

PERANCANGAN PLANT PENGOLAHAN AIR ASAM TAMBANG DENGAN PROSES SAND FILTRASI, ULTRAFILTRASI DAN REVERSE OSMOSIS

¹Subriyer Nasir, ²Eddy Ibrahim, dan ³A. Taufik Arief

¹ Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Jl. Palembang-Prabumulih Indralaya 30662

^{2,3} Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Jl. Palembang-Prabumulih Indralaya 30662

e-mail: ¹subriyer@unsri.ac.id, ²eddy-ibrahim@yahoo.com, ³taufik-arief@yahoo.com

Abstrak. Air asam tambang (*Acid Mine Drainage*) merupakan masalah serius bagi lingkungan. Selain karena pH yang rendah, air asam tambang juga mengandung ion-ion logam berat seperti Al, Mn, Fe dan ion lain. Tujuan penelitian ini adalah merancang peralatan pengolahan air asam tambang dengan menggabungkan tiga macam unit pengolah yaitu sand filter, ultrafiltrasi dan reverse osmosis. Plant mini yang dirancang adalah kombinasi dari sand filter, ultrafiltrasi dan reverse osmosis. Sampel yang diteliti berasal dari salah satu perusahaan penambangan batubara di Sumatera Selatan. Variabel yang diteliti adalah laju alir, tekanan dan waktu operasi. Parameter yang diperiksa adalah pH, TSS, TDS, EC, turbidity, dan fluks permeat. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa kombinasi sand filter yang dilengkapi dengan filtrasi menggunakan fly-ash dan rice husk dapat menaikkan pH air asam tambang dari 3,9 menjadi 7,2.

Kata kunci: air asam tambang, sand filter, ultrafiltrasi, reverse osmosis

1. Pendahuluan

Air asam tambang (*acid mine drainage*) merupakan salah satu masalah yang serius terhadap lingkungan yang terutama karena aktivitas pertambangan. Kontaminasi air asam tambang dapat terjadi saat dilakukannya konstruksi, kegiatan penambangan, dan saat tambang ditinggalkan karena tidak produktif lagi. Air asam khususnya yang ada di areal bekas tambang mengandung ion-ion logam seperti Al, Mn, Fe, dan senyawa sulfat dll. dengan pH antara 2-6.

Maraknya kegiatan penambangan batubara di Sumsel khususnya akan membawa implikasi terhadap kerusakan lingkungan terutama perairan. Pemakaian bahan kimia dengan jumlah besar misalnya batu kapur tentu berdampak pada cost yang harus dikeluarkan perusahaan. Di sisi lain, air asam tambang tidak saja dihasilkan oleh perusahaan penambangan batu bara tetapi juga industri penambangan logam misalnya timah dan nikel. Untuk itu upaya menetralsir air asam tambang tanpa penambahan zat kimia perlu dilakukan agar tidak menimbulkan masalah baru terhadap lingkungan.

Metoda yang banyak dipakai oleh industri pertambangan batubara untuk menetralsir air asam tambang adalah dengan penambahan kapur (*lime*) dalam dosis tertentu yang tentunya membutuhkan investasi yang cukup besar untuk pembelian bahan kimia, biaya pemeliharaan, dan masalah lain yang terkait dengan aspek lingkungan. Sementara itu, air asam tambang di PTBA Tanjung Enim dikelola dengan metode kolam pengendap lumpur dengan penambahan kapur untuk menetralsir air asam tambang selain metoda *wetland* yang diklaim dapat menurunkan kandungan Fe dan Mn (www.ptba.co.id).

Usaha untuk menetralsir air asam tambang telah banyak dilakukan diantaranya dengan menggunakan lignit sebagai adsorben (Mohan & Chander, 2006), fly-ash, clinker, dan zeolit sintesis (Rios, et-al. 2008), elektrokimia (Luptakova, et-al. 2012) dan metoda yang relatif baru untuk mengolah air asam tambang adalah dengan cara elektrodialisa (Buzzi, et-al 2013).

