

Perbandingan Proses Penurunan Kromium Heksavalen oleh Ferus Sulfat dalam Medium Berasid dan Beralkali

Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Lau Ming Ngo dan Saleha Atan

ABSTRAK

Proses penurunan yang diikuti dengan pemendakan merupakan satu kaedah perawatan air sisa berkromium yang paling lazim digunakan. Dalam kajian ini, proses penurunan kromium heksavalen dilakukan dalam kedua-dua medium berasid dan beralkali. Larutan ferus sulfat digunakan sebagai agen penurunan bagi menurunkan kromium heksavalen (Cr^{6+}) kepada kromium trivalen (Cr^{3+}). Rawatan dalam medium beralkali pada pH 9.0 perlu ditambahkan dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) bagi meningkatkan larutan kerana air sisa berkromium adalah berasid. Ketika tindak balas berlaku, penambahan larutan ferus sulfat ke dalam medium tindak balas dikawal dengan memerhatikan potensi penurunan-pengoksidaan (ORP). Susuk ORP bagi proses penurunan yang berlaku dalam medium berasid dan beralkali mempunyai bentuk yang berbeza. Takat penghabisan ion Cr^{6+} dalam medium berasid adalah sekitar 380 mV. Takat penghabisan ion Cr^{6+} dalam medium beralkali pula berlaku dalam julat nilai mutlak dari 0 ke -300 mV. Jumlah enapcemar yang terbentuk dalam medium beralkali adalah 1.6 kali lebih banyak berbanding dalam medium berasid. Bagi proses penurunan dalam kedua-dua medium tindak balas, kadar penurunan adalah lebih cepat bagi kepekatan ion Cr^{6+} yang lebih tinggi. Namun begitu, kadar penurunan adalah lebih cepat bagi proses penurunan yang berlaku dalam medium berasid kerana kepekatan ion Cr^{6+} menurun dengan lebih cepatnya dalam medium berasid.

Kata Kunci: kromium heksavalen, penurunan kromium, ferus sulfat, potensi pengoksidaan-penurunan (ORP)

ABSTRACT

Reduction process followed by precipitation is the most common method used in treating wastewater containing chromium ions. In this study, hexavalent chromium reduction process was carried out in both acidic and alkaline mediums. Ferrous sulphate solution was used as a reducing agent to reduce hexavalent chromium (Cr^{6+}) to trivalent chromium (Cr^{3+}). The reaction in alkaline medium at pH 9.0 was achieved by adding sodium hydroxide solution (NaOH) since chromium wastewater was acidic. During the reaction, the addition of ferrous sulphate solution into reaction medium was monitored through oxidation-reduction potential (ORP) parameter. The results showed that the ORP profiles for the reduction process were different in both acidic and alkaline mediums. When the reduction process was completed in the acidic medium, the absolute ORP value was recorded as 380 mV. The absolute ORP value when the reduction process completed in the

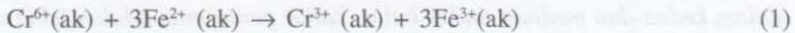
alkaline medium was in the range of 0 to -300 mV. The total precipitation in the alkaline medium was 1.6 times higher than acidic medium. For the reduction process in both acidic and alkaline mediums, the rate of reduction process was faster for the higher concentration of Cr^{6+} ion. However, the rate of reduction process in the acidic medium was faster than the alkaline medium because the reduction of Cr^{6+} ion concentration was greater in the acidic medium.

Keywords: hexavalent chromium, chromium reduction, ferrous sulphate, oxidation-reduction potential (ORP)

PENGENALAN

Kromium boleh dijumpai dalam bentuk pengoksidaan Cr^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{4+} , Cr^{5+} dan Cr^{6+} . Namun begitu, hampir kesemua kromium wujud dalam bentuk trivalen dan heksavalen (Cr^{6+}) kerana keadaan pengoksidaannya yang paling stabil. Keadaan pengoksidaan kromium dapat digunakan untuk menentukan ketoksikannya. Berbanding dengan kromium trivalen, kromium heksavalen lebih mencemarkan alam sekitar yang kerana ia adalah agen pengoksidaan yang kuat dan larut dalam semua keadaan.

