



Pengembangan Model Pengolahan air Baku dengan Metoda Elektrokoagulasi

Febrianto Adi Nugroho

Jurusan Teknik Kimia

Fakultas Teknik- Universitas Jenderal Achmad Yani

e-mail : adinugroho2@yahoo.com

Abstrak . Besi (Fe) dan mangan (Mn) merupakan komponen yang umum terdapat dalam air kulit bumi, dan sangat mudah terlarut dalam air tanah (ground water). Secara alamiah bentuk yang sangat umum ditemukan dalam air tanah adalah senyawa besi dan mangan bikarbonat. Air yang mengandung besi dan mangan bikarbonat bila berkontak dengan udara akan membentuk presipitat (endapan) dan berada dalam bentuk dispersi koloid, yang menyebabkan warna dan kekeruhan dalam air. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model perangkat pengolahan air tanah sehingga memenuhi baku mutu air bersih. Tujuan khusus penelitian ini adalah untuk mengetahui efisiensi proses elektrokoagulasi untuk menurunkan penurunan kekeruhan, Fe dan Mn dalam air tanah. Penelitian dilakukan terhadap sampel yang berasal dari sumber air disekitar Cibeber kota Cimahi yang dialirkan kedalam bak elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda plat aluminium. Dalam penelitian ini, diamati pengaruh variasi waktu tinggal dan jumlah plat elektroda aluminium. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan penurunan konsentrasi Fe dan Mn akibat variasi waktu tinggal dan jumlah plat elektroda. Penurunan konsentrasi Fe dan Mn terbaik dari sumber air I diperoleh pada waktu tinggal 11,266 menit, menggunakan 6 plat elektroda dan rapat arus 0,000996 A/cm² dengan penurunan konsentrasi Fe sebesar 78,92 % dan konsentrasi Mn 80,41 %, sedangkan untuk sumber air II hasil terbaik diperoleh pada waktu tinggal 13,289 menit, menggunakan 6 plat elektroda dan rapat arus 0,000712 A/cm² dengan penurunan konsentrasi Fe sebesar 86,85 % dan konsentrasi Mn 87,00 %.

Kata kunci : *air, elektrokoagulasi, presipitat, konsentrasi dan rapat arus*

1 PENDAHULUAN

Kebutuhan air yang memenuhi persyaratan kesehatan Depkes RI sudah semakin meningkat di berbagai daerah di Indonesia. Daerah-daerah kritis yang belum mendapat pelayanan air melalui PDAM perlu mendapat perhatian sehingga permasalahan dapat diselesaikan dengan cepat. Instalasi pengolahan air bersih yang dapat dipindah-pindahkan merupakan alternatif yang perlu dipertimbangkan untuk pemecahan sementara atau jangka pendek.

Berbagai instalasi seperti ini telah dikembangkan sejak lama tetapi sering mendapat kesulitan dalam pengoperasiannya karena ketergantungan yang cukup tinggi terhadap bahan kimia. Penerapan proses elektrolisa dalam teknologi pengolahan air bersih memberikan harapan untuk mengurangi kesulitan instalasi model terdahulu. Studi literatur mengenai pemanfaatan elektrokoagulasi dan beberapa penelitian lain memungkinkan pengolahan air tanpa menggunakan bahan kimia untuk koagulan terutama untuk instalasi berkapasitas kecil. Kemungkinan pemanfaatan teknologi ini perlu dikaji lebih lanjut untuk mengolah air permukaan ataupun air tanah di Indonesia.

Besi dan mangan merupakan komponen utama yang terdapat dalam kulit bumi, sangat mudah larut dalam air tanah (ground water). Secara alamiah, bentuk yang sangat umum ditemukan dalam air tanah adalah senyawa besi dan mangan bikarbonat. Air mengandung besi (Fe^{2+}) bila berkontak dengan udara akan teroksidasi menjadi $Fe(OH)_3$ yang menyebabkan warna dan kekeruhan dalam air. Pada mulanya air jernih dan tidak berwarna, tetapi bila didiamkan beberapa saat akan timbul warna kuning dan akhirnya membentuk endapan kecoklatan. Bila dalam air juga terdapat Mn^{2+} , maka Mn^{2+} juga akan ikut teroksidasi membentuk lapisan film MnO_2 . $Fe(OH)_3$ dan MnO_2 ini sering terdapat dalam bentuk dispersi koloid yang stabil dalam waktu yang lama. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efektivitas proses elektrokoagulasi terhadap penurunan konsentrasi Fe dan Mn dalam air tanah. Air yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari air tanah disekitar Cibeber kota Cimahi.

2 TINJAUAN PUSTAKA

Air dalam keadaan murni adalah suatu cairan yang tidak mempunyai rasa, tidak berbau dan tidak beracun. Menurut peraturan dari Menteri Negara Kelestarian dan Lingkungan Hidup No:Kep 02/MENKLH/I/1988, pengertian air adalah semua air yang terdapat didalam bumi atau berasal dari sumber air yang terdapat di laut. Sedangkan standar kualitas air didasarkan pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 416/Menkes/Per/IX/1990

A. Proses Koagulasi dan Flokulasi

Air permukaan umumnya mengandung bermacam zat pengotor koloid yang dapat menimbulkan kekeruhan atau warna pada air. Koloid merupakan suatu suspensi partikel-partikel kecil yang berukuran 1 sampai 100 milimikron. Kekeruhan sering disebabkan oleh partikel lempung koloid yang dihasilkan dari penggerusan tanah. Warna dapat berasal dari koloid besi dan mangan atau senyawa-senyawa organik yang dihasilkan dari dekomposisi tumbuh-tumbuhan.

