

PENGARUH KONSENTRASI NaOH DAN WAKTU ELEKTROLISIS TERHADAP KADAR KLOORIN DALAM PRODUKSI SODIUM HIPOKLORIT DARI AIR LAUT

Siti Nur A'ini¹, Ernia Novika Dewi¹, Windi Zamrud¹, Arif Eko Prasetyo²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar, Jl. Tanjung Awar-Awar, Desa Wadung, Kecamatan Jenu, Kabupaten Tuban, 62352, Indonesia

aini08771@gmail.com ; [ernianovika@polinema.ac.id]

ABSTRAK

PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar merupakan PLTU berbahan bakar batu bara berkapasitas 2×350 MW yang memanfaatkan sistem pendingin kondensor dengan air laut. Untuk mencegah pertumbuhan biota laut pada sistem ini, diperlukan injeksi sodium hypochlorite (NaOCl) melalui metode shock dosing. Namun, fluktuasi pasang surut air laut menyebabkan konsentrasi NaOCl menurun, sehingga efektivitasnya berkurang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh elektroda karbon grafit dalam produksi NaOCl dari air laut serta menentukan konsentrasi NaOH dan durasi elektrolisis optimal. Produksi NaOCl dari air laut dimulai dengan pengukuran pH dan konduktivitas, dilanjutkan elektrolisis menggunakan elektroda karbon grafit dengan variasi konsentrasi NaOH (0; 0,5; dan 1 N) dan waktu elektrolisis (10–60 menit). Kadar klorin dianalisis dengan titrasi iodometri. Hasil menunjukkan bahwa elektroda karbon grafit cenderung terdegradasi pada kondisi basa kuat dan suhu tinggi, serta menghasilkan larutan yang keruh. Kondisi optimal diperoleh pada penambahan NaOH 1 N dengan durasi elektrolisis 60 menit, menghasilkan kadar klorin tertinggi sebesar 550,34 mg/L, yang memenuhi kebutuhan aplikasi shock dosing pada sistem pendingin PLTU.

Kata kunci: air laut, elektrolisis, natrium hidroksida, shock dosing, sodium hipoklorit.

ABSTRACT

PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar is a coal-fired PLTU with a capacity of 2×350 MW which utilizes a condenser cooling system with sea water. To prevent the growth of marine biota in this system, sodium hypochlorite (NaOCl) injection is required via the shock dosing method. However, tidal fluctuations in sea water cause the concentration of NaOCl to decrease, so its effectiveness is reduced. This research aims to analyze the effect of graphite carbon electrodes in the production of NaOCl from seawater and determine the optimal NaOH concentration and electrolysis duration. NaOCl production from seawater begins with measuring pH and conductivity, followed by electrolysis using graphite carbon electrodes with variations in NaOH concentration (0; 0.5; and 1 N) and electrolysis time (10–60 minutes). Chlorine levels were analyzed by iodometric titration. The results show that graphite carbon electrodes tend to degrade under strong alkaline conditions and high temperatures, and produce turbid solutions. Optimal conditions were obtained by adding 1 N NaOH with an electrolysis duration of 60 minutes, producing the highest chlorine content of 550.34 mg/L, which met the needs of shock dosing applications in the PLTU cooling system.

Keywords: seawater, electrolysis, sodium hydroxide, shock dosing, sodium hypochlorite.

1. PENDAHULUAN

PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar merupakan salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama dengan kapasitas 2 x 350 MW. Pembangkit ini berlokasi di tepi Laut Jawa pada Semenanjung Awar-Awar, Desa Wadung, Kecamatan Jenu, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur. Ketersediaan air laut menjadi faktor penting dalam operasionalnya, sehingga untuk menjalankan operasi yang efektif dibutuhkan berbagai utilitas pendukung. Salah satu utilitas yang sangat penting, terutama dalam proses pendinginan di dalam kondensor adalah *chlorination plant*. *Chlorination plant* merupakan tempat produksi sodium hipoklorit (NaOCl) yang digunakan sebagai disinfektan untuk melemahkan atau menghambat pertumbuhan biota laut yang berkembang di sepanjang *line* kondensor [1].

Proses *chlorination* dilakukan melalui pengolahan air laut menggunakan metode elektrolisis untuk menghasilkan NaOCl. Dalam proses elektrolisis, air laut dilewatkan di antara anoda dan katoda di dalam *electrolyser* yang terhubung ke sumber arus searah (DC). Selama proses ini, ion klorida (Cl^-) dioksidasi di anoda membentuk gas klorin (Cl_2), sedangkan air mengalami reduksi di katoda menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-). Gas klorin yang terbentuk kemudian bereaksi dengan ion OH^- dalam larutan, membentuk sodium hipoklorit (NaOCl), natrium klorida (NaCl), dan udara (H_2O). Larutan NaOCl yang dihasilkan kemudian diinjeksikan pada aliran masuk *bar screen* dan *Sea Water Supply Pump* (SWSP) untuk mencegah pertumbuhan biota laut seperti ikan, tiram, dan organisme lain yang dapat masuk bersama aliran air laut menuju sistem pendingin. Organisme tersebut berpotensi menempel pada permukaan *pipe line Circulating Water Pump* (CWP) dan *tube condenser*, yang dapat menyebabkan penyumbatan, korosi, serta menurunkan efisiensi perpindahan panas. Oleh karena itu, injeksi NaOCl berfungsi untuk menghambat atau mematikan biota laut, sehingga sistem pendingin tetap bekerja secara optimal dan efisien [2].

