

Kemampuan Adsorben Tanah Liat dengan Kombinasi Aktivasi Termal dan Aktivasi Asam untuk Mengurangi Kadar Surfaktan Limbah Laundry

Bagus Tri Wibowo, Tuhu Agung Rachmanto

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: tuhu.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 28 April 2026

Disetujui: 05 Mei 2026

Abstract

Laundry wastewater often contains high levels of anionic surfactants, which are toxic to the environment and living organisms. Therefore, water treatment are necessary to reduce surfactant levels in laundry wastewater using clay adsorbents. This study investigates the performance of thermally and acid-activated clay adsorbents (kaolinite and bentonite) for removing surfactants, phosphate, and total suspended solids (TSS) from laundry wastewater. Adsorbents were activated at 500°C and 800°C, followed by acid activation using HCl (0.5–3 N). Batch adsorption tests were conducted with a dosage of 10 g/L, agitation speed of 200 rpm, and 2 hours contact time. Results show that increasing acid concentration significantly improves surfactant and phosphate removal due to enhanced surface charge and porosity. The best performance was achieved by kaolinite activated at 500°C and 3 N HCl under slightly acidic conditions, reaching 95.4% surfactant removal and 99.3% phosphate removal. Statistical analysis (ANOVA) indicates that acid activation has a strong influence on adsorption efficiency, while thermal activation shows limited or adsorbent-dependent effects. However, TSS increased by up to 304% for kaolinite and 72% for bentonite, likely due to adsorbent abrasion. Overall, treated kaolinite shows strong potential as an effective and low-cost adsorbent.

Keywords: *laundry wastewater, surfactant removal, phosphate removal, acid activation, thermal activation*

Abstrak

Limbah cair *laundry* cenderung memiliki kadar surfaktan anionik yang tinggi, sehingga sangat berbahaya bagi lingkungan serta makhluk hidup karena bersifat toksik. Oleh karena itu, dilakukannya upaya pengolahan air untuk mereduksi kadar surfaktan pada limbah *laundry* dengan adsorben tanah liat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja adsorben tanah liat (kaolinit dan bentonit) yang diaktivasi secara termal dan asam dalam menurunkan kadar surfaktan, fosfat, dan TSS pada limbah *laundry*. Aktivasi termal dilakukan pada suhu 500°C dan 800°C, dilanjutkan dengan aktivasi asam HCl (0,5–3 N). Uji adsorpsi dilakukan secara batch dengan dosis 10 g/L, kecepatan pengadukan 200 rpm, dan waktu kontak 2 jam. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi asam meningkatkan efisiensi penurunan surfaktan dan fosfat akibat bertambahnya muatan aktif dan porositas adsorben. Kinerja terbaik diperoleh pada kaolinit dengan aktivasi 500°C dan HCl 3 N pada kondisi limbah sedikit asam, dengan efisiensi 95,4% untuk surfaktan dan 99,3% untuk fosfat. Analisis statistik (ANOVA) menunjukkan aktivasi asam berpengaruh signifikan, sedangkan suhu tidak selalu signifikan. Diketahui adanya peningkatan nilai TSS hingga 304% untuk kaolinit dan 72% untuk bentonit akibat abrasi adsorben selama proses adsorpsi. Secara keseluruhan, kaolinit kombinasi aktivasi asam dan termal berpotensi sebagai adsorben efektif dan ekonomis untuk pengolahan limbah *laundry*.

Kata Kunci: *limbah laundry, penghilangan surfaktan, penghilangan fosfat, aktivasi asam, aktivasi termal*

1. Pendahuluan

Wilayah Asia dan Pasifik mampu menghasilkan debit limbah cair sangat tinggi, mencapai $117,6 \times 10^9$ m³ per tahun. Namun hal tersebut tidak diimbangi dengan pengolahan dan pemanfaatan kembali. Hanya 31% limbah cair yang terkumpul dan 16% yang diolah kembali, menunjukkan rendahnya upaya penggunaan kembali [1]. Salah satu penyumbang utama limbah cair berasal dari aktivitas *laundry* yang menggunakan air dalam jumlah besar, sekitar 15 liter per kilogram pakaian dan menghasilkan hingga 400 m³ limbah per hari. Tingginya limbah *laundry* di Asia juga dipengaruhi penggunaan mesin cuci tabung vertikal yang memerlukan siklus pencucian berulang [2].

