

Difraktogram XRD menunjukkan hubungan antara intensitas terhadap sudut hamburan (2θ).



Gambar 14. Spektrum XRD KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂, dan KAM-ZnCl₂

Pada penelitian ini, difraktogram XRD dari KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂, dan adalah relatif sama, yaitu terbentuknya 1 puncak difraksi melebar pada sudut 20°-30° tepatnya pada 24,28°; 24,42°; 24,54° dan 24,56° yang mengindikasikan bahwa struktur kristalit dari ke empat bahan tersebut adalah amorf. Terbentuknya puncak-puncak tajam mengindikasikan adanya stuktur amorf yang tidak teratur. Terbentuknya puncak ini disesuaikan dengan data *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS No.75-1621) yang menjadi karakteristik khas dari struktur karbon aktif (Kunusa, dkk., 2021).

4.6. Karakterisasi Luas Permukaan Karbon

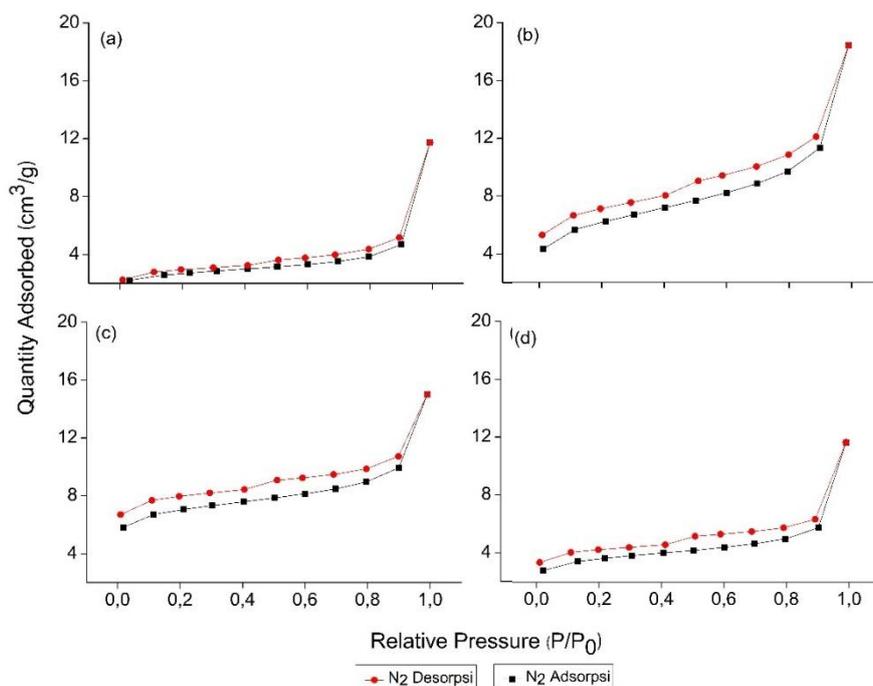
Analisis *surface area analyzer* (SAA) didasarkan pada kemampuan mengukur variasi tekanan dalam proses adsorpsi dan desorpsi isoterm gas nitrogen pada kondisi temperature nitrogen cari sebagai lapisan tunggal yang kemudian diolah menggunakan persamaan BET. Karakterisasi karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi menggunakan metode BET menunjukkan luas permukaan dari KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂ secara berturut-turut adalah 8,61; 20,38; 22,40 dan 11,57 m²/g. Luas permukaan dari karbon aktif mengalami peningkatan setelah penambahan modifikator. Peningkatan luas permukaan ini yang diharapkan dapat meningkatkan tingkat

efektivitas dari karbon aktif sebagai material berpori. Pengukuran didasarkan pada data adsorpsi isotermal pada suhu 77 K. Perhitungan diameter pori, volume pori dan distribusi pori dihitung berdasarkan jumlah gas N_2 yang teradsorpsi oleh karbon aktif dan karbon aktif modifikasi.

