

Penggunaan Zeolit Alam Sebagai Alternatif Penangkap Logam Berat pada Air Umpan Boiler: Studi Kasus Pabrik Kelapa Sawit di Riau

Khairul^{1,*}, Ikhlas Hakiki²

¹⁾ Teknik Lingkungan, Sekolah Pascasarjana Ilmu dan Teknologi Multidisiplin, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²⁾ Teknik Mesin, Politeknik Kampar Riau, Indonesia

*) Corresponding author: khairuldiafakhri@gmail.com

Abstrak

Air umpan boiler yang tidak memenuhi standart kualitas dapat menyebabkan gangguan serius pada sistem boiler, seperti korosi, pembentukan kerak (*scaling*), dan penurunan efisiensi perpindahan panas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas zeolite alam sebagai alternatif media filterasi untuk menurunkan kesadahan total (T. Hardness) dan kandungan logam berat pada air umpan boiler di Pabrik Kelapa Sawit (PMKS) di Riau. Metodologi yang digunakan pada penelitian ini adalah pendekatan PDCA (*Plan, Do, Check, Action*) selama 3 bulan, meliputi Identifikasi akar masalah, perancangan dan fabrikasi pipa filtrasi berdiameter 6 Inch dengan panjang total 2.200 mm, aktivasi zeolite dilakukan dengan melalui pemanasan fisik pada suhu $\pm 400^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam. Uji skala laboratorium pada variasi massa zeolit (100, 150 dan 200 gram), serta pemasangan dan pemantauan selama tiga bulan pada jalur *feed tank boiler*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan massa zeolite berbanding lurus dengan kenaikan pH. Filtrasi zeolit mampu menurunkan T. Hardness hingga taraf trace (<2 ppm) dan menurunkan kadar silica sebesar 50% dibandingkan dengan sistem softener konvensional. Pada evaluasi dan observasi lapangan didapatkan tujuh dari sepuluh parameter air umpan boiler menunjukkan hasil lebih baik dibandingkan softener, dan seluruh parameter yang diuji berada dalam batas Standar Operating Procedure (SIP maupun mendekati ambang ASME Section VII. Pengembalian modal awal (*Payback Period*) dalam waktu ± 5 bulan melalui penghematan konsumsi NaCl. Disimpulkan bahwa Zeolite alam terbukti menjadi media filterasi yang efektif, ekonomis dan ramah lingkungan, serta berpotensi menggantikan sebagian fungsi softener konvensional dan bahan kimia seperti P-406 dan NaCl pada sistem pengolahan air umpan boiler di industri kelapa sawit.

Kata kunci: Zeolit Alam; Air Umpan Boiler; Logam Berat; Kesadahan Air; Pabrik Kelapa Sawit

Abstract

Boiler feed water that does not meet quality standard can cause serious issues in boiler system, such as corrosion, scaling, and reduced efficiency. This study aims to evaluate the effectiveness of natural zeolite as an alternative filtration media to reduce hardness and heavy metal content in boiler feedwater at palm oil mill. The methodology employed a PDCA (Plan, Do, Check, Action,) and experimental approach over a period of three months, utilizing physical activation of zeolite at 400°C for 3 hours. Results indicate that increasing the mass of zeolite significantly improves water quality, as evidenced by pH values and reduction in Total Hardness and Silica levels. Natural zeolite has proven to be effective, economical, and environmentally friendly filtration media, capable of partially replacing chemicals such as P-405 and NaCl in boiler water treatment system.

Keywords: Natural Zeolite; Feed Water Boiler; Heavy Metals; Water Hardness; Palm Oil Mill

PENDAHULUAN

Boiler merupakan serangkaian alat yang digunakan pada suatu perusahaan yang menghasilkan uap (*steam*) untuk memenuhi kebutuhan energi mekanis dan listrik dari suatu pabrik. Pada industri kelapa sawit, boiler menjadi salah satu unit vital karena *steam* yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan turbin serta proses pengolahan tanda buah

segar (TBS). Perusahaan kelapa sawit di Indonesia menggunakan Boiler sebagai pembangkit uap yang menghasilkan *steam* yang akan menjadi sumber tenaga gerak untuk menggerakkan pabrik dan tenaga listrik. Fungsi utama boiler sendiri adalah mentransfer energi dari bentuk gas panas yang diciptakan melalui bahan bakar hingga mengubah air menjadi uap.

