

Kombinasi Elektrodialisis dan Presipitasi dalam *Recovery* Amonium dan Fosfat dari Limbah Urin

Riang Ursada dan Arseto Yekti Bagastyo

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: bagastyo@enviro.its.ac.id

Abstrak—Urin manusia menjadi penyumbang nutrisi terbesar pada air limbah domestik dengan kandungan fosfor 50% dan nitrogen 80% padahal volumenya hanya 1% dari total volume limbah domestik. Urin yang terpisah berpotensi menjadi sumber nutrisi terbarukan. Presipitasi *struvite* ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) adalah pendekatan yang efisien dan sederhana untuk pemulihan nutrisi dari urin. Dalam penelitian ini dilakukan kombinasi elektrodialisis dan presipitasi dalam *recovery* amonium dan fosfat dari limbah urin sintetis dengan variasi kuat arus dan pH untuk presipitasi. Elektrodialisis menggunakan reaktor skala laboratorium yang terbuat dari bahan akrilik dengan 3 kompartemen. Elektrodialisis menggunakan anoda karbon dan katoda *stainless steel* yang terhubung dengan DC Power Supply. Hasil konsentrat elektrodialisis kemudian dipresipitasi dengan jar test volume aktif $10 \times 10 \times 14$ cm³ berbahan akrilik. Uji presipitasi *struvite* menggunakan variabel bebas yaitu variasi kuat arus 450 mA, 1150 mA, 1350 mA dan pH 9; 9,3; 9,5. variabel kontrol yaitu kecepatan pengadukan 158 rpm dengan waktu pengadukan 60 menit. Didapatkan kuat arus listrik optimum adalah 450 mA dengan persen *removal* amonium 36,64% dan persen *removal* fosfat 16,18%. pH presipitasi optimum terjadi pada pH 9,5. Presipitat yang diprediksi terbentuk selain *struvite* adalah *brucite*, *trimagnesium phosphate*, dan *newberyite*.

Kata Kunci—Elektrodialisis, *Recovery*, *Struvite*, Urin.

I. PENDAHULUAN

MENGOLAH air limbah domestik untuk dapat digunakan kembali sebagai air minum, irigasi dan manufaktur biasanya mahal terhitung mengkonsumsi 3% listrik global dan 5% emisi gas rumah kaca non-karbon dioksida global [1]. Urin manusia menjadi penyumbang nutrisi terbesar pada air limbah domestik dengan kandungan fosfor 50% dan nitrogen 80% padahal volumenya hanya 1% dari total volume limbah domestik [2]. Urin tidak hanya menyumbangkan banyak nutrisi tetapi juga mikropolutan berbahaya ke air limbah perkotaan. Pengumpulan dan pemisahan urin adalah cara yang mungkin untuk reformasi pengolahan air limbah. Pemisahan urin memiliki beberapa keuntungan antara lain mengurangi beban pengolahan air limbah, memungkinkan adanya daur ulang nutrisi ke pertanian serta mengeliminasi mikropolutan [3].

Di seluruh dunia, sekitar 50-60% dari kebutuhan pupuk fosfor dipenuhi oleh pupuk mineral [4]. Namun, mineral fosfor merupakan sumber daya terbatas dan persediaannya diprediksi mencapai puncak pada tahun 2030. Salah satu teknik menjanjikan yang banyak dipelajari menghilangkan fosfor dari air limbah adalah presipitasi *struvite* [5]. *Struvite* adalah endapan yang membentuk $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [6]. Presipitasi *struvite* ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) dari urin adalah

pendekatan yang efisien dan sederhana untuk menghasilkan butiran pupuk fosfor [7]. Elektrodialisis cocok digunakan untuk pemulihan fosfor dari limbah cair [8]. Penelitian *recovery* amonium dan fosfat memanfaatkan elektrodialisis yang terintegrasi dengan presipitasi *struvite* telah dilakukan dan menunjukkan efisiensi yang tinggi [9].

Penelitian ini menggunakan variasi arus listrik sebab pada proses elektrodialisis arus listrik dapat mempengaruhi medan listrik dalam membran sehingga mempengaruhi proses *recovery* [9]. Keberhasilan kristalisasi *struvite* dipengaruhi oleh beberapa parameter. Di antara yang diketahui sangat penting adalah pH, konsentrasi magnesium, keberadaan ion asing, dan waktu retensi [5]. Pada penelitian ini digunakan variasi pH. Penelitian terdahulu menunjukkan semakin tinggi pH urin maka laju penurunan fosfat semakin tinggi dari 8,5 hingga pH 9 dan kemudian menurun setelah mencapai pH 9,5 pada pembentukan kristal *struvite* [10]. Terjadinya pembentukan kristal *struvite* ada pada range pH 8-9,5 [11].