Kaedah perawatan air sisa berkromium melalui proses penurunan kromium heksavalen dan diikuti dengan pemendakan kromium trivalen merupakan satu kaedah lazim yang digunakan dalam industri. Penurunan kromium heksavalen kepada kromium trivalen dengan menggunakan agen penurunan ferus sulfat adalah mengikut persamaan tindakbalas redoks yang berikut:



Kadar tindakbalas bagi proses penurunan kromium heksavalen adalah bergantung kepada beberapa faktor. Proses penurunan Cr^{6+} adalah amat dipengaruhi oleh nilai pH larutan, suhu dan jenis agen penurunan yang digunakan. Proses penurunan kromium heksavalen adalah amat bergantung kepada nilai pH kerana kesan pH ke atas penguraian asid. Kadar tindakbalas bagi proses penurunan kromium adalah berkadar songsang dengan nilai pH. Proses penurunan ini juga bergantung kepada betapa Fe^{2+} berubah sebagai satu fungsi suhu disebabkan oleh kepekatan agen penurunan (Fe^{2+}) pada nilai pH 4.0 adalah hampir malar pada kesemua julat suhu (Sedlak & Chan 1997).

Agan penurunan yang biasanya digunakan ialah sulfur dioksida (SO_2) dan garamnya, garam ferus, ferus sulfida (Wise & Trantolo 1994), natrium bisulfit (NaHSO_3) serta natrium metabisulfit ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) (Benefield et al. 1982). Apabila ferus sulfat digunakan sebagai agen penurunan, Cr^{6+} diturunkan oleh ferus sulfat, dengan Cr^{3+} dan Fe^{3+} sebagai produk tindakbalas yang akan termendak sebagai sebatian hidroksida. Pemendakan bersama $\text{Cr}(\text{OH})_3$ dan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ melebarkan julat pH yang sesuai untuk pemendakan logam.

Menurut Wise dan Trantolo (1994), apabila agen penurunan garam sulfit digunakan, penurunan kromat berlaku pada pH 2-3 dan pemendakan kromium hidroksida berlaku pada pH 8.5. Dengan itu, proses penurunan kromium heksavalen diikuti dengan pemendakan kromium trivalen melibatkan dua langkah yang berturutan. Penurunan kromium heksavalen dan pemendakan

kromium trivalen boleh dikurangkan kepada satu langkah dalam medium beralkali. Ini dicapai dengan melakukan proses penurunan dan pemendakan dalam satu reaktor pada pH 9.5-10 dengan menggunakan sebatian ferus.

Penurunan kromat boleh dilaksanakan oleh garam ferus dalam larutan berasid dan larutan beralkali. Keupayaan redoks bagi rantai Fe^{3+}/Fe^{2+} adalah tidak bergantung kepada pH dalam medium berasid, manakala keupayaan pengoksidaan bagi kromat adalah amat bergantung kepada kepekatan ion hidrogen. Penurunan kromat menggunakan ion ferus dalam medium berasid dilakukan pada nilai pH 3. Sebaliknya, Fe^{3+} termendak dalam medium yang neutral dan beralkali sebagai hidroksida. Fe^{3+} hidroksida adalah 24 kali kurang larut daripada Fe^{2+} hidroksida [$K_{sp}(Fe(OH)_3) = 10^{-37.4}$; $K_{sp}(Fe(OH)_2) = 10^{-13.8}$] (Wise & Trantolo 1994).

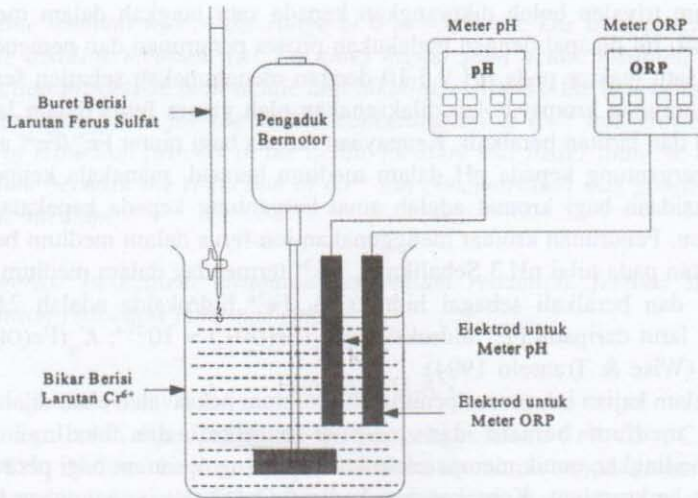
Dalam kajian ini, proses penurunan kromium heksavalen akan dijalankan dalam medium berasid dan medium beralkali dan hasilnya akan diperbandingkan untuk memperolehi keadaan yang optimum bagi perawatan air sisa berkromium. Keberkesanan kadar tindak balas, penggunaan bahan kimia, kesesuaian kawalan dan peratus mendakan yang terbentuk bagi proses penurunan ini turut dikaji dan dibincangkan.