Partikel-partikel koloid sulit dipisahkan dari cairannya karena partikel-partikel tidak akan mengendap secara gravitasi untuk jangka waktu tertentu dan ukurannya yang sangat kecil dapat lolos melalui saringan media berpori. Agar partikel koloid dapat dipisahkan, koloid-koloid tersebut harus digabungkan sehingga terbentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar. Penggabungan partikel koloid bukan merupakan proses yang sederhana, karena selain menyangkut proses yang sangat kecil, juga yang terpenting adalah sifat fisik dan gaya listrik yang menyebabkan partikel koloid berada dalam keadaan stabil.

Proses destabilisasi pada suatu sistem koloid berupa penggabungan dari partikel-partikel koloid akibat pembubuhan bahan kimia disebut sebagai proses koagulasi. Flokulasi adalah proses penggabungan partikel-partikel koloid yang terkoagulasi membentuk flok-flok yang lebih mudah mengendap.

Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi proses koagulasi dan flokulasi adalah jenis koagulan. Dimana koagulan adalah substansi (bahan kimia) yang ditambahkan untuk membantu proses koagulasi. Koagulan yang umum digunakan adalah tawas (Alumunium Sulfat), PAC (Poly Alumunium Chlorida), Karbon aktif, dan lain-lain.

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses tersebut adalah pH, kekeruhan, komposisi kimia air, jenis koagulan, temperatur, dan kondisi pencampuran.

Pada proses koagulasi kimia, faktor pencampuran dan pembubuhan koagulan, serta kontrol pH merupakan hal yang terpenting agar di dapat efisiensi proses koagulasi yang optimum.

B. Sel Elektrokoagulasi

Prinsip dasar dari sel elektrokoagulasi mengikuti prinsip yang digunakan dalam sistem sel elektrolisis, dimana anoda merupakan tempat berlangsungnya reaksi oksidasi dan katoda sebagai tempat berlangsungnya reaksi reduksi.

Elektrolit berfungsi sebagai media transportasi ionik. Sekaligus mencegah terjadinya hubungan singkat antara anoda dan katoda. Elektron yang dilepaskan pada reaksi anodik berpindah melalui rangkaian listrik menuju pemasok arus yang dipasang di luar sel. Elektron dari pemasok arus mengalir menuju katoda sehingga pada katoda terjadi reaksi reduksi.

Reaksi elektrolisis merupakan suatu proses kimia heterogen yang mencakup perpindahan muatan dari atau ke sebuah elektroda. Untuk mencegah terjadinya akumulasi muatan positif dan negatif di suatu tempat dalam sel maka jumlah elektron yang digunakan untuk proses reduksi pada katoda dan jumlah elektron yang dilepas untuk proses oksidasi pada anoda harus sama. Keharusan untuk mempertahankan keseimbangan muatan dalam seluruh sistem sel pada dasarnya memiliki konsekuensi penting, antara lain :

1. Agar elektrolisis dapat berlangsung, untuk itu elektron-elektron harus bergerak dari anoda ke katoda melalui sebuah rangkaian listrik luar dan pemasok arus searah.
2. Harus ada mekanisme transportasi muatan listrik antara kedua elektroda di dalam sel.

Proses elektrokoagulasi telah dipelajari dalam skala laboratorium maupun dalam skala pilot (besar). Dalam sel elektrokimia, air baku melalui elektroda aluminium paralel yang dihubungkan ke sebuah battery. Aluminium akan dipisahkan dari anoda dan gas hidrogen terbentuk pada katoda.

Menurut Vik, prinsip dasar dalam proses elektrokoagulasi yaitu :

1. Koagulasi
Pemisahan Aluminium dari anoda dan pengadukan dalam air diciptakan oleh aliran air dalam baffle channel menghasilkan proses koagulasi yang akan menghilangkan polutan dalam air.
2. Alkalisasi
Pembentukan gas hidrogen pada katoda yang menyebabkan kenaikan pH dalam air.
3. Flotasi
Pembentukan gas hidrogen pada katoda yang menyebabkan flotasi dari lumpur yang didapatkan dalam proses.

C. Proses Elektrodik yang Berlangsung Dalam Sel Elektrokoagulasi

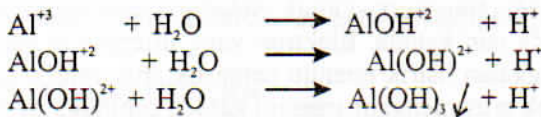
Untuk memahami pengaruh dari berbagai parameter percobaan terhadap performansi

dari sel elektrokoagulasi dan sifat-sifat dari dua reaksi elektrodiknya diperlukan pemahaman mengenai reaksi-reaksi elektrodik utama yang berlangsung di kedua elektroda. Reaksi elektrodik yang terjadi pada elektroda aluminium adalah :

Anoda



Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi ion Al^{+3} . Ion Al^{+3} yang terbentuk dalam larutan akan mengalami reduksi hidrolisis, menghasilkan padatan $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ yang tidak dapat larut lagi dalam air.



atau :

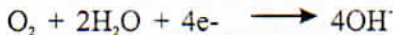


$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ yang terbentuk dalam larutan dapat berfungsi sebagai koagulan untuk proses koagulasi-flokulasi yang terjadi pada proses selanjutnya di dalam reaktor elektrokoagulasi. Setelah proses koagulasi-flokulasi ini selesai maka kontaminan-kontaminannya yang berada dalam air buangan dapat terpresipitasi dengan sendirinya.

