

Penyisihan Nutrien dengan Material Zeolit dan Karbon Aktif dalam Teknologi Sediment Capping Studi Kasus Danau Batur Bali

Rosalina Almalia*, Prayatni Soewondo, Astried Sunaryani

Program Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

*Koresponden email: rosalina.almalia@gmail.com

Diterima: 20 Desember 2025

Disetujui: 04 Januari 2025

Abstract

Lake Batur is one of the national priority lakes that is experiencing pollution pressure due to anthropogenic activities. Nitrogen in the form of ammonium (NH_4) and phosphorus in the form of orthophosphate (PO_4) at high levels cause eutrophication. One of the technologies used to address eutrophication in Lake Batur is sediment capping technology. Sediment capping involves covering the sediment surface with a capping layer of adsorbent material that must effectively adsorb nutrients, prevent their release back into the water, and remain stable under lake environmental conditions. Therefore, adsorbent materials that are selective, environmentally friendly, and easily obtainable especially in the local context of Lake Batur are required. This study aims to determine the capability of zeolite and activated carbon as capping materials through laboratory experiments. The parameters tested include the adsorption efficiency of zeolite and carbon in removing ammonium and orthophosphate under various conditions such as pH, dosage, and equilibrium isotherms. The results of the study show that both materials have potential as capping materials but zeolite is more recommended for nutrient management in Lake Batur.

Keywords: *sediment capping, adsorption, zeolite, activated carbon, ammonium, orthophosphate*

Abstrak

Danau Batur merupakan salah satu danau prioritas nasional yang mengalami tekanan pencemaran akibat aktivitas antropogenik. Nitrogen dalam bentuk amonium (NH_4) dan fosfor dalam bentuk ortofosfat (PO_4) yang tinggi menyebabkan eutrofikasi. Salah satu teknologi yang digunakan dalam mengatasi eutrofikasi di danau Batur adalah teknologi *sediment capping*. Teknologi *sediment capping* melibatkan penutupan permukaan sedimen dengan lapisan material *capping* berupa adsorben yang secara efektif harus mampu menyerap nutrien, menahan pelepasan kembali, dan stabil dalam kondisi lingkungan danau. Oleh karena itu, diperlukan material adsorben yang selektif, ramah lingkungan, dan mudah didapatkan khususnya untuk konteks lokal seperti danau Batur. Penelitian ini bertujuan mengetahui kemampuan zeolit dan karbon aktif sebagai material *capping* melalui eksperimen laboratorium. Parameter yang diuji meliputi efisiensi adsorpsi zeolit dan karbon aktif dalam menyisihkan amonium dan ortofosfat dalam berbagai kondisi variasi seperti pH, dosis dan isoterm kesetimbangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua material memiliki potensi sebagai material *capping* namun zeolit lebih direkomendasikan untuk penanganan nutrien di danau Batur.

Kata kunci: *sediment capping, adsorpsi, zeolit, karbon aktif, amonium, ortofosfat*

1. Pendahuluan

Danau merupakan ekosistem air tawar yang memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan hidrologis, ekologis, dan sosial suatu wilayah. Di Indonesia danau juga menjadi sumber air bersih, irigasi pertanian, energi, perikanan, dan pariwisata menjadikannya elemen vital dalam pembangunan berkelanjutan. Namun, seiring meningkatnya aktivitas manusia banyak danau mengalami degradasi kualitas air dan kerusakan ekosistem. Salah satu danau yang mengalami tekanan ekologis signifikan adalah Danau Batur di Kabupaten Bangli, Bali. Danau Batur di Kabupaten Bangli merupakan danau kaldera vulkanik yang memiliki fungsi ekologis, sosial, dan ekonomi penting. Namun, aktivitas antropogenik telah meningkatkan beban pencemar terutama nitrogen dan fosfor yang memicu eutrofikasi [1][2]. Eutrofikasi tidak hanya berasal dari beban eksternal tetapi juga dari beban internal berupa pelepasan kembali nutrien dari sedimen [3].

Sedimen danau berperan sebagai penyimpan sekaligus sumber nutrien karena kemampuannya dalam mengadsorpsi dan desorpsi yang dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan danau. Sedimen mampu menyerap dan melepas amonium (NH_4) dan ortofosfat (PO_4) dari sedimen yang dapat memperparah eutrofikasi dan mengganggu keseimbangan ekosistem perairan [3][4]. Eutrofikasi menyebabkan *alga*

blooming dan penurunan populasi ikan endemik [5]. Penurunan kualitas air dan gangguan ekosistem ini tidak hanya berdampak pada lingkungan tetapi juga pada keberlanjutan ekonomi masyarakat sekitar. Dalam mengatasi masalah ini teknologi *sediment capping* menjadi solusi potensial dengan zeolit dan karbon aktif sebagai material adsorben yang mampu menyerap dan menahan nutrien [6][7]. Teknologi *sediment capping* ini melibatkan penutupan permukaan sedimen dengan lapisan material adsorben yang berfungsi sebagai penghalang difusi dan penstabil kontaminan. Material *capping* yang efektif harus mampu menyerap nutrien, menahan pelepasan kembali, dan tetap stabil dalam kondisi lingkungan danau. Teknologi ini telah digunakan secara global untuk remediasi danau dan sungai yang tercemar dengan efektivitas tergantung pada jenis material, ketebalan lapisan, dan kondisi lingkungan [8]. Oleh karena itu, teknologi *capping* dengan material adsorben menjadi alternatif yang menjanjikan.