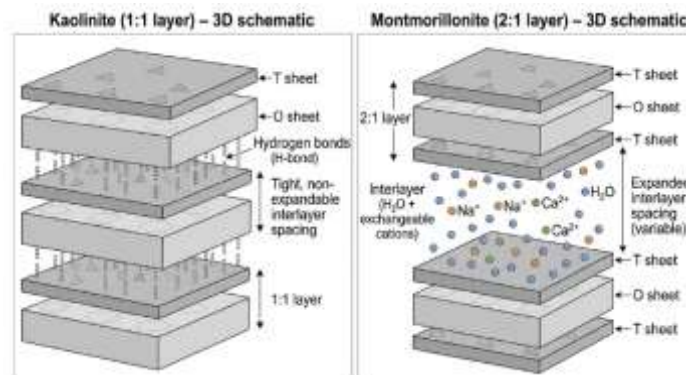
Limbah *laundry* memiliki kadar polutan yang bervariasi tergantung produk dan skala pencucian, namun umumnya berasal dari deterjen yang mengandung pewangi, pelembut, *builders*, pemutih, dan surfaktan. Surfaktan dalam limbah *laundry* umumnya tinggi dalam bentuk anionik dan dapat berdampak negatif pada organisme serta tanaman. Selain itu, limbah *laundry* juga mengandung fosfat tinggi akibat kandungan *builders* deterjen [3]. Surfaktan adalah zat aktif permukaan yang mampu membentuk gugus molekul (misel) dalam air atau minyak, dengan struktur ekor hidrofobik dan kepala hidrofilik [4]. Surfaktan anionik bersifat toksik bagi makhluk hidup karena reaktivitasnya terhadap komponen seluler serta kemampuannya berikatan dengan DNA, peptida, dan protein, sehingga mengganggu fungsi biologis. Pada konsentrasi tinggi, zat ini dapat menyebabkan gangguan pernapasan dan iritasi kulit pada manusia [2].

Untuk pengolahan air, adsorpsi sering kali dipilih karena biaya pengolahan yang rendah, fleksibel, desain yang sederhana, serta efisien dan tahan terhadap kadar polutan berbahaya. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya dalam presipitasi kimia dan pertukaran ion. Metode ini efektif menghilangkan polutan anionik maupun kationik melalui pengikatan dengan pertukaran ion pada permukaan adsorben [5].

Adsorpsi surfaktan dapat terjadi dikarenakan terbentuknya agregat pada permukaan adsorben. Pada konsentrasi surfaktan yang tinggi, Permukaan agregat memiliki properti yang bersifat sama dengan larutan misel. Monomer yang teradsorpsi dan agregat surfaktan tersebut dianggap berada dalam kesetimbangan termodinamika dengan monomer dalam larutan, sehingga misel dalam larutan dan agregat permukaan bersaing untuk mendapatkan monomer surfaktan. Seiring dengan peningkatan konsentrasi surfaktan, monomer surfaktan yang teradsorpsi pada permukaan padatan akan mulai beragregasi dan membentuk struktur menyerupai misel yang disebut admisel atau hemimisel yang berlapis. Adsorpsi berlanjut hingga seluruh permukaan terpenuhi [6].

Mekanisme yang terjadi pada adsorpsi surfaktan berupa ikatan hidrofobik, pertukaran ion, pasangan ion, dan gaya dispersi. Adsorpsi surfaktan bermula dengan interaksi muatan positif dan negatif pada permukaan serta gaya elektrostatis antara kepala hidrofilik surfaktan dengan muatan berlawanan pada kandungan permukaan adsorben. Selain itu, interaksi antara bagian hidrofobik surfaktan yang belum teradsorpsi dengan yang telah teradsorpsi menyebabkan peningkatan adsorpsi surfaktan lebih lanjut pada permukaan padatan [4] [7].