Menurut Zul Alfian, 2004. Air yang berada di pipa boiler dipanaskan sehingga perpindahan panas dari sumber panas tersebut ke air sehingga mengakibatkan air tersebut menjadi panas dan berubah wujud menjadi uap (*steam*). Air Umpan Boiler menjadi salah satu hal yang sangat perlu dan penting untuk diperhatikan. Kebutuhan air umpan boiler dengan parameter dan standart yang ditentukan merupakan langkah yang tepat untuk menjaga boiler tetap aman. Menurut Fatimura, 2008 air yang lebih panas memiliki berat jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan air yang lebih dingin, sehingga terjadi perubahan berat jenis air didalam boiler. Air yang memiliki berat jenis lebih kecil akan naik, dan sebaliknya air yang memiliki berat jenis lebih berat akan turun ke dasar.

Untuk menghasilkan *steam* yang berkualitas tergantung pada pengolahan air boiler yang digunakan untuk mengendalikan kemurnian *steam* dari endapan dan korosi. Pengolahan air boiler merupakan serangkaian unit yang sangat penting untuk menjaga boiler tetap sehat untuk kedepannya. Kinerja boiler, efisiensi, dan umur boiler merupakan hasil langsung dari pengolahan air boiler yang digunakan sebagai uap (*steam*). Analisa *water treatment* merupakan salah satu cara untuk mengetahui seberapa besar zat kimia yang terkandung didalam air umpan boiler. Zat kimia tersebut dijaga pada batas-batas standart sesuai dengan batas minimal dan maksimal untuk mendapatkan *steam* sesuai dengan yang diharapkan.

Akibat dari kurangnya penanganan terhadap air umpan boiler akan menimbulkan masalah-masalah yang cukup serius, yaitu timbulnya kerak, korosi, deposit dan *steam carryover* (terbawanya uap). Berdasarkan penelitian Nasution, 2008 senyawa yang membentuk kerak adalah alkalinitas. Alkalinitas dan kesadahan air disebabkan oleh kalsium karbonat (CaCO_3), magnesium karbonat (MgCO_3). Penyusun alkalinitas adalah anion bikarbonat (HCO_3), karbonat (CO_3), dan hidroksida (OH). Anion bikarbonat menjadi penyebab yang sangat besar dalam pembentukan kerak. Sementara korosi dapat disebabkan oleh oksigen dan karboin dioksida yang terdapat dalam uap yang terkondensasi. Korosi yang sering terjadi pada boiler adalah *uniform corrosion*, *pitting corrosion* (terbentuknya lubang), dan *embrittlement* (peretakan baja). Berdasarkan Fatimura, 2008 masalah korosi

dalam boiler pada pabrik sering terjadi disebabkan oleh air boiler yang tidak di olah dengan baik sehingga dapat memperparah terjadinya korosi dan berakibat boiler meledak.

Zeolit Alam menjadi salah satu penyaring molekul/pemisah yang mempunyai sifat sebagai penyerap ion-ion logam berat penyebab kesadahan air (Pb, Fe, Mn, Zn, Cu, Mg). Penyaringan dengan menggunakan meted fisika ini dapat menjadi solusi yang baik tanpa ada pencampuran bahan kimia air. Di Indonesia tampaknya belum mendapatkan perhatian yang memadai sebagai media filterasi air. Secara geografis, Indonesia terletak pada jalur gunung berapi yang memiliki potensi yang cukup besar.

Tabel 1. Parameter Standar Air Umpan Boiler

Parameter	Nilai
pH	10,5 – 11,5
Total Hardness	<2 ppm
Silica	<2 ppm

Sumber: SOP AAS

Berdasarkan hasil identifikasi akar masalah (*root cause analysis*) di PMKS-Riau, kondisi Total Hardness pada feed tank yang tidak mencapai taraf trace (<2 ppm) disebabkan oleh empat kategori faktor, yaitu faktor operasional (kinerja softener yang kurang optimal, dosis bahan kimia P-406 yang tidak aktual, serta adanya pre-filter fisika), faktor material (media resin yang jenuh dan kualitas air baku yang buruk) serta faktor kolabonrasi lintas fungsi. Kondisi ini mendorong perlunya rekayasa teknik (*Engineering Improvement*) untuk menghasilkan air umpan boiler yang memenuhi standar.

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menurunkan kandungan T. Hardness pada air umpan boiler hingga mencapai taraf trace (<2 ppm) sesuai SOP perusahaan,
2. Mereduksi konsumsi bahan kimia penghambat kerak P-406,
3. Mengeliminasi kebutuhan regenerasi NaCl pada sistem softener, dan
4. Memperpanjang umur pakai pipa boiler dan peralatan internal treatment.