Material *capping* yang umum digunakan meliputi tanah, abu, bentonit, zeolit, karbon aktif, dan biochar. Namun, tidak semua material memiliki efisiensi tinggi, stabilitas jangka panjang, dan dampak lingkungan yang minimal. Oleh karena itu, diperlukan material adsorben yang selektif, ramah lingkungan, dan mudah didapatkan, khususnya untuk konteks lokal seperti danau Batur. Zeolit dan karbon aktif merupakan dua jenis material adsorben yang telah banyak digunakan dalam pengolahan air dan remediasi sedimen. Zeolit dan karbon aktif memiliki kapasitas adsorpsi tinggi, struktur pori yang mendukung, dan sifat ramah lingkungan. Zeolit memiliki struktur kristalin dengan kemampuan pertukaran ion yang tinggi [7] sedangkan karbon aktif memiliki luas permukaan besar dan porositas tinggi yang mendukung adsorpsi senyawa organik dan anorganik [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan zeolit dan karbon aktif sebagai material *capping* melalui eksperimen laboratorium dalam menyisihkan (amonium) NH_4 dan (ortofosfat) PO_4 dalam berbagai kondisi variasi seperti pH dan dosis dan isoterme kesetimbangan dari masing - masing adsorben. Fokus utama adalah pada karakteristik material, efisiensi adsorpsi, dan isoterme dari masing – masing adsorben. Melalui pendekatan laboratorium yang terstruktur dan analisis ilmiah yang mendalam diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengendalian eutrofikasi dan restorasi ekosistem danau secara berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan secara eksperimental dalam skala laboratorium menggunakan air artifisial yang konsentrasiannya menyerupai kondisi di danau Batur. Material adsorben yang digunakan adalah zeolit alami dan karbon aktif berukuran 100 mesh. Eksperimen dilakukan untuk melihat kemampuan adsorpsi adsorben zeolit dan karbon aktif dalam menyisihkan ortofosfat dan amonium yang dilakukan dalam skala laboratorium secara adsorpsi batch meliputi karakteristik material, pengaruh pH dan dosis terhadap % efisiensi penyisihan amonium dan ortofosfat dan isoterme adsorbsi zeolit dan karbon aktif yang dimodelkan dalam langmuir, freundlich dan tenkim.

2.1 Lokasi dan Sampel Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di laboratorium di BRIN Bandung. Sampel adsorben berupa zeolit dan karbon aktif berasal dari adsorben yang ada di pasaran dan tersedia secara komersial. Adsorben zeolit dan karbon aktif dalam bentuk granular dilakukan pengecilan ukuran dengan cara digerus kemudian diayak menggunakan *sieve shaker* (ayakan) dengan ukuran 100 mesh. Sampel air dibuat secara artifisial dengan konsentrasi nutrien menyerupai kondisi aktual danau Batur dimana konsentrasi ortofosfat 4,9 mg/L dan amonium 0,8 mg/L. Larutan stock amonium dengan konsentrasi 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan 3,819 gr NH_4Cl dalam 1 liter air. Larutan stock ortofosfat dengan konsentrasi 50 mg/L dengan melarutkan KH_2PO_4 dalam 1 liter air [9]. Masing-masing larutan di encerkan sesuai dengan konsentrasi yang digunakan.

2.2 Karakterisasi material

Material zeolit alami dan karbon aktif dilakukan pengujian karakteristik fisik dan kimia menggunakan SEM-EDX untuk mengetahui karakteristik awal material zeolit dan karbon aktif berupa morfologi dan mikrostruktur dari permukaan material adsorben.

2.3 Prosedur Eksperimen

Kemampuan material zeolit dan karbon aktif sebagai material *capping* dalam mengadsorbsi polutan dievaluasi dalam (%) efisiensi penyisihan amonium dan ortofosfat serta isoterme adsorbsi masing - masing material. Menentukan pengaruh pH awal larutan terhadap % penyisihan (NH_4) amonium dan ortofosfat (PO_4) menggunakan zeolit dan karbon aktif dengan masing – masing massa 0,3 gram pada pH pada 4, 6, 8, dan 10. Pengaturan pH menggunakan larutan HCl dan NaOH 0.1 M. Eksperimen dilakukan secara adsorbsi

batch menggunakan orbital shaker dengan kecepatan 150 rpm dengan waktu kontak selama 24 jam dengan suhu 25°C. 30 mL larutan KH_2PO_4 disiapkan dengan konsentrasi 4,9 mg/L sedangkan 150 mL NH_4Cl disiapkan dengan konsentrasi 0,8 mg/L untuk pengujian pH. Hasil sampel disaring kemudian dilakukan pengujian menggunakan spektrofotometri dengan metode fenat untuk amonium dan asam askorbat untuk ortofosfat. Menentukan pengaruh dosis awal larutan terhadap % penyisihan (NH_4^+) Amonium dan ortofosfat (PO_4^{3-}) menggunakan zeolit dan karbon aktif dengan masing – masing dengan dosis pada 0,1 gr, 0,2 gr, 0,3 gr, 0,4 gr dan 0,5 gr. Eksperimen dilakukan secara adsorpsi batch menggunakan orbital shaker dengan kecepatan 150 rpm dengan waktu kontak selama 24 jam dengan suhu 25°C. 30 mL larutan KH_2PO_4 disiapkan dengan konsentrasi 4,9 mg/L sedangkan 150 mL NH_4Cl disiapkan dengan konsentrasi 0,8 mg/L. Hasil sampel disaring kemudian dilakukan pengujian menggunakan spektrofotometri dengan metode fenat untuk amonium asam askorbat untuk ortofosfat

Isoterm adsorpsi amonium dan ortofosfat menggunakan zeolit dan karbon aktif ditentukan dengan melalui metode kesetimbangan batch. Sebanyak 0,3 gr sampel zeolit dan karbon aktif masing – masing ditambahkan dalam 150 ml larutan amonium dengan konsentrasi awal bervariasi berkisar antara 5 hingga 100 mg/L. Larutan ion amonium yang digunakan bersumber dari NH_4Cl yang dilarutkan. Untuk pengujian ortofosfat, digunakan 30 mL larutan KH_2PO_4 dengan konsentrasi awal yang divariasikan antara 0,5 hingga 10 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan secara batch menggunakan orbital shaker pada kecepatan 150 rpm, suhu ($25 \pm 1^\circ\text{C}$), dan pH 7 selama 24 jam.