Katoda

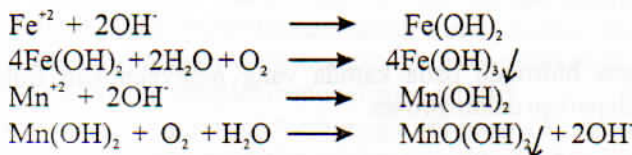


atau :



Pada reaksi katodik akan terbentuk gas hidrogen, sebagai hasil reaksi dari proses reduksi H_2O . Gelembung-gelembung halus gas hidrogen ini cenderung untuk melepaskan diri dari katoda. Gas-gas yang keluar dari dalam larutan ini kemudian mengikat partikel-partikel koloid tersuspensi yang berada di dalam air buangan dan kemudian mengambang ke permukaan larutan bersama-sama sebagai busa. Semakin banyak partikel koloid tersuspensi yang ada dalam larutan maka semakin banyak busa yang terbentuk pada permukaan larutan.

Reaksi katodik yang terjadi pada bahan anorganik seperti besi (Fe^{+2}) dan mangan (Mn^{+2}) yang terdapat dalam air tanah :



Ion OH^- pada proses reduksi akan bereaksi dengan ion Fe^{+2} dan ion Mn^{+2} , lalu senyawa yang terbentuk akan teroksidasi menjadi senyawa besi(III)hidroksida, dan senyawa

mangan dihidroksida yang akan mengendap.

Reaksi Total Sel

Reaksi yang berlangsung selama proses elektrokoagulasi,



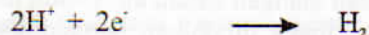
Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak dengan laju (mol equivalen) yang sama pada masing-masing elektroda.

Hal-hal yang dapat terjadi selama reaksi sel berlangsung adalah :

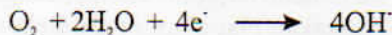
1. Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi keadaan tingkat oksidasi 3+.
2. Al^{3+} yang terlarut dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis membentuk padatan $Al(OH)_3 \cdot nH_2O$.
3. Proses anodik akan selalu disertai oleh salah satu atau lebih proses katodik berikut :



atau :



dan :



atau :



4. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi, dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti Al^{3+} dan OH^- , atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti Al_2O_3 , $Al(OH)_3$, serta pembentukan gas H_2 .
5. Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit, terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan OH^- dan gas H_2 pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut diatas tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah Al^{3+} yang terhidrolisis.
6. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapis oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap karena terhidrolisis sehingga tahanan polarisasi bertambah.

3 PELAKSANAAN PENELITIAN

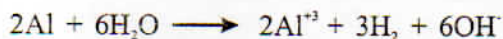
Penelitian elektrokoagulasi ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan proses kontinyu, yang menggunakan bak elektrokoagulasi dengan kapasitas 30 liter. Air baku dialirkan ke dalam bak yang telah dipasang elektroda-elektroda aluminium secara parallel dan dihubungkan dengan arus listrik searah.

Pada pelaksanaan penelitian, air baku dialirkan ke dalam bak elektrokoagulasi dengan debit air yang besarnya ditetapkan dan dilakukan variasi waktu tinggal serta rapat arus dimana besarnya rapat arus ini tergantung pada arus listrik yang ditetapkan

mangan dihidroksida yang akan mengendap.

Reaksi Total Sel

Reaksi yang berlangsung selama proses elektrokoagulasi,



Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak dengan laju (mol equivalen) yang sama pada masing-masing elektroda.

Hal-hal yang dapat terjadi selama reaksi sel berlangsung adalah :

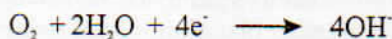
1. Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi keadaan tingkat oksidasi 3+.
2. Al³⁺ yang terlarut dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis membentuk padatan Al(OH)₃.nH₂O.
3. Proses anodik akan selalu disertai oleh salah satu atau lebih proses katodik berikut :



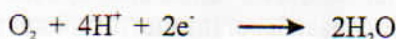
atau :



dan :



atau :



4. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi, dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti Al³⁺ dan OH⁻, atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti Al₂O₃, Al(OH)₃, serta pembentukan gas H₂.
5. Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit, terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan OH⁻ dan gas H₂ pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut diatas tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah Al³⁺ yang terhidrolisis.
6. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapis oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap karena terhidrolisis sehingga tahanan polarisasi bertambah.

3 PELAKSANAAN PENELITIAN

Penelitian elektrokoagulasi ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan proses kontinyu, yang menggunakan bak elektrokoagulasi dengan kapasitas 30 liter. Air baku dialirkan ke dalam bak yang telah dipasang elektroda-elektroda aluminium secara parallel dan dihubungkan dengan arus listrik searah.

Pada pelaksanaan penelitian, air baku dialirkan ke dalam bak elektrokoagulasi dengan debit air yang besarnya ditetapkan dan dilakukan variasi waktu tinggal serta rapat arus dimana besarnya rapat arus ini tergantung pada arus listrik yang ditetapkan

mangan dihidroksida yang akan mengendap.

Reaksi Total Sel

Reaksi yang berlangsung selama proses elektrokoagulasi,



Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak dengan laju (mol equivalen) yang sama pada masing-masing elektroda.

Hal-hal yang dapat terjadi selama reaksi sel berlangsung adalah :

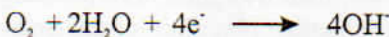
1. Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi keadaan tingkat oksidasi 3+.
2. Al³⁺ yang terlarut dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis membentuk padatan Al(OH)₃.nH₂O.
3. Proses anodik akan selalu disertai oleh salah satu atau lebih proses katodik berikut:



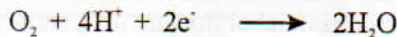
atau :



dan :



atau :



4. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi, dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti Al³⁺ dan OH⁻, atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti Al₂O₃, Al(OH)₃ serta pembentukan gas H₂.
5. Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit, terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan OH⁻ dan gas H₂ pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut diatas tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah Al³⁺ yang terhidrolisis.
6. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapisi oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap karena terhidrolisis sehingga tahanan polarisasi bertambah.