Tabel 6. Data Struktur Pori Karbon Aktif dan Karbon Aktif Termodifikasi

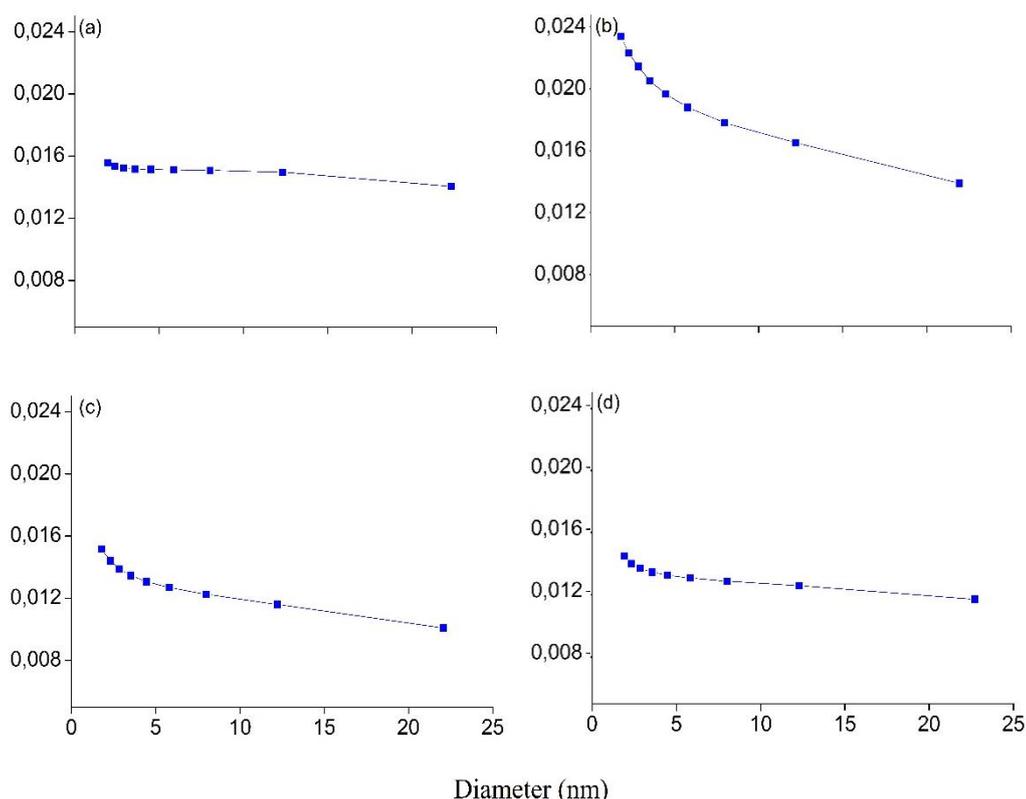
Material	Luas Permukaan BET (m^2/g)	Volume Pori (cm^3/g)	Diameter Pori (nm)
KATKKS	8,61	0,015	16,99
KAM- H_2SO_4	20,38	0,023	8,09
KAM- H_2O_2	22,40	0,015	8,75
KAM- $ZnCl_2$	11,57	0,014	11,83

Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh data volume pori pada KTKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$ adalah 0,015; 0,023; 0,015 dan 0,014 cm^3/g . Sedangkan diameter pori berturut-turut adalah 16,99; 8,09; 8,75 dan 11,83 nm. Hal ini menunjukkan bahwa karbon aktif dan karbon aktif modifikasi yang dihasilkan tergolong mesopore (diameter 2-50 nm). Isotermal adsorpsi N_2 pada KATTKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$ dapat dilihat pada Gambar 15,



Gambar 15. Hubungan Tekanan Relatif Terhadap Volume N_2 yang Terserap pada (a) KATKKS, (b) KAM- H_2SO_4 , (c) KAM- H_2O_2 dan (d) KAM- $ZnCl_2$

Gambar 15 adalah isoterm adsorpsi dan desorpsi gas N_2 oleh karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi. Hubungan tekanan relatif terhadap volume gas N_2 yang terserap pada KATKKS menunjukkan jalur adsorpsi yang berbeda dengan jalur desorpsinya sehingga dapat dikatakan bersifat *irreversible*. Berdasarkan model kurva pada Gambar 15 mengidentifikasi bahwa KATKKS yang didapatkan adalah tipe isotermal IV yang merupakan karakteristik material mesopori. Isoterm adsorpsi tipe IV merupakan adsorben berukuran mesopori (2-50nm). Karbon aktif merupakan metrial berpori yang memiliki pori-pori yang sangat kompleks yang memiliki beberapa ukuran berdasarkan IUPAC yaitu ukuran mikro, ukuran meso dan ukuran makro.