Biota laut yang terpapar NaOCl secara kontinyu dengan dosis rendah dapat membentuk sistem kekebalan tubuh terhadap zat tersebut seiring berjalannya waktu. Sehingga, dapat menurunkan efektivitas NaOCl dalam menghambat pertumbuhan dan perkembangan biota laut. Kondisi ini dapat mengakibatkan peningkatan pembentukan *fouling* di dalam kondensor dan saluran air, yang pada akhirnya mengurangi efisiensi transfer panas dan meningkatkan biaya operasional pembangkit. Jika masalah *fouling* ini tidak ditangani dengan baik, kinerja pembangkit secara keseluruhan bisa terganggu. Untuk memastikan pengendalian biota laut yang lebih efektif, maka dibutuhkan penerapan metode *shock dosing* dengan NaOCl, yaitu pemberian dosis tinggi dalam waktu singkat yang bertujuan untuk mengatasi kebal atau resistansi yang terbentuk pada biota laut [3].

Perubahan volume air laut akibat pasang surut merupakan salah satu faktor yang memengaruhi konsentrasi produk NaOCl. Saat volume air laut meningkat atau pasang, maka konsentrasi produk NaOCl menjadi lebih rendah. Sebaliknya, saat volume air laut berkurang atau surut, maka konsentrasi produk NaOCl menjadi lebih tinggi. Untuk meningkatkan konsentrasi air laut dapat dilakukan dengan penambahan natrium hidroksida (NaOH), yang kemudian akan meningkatkan konsentrasi NaOCl yang dihasilkan, sehingga lebih efektif dalam pengendalian biota laut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Mubarok dkk., (2021) menunjukkan bahwa penambahan larutan natrium hidroksida (NaOH) dapat meningkatkan kadar natrium klorida (NaCl) pada air laut. Penelitian ini menggunakan variasi konsentrasi

NaOH (0,01; 0,02; 0,03; 0,04; dan 0,05N) serta waktu reaksi (6, 8, 10, 12, dan 14 menit). Hasil terbaik tercapai pada konsentrasi NaOH 0,05N dan waktu reaksi 14 menit menghasilkan kadar NaCl sebesar 1,19%. Selain itu, berat endapan magnesium hidroksida ($Mg(OH)_2$) terbanyak juga diperoleh pada kondisi yang sama sebesar 4,3012 gram [4]. Dalam penelitian ini, peningkatan kadar NaCl berperan penting karena NaCl merupakan sumber ion klorida (Cl^-) yang digunakan dalam proses elektrolisis untuk menghasilkan NaOCl. Penelitian lain juga dilakukan oleh Puspasari dkk., (2023) tentang pembuatan desinfektan menggunakan metode elektrolisis larutan garam dengan variasi konsentrasi (5, 10, dan 20%) serta tegangan elektrolisis (6, 12, dan 20V). Hasil penelitian menunjukkan, produksi NaOCl secara optimal melalui elektrolisis larutan garam tercapai pada konsentrasi garam 5%, tegangan 12V, dan laju alir 11 mL/s. Pada waktu 55 detik, konsentrasi klorin yang terbentuk adalah 200 ppm. Namun, pada larutan garam dengan konsentrasi 20%, tidak ada indikasi pembentukan klorin, meskipun tegangan elektrolisis telah diubah [5].

Dengan mempertimbangkan pengaruh pasang surut air laut dan hasil penelitian sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh elektroda karbon grafit, konsentrasi NaOH, dan waktu elektrolisis terhadap produksi NaOCl yang efektif untuk *shock dosing*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

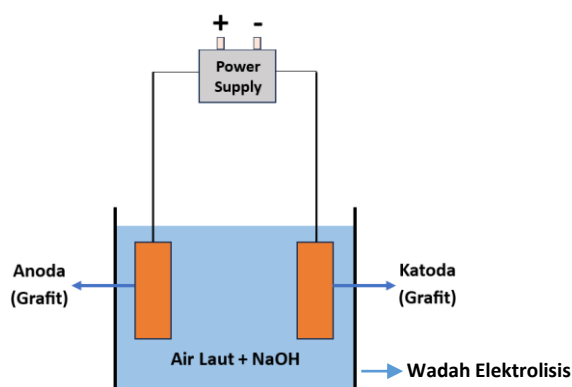
Penelitian ini dilaksanakan dalam skala laboratorium dengan metode eksperimen dan pengambilan data secara kuantitatif. Lokasi penelitian berada di Laboratorium *Water Treatment Plant* (WTP) PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar. Proses penelitian diawali dengan pengukuran pH dan konduktivitas air laut. Selanjutnya, elektrolisis air laut dilakukan menggunakan elektroda karbon grafit dengan variabel yang digunakan meliputi penambahan NaOH 0 (blanko); 0,5; dan 1N serta waktu elektrolisis selama 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 menit. Analisis kadar klorin dalam produk NaOCl dilakukan melalui metode titrasi iodometri.

2.1. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

a. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1, meliputi: wadah elektrolisis, elektroda karbon grafit, penjepit buaya, *supply power*.



Gambar 1. Rangkaian alat elektrolisis dalam pembuatan NaOCl

b. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu: air laut sebanyak 1 liter, larutan NaOH 0,5 dan 1N, air demineral, larutan NaOCl (produk yang dihasilkan), larutan acid 1:1 (air demin : *acetic acid*), indikator amilum 1%, dan larutan sodium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) 0,1N.