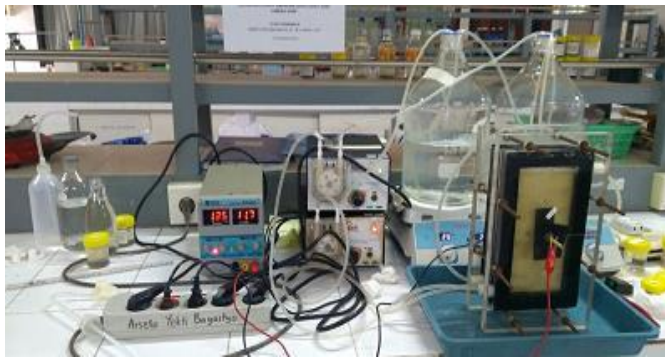
Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh arus listrik dan pH untuk presipitasi pada efisiensi *recovery* amonium dan fosfat dari limbah urin menggunakan teknologi elektrodialisis dan presipitasi. Serta mengkaji pengaruh arus listrik dan pH untuk presipitasi pada pembentukan *struvite* dari limbah urin menggunakan teknologi kombinasi elektrodialisis dan presipitasi.

II. METODE PENELITIAN

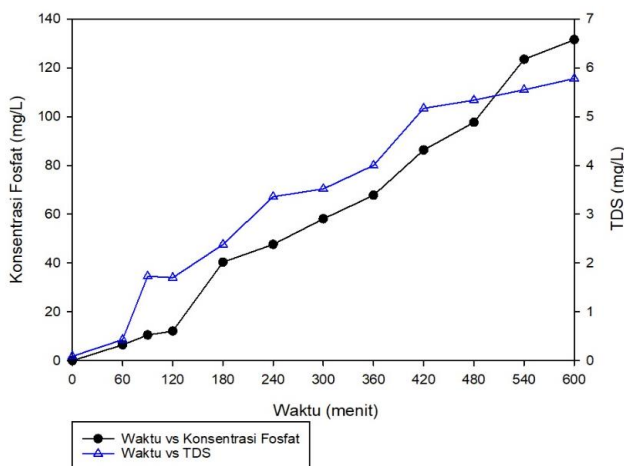
A. Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan yang dilakukan sebelum melakukan penelitian utama adalah penelitian penentuan variasi kuat arus listrik elektrodialisis dan penelitian waktu operasi elektrodialisis. Reaktor elektrodialisis berupa sistem batch dengan 3 kompartemen. Pada kompartemen tengah yang merupakan kompartemen konsentrat dan elektrolit aquades berbentuk balok dengan ukuran panjang x lebar x tinggi total adalah 10 cm x 1 cm x 20 cm (± 200 ml). Pada kompartemen anoda dan katoda yang juga merupakan komponen feed berukuran panjang x lebar x tinggi total adalah 10 cm x 2 cm x 20 cm (± 400 ml). Membran yang digunakan pada penelitian ini yaitu CEM CMI-7000S dan AEM AMI-7001S. Membran direndam terlebih dahulu pada larutan NaCl 5% selama 24 jam.

Variasi kuat arus listrik ditentukan melalui uji penentuan range kuat arus listrik menggunakan variabel bebas kuat arus listrik dan variabel terikat voltase DC Supply. Range kuat arus listrik digunakan untuk penentuan variasi adalah 0-2000 mA dengan kenaikan 50 mA setiap 5 menitnya. Kemudian



Gambar 1. Rangkaian elektrodialisis.



Gambar 2. Hubungan TDS, konsentrasi fosfat (PO_4^{3-}) dan waktu.

diukur TDS tiap sampel untuk diambil tiga nilai kenaikan TDS tertinggi pada konsentrat. Penentuan waktu operasional elektrodialisis pada penelitian ini dilakukan dengan target kenaikan fosfat tertinggi pada tangki produk dengan satu variasi kuat arus listrik. Sampel diambil setiap 60 menit sekali dengan maksimal waktu 10 jam. Rangkaian elektrodialisis tertera pada Gambar 1.