2. Air Asam Tambang dan Pengolahannya

Air asam tambang (AAT) atau acid mine drainage (AMD) terbentuk karena adanya mineral sulfida (pirit) yang teroksidasi oleh oksigen dan air; dapat terbentuk dalam air tanah pada sebuah tambang yang masih aktif berproduksi. Senyawa-senyawa sulfur yang sering terdapat dalam air asam tambang adalah pyrite (FeS_2), marcasite (FeS_2), Pyrrhotite (Fe_xS_x), chalcocite (Cu_2S), covelite (CuS), chalcopyrite (CuFeS_2), molybdenite (MoS_2), milerite (NiS), galena (PbS), sphalerite (ZnS), dan arsenopyrite (FeAsS) (Skousen et-al 1998).

Senyawa Pyrite (FeS_2) merupakan senyawa yang berperan dalam pembentukan asam dan pelarutan ion logam pada batubara atau mineral lainnya. Pyrite dapat teroksidasi ketika terpapar oleh oksigen dan air dan menghasilkan ion hidrogen yang bersifat asam, ion sulfat dan kation logam yang dapat larut (Skousen et al, 1998; Castello 2003). Rendahnya oksigen terlarut akan menyebabkan peningkatan konsentrasi ion ferro, sulfat dan hidrogen. Akibatnya air asam yang terbentuk akan mempunyai pH yang rendah. Pada saat air mempunyai pH rendah maka bakteri acidophilic misalnya *Thiobacillus Ferroxidans* berperan dalam mengoksidasi ion ferro.

Ada dua macam proses pengolahan air asam tambang yang dikenal saat ini yaitu proses pengolahan aktif dan proses pengolahan pasif (Watzlaf, et-al, 2004). Akan tetapi, Global Acid Rock Drainage (2009) mengklasifikasikan proses pengolahan air asam tambang menjadi pengolahan aktif, pasif dan pengolahan in-situ. Proses pengolahan aktif merujuk kepada teknologi yang dioperasikan manusia dengan perawatan dan monitoring berdasarkan sumber energi dari luar. Beberapa contoh proses pengolahan aktif adalah aerasi, netralisasi, pengendapan secara kimia, proses membran, pertukaran ion dan penghilangan sulfat secara biologi. Proses pengolahan pasif adalah pengolahan yang tidak membutuhkan intervensi manusia secara reguler, baik pengoperasian maupun perawatannya. Biasanya menerapkan konstruksi material alam seperti tanah, clay dan batuan pecah, material alam seperti jerami, potongan kayu, dan kompos dan mempromote pertumbuhan vegetasi alam.

Pengolahan secara in situ mencakup beberapa cara misalnya 1) menyebarkan senyawa alkali pada areal penambangan yang terkena dampak dan air limbah tambang, 2) pengolahan in pit (*pit-lake*) water, penutupan areal tambang dan areal air tambang secara organik 3) pembuatan rintangan yang bersifat reaktif dan permeabel yaitu menggunakan material yang kaya zat organik dan penggunaan senyawa dengan valensi nol.

3. Sand Filter, Ultrafiltrasi dan Reverse Osmosis

Ada dua jenis sand filter yang dikenal dalam pengolahan air dan air limbah yaitu 1) *slow sand filter* (saringan pasir lambat) dan 2) *rapid sand filter* (saringan pasir cepat). Saringan pasir lambat cocok diterapkan untuk pengolahan air skala kecil dengan biaya konstruksi dan operasi yang rendah. Untuk efektivitas pengolahan air dengan slow sand filter, air umpan harus mempunyai turbidity antara 5 sampai 30 NTU.

Saringan pasir cepat mempunyai cara kerja yang sama dengan saringan pasir lambat dan merupakan sistem filtrasi yang banyak digunakan. Saringan pasir cepat mempunyai keunggulan seperti tidak memerlukan areal yang luas. Perbedaannya dengan saringan pasir lambat adalah kecepatan atau laju alir air yang melintasi media. Dalam operasinya air mengalir ke bawah melalui unggun pasir untuk menghilangkan partikel tersuspensi. Partikel tersuspensi terdiri dari koagulan atau non koagulan

tersuspensi yang tertinggal dalam air setelah sedimentasi. Media saringan pasir cepat dapat berupa kombinasi antara pasir dan antrasit sedangkan air umpan mempunyai turbidity lebih dari 1000 NTU dengan produk yang dihasilkan mempunyai turbidity 0,5 NTU. Pemakaian sand filter dalam penelitian ini adalah untuk menurunkan kadar TSS, TDS dan turbidity air umpan sehingga memenuhi persyaratan air yang cocok sebagai feed pada UF dan RO.