2.2. Prosedur Kerja

Prosedur kerja dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Analisis derajat keasaman (pH) air laut

Analisis pH dimulai dengan pengambilan 100 mL air laut yang dimasukkan ke dalam *beaker glass*. Selanjutnya, mencelupkan kertas indikator universal ke dalam air laut. Warna yang muncul pada kertas, kemudian diamati dan dicocokkan dengan skala pH untuk mendapatkan nilai pH air laut. Dilakukan hal yang sama pada variabel penambahan NaOH konsentrasi 0,5 dan 1N [6].

b. Analisis konduktivitas air laut

Analisis konduktivitas air laut dimulai dengan menyalakan *conductivity meter*. Selanjutnya, elektroda dibersihkan dengan air demineral hingga nilai konduktivitasnya di bawah $1 \mu\text{S}/\text{cm}$. Kemudian, air laut sebanyak 100 mL dimasukkan kedalam *beaker glass*, elektroda dimasukkan, dan nilai konduktivitas yang stabil dicatat [7].

c. Proses elektrolisis air laut

Proses elektrolisis air laut dimulai dengan menyalakan *supply power* dan mengatur tegangan listrik pada 10 volt. Pengambilan sampel dilakukan secara berkala setiap 10 menit selama 1 jam dengan membuka sedikit wadah elektrolisis, mengambil sampel dari bagian tengah menggunakan pipet volume, dan menutup kembali wadah tersebut. Percobaan diulangi menggunakan variabel yang berbeda, dengan penambahan 3 mL larutan NaOH ke dalam air laut sebelum proses elektrolisis.

d. Analisis kadar klorin dalam NaOCl

Analisis kadar klorin dalam NaOCl dimulai dengan melarutkan 25 ml sampel ke dalam erlenmeyer dan menambahkan air demineral hingga volumenya mencapai 50 ml. Selanjutnya, ditambahkan 1 gram kalium iodida yang akan bereaksi dengan klorin, diikuti dengan penambahan 5 ml asam asetat untuk menciptakan kondisi asam yang diperlukan, dan larutan dikocok hingga homogen. Kemudian, larutan tersebut dititrasikan dengan larutan natrium tiosulfat. Apabila warna larutan menjadi kuning samar, ditambahkan 5-7 tetes indikator amilum untuk mempermudah pengamatan titik akhir titrasi dan titrasi dilanjutkan sampai warna biru tepat hilang (bening). Titrasi dilakukan secara duplo untuk memastikan hasil yang akurat. Volume natrium tiosulfat yang terpakai dalam titrasi akan digunakan untuk menghitung kadar klorin dalam sampel yang dapat dihitung menggunakan rumus nomor (1):

$$\text{Cl}_2 \text{ (mg/L)} = \frac{V. \text{ titran (mL)} \times \text{Kons. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ (N)} \times 35,45 \text{ g/mol} \times 1000 \text{ mL}}{V. \text{ sampel (mL)}} \quad (1)$$

Keterangan:

Cl_2 = kadar klorin dalam NaOCl (mg/L)

V. titran = volume natrium tiosulfat yang dibutuhkan (mL)

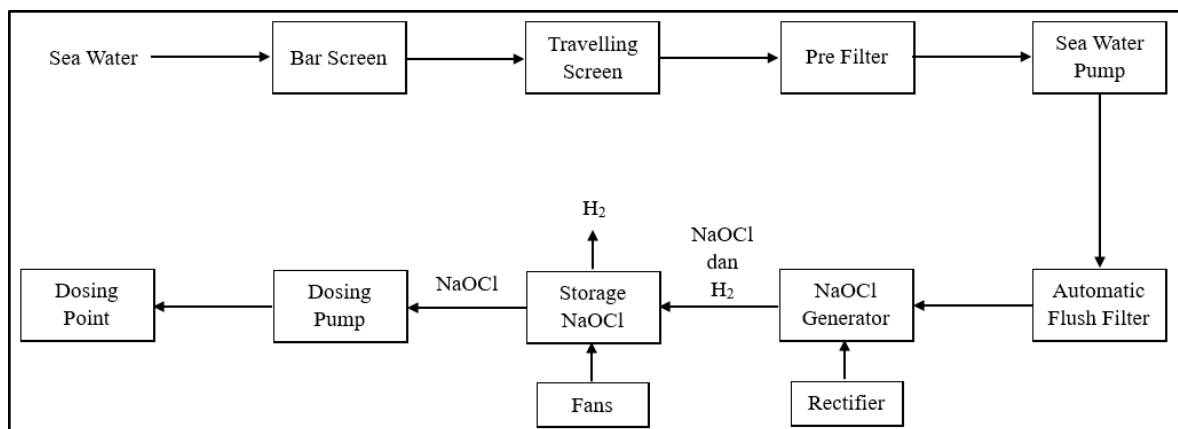
Kons. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ = konsentrasi larutan natrium tiosulfat (N)

35,45 = berat atom klorin (Cl) dalam gram per mol (g/mol)
 V. sampel = volume sampel yang akan dititrasi (mL)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

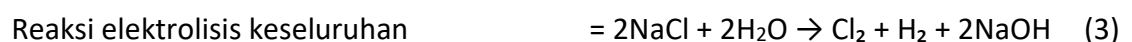
3.1 Proses Produksi NaOCl di PLTU Tanjung Awar-Awar

Produksi sodium hipoklorit (NaOCl) di PLTU Tanjung Awar-Awar dapat dilihat pada Gambar 2. Proses ini diawali dengan *filtrasi* air laut secara bertahap. Pertama, air laut disaring menggunakan *bar screen* yang bertujuan untuk menyaring kotoran yang berukuran besar seperti kayu, plastik, dahal, ikan besar dan lain-lain [8]. Kemudian, air laut disaring menggunakan *travelling screen* untuk menyaring kotoran-kotoran yang lolos dari *bar screen*. Kotoran ini biasanya dapat berupa ikan-ikan kecil, ular, ubur-ubur, kerang, dan lain-lain yang terbawa oleh arus laut [9]. Setelah itu, air laut akan melewati tahap *pre filter* untuk menghilangkan partikel tanah liat dan pasir besar menggunakan *centrifugal sea water desander*. Selanjutnya, air laut dipompa dengan tekanan tinggi menggunakan *Sea Water Pump* (SWP) dan dialirkan menuju *automatic flush filter* untuk memastikan air laut bebas dari kotoran.