Sebagai pembaharuan dari kajian sebelumnya, penelitian ini juga membandingkan capaian kualitas air umpan boiler hasil filtrasi zeolit terhadap standar internasional ASME Section VII – *Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers* (ASME, 2023). Melakukan analisis biaya – mandaat (*Cost-Benefit Analysis*) yang lebih rinci

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium dan area internal *water treatment* Pabrik Minyak Kelapa Sawit di Riau menggunakan kerangka kerja eksperimen dan *Plan-*

Do-Check-Action (PDCA) selama tiga bulan. Metode ini dipilih sebagai kerangka *Continuous Improvement* untuk memastikan setiap tahap perencanaan, pelaksanaan, verifikasi dan standarisasi dilakukan dengan terdokumentasi dan dapat di replikasikan pada unit pabrik minyak kelapa sawit lainnya. Tahapan penelitian meliputi lima langkah, yaitu:

1. **Plan** – Identifikasi akar masalah T. Hardness air umpan boiler dan penetapan target,
2. **Do** – Pengadaan material, aktivasi zeolit pada suhu 400⁰C selama 3 jam, dan fabrikasi pipa filtrasi 6” x 2.200mm,
3. **Check** - Tahap pertama, pengujian pH, T. Hardness, dan silika pada skala laboratoium dengan variasi massa zeolit 100gram, 150gram, dan 200gram,
4. **Check** – Tahap kedua, pemasangan pada jalur Feed Tank dan pemantauan lapangan selama tiga bulan dengan report,
5. **Action** – Analisis perbandingan dengan softener konvensional, analisis biaya-mandaat, serta standarisasi SOP (Standar Operasional Prosedur) aktivasi berkala.

1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi gelas kimia, Labu Erlenmeyer, batang pengaduk, pH meter digital, furnance/over aktivasi, akuades, dan seperangkat alat uji lapangan berupa test kit T. Hardness dan silica. Bahan utama fabrikasi yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 2.** dibawah ini:

Tabel 2. Bahan dan Komponen Utama Alat Filtrasi Zeolit

No	Item	Spesifikasi	Jumlah
1	Zeolit Alam	Media penukar ion	20 kg
2	Pasir Silica (Sio ₂ >95%)	Pre-Filter partikel tersuspensi (TSS)	2 kg
3	Busa Filter (Sponge Filter)	Pemisah fisik antar media lapisan	1 kg
4	Pipa Baja Schdl 40 Carbon Steel, Ø6"	Tebal 5,8 mm	1 batang
5	Strainer Stainless Steel	Penahan media	1 m
6	Flange DN150 PN16	Sambungan ujung pipa	2 pcs
7	Baut dan Mur M16 × 55	Pengencang Flange	1-6 pcs
8	Cat Epoxy, M16 × 55	Finishing anti-korosi	1 set

a) Batu Zeolit Alam dan Pasir Silica

Zeolit Alam menjadi salah satu penyaring molekul/pemisah yang mempunyai sifat sebagai penyerap ion-ion logam berat penyebab kesadahan air (Pb, Fe, Mn, Zn, Cu, Mg).

Penyaringan dengan menggunakan meted fisika ini dapat menjadi solusi yang baik tanpa ada pencampuran bahan kimia air.



Gambar 1. Zeolit Alam dan Pasir Silica

Pasir silica dikenal sebagai item yang baik dalam proses penyaringan air. Kandungan dalam pasir silica mampu menahan dan menyeram beberapa kandungan yang tidak baik didalam air. Penggunaan pasir silica ini sama hal nya dengan penggunaan pasir pada sand filter yang berada pada *Water Treatment*.

b) Pipa Baja Carbon Steel

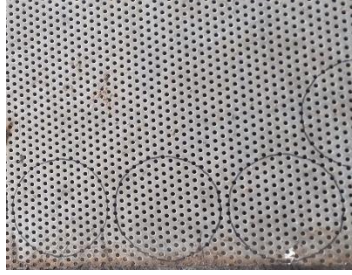
Pipa 6 Inch dijadikan sebagai tabung filtrasi pada penelitian ini. Penggunaan pipa dengan diameter 6 Inch disebabkan pipa *internal treatment* yang digunakan pada pabrik kelapa sawit menggunakan pipa dengan ukuran dan diameter yang sama.



Gambar 2. Pipa 6 Inch Stainless Steel

c) Strainer Stainless Steel

Stainer digunakan sebagai pembatas antara bahan yang akan digunakan pada setiap bagian pipa yang dipotong.