3 PELAKSANAAN PENELITIAN

Penelitian elektrokoagulasi ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan proses kontinyu, yang menggunakan bak elektrokoagulasi dengan kapasitas 30 liter. Air baku dialirkan ke dalam bak yang telah dipasang elektroda-elektroda aluminium secara parallel dan dihubungkan dengan arus listrik searah.

Pada pelaksanaan penelitian, air baku dialirkan ke dalam bak elektrokoagulasi dengan debit air yang besarnya ditetapkan dan dilakukan variasi waktu tinggal serta rapat arus dimana besarnya rapat arus ini tergantung pada arus listrik yang ditetapkan

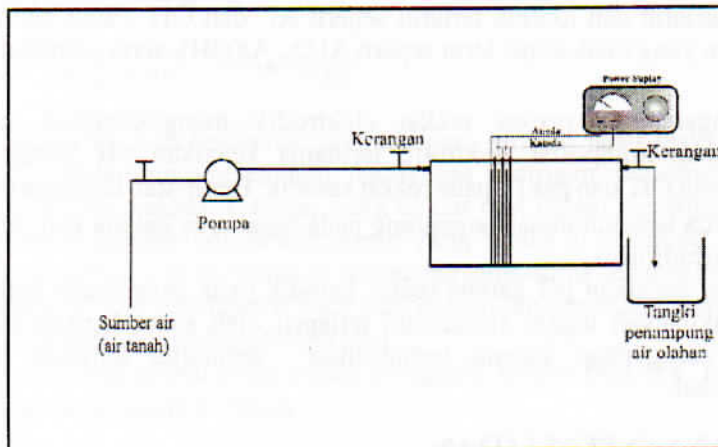
pada arus listrik yang ditetapkan besarnya dan luas elektroda yang besarnya divariasikan tergantung pada jumlah plat elektroda yang digunakan dalam proses.

Selama proses percobaan berlangsung, diambil sejumlah sampel untuk selanjutnya dilakukan pengukuran terhadap parameter-parameter :

1. pH,
2. suhu,
3. jumlah Al yang larut
4. konsentrasi Fe
5. konsentrasi Mn

Data-data yang diperoleh dari hasil penelitian diolah dengan menggunakan metoda statistik deskriptif. Metoda statistik deskriptif merupakan metoda guna mengumpulkan, mengolah, menyajikan data kuantitatif secara deskriptif dalam bentuk tabel.

Air yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari air tanah. Untuk mendapatkan kekeruhan dari air ini, maka setelah air dipompakan kedalam bak air baku kemudian dilakukan proses aerasi dengan cara membiarkan air berkontak bebas dengan udara, sehingga terbentuk koloid dari besi dan mangan dalam air. Untuk menjaga agar tidak terjadi pengendapan dari koloid ini, maka dilakukan pengadukan pada air baku tersebut. Pengadukan ini juga akan membantu terjadinya aerasi dengan udara bebas. Pada percobaan elektrokoagulasi digunakan plat aluminium. Selama pengoperasian dilakukan variasi waktu tinggal dalam bak serta variasi besarnya luas elektroda untuk 4, 5 dan 6 elektroda. Rangkaian percobaan laboratorium disajikan pada diagram dan gambar berikut :



Gambar 1. Rangkaian alat pengolahan air tanah dengan metoda elektrokoagulasi

4 DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

Penelitian pengolahan air dengan metode elektrokoagulasi dilakukan di dua tempat sumber air di wilayah Cibeber Kota Cimahi (Sumber air I dan Sumber Air II)

A. Sumber air I

A.1 Analisa Air Tanah Sebelum Proses Elektrokoagulasi

Tabel 1. Data Pengolahan air Tanah yang diambil sebelum proses elektrokoagulasi

CFe (mg/L)	CMn (mg/L)	Suhu (°C)	pH	Luas plat (dm ²)		
				4plat	5plat	6plat
1,02	0,883	23,5	7,1	4,665	5,856	7,027

A.2 Analisa Air Tanah Setelah Proses Elektrokoagulasi

Pada percobaan ini analisa dilakukan berdasarkan jumlah plat elektroda aluminium yang digunakan, yaitu 4 plat, 5 plat dan 6 plat elektroda Aluminium dan arus listrik yang digunakan 7 ampere.

A..2.1. Analisa untuk Operasi 4 Plat Elektroda Aluminium

Tabel 2. Data hasil elektrokoagulasi untuk 4 plat elektroda

I_1 (A/cm ²)	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,001494	T ₁ = 6,404	27	7,1	0,441	0,413
	T ₂ = 4,983	27	7,1	0,471	0,424
	T ₃ = 3,954	27	7,1	0,490	0,431

A.2.2. Analisa untuk Operasi 5 Plat Elektroda Aluminium

Tabel 3. Data hasil elektrokoagulasi untuk 5 plat elektroda

I_2 (A/cm ²)	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,001195	T ₁ = 8,686	27	7,1	0,366	0,213
	T ₂ = 6,759	27	7,1	0,376	0,233
	T ₃ = 5,364	27	7,1	0,424	0,239

A.2.3. Analisa untuk Operasi 6 Plat Elektroda Aluminium

Tabel 4. Data hasil elektrokoagulasi untuk 6 plat elektroda

I_3 (A/cm ²)	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,000996	T ₁ = 11,266	27	7,1	0,226	0,173
	T ₂ = 8,766	27	7,1	0,286	0,193
	T ₃ = 6,957	27	7,1	0,338	0,198

B. Sumber Air II**B.1 Analisa Air Tanah Sebelum Proses Elektrokoagulasi****Tabel 5.** Data Pengolahan air Tanah yang diambil sebelum proses elektrokoagulasi I

C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	Suhu (°C)	pH	Luas plat (dm ²)		
				4plat	5plat	6plat
1,194	1,385	24	7,1	4,665	5,856	7,027

B.2. Analisa Air Tanah Setelah Proses Elektrokoagulasi

Pada percobaan ini analisa dilakukan berdasarkan jumlah plat elektroda aluminium yang digunakan, yaitu 4 plat, 5 plat dan 6 plat elektroda Aluminium dan arus listrik yang digunakan 5 ampere.