Gambar 2. Diagram alir produksi NaOCl di PLTU Tanjung Awar-Awar

Air laut yang telah melalui proses filtrasi kemudian dialirkan menuju sel elektrolisis (NaOCl generator) yang dilengkapi dengan perangkat penyearah arus (*rectifier*). *Rectifier* akan mengubah arus bolak-balik (AC) 400 V menjadi arus searah (DC) yang digunakan untuk mensuplai energi listrik ke sel elektrolisis. Reaksi yang terjadi pada NaOCl generator dapat dilihat pada persamaan reaksi nomor (1) sampai (5).

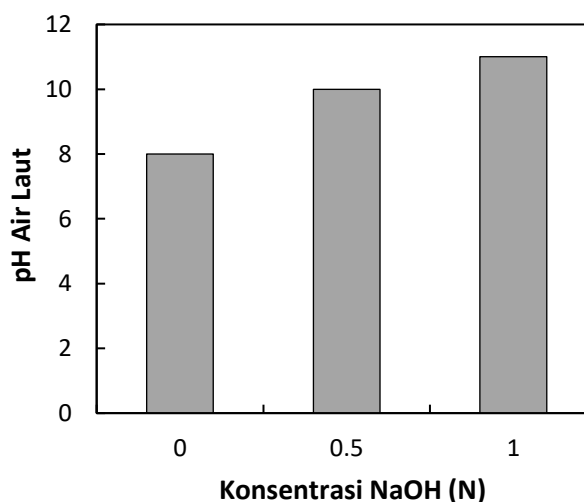


Di dalam sel, air laut akan terurai menjadi ion-ion yang kemudian bergabung membentuk larutan NaOCl sebagai produk utama dan gas hidrogen sebagai produk samping. Larutan NaOCl dan hidrogen akan dipompa menuju tangki penyimpanan. Sistem ventilasi akan mengencerkan konsentrasi hidrogen hingga > 1% sebelum dibuang ke atmosfer. Endapan kalsium dan magnesium yang terbentuk di dasar tangki penyimpanan akan dibuang secara berkala untuk menjaga kualitas larutan NaOCl [10].

Larutan NaOCl yang dihasilkan selanjutnya dipompa dan diinjeksikan ke dalam *intake water* dengan konsentrasi 1 mg/L. Untuk mengatasi pertumbuhan *biofouling* yang signifikan, maka diterapkan metode *shock dosing* yaitu pemberian dosis tinggi dalam waktu singkat, yang bertujuan untuk mengatasi kebal atau resistansi yang terbentuk pada biota laut [3]. *Shock dosing* dilakukan pada konsentrasi larutan NaOCl 4 mg/L selama 30 menit per hari. Selain itu, konsentrasi klorin pada *effluent* kondensor dijaga agar tidak melebihi 0,5 mg/L. Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 08 Tahun 2009 tentang Standar Kualitas Air Limbah untuk Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal, batas maksimum kandungan klorin bebas (Cl_2) yang diperbolehkan adalah 0,5 mg/L [11].

3.2 Pengaruh pH dan Konduktivitas dalam Elektrolisis NaOCl

Produksi NaOCl umumnya memanfaatkan proses elektrolisis dengan air laut sebagai bahan baku utama. Prinsip dasarnya adalah mengalirkan arus listrik searah melalui elektroda, sehingga di katoda terjadi reaksi reduksi sedangkan di anoda terjadi reaksi oksidasi. Selama proses tersebut, ion-ion positif yang ada dalam larutan akan bergerak menuju katoda untuk menerima elektron. Sebaliknya, ion-ion negatif akan tertarik ke anoda dan melepaskan elektron. [12]. Proses ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk tingkat keasaman (pH) larutan.



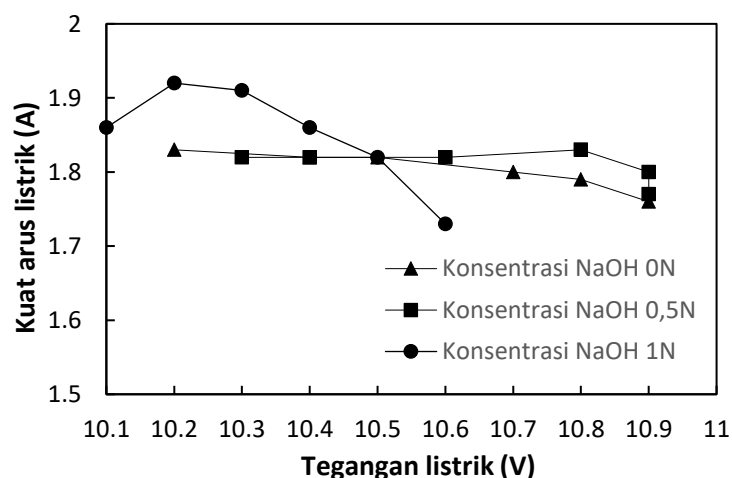
Gambar 3. Hubungan nilai pH berdasarkan penambahan konsentrasi NaOH ke dalam air laut