2.4 Analisis Data

Efisiensi (D) penyisihan ortofosfat (PO_4^{3-}) dan (NH_4^+) amonium dihitung berdasarkan konsentrasi awal dan akhir :

$$D = \frac{(C_{o-} - C)}{C_{o-}} \times 100 \% \quad (1)$$

D = (%) persen efisiensi penyisihan amonium/ ortofosfat

C_o = (mg/L) konsentrasi amonium/ ortofosfat sebelum reaksi

C = (mg/L) konsentrasi amonium/ ortofosfat setelah reaksi

Isoterm adsorpsi ortofosfat (PO_4^{3-}) dan (NH_4^+) amonium menggunakan zeolit dan karbon aktif menggunakan model langmuir, freundlich dan tenkim menggunakan persamaan:

$$q_e = Q_m \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

Keterangan:

C_e = Konsentrasi akhir kesetimbangan pada adsorbat setelah proses adsorpsi (mg/L)

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg/gram)

K_L = Konstanta Langmuir (L/mg)

Q_m = Kapasitas adsorpsi (mg/gram)

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

Keterangan:

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg/gram)

K_f = Konstanta Freundlich

n = Konstanta yang berhubungan dengan energi adsorpsi terhadap heterogenitas situs adsorben

C_e = Konsentrasi akhir kesetimbangan pada adsorbat setelah proses adsorpsi (mg/L)

$$q_e = \frac{RT}{b} \ln(K_T C_e) \quad (4)$$

$$B_T = \frac{RT}{b} \quad (5)$$

Keterangan:

q_e = Kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang (mg/gram)

K_T = Konstanta Tenkim (l/mg)

R = Konstanta gas universal (8.314 J/(mol.K))

T = Suhu mutlak (K)

b = konstanta terkait energi adsorpsi

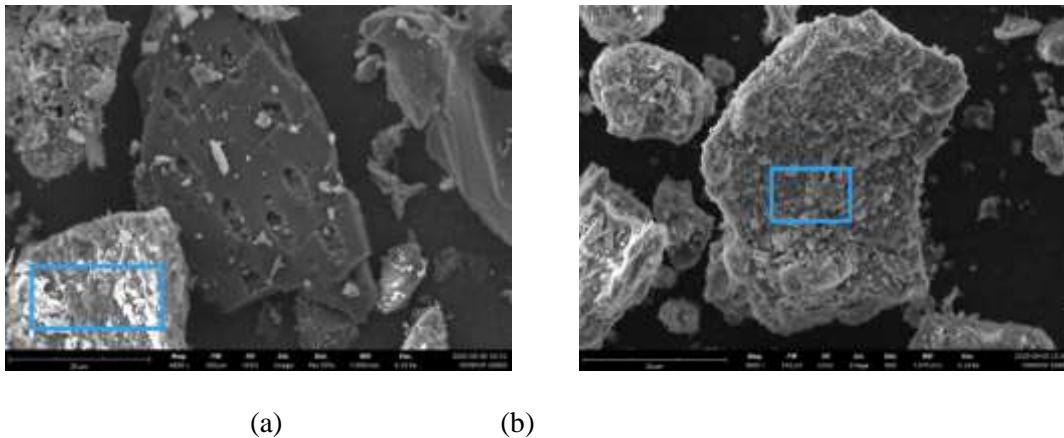
C_e = Konsentrasi akhir kesetimbangan pada adsorbat setelah proses adsorpsi (mg/L)

Pengolahan data hasil dan analisis penelitian ini menggunakan excel dan Origin Lab 6.8.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik awal material

Karbon aktif yang digunakan dalam penelitian ini merupakan karbon aktif ada di pasaran dan tersedia secara komersial. Gambar 1 menunjukkan foto SEM material karbon aktif dengan perbesaran hingga 4800x. Berdasarkan hasil SEM kemungkinan besar karbon aktif berasal dari limbah tempurung kelapa. Hasil SEM karbon aktif menunjukkan morfologi karbon aktif mempunyai bentuk amorf dengan susunan karbon yang tidak teratur yang diselingi oleh retakan dan celah berbentuk silindris yang berfungsi sebagai pori-pori



Gambar 1. (a) Hasil SEM karbon aktif perbesaran 4800x; (b) SEM zeolit perbesaran 5000x

Hasil SEM zeolit menunjukkan zeolit memiliki permukaan yang heterogenitas. Zeolit memiliki permukaan kasar dan banyak terdapat pori-pori kosong nampak seperti molekul-molekul yang agregat tak beraturan. Agregat ini terdiri dari banyak serpihan kecil yang saling terhubung yang membentuk struktur berpori keseluruhan zeolit yang berkontribusi pada sifat adsorbsinya. Hasil analisis SEM-EDX menunjukkan material zeolit menyediakan situs aktif yang lebih kuat pada permukaan adsorben dengan komponen penyusun zeolit didominasi oksigen dan silikon serta karbon, magnesium, aluminium dan besi dalam jumlah kecil. Elemen komposisi karbon aktif dan zeolit masing-masing disajikan pada **Tabel 1**.