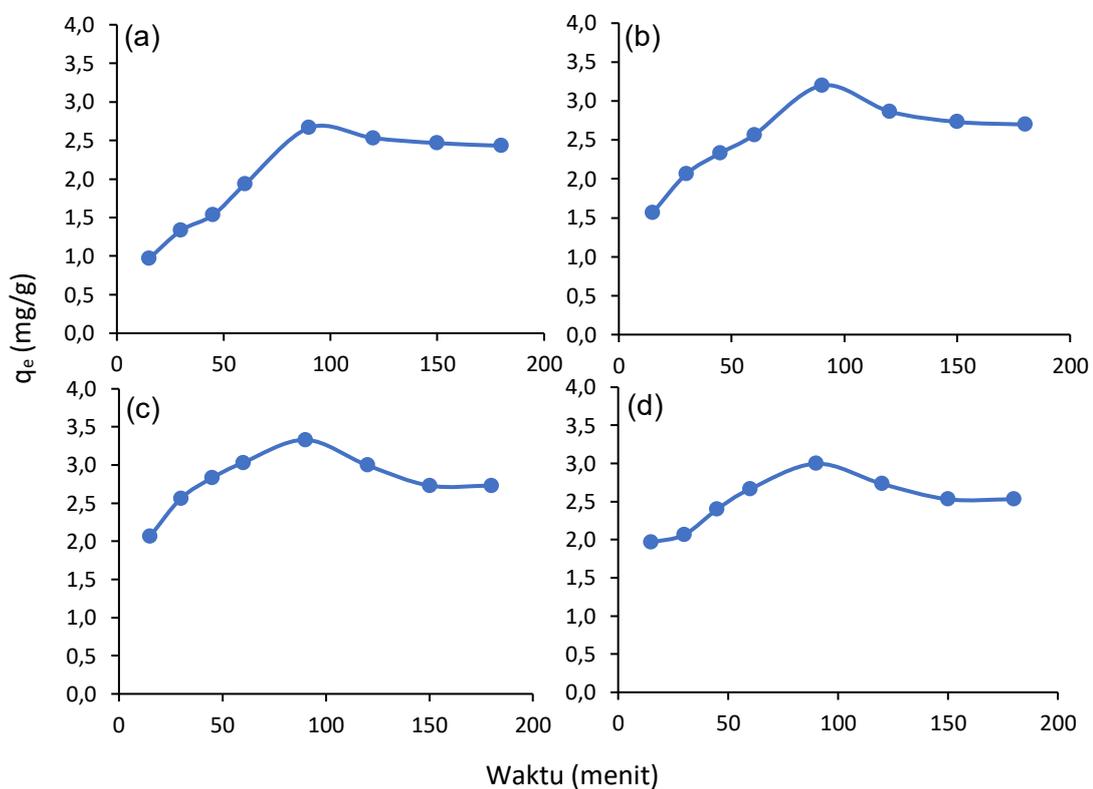


Gambar 16. Hubungan Diameter Pori Terhadap Volume N_2 yang Teradsorpsi oleh (a) KATKKS, (b) KAM- H_2SO_4 , (c) KAM- H_2O_2 dan (d) KAM- $ZnCl_2$

Gambar 16 memperlihatkan bahwa KATKKS memiliki rentang diameter pori yang terukur antara 1,9 nm hingga 22,3 nm. KAM- H_2SO_4 memiliki rentang diameter pori yang terukur antara 1,8 nm hingga 21,9 nm. KAM- H_2O_2 memiliki rentang diameter pori yang terukur antara 1,8 nm hingga 22,1 nm. Sedangkan KAM- $ZnCl_2$ memiliki rentang diameter pori yang terukur antara 1,9 nm hingga 22,7 nm.

4.7. Penentuan Waktu Optimum

Waktu optimum menunjukkan waktu yang digunakan oleh karbon aktif untuk mengadsorpsi dalam jumlah maksimum suatu zat. Waktu optimum adsorpsi ditentukan dengan menginteraksikan sampel air dengan sejumlah adsorben selama beberapa variasi waktu. Waktu kontak divariasikan untuk mengetahui kemampuan setiap adsorben dan mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk tercapainya kesetimbangan adsorpsi. Waktu optimum dari adsorpsi untuk menurunkan kadar KOK oleh karbon aktif dan karbon aktif modifikasi dapat ditentukan dengan menghitung jumlah zat yang teradsorpsi (q_e) dan waktu (t). Jumlah zat yang teradsorpsi oleh karbon aktif dan karbon aktif modifikasi ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Waktu Optimum Adsorpsi Oleh (a) KATKKS, (b) KAM-H₂SO₄ (c) KAM-H₂O₂ dan (d) KAM-ZnCl₂