Adsorben tanah liat banyak digunakan karena komposisi mineral dan strukturnya yang beragam, sehingga memengaruhi luas permukaan, kapasitas tukar kation, dan kandungan air antar-lapisan yang menyebabkan tanah liat *swelling*. Perbedaan ini semakin terlihat setelah aktivasi termal. Bentonit (montmorillonit) memiliki struktur 2:1 dengan satu lapis oktahedral berpusat pada Al diapit dua lapis tetrahedral berpusat Si, memungkinkan air masuk ke antar-lapisan sehingga memiliki kemampuan *swelling* dan luas permukaan yang tinggi. Sebaliknya, kaolinit berstruktur 1:1 tetrahedral dan oktahedral yang berikatan kuat membatasi masuknya air ke dalam antar-lapisan dan menghasilkan luas permukaan lebih rendah. Namun, kandungan Al pada kaolinit lebih tinggi, sehingga berpotensi meningkatkan adsorpsi melalui pertukaran muatan pada permukaan [8].



Gambar 1. Hasil Uji Statistik Korelasi
 Sumber: Mostafa Zamanian, 2026

Untuk meningkatkan performa adsorpsi, dilakukan aktivasi pada adsorben. Aktivasi termal dilakukan dengan mengubah sifat struktur tanah liat, seperti bentuk, ukuran, porositas, serta karakter amorf dan kristal menggunakan panas. Pada tahap pemanasan awal terjadi dehidrasi dan dihidroksilasi yang menghilangkan air dan gugus hidroksil, kemudian pada suhu lebih tinggi terbentuk struktur amorf. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan dehidrasi irreversibel, penyempitan pori, dan keruntuhan struktur yang menurunkan kemampuan adsorpsi [5][9].

Selain itu, aktivasi adsorben dapat dilakukan dengan pemberian asam. Aktivasi asam mampu meningkatkan sifat fisik, seperti luas permukaan dan porositas, serta sifat kimia, seperti kapasitas tukar kation. Umumnya, penggunaan aktivasi asam digunakan untuk menghilangkan impuritas pada adsorbent. Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat faktor yang mempengaruhi hasil dari aktivasinya seperti, lama kontak waktu aktivasi, tingkat keasaman, dan suhu. Seluruh parameter tersebut akan memengaruhi lapisan adsorben yang nantinya akan jenuh terhadap proton [5]. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan adsorben tanah liat yang telah diaktivasi untuk adsorpsi kadar surfaktan yang tinggi pada limbah *laundry*. Penelitian dilakukan dengan membandingkan hasil kemampuan adsorben dengan dukungan secara statistik dengan aplikasi Minitab.

2. Metode Penelitian

2.1 Pembuatan Adsorben

Adsorben dibentuk dari tanah liat dengan ukuran granular yang diaktivasi suhu termal 500°C dan 800°C selama 2 jam. Jenis adsorben yang digunakan adalah kaolin dan bentonit. Adsorben kemudian dilanjutkan dengan aktivasi asam HCl dengan tingkat keasaman 0,5 N, 1 N, 1,5 N, 2 N, 2,5 N dan 3 N. Setelah diaktivasi dengan asam, adsorben dicuci dengan aquades dan dikeringkan kedalam oven bersuhu 105 C selama 1 jam.

2.2 Pelaksanaan Uji Adsorpsi secara *Batch*

Adsorben ditimbang dengan ukuran dosis 10 gr/liter untuk setiap uji *batch*. Pengujian dilakukan secara *batch* dengan pengadukan adsorben dalam limbah cair. Kecepatan agitator yang digunakan adalah 200 rpm dan dengan waktu kontak proses selama 2 jam.