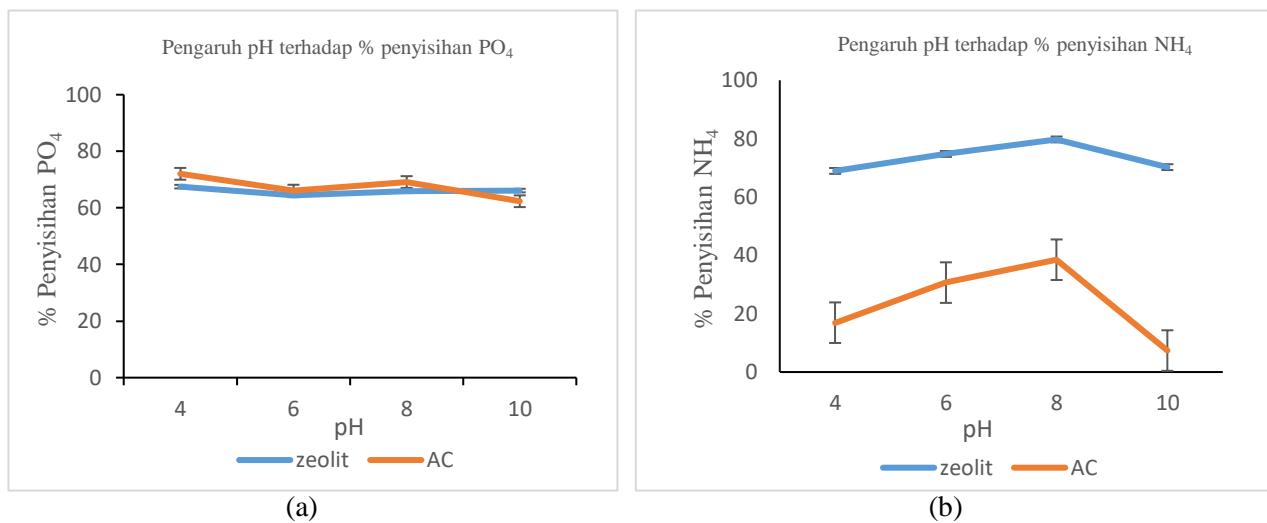
Tabel 1. Elemen komposisi karbon aktif dan zeolit

Komposisi	Simbol	Karbon aktif		Zeolit			
		Berat atom	Berat konsentrasi (%)	Komposisi	Simbol	Berat atom	Berat konsentrasi (%)
Karbon	C	68,350	59,6	Karbon	C	7,796	4,605
Oksigen	O	29,185	33,9	Oksigen	O	60,809	47,848
Magnesium	Mg	0,566	1	Magnesium	Mg	1,255	1,502
Kalsium	Ca	1,890	5,5	Aluminium	Al	4,830	6,406
				Silikon	Si	21,883	30,230
				Besi	Fe	3,426	9,409

3.2 Pengaruh pH terhadap % penyisihan ortofosfat dan ammonium

pH merupakan parameter penting dalam menentukan tingkat adsorbsi suatu senyawa menggunakan adsorben. Pengaruh pH pada % penyisihan ortofosfat dan ammonium di pelajari pada rentang pH 4 hingga 10 menggunakan adsorben zeolit dan karbon aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH larutan memiliki pengaruh signifikan terhadap % penyisihan adsorpsi ortofosfat dan ammonium menggunakan kedua jenis adsorben. % penyisihan ortofosfat menggunakan kedua jenis adsorben ditunjukkan pada **Gambar 2**. Penyisihan ortofosfat tertinggi terjadi pada kondisi asam yaitu pada pH 4 untuk kedua jenis adsorben. Penyisihan ortofosfat menggunakan zeolit mencapai 67,50% sedangkan karbon aktif mencapai 72,04% yang menunjukkan dalam kondisi asam sangat baik dalam menyerap ortofosfat dibandingkan pada kondisi basa. Hal ini disebabkan pada pH asam terjadi peningkatan muatan positif pada permukaan adsorben yang mendukung fiksasi ortofosfat melalui tarikan elektrostatik serta pada pH rendah ortofosfat di air di dominasi oleh spesies $H_2PO_4^-$ yang memiliki valensi ion lebih kecil sehingga lebih mudah melakukan ikatan ion dengan permukaan adsorben [10][11]. Secara keseluruhan % penyisihan karbon aktif dan zeolit dalam

menyisihkan ortofosfat hampir sama yang menunjukkan kedua material memiliki mampu menyisihkan ortofosfat.



Gambar 2. (a) Pengaruh pH terhadap % penyisihan ortofosfat
 (b) Pengaruh pH terhadap % penyisihan amonium

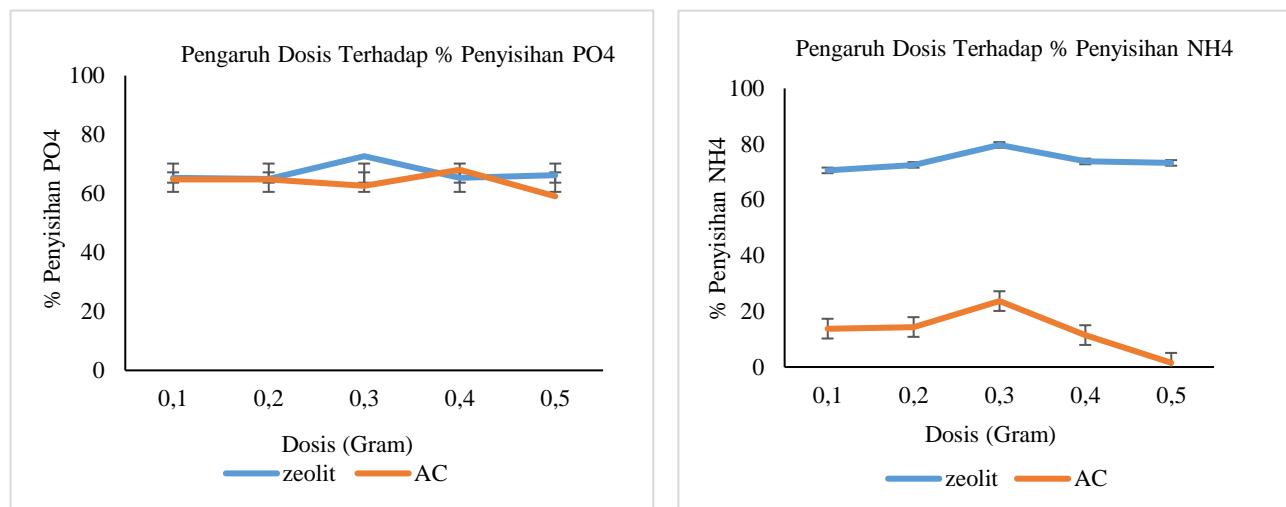
Pengaruh pH pada penghilangan amonium menggunakan zeolit dan karbon aktif di periksa di wilayah pH 4 sampai 10. Adsorpsi amonium dengan zeolit menunjukkan % penyisihan maksimum sebesar 79,71 % pada pH 8 sedangkan karbon aktif hanya mencapai 38,49% juga pada pH 8. Hasil ini menunjukkan zeolit lebih baik dalam mengadsorpsi amonium dibandingkan karbon aktif. Pada gambar 2 menunjukkan bahwa penyisihan amonium dengan zeolit dan karbon aktif meningkat secara signifikan dari pH 4 hingga pH 8 namun pada pH 10 % penyisihan amonium mengalami penurunan untuk kedua jenis adsorben. % Penyisihan amonium menggunakan zeolit meningkat secara bertahap dari pH 4 sebesar 68,92% menjadi 79,71% pada pH 8. Namun pada pH 10 efisiensi amonium mengalami penurunan menjadi 70,23%. Hal yang sama juga terjadi pada penyisihan amonium menggunakan karbon aktif.