BAHAN DAN KAEDAH

Proses penurunan kromium heksavalen dilakukan dengan menambahkan sejumlah isipadu larutan 0.2 M ferus sulfat secara berterusan ke dalam 3 L larutan Cr^{6+} yang berkepekatan tertentu. Bagi memastikan tindak balas berlaku dengan lengkapnya, larutan diaduk dengan menggunakan pengaduk bermotor (Voss of Maldon, Essex, U.K.) pada kelajuan 100 rpm. Alikuot 50 mL sampel diambil untuk analisis logam setiap kali selepas penambahan larutan ferus sulfat pada selang masa yang tertentu.

Ketika proses penurunan berlaku, susuk pH dan ORP untuk larutan yang bertindakbalas perlu diperhatikan. Bagi mengkaji susuk pH dan ORP, penderia (*sensor*) pH dan ORP dimasukkan ke dalam bikar 5 L yang diisi dengan 3 L larutan Cr^{6+} yang berkepekatan tertentu. Bacaan pH diukur dengan menggunakan meter pH *Schott Model 672P* (Great Lakes Instrument, U.S.) dan elektrod gabungan kaca rujukan yang ditentukkan dengan larutan piawai pH 4 dan pH 7 melalui kaedah penentuan dua titik. Nilai ORP pula diukur dengan menggunakan meter ORP *Schott Model 672R* (Great Lakes Instrument, U.S.) dan elektrod gabungan kaca rujukan yang ditentukkan dengan larutan piawai 200 mV dan 600 mV melalui kaedah penentuan dua titik juga. Nilai ORP bagi larutan dicerap lima minit setiap kali selepas larutan ferus sulfat ditambahkan iaitu selepas bacaan ORP stabil. Rajah 1 menunjukkan susunan peralatan uji kaji yang digunakan dalam kajian ini.

Bagi kajian penurunan kromium heksavalen dalam medium berasid, ujikaji dijalankan tanpa penambahan larutan berasid kerana pH larutan asalnya sudah bersifat asid. Manakala bagi kajian penurunan kromium heksavalen dalam medium beralkali pula, larutan NaOH ditambahkan ke dalam medium tindak balas bagi mengekalkan pH larutan pada pH beralkali. Nilai pH bagi medium tindak balas perlu sentiasa dikawal dengan menambahkan larutan NaOH ke dalam medium tindak balas bagi mengekalkan medium tindak balas pada pH lebih daripada 9.