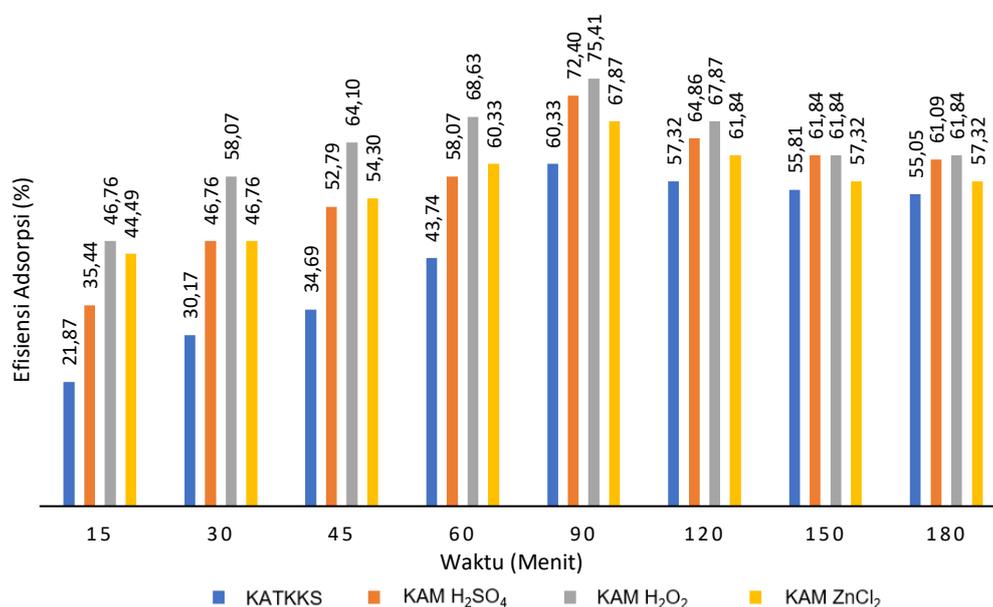
Jumlah senyawa-senyawa organik yang teradsorpsi pada karbon aktif dan karbon aktif modifikasi mengalami peningkatan dengan semakin lamanya waktu kontak antara adsorben dan adsorbat hingga tercapai waktu kontak optimum yang

ditandai semakin besarnya penurunan kadar KOK pada sampel. Setelah waktu optimum tercapai, jumlah penurunan kadar KOK mengalami penurunan. Pada menit ke 10 hingga menit ke 90 tingkat zat yang teradsorpsi mengalami peningkatan. Penurunan KOK disebabkan oleh bahan-bahan organik sebagian telah diserap dan diikat oleh karbon aktif dan karbon aktif modifikasi sehingga jumlah bahan organik yang ada dalam air limbah akan berkurang otomatis kebutuhan oksigen untuk mengoksidasi bahan organik secara kimia berkurang. Kebutuhan oksigen yang berkurang mengakibatkan nilai KOK dalam air limbah akan semakin menurun (Wirosoedarmo, dkk., 2018; Paramitha, dkk., 2021). Perbedaan hasil penurunan tersebut diakibatkan karena pada menit awal, permukaan masih belum maksimal menyerap KOK. Setelah waktu 90 menit terjadi penurunan kadar KOK paling besar karena pori-pori arang aktif bekerja secara maksimal, sedangkan pada menit ke 120 kemampuan untuk menyerap telah melampaui waktu jenuh sehingga proses penyerapannya tidak maksimal.

Waktu optimum yang diperoleh oleh KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂ untuk menurunkan kadar KOK adalah 90 menit dengan jumlah senyawa organik yang teradsorpsi masing-masing adalah 2,66; 3,19; 3,33 dan 2,99 mg/g. Berdasarkan Tabel 7 diketahui bahwa efisiensi adsorpsi paling tinggi terjadi pada menit ke 90 yaitu KATKKS mencapai 60,33%, KAM-H₂SO₄ mencapai 72,40%, KAM-H₂O₂ mencapai 75,41% dan KAM-ZnCl₂ mencapai 67,87%. Berdasarkan hasil pengukuran yang terlihat pada Gambar 18 menunjukkan bahwa penambahan modifikator pada karbon aktif dapat meningkatkan efektivitas adsorpsi untuk menurunkan kadar KOK.