B. Penelitian Utama

Penelitian utama dilakukan dengan sistem batch. Variabel yang digunakan yaitu arus listrik dan pH untuk presipitasi. Elektrodialisis dioperasikan dengan waktu dan variasi arus listrik yang didapatkan dari penelitian pendahuluan. Setelah itu, semua konsentrat pada elektrodialisis dipindah pada tangki presipitasi. Presipitasi dilakukan dengan pengadukan *jar test* dengan penambahan $MgCl_2$ dan pH dikondisikan sesuai variasi yaitu 9; 9,3; dan 9,5. Volume sampel limbah urin dioperasikan tiap batch adalah 3,5 L. Endapan yang terbentuk kemudian di saring dengan kertas saring 0,45 μm . Endapan tersaring dikeringkan dalam suhu ruang selama 48 jam [12-13]. Untuk memprediksi presipitat yang terbentuk digunakan *software* Visual MINTEQ versi 3.1. Karakteristik urin sintetis pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Kuat Arus Listrik dan Waktu Operasi Elektrodialisis

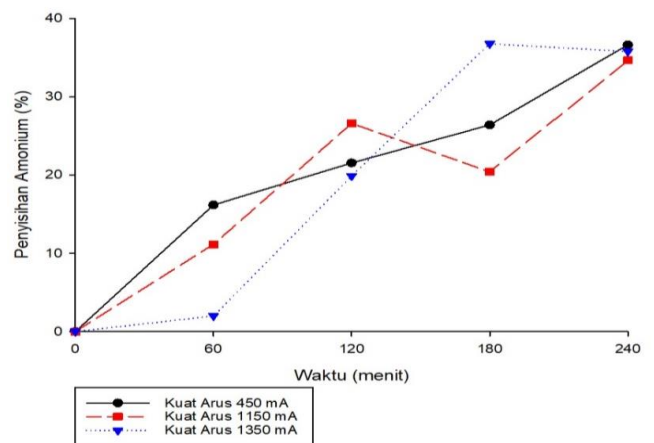
TDS dapat menjadi indikator jumlah ion pada larutan. Kenaikan tertinggi TDS terjadi pada kuat arus listrik 450 mA (0,58 mg/L), 1150 mA (0,49 mg/L), dan 1350 mA (0,66 mg/L). Dengan luas membran yang digunakan yaitu 10 x 20

Tabel 1. Karakteristik urin sintetis

Parameter	Satuan	Rata-Rata terpakai
NH_4-N	mg/L	608,2 ± 88
PO_4-P	mg/L	689,16 ± 5
Mg^{2+}	mg/L	252,35 ± 27
Ca^{2+}	mg/L	238,07 ± 60
pH	-	5,93 ± 0,42
COD	mg/L	770,00 ± 99

Tabel 2. Variasi kuat arus listrik

Variasi	Kuat Arus Listrik (mA)	Kerapatan Arus Listrik (mA/cm ²)
1	450	2,25
2	1150	5,75
3	1350	6,75



Gambar 3. Penyisihan amonium (NH_4^+) proses elektrodialisis.

cm, maka kerapatan kuat arus listrik adalah sebagaimana Tabel 2.

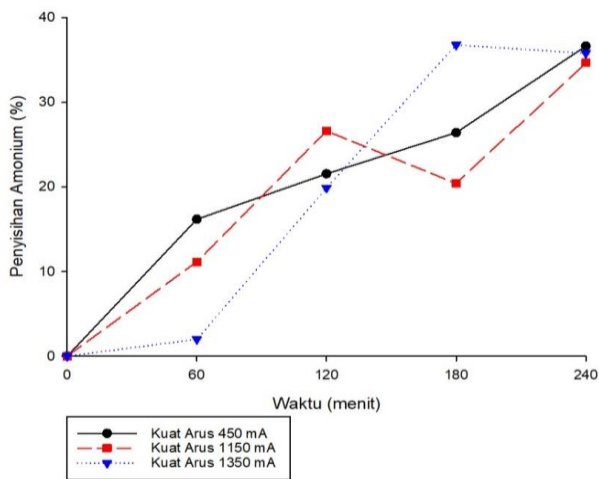
Penentuan waktu operasi elektrodialisis dilakukan dengan mengoperasikan elektrodialisis menggunakan variasi 3 selama 10 jam dengan pengambilan sampel tiap 60 menit dari tangki feed dan tangki produk. Analisis yang dilakukan adalah analisis fosfat, dicari kenaikan fosfat tertinggi pada produk. Hasil dari penelitian pendahuluan penentuan waktu operasi elektrodialisis ditunjukkan pada Gambar 2.