Gambar 3. Sketsa Strainer

d) Busa Filtrasi

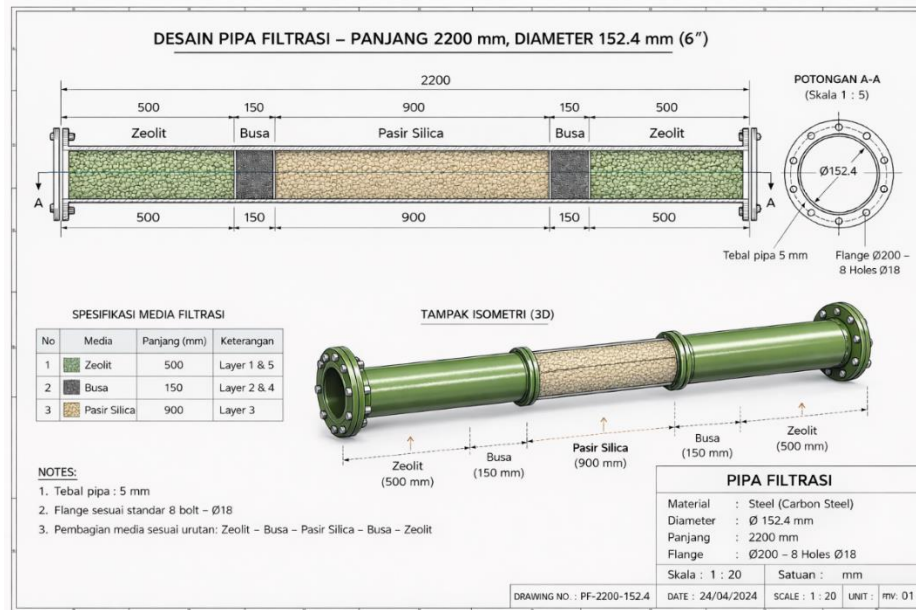
Tidak hanya sebagai penyaring pada air, busa filtrasi ini juga berfungsi sebagai penghambat keluar atau terikutnya pasir silica keluar dari penyaring (*straineer*). Hal ini sangat efektif untuk diterapkan dengan efesiensi yang cukup tinggi untuk dapat diaplikasikan pada industri perkebunan kelapa sawit.



Gambar 4. Busa Filtrasi

2. Perancangan dan Spesifikasi Teknis Alat Filtrasi

Alat filtrasi ini dirancang berupa *Horizontal Multi-Layer Filtration Pipe* dengan konfigurasi media simetris, mengikuti kaida pre-filtrasi fisik sebelum proses pertukaran ion. Berikut ini adalah gambar sketsa perancangan alat filtrasi air umpan boiler dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Design Sketsa Filtration Pipe

Berikut ini adalah spesifikasi teknis lengkap disajikan pada **Tabel 3**. Sedangkan komposisi lapisan media filtrasi dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 3. Spesifikasi Teknis Pipa Filtrasi

Parameter	Spesifikasi
Tipe alat	Horizontal Multi-Layer Filtration Pipe
Material pipa	Schedule 40 Carbon Steel, Ø6" (152,4 mm OD)
Panjang total	2.200 mm (overall, termasuk flange)
Sambungan	Flange DN150 PN16, pola 8-baut
Susunan lapisan media	Zeolit – Busa – Pasir Silika – Busa – Zeolit
Tebal dinding pipa	5,8 mm (Schedule 40)
Kapasitas alir	2–5 m ³ /jam pada tekanan 1–3 bar
Finishing	Cat epoxy 2 lapis, RAL 6011 (hijau)
Reaktivasi	Fisik, 400°C/3 jam, frekuensi 1× per 3 bulan

Tabel 4. Komposisi Lapisan Media Filtrasi

Lapisan	Fungsi	Panjang	Berat
Zeolit alam (inlet)	Ion exchanger, adsorber logam berat (Pb, Fe, Mn, Zn)	450 mm	20 kg
Busa filter	Pemisah fisik antarlapisan, mencegah migrasi media	165 mm	1 kg
Pasir silika	Pre-filter partikel, penjernihan fisik TSS/turbiditas	750 mm	2 kg
Busa filter	Pemisah fisik antarlapisan, sisi outlet	165 mm	1 kg
Zeolit alam (outlet)	Polishing layer, penangkap ion akhir	450 mm	20 kg

3. Prosedur Kalibrasi dan Instalasi

Fabrikasi dan pemasangan alat dilaksanakan melalui 6 (enam) langkah kerja yang seluruhnya dilakukan mengacu pada aspek K3L (Keselamatan, Kesehatan, Kerja dan