3. Hasil dan pembahasan

Dilakukan pengujian awal kadar surfaktan, fosfat, dan TSS pada limbah *laundry*. Limbah *laundry* yang digunakan merupakan hasil dari proses usaha *laundry* di daerah Babatan, Wiyung, Surabaya. Hasil dari pengujian kadar awal didapatkan hasil 758,2 mg/l untuk surfaktan, 60,2 mg/l untuk fosfat, dan 125 mg/l untuk TSS. Setelah itu, dilakukan proses adsorben yang telah dibuat. Hasil dihitung dengan membandingkan hasil proses dengan kadar awal sehingga diperoleh nilai persentase efisiensinya. Perhitungan efisiensi pengurangan kadar ditentukan melalui rumus berikut:

$$\% \text{ removal} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$

Dengan:

C_0 adalah Kadar awal (mg/l)

C_1 adalah Kadar setelah proses (mg/l)

Hasil perhitungan dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut:

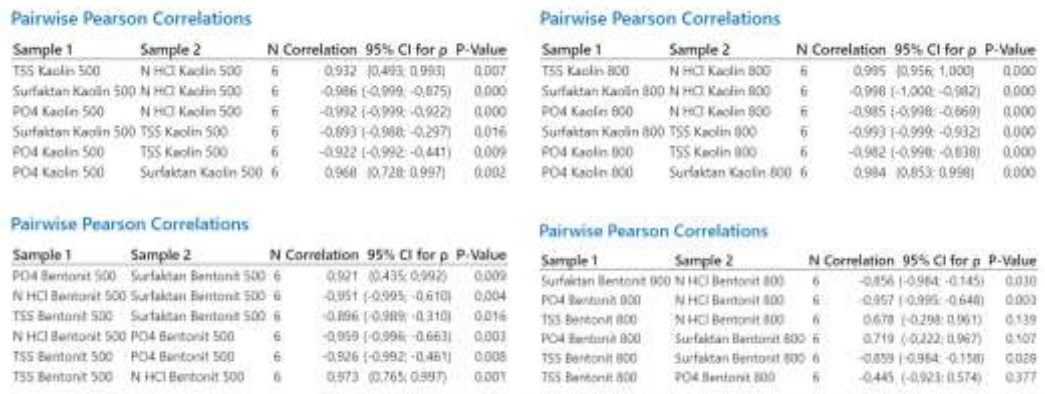
Tabel 1. Hasil Uji Pengolahan Air Limbah dengan Adsorben Tanah Liat Aktivasi Kobinasi Termal dan Asam

Nama Sampel		Kadar Hasil Pengujian			Efisiensi Penyisihan			
Jenis adsorben	Aktivasi termal	Aktivasi Asam	TSS	Surfaktan	PO4	TSS	Surfaktan	PO4
Kaolinit	500°C	HCL 0,5 N	465 mg/l	493,9 mg/l	37,4 mg/l	- 272 %	34,86 %	37,87 %
		HCL 1 N	478 mg/l	449,6 mg/l	33,1 mg/l	- 282 %	40,70 %	45,02 %
		HCL 1,5 N	473 mg/l	331,6 mg/l	30,0 mg/l	- 278 %	56,26 %	50,17 %
		HCL 2 N	480 mg/l	322,5 mg/l	26,6 mg/l	- 284 %	57,47 %	55,81 %
		HCL 2,5 N	488 mg/l	206,6 mg/l	25,4 mg/l	- 290 %	72,75 %	57,81 %
		HCL 3 N	491 mg/l	145,4 mg/l	21,0 mg/l	- 293 %	80,82 %	65,05 %
	800°C	HCL 0,5 N	180 mg/l	580,4 mg/l	48,1 mg/l	- 44 %	23,45 %	20,10 %
		HCL 1 N	189 mg/l	490,6 mg/l	42,6 mg/l	- 51 %	35,29 %	29,24 %
		HCL 1,5 N	194 mg/l	414,8 mg/l	36,8 mg/l	- 55 %	45,29 %	38,87 %
		HCL 2 N	201 mg/l	352,0 mg/l	27,8 mg/l	- 61 %	53,57 %	53,75 %
		HCL 2,5 N	205 mg/l	255,9 mg/l	24,5 mg/l	- 64 %	66,25 %	59,25 %
		HCL 3 N	213 mg/l	198,6 mg/l	22,1 mg/l	- 70 %	73,81 %	63,37 %
Bentonit	500°C	HCL 0,5 N	200 mg/l	411,0 mg/l	51,3 mg/l	- 60 %	45,79 %	14,78 %
		HCL 1 N	208 mg/l	360,2 mg/l	50,0 mg/l	- 66 %	52,49 %	16,94 %
		HCL 1,5 N	210 mg/l	340,0 mg/l	46,2 mg/l	- 68 %	55,16 %	23,26 %
		HCL 2 N	217 mg/l	304,4 mg/l	45,9 mg/l	- 74 %	59,85 %	23,75 %