Ultrafiltrasi (UF) merupakan pemisahan dengan membran berpori yang dapat memisahkan air dari padatan mikro yang berasal dari molekul besar dan koloid. Ukuran pori rata-rata untuk membran UF adalah 10-1000Å. Modul UF dapat dijumpai dalam bentuk tubular, plate and frame dan spiral wound. Aplikasi UF banyak dijumpai pada electrocoat paint, produksi keju, klarifikasi jus buah, pemisahan emulsi minyak dan air, pemurnian air, produksi enzim dan lain-lain. Berbagai penelitian mengenai UF dijumpai dalam literatur (Vela et al 2007; Shao et al 2009). Shao *et-al* telah menggabungkan UF dan RO untuk mengolah air asam dari tambang tembaga dan menyimpulkan bahwa kombinasi UF dengan RO cukup efektif untuk menghilangkan suspended solid, bakteri dan koloid sehingga UF dapat digunakan untuk menyiapkan air umpan RO dengan SDI dan turbidity rendah.

Pengolahan limbah sekunder dalam sebuah sistem RO telah menjadi fokus perhatian para ahli dalam dekade terakhir. Di negara-negara maju pemanfaatan kembali air bekas proses dan limbah cair (water and wastewater recycling) menjadi populer akhir-akhir ini utamanya untuk memenuhi kebutuhan air proses atau untuk pertanian (Petala, et al. 2006 Toze 2006). Pengolahan limbah sekunder melalui proses recycling dengan RO memerlukan pretreatment yang kompleks karena karakteristik dari limbah itu sendiri. Limbah sekunder mempunyai kandungan senyawa organik dan mikroorganisme yang tinggi bila dibandingkan dengan air laut atau air payau. Karena itu, desalinasi air limbah menggunakan sistem RO harus dapat mereduksi polutan dan mikropolutan dalam bentuk suspended solid. Proses pretreatment yang intensif juga merupakan usaha preventif untuk meminimalisir fouling yang disebabkan oleh mikroorganisme dan padatan tersuspensi yang dikenal sebagai biofouling.

Meskipun penerapan teknologi RO untuk desalinasi telah mapan sejak beberapa dekade yang lalu, namun aplikasinya dalam pengolahan limbah (effluen) sekunder masih terbatas. Berbagai studi yang dilakukan sebelumnya memperlihatkan bahwa effluen sekunder mempunyai prospek yang cukup baik sebagai sumber air di masa depan. Sejumlah eksperimen untuk desalinasi effluen dapat dijumpai di literatur (Nasir, 2007). Namun aplikasi langsung sistem RO untuk pengolahan air asam tambang jarang dijumpai di pustaka. Hal ini disebabkan karena sifat-sifat membran yang rentan terhadap pH air asam tambang yang sangat rendah. Diperlukan sistem pretreatment yang digabungkan dengan RO sehingga air umpan memenuhi persyaratan yang ditentukan oleh membran.

