

Pengaruh Pemberian Karboksimetil Kitosan (KMK) Dalam Upaya Penurunan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) pada Kerang Hijau (*Perna viridis* Linn.) dari Perairan Teluk Lamong Surabaya

A. Firdaus dan Anurohlim

Departemen Biologi, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

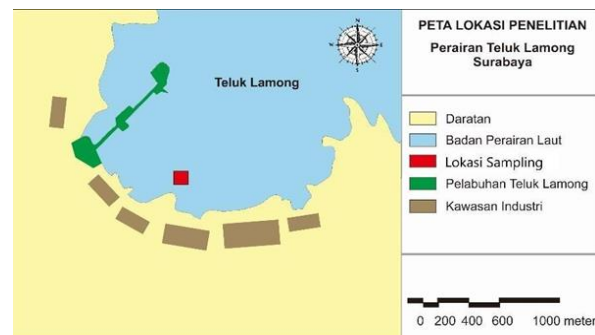
e-mail: firdausamelia7@gmail.com

Abstrak—*Perna viridis* adalah salah satu komoditas perikanan non-ikan yang sudah lama dikenal dan banyak ditemukan di perairan Teluk Lamong Surabaya yang memiliki kemampuan dalam mengakumulasi logam berat kadmium sehingga beresiko sangat dikonsumsi oleh manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi logam kadmium *P. viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya sebelum dan setelah paparan KMK pada konsentrasi KMK dan waktu perendaman yang memberikan pengaruh tertinggi terhadap penurunan konsentrasi logam kadmium sehingga dapat memperoleh nilai *Acceptable Daily Intake* (ADI) yang lebih baik. Metode diawali dengan sampling *P. viridis* di perairan Teluk Lamong Surabaya, kemudian dilakukan perendaman *P. viridis* menggunakan KMK yang telah disintesis dengan konsentrasi KMK dan waktu perendaman yang bervariasi lalu diukur konsentrasi awal logam berat kadmium dan konsentrasi akhir logam berat kadmium setelah paparan dengan KMK. Parameter pengamatan pada penelitian ini meliputi analisis konsentrasi logam berat kadmium menggunakan ICP-OES serta perhitungan kapasitas adsorpsi KMK dan nilai *Acceptable Daily Intake*. Rancangan yang digunakan adalah RAL kemudian dianalisis menggunakan uji Friedman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata konsentrasi logam berat kadmium awal *P. viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya adalah sebesar 14,4180 ppm. Konsentrasi KMK dan waktu perendaman yang memberikan pengaruh penurunan paling tinggi terhadap konsentrasi kadmium pada *Perna viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya adalah konsentrasi KMK 20 ppm dengan waktu perendaman 120 menit. Perlakuan ini memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 0,10 mg/L dan menurunkan konsentrasi kadmium hingga 1,4860 ppm atau mengalami penurunan konsentrasi kadmium sebesar 89,6%. Batas konsumsi harian maksimum *Perna viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya yang dapat dikonsumsi per harinya (dalam berat basah) adalah 408,9 gr/kg berat badan/hari untuk manusia dengan berat badan 60 kg. Batas ini setara dengan konsumsi 74 ekor kerang hijau per hari dengan penambahan KMK sebanyak 20 mg yang dilarutkan dalam 1 liter air (20 ppm) dan direndam selama 120 menit.

Kata Kunci—Kadmium, Karboksimetil Kitosan, *P. Viridis*.

I. PENDAHULUAN

TELUK Lamong Surabaya merupakan muara dari beberapa sungai yang mengalir dari Kota Surabaya, selain itu daerah ini merupakan pusat aktivitas perkapalan dan pelabuhan [1]. Perairan Teluk Lamong juga merupakan daerah penting bagi nelayan sekitar karena telah lama dijadikan sebagai area penangkapan hasil laut, namun pembangunan industri di daerah



Gambar 1. Peta lokasi sampling *P. viridis* di perairan Teluk Lamong Surabaya.

tersebut menyebabkan adanya pencemaran lingkungan. Pengawasan kualitas lingkungan suatu perairan, logam berat merupakan salah satu parameter penting untuk melihat tingkat pencemarannya [2]. Salah satu teknik monitoring pencemaran di lingkungan perairan adalah analisis kandungan logam berat yang terakumulasi di dalam biota air di perairan tersebut.

Kadmium sebagai salah satu logam berat non esensial yang bersifat toksik seringkali ditemukan terakumulasi pada makhluk hidup. Konsumsi terhadap biota perairan yang terkontaminasi logam Cd di atas ambang batas dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Kerang dapat digunakan sebagai indikator yang baik dalam memonitor suatu pencemaran logam berat salah satunya kadmium disebabkan oleh sifat mobilitasnya yang rendah sehingga relatif menetap dalam suatu habitat tertentu (*sessile*), memiliki cara makan yang *filter feeder* sehingga zat makanan dalam sedimen dan air akan langsung tersaring ke dalam tubuh kerang serta mempunyai toleransi yang besar terhadap perubahan lingkungan serta mampu bertahan hidup meskipun mengakumulasi polutan logam berat [3]. Kerang hijau (*Perna viridis* Linn.) merupakan salah satu komoditas perikanan non-ikan yang sudah lama dikenal dan dewasa ini kerang jenis tersebut telah banyak dibudidayakan untuk konsumsi [4].

Salah satu upaya menurunkan kadar logam berat pada daging kerang hijau yaitu dengan merendam daging kerang tersebut dalam larutan Na_2CaEDTA (dinatrium kalsium etilen diamin tetra-asetat) dan kitosan karena kedua zat ini mempunyai kemampuan untuk mengikat ion logam berat dan menariknya keluar jaringan [4]. Saat ini telah banyak dikembangkan karboksimetil kitosan (KMK) yang mempunyai keistimewaan dapat larut dalam air, bersifat *biodegradable*, *biocompatible*,

tidak beracun, dan hidrofilik serta mampu menjadi adsorben untuk logam berat [4]. Penelitian ini menggunakan kitosan yang berasal dari kulit udang windu (*Penaeus monodon*) yang kemudian dimodifikasi menjadi karboksimetil kitosan. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi logam kadmium *P. viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya sebelum dan setelah paparan KMK pada komposisi KMK dan waktu perendaman yang memberikan pengaruh tertinggi terhadap penurunan konsentrasi logam kadmium sehingga dapat memperoleh nilai *Acceptable Daily Intake* (ADI) yang lebih baik.

II. METODOLOGI

A. Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari 2019 hingga April 2019, meliputi kegiatan sampling *P. viridis* di laksanakan di perairan Teluk Lamong Surabaya. Kegiatan uji pengaruh komposisi KMK dan waktu perendaman terhadap *P. viridis* serta proses destruksi basah untuk uji logam berat *P. viridis* dilakukan di laboratorium Zoologi dan Rekayasa Hewan Departemen Biologi, Fakultas Sains, ITS Surabaya. Analisis kandungan logam berat kadmium *P. viridis* dilakukan di Laboratorium Lingkungan dan Energi, Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), ITS Surabaya.

B. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini yakni perahu motor, coolbox, beaker glass, wadah perendaman, oven MEMMERT, gelas ukur, pipet tetes, erlenmeyer, pengaduk, kaca arloji, kertas saring, neraca analitik, botol sampel, hotplate, mortar, alu dan ICP-OES PRODIGY 7. Sedangkan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu *P. viridis*, aquabidest, bubuk kitosan dari kulit *P. monodon*, asam asetat 2%, NaOH 40%, sodium kloroasetat, asam asetat 5%, etanol 75%, HNO₃ 5%, HNO₃ 65% dan H₂O₂ 30%.

C. Cara Kerja

1) Sampling *P. viridis*

Sampling *P. viridis* dilakukan melalui survei jelajah (*free-hand sampling*) dengan menggunakan metode *hand-collecting* [5] dari perairan Teluk Lamong Surabaya. Posisi lokasi sampling *P. viridis* di perairan Teluk Lamong Surabaya terletak pada koordinat 7°13.165'S 112°40.963'E pada kedalaman 1,5 meter diatas permukaan laut (Gambar 1). Pencatatan lokasi sampling dilakukan dengan bantuan GPS. Sampel kerang diambil pada satu titik.

Selanjutnya sampel yang telah diambil dari lokasi dimasukkan (dikomposit) kedalam coolbox sebelum dianalisis di laboratorium untuk proses selanjutnya. Lalu, *P. viridis* dibersihkan dengan air mengalir dan dilakukan penyortiran berdasarkan ukuran panjang cangkangnya. Kriteria *P. viridis* yang gunakan sebagai objek uji didasarkan atas ukuran cangkang sebesar ± 5-6 cm sebanyak 390 individu kerang hijau. Pengambilan *P. viridis* pada ukuran tersebut dikarenakan *P. viridis* berada pada fase dewasanya saat memiliki ukuran panjang 4-6 cm dengan lebar yang biasanya setengah dari ukuran panjangnya serta ukuran 5-6 cm adalah ukuran *P. viridis* yang siap panen (*commercial harvesting*) dan siap konsumsi [6]

ditambah lagi ukuran tersebut merupakan ukuran kerang hijau terbesar yang ditemukan di perairan Teluk Lamong Surabaya.

2) Pembuatan Karboksimetil Kitosan (KMK)

Karboksimetil kitosan dibuat dengan cara melarutkan 30 gram bubuk kitosan dengan 100 ml asam asetat 2%, yang ditambahkan 13,5 gram NaOH 40% dalam gelas beaker 500 ml. Bubuk kitosan yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan kitosan yang berasal dari kulit udang windu (*Penaeus monodon*). Campuran yang telah dibuat kemudian dipanaskan diatas hotplate dengan suhu 50°C selama 1 jam, hingga terbentuk endapan. Endapan disaring menggunakan kertas saring Whatman dengan pore size 16µm kemudian ditambahkan sodium kloroasetat sebanyak 30 gram. Lalu, campuran dikeringkan dalam oven dengan suhu 60°C selama 3 jam. Campuran tersebut kemudian dinetralkan dengan larutan asam asetat 5% sebanyak 30 ml, lalu dituangkan kedalam larutan etanol 75% sebanyak 200 ml. Setelah itu, campuran tersebut dikeringkan dalam oven dengan suhu 70°C selama 2 jam [7].

20 mg bubuk KMK yang telah kering kemudian dilarutkan dalam 1000 ml aquabidest hingga diperoleh larutan stok KMK dengan konsentrasi 20 ppm sebanyak 1000ml / 1 liter. Kemudian, larutan stok tersebut diencerkan hingga diperoleh larutan KMK dengan konsentrasi 15 ppm dan 10 ppm [8].

3) Persiapan Uji Logam Berat Kadmium Pada *P. viridis*

Analisis kadar logam kadmium dilakukan dengan preparasi sampel menggunakan teknik destruksi basah menggunakan HNO₃ dan H₂O₂. Daging *P. viridis* dihaluskan hingga homogen menggunakan mortar dan alu. Selanjutnya daging *P. viridis* dikeringkan dengan oven pada suhu 70°C selama 48 jam [9]. Kemudian daging *P. viridis* kering digerus menggunakan mortar dan alu dan disaring menggunakan kertas saring Whatman dengan pore size 16µm [9]. Kertas saring yang digunakan, sebelumnya dikeringkan pada suhu 100°C selama 15 menit [10]. Lalu sampel halus ditimbang sebanyak ± 2 gram dan dimasukkan ke dalam gelas kimia, kemudian didestruksi menggunakan 20 mL HNO₃ 65% dan 10 mL H₂O₂ 30%, kemudian diuapkan diatas hotplate pada suhu 60-70°C selama kurang lebih selama 2-3 jam hingga terdapat endapan. Endapan tersebut ditempatkan pada erlenmeyer 50 mL dan ditambahkan HNO₃ 5% sampai tanda batas. Filtrat contoh uji siap diukur ke dalam ICP-OES [9].

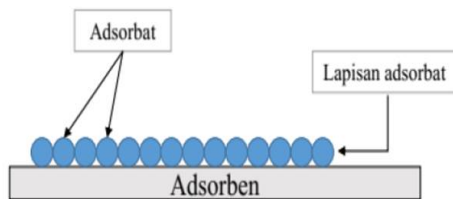
4) Perlakuan penelitian

Perlakuan pada penelitian ini menggunakan 4 macam komposisi KMK dan 3 macam waktu perendaman, yakni diantaranya :

- A1B1 : komposisi KMK 0 ppm dan waktu perendaman 40 menit
- A1B2 : komposisi KMK 0 ppm dan waktu perendaman 80 menit
- A1B3 : komposisi KMK 0 ppm dan waktu perendaman 120 menit
- A2B1 : komposisi KMK 10 ppm dan waktu perendaman 40 menit
- A2B2 : komposisi KMK 10 ppm dan waktu perendaman 80 menit
- A2B3 : komposisi KMK 10 ppm dan waktu perendaman 120 menit
- A3B1 : komposisi KMK 15 ppm dan waktu perendaman 40 menit
- A3B2 : komposisi KMK 15 ppm dan waktu perendaman 80 menit
- A3B3 : komposisi KMK 15 ppm dan waktu perendaman 120 menit
- A4B1 : komposisi KMK 20 ppm dan waktu perendaman 40 menit
- A4B2 : komposisi KMK 20 ppm dan waktu perendaman 80 menit
- A4B3 : komposisi KMK 20 ppm dan waktu perendaman 120 menit

Perlakuan diawali dengan membersihkan *P. viridis* hasil sampling kemudian daging *P. viridis* dilepas dari cangkangnya dengan cara direbus menggunakan 200ml akuades hingga

akuades mendidih (100°C) [11] serta ditimbang berat dagingnya. Setelah itu, daging *P. viridis* direndam pada konsentrasi KMK 0 ppm KMK 10 ppm, 15 ppm dan 20 ppm sebanyak 150ml pada 3 macam waktu perendaman yang berbeda yaitu selama 40, 80 dan 120 menit [8]. Cara perendaman yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan model adsorpsi Isoterm Langmuir [12].