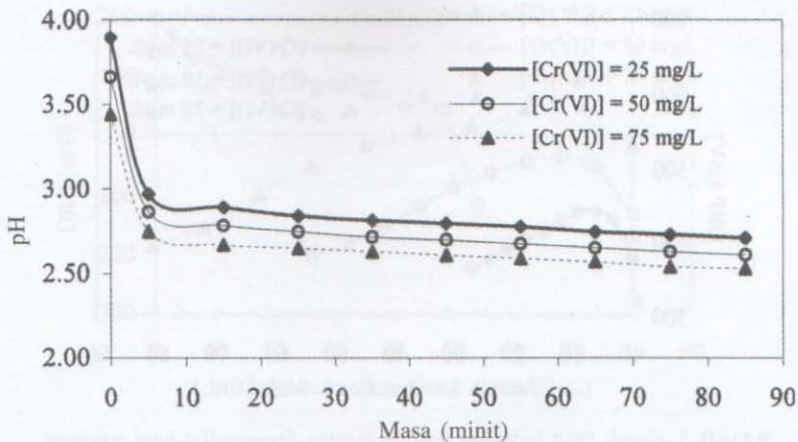


RAJAH 1. Susunan peralatan uji kaji untuk kajian penurunan kromium heksavalen

Kepekatan ion Cr⁶⁺ dan Fe²⁺ dalam sampel ditentukan secara kalorimetri masing-masing dengan menggunakan kaedah piawai *1,5-Diphenyl-carbohydrazide (Powder Pillows)* pada jarak gelombang 540 nm dan *1,10-Phenanthroline (Powder Pillows)* pada jarak gelombang 510 nm dengan alat spektrofotometer *HACH DR/2000 Model 44800-00* (Colo, U.S.). Kepekatan atom Cr dan Fe dalam sampel ditentukan bagi mengetahui kepekatan ion Cr³⁺ dan Fe³⁺ dalam sampel. Kepekatan atom Cr dan Fe dianalisis melalui *Atomic Absorption Spectrometer Model Analyst 800* (Perkin Elmer Instruments, U.S.). Nilai kepekatan ion Cr³⁺ ialah hasil tolakan nilai kepekatan ion Cr⁶⁺ dari nilai kepekatan atom Cr dan begitu juga kaedah perhitungan untuk menentukan nilai kepekatan ion Fe³⁺.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

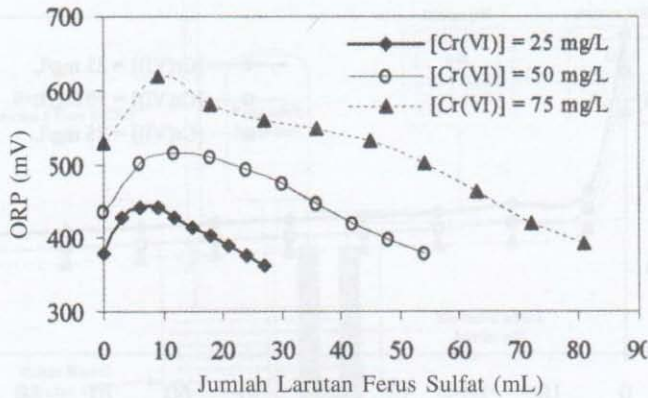
Parameter-parameter uji kaji seperti pH, ORP dan jumlah enapcemar diperbandingkan antara proses penurunan yang dijalankan dalam medium berasid dengan beralkali. Larutan Cr⁶⁺ awal yang disediakan adalah bersifat asid dengan nilai pH yang kurang daripada 4 kerana ion Cr⁶⁺ yang hadir dalam bentuk kromat (CrO₄²⁻) dan dikromat (Cr₂O₇²⁻) adalah berasid. Dengan merujuk kepada graf dalam Rajah 2, pH larutan Cr⁶⁺ awal didapati semakin rendah apabila kepekataannya meningkat. Apabila larutan ferus sulfat ditambahkan ke dalam larutan Cr⁶⁺, nilai pH larutan didapati menurun dengan banyaknya kepada pH yang kurang daripada 3 bagi ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr⁶⁺. Julat pH 2.5-3.0 ini telah terbukti sesuai untuk menurunkan Cr⁶⁺ kepada Cr³⁺ seperti kajian yang telah dilakukan oleh Eary dan Rai (1988) serta Buerge dan Hug (1997). Larutan Cr⁶⁺ awal berkepekatan 75 mg/L mempunyai nilai pH yang lebih rendah sepanjang proses penurunan kerana lebih banyak mendakan Fe(OH)₃ dan Cr(OH)₃ yang terbentuk ketika larutan Cr⁶⁺ yang lebih pekat dirawat. Bagi proses penurunan yang dilakukan dalam medium beralkali, pH medium tindak balas dikawal supaya kekal pada sekitar 9.0 sepanjang proses penurunan bagi ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr⁶⁺ yang dikaji.



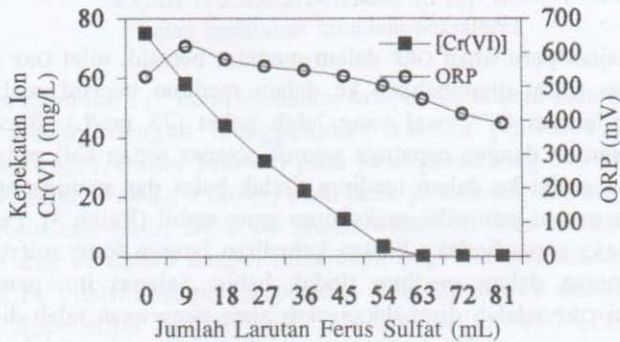
RAJAH 2. Susuk ORP terhadap jumlah larutan ferus sulfat bagi medium berasid untuk ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr^{6+}