4. Metodologi

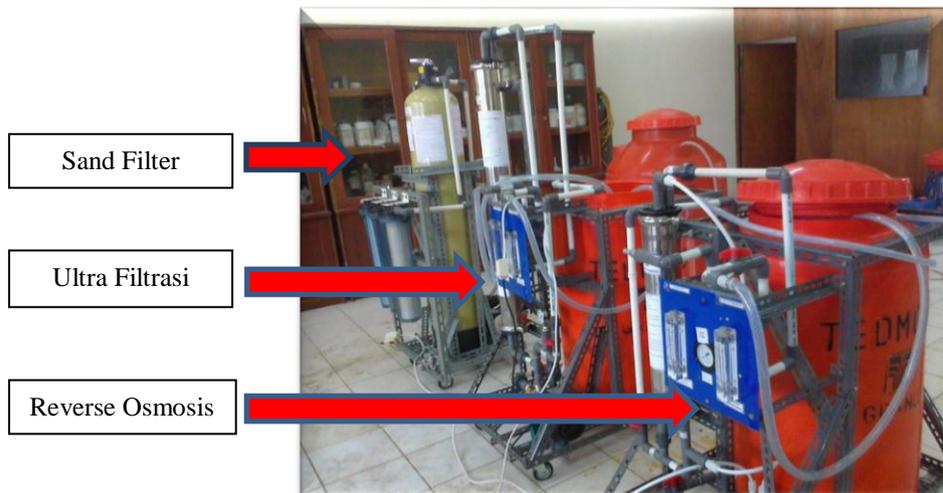
Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah a) Saringan pasir cepat (rapid sand filter) yang terdiri dari tabung stainless steel, pasir silika, karbon aktif, pompa sentrifugal, pressure gauge, dan flowmeter; b) Rangkaian Peralatan UF yang terdiri dari hollow fiber membrane, Tabung stainless dengan dimensi: tinggi 150 cm, diameter 10 cm, pompa sentrifugal, flow meter dan pressure gauge dan rangkaian Peralatan RO yang terdiri dari pompa booster, membran RO, sistem pemipaan dan valve, flow meter, dan pressure gauge. Alat ukur dan analisa yang digunakan adalah pH

meter, Turbiditymeter, Electrical Conductivitymeter, Analytical Balance, Spectrofotometer dan Atomic Absorption Spectrophotometer.

Variabel yang diteliti adalah adalah laju alir umpan, tekanan dan waktu operasi. Laju alir umpan menuju rapid sand filter dibuat konstan sesuai dengan tekanan operasi pompa. Tekanan operasi pada ultra filtrasi disetting pada 1, 1,5 dan 2 atm sedangkan waktu operasi ditetapkan selama 1 jam. Laju alir umpan menuju sistem UF divariasikan dari 2.5 sampai 7.5 liter per menit. Produk permeat dianalisis setiap interval waktu 15 menit. Parameter yang diteliti adalah komposisi air asam tambang (feed), TDS, pH, EC, konsentrasi logam-logam berat yaitu Fe dan Mn, serta ion sulfat serta laju alir permeat yang dihasilkan. Sampel ditampung dalam tangki plastik dengan kapasitas 550 L. Pengambilan permeat dilakukan dengan menggunakan gelas ukur bervolume 1000 mL. Untuk keperluan analisis, permeat di tampung dalam botol kaca dengan volume 250 mL. Analisis ion logam dilakukan menggunakan spectrophotometer.

5. Hasil dan Pembahasan

Peralatan yang dirancang dalam penelitian ini dapat dibagi menjadi tiga kelompok seperti terlihat pada Gambar 1 yang terdiri dari:



Gambar 1. Rangkaian Peralatan Sand Filter-Ultrafiltrasi-Reverse Osmosis

1. *Sistem Sand Filtrasi*, yaitu tabung fiber yang dilengkapi dengan tiga buah housing untuk mempersiapkan umpan memasuki sistem ultra filtrasi. Adsorben berupa Rice-husk ash atau Fly-ash ditempatkan dalam cartridge dengan tinggi 20 in dan diameter 2 in. Media pengisi filter terdiri dari silika dari ukuran halus, sedang dan kasar serta karbon aktif di bagian atas filter. Berat masing-masing material adalah 20 kg. Tangki Polyethylene dengan kapasitas 250 L untuk menampung sampel. Tabung untuk sand filter terbuat dari fiber berukuran diameter 10 in (25 cm) dan tinggi 54 in (137 cm) dan dilengkapi dengan three gate valve yang berfungsi untuk mengatur debit air masuk, pengurasan, dan sistem penyaluran air yang telah difilter untuk diteruskan ke sistem UF.
2. *Sistem Ultrafiltrasi* berupa housing terbuat dari stainless steel dan dilengkapi dengan membran jenis hollow fiber. Tangki Polyethylene dengan kapasitas 250 L untuk menampung permeat hasil proses UF.