Gambar 2. Model adsorpsi isoterm Langmuir [12].

D. Analisis Kadar Logam Berat Kadmium *P. viridis*

Analisis kadar logam berat Cd pada *P. viridis* dilakukan di awal sebelum pemberian KMK dan setelah pemberian KMK dengan masing - masing jumlah *P. viridis* yang digunakan untuk analisis 10 ekor/ulangan. Perhitungan kadar logam berat kadmium pada *Perna viridis* menggunakan rumus sesuai [13], sebagai berikut

$$\text{Kadar Logam Cd (ppm)} = \frac{X (\text{ppm}) \times Y (\text{ml})}{Z (\text{mg})}$$

Keterangan :

X : Hasil pengukuran kadar Cd dari ICP (ppm)

Y : Volume akhir sampel (mL)

Z : Berat sampel (mg)

Hasil analisis logam berat dalam daging *P. viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 7387 : 2009 mengenai Batas Maksimum Cemar Logam Berat dalam Pangan untuk kandungan Cd pada daging kekerangan (bivalvia) moluska dan teripang sebesar 1 ppm [14].

E. Kapasitas Adsorpsi Karboksimetil Kitosan

Kapasitas adsorpsi KMK terhadap kadar logam berat kadmium dihitung dengan persamaan Langmuir sebagai berikut: [12]

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}$$

Keterangan :

q : Kapasitas adsorpsi KMK (gr/L)

C₀ : Konsentrasi awal logam berat kadmium (ppm)

C_e : Konsentrasi akhir logam berat kadmium (ppm)

V : Volume larutan (L)

m : Massa adsorben (mg)

F. Nilai Acceptable Daily Intake (ADI)

Untuk penentuan batas konsumsi harian (*Acceptable Daily Intake* - ADI) dilakukan perhitungan berdasarkan aturan FAO/WHO, dengan rumus sebagai berikut: [15]

$$\begin{aligned} \text{Batas Konsumsi Harian} \\ = \text{Konsentrasi Cd } P. \text{viridis} \\ \times \text{Berat Badan} \end{aligned}$$

Keterangan :

Batas konsumsi harian *P. viridis* (gr/kg berat badan/hari)

Konsentrasi Cd *P. viridis* (ppm)

Berat badan diestimasikan sebesar 60 kg/individu (estimasi berat badan orang dewasa untuk wilayah Asia)

$$\text{Acceptable Daily Intake} = \frac{\text{Standar Intake Cd}}{\text{Konsentrasi Cd } P. \text{viridis}}$$

Keterangan :

Acceptable Daily Intake (ekor *P. viridis*/hari) [15]

Standar intake Cd berdasar (FAO/WHO) sebesar 0,15mg/kg berat badan/hari

Konsentrasi Cd *P. viridis* (ppm)

1) Rancangan Penelitian dan Analisis Data

Rancangan yang digunakan adalah RAL dengan dua faktor yang terdiri dari komposisi KMK dan waktu perendaman yang berbeda-beda untuk *P. viridis*. Data yang diperoleh dianalisis dengan ANOVA *two way* ($\alpha=0,05$) jika data konsentrasi logam Cd *P. viridis* terdistribusi normal. Selanjutnya, apabila hasil yang didapat dari uji ANOVA *two way* menunjukkan adanya pengaruh yang nyata atau signifikan maka dilanjutkan dengan uji jarak berganda Duncan (*Duncan's Multiple Range Test* - DMRT). Data yang diperoleh dianalisis dengan uji Friedman ($\alpha=0,05$) jika data konsentrasi logam Cd *P. viridis* tidak terdistribusi normal. Selanjutnya, apabila hasil yang didapat dari uji Friedman menunjukkan adanya pengaruh yang nyata atau signifikan maka dilanjutkan dengan uji beda nyata terkecil (*Least Significant Difference* - LSD) [16].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kadar Logam Berat Kadmium Pada *P. viridis*

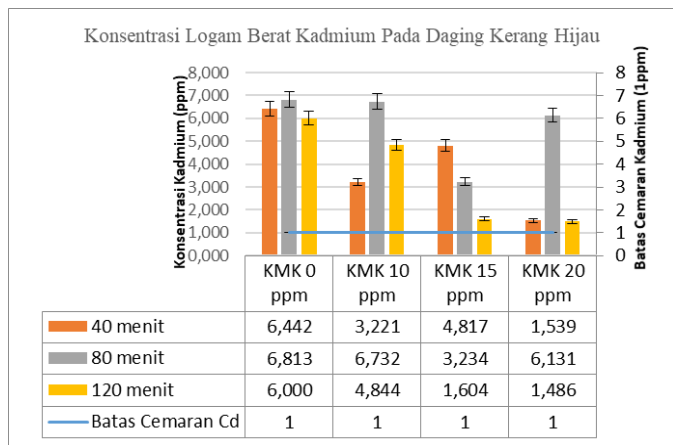
P. viridis yang digunakan dalam penelitian ini memiliki panjang rata-rata 5,30 cm ; lebar rata-rata 2,55 cm dan berat rata-rata 1,17 gram. Dalam penelitian ini menggunakan *P. viridis* sejumlah 390 ekor dengan masing-masing 10 ekor/ulangan. Hasil uji konsentrasi kadmium awal pada *P. viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya pada penelitian ini sebesar 14,4180 ppm. Pengujian konsentrasi kadmium awal pada *P. viridis* dimaksudkan untuk membandingkan perubahan konsentrasi kadmium setelah dilakukan paparan pemberian karboksimetil kitosan (KMK) dan waktu perendaman yang bervariasi. (Tabel 1)

Tabel 1. Hasil uji homogenitas ukuran cangkang pada *P. viridis*

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	—	0,006
Levene	2,31	0,076

Nilai uji homogenitas untuk ukuran cangkang dengan menggunakan data panjang cangkang menunjukkan bahwa P-hitung > 0,05, yang menandakan bahwa distribusi individu-individu *P. viridis* hasil sampling dari perairan Teluk Lamong Surabaya dianggap sama atau homogen, sehingga uji pengaruh karboksimetil kitosan (KMK) terhadap konsentrasi kadmium pada *P. viridis* dapat dilanjutkan. (Tabel 1)

Hasil analisis laboratorium pada keempat perlakuan kombinasi antara komposisi KMK dan waktu perendaman untuk parameter kandungan terlarut kadmium pada *P. viridis* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik pengaruh perlakuan terhadap konsentrasi logam berat kadmium *P. viridis*.