B.2.1 Analisa untuk Operasi 4 Plat Elektroda Aluminium**Tabel 6.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 4 plat elektroda

I_1 (A/cm ²)	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,001067	$T_1 = 7,554$	26,5	7,1	0,528	0,329
	$T_2 = 5,322$	26,5	7,1	0,584	0,346
	$T_3 = 4,145$	26,5	7,1	0,646	0,369

B.2.3. Analisa untuk Operasi 6 Plat Elektroda Aluminium**Tabel 7.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 5 plat elektroda

I_2 (A/cm ²)	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,000854	$T_1 = 10,247$	26,5	7,1	0,284	0,211
	$T_2 = 7,219$	26,5	7,1	0,335	0,216
	$T_3 = 5,622$	26,5	7,1	0,374	0,223

B.2.2 Analisa untuk Operasi 5 Plat Elektroda Aluminium**Tabel 8.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 6 plat elektroda

I_3 (A/cm ²)	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,000712	$T_1 = 13,289$	26,5	7,1	0,157	0,180
	$T_2 = 9,362$	26,5	7,1	0,173	0,183
	$T_3 = 7,291$	26,5	7,1	0,202	0,193

4.2 Pembahasan

Dalam hal ini akan dibahas hasil-hasil penelitian yang meliputi hasil percobaan elektrokoagulasi dengan menggunakan variasi banyaknya plat aluminium untuk 4 plat, 5 plat dan 6 plat serta variasi waktu tinggal. Hal ini ditunjukkan untuk mengetahui pengaruh adanya variasi tersebut terhadap efisiensi penurunan konsentrasi Fe dan Mn. Selain itu dibahas pula perubahan fisis yang terjadi yaitu, suhu dan pH selama proses elektrokoagulasi.

4.2.1 Aluminium yang larut

Konsentrasi aluminium (mg/l) dalam proses elektrokoagulasi ini dipengaruhi oleh besarnya arus listrik dan lamanya waktu operasi dalam bak. Jumlah aluminium yang melarut dihitung berdasarkan hukum Faraday yaitu

$$W = \frac{M \cdot i \cdot t}{n \cdot F} * 10^3 \text{ mg} = \frac{i \cdot t \cdot 27 \cdot 10^3}{3.96500} \text{ mg} = i \cdot t \cdot (0,093) \text{ mg}$$

Konsentrasi ion Al (mg/l): $\frac{W}{t_{op} \cdot Q} = \frac{i \cdot t \cdot (0,093)}{T_{op} \cdot Q}$

Pada percobaan ini, jumlah berat dan konsentrasi aluminium yang melarut diuraikan sebagai berikut :

a. Sumber air tanah I

- lama operasi 15 menit = 900 detik
- arus listrik 7 ampere
- berat aluminium yang melarut = $7 * 900 * 0.093 \text{ mg} = 585.9 \text{ mg}$

Tabel 9. Konsentrasi ion Al yang melarut untuk data hasil olahan dengan 6 plat elektroda aluminium (Sumber I)

T (menit)	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	C Al (mg/L)
T ₁ = 11,266	0,157	0,180	48,249
T ₂ = 8,766	0,173	0,183	37,544
T ₃ = 6,957	0,202	0,193	29,794

b. Sumber air tanah II

- lama operasi 15 menit = 900 detik
- arus listrik 5 ampere
- berat aluminium yang melarut = $5 * 900 * 0.093 \text{ mg} = 418.5 \text{ mg}$

Tabel 10. Konsentrasi ion Al yang melarut untuk data hasil olahan dengan 6 plat elektroda aluminium (Sumber II)

T (menit)	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	C Al (mg/L)
T ₁ = 13,289	0,157	0,180	40,655
T ₂ = 9,362	0,173	0,183	28,641
T ₃ = 7,291	0,202	0,193	22,305

Dari hasil penelitian, ternyata konsentrasi ion dalam proses elektrokoagulasi ini tidak terlalu tinggi. Konsentrasi ion Al akan meningkat seiring dengan peningkatan rapat arus.

4.2.1 Konsentrasi Fe dan Mn yang tersisa

Teroksidasinya Fe^{2+} dan Mn^{2+} oleh oksigen yang ada di udara menjadi Fe^{3+} dan Mn^{4+} yang berbentuk koloid akan menimbulkan kekeruhan pada air tanah. Partikel-partikel koloid tersebut selama proses elektrokoagulasi akan terdestabilisasi membentuk flok-flok yang lebih besar. Terbentuknya gas H_2 di katoda menyebabkan flok yang terbentuk ini mengalami flotasi sehingga terjadi akumulasi flok yang mengandung gas di permukaan air dalam bentuk lapisan sludge. Dengan demikian, pada proses elektrokoagulasi ini kandungan Fe dan Mn dalam air akan mengalami penurunan. Sisa Fe dan Mn yang didapatkan dari air hasil olahan dengan variasi jumlah plat elektroda, dan waktu tinggal dapat dilihat pada tabel di atas.

Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan sumber air I, kandungan Fe dari air tanah adalah 1.119 mg/l dan Mn 0.883 mg/l. Setelah melalui proses elektrokoagulasi hasil terbaik diperoleh pada variasi dengan menggunakan 6 plat elektroda aluminium, rapat arus (I) 0.000996 A/cm² dan waktu tinggal (τ) 11.266 menit dengan kandungan Fe menjadi 0.226 mg/l dan Mn menjadi 0.173 mg/l. Ini berarti terjadi penurunan kandungan Fe sebesar 78.92 % dan Mn sebesar 80.41 %. Sedangkan untuk hasil penelitian dengan menggunakan sumber air II hasil olahan terbaik diperoleh pada variasi dengan menggunakan 6 plat elektroda aluminium, nilai rapat arus (I) 0.000712 A/cm² dan waktu tinggal (τ) 13.289 menit dengan penurunan kandungan Fe sebesar 86.85 % dan Mn sebesar 87.00 %.