3. *Sistem Reverse Osmosis* berupa tabung stainless steel yang dilengkapi dengan membran RO merek CSM (Korea). Tangki Polyethylene dengan kapasitas 250 L digunakan untuk menampung permeat. Sistem peralatan telah selesai diinstalasi dan terlihat pada Gambar 1.

5.1 Komposisi Sampel Air Asam Tambang

Air asam tambang yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari lokasi penambangan batubara PTBA. Hasil analisis air asam tambang yang digunakan ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1
Komposisi Sampel Air Asam Tambang

No	Parameter	Satuan	Nilai	Standar Air Gol.I	KepmenLH No 113/2003
1.	Kekeruhan (turbidity)	NTU	35,3	-	
2.	TDS	Mg/L	1650	1000	
3.	TSS	Mg/L	14,2	50	400
4.	pH	-	3,93	6-9	6-9
5.	Besi	Mg/L	0,808	0.3	7
6.	Mangan	Mg/L	10,35	0,1	4
7.	Sulfat	Mg/L	1340,9	400	
8.	Aluminium	Mg/L	1,603	-	

Hasil analisis air asam tambang memperlihatkan nilai TDS, pH, Ion besi, mangan, aluminium serta sulfat yang cukup tinggi. Air limbah industri batubara diatur dengan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 113/2003 yang mensyaratkan pH 6-9, TSS maksimum 400 mg/L, besi total 7 mg/L, dan Mangan total 4 mg/L sedangkan untuk Al dan sulfat tidak diatur secara khusus.

5.2 Pengaruh Waktu Operasi

Dua adsorben digunakan pada proses filtrasi umpan sebelum memasuki sistem UF yaitu abu sekam padi dan fly- ash. Tabel 2 dan 3 menampilkan hasil yang diperoleh setelah waktu operasi berturut turut 15, 30, 45 dan 60 menit.

Pada proses filtrasi dengan sand filter menunjukkan bahwa terjadi kenaikan pH dari pH awal 3,93 menjadi 6,0 dan terjadi penurunan TDS yang cukup signifikan dari 1650 mg/L menjadi 872,5 yaitu sekitar 47.12%. Pada filtrasi menggunakan UF dan RO kenaikan terjadi peningkatan pH yang signifikan. Kadar TDS permeat mengalami penurunan sekitar 4% UF namun mengalami penurunan yang signifikan pada RO menjadi 98.78%. Kenaikan TDS pada sistem UF disebabkan karena sebagian partikel abu sekam padi lolos dari sistem sand Filter.

Pada proses filtrasi dengan sand filter/ fly- ash terjadi kenaikan pH dari pH awal 3,93 menjadi 5.8 yaitu sekitar 32%. Penggunaan adsorben fly-ash mampu menaikkan pH umpan, namun permeat yang dihasilkan masih bersifat asam. Terjadi penurunan TDS yang cukup signifikan dari 1650 mg/L menjadi 884 yaitu sekitar 46.42%. Pada filtrasi menggunakan UF dan RO terlihat pH permeat naik menjadi 6.13 dan 6.7. Kadar TDS permeat mengalami penurunan sekitar 46.63% pada UF dan pada RO menjadi 99.4%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem filtrasi telah berjalan dengan sangat baik. Permeat hasil pengolahan air asam tambang dengan sistem yang dirancang telah mampu menetralkan pH air asam tambang dan menurunkan TDS dengan signifikan.

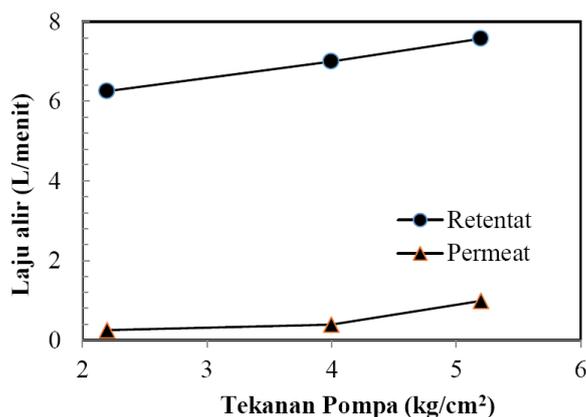
Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pada sistem filtrasi awal abu sekam padi mempunyai daya adsorpsi yang lebih baik dari fly-ash.