Berdasarkan Gambar 3, penambahan NaOH 1N ke dalam air laut menghasilkan pH tertinggi, yaitu 11. Hal ini menunjukkan, penambahan NaOH ke dalam air laut dapat

meningkatkan pH secara signifikan karena sifatnya sebagai basa kuat yang menghasilkan ion hidroksida (OH^-). Semakin tinggi konsentrasi NaOH yang ditambahkan, semakin tinggi juga pH larutan yang dihasilkan [13]. Selain pH, konduktivitas larutan juga merupakan faktor penting dalam elektrolisis. Air laut yang digunakan sebagai bahan baku memiliki konduktivitas tinggi sebesar 11,74 mS/cm, menunjukkan kemampuannya yang baik dalam menghantarkan listrik akibat banyaknya ion yang terkandung di dalamnya. Berdasarkan hukum Ohm ($V = IR$, atau $I = V/R$), dengan tegangan (V) yang sama, konduktivitas yang tinggi (berbanding terbalik dengan resistansi/hambatan R) akan menghasilkan arus (I) yang lebih besar. Arus yang lebih besar ini memudahkan arus listrik mengalir melalui larutan, sehingga mempercepat laju reaksi elektrolisis. Sebaliknya, jika konduktivitas rendah (resistansi tinggi), arus yang mengalir akan lebih kecil, meningkatkan hambatan listrik yang berakibat mengurangi efisiensi elektrolisis [14].

3.3 Penggunaan Karbon Grafit Pada Produksi NaOCl

PLTU Tanjung Awar-Awar memproduksi NaOCl menggunakan tegangan listrik yang tinggi sebesar 56,5 V dan arus listrik yang sangat kuat sebesar 3.421 A. Untuk mempercepat proses dan menghasilkan produk yang lebih murni di unit, digunakan elektroda yang terbuat dari logam platina (Pt). Dalam percobaan yang telah dilakukan, jenis elektroda yang digunakan yaitu karbon grafit dengan tegangan listrik sebesar 10 V. Platina dan karbon grafit merupakan jenis elektroda *inert* yang berfungsi sebagai penghantar arus listrik tanpa terlibat dalam reaksi elektrolisis [15]. Elektroda tersebut masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Platina memiliki beberapa kelebihan seperti stabilitas kimia yang tinggi, konduktivitas yang baik, kemampuan bekerja sebagai katalis, dan dapat digunakan dalam berbagai kondisi larutan [16]. Selain itu, platina juga memiliki kelemahan seperti harga yang mahal dan ketersediaan yang terbatas [17]. Sementara, karbon grafit lebih murah dan mudah didapatkan [18]. Namun, karbon grafit memiliki kelemahan yaitu kurang stabil dalam kondisi basa kuat, konduktivitasnya tidak konsisten, dan permukaannya mudah teroksidasi.



Gambar 4. Hubungan tegangan listrik dan kuat arus listrik pada perubahan konsentrasi NaOH dalam produksi NaOCl

Proses elektrolisis dimulai pada tegangan sebesar 10V. Namun, seiring berjalannya waktu elektrolisis terjadi kenaikan tegangan yang tidak signifikan. Berdasarkan Gambar 4, pada konsentrasi NaOH 0 (blanko); 0,5 dan 1N menunjukkan penurunan kuat arus listrik seiring dengan meningkatnya tegangan listrik. Kondisi ini tidak sejalan dengan hukum ohm, yang menyatakan bahwa tegangan dan kuat arus memiliki hubungan yang berbanding lurus, sementara hambatan dan kuat arus berbanding terbalik [14]. Penyimpangan ini disebabkan oleh kenaikan suhu selama proses elektrolisis karena tidak ada pendingin di dalam sistem. Pertukaran ion yang terjadi secara cepat selama proses elektrolisis memicu kenaikan suhu di area reaksi. Peningkatan suhu ini dapat memengaruhi arus dan tegangan, serta berdampak pada wadah yang digunakan selama proses elektrolisis. Hal ini disebabkan karena suhu yang tinggi dapat mengurangi ketahanan peralatan yang digunakan [12]. Selain itu, suhu yang tinggi juga berisiko merusak *power supply* dan mempercepat pelapukan pada elektroda karbon grafit terutama dalam kondisi basa kuat. Akibatnya, efisiensi proses elektrolisis menurun dan produk menjadi lebih keruh karena adanya partikel karbon yang terlepas. Hasil pengamatan selama proses elektrolisis menunjukkan, pelapukan elektroda karbon terlihat pada akhir percobaan konsentrasi NaOH 1N. Dalam kondisi tersebut, elektroda karbon grafit kurang efektif digunakan dalam larutan basa dengan konsentrasi yang tinggi. Sehingga penggunaan elektroda platina lebih disarankan untuk operasi di unit karena tidak mudah bereaksi dengan larutan garam, memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik, dan tahan terhadap suhu tinggi serta korosi air laut.

3.4 Hubungan Konsentrasi NaOH Terhadap Kadar Klorin Pada Produksi NaOCl

Sodium hipoklorit (NaOCl) merupakan disinfektan yang efektif karena kandungan klorin di dalamnya. Klorin berfungsi menginaktivasi enzim-enzim penting dalam sel mikroorganisme, sehingga mengganggu proses metabolisme sel dan menyebabkan kematian sel [19]. Dalam percobaan ini, NaOCl yang dihasilkan berbentuk liquid. Kadar klorin dalam larutan NaOCl yang dihasilkan dapat dianalisis menggunakan metode titrasi iodometri. Dalam metode ini, klorin yang memiliki daya oksidasi tinggi direduksi oleh kelebihan kalium iodida sehingga terbentuk iodium, sesuai dengan persamaan reaksi nomor (6):



Iodium yang terbentuk kemudian diukur dengan titrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat standart. Volume tiosulfat yang dibutuhkan dalam titrasi ini berbanding lurus dengan jumlah iodium yang dihasilkan, sesuai dengan persamaan reaksi nomor (7) [20] :