Kenaikan fosfat tertinggi pada produk terjadi pada waktu 180 menit atau 3 jam yaitu sebesar 28,25 mg/L. Dilakukan penambahan waktu 60 menit dari waktu kenaikan fosfat tertinggi karena ingin mendapatkan konsentrasi fosfat yang lebih tinggi, sehingga dalam penelitian ini waktu operasi elektrodialisis adalah selama 4 jam.

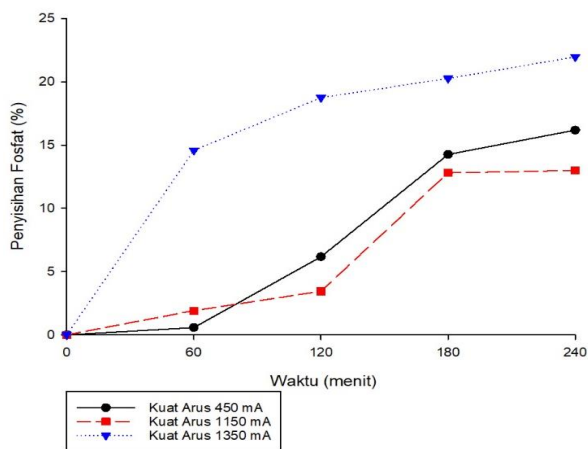
B. Efisiensi Proses Elektrodialisis

Dilihat pada Gambar 3, didapatkan persen penyisihan ketiga variasi kuat arus listrik tidak terlalu jauh berbeda dengan simpangan baku tidak mencapai 1%. Pada variasi arus listrik 450 mA, penyisihan amonium fluktuatif. Penyisihan amonium terbesar terjadi pada akhir proses elektrodialisis, amonium tersisihkan sebesar 36,64% (335,18 mg/L dari 914,85 mg/L). Sedangkan pada variasi arus listrik 1150 mA, penyisihan amonium terbesar adalah 34,65% (276,03 mg/L dari 796,55 mg/L). Ini menjadi penyisihan paling kecil dibanding variasi kuat arus lainnya. Penyisihan amonium pada variasi arus listrik 1350 mA yaitu sebesar 35,79% (177,45 mg/L dari 495,87 mg/L).

Oksidasi terjadi di kompartemen anoda. Pada anoda di mana amonia dapat didekomposisi menjadi nitrogen gas yang

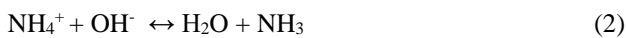


Gambar 4. Konsentrasi nitrat (NO₃⁻) di feed proses elektrodialisis.

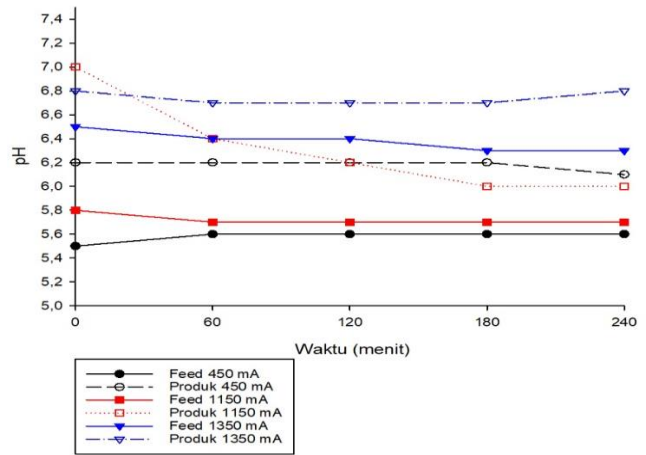
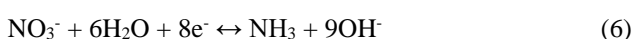
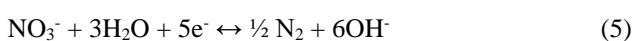
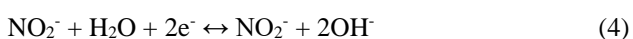
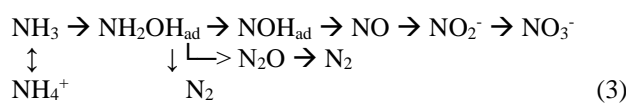


Gambar 5. Penyisihan fosfat (PO₄³⁻) proses elektrodialisis.

ditunjukkan pada persamaan 3, gas oksigen dan elektron juga dapat berevolusi dari pemisahan air pada persamaan 1. Hubungan antara pH, gas (udara) dan suhu dapat mempengaruhi bentuk amonium dalam air. Pada pH di atas 9,3 ion amonium dapat berubah menjadi gas amonia. Reaksi kesetimbangan amonium dan amonia ditunjukkan pada persamaan 2.