Tabel 2
Karakteristik Permeat dan retentat pada SF, U dan RO dengan adsorben Rice-husk Ash dan Fly-ash

Rice husk ash					Fly-ash			
Sand Filter								
Waktu (menit)	Permeat (L/menit)	Retentat (L/menit)	TDS (mg/L)	pH (-)	Permeat (L/menit)	Retentat (L/menit)	TDS (mg/L)	pH (-)
15	3.0	0	740	6.0	3.3	0	889	5.6
30	3.0	0	883	6.0	3.3	0	884	5.8
45	3.0	0	915	6.0	3.3	0	882	5.8
60	3.0	0	952	6.0	3.3	0	881	5.8
Ultrafiltrasi								
15	2.5	9.2	895	6.0	2.5	9.8	887	6.0
30	2.5	9.2	905	6.0	2.5	9.8	884	6.1
45	2.5	9.2	907	6.0	2.5	9.0	877	6.2
60	2.5	9.2	908	6.0	2.5	9.0	874	6.2
Reverse Osmosis								
15	0.10	2	11	6.0	0.28	6.9	4	6.5
30	0.11	2	11	6.0	0.27	7.0	4	6.7
45	0.12	2	11	6.0	0.25	7.1	6	6.7
60	0.12	2	11	6.0	0.26	6.9	6	6.9

5.3 Pengaruh Tekanan Operasi

Tekanan operasi pompa memegang peranan penting dalam sistem operasi membran. Peningkatan tekanan operasi dapat meningkatkan fluks permeat dan retentat yang dihasilkan. Gambar 4 berikut memperlihatkan pengaruh tekanan operasi terhadap laju alir pada sistem pengolahan air asam tambang sintesis menggunakan Sand Filter, UF dan RO.



Gambar 4. Pengaruh Tekanan terhadap Laju Alir Permeat dan Retentat

5.4 Penurunan Kadar Sulfat, Mangan, dan Besi

Tabel 4 memperlihatkan persentase penurunan kadar sulfat, mangan dan besi baik pada UF maupun RO. Terjadi penurunan yang signifikan terhadap kandungan sulfat, mangan, dan besi dalam tiap tahapan proses bila dibandingkan dengan kadar sulfat,

mangan dan besi dalam sampel awal. UF dan RO menampilkan hasil yang sangat baik dalam menurunkan ketiga parameter tersebut. Tentunya hasil yang sangat baik ini disebabkan sampel telah mengalami pretreatment terlebih dahulu sebelum dialirkan ke sistem UF yang juga bertindak sebagai pretreatment untuk sistem RO.

Tabel 4
Penurunan Kadar Sulfat, Mangan dan Besi pada UF dan RO

Run	Ultrafiltrasi			Run	Reverse Osmosis				
	Permeat (L/menit)	Penurunan (%)			Permeat (L/menit)	Penurunan (%)			
		Sulfat	Mangan	Besi		Sulfat	Mangan	Besi	
1	-	78,47	92,27	98,76	1	-	98,97	99,71	96,29
2	-	76,71	99,90	98,76	2	-	99,18	99,81	98,76
3	-	76,54	97,97	98,76	4	7,57	98,83	99,81	98,76
4	-	75,11	96,52	98,76	12	6,25	98,20	99,71	98,76
12	3,50	70,15	93,14	33,17	12	7,00	99,88	99,61	97,52
17	7,25	95,10	90,05	97,52	12	7,00	99,94	99,61	97,52
19	4,50	92,89	97,87	96,29	17	7,57	99,94	99,90	97,52
22	4,25	81,59	89,37	50,50	15	6,25	99,98	98,94	96,29

Kenaikan tekanan operasi pada sistem RO akan meningkatkan laju alir permeat dan retentat. Permeat juga memperlihatkan kualitas yang sangat baik jika ditinjau dari pH, TDS dan EC.