Gambar 3. menunjukkan terdapat perbedaan nilai konsentrasi kadmium dalam daging *P. viridis* pada setiap perlakuan. Grafik tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium tertinggi pada *P. viridis* setelah perlakuan ditemukan pada konsentrasi KMK 10 ppm dan waktu perendaman 80 menit yaitu sebesar 6,7320 ppm sedangkan konsentrasi kadmium terendah pada *P. viridis* setelah perlakuan terdapat pada konsentrasi KMK 20 ppm dan waktu perendaman 120 menit yaitu sebesar 1,4860 ppm. Konsentrasi kadmium tersebut masih lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan kontrol yaitu perendaman dengan aquabidest yang memiliki rata-rata konsentrasi kadmium sebesar 6,418 ppm. Semua konsentrasi kadmium dari hasil perlakuan menunjukkan nilai yang masih lebih tinggi dibandingkan dengan Batas Maksimum Cemar Kadmium dalam Pangan menurut SNI 7387 Tahun 2009 pada daging kekerangan (bivalvia) moluska dan teripang yang memiliki nilai sebesar 1 ppm [14]. Hal ini berarti konsentrasi logam kadmium dalam daging *P. viridis*, meskipun telah diperlakukan dengan pemberian KMK, masih diatas baku mutu yang disyaratkan.

Konsentrasi logam kadmium dalam *P. viridis* yang telah di atas baku mutu diduga disebabkan telah tercemarnya habitat kerang hijau oleh logam kadmium sehingga akumulasi logam dalam jaringan kerang telah sedemikian tinggi. Selain itu tingginya kadar logam kadmium dalam daging *P. viridis* dimungkinkan karena umur kerang hijau yang terambil telah masuk fase dewasa dengan dilihat dari ukuran cangkangnya yang mencapai 5 – 6 cm *P. viridis* telah masuk fase dewasa dan matang gonad rata-rata memiliki ukuran cangkang sebesar 3 cm hingga pertumbuhan maksimalnya [17]. Semakin tinggi usia *P. viridis*, semakin akan meningkat kandungan logam berat pada organ tubuh daging, hepatopankreas dan insang kerang hijau [18]. Oleh karena itu semakin tua *P. viridis*, logam kadmium yang terakumulasi pada tubuh kerang hijau juga semakin bertambah.

Menurut [19] sumber-sumber logam berat kadmium di pesisir dan laut, berasal dari sumber yang bersifat alami dari lapisan kulit bumi seperti masukan dari daerah pantai yang berasal dari sungai-sungai dan abrasi pantai akibat aktivitas gelombang, masukan dari laut dalam yang berasal dari aktivitas geologi gunung berapi laut dalam, dan masukan dari udara yang berasal dari atmosfer sebagai partikel-partikel debu. Logam berat kadmium juga dapat berasal dari aktifitas manusia, seperti limbah pasar dan limbah rumah tangga, aktivitas transportasi

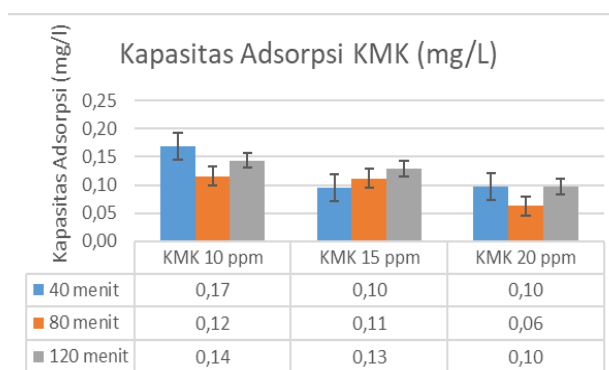
laut dan aktivitas perbaikan kapal laut. Diduga bahwa aktivitas penduduk di dekat perairan Teluk Lamong Surabaya menyumbangkan mayoritas logam ini dalam perairan seperti transportasi laut, perbaikan perahu nelayan, sampah rumah tangga, emisi industri dan peleburan Zn dan Pb. Hal ini juga dibuktikan dalam penelitian [1] dimana bioakumulasi logam Cd pada bivalvia (*Anadara nodifera*, *Meretrix lyrata*, dan *Solen lamarckii*) di perairan pesisir Madura sebelah barat memiliki rata-rata kandungan Cd sebesar 2,88 – 8,07 mg/kg dimana hal ini kemungkinan disebabkan karena perairan pesisir Madura sebelah barat berdekatan dengan muara Sungai Kalimas dan Teluk Lamong Surabaya yang merupakan muara dari beberapa sungai yang mengalir dari Kota Surabaya, perairan ini juga merupakan pusat aktivitas perkapalan.

Nilai konsentrasi kadmium pada *P. viridis* memiliki pola grafik yang berbeda pada setiap perlakuan. Pada perlakuan kontrol, KMK 10 ppm dan KMK 20 ppm, perendaman dengan waktu 80 menit menghasilkan nilai konsentrasi kadmium yang lebih tinggi dibanding dengan waktu perendaman 40 menit dan 120 menit. Pada prinsipnya, penelitian dalam skala laboratorium ini diharapkan konsentrasi kadmium pada *P. viridis* mengalami penurunan seiring dengan penambahan konsentrasi KMK yang semakin tinggi dan waktu perendaman yang semakin pendek. Namun, berdasarkan pengamatan yang dilakukan menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium pada *P. viridis* cenderung lebih rendah pada waktu perendaman 40 dan 120 menit dibandingkan waktu perendaman 80 menit.

Sementara itu pada perlakuan KMK 15 ppm menunjukkan pola penurunan seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Konsentrasi pada waktu kontak di bawah 120 menit (40 menit dan 80 menit) menunjukkan konsentrasi kadmium yang lebih tinggi, hal ini diduga karena belum terjadinya kesetimbangan antara adsorbat yang dijerap oleh adsorben karboksimetil kitosan dengan jumlah yang tersisa dalam larutan [20]. Pada waktu kontak 120 menit telah terjadi kesetimbangan adsorpsi antara konsentrasi adsorbat yang dijerap dengan konsentrasi adsorbat yang tersisa dalam larutan. Setelah tercapainya kesetimbangan adsorpsi, konsentrasi kadmium menunjukkan konsentrasi yang lebih rendah, ini disebabkan sudah terpenuhinya gugus aktif pada permukaan adsorben sehingga peluang untuk terjadinya ikatan antara Cd(II) dengan situs aktif menjadi kecil [20].

Berdasarkan uji normalitas, pada penelitian ini terjadi ketidaknormalan distribusi data konsentrasi kadmium pada *P. viridis*, sehingga analisis data pada penelitian ini tidak dapat dilakukan menggunakan uji parametrik berupa uji ANOVA dua-arah (*ANOVA Two-Way*). Untuk mengetahui perbedaan konsentrasi kadmium dari pengaruh ketiga komposisi KMK dan ketiga waktu perendaman, maka dilakukan dengan menggunakan jenis uji non-parametrik menggunakan uji Friedman.