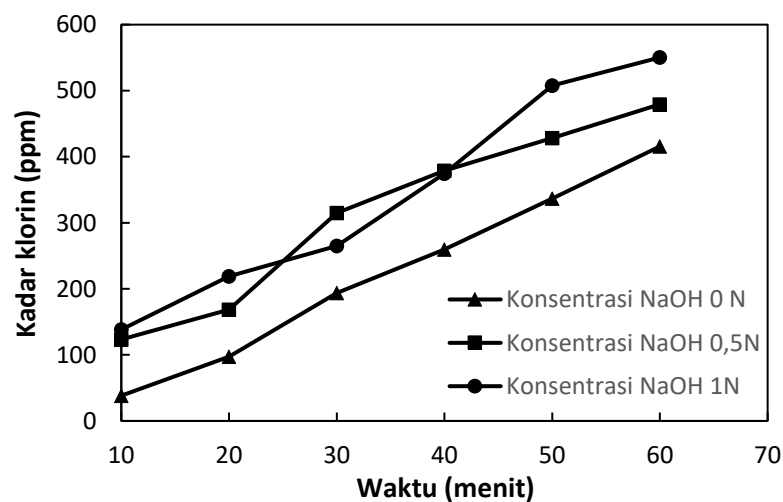
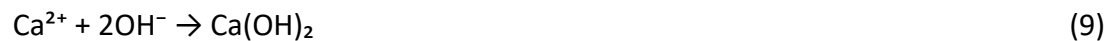
Gambar 5 menunjukkan, peningkatan konsentrasi NaOH dalam air laut berbanding lurus dengan peningkatan kadar klorin dalam larutan NaOCl. Pada konsentrasi NaOH 0N (blanko), kadar klorin tertinggi yang dihasilkan mencapai 415,59 mg/L. Sementara itu, konsentrasi NaOH 0,5 dan 1N mampu meningkatkan kadar klorin secara bertahap, masing-masing mencapai 479,42 mg/L dan 550,34 mg/L. Peningkatan ini terjadi karena NaOH

berperan penting dalam mengikat ion klorin bebas, yang pada akhirnya meningkatkan konsentrasi NaOCl. Selain itu, penambahan NaOH juga mengubah sifat endapan yang terbentuk selama proses. Ion hidroksida (OH^-) dari NaOH bereaksi dengan ion Mg^{2+} dan Ca^{2+} yang terdapat dalam air laut, menghasilkan endapan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang memiliki karakteristik lebih lunak dan lebih mudah untuk dipisahkan. Semakin tinggi konsentrasi NaOH, semakin banyak endapan yang terbentuk. Akibatnya, konsentrasi NaCl dalam air laut juga meningkat karena zat-zat pengotor telah mengendap [4]. Berikut adalah reaksi pembentukan magnesium hidroksida dan kalsium hidroksida:

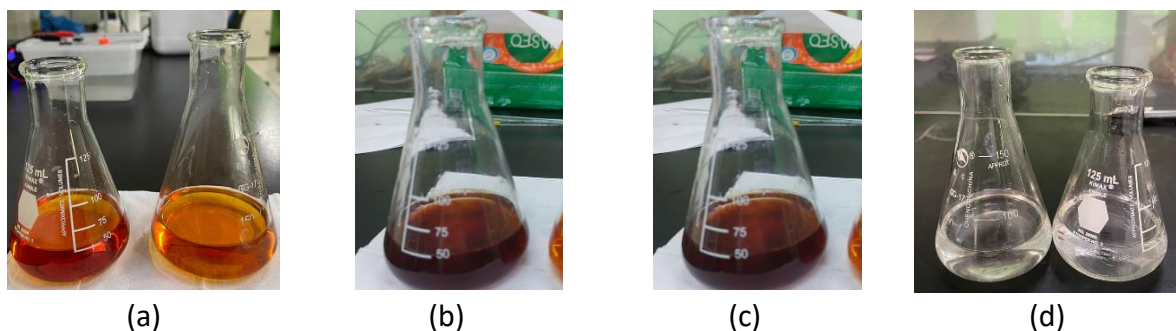
Pembentukan magnesium hidroksida dapat dilihat pada persamaan reaksi nomor (8).



Pembentukan kalsium hidroksida dapat dilihat pada persamaan reaksi nomor (9).



Gambar 5. Hubungan konsentrasi NaOH terhadap kadar klorin pada produksi NaOCl



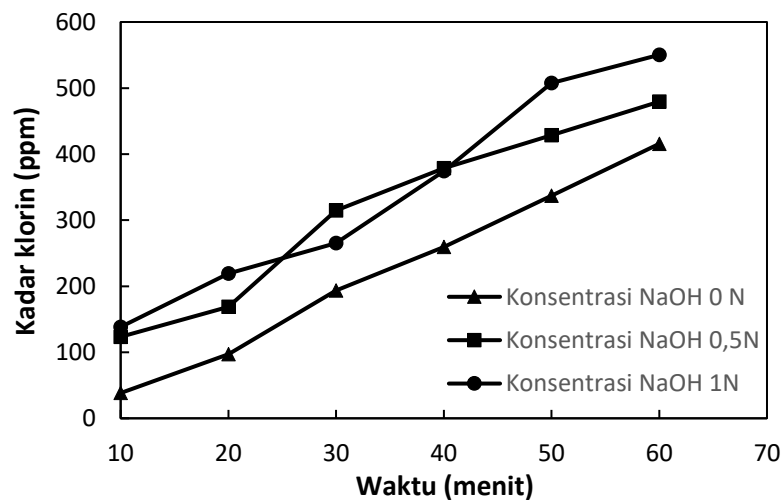
Gambar 6. Warna titer pada titrasi iodometri (a) NaOH 0N (blanko) (b) NaOH 0,5N (c) NaOH 0,1N (d) warna titer (larutan) setelah dititrasi