Sesuai dengan peraturan yang dikeluarkan menteri kesehatan Republik Indonesia nomor 416/Menkes/Per/IX/1990 mengenai standar kualitas air bersih, maka dengan demikian kandungan Fe dan Mn yang tersisa dari air hasil olahan dengan metoda elektrokoagulasi sudah memenuhi syarat kualitas air bersih. Akan tetapi air olahan ini belum memenuhi kualitas air minum dengan standar konsentrasi mangan kurang dari 0.1 mg/l.

4.2.2 Perubahan Variabel Proses Selama Elektrokoagulasi

4.2.2.1 Suhu

Pada percobaan elektrokoagulasi ini digunakan beberapa plat aluminium yang dipasang paralel. Potensial untuk tiap platnya adalah sama, sehingga jumlah total arus yang keluar sama dengan jumlah arus dari tiap unit plat. Hal ini dapat dilihat dari persamaan :

$$i = V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Dimana :

- | | |
|---|----------------------------|
| i | = arus listrik (Ampere) |
| V | = potensial listrik (volt) |
| R | = hambatan (ohm) |
| n | = jumlah plat |

suhu air selama proses elektrokoagulasi akan semakin meningkat dengan arus yang semakin besar. Hal ini karena dengan penggunaan arus yang semakin besar, potensial listrik akan semakin besar. Pemakaian voltage yang semakin besar inilah yang dapat menyebabkan panas. Dalam penelitian ini arus listrik dan potensial listrik merupakan variabel yang ditetapkan sehingga suhu air selama proses elektrokoagulasi akan tetap.

4.2.3.2. pH (derajat keasaman)

Bila Al^{3+} ditambahkan dalam air akan terjadi reaksi dengan ion hidroksida dari hidrolisa air yang menghasilkan $Al(OH)_3$ dan ion hidrogen, reaksinya adalah :



Bikarbonat yang terdapat dalam air akan bereaksi dengan ion H^+ , dengan reaksi sebagai berikut :



Terbentuknya CO_2 tersebut akan menurunkan pH karena H_2CO_3 bersifat asam lemah. Semakin besar arus yang digunakan, semakin banyak Al^{3+} yang larut sehingga ion H^+ yang terbentuk juga semakin banyak.

Air tanah umumnya mengandung bikarbonat yang tinggi, jadi semakin banyak pula reaksi pembentukan CO_2 yang menyebabkan pH turun selama reaksi berlangsung.

Dalam proses elektrokoagulasi ini, terjadi reaksi pembentukan gas hidrogen pada katoda, dengan reaksi :



Selain gas hidrogen, akan dihasilkan juga ion hidroksida (OH^-). Semakin besar arus yang digunakan, maka semakin cepat juga reaksi tersebut terjadi dan OH^- yang dihasilkan juga semakin banyak sehingga akan menaikkan pH dalam air.

Dengan terjadinya reaksi-reaksi tersebut diatas selama proses elektrokoagulasi ini, maka pH air selama proses elektrokoagulasi tidak mengalami penurunan yang tajam bahkan cenderung konstan. Seperti terlihat pada tabel hasil penelitian di atas, dengan pemakaian arus listrik yang tetap yaitu 7 ampere dan 5 ampere maka derajat keasaman air olahan dari setiap variasi yang dilakukan cenderung sama.

4.2.3.3. Mekanisme Destabilisasi Koloid yang Terjadi

Mekanisme destabilisasi koloid dapat terjadi dalam 4 cara yaitu

1. pemampatan lapisan ganda
2. penjaringan dalam presipitat
3. adsorpsi dan netralisasi muatan
4. adsorpsi dan pengikatan antar partikel
(jembatan antar partikel)

Pada mekanisme pemampatan lapisan ganda, dibutuhkan dosis koagulan yang tinggi agar terjadi destabilisasi koloid sedangkan mekanisme pengikatan antar partikel dapat

terjadi bila terdapat senyawa polimer dengan berat molekul yang besar dan mempunyai rantai karbon yang panjang. Kedua mekanisme tersebut tidak mungkin terjadi dalam proses elektrokoagulasi karena dosis aluminium yang dibutuhkan dalam proses ini relatif masih rendah dan tidak ada penambahan senyawa polimer, dengan demikian ada 2 kemungkinan mekanisme destabilisasi yang terjadi dalam proses elektrokoagulasi yaitu penjarangan dalam presipitat serta adsorpsi dan netralisasi muatan.

Pada mekanisme penjarangan dalam presipitat terbentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s) melalui reaksi berikut:



Konstanta kelarutan (k_s) $\text{Al}(\text{OH})_3$ adalah $10^{-31.6}$, supaya terjadi presipitasi yang cepat rasio $[\text{Al}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 / k_s$ harus lebih besar dari 100. (O'Melia, 1972)

Untuk efisiensi penurunan konsentrasi Fe dan Mn lebih dari 75 % mekanisme tersebut, rasio $[\text{Al}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 / k_s$ dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 10. Rasio $[\text{Al}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 / k_s$ pada data hasil olahan dengan 6 plat elektroda aluminium

Sumber air	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	C Al (mg/l)	pH
Himatek	0,157	0,180	48,249	7,1
	0,173	0,183	37,544	7,1
	0,202	0,193	29,794	7,1
Mipa	0,157	0,180	40,655	7,1
	0,173	0,183	28,641	7,1
	0,202	0,193	22,305	7,1