Lingkungan). Langkah 1, pemotongan pipa 6" menjadi lima segmen sesuai dimensi rancangan menggunakan alat potong dengan Alat Pelindung Diri (APD) lengkap. Langkah 2, pengisian media filtrasi—pasir silika dimasukkan pada segmen tengah, zeolit alam yang telah diaktivasi pada suhu 400°C dimasukkan pada kedua segmen ujung, dan busa filter dipasang pada setiap batas antarmedia untuk mencegah migrasi partikel. Langkah 3, pengelasan *flange* DN150 PN16 pada setiap ujung pipa menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) posisi 3G sesuai standar AWS D1.1, dilanjutkan uji kebocoran visual dan uji hidrostatis $1,5\times$ tekanan desain sebelum pemasangan. Langkah 4, pemasangan pada jalur feed tank menggunakan sambungan baut dan mur *flange* M16 disertai dokumentasi *before-after*. Langkah 5, komisioning dan pemantauan berkala hingga start-up sistem dilakukan dengan pengambilan sampel air setiap minggu, dan parameter T. Hardness, pH, serta silika diuji di laboratorium pabrik. Langkah 6, evaluasi dan standardisasi data pemantauan selama tiga bulan dianalisis, disusun SOP aktivasi berkala zeolit, dan laporan *continuous improvement*. Hasil akhir pemasangan pipa filtrasi dapat dilihat pada **Gambar 6**. Dibawah ini:



Gambar 6. Visual Pipa Filtrasi

Backwash pipa filtrasi dilakukan setiap 72 jam atau ketika terjadi penurunan tekanan lebih dari 0,5 bar, sedangkan media zeolit dan pasir silika dicuci bersih sebelum dimasukkan ke dalam pipa untuk meminimalkan kontaminasi awal. Toleransi dimensi fabrikasi ditetapkan ± 2 mm untuk panjang dan $\pm 0,5$ mm untuk diameter nominal.

4. Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan pada dua tahap. Tahap pertama adalah uji skala laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa zeolit alam (100 g, 150 g, dan 200 g) terhadap pH efluen, dibandingkan dengan pH hasil pengolahan softener konvensional sebagai baseline. Tahap kedua adalah uji lapangan (field scale) selama tiga bulan pada jalur feed tank boiler PMKS, mencakup sepuluh parameter kualitas air umpan boiler, yaitu pH, T. Hardness, M-Alkalinity, P-Alkalinity, O-Alkalinity, Total Dissolved Solids (TDS), klorida,

fosfat, sulfit, dan silika, yang seluruhnya dibandingkan terhadap AA SOP internal perusahaan dan standar internasional ASME Section VII (ASME, 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengaruh Aktivasi dan Variasi Massa Zeolit terhadap pH

Aktivasi fisik zeolit dilakukan bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan efektif zeolit sehingga kemampuan sebagai adsorben meningkat. Aktivasi zeolit alam dilakukan dengan memanaskannya kedalam furnace pada suhu $\pm 400^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam. Proses pemanasan perlu dikontrol karena pemanasan berlebihan (*overheating*) dapat mendegradasi struktur kristal zeolit secara tidak langsung (Sukmawati dalam Warisaura et al., 2019). Hasil uji skala laboratorium terhadap pengaruh variasi massa zeolit alam terhadap pH air disajikan dalam **Tabel 5**.

Tabel 5. Variasi Massa Zeolit Alam terhadap pH Air Umpan Boiler

Massa Zeolit (gram)	pH Softener (baseline)	pH Filtrasi Zeolit
100	9,50	9,54
150	9,50	9,58
200	9,50	9,73

Data pada **Tabel 5**. menunjukkan bahwa pH maksimum zeolit tercapai pada massa 200 gram, yaitu 9,73, atau meningkat 2,4% dibandingkan pH pada massa 100 gram. Hasil ini konsisten dengan teori adsorpsi Langmuir, yaitu semakin besar massa adsorben yang digunakan, semakin banyak situs aktif (*active site*) yang tersedia untuk pertukaran kation, sehingga kualitas efluen air umpan boiler semakin baik (Srihapsari, 2006). Penelitian ini mengonfirmasi bahwa zeolit alam bekerja melalui mekanisme pertukaran kation (ion exchange), yaitu kation logam berat bermuatan positif dalam larutan (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+}) ditukar dengan kation $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ yang terikat pada struktur aluminosilikat zeolite. Proses ini bersifat reversibel sehingga zeolit dapat diregenerasi secara fisik tanpa bahan kimia tambahan.

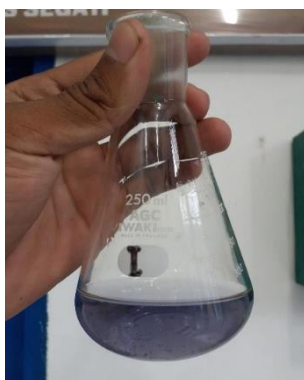
2. Perbandingan Parameter Air Umpan Boiler: Softener Vs Filtrasi Zeolit

Perbandingan parameter lainnya yang dilakukan pada air umpan boiler adalah pH, T. Hardness dan Silica antara softener konvensional dan filtrasi zeolit disajikan pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Perbandingan Air Umpan Boiler: Softener vs Filtrasi Zeolit