Bagi kajian perubahan ORP dalam medium berasid, nilai ORP sebelum larutan ferus sulfat ditambahkan ke dalam medium berasid adalah lebih tinggi bagi larutan Cr^{6+} awal yang lebih pekat (75 mg/L). Bacaan ORP didapati menurun dengan cepatnya sejurus selepas setiap kali penambahan larutan ferus sulfat ke dalam medium tindak balas dan meningkat semula sehingga mencapai satu nilai maksimum yang stabil (Rajah 3). Penurunan nilai ORP yang cepat berlaku kerana kehadiran larutan ferus sulfat sebagai agen penurunan dalam medium tindak balas. Selepas itu, peningkatan semula nilai ORP adalah disebabkan oleh agen penurunan telah digunakan untuk proses penurunan. Nilai ORP didapati menurun semula setelah mencapai titik maksimumnya apabila semakin banyak larutan ferus sulfat ditambahkan ke dalam medium tindakbalas. Penurunan nilai ORP berlaku kerana kesemua ion Cr^{6+} telah diturunkan. Susuk perubahan ORP terhadap jumlah larutan ferus sulfat yang ditambahkan mempunyai bentuk yang serupa bagi ketiga-tiga kepekatan larutan Cr^{6+} seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Walaupun nilai ORP adalah lebih tinggi bagi agen pengoksidaan yang lebih kuat, peningkatan nilai ORP pada awal proses penurunan ini adalah disebabkan oleh banyak pergerakan elektron dari agen pengoksidaan kepada agen penurunan (Johnson 2002). Di samping itu, nilai ORP juga meningkat dengan penurunan nilai pH yang mendadak pada awal proses penurunan yang telah ditunjukkan dalam Rajah 2. Keputusan ini adalah konsisten dengan kajian yang dilakukan oleh Sensorex (2003).

Jika dilihat dari aspek perubahan ORP terhadap kepekatan ion Cr^{6+} , nilai ORP meningkat pada peringkat awal proses penurunan dan mencapai satu nilai maksimum selepas sejumlah larutan ferus sulfat ditambahkan ke dalam medium tindakbalas (Rajah 4). Nilai ORP mula menurun selepas titik maksimumnya kerana kepekatan agen pengoksidaan (Cr^{6+}) dalam larutan adalah semakin berkurangan. Daripada kajian yang telah dilakukan untuk ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr^{6+} , nilai ORP ketika proses penurunan dalam medium berasid selesai ialah sekitar 380 mV. Nilai ini adalah hampir kepada nilai ORP sebanyak 465 mV yang diperolehi daripada kajian yang dilakukan oleh Hanvajawanong dan Intawong (2003) yang menurunkan Cr^{6+} dengan menggunakan larutan ferus sulfat pada pH 2.0.



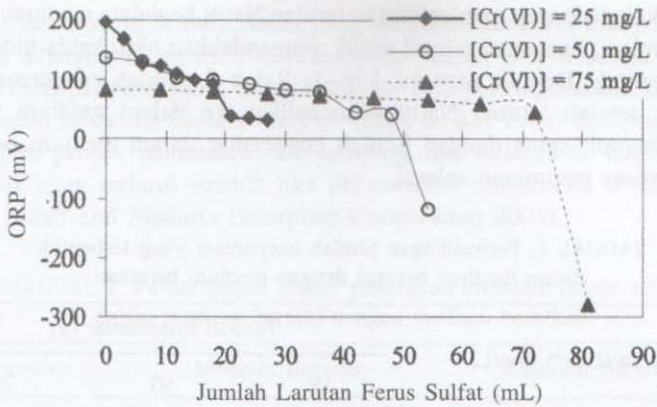
RAJAH 3. Susuk ORP terhadap jumlah larutan ferus sulfat bagi medium berasid untuk ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr^{6+} yang berlainan



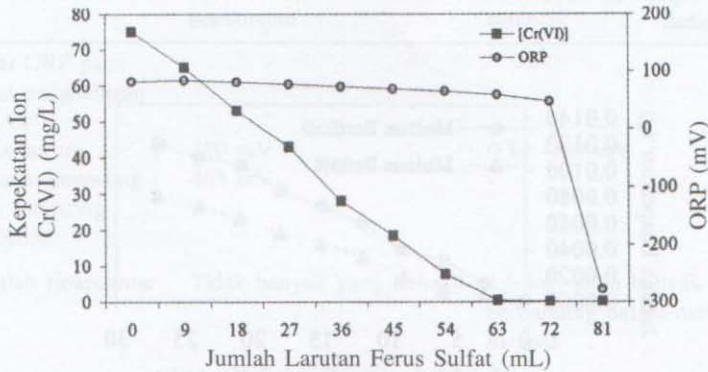
RAJAH 4. Susuk ORP dan kepekatan ion Cr^{6+} terhadap jumlah larutan ferus sulfat bagi larutan Cr^{6+} awal berkepekatan 75 mg/l dalam medium berasid