Prediksi reaksi yang terjadi sehingga terdapat kenaikan dan penurunan nitrat yang terlihat pada Gambar 4 yaitu amonia diketahui dapat dioksidasi melalui beberapa langkah rumit menjadi berbagai senyawa nitrogen seperti sebagai gas nitrogen dan NO_x, dan bahkan ion nitrat pada keadaan oksidasi tertinggi, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3. Ion nitrat dan nitrit, yang dapat dihasilkan selama dekomposisi amonia pada anoda, dapat direduksi kembali menjadi nitrogen, nitrogen oksida, dan bahkan amonia di katoda [14] sesuai dengan persamaan 4 hingga 9.



Gambar 6. pH Proses Elektrodialisis.

Tabel 3.

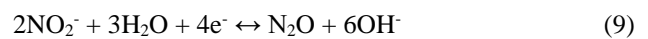
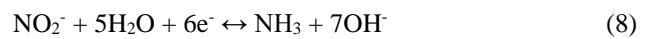
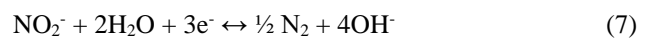
Nilai COD (mg/L) urin hasil proses elektrodialisis

Waktu (menit)	450 mA	1150 mA	1350 mA
0	630	840	840
240	420	630	630

Tabel 4.

Konsumsi penyisihan amonium proses elektrodialisis

Arus Listrik	Konsumsi Energi Proses (Wh/L)	% Removal Amonium	Amonium Tersisihkan (gram)	Amonium Tersisihkan / Konsumsi Energi
450	3,2914	36,6379	1,1731	0,3566
1150	12,4857	34,6535	0,9661	0,0774
1350	15,4285	35,7853	0,6211	0,0403



Penurunan ion nitrat dalam mode arus yang melampaui batas disebabkan oleh perubahan komposisi dan aktivitas katalitik dari fungsi kelompok membran penukar anion terhadap disosiasi molekul air karena pengaruh ion amonium. Gambar 5 menunjukkan penyisihan fosfat pada proses elektrodialisis.

Pada variasi arus listrik 450 mA, penyisihan fosfat tertinggi terjadi pada akhir proses elektrodialisis tetapi hanya sebesar 16,18% (338,98 mg/L dari 2.094,43 mg/L). Sedangkan pada variasi arus listrik 1150 mA penyisihan fosfat terbesar terjadi pada akhir proses elektrodialisis yaitu 13,00% (274,41 mg/L dari 2.110,57 mg/L). Pada variasi kuat arus listrik 1350 mA, penyisihan fosfat tertinggi pada akhir waktu proses yaitu sebesar 21,97% (468,119 mg/L dari 2.130,75 mg/L). Ketiga variasi kuat arus listrik ini memiliki simpangan baku penyisihan fosfat yang tidak besar yaitu hanya 3,71%.

Fosfat memiliki nilai difusitas ionik yang rendah yaitu 0,759 (10⁻⁵cm²/s), sedangkan amonium sebesar 1,334 (10⁻⁵cm²/s) dan anion lain dalam urin seperti Cl⁻, HCO₃⁻, atau CH₃COO⁻ memiliki nilai difusitas ionik yang lebih tinggi daripada fosfat yaitu lebih dari 1 (10⁻⁵cm²/s) [15]. Ini menyebabkan mengapa penyisihan fosfat lebih rendah dibandingkan dengan amonium. Magnesium merupakan ion positif sehingga memiliki kemungkinan untuk berpindah dari urin ke produk melalui membran penukar kation. Kemampuan membran melewatkan ion magnesium dapat

Tabel 5.
Konsumsi penyisihan fosfat proses elektrodialisis

Arus Listrik	Konsumsi Energi Proses (Wh/L)	% Removal Fosfat	Fosfat Tersisihkan (gram)	Fosfat Tersisihkan / Konsumsi Energi
450	3,2914	16,1850	1,1864	0,3606
1150	12,4857	13,0019	0,9605	0,0769
1350	15,4285	21,9697	1,6384	0,1062