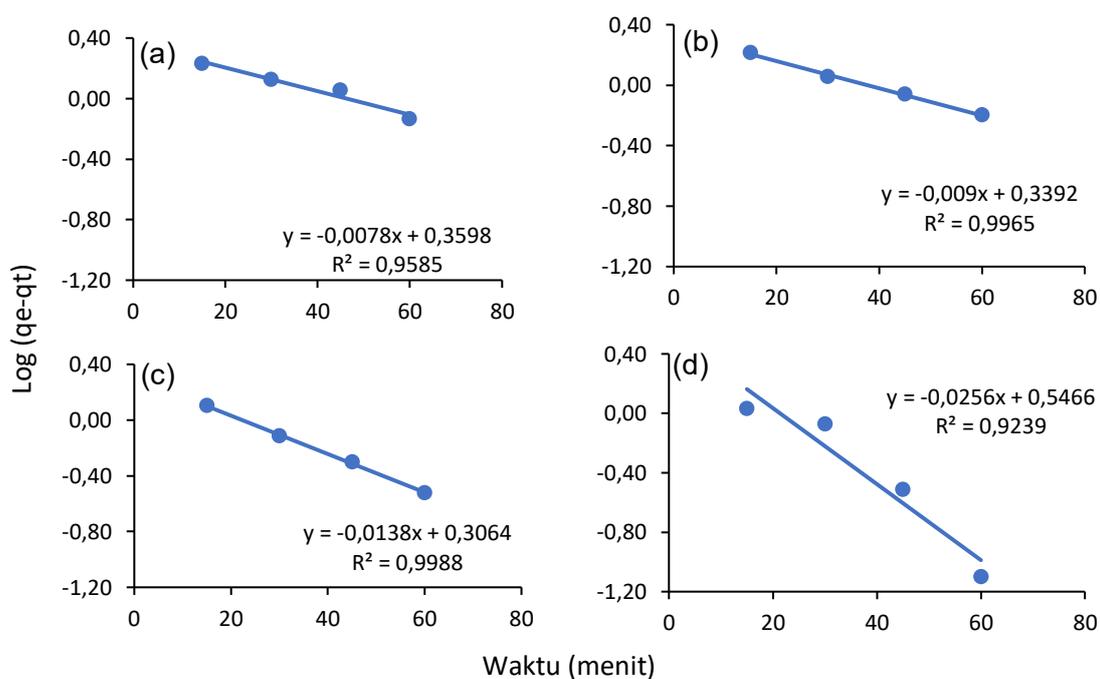
Tabel 7. Adsorpsi Dalam Waktu Optimum 90 Menit

No.	Adsorben	Kadar KOK Awal (ppm)	Pengukuran Adsorpsi		
			Kadar KOK Akhir (ppm)	Daya Adsorpsi (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)
1	KATKKS	88,40	35,07	2,6640	60,33
2	KAM-H ₂ SO ₄		24,40	3,1987	72,40
3	KAM-H ₂ O ₂		21,73	3,3313	75,41
4	KAM-ZnCl ₂		28,40	2,9976	67,87