Bagi kajian perubahan ORP dalam medium beralkali pula, nilai ORP didapati menurun dengan mendadak kerana pH medium tindakbalas meningkat dengan banyaknya selepas larutan NaOH ditambahkan. Oleh sebab larutan Cr^{6+} yang lebih pekat adalah lebih berasid, dengan itu, lebih banyak larutan NaOH yang perlu ditambahkan ke dalam medium tindakbalas untuk mencapai nilai pH 9.0. Apabila larutan ferus sulfat mula ditambahkan ke dalam medium beralkali, bacaan ORP menurun untuk ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr^{6+} . Nilai ORP selepas proses penurunan selesai adalah lebih rendah untuk larutan Cr^{6+} yang lebih pekat. Dapat diperhatikan dengan jelasnya bahawa nilai ORP pada titik terakhir dalam Rajah 5 adalah bernilai negatif untuk larutan Cr^{6+} awal berkepekatan 75 mg/L. Sementara itu, nilai ORP untuk larutan Cr^{6+} awal berkepekatan 25 mg/L tidak menjejaki nilai negatif setelah proses penurunan selesai.

Nilai ORP bagi proses penurunan yang berlaku dalam medium beralkali adalah menurun dengan perlahan sebelum kesemua ion Cr^{6+} diturunkan. Apabila hampir kesemua ion Cr^{6+} diturunkan, nilai ORP menurun dengan mendadak sehingga mencapai nilai negatif bagi larutan Cr^{6+} awal berkepekatan 75 mg/L seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6. Daripada kajian yang telah dilakukan untuk ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr^{6+} ,



RAJAH 5. Susuk ORP terhadap jumlah larutan ferus sulfat bagi medium beralkali untuk ketiga-tiga kepekatan awal larutan Cr^{6+}



RAJAH 6. Susuk ORP dan kepekatan ion Cr^{6+} terhadap jumlah larutan ferus sulfat bagi larutan Cr^{6+} awal berkepekatan 75 mg/l dalam medium beralkali

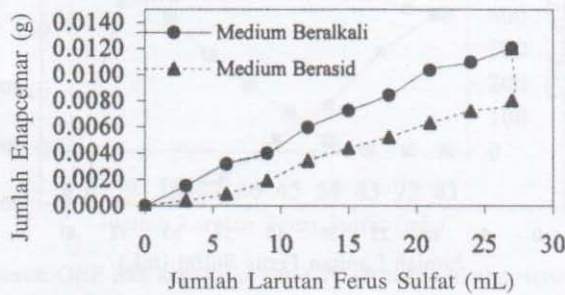
nilai ORP ketika proses penurunan dalam medium beralkali selesai berlaku dalam julat nilai mutlak dari 0 hingga -300 mV. Nilai ini adalah hampir kepada nilai ORP yang diberikan oleh Wise dan Trantolo (1994).

Dari segi pembentukan enapcemar pula, jumlah enapcemar didapati semakin banyak terbentuk apabila semakin banyak larutan ferus sulfat yang ditambahkan ke dalam medium tindak balas sama ada yang berasid atau beralkali. Untuk proses penurunan yang dijalankan dalam medium berasid, jumlah enapcemar adalah lebih tinggi bagi larutan Cr^{6+} yang lebih pekat. Hal ini adalah disebabkan oleh lebih banyak mendakan yang terbentuk hasil daripada lebih banyak ion Cr^{6+} yang diturunkan oleh larutan ferus sulfat. Apabila jumlah enapcemar bagi proses penurunan yang dilakukan dalam kedua-dua medium berasid dan beralkali diperbandingkan, jumlah enapcemar dalam medium beralkali didapati hampir 1.6 kali ganda lebih banyak daripada jumlah enapcemar dalam medium berasid seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 1. Enapcemar yang terbentuk dalam medium berasid hanya sedikit sahaja kerana $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yang terhasil mudah terlarut dalam keadaan berasid (Benefield et al. 1982) dan tidak termendak. Oleh itu, larutan beralkali perlu ditambah untuk memendakkan logam hidroksida yang terbentuk. Kajian

telah dilakukan dengan menambahkan larutan NaOH ke dalam medium berasid setelah proses penurunan selesai untuk memendakkan hidroksida-hidroksida yang terbentuk. Dengan merujuk kepada Rajah 7, jumlah enapcemar yang terbentuk setelah larutan NaOH ditambahkan ke dalam medium berasid didapati hampir sama dengan jumlah enapcemar dalam medium beralkali setelah proses penurunan selesai.