Penurunan ini menunjukkan bahwa nilai pH yang lebih tinggi dapat mengurangi kinerja adsorpsi amonium oleh zeolit dan karbon aktif. Hal ini dikarenakan pada pH tinggi di atas 8 amonium berubah menjadi amonia (NH_3) yang bersifat netral dan tidak dapat bertukar ion sehingga kapasitas penyerapan menurun. Namun pada pH terlalu rendah efisiensi penyisihan amonium menurun karena pada kondisi asam terjadi persaingan antara H^+ dan amonium untuk menempati situs pertukaran pada zeolit [12]. Hasil ini membuktikan bahwa optimalisasi pH merupakan faktor krusial dalam meningkatkan efisiensi adsorpsi polutan dari perairan dengan pH optimal yang berbeda untuk setiap jenis polutan. Mekanisme dominan adsorpsi amonium oleh zeolit adalah pertukaran ion antara kation (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) pada permukaan adsorben dengan NH_4 dalam larutan [13].

Zeolit menunjukkan keunggulan dalam mengadsorpsi amonium karena struktur kristalnya yang berpori dimana zeolit adalah aluminosilikat terhidrasi dengan tetrahedral alumina dan silika tersusun secara simetris yang menghasilkan struktur sarang lebah tiga dimensi yang terbuka dan stabil serta memiliki kapasitas pertukaran kation, selektivitas kation, volume rongga yang lebih tinggi dan afinitas yang tinggi terhadap amonium sedangkan karbon aktif lebih bergantung pada interaksi fisik atau kimia permukaan

3.3 Pengaruh dosis terhadap % penyisihan ortofosfat dan amonium

Pengaruh dosis terhadap % penyisihan ortofosfat dan amonium juga diselidiki dengan menggunakan dosis 0,1 sampai 0,5 gr. % penyisihan kedua adsorben dalam mengadsorpsi ortofosfat dan amonium seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3**.



(a)
Gambar 3. (a) Pengaruh Dosis terhadap % penyisihan ortofosfat
 (b) Pengaruh Dosis terhadap % penyisihan amonium

Dari **Gambar 3** dapat terlihat bahwa % penyisihan ortofosfat dan ammonium dipengaruhi oleh dosis adsorben yang digunakan. Peningkatan dosis zeolit dan karbon aktif dari 0,1 hingga 0,5 gram menunjukkan tren peningkatan penyisihan adsorpsi ortofosfat dengan % penyisihan maksimum masing-masing sebesar 72,66% dan 68,07%. Hal ini dikaitkan dengan bertambahnya jumlah situs aktif dan luas permukaan adsorben yang tersedia untuk interaksi dengan ion ortofosfat dan ammonium sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan [14]. Semakin kecil ukuran partikel maka semakin banyak pori yang terdapat pada adsorben sehingga adsorbat yang terserap semakin banyak. Namun, karbon aktif mengalami penurunan efisiensi pada dosis 0,5 gr hal ini menurut [15] pada dosis tinggi terjadi penurunan efisiensi karena *overcrowding* partikel adsorben dimana jumlah adsorben yang ditambahkan terlalu banyak sehingga situs aktif pada permukaan adsorben saling menutupi dan difusi ortofosfat ke dalam pori-pori berkurang akibatnya tidak semua bisa berinteraksi dengan ortofosfat sehingga terjadi penurunan efisiensi.

Dalam penyisihan ammonium zeolit menunjukkan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon aktif dengan nilai maksimum mencapai 79,71% pada dosis 0,3 gram. Zeolit menunjukkan performa lebih baik dibandingkan karbon aktif karena struktur porositasnya dan kemampuan pertukaran ion yang lebih baik terhadap ammonium. Selain itu, ukuran butiran zeolit yang lebih kecil meningkatkan luas permukaan dan jumlah pori sehingga memperbesar kapasitas adsorpsi. Struktur kristalin zeolit terdiri dari rangkaian aluminosilikat dengan muatan negatif yang mampu menarik kation seperti ammonium melalui pertukaran ion. Namun, kapasitas pertukaran ini terbatas oleh ukuran pori dan distribusi muatan internal. Mekanisme adsorpsi zeolit terhadap ammonium didominasi oleh pertukaran ion atau daya elektrostatik [16].