6. Kesimpulan dan Saran

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa perancangan sistem pengolahan air asam tambang skala semi pilot plant telah menunjukkan kinerja yang baik dalam meningkatkan nilai pH dan menurunkan kadar sulfat, mangan dan besi. Penggunaan rice husk ash dalam sistem pengolahan AAT yang dirancang dapat menaikkan pH air asam tambang sampai 6.0 sedangkan fly-ash dapat meningkatkan pH sampai 6.9. Permeat hasil pengolahan tahap akhir dengan sistem RO memiliki pH antara 6.2 - 6.9 sehingga memenuhi syarat air bersih. Namun demikian masih diperlukan analisis kimia lengkap untuk memastikan bahwa air asam tambang selain memenuhi syarat dibuang ke perairan juga aman untuk dijadikan air bersih bahkan air minum. Hal yang masih menjadi kekhawatiran adalah kemungkinan adanya senyawa arsen dari arsenopirit yang terkandung dalam air asam tambang.

Daftar Pustaka

- Baker, R.W., (2004). *Membrane Technology and Applications*, 2nded John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- Buzzi, D.C, Viegas, L.S., Rodrigues, M.A.S., Bernardes, A.M., & Tenório, J.A.S., (2013), Water recovery from acid mine drainage by electrodialysis. *Minerals Engineering*, 40, 82–89.
- Cséfalvay, E., Pauer, V., & Mizsey, P., (2009). Recovery of copper from process waters by nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination*, 240, 1–3, 132-142.
- Costello, C (2003). *Acid Mine Drainage : Innovative Treatment Technologies*, U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office Washington DC.

- Johnson, D. B., & Hallberg, K.B., (2005). Acid mine drainage remediation options: a review. *Science of the Total Environment*, 338, 3– 14.
- Luptakova, A., Ubaldini, S., Macingova, E., Fornari, P., & Giuliano, V., (2012). Application of physical–chemical and biological–chemical methods for heavy metals removal from acid mine drainage. *Process Biochemistry*, 47, 11, 1633–1639.
- Mohan, D & Chander, S., (2006). Removal and recovery of metal ions from acid mine drainage using lignite-A low cost sorbent. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 3, 1545-1553.
- Nasir, S., (2007). *Membrane Performance and Build-up of Solute in Small scale of Reverse Osmosis*, PhD Thesis, Curtin University of Technology, Australia.
- Petala, M., Tsiridis, V., Samaras, P., Zouboulis, A., & Sakellaropoulos, G.P., (2006). Wastewater reclamation by advanced treatment of secondary effluents. *Desalination*, 195, 1-3, 109-118.
- Ríos, C.A, Williams, C.D., & Roberts, C.L., (2008). Removal of heavy metals from acid mine drainage (AMD) using coal fly ash, natural clinker and synthetic zeolites. *Journal of Hazardous Materials*, 156, 1–3, 23–35.
- Shao, E., Wei, J., Yo, A., & Levy, R., (2009). Application of Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Mine Waste Water Reuse. *Water in Mining*, Perth, Western Australia.
- Skousen, J et-al (1998). *Handbook of Technologies for Avoidance and Remediation of Acid Mine Drainage*, The National Mine Land Reclamation Centre, Morgantown, West Virginia.
- Toze, S., (2006). Reuse of effluent water--benefits and risks, *Agricultural Water Management* Special Issue on Water Scarcity: Challenges and Opportunities for Crop Science, 80, 1-3, 147-159.
- Vela, M.C.V., Blanco, S. A., García, J.L., Gozávez-Zafrilla, J.M., & Rodríguez. E.B., (2007). Modelling of flux decline in crossflow ultrafiltration of macromolecules: comparison between predicted and experimental results. *Desalination*, 204, 1–3, 328–334.
- Watzlaf, G.R., Schroeder, K.T., Kleinmann, R.L.P., Kairies, C.L., & Nairn, R.W., (2004). *The Passive Treatment of Coal Mine Drainage*, DOE/NETL-2004/1202, U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory Pittsburgh, PA.