JADUAL 1. Perbandingan jumlah enapcemar yang terbentuk dalam medium berasid dengan medium beralkali

Kepekatan awal Cr^{6+} (mg/L)	Jumlah Enapcemar (g)		
	25	50	75
Medium berasid	0.0080	0.0193	0.0292
Medium beralkali	0.0121	0.0244	0.0628
Nisbah enapcemar medium beralkali kepada medium berasid	1.5	1.3	2.1
Purata nisbah	1.6		



RAJAH 7. Perbandingan jumlah enapcemar terhadap jumlah larutan ferus sulfat dalam medium berasid dengan medium beralkali bagi larutan Cr^{6+}

Berdasarkan keputusan di atas, proses penurunan kromium heksavalen kepada kromium trivalen dengan menggunakan larutan ferus sulfat boleh dijalankan dalam kedua-dua medium berasid dan beralkali. Proses penurunan kromium heksavalen yang berlaku dalam kedua-dua medium berasid dan beralkali menunjukkan kelebihan dan kekurangan masing-masing seperti yang diringkaskan dalam Jadual 2. Proses penurunan yang dilakukan dalam medium berasid melibatkan dua langkah. Langkah pertama ialah penambahan larutan ferus sulfat bagi menurunkan kromium heksavalen. Setelah proses penurunan selesai, larutan NaOH perlu ditambahkan ke dalam medium tindakbalas bagi memendakkan hidroksida $\text{Fe}(\text{OH})_3$ dan $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Bagi proses penurunan yang dijalankan dalam medium beralkali, penambahan larutan ferus sulfat dan larutan NaOH adalah serentak bagi menurunkan dan memendakkan hidroksida logam yang terhasil. Walaupun penurunan dan pemendakan berlaku dalam satu langkah, kawalan diperlukan untuk mengekalkan nilai pH medium beralkali. Hal ini disebabkan oleh pH medium tindakbalas akan menurun setiap kali selepas larutan ferus sulfat ditambahkan.

Dengan itu, kuantiti larutan NaOH yang ditambahkan perlu dikawal dengan baiknya supaya pH medium sentiasa pada sekitar 9.0. Medium beralkali dengan nilai pH yang lebih tinggi daripada 10.0 perlu dielakkan kerana ion Fe^{2+} mudah teroksida kepada ion Fe^{3+} (Eary & Rai 1988) dan menurunkan kecekapan proses penurunan. Di samping itu, hidroksida $Cr(OH)_3$ yang terbentuk akan terlarut semula jika pH medium tindakbalas melebihi 11.0 (Japan Small and Medium Enterprise Cooperation 2001).

JADUAL 2. Perbandingan proses penurunan kromium heksavalen dalam medium berasid dengan medium beralkali

Parameter	Medium Berasid	Medium Beralkali
Penurunan dan pemendakan	Melibatkan dua langkah	Melibatkan satu langkah
Keperluan kawalan	Kawalan terhadap pH dan ORP dilakukan secara berasingan	Kawalan terhadap pH dan ORP perlu dilakukan dengan serentak
Nilai ORP pada takat penghabisan ion Cr^{6+}		
• Kajian ini	380 mV	0 ke -300 mV
• Hanvajanawong & Intawong (2003)	465 mV	-
Jumlah Enapcemar	Tidak banyak yang terhasil	1.6 kali lebih banyak berbanding dalam medium berasid
Kadar penurunan Penggunaan agen penurunan	Lebih cepat Tidak banyak	Lebih perlahan Lebih banyak

Kelebihan proses penurunan dalam medium berasid ialah proses penurunan berlaku pada kadar yang lebih tinggi berbanding dalam medium beralkali. Keadaan pH yang paling optimum untuk kadar penurunan yang paling cepat ialah dalam julat dari 2.0 ke 3.0 (Hanvajanawong & Intawong 2003; Holtzman 1994). Proses penurunan dalam medium beralkali pula menghasilkan jumlah enapcemar yang lebih banyak kerana hidroksida $Fe(OH)_3$ dan $Cr(OH)_3$ mudah termendak dalam medium beralkali. Dengan itu, air sisa yang terawat mengandungi kandungan ion Cr^{3+} dan Fe^{3+} yang kurang daripada dalam medium berasid. Ini menjadikan air sisa yang dilepaskan ke dalam sungai adalah kurang bertoksik.