Tabel 6.
Massa endapan (gram) hasil proses presipitasi

pH	450 mA	1150 mA	1350 mA
9	-*	0,1786	0,0447
9,3	-*	0,2232	0,0216
9,5	-*	1,0552	0,0897

*=Tidak ada data

Tabel 7.
Prediksi hasil proses presipitasi kuat arus 450 mA

Mineral	Indeks Saturasi		
	pH 9	pH 9,3	pH 9,5
<i>Brucite</i>	-1.198	-0.596	-0.194
Mg(OH) ₂ (active)	-2.892	-2.290	-1.888
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	3.618	4.204	4.583
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	0.391	0.383	0.372
<i>Periclase</i>	-5.682	-5.079	-4.678
<i>Struvite</i>	2.467	2.639	2.720

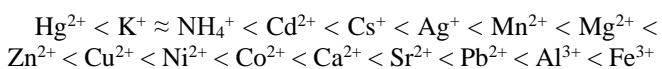
Tabel 8.
Prediksi hasil proses presipitasi kuat arus 1150 mA

Mineral	Indeks Saturasi		
	pH 9	pH 9,3	pH 9,5
<i>Brucite</i>	-0.848	-0.247	0.153
Mg(OH) ₂ (active)	-2.542	-1.941	-1.541
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	3.813	4.389	4.760
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	0.310	0.297	0.283
<i>Periclase</i>	-5.331	-4.730	-4.330
<i>Struvite</i>	2.307	2.480	2.561

Tabel 9.
Prediksi hasil proses presipitasi kuat arus 1350 mA

Mineral	Indeks Saturasi		
	pH 9	pH 9,3	pH 9,5
<i>Brucite</i>	-0.952	-0.352	0.048
Mg(OH) ₂ (active)	-2.646	-2.046	-1.646
Mg ₃ (PO ₄) ₂ (s)	3.378	3.954	4.325
MgHPO ₄ ·3H ₂ O(s)	0.145	0.133	0.120
<i>Periclase</i>	-5.435	-4.835	-4.435
<i>Struvite</i>	1.740	1.912	1.992

dilihat dari tingkat afinitas elektron. Afinitas elektron merupakan energi yang dilepaskan oleh atom ketika suatu elektron ditambahkan kedalam suatu molekul [16]. Membran akan bekerja lebih baik jika ion yang ada pada larutan memiliki afinitas lebih kecil daripada membran, ion dengan afinitas yang lebih besar daripada membran akan lebih sulit dilewatkan [17]. Urutan afinitas beberapa kation umum yaitu



Hal ini dapat menjadi landasan prediksi mengapa ion magnesium lebih sedikit terbentuk di produk dibandingkan dengan ion amonium yang memiliki tingkat afinitas lebih kecil.

Adanya perubahan pH pada Gambar 6 membuktikan bahwa ada aktifitas perpindahan ion pada proses elektrodialisis. Adanya reaksi sederhana pada membran tukar anion yang melewatkan ion negatif akan menyebabkan laju perpindahan ion-ion H⁺ dan OH⁻. Laju perpindahan tersebut akan meningkat jika ada peningkatan arus listrik. Penurunan

nilai pH pada urin juga dapat menjadi indikasi adanya pembentukan endapan. Endapan berwarna putih terjadi di kompartemen katoda.

Tabel 3 menunjukkan perubahan nilai COD urin. COD urin hasil dari proses elektrodialisis masih belum memenuhi baku mutu air limbah domestik menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 68 Tahun 2016 yaitu sebesar 100 mg/L.

C. Konsumsi Energi Elektrodialisis

Konsumsi energi penyisihan amonium dan penyisihan fosfat dapat dilihat pada Tabel 4 dan 5. Konsumsi energi pada kuat arus listrik 450 mA menunjukkan efisiensi yang paling tinggi. Konsumsi energi akan semakin rendah jika luas permukaan membran digunakan semakin besar dan sebaliknya [18].

D. Efisiensi Proses Presipitasi

Pada penelitian ini, digunakan kristal MgCl₂ sebagai sumber tambahan magnesium efluen elektrodialisis. Larutan NaOH 4% digunakan untuk menaikkan pH konsentrat hingga

sesuai dengan variasi. Volume NaOH rata-rata digunakan untuk menaikkan pH larutan konsentrat 1 L adalah 4 hingga 7 mL. Fosfat terukur pada penelitian ini adalah sebagai PO_4 . Rasio $\text{Mg}:\text{PO}_4$ digunakan adalah 20:1. Dari besar massa endapan yang dihasilkan yang ditunjukkan pada Tabel 6, didapatkan massa terbesar ada pada pH 9,5. Sehingga terpilih pH optimum adalah 9,5.