Sumber air	$[\text{Al}^{3+}]$ mol/liter	$[\text{OH}^-]$ mol/liter	Rasio $[\text{Al}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 / k_s$
Himatek	0,001787	$1,503 \times 10^{-7}$	241615288,39
	0,001391	$1,503 \times 10^{-7}$	188010419,38
	0,001103	$1,503 \times 10^{-7}$	149200929,14
Mipa	0,001506	$1,445 \times 10^{-7}$	180864612,23
	0,001061	$1,445 \times 10^{-7}$	127417416,34
	0,000826	$1,445 \times 10^{-7}$	99231350,90

Berdasarkan perhitungan pada tabel diatas, ternyata rasio $[\text{Al}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 / k_s$ yang didapatkan lebih besar dari 100, jadi presipitasi akan terjadi dengan cepat.

4.2.3. Perhitungan Biaya Olahan

Taksiran biaya pengolahan ini didasarkan kepada biaya pengoperasian instalasi dalam skala rumah tangga dalam bentuk biaya listrik. Perhitungan biaya ditunjukkan untuk unit elektrokoagulasi saja, dimana tidak termasuk:

- Biaya pemompaan dari sumber air baku ke instalasi,

- Biaya awal dari pembuatan unit elektrokoagulasi,
- Biaya beban dari penggunaan daya pada sambungan listrik rumah,
- Biaya pemeliharaan dari alat listrik.

Untuk mendapatkan hasil penelitian diatas, alat ini dioperasikan sebagai berikut :

- Jarak antar plat 2 cm
- Waktu operasi 15 menit
- Arus listrik yang dikeluarkan 7 ampere (Sumber air I) dan 5 ampere (Sumber air II)
- Potensial listrik yang dikeluarkan 18 volt (Sumber air I) dan 20 volt (Sumber air II)
- Jumlah plat aluminium yzitu 4, 5 dan 6 plat
- Volume air dari sumber air himatek dengan jumlah plat 6 buah adalah 12,15 liter dengan debit air 0,810 liter/menit atau 48,6 liter/jam dan volume air dari dari sumber air Mipa adalah 10,29 liter dengan debit air 0,686 liter/menit atau 41,16 liter/jam.
- Biaya listrik per kwh rp. 350,00

Daya listrik yang dibutuhkan dalam percobaan ini ditentukan oleh besarnya arus listrik dan potensial listrik. Besarnya daya listrik dalam satuan kwh (kilo watt hour) adalah :

$$P = V.i.top / 1000$$

Untuk waktu operasi 15 menit (0,25 jam), besarnya daya listrik yang digunakan adalah :

- Sumber air I

$$P = 7A * 18 \text{ volt} * 0,25 \text{ jam} / 1000$$

$$= 0,0315 \text{ kwh}$$
- Sumber air II

$$P = 5A * 20 \text{ volt} * 0,25 \text{ jam} / 1000$$

$$= 0,025 \text{ kwh}$$

Biaya pemakaian listrik adalah besarnya penggunaan daya listrik dikalikan dengan harga pemakaian listrik per kwh. Jadi biaya pemakaian daya listrik adalah :

- Sumber air I

$$\text{Biaya} = 0,0315 \text{ kwh} * 350,00 \text{ rp/kwh}$$

$$= \text{Rp. } 11,025 / 15 \text{ menit}$$

$$= \text{Rp. } 44.1 / \text{jam}$$

Dengan banyaknya air yang dihasilkan 48,6 liter/jam sehingga diperlukan biaya operasi sebesar Rp. 905,35 /m³

- Sumber air II

$$\text{Biaya} = 0,025 \text{ kwh} * 350,00 \text{ rp/kwh}$$

$$= \text{Rp. } 8,75 / 15 \text{ menit}$$

$$= \text{Rp. } 35,00 / \text{jam}$$

Dengan banyaknya air yang dihasilkan 41,16 liter/jam sehingga diperlukan biaya operasi sebesar Rp. 850,34 /m³

Perhitungan biaya operasi diatas menunjukan bahwa elektrokoagulasi masih merupakan alternatif yang mahal. Namun alternatif ini masih dapat dimanfaatkan untuk daerah-daerah terpencil yang sulit memperoleh koagulan tetapi telah terjangkau oleh aliran listrik.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses elektrokoagulasi dengan menggunakan plat aluminium ini dapat dipakai sebagai salah satu alternatif untuk meningkatkan kualitas air tanah karena dapat menurunkan kandungan Fe dan Mn.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk air olahan dari sumber air I hasil terbaik diperoleh dengan penurunan kandungan Fe mencapai 78.92 % dan Mn sebesar 80.41 %. Sedangkan untuk air olahan dari Sumber air II penurunan kandungan Fe mencapai 86.85 % dan Mn sebesar 87.00 %.
3. Biaya operasi untuk menghasilkan 1 m³ air olahan menggunakan sumber air I sebesar Rp. 905,35 /m³ sedangkan untuk sumber air II diperlukan biaya operasi sebesar Rp.850,34/m³.