Parameter	Satuan	AA SOP	Softener	Filtrasi Zeolit
pH	–	7,0–8,5	9,50	9,71
T. Hardness	ppm	<2	Trace	Trace
Silika	ppm	<2	1,0	0,5

Total Hardness pada kedua metode telah mencapai taraf *trace* (<2 ppm), menunjukkan performa yang setara antara filtrasi zeolit dan softener konvensional untuk parameter kesadahan. Kadar silica pada filtrasi zeolit tercatat 0,05 ppm, atau turun 50% dibandingkan softener (1,0 ppm) yang mengindikasikan perasnan ganda pada pasir silika dan zeolit sebagai pre-filtrasi fisik sekaligus adsorben ion. Nilai pH filtrasi zeolit (9,71) tercatat sedikit di atas rentang AA SOP untuk *Feed Water* (7,0 – 8,5) namun masih berada pada rentang aman untuk air umpan boiler (10,5 – 11,5) sehingga memerlukan kombinasi dengan dosis P-406 aktual agar pH *Feed Water* dapat dipenuhi secara konsisten.



a)



b)

Gambar 7. a). Uji T. Hardness, b). Uji Silica

3. Hasil Akhir Pengamatan Lapangan

Dari hasil pengamatan dan pemantauan di lapangan terhadap 10 (sepuluh) parameter kualitas air umpan boiler dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Perbandingan Parameter Air Umpan Boiler: Softener vs Zeolit

Parameter	Satuan	AA SOP	Softener	Zeolit	Status
pH	–	10,5–11,5	10,87	11,01	Lebih baik
T. Hardness	ppm	<5	0,1	0,05	Lebih baik
M-Alkalinity	ppm CaCO ₃	500–800	480	501	Lebih baik
P-Alkalinity	ppm CaCO ₃	300–600	370	330	Setara
O-Alkalinity	ppm CaCO ₃	300–500	290	302	Lebih baik
TDS	ppm CaCO ₃	<2000	1000	800	Lebih baik
Klorida	ppm Cl	<300	75	70	Lebih baik
Fosfat	ppm PO ₄	30–80	35	35	Setara
Sulfit	ppm Na ₂ SO ₃	20–80	30	30	Setara
Silika	ppm SiO ₂	<150	60	55	Lebih baik

Dilihat dari tabel diatas yang mencakup 10 (sepuluh) parameter yang telah di uji, 7 Parameter (pH, T. Hardness, M-Alkalinity, O-Alkalinity, TDS, klorida, dan silika) menunjukkan hasil lebih baik pada filtrasi zeolit dibandingkan softener konvensional, sedangkan tiga parameter lainnya (P-Alkalinity, fosfat, dan sulfat) menunjukkan hasil yang setara. Seluruh parameter tetap berada dalam batas aman AA SOP, mengonfirmasi bahwa filtrasi zeolit layak diaplikasikan sebagai internal treatment tambahan pada sistem pengolahan air umpan boiler Pabrik Kelapa Sawit di Riau.

4. Benchmark terhadap Standard International ASME Section VII

Untuk memperkuat validitas dari hasil penelitian yang telah dilakukan, capaian filtrasi juga dibandingkan terhadap ASME Section VII – *Recommended Guidelines for the Care of Power Boilers*, yaitu standar internasional yang menjadi acuan industri global bagi pengoperasian, pemeliharaan dan inspeksi power boiler (ASME, 2023). Hasil *Benchmark* disajikan dalam **Tabel 8**.

Tabel 8. Benchmark Hasil Filtrasi Zeolit terhadap ASME Section VII dan AA SOP

Parameter	Satuan	ASME Sec. VII	AA SOP (Internal)	Hasil Zeolit	Status vs ASME
pH (feed water)	–	8,5–9,5	7,0–8,5	9,71	Sedikit di atas
pH (boiler water)	–	10,5–11,8	10,5–11,5	11,01	Sesuai
T. Hardness	ppm	<1,0	<2	Trace	Melampaui
Silika (SiO ₂)	ppm	<1,0	<2	0,5	Sesuai
TDS	ppm	<3500	<2000	800	Melampaui
Klorida (Cl ⁻)	ppm	<200	<300	70	Melampaui
Fosfat (PO ₄ ³⁻)	ppm	20–60	30–80	35	Sesuai

Enam dari tujuh parameter yang dapat diuji memenuhi atau melampaui batas ASME Section VII, sedangkan pH feed water berada sedikit di atas ambang atas ASME (9,5) sehingga memerlukan optimasi dosis P-406 lanjutan. Hal ini dapat menjadi penelitian selanjutnya agar nilai yang dihasilkan tidak melebihi dan penggunaan kimia P-406 lebih minimal.