Analisis endapan juga dapat dilakukan dengan memasukkan informasi komponen larutan dan pH ke aplikasi MINTEQ. Hasil permodelan menggunakan Visual MINTEQ dapat dilihat pada Tabel 7, 8, dan 9. Indeks saturasi >0 menunjukkan *oversaturation* atau jenuh dan mineral mungkin mengalami pengendapan. Sedangkan indeks saturasi <0 berarti *undersaturation* atau kurang jenuh dan mineral akan larut. Dan indeks saturasi = 0 menunjukkan kejenuhan dan mineral berada dalam status kesetimbangan terhadap larutan. Nilai indeks saturasi *struvite* semakin meningkat dari pH 9 hingga pH 9,5. Hasil permodelan menunjukkan bahwa selain *struvite* endapan yang dapat terbentuk adalah *brucite* ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) pada pH 9,5, *trimagnesium phosphate* ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$), dan *newberyite* ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Ketiga mineral ini akan menyebabkan removal amonium semakin menurun karena magnesium tidak berikatan dengan amonium sehingga semakin sedikit pula *struvite* terbentuk.

Dari indeks saturasi dapat diprediksi bahwa endapan *trimagnesium phosphate* akan terbentuk lebih banyak daripada *struvite*. Perbandingan *trimagnesium phosphate* dan *struvite* terbentuk berbedanya di setiap variasi arus listrik. Pada kuat arus listrik 450 mA, *trimagnesium phosphate* terbentuk 1,5 hingga 1,7 kali lebih banyak dari pada *struvite*. Pada kuat arus 1150 mA, *trimagnesium phosphate* terbentuk 1,7 hingga 1,9 kali lebih banyak dari pada *struvite*. Dan pada kuat arus 1350 mA, *trimagnesium phosphate* terbentuk 1,9 hingga 2,2 kali lebih banyak dari pada *struvite*. Ini menunjukkan bahwa pembentukan *struvite* terbaik ada pada hasil elektrodialisis kuat arus 450 mA.

Trimagnesium phosphate terbentuk dari 3Mg^{2+} dan 2PO_4^{3-} tanpa berikatan dengan amonium. Sedangkan *struvite* terbentuk dari 1Mg^{2+} , 1PO_4^{3-} , dan 1NH_4^{1+} . Jika dilihat dari perbandingan molaritas $\text{NH}_4:\text{PO}_4$ di produk elektrodialisis, memang lebih besar di kuat arus 450 mA. Pada kuat arus listrik 450 mA, $\text{NH}_4:\text{PO}_4$ didapatkan adalah 17,8:1. Pada kuat arus listrik 1150 mA, $\text{NH}_4:\text{PO}_4$ didapatkan adalah 5,9:1. Pada kuat arus listrik 1350 mA, $\text{NH}_4:\text{PO}_4$ didapatkan adalah 3,2:1. Sehingga pembentukan *struvite* lebih baik terjadi pada hasil produk elektrodialisis kuat arus 450 mA.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut arus listrik berpengaruh pada *removal* amonium dan fosfat. Arus listrik yang terlalu tinggi tidak disarankan karena akan menyebabkan kerapatan arus listrik yang terlalu tinggi pula. Kerapatan arus listrik terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan efisiensi kuat arus serta memungkinkan terjadi kerusakan film membran. Arus listrik optimum dari proses elektrodialisis penelitian ini adalah 450 mA dengan persen *removal* amonium 36,64% dan persen *removal* fosfat 16,18%. pH presipitasi optimum terjadi pada pH 9,5. pH presipitasi berpengaruh pada *removal* amonium dan fosfat.

pH yang tepat akan membuat pengendapan *struvite* secara optimal sehingga terjadi penurunan kadar fosfat dan amonium yang optimal pula.