5.2 Saran

1. Salah satu kerugian dari proses elektrokoagulasi ini adalah terbentuknya lapisan pada permukaan katoda karena terjadinya proses adsorpsi materi-materi yang terdapat dalam air. Untuk mengurangi kecepatan penebalan lapisan tersebut, sebaiknya dilakukan pencucian pada setiap kali selesai dioperasikan untuk menghilangkan materimateri-materi teradsorpsi pada permukaan katoda.
2. Dalam pemilihan plat perlu diperhatikan kemungkinan adanya kandungan logam berat yang dapat merugikan kualitas air olahan.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terutama mengenai karakteristik flok yang terbentuk, karakteristik buih dan usaha-usaha untuk meningkatkan efisiensi dengan mengembangkan proses lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Achmad, Hiskia Drs., "Kimia Larutan", Penerbit PT Citra Aditia bakti, Bandung, 1996.
2. American Water Works Association, "Water Quality and Treatment", 3rd edition, Mc Graw Hill Book Company, new York, 1971.
3. Bard, J.A and L.R. Faulkner, "Electrochemical Methods Fundamental and Application", John Willey and Sons, New York, 1980.
4. Benefield, L.D., Joseph, F. Judkins and Barron L. Weand, "Process chemistry for Water and Waste Water Treatment", Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1982.
5. Degremont, "Water Treatment Handbook", Hal Sfed Press, New York, 1979.
6. Fair, G. M., J.C., and Okun, D. A., "Water and Wastewater Engineering", Volume-2, John Wiley and Sonc Inc., New York, 1978.
7. Hammer, Mark J., "Water and Wastewater Technology", John Wiley and Sons Inc., New York, 1977.
8. Herbert E. Hudson, Jr., "Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation", Van Nostrand Reinhold, 1981.
9. Nalco Water Handbook, "Coagulation and flocculation", Mc Graw Hill, 1980.
10. Reynolds, Tom D., "Unit Operation and Processes in Environment Engineering", Wadsworth Inc., USA., 1982.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses elektrokoagulasi dengan menggunakan plat aluminium ini dapat dipakai sebagai salah satu alternatif untuk meningkatkan kualitas air tanah karena dapat menurunkan kandungan Fe dan Mn.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk air olahan dari sumber air I hasil terbaik diperoleh dengan penurunan kandungan Fe mencapai 78.92 % dan Mn sebesar 80.41 %. Sedangkan untuk air olahan dari Sumber air II penurunan kandungan Fe mencapai 86.85 % dan Mn sebesar 87.00 %.
3. Biaya operasi untuk menghasilkan 1 m³ air olahan menggunakan sumber air I sebesar Rp. 905,35 /m³ sedangkan untuk sumber air II diperlukan biaya operasi sebesar Rp.850,34/m³.

5.2 Saran

1. Salah satu kerugian dari proses elektrokoagulasi ini adalah terbentuknya lapisan pada permukaan katoda karena terjadinya proses adsorpsi materi-materi yang terdapat dalam air. Untuk mengurangi kecepatan penebalan lapisan tersebut, sebaiknya dilakukan pencucian pada setiap kali selesai dioperasikan untuk menghilangkan materimateri-materi teradsorpsi pada permukaan katoda.
2. Dalam pemilihan plat perlu diperhatikan kemungkinan adanya kandungan logam berat yang dapat merugikan kualitas air olahan.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terutama mengenai karakteristik flok yang terbentuk, karakteristik buih dan usaha-usaha untuk meningkatkan efisiensi dengan mengembangkan proses lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Achmad, Hiskia Drs., "Kimia Larutan", Penerbit PT Citra Aditia bakti, Bandung, 1996.
2. American Water Works Association, "Water Quality and Treatment", 3rd edition, Mc Graw Hill Book Company, new York, 1971.
3. Bard, J.A and L.R. Faulkner, "Electrochemical Methods Fundamental and Application", John Willey and Sons, New York, 1980.
4. Benefield, L.D., Joseph, F. Judkins and Barron L. Weand, "Process chemistry for Water and Waste Water Treatment", Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1982.
5. Degremont, "Water Treatment Handbook", Hal Sfed Press, New York, 1979.
6. Fair, G. M., J.C., and Okun, D. A., "Water and Wastewater Engineering", Volume-2, John Wiley and Sonc Inc., New York, 1978.
7. Hammer, Mark J., "Water and Wastewater Technology", John Wiley and Sons Inc., New York, 1977.
8. Herbert E. Hudson, Jr., "Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation", Van Nostrand Reinhold, 1981.
9. Nalco Water Handbook, "Coagulation and flocculation", Mc Graw Hill, 1980.
10. Reynolds, Tom D., "Unit Operation and Processes in Environment Engineering", Wadsworth Inc., USA., 1982.

11. Rich, L. G, "Unit Operation of Sanitary Engineering", John Wiley an Sons, Inc., 1961.
12. Sanks, Robert L, "Water Treatment Plant Design", Ann Arbor Science, Michigan, 1982.
13. Sawyer and Mc Carty, "Chemistry for Environmental Engineering", 3rd edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1978.
14. Vik, E. A., "Small Water Treatment Plants Using Electrocoagulation", 4th Asia Pasific Regional Water Supply Conference and Exhibition, Jakarta - Indonesia, 5-11 November 1983.
15. Walter J., Weber Jr., "Physicochemical Processes for Water Qualy Control" John Wilwy and Sons, Inc., New York, 1972.

Penyunting: dr. DR.

Tugas dan tanggung jawab: menulis, memeriksa, mengoreksi, dan menyetujui

keaslian, keakuratan, dan kelengkapan artikel.

Formulir peninjauan artikel diserahkan kepada redaksi sebagai berikut:

Batas: 100 x 150 mm. Jumlah: 10. Lembar: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

penggunaan: 10000.

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Analisa Kurusikan pada Tirtum Bunter yang terdapat dalam Material Bunter Bontol (Jaj M.A.R-M-246)

Penyunting: dr. DR.

Tugas dan tanggung jawab: menulis, memeriksa, mengoreksi, dan menyetujui

keaslian, keakuratan, dan kelengkapan artikel.

Formulir peninjauan artikel diserahkan kepada redaksi sebagai berikut:

Batas: 100 x 150 mm. Jumlah: 10. Lembar: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis

Ukuran: 100 mm x 150 mm. Jumlah: 10. Ditulis dengan tinta hitam menggunakan alat tulis