Nama Sampel		Kadar Hasil Pengujian			Efisiensi Penyisihan			
Jenis adsorben	Aktivasi termal	Aktivasi Asam	TSS	Surfaktan	PO4	TSS	Surfaktan	PO4
800°C	HCL 2,5 N		219 mg/l	287,4 mg/l	45,5 mg/l	- 75 %	62,09 %	24,42 %
	HCL 3 N		221 mg/l	171,9 mg/l	42,9 mg/l	- 77 %	77,33 %	28,74 %
	HCL 0,5 N		144 mg/l	590,4 mg/l	50,9 mg/l	- 15 %	22,13 %	15,45 %
	HCL 1 N		145 mg/l	582,6 mg/l	50,3 mg/l	- 16 %	23,16 %	16,45 %
	HCL 1,5 N		142 mg/l	556,4 mg/l	46,7 mg/l	- 14 %	26,62 %	22,43 %
	HCL 2 N		144 mg/l	537,8 mg/l	45,6 mg/l	- 15 %	29,07 %	24,25 %
	HCL 2,5 N		146 mg/l	492,1 mg/l	44,6 mg/l	- 17 %	35,10 %	25,91 %
	HCL 3 N		149 mg/l	298,4 mg/l	44,2 mg/l	- 19 %	60,64 %	26,58 %

Sumber: Hasil Pengukuran (2026)

Dari data yang didapat, dilakukan uji korelasi menggunakan *software* statistik Minitab untuk mengetahui hubungan bagaimana antara tingkat keasaman pada aktivasi asam memberikan pengaruh pada hasil. Berikut hasil yang didapat:



Gambar 2. Hasil Uji Statistik Korelasi

Dari hasil yang didapat yang tertera pada **Tabel 1**, diketahui tiap adsorben tanah liat mampu menurunkan kadar surfaktan. Setiap peningkatan aktivasi asam yang dilakukan pada adsorben memberikan hasil peningkatan efisiensi reduksi surfaktan. Hal itu terjadi dikarenakan ketika diberikannya asam saat aktivasi maka gugus dengan muatan positif telah terbuka dengan hilangnya impuritas [10]. Aktivasi adsorben menggunakan asam mampu mengurangi sebagian mineral oksida, termasuk oksida kalsium, magnesium, dan logam alkali, dari material lempung relatif terhadap SiO tanpa merubah struktur adsorben [9]. Dari hasil yang didapat yang tertera pada **Tabel 1** ditemukan bahwa hasil reduksi terbaik dilakukan pada masing masing adsorben dengan aktivasi asam HCl 3N dengan aktivasi termal 500°C. Dari data yang didapat dari uji korelasi, memberikan adanya korelasi antara tiap kenaikan tingkat keasaman pada adsorben dengan hasil surfaktan dari akhir proses. Pada seluruh uji korelasi dengan empat adsorben diketahui memiliki sifat yang sama yaitu dengan nilai negatif kuat, sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk setiap kenaikan tingkat keasaman berbanding terbalik dengan hasil akhir surfaktan yang didapat.

Pada penurunan fosfat dapat terjadi karena adanya adsorpsi pada permukaan yang melibatkan pertukaran ion pada permukaan gugus negatif fosfat dengan sifat positif dari permukaan tanah liat [11]. Dapat dilihat untuk uji korelasi yang didapat, adanya korelasi kuat negatif antara tingkat keasaman pada aktivasi adsorben dengan kadar akhir fosfat. Dapat disimpulkan bahwa dengan semakin meningkatnya tingkat keasaman pada aktivasi adsorben, hasil fosfat akan semakin sedikit, berbanding terbalik dengan tingkat keasaman pada aktivasi adsorben. Dengan demikian, dapat dilihat pula bahwa hasil akhir fosfat berbanding lurus dengan hasil akhir surfaktan, yang sama sama memiliki sifat negatif terhadap tingkat keasaman pada aktivasi adsorben.