5. Analisis Biaya dan Manfaat (*Cost-Benefit Analysis*)

Referensi harga bahan kimia boiler yang digunakan sebagai dasar perhitungan penghematan disajikan pada **Tabel 9**.

Tabel 9. Harga Referensi Bahan Kimia Boiler

Kimia Boiler	Penggunaan	Harga per Siklus
NaCl (garam regenerasi)	100 kg/regenerasi	Rp290.000
P-406 (hardness inhibitor)	5 kg/aplikasi	Rp63.000
P-511 (scale inhibitor)	5 kg/aplikasi	Rp82.000
P-219 (corrosion inhibitor)	0,3 kg/aplikasi	Rp50.500
Caustic soda	4 kg/aplikasi	Rp4.300

Sistem softener konvensional yang terpasang pada pabrik kelapa sawit saat ini memerlukan regenerasi NaCl sebanyak 2 kali per bulan (100 kg per regenerasi), sedangkan dengan menggunakan filtrasi zeolit alam, kebutuhan regenerasi NaCl dapat dieliminasi karena zeolit cukup diregenerasi secara fisik melalui pemanasan 400°C per 3 jam setiap 3 bulan tanpa menggunakan bahan kimia. Secara retensi dan jadwal regenerasi, penggunaan zeolit alam membutuhkan 4 kali per tahun sedangkan softener konvensional membutuhkan 24 kali per tahun. Selain efisien terhadap waktu dan jumlah regenerasi yang dilakukan, penggunaan bahan kimia NaCl juga sangat berpengaruh. Dibawah ini adalah ringkasan analisis biaya dan manfaat yang telah peneliti hitung dan disajikan pada **Tabel 10**.

Tabel 10. Ringkasan Analisis Biaya-Manfaat

Komponen	Nilai	Keterangan
Total investasi awal (CAPEX)	Rp2.427.576	BOM: pipa + media + flange
Penghematan NaCl per bulan	Rp580.000	100 kg garam × 2× regenerasi
Penghematan NaCl per tahun	Rp6.960.000	Rp580.000 × 12 bulan
Payback period	±5 bulan	Rp2.427.576 ÷ Rp580.000/bulan

Proyeksi kumulatif terhadap penghematan biaya selama 3 tahun operasional menunjukkan tren peningkatan yang cukup signifikan seiring waktu berjalan, yaitu Rp1.000.000 pada bulan pertama, Rp3.000.000 pada bulan ke enam dan Rp7.000.000 pada akhir tahun pertama, Rp14.000.000 pada akhir tahun kedua, dan Rp21.000.000 pada akhir bulan ketiga. Estimasi ini hanya memperhitungkan eliminasi biaya regenerasi NaCl dan belum mencakup potensi penghematan tambahan dari pengurangan konsumsi P-406 maupun perpanjangan umur pipa boiler akibat berkurangnya laku *scaling* dan korosi.

6. Keberlanjutan dan Pengelolaan Limbah Zeolit Jenuh

Aspek keberlanjutan (*sustainability*) dari sistem filtrasi zeolit dikaji melalui pendekatan *cradle-to-grave* yang meliputi lima tahap siklus hidup, yaitu:

- Ekstraksi dan aktivasi zeolit alam dengan konsumsi energi aktivasi sekitar 2 kWh/kg
- Operasi filtrasi dengan masa pakai aktif ±3 bulan per siklus

- iii. Re-aktivasi fisik pada suhu 400°C selama 3 jam dapat diulang sebanyak 4-6 siklus (setara dengan 12 – 18 bulan operasi)
- iv. Penjenuhan (*End of Life*) setelah enam siklus aktivasi, ketika kapasitas tukar ion zeolit tidak lagi dapat dipulihkan.
- v. Disposasi serta recovery, ketika zeolit jenis diklasifikasikan sebagai Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (LB3).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah zeolit jenuh yang telah mengabsorpsi logam berat dikategorikan sebagai Limbah B3 dengan kode B413 (logam berat teradsorpsi). Tiga opsi penanganan limbah zeolit jenuh yang teridentifikasi adalah:

- a) Penyerahan kepada Pengelola Limbah B3 (PPLI) berlisensi
- b) Regenerasi kimia menggunakan HCl 0,1 N untuk recovery logam berat,
- c) Co-processing pada industri semen apabila kandungan Pb di bawah 300 ppm, dengan seluruh proses wajib disertai dokumentasi manifest B3 melalui sistem daring Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Pemerintah Republik Indonesia, 2021).