Pada hasil uji Friedman terlihat bahwa rata-rata konsentrasi kadmium pada konsentrasi 10 ppm sebesar 4,284 ppm ; pada konsentrasi 15 ppm sebesar 1,604 ppm dan konsentrasi 20 ppm sebesar 2,044 ppm. Pada uji Friedman terlihat bahwa besaran nilai *Chi Square* = 2,67 dan *asym sig* = 0,264. Hasil uji signifikansi *Chi Square* menunjukkan bahwa *asym sig* > 0.05 sehingga dapat disimpulkan bahwa tiga komposisi KMK yang diberikan tidak memberikan efek perbedaan konsentrasi kadmium yang signifikan *P. viridis*. Dari hasil ranking



Gambar 4. Grafik hubungan antara konsentrasi KMK terhadap kapasitas adsorpsi kadmium pada *P. viridis*.

diketahui bahwa konsentrasi KMK 20 ppm mendapat respon paling tinggi dalam penurunan konsentrasi kadmium, kemudian konsentrasi KMK 15 ppm dan terakhir konsentrasi KMK 10 ppm.

Pada hasil uji Friedman terlihat bahwa rata-rata konsentrasi kadmium pada waktu perendaman 120 menit sebesar 3,216 ppm ; kemudian pada waktu perendaman 40 menit sebesar 3,321 ppm dan waktu perendaman 80 menit sebesar 5,119 ppm. Pada uji Friedman terlihat bahwa besaran nilai *Chi Square* = 4,50 dan *asympt sig* = 0,105. Hasil uji signifikansi *Chi Square* menunjukkan bahwa *asympt sig* > 0,05 sehingga dapat disimpulkan bahwa tiga jenis waktu perendaman yang diberikan memberikan konsentrasi kadmium yang tidak berbeda secara signifikan pada *P. viridis*. Dari hasil ranking diketahui bahwa konsentrasi waktu perendaman 120 menit mendapat respon paling tinggi dalam penurunan konsentrasi kadmium, disusul waktu perendaman 40 menit, kemudian terakhir waktu perendaman 80 menit.

Dari hasil uji Friedman pada faktor komposisi KMK dan waktu perendaman dapat disimpulkan bahwa komposisi KMK dan waktu perendaman yang dilakukan tidak memberikan konsentrasi kadmium yang berbeda pada *P. viridis* dikarenakan memiliki nilai *asympt sig* > 0,05. Oleh karena itu, analisis data pada uji Friedman tidak dapat dilanjutkan dengan uji beda nyata terkecil (*Least Significant Difference* – LSD). Faktor komposisi KMK yang mendapat respon paling tinggi dalam mempengaruhi penurunan konsentrasi kadmium adalah konsentrasi KMK 20 ppm. Faktor waktu perendaman yang mendapat respon paling tinggi dalam mempengaruhi penurunan konsentrasi kadmium adalah waktu perendaman 120 menit.

Kenaikan pH akan menyebabkan turunnya kelarutan logam sehingga logam berat akan cenderung mengendap. pH yang tinggi menyebabkan toksisitas logam mengalami peningkatan [21]. Dari pengukuran pH yang dilakukan pada masing-masing perlakuan menunjukkan adanya penurunan konsentrasi kadmium dalam daging dari pada perlakuan dengan pH 6,7 – 7 (perlakuan dengan KMK 0 ppm dan waktu perendaman 40 menit ; perlakuan dengan KMK 0 ppm dan waktu perendaman 120 menit ; perlakuan dengan KMK 10 ppm dan waktu perendaman 40 menit ; perlakuan dengan KMK 10 ppm dan waktu perendaman 120 menit ; perlakuan dengan 15 ppm dan waktu perendaman 40 menit ; perlakuan dengan 15 ppm dan waktu perendaman 80 menit ; perlakuan dengan KMK 20 ppm dan waktu perendaman 40 menit serta perlakuan dengan KMK 20 ppm dan waktu perendaman 120 menit). Sedangkan untuk

perlakuan dengan pH > 7 (perlakuan dengan KMK 0 ppm dan waktu perendaman 80 menit ; perlakuan dengan KMK 10 ppm dan waktu perendaman 80 menit ; perlakuan dengan KMK 15 ppm dan waktu perendaman 120 menit serta perlakuan dengan KMK 20 ppm dan waktu perendaman 80 menit) diperoleh peningkatan konsentrasi kadmium dalam daging.

Dari uji korelasi *Pearson* antara nilai pH dengan konsentrasi kadmium pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil analisis korelasi sebesar 0,509. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi hubungan yang sedang antara pH dengan konsentrasi kadmium. Artinya, variabel pH masih memiliki hubungan/pengaruh terhadap konsentrasi Cd hanya saja kekuatan korelasinya sedang. Sedangkan arah hubungan adalah positif karena nilai *r* positif, berarti semakin tinggi nilai pH maka semakin meningkatkan pula konsentrasi Cd. Namun dari nilai *P-value* yang didapat (0,091 > 0,05) maka dapat disimpulkan tidak ada hubungan secara signifikan antara pH dengan konsentrasi kadmium.

B. Kapasitas Adsorpsi Karboksimetil Kitosan terhadap Kadar Logam Berat Kadmium pada *P. viridis*

Kapasitas adsorpsi menyatakan banyaknya adsorbat yang mampu terakumulasi pada permukaan adsorben [22]. Kapasitas adsorpsi ditentukan berdasarkan banyaknya zat terlarut yang teradsorpsi oleh setiap gram adsorben pada keadaan jenuh berdasarkan zat terlarut yang teradsorpsi oleh setiap gram adsorben. Faktor-faktor yang mempengaruhi kapasitas adsorpsi antara lain adalah proses penambahan aktivator, waktu kontak, dan pH yang diterapkan [23]. Kapasitas adsorpsi setiap senyawa juga dipengaruhi oleh struktur masing-masing senyawa [22]. Karboksimetil kitosan memiliki selektivitas dan kapasitas adsorpsi yang tinggi sehingga berpotensi untuk penyerapan logam, mudah mengalami biodegradasi dan tidak beracun [24].

Gambar 4. menunjukkan bahwa rata-rata kapasitas adsorpsi kadmium oleh KMK pada konsentrasi 10; 15; dan 20 ppm menunjukkan angka (nilai) yang berbeda. Adsorpsi logam berat kadmium pada daging *P. viridis* yang tertinggi terjadi pada konsentrasi KMK 10 ppm pada waktu perendaman 40 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,17 mg/l. Sementara itu, adsorpsi logam berat kadmium pada daging *P. viridis* yang terendah terjadi pada konsentrasi KMK 20 ppm pada waktu perendaman 80 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,06 mg/l. Pada kondisi ini, diduga permukaan KMK telah jenuh oleh ion-ion logam kadmium (Cd^{2+}) sehingga pada konsentrasi KMK yang lebih besar dari 10 ppm kemampuan KMK untuk menyerap ion kadmium (Cd^{2+}) akan menurun atau dianggap jenuh. Jadi walaupun massa KMK bertambah tapi tidak mempengaruhi terhadap kapasitas adsorpsinya.

Hal diatas dengan desorpsi. Desorpsi adalah proses pelepasan kembali ion yang telah berikatan dengan gugus aktif. Desorpsi ini terjadi karena lemahnya interaksi yang terjadi antara ion kadmium (Cd^{2+}) dengan gugus amina. Gugus amina khususnya nitrogen dalam KMK akan bereaksi dan mengikat logam dari jaringan *P. viridis* yang ada [20].