Pembentukan kadar klorin selama percobaan, ditandai dengan munculnya bau khas yang menyengat dan adanya perubahan warna pada titrasi iodometri. Selama proses titrasi, terjadi perubahan warna dari *orange* kecoklatan menjadi tidak berwarna (bening)

pada konsentrasi NaOH 0N (blanko) seperti yang terlihat pada Gambar 6 (a) dan (d), sedangkan pada konsentrasi 0,5 dan 1N terjadi perubahan warna dari merah kecoklatan menjadi tidak berwarna (bening) seperti yang terlihat pada Gambar 6 (b), (c) dan (d). Warna *orange* kecoklatan di dalam titer menunjukkan jumlah klorin yang terbentuk masih sedikit meskipun percobaan sudah berlangsung selama satu jam. Sebaliknya, jika titer dari warna merah kecoklatan menjadi jernih menunjukkan bahwa jumlah klorin yang terbentuk cukup banyak. Dari hasil percobaan tersebut, dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi injeksi larutan NaOCl pada *intake water* berdasarkan rumus pengenceran dengan mempertimbangkan *flow* yang masuk dan produk yang dihasilkan.

3.5 Hubungan Waktu Elektrolisis Terhadap Kadar Klorin Pada Produksi NaOCl

Elektrolisis merupakan proses penting dalam pembentukan senyawa aktif seperti sodium hipoklorit (NaOCl) dari air laut yang mengandung ion klorida. Dalam proses ini, waktu elektrolisis menjadi parameter penting yang memengaruhi efisiensinya. Selama proses, ion klorida (Cl^-) dioksidasi menjadi gas klorin (Cl_2) di anoda, yang kemudian bereaksi dengan natrium hidroksida (NaOH) untuk membentuk NaOCl. Oleh karena itu, waktu elektrolisis sangat menentukan jumlah kadar klorin yang dihasilkan dalam NaOCl.



Gambar 7. Hubungan waktu elektrolisis terhadap kadar klorin pada produksi NaOCl

Berdasarkan Gambar 7, kadar klorin dalam larutan NaOCl meningkat seiring dengan bertambahnya waktu elektrolisis. Pada percobaan elektrolisis yang dilakukan, kadar klorin tertinggi selalu tercapai pada menit ke-60 di setiap variasi konsentrasi NaOH. Konsentrasi NaOH 0N (blanko) menghasilkan kadar klorin sebesar 415,59 mg/L. Konsentrasi NaOH 0,5N meningkatkan kadar klorin menjadi 479,42 mg/L, dan konsentrasi NaOH 1N menghasilkan kadar klorin tertinggi sebesar 550,34 mg/L. Berdasarkan data yang diperoleh, kondisi elektrolisis yang optimal untuk menghasilkan NaOCl yang efektif dalam penerapan metode *shock dosing* yaitu dengan penambahan NaOH 1N dan waktu elektrolisis 60 menit. Peningkatan konsentrasi klorin seiring waktu menandakan bahwa semakin lama proses elektrolisis berlangsung dengan potensial listrik yang rendah, semakin besar jumlah klorin yang terbentuk. Akibatnya, volume larutan natrium tiosulfat yang dibutuhkan untuk

menetralkan gas klorin juga akan meningkat. Namun perlu diperhatikan bahwa waktu elektrolisis yang terlalu lama, khususnya pada tegangan listrik yang tinggi, dapat menyebabkan penurunan kadar klorin dalam sistem. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh dua faktor utama. Pertama, klorin mudah menguap pada suhu tinggi yang dihasilkan selama proses elektrolisis, sehingga sebagian gas klorin hilang ke lingkungan. Kedua, setelah sebagian besar ion klorida dalam larutan telah dikonversi menjadi klorin, laju pembentukan klorin menurun. Akibatnya, jumlah klorin yang menguap bisa lebih besar dibandingkan dengan jumlah klorin baru yang terbentuk [21]. Oleh karena itu, pemilihan waktu dan tegangan yang tepat dalam proses elektrolisis menjadi faktor kunci untuk menghasilkan klorin secara efisien. Optimalisasi ini harus mempertimbangkan jumlah ion klorida yang tersedia untuk dielektrolisis serta besar kecilnya potensi sel yang digunakan, guna menghindari pemborosan energi dan kehilangan produk akibat kondisi operasional yang tidak ideal.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan elektroda karbon grafit kurang efektif untuk produksi NaOCl, terutama pada suhu tinggi dan larutan basa kuat. Kondisi ini menyebabkan pelapukan elektroda, yang berpotensi menurunkan efisiensi proses dan meningkatkan kekeruhan produk akibat pelepasan partikel karbon. Sedangkan, penambahan konsentrasi NaOH 1N dan waktu elektrolisis 60 menit merupakan kondisi yang optimal untuk menghasilkan NaOCl dengan efektivitas tinggi dalam penerapan metode *shock dosing*, kadar klorin yang dihasilkan mencapai 550,34 mg/L.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan beberapa perbaikan penting. Uji coba dengan waktu elektrolisis lebih dari 60 menit pada konsentrasi NaOH 1N perlu dilakukan untuk mengetahui batas maksimal produksi sebelum terjadi penurunan kualitas. Kualitas air laut sebagai bahan baku juga sebaiknya ditingkatkan melalui penambahan bahan tertentu atau metode pretreatment untuk memperbaiki hasil elektrolisis. Selain itu, optimasi tegangan listrik diperlukan untuk mencapai efisiensi energi terbaik sekaligus mengatasi masalah kenaikan suhu selama proses. Pengujian elektroda alternatif yang lebih ekonomis, tahan panas, dan stabil dalam larutan basa juga penting untuk mendukung produksi NaOCl yang berkelanjutan. Perbaikan tersebut diharapkan tidak hanya meningkatkan efektivitas produksi NaOCl, tetapi juga mengurangi dampak teknis dan biaya operasional.