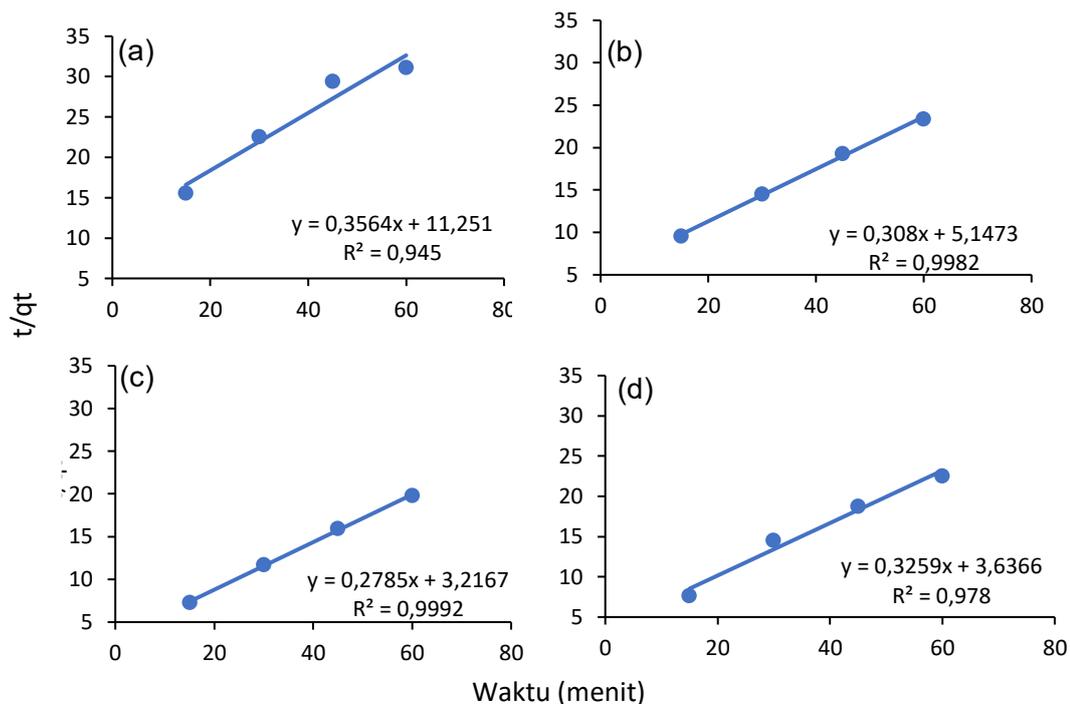


Gambar 18. Efisiensi Adsorpsi oleh KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂

Kinetika adsorpsi menyatakan proses adsorpsi suatu adsorbat oleh adsorben merupakan fungsi waktu. Adsorpsi yang terjadi pada adsorben berpori dinyatakan sebagai proses perpindahan massa yang diikuti terjadinya interaksi antara permukaan adsorben dengan adsorbat (Tong, dkk., 2019). Model kinetika adsorpsi yang digunakan adalah kinetika orde satu dan orde dua semu seperti yang terlihat pada Gambar 19 dan Gambar 20.



Gambar 19. Grafik Kinetika Orde Satu Semu oleh (a) KATKKS, (b) KAM-H₂SO₄, (c) KAM-H₂O₂ dan (d) KAM-ZnCl₂



Gambar 20. Grafik Kinetika Adsorpsi Dua Semu oleh (a) KATKKS, (b) KAM- H_2SO_4 , (c) KAM- H_2O_2 dan (d) KAM- $ZnCl_2$

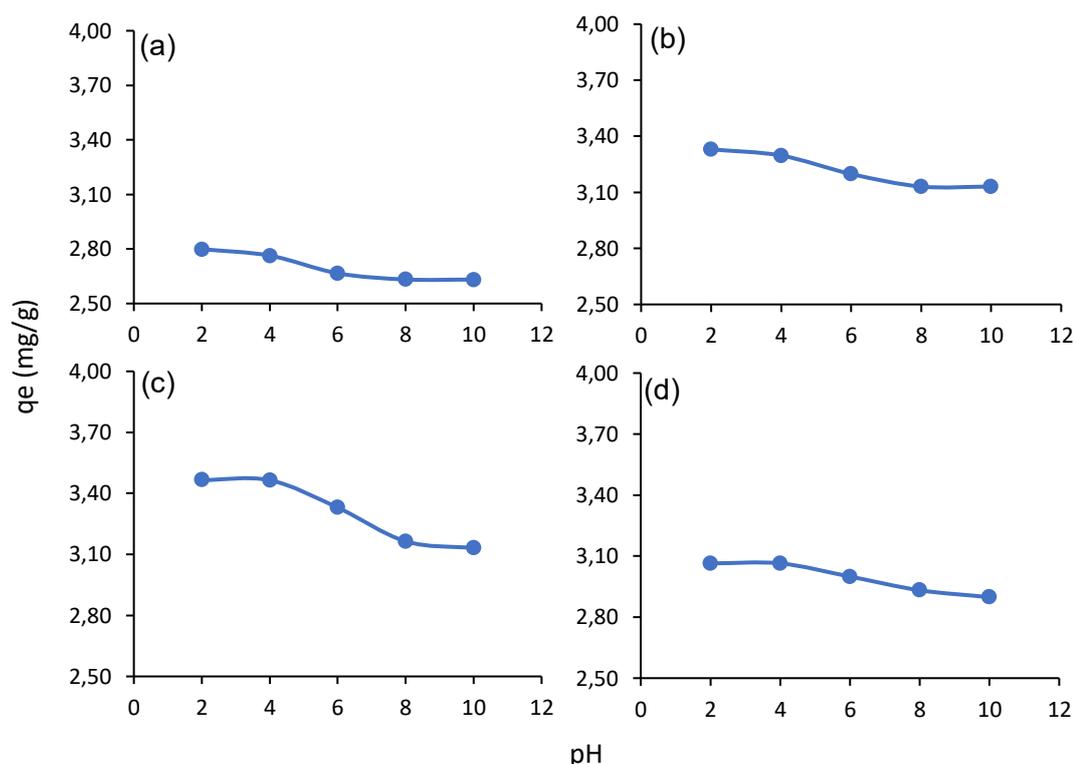
Tabel 8. Nilai Parameter Kinetika Adsorpsi oleh KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$