Kapasitas adsorpsi KMK terhadap logam berat kadmium menurun dengan meningkatnya jumlah massa KMK, fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 3.2. Hal ini terjadi karena pada jumlah massa tinggi terbentuk ikatan hidrogen intermolekul KMK yang akan mengurangi kemungkinan berinteraksi dengan

Tabel 2.
Batas konsumsi harian dan nilai ADI terhadap *P. viridis* dari perairan
Teluk Lamong Surabaya

Konsentrasi KMK (ppm)	Waktu Perendaman (menit)	Batas konsumsi harian kerang hijau (gr/hari)	ADI (individu/hari)
0	40	96	23
	80	89,4	
	120	193,8	
10	40	367,8	33
	80	92,4	
	120	289,2	
15	40	290,4	57
	80	360	
	120	386,4	
20	40	403,8	74
	80	193,2	
	120	408,6	

Keterangan: ADI = *Acceptable Daily Intake*

ion Cd^{2+} [25]. Ada tiga kemungkinan ikatan hidrogen intermolekul yang terjadi pada KMK yaitu ikatan H---N pada gugus amida, H---O pada gugus hidroksil dan H---O pada gugus karboksil [25].

Pengaruh waktu pada proses adsorpsi mempengaruhi kapasitas adsorpsi KMK pada logam berat kadmium pada kerang hijau. Dari data yang diperoleh pada waktu perendaman, kapasitas adsorpsi KMK menurun dengan bertambahnya waktu yang diterapkan untuk berinteraksi dengan ion Cd(II). Hal ini diduga karena semakin lama waktu yang diberikan kepada partikel KMK untuk berinteraksi dengan adsorbat (logam Cd pada *P. viridis*), semakin banyak pula adsorbat yang dapat teradsorpsi pada pori-pori partikel KMK, hingga mencapai waktu tertentu kapasitas adsorpsi KMK akan mencapai titik jenuh / konstan [26].

Kitosan dan produk turunannya, salah satunya karboksimetil kitosan (KMK), bersifat polikationik sehingga dapat mengikat lemak dan logam berat pencemar [27]. Logam berat atau logam lain secara keseluruhan dalam larutan elektrolit merupakan partikel bermuatan positif, sedangkan karboksimetil kitosan adalah polielektrolit bermuatan negatif. Reaksi antara kedua partikel tersebut akan menuju pada arah penghilangan gradient muatan dan berbentuk senyawa produk yang tidak bermuatan [27].

Penentuan pengaruh pH juga merupakan parameter penting untuk menentukan kapasitas adsorpsi yang diperoleh pada KMK terhadap ion logam dalam larutan. Peningkatan pH dapat mengurangi jumlah ion H^+ sehingga meningkatkan kemampuan situs aktif mengikat Cd(II) [20]. Pada perlakuan dengan pH < 7 yaitu perlakuan dengan KMK 10 ppm dan waktu perendaman 40 menit serta perlakuan dengan KMK 10 ppm dan waktu perendaman 120 menit diperoleh kapasitas adsorpsi KMK terhadap logam kadmium paling tinggi.

Pada pH asam hingga netral, konsentrasi H^+ relatif sama dengan OH^- sehingga keberadaan ion H^+ dapat terstabilkan oleh ion OH^- dan situs aktif NH_2 akan lebih optimum berikatan dengan Cd(II). Kondisi ini menyebabkan terjadinya kesetimbangan adsorpsi pada sistem yaitu antar konsentrasi yang tinggal dalam larutan dengan konsentrasi yang diadsorpsi oleh adsorben serta kecepatan adsorpsi sama dengan kecepatan desorpsi [20].

Penurunan kapasitas adsorpsi terjadi pada perlakuan dengan pH menuju basa. Pada perlakuan dengan pH > 7 yaitu perlakuan dengan KMK 10 ppm dan waktu perendaman 80 menit ; perlakuan dengan KMK 15 ppm dan waktu perendaman 120 menit ; serta perlakuan dengan KMK 20 ppm dan waktu perendaman 80 menit terjadi penurunan kapasitas adsorpsi KMK terhadap logam kadmium dibanding kapasitas adsorpsi pada perlakuan dengan pH < 7.

pH yang semakin tinggi memungkinkan konsentrasi OH^- di dalam larutan meningkat dan menambah jumlah basa Lewis yang tersedia di dalam adsorben KMK untuk mengubah Cd(II) menjadi Cd(OH)₂. Ini menyebabkan konsentrasi Cd(II) setelah adsorpsi pada filtrat menurun dan seharusnya berakibat pada kenaikan persentase Cd(II) teradsorpsi. Oleh karena itu dimungkinkan interaksi antara ion Cd(II) dengan ion OH^- dalam larutan akan membentuk kompleks Cd(OH)_x yang stabil. Kompleks ini dapat larut dalam air dan mengurangi jumlah Cd(II) yang akan teradsorpsi oleh karboksimetil kitosan [20].

Dari uji korelasi *Spearman* antara nilai pH dengan kapasitas adsorpsi KMK pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil analisis korelasi sebesar 0,177. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat korelasi positif yang sangat rendah antara pH dengan kapasitas adsorpsi KMK. Arah hubungan adalah positif karena nilai r positif, berarti semakin tinggi nilai pH maka semakin meningkatkan pula kapasitas adsorpsi KMK. Namun dari nilai *P-value* yang didapat (0,648 > 0,05) maka dapat disimpulkan tidak ada hubungan secara signifikan antara pH dengan kapasitas adsorpsi KMK.

Menurut [28], penyerapan logam berat oleh organisme perairan termasuk *P. viridis* dapat melalui dua jalur yaitu pengikatan pada dinding sel (adsorpsi) jika *P. viridis* tersebut dalam keadaan telah mati dan penyerapan logam ke dalam sel (absorpsi) jika kerang hijau tersebut dalam keadaan masih hidup. Pada dinding sel terdapat protein dan polisakarida yang dapat mengikat ion logam, seperti amino, karboksilat, fosfat, sulfhidril, sulfat, dan hidroksil [29]. Logam kadmium yang telah melewati dinding sel melalui penyerapan pasif maka akan masuk ke dalam sel melalui membran sel [30]. Membran sel terbentuk dari dua lapisan lipid (*lipid bilayer*) dan bersifat sukar dilalui (*impermeable*) oleh ion-ion termasuk ion logam berat [31]. Masuknya logam berat melintasi membran sel dapat terjadi jika logam tersebut bersifat lipofilik (mudah larut dalam lemak atau lipid) [32].

C. Nilai Acceptable Daily Intake (ADI) *P. viridis* dari Perairan Teluk Lamong Surabaya

ADI atau batas asupan harian yang diperbolehkan merupakan salah satu mekanisme untuk meminimasi efek logam berat terhadap kesehatan manusia [33]. Dari setiap perlakuan kombinasi antara jenis adsorben dan waktu kontak diperoleh data batas asupan harian seperti tersaji pada Tabel 2.