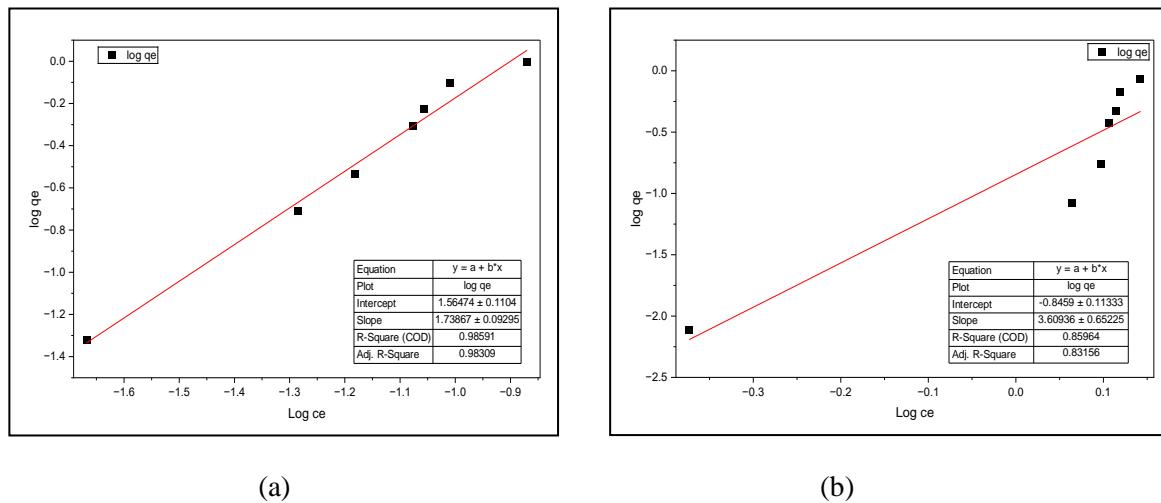
Pola efisiensi karbon aktif menunjukkan peningkatan hingga dosis 0,3 gram kemudian menurun pada dosis lebih tinggi 0,4-0,5 gram. Penurunan ini dapat dikaitkan dengan fenomena saturasi permukaan adsorben di mana situs aktif pada karbon aktif mulai jenuh dan tidak mampu lagi menampung ammonium secara efektif [17]. Efektivitas karbon aktif jauh lebih rendah terhadap ion ammonium kemungkinan karena sifat ammonium yang bersifat polar dan terhidrasi kuat sehingga sulit diadsorbsi pada permukaan nonpolar karbon aktif yang struktur mikroporinya lebih cocok untuk molekul organik nonpolar bukan ion-ion terlarut [18]. Adsorpsi ammonium oleh karbon aktif sangat tergantung pada sifat fisik yang berupa luas permukaan dan kimia yaitu gugus fungsional. Mekanisme adsorpsi ammonium adalah melalui kombinasi interaksi kimia dan ikatan elektrostatik antara ammonium dengan gugus fungsional permukaan [19]. Perbedaan performa ini menegaskan bahwa zeolit lebih unggul dalam aplikasi penyisihan ion ammonium pada konsentrasi rendah.

3.4 Isoterm adsorbsi

3.4.1 Isoterm ortofosfat

Hubungan antara jumlah zat yang teradsorpsi per satuan massa adsorben dengan konsentrasi larutan pada kondisi kesetimbangan digambarkan melalui isoterm adsorpsi. Isoterm penting untuk memahami bagaimana ion ortofosfat berinteraksi dengan permukaan adsorben. Dalam penelitian ini model isoterm langmuir, freundlich, dan tenkim digunakan untuk menginterpretasikan data kesetimbangan adsorpsi ortofosfat pada zeolit dan karbon aktif. Hasil perhitungan parameter isoterm adsorpsi ortofosfat dapat dilihat pada **Tabel 2**. Hasil menunjukan bahwa kedua jenis adsorben yaitu zeolit dan karbon aktif dalam

mengadsorpsi ortofosfat paling sesuai dengan model isoterm freundlich dengan nilai $R^2 = 0,9859$ untuk zeolit dan $R^2 = 0,8596$ untuk karbon aktif. Hal ini menunjukkan adsorpsi zeolit dan karbon aktif adalah multilayer pada permukaan heterogen. Model grafik isoterm freundlich untuk zeolit dan karbon aktif dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. (a) Model isoterm freundlich zeolit terhadap ortofosfat (b) Model isoterm freundlich karbon aktif terhadap ortofosfat

Tabel 2. Parameter model isoterm adsorpsi ortofosfat

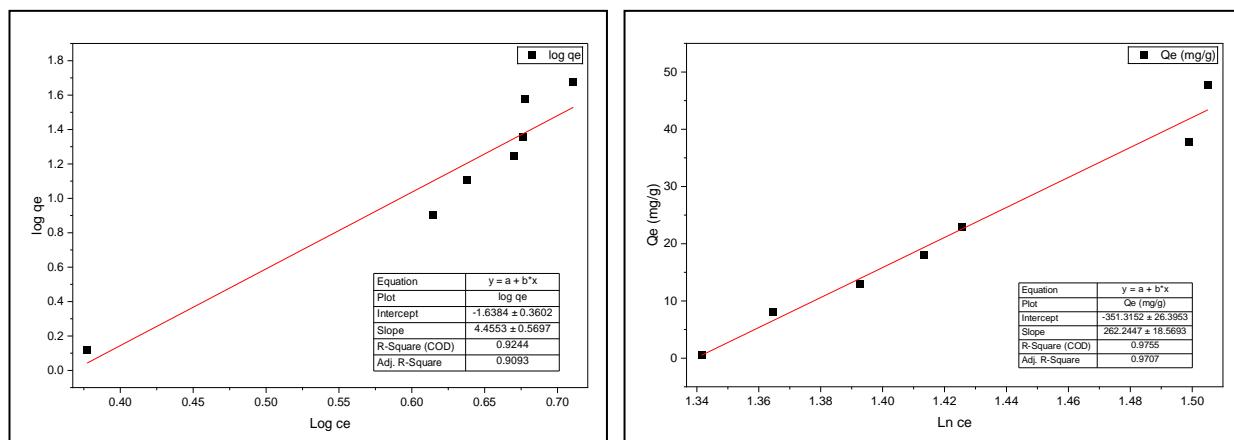
Adsorben	Langmuir				
	slope	intersep	Qmax	K _L	R ²
zeolit	-2.8187	0.4362	-0.3548	-6.4619	0.7846
	Persamaan				
AC	-58.731	80.403	-0.0170	-0.7305	0.9929
	Persamaan				
Freundlich					
zeolit	1.7387	1.5647	1.7387	36.7029	0.9859
	Persamaan				
AC	3.6094	0.8459	3.6094	7.0129	0.8596
	Persamaan				
Tenkim					
zeolit	0.5075	1.8447	0.5075	37.8972	0.8124
	Persamaan				
AC	0.4608	0.336	0.4608	2.0734	0.3827
	Persamaan				