Dibandingkan dengan sistem softener konvensional, filtrasi zeolit memberikan manfaat lingkungan netto (*net environmental benefit*) berupa eliminasi 100 kg NaCl per siklus regenerasi sehingga mengurangi salinitas limbah cair, reduksi brine reject yang dibuang ke lingkungan, jejak karbon (*carbon footprint*) yang lebih rendah dibandingkan proses berbasis bahan kimia P-406, serta potensi ekonomi dari recovery logam berat bernilai seperti seng (Zn) dan tembaga (Cu) pada tahap akhir siklus hidup zeolit.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut: (a) Filtrasi zeolit terbukti efektif menurunkan T. Hardness air umpan boiler hingga taraf trace (<2 ppm) dan menurunkan kadar silika hingga 0,5 ppm, memenuhi AA SOP dan mendekati atau melampaui ambang ASME Section VII; (b) Zeolit bekerja lebih optimal pada massa yang lebih tinggi (200 g > 150 g > 100 g) melalui mekanisme ion exchange dan adsorpsi fisik; (c) Filtrasi zeolit mengeliminasi kebutuhan regenerasi NaCl, karena aktivasi fisik 400°C/3 jam setiap tiga bulan telah cukup untuk memulihkan performa media; (d) Enam dari sepuluh parameter air umpan boiler menunjukkan hasil lebih baik pada filtrasi zeolit dibandingkan softener, dengan seluruh parameter berada dalam batas

aman AA SOP; dan (e) Investasi sebesar Rp2.427.576 mampu kembali dalam waktu ± 5 bulan melalui penghematan Rp580.000 per bulan dari eliminasi regenerasi NaCl.

Beberapa rekomendasi tindak lanjut disusun berdasarkan tingkat prioritas sebagaimana disajikan pada **Tabel 11**.

Tabel 11. Rekomendasi Tindak Lanjut

Prioritas	Rekomendasi
Tinggi	Menghitung persentase aktual penurunan T. Hardness untuk optimasi dosis P-406 secara real-time.
Tinggi	Menyusun standardisasi SOP aktivasi berkala zeolit dan jadwal inspeksi media filter.
Sedang	Melakukan uji parameter logam berat lengkap menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) sebelum dan sesudah filtrasi zeolit.
Sedang	Mereplikasi sistem filtrasi zeolit pada PMKS lain dalam grup perusahaan untuk memperoleh penghematan pada skala grup.
Rendah	Mengkaji kombinasi zeolit termodifikasi (<i>HCl-activated</i>) untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi lebih lanjut.

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengukur parameter oksigen terlarut guna melengkapi benchmark terhadap ASME Section VII, serta mengkaji kelayakan regenerasi kimia HCl 0,1 N untuk recovery logam berat pada tahap *end-of-life* zeolit sebagai bagian dari upaya *circular economy* pada pengelolaan limbah B3 hasil filtrasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan terhadap pelaksanaan penelitian ini, baik dalam bentuk pendanaan, fasilitas, kerja sama mitra, maupun bantuan teknis lainnya. Penulis juga menyampaikan rasa bangga kepada Ikhlas Hakiki yang sudah berjuang dan tetap terus tumbuh dan berkembang. Saya secara khusus berterima kasih kepada Asian Agri Group yang telah memberikan saya kesempatan untuk melaksanakan *Continuous Improvement* di Pabrik Kelapa Sawit Segati (Langgam Group), Riau. Dilain sisi, saya berterima kasih kepada keluarga dan rekan seperjuangan MAT (*Mill Assistant Trainee*) XXXV dan PCOE II 2022. Sukses selalu dimanapun kita berada.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfian, Z. (2004). Analisa pH dan Kesadahan Total pada Air Umpan Boiler di Pabrik PTPN II Padang Brahrang. *Jurnal Sains Kimia*, 8(2), 53-55.
- Eun, J. C. (2020). Design Engineering. In *Handbook of Engineering Practice of Materials and Corrosion* (pp. 1-116). Cham: Springer International Publishing.

- Fatimura, M. (2016). Study Analisa Kualitas Air Boiler Menggunakan Standar American Society of Mechanical Engineers (ASME). *Jurnal Redoks*, 1(1).
- Nasution, A. (2012). *Pengaruh Kualitas Air terhadap Operasional Boiler* (Doctoral dissertation, Universitas Medan Area).
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Srihapsari, D. (2006). Penggunaan zeolit alam yang telah diaktivasi dengan larutan HCl untuk menjerap logam-logam penyebab kesadahan air. Universitas Negeri Semarang.
- Warisaura, A. D., Sukmawati, P. D., & Reza, I. B. (2019). Studi kemampuan kombinasi kayu apu (*Pistia stratiotes*) dan zeolit terhadap penurunan warna, COD, TSS limbah pewarna Remazol Red Rb. *Prosiding Simposium Nasional Rekayasa Aplikasi Perancangan dan Industri*, 182-187.