Menilik informasi dari Tabel 2, diestimasikan bahwa batas konsumsi maksimum kerang hijau yang dapat dikonsumsi per harinya (dalam berat basah) adalah 408,9 gr/kg berat tubuh per hari untuk rata-rata individu dengan berat badan 60 kg. Berat ini setara dengan 74 ekor kerang hijau dengan penambahan karboksimetil kitosan (KMK) 20 mg yang dilarutkan dalam 1 liter air (20 ppm).

Logam berat yang masuk ke dalam tubuh akan terakumulasi dalam tubuh, baik dalam jaringan, darah, tulang maupun gigi.



Gambar 5. Proses membersihkan *Perna viridis* hasil sampling dengan air mengalir lalu dilakukan penyortiran *Perna viridis* sesuai ukuran panjang cangkang.



Gambar 6. Bubuk kitosan dari kulit *Penaeus monodon* yang akan disintesis menjadi karboksimetil kitosan.

Untuk meminimalkan dampak yang ditimbulkan perlu dilakukan pembatasan konsumsi. Batasan ini dapat diperkirakan melalui berat basah maksimum kerang yang dapat dikonsumsi manusia per harinya [34].

Logam kadmium (Cd) akan mengalami proses biotransformasi dan bioakumulasi dalam organisme hidup (tumbuhan, hewan dan manusia [35]. Dalam tubuh biota perairan jumlah logam yang terakumulasi akan terus mengalami peningkatan (biomagnifikasi) dan dalam rantai makanan biota yang tertinggi akan mengalami akumulasi kadmium (Cd) yang lebih banyak [35]. Kadmium dapat terakumulasi dalam tubuh manusia serta baru dapat keluar dari dalam tubuh, dengan waktu tunggu berkisar antara 20-30 tahun lamanya [35]. Efek dalam tubuh pun beragam, mulai dari hipertensi sampai kanker [35].

Kandungan logam berat pada kerang hijau pada perairan Teluk Lamong Surabaya ini cukup membahayakan bagi yang mengkonsumsinya, karena konsentrasi logam berat kadmium yang terukur pada penelitian ini telah melebihi baku mutu yang telah ditentukan oleh berbagai organisasi. BPOM-RI menambahkan untuk logam berat kadmium dalam makanan maksimum 2 mg/kg atau setara 2 ppm. *The Codex Committee on Food Additive and Contaminants* menyatakan nilai maksimum kadmium pada makanan 0,4 mg/kg atau setara 0,4 ppm. Menurut standar Uni Eropa EC No. 466/2001 konsentrasi maksimum kadmium adalah 1 mg/kg atau setara 1 ppm [18].

KMK merupakan bahan yang aman untuk digunakan baik penggunaan dalam bidang biomedis maupun sebagai bahan pangan [36]. Dengan adanya penggunaan KMK, kerang hijau dari Perairan Teluk Lamong Surabaya dapat tetap dikonsumsi dalam batas konsumsi sesuai perhitungan ADI sehingga tidak



Gambar 7. Pengukuran panjang cangkang *Perna viridis* hasil sampling menggunakan jangka sorong (*sketchmark*) untuk homogenisasi ukuran *Perna viridis*.



Gambar 8. Pengukuran kadar logam berat kadmium pada *Perna viridis* menggunakan ICP-OES Prodigy 7.

menimbulkan efek jangka pendek maupun jangka panjang yang merugikan manusia.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa rata-rata konsentrasi logam berat kadmium awal *P. viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya adalah sebesar 14,4180 ppm. Konsentrasi KMK dan waktu perendaman yang memberikan pengaruh penurunan paling tinggi terhadap konsentrasi kadmium pada *Perna viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya adalah konsentrasi KMK 20 ppm dengan waktu perendaman 120 menit. Perlakuan ini memiliki kapasitas adsorpsi sebesar 0,10 mg/L dan menurunkan konsentrasi kadmium hingga 1,4860 ppm atau mengalami penurunan konsentrasi kadmium sebesar 89,6%. Batas konsumsi harian maksimum *Perna viridis* dari perairan Teluk Lamong Surabaya yang dapat dikonsumsi per harinya (dalam berat basah) adalah 408,9 gr/kg berat badan/hari untuk manusia dengan berat badan 60 kg. Batas ini setara dengan konsumsi 74 ekor kerang hijau per hari dengan penambahan KMK sebanyak 20 mg yang dilarutkan dalam 1 liter air (20 ppm) dan direndam selama 120 menit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahyar, D. G. Bengen, and Y. Wardiatno, "Distribution And Bioaccumulation Of Heavy Metals Pb and Cd ON bivalves Anadara nodifera, Meretrix lyrata, and Solen lamarckii in coastal waters OF the West Madura Strait," *J. Ilmu dan Teknol. Kelaut. Trop.*, vol. 9, no. 2, p. 631, Jan. 2018.
- [2] N. Priyanto, D. Dwiyoitno, and F. Ariyani, "Kandungan Logam Berat (Hg, Pb, Cd, dan Cu) Pada Ikan, Air, dan Sedimen Di Waduk Cirata, Jawa Barat," *J. Pascapanen dan Bioteknol. Kelaut. dan Perikan.*, vol.