Material	q_e (mg/g)			k_1	k_2	R^2	
	Orde 1	Orde 2	Perc.			Orde 1	Orde 2
KATKKS	2,28	2,80	2,66	0,0179	0,011	0,9585	0,945
KAM- H_2SO_4	2,18	3,24	3,19	0,0207	0,0184	0,9965	0,9982
KAM- H_2O_2	2,02	3,59	3,33	0,0317	0,0241	0,9988	0,9992
KAM- $ZnCl_2$	3,52	3,06	2,99	0,0589	0,0292	0,9239	0,978

Data pada Tabel 6 nilai parameter kinetika adsorpsi oleh KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$ bahwa nilai q_e teoritis yang dihitung menggunakan model orde satu dan orde dua semu memiliki nilai cukup berbeda. Kinetika orde satu semu memiliki nilai q_e hasil percobaan dan penentuan waktu optimum yang sangat berbeda. Sedangkan kinetika orde dua semu memiliki nilai q_e teoritis dan penentuan waktu optimum yang hampir sama. Hal ini mengindikasikan bahwa adsorpsi yang terjadi dalam penurunan KOK mengikuti model kinetika orde dua semu.

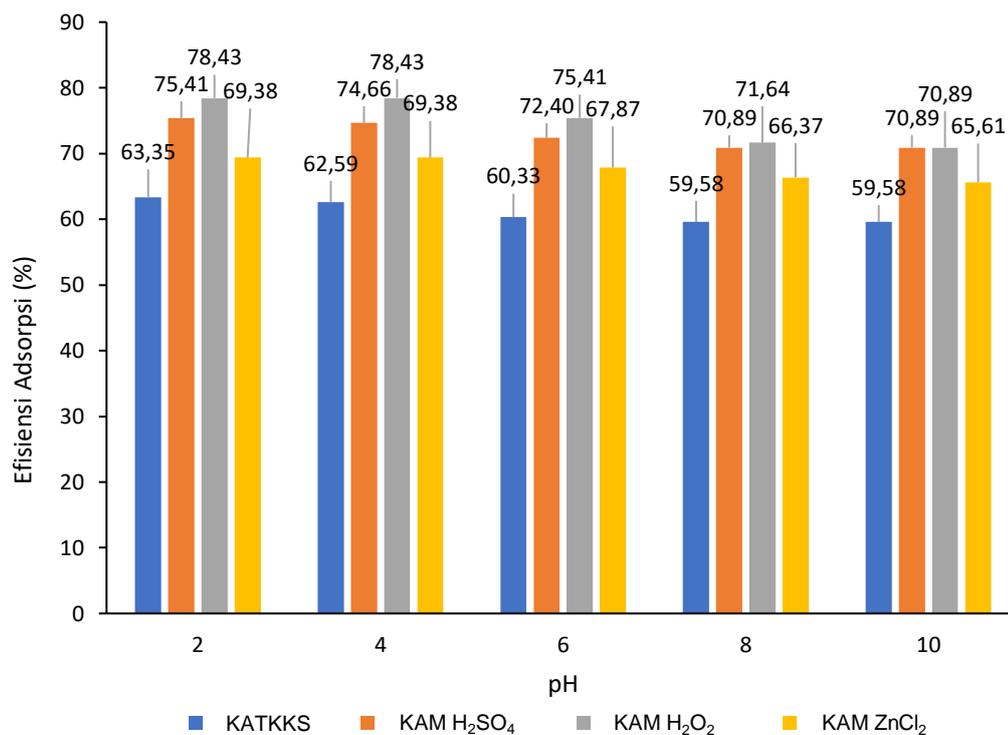
4.8. Penentuan pH optimum

Pengaruh pH dalam proses adsorpsi dianalisis pada nilai pH antara 2 hingga 10 dengan waktu optimum 90 menit. Pengaruh pH terhadap adsorpsi oleh karbon aktif dan karbon aktif modifikasi ditunjukkan pada Gambar 21. Pada interaksi senyawa organik dengan karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi, perubahan pH memberikan pengaruh yang signifikan terhadap jumlah senyawa organik yang teradsorpsi. Adsorpsi penurunan KOK yang paling banyak mengadsorpsi senyawa organik adalah karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi dengan nilai pH 2.