Nilai K_f sebesar 36,7029 pada zeolit menunjukkan kemampuan adsorben menahan adsorbat yang tinggi sedangkan 1/n = 1,7387 yang lebih besar dari 1 mengindikasikan bahwa adsorpsi berlangsung pada kondisi yang *favorable* artinya ikatan antara ortofosfat dan permukaan zeolit tidak terlalu kuat. Hal ini dapat dikaitkan dengan keberagaman ukuran pori dan distribusi situs aktif yang tidak seragam pada permukaan zeolit. Sedangkan pada karbon aktif dalam mengadsorpsi ortofosfat memiliki nilai 1/n = 3,6094 yang jauh diatas 1 menunjukkan bahwa interaksi ortofosfat dengan permukaan karbon aktif relatif lemah kemungkinan besar disebabkan oleh sifat permukaannya yang lebih non polar sehingga kurang optimal dalam menarik ion anorganik bermuatan negatif seperti amonium.

3.4.2 Isoterm amonium

Isoterm adsorpsi amonium dilakukan menggunakan 0,3 gr adsorben zeolit dan karbon aktif dalam 150 ml larutan amonium. Data hasil perhitungan ditampilkan pada **Tabel 3** dalam tiga model isoterm yaitu langmuir, freundlich dan tenkim. Ketiga model isoterm diuji untuk menentukan model yang paling

menggambarkan fenomena adsorpsi. Model Isoterm zeolit paling sesuai dengan model freundlich dengan $R^2 = 0,9244$. Nilai $K_f = 0,0230$ yang rendah menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi zeolit terhadap amonium relatif kecil pada rentang konsentrasi yang diuji. Sementara nilai $1/n = 4,4553$ menunjukkan adsorpsi berada kategori kurang favorable disebabkan oleh kompetisi ion lain dalam larutan, kondisi pH dan nilai kapasitas tukar kation zeolit yang tidak terlalu tinggi. Isoterm amonium dengan karbon aktif paling cocok menggunakan model tenkim dengan nilai R^2 mencapai 0,9775. Model tenkim memperhitungkan variasi energi adsorpsi ketika permukaan mulai jenuh sehingga menggambarkan proses adsorpsi yang dikontrol oleh interaksi tenaga permukaan. Nilai $B_T = 262.24$ menunjukkan adanya interaksi yang cukup kuat tetapi sifat interaksinya lebih condong ke adsorpsi fisik dan interaksi permukaan bukan pertukaran ion.



Gambar 5. (a) Model isoterm freundlich zeolit terhadap amonium (b) Model isoterm tenkim karbon aktif terhadap amonium

Gambar 5 menunjukkan model isoterm oleh zeolit dan karbon aktif terhadap amonium dalam model freundlich dan tenkim. Hasil menunjukkan bahwa kedua material memiliki potensi untuk menyerap zeolit dan karbon aktif namun untuk meningkatkan potensi yang tinggi dalam menyerap amonium yang relevan dengan kondisi danau Batur. Zeolit menunjukkan beberapa tanda bahwa mekanisme tukar kation mungkin berperan tetapi kapasitasnya kecil dan tidak menguntungkan dalam rentang yang diuji sedangkan karbon aktif menunjukkan pola energi yang teratur tetapi kapasitasnya sangat rendah terhadap ion amonium.

Tabel 3. Parameter model isoterm adsorpsi amonium

Adsorben		Langmuir				
		slope	intersep	Q_{\max}	K_L	R^2
zeolit	-0.6575	3.3181		-1.509	-0.1982	0.9720
	Persamaan			$y = -0.6621x + 3.3493$		
AC		slope	intersep	Q_{\max}	K_L	R^2
AC	-5.2711	22.983		-0.1897	-0.2293	0.3374
	Persamaan			$y = -5.2711x + 22.983$		
Adsorben		Freundlich				
zeolit	4.4553	-1.6384		4.4553	0.0230	0.9244
	Persamaan			$y = 4.088x - 1.4093$		
AC	19.793	-11.115		19.7930	1.4×10^{-5}	0.7755
	Persamaan			$y = 19.793x - 11.115$		
Adsorben		Tenkim				
zeolit	45.408	-44.135		45.408	0.3783	0.5176
	Persamaan			$y = 40.408x - 44.135$		
AC	262.24	-351.32		262.24	0.2619	0.9755
	Persamaan			$y = 262.24x - 351.32$		

4. Kesimpulan

Penelitian menunjukkan bahwa zeolit dan karbon aktif sama-sama memiliki kemampuan yang baik dalam menyisihkan amonium (NH_4^+) dan ortofosfat (PO_4^{3-}) pada skala laboratorium, namun zeolit menunjukkan performa yang lebih unggul berdasarkan efisiensi penyisihan dan kecocokan model isoterm. Zeolit dengan struktur kristalin berpori dan rasio Si/Al yang sesuai mampu menyisihkan ortofosfat hingga 67,50% pada pH 4 dan amonium hingga 79,71% pada pH 8 dengan dosis optimal 0,3 g dan karakter adsorpsinya paling cocok dengan isoterm Freundlich dengan $R^2 = 0,9859$ untuk PO_4^{3-} dan 0,9244 untuk NH_4^+ yang menandakan permukaan heterogen dan adsorpsi multilayer. Karbon aktif menunjukkan struktur amorf berporositas tinggi dan mampu menghilangkan ortofosfat hingga 72,04% pada pH 4 dengan dosis optimal 0,4 g namun kemampuan menghilangkan amonium jauh lebih rendah dimana % penyisihan maksimum 23,67% pada dosis 0,3 g dan pH 8. Adsorpsi ortofosfat oleh karbon aktif mengikuti isoterm Freundlich dengan $R^2=0,8596$ sementara adsorpsi amonium paling sesuai dengan isoterm tenkim dengan $R^2=0,9775$ yang menunjukkan pengaruh distribusi energi permukaan. Secara keseluruhan, kedua material layak dipertimbangkan untuk aplikasi *sediment capping* namun zeolit lebih direkomendasikan untuk penanganan nutrien pada kondisi danau seperti Danau Batur.