Arus listrik berpengaruh pada *removal* amonium dan fosfat. Arus listrik yang tepat akan menghasilkan kadar amonium dan fosfat yang optimal pada produk sehingga dapat menyediakan amonium dan fosfat yang maksimal untuk proses presipitasi pembentukan *struvite*. pH untuk presipitasi pada pembentukan *struvite* dari limbah urin dapat mempengaruhi pembentukan *struvite*. pH terlalu rendah membuat pembentukan *struvite* yang rendah, akan tetapi pH terlalu tinggi dapat menyebabkan penguapan amonia sehingga pemulihan amonium tidak optimal. Presipitat yang mungkin terbentuk selain *struvite* antara lain *brucite* ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), *trimagnesium phosphate* ($\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$), dan *newberyite* ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W.-W. Li, H.-Q. Yu, and B. E. Rittmann, "Chemistry: reuse water pollutants," *Nat. News*, vol. 528, no. 7580, p. 29, 2015.
- [2] L. Aljerf and A. E. Choukaife, "The efficient implementation of the Jift as one of the Olive Mill Waste (OMW) in urea extraction from urine," *J. King Abdulaziz Univ.*, vol. 26, no. 1, pp. 97--110, 2015.
- [3] K. M. Udert, T. A. Larsen, M. Biebow, and W. Gujer, "Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system," *Water Res.*, vol. 37, no. 11, pp. 2571--2582, 2003.
- [4] V. Smil, "Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences," *Annu. Rev. energy Environ.*, vol. 25, no. 1, pp. 53--88, 2000.
- [5] S. E. Manahan, *Environmental Science and Technology*. London: Crc Press, 1997.
- [6] N. Marti, A. Bouzas, A. Seco, and J. Ferrer, "Struvite Precipitation assessment in anaerobic digestion processes," *Chem. Eng. J.*, vol. 141, no. 1--3, pp. 67--74, 2008.
- [7] B. Etter, E. Tilley, R. Khadka, and K. M. Udert, "Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal," *Water Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 852--862, 2011, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.007>.
- [8] M. Červenková, J. Chromiková, S. Heviánková, and Z. Wranová, "The Application of Electrodialysis for The Recovery of Phosphorus from Wastewater Sludge Liquid Discharge," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IAD, p. 012007, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/92/1/012007>.
- [9] X. Wang, X. Zhang, Y. Wang, Y. Du, H. Feng, and T. Xu, "Simultaneous recovery of amonium and phosphorus via the integration of electrodialysis with struvite reactor," *J. Memb. Sci.*, vol. 490, pp. 65--71, 2015.
- [10] E. Ariyanto, L. Katerina, and D. S. Dwiyani, "Pengaruh pH dan Rasio Reaktan PO_4 : Mg Terhadap Penurunan Kandungan PO_4 dalam Urine Melalui Proses Pembentukan Struvite Kristal," in *Prosiding Semantik*, 2019.
- [11] F. Mijangos, M. Kamel, G. Lesmes, and D. Muraviev, "Synthesis of struvite by ion exchange isothermal supersaturation technique," *React. Funct. Polym.*, vol. 60, pp. 151--161, 2004.
- [12] W. De Buck, "Struvite Crystallization and Separation in Digested Sludge," Sanitary Engineering Department, Delft University of Technology, 2012.
- [13] A. Rodlia, N. Ikhlas, E. Pandebesie, A. Bagastyo, and W. Herumurti, "The Effect of Mixing Rate on Struvite Recovery from The Fertilizer Industry," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, p. 012013.
- [14] K.-W. Kim, Y.-J. Kim, I.-T. Kim, G.-I. Park, and E.-H. Lee, "The electrolytic decomposition mechanism of ammonia to nitrogen at an IrO_2 anode," *Electrochim. Acta*, vol. 50, no. 22, pp. 4356--4364, 2005.
- [15] R. C. Tice and Y. Kim, "Energy efficient reconcentration of diluted human urine using ion exchange membranes in bioelectrochemical systems," *Water Res.*, vol. 64, pp. 61--72, 2014, [Online]. Available: [doi:10.1016/j.watres.2014.06.037](https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.037).
- [16] A. Tullatif, "Mempelajari senyawa miritrinit dengan penambahan substituen NH_2 , NO_2 , dan CH_3 sebagai inhibitor korosi menggunakan metode Density Functional Theory (DFT)," *CHEMPUBLISH J.*, vol. 5, no. 2, pp. 166--178, 2020.
- [17] D. N. Hikmawati, "Integrasi Proses Elektrodialisis dan Pengendapan

Struvite Untuk Recovery Amonium dan Fosfat Pada Air Limbah Industri Pupuk,” Departemen Perencanaan Wilayah dan Kota, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.

[18] K. M. Chehayeb, D. M. Farhat, and K. G. Nayar, “Optimal design and

operation of electrodialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration.,” *Desalination*, vol. 420, pp. 167--182, 201