Gambar 21. Hasil Adsorpsi Berdasarkan Nilai pH oleh (a) KATKKS, (b) KAM-H₂SO₄, (c) KAM-H₂O₂ dan (d) KAM-ZnCl₂

Nilai pH optimum yang diperoleh oleh KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂ untuk menurunkan kadar KOK dalam waktu 90 menit dengan jumlah senyawa organik yang teradsorpsi masing-masing adalah 2,69; 3,36; 3,38 dan 2,99 mg/g. Persentase efektivitas penurunan KOK yang ditunjukkan pada Gambar 22 menyatakan nilai efektivitas adsorpsi KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂ pada pH 2 berturut-turut adalah 62,02% 75,04%, 77,87% dan 68,91%.



Gambar 22. Efisiensi Adsorpsi dengan Pengaruh pH oleh KATKKS, KAM-H₂SO₄, KAM-H₂O₂ dan KAM-ZnCl₂

Tabel 9. Adsorpsi dalam pH Optimum

No.	Adsorben	Kadar KOK Awal (ppm)	Pengukuran Adsorpsi		
			Kadar KOK Akhir (ppm)	Daya Adsorpsi (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)
1	KATKKS	88,40	33,07	2,6991	62,02
2	KAM-H ₂ SO ₄		22,40	3,2636	75,04
3	KAM-H ₂ O ₂		19,27	3,3888	77,87
4	KAM-ZnCl ₂		27,07	2,9978	68,91

Hasil analisis menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan KOK lebih tinggi pada kondisi asam yang disebabkan oleh interaksi elektrostatis antara senyawa yang teradsorpsi dan permukaan adsorben. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa semakin rendah nilai pH maka efisiensi penurunan kadar KOK akan semakin tinggi. Efisiensi penurunan kadar KOK dengan menggunakan karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi akan meningkat dengan cara menurunkan pH

adsorbat. Hal ini terjadi karena pada pH rendah, konsentrasi ion H^+ lebih besar, sehingga akan lebih mudah menetralkan permukaan karbon aktif yang bermuatan negatif, sehingga hambatan untuk terjadinya difusi organik pada pH yang lebih tinggi dapat dikurangi serta menghasilkan daya tarik elektrostatik yang sangat tinggi antara permukaan muatan positif. Sebaliknya, pada pH tinggi, konsentrasi ion OH^- lebih banyak, sehingga menyebabkan proses difusi bahan-bahan organik menjadi terhalang (Gumelar, dkk., 2015)

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa, sintesis karbon aktif dapat dengan menggunakan tandan kosong kelapa sawit dan H_3PO_4 serta dimodifikasi menggunakan H_2SO_4 , H_2O_2 dan $ZnCl_2$ yang mengakibatkan karakteristik yang berbeda tiap modifikator. Waktu kontak optimum adsorpsi untuk menurunkan kadar KOK oleh KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$ dan adalah 90 menit, yang dapat menurunkan kadar KOK berturut-turut sebesar 60,33%; 72,40%; 75,41% dan 67,87%. pH optimum adsorpsi untuk menurunkan kadar KOK oleh KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$ adalah pH 2 yang dapat menurunkan kadar KOK berturut-turut sebesar 62,02%; 75,04%; 77,87% dan 68,91%. Model kinetika adsorpsi untuk menurunkan kadar KOK oleh KATKKS, KAM- H_2SO_4 , KAM- H_2O_2 dan KAM- $ZnCl_2$ mengikuti kinetika orde dua semu.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh dan untuk pengembangan hasil penelitian, maka perlu dilakukan penelitian lanjutan antara lain:

1. Pengaplikasian karbon aktif dan karbon termodifikasi terhadap paramater kualitas air lainnya.
2. Pengaplikasian pada jenis air lainnya, seperti air laut.