- 3, no. 1, p. 69, Jun. 2008.
- [3] S. Y. Wulandari, B. Yulianto, G. W. Santosa, and K. Suwartimah, "Kandungan Logam Berat Hg dan Cd dalam Air, Sedimen dan Kerang Darah (*Anadara granosa*) dengan Menggunakan Metode Analisis Pengaktifan Neutron (APN)," *ILMU Kelaut. Indones. J. Mar. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 170–175, Feb. 2012.
- [4] J. T. Murtini, A. D. Kurniawan, and E. N. Dewi, "Pengaruh Waktu Perendaman dan Konsentrasi Karboksimetil Kitosan untuk Menurunkan Kandungan Logam Berat Hg, Cd, Dan Pb Pada Kerang Hijau (*Perna Viridis* Linn.)," *J. Pascapanen dan Bioteknologi Kelaut. dan Perikan.*, vol. 3, no. 1, p. 37, Jun. 2008.
- [5] Aunurohlim, "Etude Comparative et Ecotoxicologique de deux Peuplements de Mangrove Tropicales (L'archipel de Kangean et Surabaya, Indonesie); Recherche d'espèces Macrobenthiques Bioindicatrices des Métaux Lourds," Université de La Rochelle, 2004.
- [6] I. Malik, M. Yusuf, W. Subachri, and Y. Candhika, *Seri Panduan Perikanan Skala Kecil Budidaya Kerang Hijau (Perna viridis)*. Jakarta: WWF-Indonesia, 2015.
- [7] N. Suseno, K. S. Padmawijaya, and C. L. Nico, "Synthesis of Soluble Carboxymethyl Chitosan from Low Molecular Weight of Chitosan," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, 2018.
- [8] B. Hastuti, Mudasir, D. Siswanta, and Triyono, "The Synthesis of Carboxymethyl Chitosan-Pectin Film as Adsorbent for Lead (II) Metal," *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 4, no. 6, pp. 349–353, 2013.
- [9] A. Amriani, B. Hendarto, and A. Hadiyanto, "Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) DAN SENG (Zn) pada Kerang Darah (*Anadara granosa* L.) dan Kerang Bakau (*Polymesoda bengalensis* L.) di Perairan Teluk Kendari," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 9, no. 2, p. 45, Oct. 2012.
- [10] Haryoto and A. Wibowo, "Kinetika Bioakumulasi Logam Berat Kadmium Oleh Fitoplankton *Chlorella* sp. Lingkungan Perairan Laut," *J. Penelit. Sains dan Teknol.*, vol. 5, no. 2, 2004.
- [11] R. Rachmawati, W. F. Ma'ruf, and A. D. Anggo, "Pengaruh Lama Perebusan Kerang Darah (*Anadara granosa*) dengan Arang Aktif Terhadap Pengurangan Kadar Logam Kadmium Dan Kadar Logam Timbal," *J. Pengolah. dan Bioteknologi. Has. Perikan.*, vol. 2, no. 4, pp. 41–50, 2013.
- [12] R. Nafi'ah, "Kinetika adsorpsi Pb(II) dengan Adsorben Arang Aktif dari Sabut Siwalan," *J. Farm. Sains dan Prakt.*, vol. 1, no. 2, pp. 28–37, 2016.
- [13] E. Supriyantini and H. Endrawati, "Kandungan Logam Berat Besi (Fe) Pada Air, Sedimen, Dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Tanjung Emas Semarang," *J. Kelaut. Trop.*, vol. 18, no. 1, Jun. 2015.
- [14] Badan Standarisasi Nasional, "Standar Nasional Indonesia Mengenai Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan," 2009.
- [15] FAO/WHO, "Guidelines for the simple evaluation of dietary exposure to food additives CAC/GL 3-1989 Adopted 1989. Revision 2014 (formerly Guidelines for the Simple Evaluation of Food Additive Intake)," vol. 2014, pp. 1–12, 2014.
- [16] S. Kusrianingrum, *Perancangan Percobaan*. Surabaya: Airlangga University Press, 2012.
- [17] W. Cappenberg, "Beberapa Aspek Biologi Kerang Hijau," *Oseana*, vol. 33, no. 1, pp. 33–40, 2008.
- [18] R. Cordova, "Bioakumulasi Logam Berat Dan Malformasi Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Teluk Jakarta," Institut Pertanian Bogor, 2011.
- [19] D. Rumahlatu, "Konsentrasi Logam Berat Kadmium Pada Air, Sedimen dan *Deadema setosum* (Echinodermata, Echinoidea) di Perairan Pulau Ambon," *Ilmu Kelaut.*, vol. 16, no. 2, pp. 78–85, 2011.
- [20] Darjito, D. Purwonugroho, and Siti, "Kajian Adsorpsi Cd (II) pada Kitosan-Alumina," *Indo. J. Chem.*, vol. 6, no. 3, pp. 238–244, 2006.
- [21] U. Fostner, G. Edward, and W. W. F. Prosi, *Metal Pollution in The Aquatic Environment*, 2nd ed. New York: Springer Verlag Heidelberg, 1983.
- [22] A. Asnawati, R. Kharismaningrum, and A. Novita, "Penentuan Kapasitas Adsorpsi Selulosa Terhadap Rhodamin B Dalam Sistem Dinamis," *J. Kim. Ris.*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [23] A. Puspitasari, N. Sumarni, and Musafira, "Kajian Kapasitas Adsorpsi Arang Kulit Kopi Robusta Teraktivasi ZnCl₂ Terhadap Ion Pb (II)," *Kovalen*, vol. 3, no. 2, pp. 134–141, 2017.
- [24] N. Agustya, L. Destiarti, and A. Z. Titin, "Penentuan Kapasitas Adsorpsi Kitosan Terimobilisasi Ditiuron Terhadap Cd(II)," *JKK*, vol. 4, no. 3, pp. 73–78, 2015.
- [25] M. Erna, A. Emriadi, and A. Syukri, "Karboksimetil Kitosan sebagai Inhibitor Korosi pada Baja Lunak dalam Media Air Gambut," *J. Mat. dan Sains*, vol. 16, no. 2, 2011.
- [26] S. Jasmal and Ramlawati, "Kapasitas Adsorpsi Arang Aktif Ijuk Pohon Aren (*Arenga pinnata*) terhadap Pb²⁺," *J. Sainsmat*, vol. 4, no. 1, pp. 57–66, 2015.
- [27] P. Liliandari and Aunurohlim, "Kecepatan Filtrasi Kerang Hijau *Perna viridis* terhadap *Chaetoceros* sp dalam Media Logam Tercemar Kadmium," *J. Sains Dan Seni Pomits*, vol. 2, no. 2, 2013.
- [28] L. Moreno-Garrido, M. Lubian, and A. M. V. M. Soares, "Influence of Cellular Density on Determination of EC₅₀ in Microalgal Growth Inhibition Tests," *J. Ecotoxicol. Environmental Saf.*, vol. 47, pp. 112–116, 2000.
- [29] N. Das, R. Vimala, and P. Karthika, "Biosorption of Heavy Metal – An Overview," *Indian J. Biotechnol.*, vol. 7, pp. 159–169, 2008.
- [30] Kumar, K. Kishore, M. K. Prasad, G. V. S. Sarma, and R. Murthy, "Biosorption Studies for Removal of Chromium Using Immobilized Marine Alga *Isochrysis galbana*," *Indian J. Mar. Sciene*, vol. 35, pp. 263–267, 2006.
- [31] C. Campbell, "Cadmium – A Priority Pollutant," *J. Env. Chem*, vol. 3, no. 3, pp. 387–388, 2006.
- [32] J. Kimball, *Biologi*. Jakarta: Erlangga, 1998.
- [33] N. Abdulgani, Aunurohlim, and W.I. Anita, "Konsentrasi Kadmium (Cd) pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Surabaya dan Madura," *Berk. Penelit. Hayati*, vol. 4, 2010.
- [34] D. Buwono, "Upaya Penurunan Kandungan Logam Hg (Merkuri) dan Pb (Timbal) pada Kerang Hijau (*Mytilus viridis* Linn) dengan Konsentrasi dan Waktu Perendaman Na₂CaEDTA yang Berbeda," *J. Bionatura*, vol. 7, no. 3, pp. 192–195, 2005.
- [35] F. Istarani and S. P. Ellina, "Studi Dampak Arsen (As) dan Kadmium (Cd) terhadap Penurunan Kualitas Lingkungan," *J. Tek. Pomits*, vol. 3, no. 1, 2014.
- [36] D. Fadly, "Aktivitas Antioksidan Karboksimetil Kitosan Pupa Ulat Sutra (*Bombyx mori* L.) Dan Efeknya Pada Peroksidasi Lipid Human Plasma Secara In Vitro," Institut Pertanian Bogor, 2017.