5. Ucapan Terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada BRIN (Badan riset dan inovasi Nasional) Tahun 2023 - 2025 atas dukungan penitian dana riset terkait bahan dan alat penelitian dalam kontrak SK Nomor 3/III.5/HK/2025.

6. Daftar Pustaka

- [1] I. N. Radiarta and S. L. Sagala, "Model spasial tingkat kesuburan perairan di Danau Batur Kabupaten Bangli Provinsi Bali dengan aplikasi sistem informasi geografis," *Jurnal Riset Akuakultur*, vol. 7, no. 3, pp. 499–508, 2012, doi: 10.15578/jra.7.3.2012.499-508.
- [2] A. Sunaryani, A. B. Santoso, P. Soewondo, Suharyanto, A. Imananda, and I. F. Sani, "Eutrophication in Lake Batur: Current status and management strategies," *E3S Web of Conferences*, vol. 485, Art. no. 03013, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202448503013.
- [3] S. Defeo, M. W. Beutel, N. Rodal-Morales, and M. Singer, "Sediment release of nutrients and metals from two contrasting eutrophic California reservoirs under oxic, hypoxic and anoxic conditions," *Frontiers in Water*, vol. 6, Art. no. 1474057, 2024.
- [4] K. Kowalczevska-Madura, R. Dondajewska-Pielka, and R. Goldyn, "The assessment of external and internal nutrient loading as a basis for lake management," *Water*, vol. 14, no. 18, Art. no. 2844, 2022.
- [5] P. A. Wiradana, I. K. W. Yudha, and A. T. Mukti, "Mass tilapia (*Oreochromis mossambicus*) mortality in floating net cages at Batur Lake, Bangli Regency, Bali Province: A case report," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1036, no. 1, Art. no. 012068, 2022.
- [6] B. W. Gu, C. G. Lee, T. G. Lee, and S. J. Park, "Evaluation of sediment capping with activated carbon and nonwoven fabric mat to interrupt nutrient release from lake sediments," *Science of the Total Environment*, vols. 599–600, pp. 413–421, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.212.
- [7] Y. Zhan, Y. Yu, J. Lin, X. Wu, Y. Wang, and Y. Zhao, "Simultaneous control of nitrogen and phosphorus release from sediments using iron-modified zeolite as capping and amendment materials," *Journal of Environmental Management*, vol. 249, Art. no. 109369, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109369.
- [8] A. S. Knox, M. H. Paller, and K. L. Dixon, "Evaluation of active cap materials for metal retention in sediments," *Remediation Journal*, vol. 24, pp. 49–69, 2014, doi: 10.1002/rem.21394.
- [9] M. Zamparas, Y. Deligiannakis, and I. Zacharias, "Phosphate adsorption from natural waters and evaluation of sediment capping using modified clays," *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, nos. 13–15, pp. 2895–2902, 2013, doi: 10.1080/19443994.2012.748139.
- [10] H.-J. Cui, M. K. Wang, M.-L. Fu, and E. Ci, "Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar," *Journal of Soils and Sediments*, vol. 11, no. 7, pp. 1135–1141, 2011, doi: 10.1007/s11368-011-0405-9.
- [11] I. Leusbroek, S. J. Metz, G. Rexwinkel, and G. F. Versteeg, "The solubilities of phosphate and sulfate salts in supercritical water," *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 54, no. 1, pp. 1–8, 2010, doi: 10.1016/j.supflu.2010.03.003.

-
- [12] H. Huang, X. Xiao, B. Yan, and L. Yang, "Ammonium removal from aqueous solutions by using natural Chinese (Chende) zeolite as adsorbent," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 175, nos. 1–3, pp. 247–252, 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.09.156.
 - [13] M. Pan, M. Zhang, X. Zou, X. Zhao, T. Deng, T. Chen, and X. Huang, "The investigation into the adsorption removal of ammonium by natural and modified zeolites: kinetics, isotherms, and thermodynamics," *Water SA*, vol. 45, no. 4, pp. 648–656, 2019.
 - [14] T. Fan, M. Wang, X. Wang, Y. Chen, S. Wang, H. Zhan, X. Chen, A. Lu, and S. Zha, "Experimental study of the adsorption of nitrogen and phosphorus by natural clay minerals," *Adsorption Science & Technology*, vol. 2021, Art. no. 4158151, 2021, doi: 10.1155/2021/4158151.
 - [15] L. Sirajo and M. A. A. Zaini, "Iron-loaded coconut shell-activated carbons for orthophosphate adsorption," *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023.
 - [16] P. Liu, A. Zhang, Y. Liu, Z. Liu, X. Liu, L. Yang, and Z. Yang, "Adsorption mechanism of high-concentration ammonium by Chinese natural zeolite with experimental optimization and theoretical computation," *Water*, vol. 14, no. 15, Art. no. 2413, 2022.
 - [17] O. Sedaghat, N. Bahramifar, and H. Younesi, "Ammonium ion adsorption from aqueous solutions by using modified activated carbon derived from rice straw," 2023.
 - [18] A. A. Halim, M. T. Latif, and A. Ithnin, "Ammonia removal from aqueous solution using organic acid modified activated carbon," *World Applied Sciences Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 1–6, 2013.
 - [19] B. Han, C. Butterly, W. Zhang, J. Z. He, and D. Chen, "Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 283, Art. no. 124611, 2021.