REFERENSI

- [1] A. Asof, N. Pasra, dan G. Y. Wibowo, "Optimalisasi Acid Cleaning Pada Cell Generator Chlorination Plant Dengan Menggunakan Acuan Tegangan," *Jurnal Power Plant*, hal. 20–25, 2015.
- [2] M. A. S. Y. Ananto dan B. Widiono, "Pengaruh Acid Cleaning Terhadap Efisiensi Electro-Chlorination Plant #3," *Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 6, no. 2, hal. 111–116, 2020.
- [3] Fitriani dan S. Wardoyo, "Peranan Teknologi Mesin Elektrolizer sebagai Penghasil Sodium Hypochlorite pada Pembangkit PT. Indonesia Power UJP PLTU Banten 2 Labuan," *Jurnal Elektronika dan Teknik Informatika Terapan*, vol. 2, no. 4, hal. 124–135, 2024.
- [4] M. R. Mubarak, Y. D. Indrayani, Soemargono, dan L. Suprianti, "Peningkatan Kadar

- Sodium Chlorida di dalam Air Laut dengan Penambahan Larutan Sodium Hidroksida," *Journal of Chemical and Process Engineering*, vol. 2, no. 2, hal. 31–37, 2021.
- [5] D. Puspasari, E. Wijayanti, dan N. S. Fitri, "Pembuatan Desinfektan Menggunakan Metode Elektrolisis Larutan Garam," *Indonesian Journal of Laboratory*, vol. 6, no. 3, hal. 219–225, 2023.
- [6] Sumiati, "Kertas Indikator Asam Basa dari Ekstrak Etanol Rimpang Tanaman Temulawak (*Curcuma xanthorrhiza* Roxb.)," *Integrated Lab Journal*, vol. 7, no. 2, hal. 119–131, 2019.
- [7] F. Irwan, Afdal, dan I. Arlindia, "Kajian Hubungan Konduktivitas Listrik Dengan Konsentrasi Padatan Terlarut Pada Air Permukaan," *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, vol. 5, hal. 7–10, 2016.
- [8] A. P. Sari dan A. Yuniarto, "Perencanaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Agar-agar," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, hal. 92–97, 2016.
- [9] A. Sukarno, Bono, dan B. Prasetyo, "Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kinerja Kondensor Di PLTU Tanjung Jati B Unit 1," *Jurnal Teknik Energi*, vol. 10, no. 2, hal. 65–71, 2014.
- [10] L. China National Electric Engineering Technology CO., "Chemical System Chemical Operation," 2011.
- [11] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 08 Tahun 2009, "Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Termal," 2009.
- [12] Fitriyanti, "Pengaruh Luas Permukaan Elektroda Dengan Penambahan Pwm Controller Terhadap Efisiensi Produksi Gas Hidrogen Pada Proses Elektrolisis," *Jurnal Sains Fisika*, vol. 1, hal. 42–52, 2021.
- [13] E. F. Agustin dan N. Hendrawati, "Pengaruh Variasi Natrium Hidroksida (NaOH) Terhadap Pembuatan Sabun Mandi Padat Sari Mentimun," *Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 4, hal. 850–858, 2022.
- [14] Y. A. A. Turnip, M. Mungkin, D. Maizana, dan H. Satria, "Rancang Bangun Baterai Alternatif Menggunakan Metode Sel Volta dengan Charger Panel Surya," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, hal. 156–165, 2024.
- [15] Erlinawati, T. Z. Mahesi, R. Saputra, I. Febriana, dan S. E. A, "Pengaruh Jumlah Sel Elektroda Terhadap Produksi Gas Hidrogen dengan Proses Elektrolisis sebagai Sumber Energi Fuel Cell," *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 14, no. 1, hal. 10–18, 2025.
- [16] D. M. D. A. Putra, I. M. Joni, M. Suarda, K. Astawa, dan M. Sucipta, "Karakteristik Cyclic Voltammetry Katalis Platina-Titanium Dioksida Didukung Vulcan XC 72 - Reduced Graphene Oxide Dengan Variasi Perbandingan Massa," *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanik*, vol. 14, no. 1, hal. 86–92, 2025.
- [17] E. Oktaviani dan N. M. Nursam, "Pengaruh Material Counter Electrode Pada Dye-Sensitized Solar Cell," *Jurnal Material Metalurgi*, vol. 3, hal. 109–130, 2019.
- [18] A. Artadi, Sudaryo, dan Aryadi, "Penggunaan Grafit Batu Baterai Sebagai Alternatif Elektroda Spektrografi Emisi," *Jurnal Forum Nuklir*, vol. 1, no. 2, hal. 105–119, 2007.
- [19] K. I. N. Kholifah, "Pengaruh Penambahan Natrium Hipoklorit (NaOCl) Untuk Backwash Membrane Bioreactor Terhadap Kualitas Air Limbah Amonia," *Skripsi*, 2018.
- [20] A. M. Ulfa, "Penetapan Kadar Klorin (Cl₂) Pada Beras Menggunakan Metode Iodometri," *Jurnal Kesehatan Holistik*, vol. 9, no. 4, hal. 197–200, 2015.
- [21] G. S. W. Hsu, Y. F. Lu, dan S. Y. Hsu, "Effects Of Electrolysis Time And Electric Potential

On Chlorine Generation Of Electrolyzed Deep Ocean Water,” *Journal of Food and Drug Analysis*, vol. 25, hal. 759–765, 2017.