Apabila dilihat dari segi penggunaan larutan ferus sulfat, proses penurunan yang dilakukan dalam medium beralkali memerlukan lebih banyak larutan ferus sulfat. Namun begitu, kajian ini telah menunjukkan bahawa kuantiti larutan ferus sulfat yang diperlukan bagi penurunan pada pH 9.0 adalah lebih sedikit sahaja daripada penurunan pada medium berasid. Ini terbukti daripada kajian Eary dan Rai (1988) yang menyatakan bahawa nisbah Fe^{2+} kepada Cr^{6+} kekal pada 3.03 jika pH medium tindak balas kurang

daripada 10.0. Dengan itu, kos bagi penggunaan larutan ferus sulfat tidak banyak berbeza bagi proses penurunan dalam medium berasid dengan medium beralkali jika pH bagi medium beralkali tidak melebihi 10.0.

KESIMPULAN

Proses penurunan kromium heksavalen yang berlaku dalam kedua-dua medium berasid dan beralkali menunjukkan kelebihan dan kekurangan masing-masing. Dengan itu, pemilihan medium tindakbalas adalah bergantung kepada kos semasa dan bekalan agen penurunan, kos pemasangan kelengkapan bagi menjalankan proses penurunan, keadaan perawatan yang bersesuaian apabila dirawat bersama logam berat yang lain dan kos sistem kawalan terhadap parameter pH dan ORP. Secara ringkasnya, penurunan dalam medium berasid mempunyai kelebihan berbanding dengan penurunan dalam medium beralkali dari segi kawalan proses yang lebih mudah kerana hanya melibatkan satu parameter kawalan pada sesuatu masa, seperti ORP semasa proses penurunan dan pH semasa pemendakan. Manakala, kedua-dua ORP dan pH perlu dikawal serentak semasa proses penurunan dalam medium berasid. Kawalan yang tidak baik akan menyumbang terhadap pembaziran agen penurunan dan juga agen pemendakan, serta pembentukan enapcemar yang lebih banyak di akhir proses rawatan.

RUJUKAN

- Benefield, L. D., Judkins, J. F. & Weand, B. L. 1982. *Process chemistry for water and wastewater treatment*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Buerge, I. J. & Hug, S. J. 1997. Kinetics and pH dependence of chromium(VI) reduction by iron(II). *Environ. Sci. Tech.* 31(5): 1426-1432.
- Eary, L. E. & Rai, D. 1988. Chromate removal from aqueous waste by reduction with ferrous ion. *Environ. Sci. Tech.* 22(8): 972-977.
- Hanvajanawong, N. & Intawong, P. 2003. Design of wastewater treatment plant of the zipper factory. (atas talian) http://www.aprcp.org/roundtables/4th/Papers/Hanvajanawong_W14.htm. (28 September 2003).
- Holtzman, S. A. 1994. Cyanide and heavy metal Removal. (atas talian) <http://www.actglobal.net/wastewat.htm>. (3 Oktober 2003).
- Japan Small and Medium Enterprise Cooperation. 2001. Chromium-wastewater treatment. (atas talian) http://www.apec-vc.or.jp/co-op/mekki/docs/2_4_01.htm. (3 Oktober 2003).
- Johnson, C.T. 2002. The Control of pH and Oxidation Reduction Potential (ORP) in Cooling Tower Applications. (atas talian) http://www.awt.org/members/publications/analyst/2002/spring/control_pH.htm. (3 Oktober 2003).
- Sedlak, D. L. & Chan, P. G. 1997. Reduction of hexavalent chromium by ferrous iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61(11): 2185-2189.
- Sensorex. 2003. Reduction-oxidation measurements. (atas talian) <http://www.sensorex.com>. (11 Februari 2003).
- Wise, D. L. & Trantolo, D. J. 1994. *Process engineering for pollution control and waste minimization*. New York: Marcel Dekker, Inc.