Dari hasil yang didapatkan yang tertera pada **Tabel 1**, menunjukkan bahwa adanya peningkatan TSS pada hasil. Hal tersebut memungkinkan terjadi diakrenakan pada adsorben memiliki sifat atrisi yang memberikan kemampuan adsorben terhadap haya gesek yang terjadi pada proses adsorpsi dalam air. Kondisi ini umumnya muncul ketika pada proses pengadukan, pencucian, pencucian balik. Dengan tergeseknya adsorben dengan aliran air secara terus menerus, berpotensi adanya abrasi yang mengikis sebagian adsorben menjadi partikel halus [12]. Oleh karena itu, diperkuat dengan adanya korelasi antara nilai akhir TSS terhadap tingkat keasaman untuk aktivasi adsorbent. Didapatkan hasil adanya positif kuat,

yang menandakan nilai akhir TSS berbanding lurus dengan tingkat keasaman untuk aktivasi adsorben. Semakin tinggi tingkat keasaman yang digunakan saat aktivasi maka semakin tinggi pula nilai akhir pada TSS. Dengan demikian, nilai TSS bersifat negatif terhadap hasil surfaktan dan fosfat yang berbanding terbalik dengan tingkat keasaman untuk aktivasi adsorben.

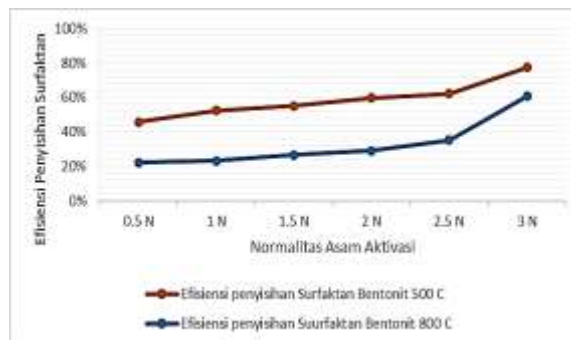
3.1 Perbandingan terhadap Suhu Aktivasi

3.1.1 Surfaktan terhadap Suhu Aktivasi

Berdasarkan hasil uji kemampuan adsorben secara batch, perbandingan penurunan surfaktan terhadap suhu aktivasi menunjukkan bahwa aktivasi termal dengan suhu 500°C memberikan hasil terbaik pada kedua adsorben. Adsorben kaolin menunjukkan efisiensi penurunan surfaktan sebesar 80,82% dengan konsentrasi akhir 145,4 mg/l. Sementara itu, bentonit mencapai penurunan sebesar 77,33% dengan konsentrasi akhir 171,9 mg/l.



Gambar 3. Perbandingan Efisiensi Penurunan Surfaktan antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Kaolin terhadap Aktivasi Asam



Gambar 4. Perbandingan Efisiensi Penurunan Surfaktan antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Bentonit terhadap Aktivasi Asam

Dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan suhu terhadap hasil akhir memberikan pengaruh yang signifikan. Diketahui jika hasil p value $< 5\%$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. H_0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan aktivasi dengan hasil akhir surfaktan. Sedangkan untuk H_1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan saat aktivasi dengan hasil akhir surfaktan.

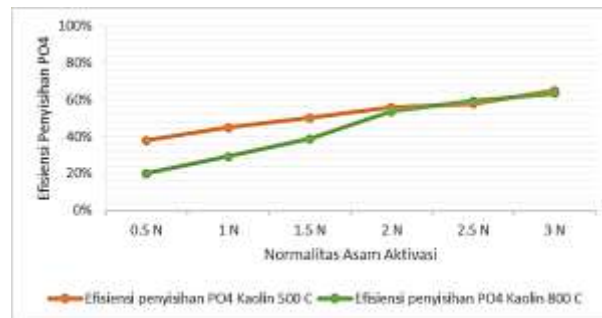
Dari hasil uji kedua adsorben didapatkan bahwa untuk adsorben kaolin dihasilkan p value senilai 0,49 sehingga p value uji adsorben kaolin terhadap suhu dengan hasil akhir surfaktan lebih dari 5%. Hal itu memberikan kesimpulan bahwa H_0 diterima, yang mana tidak ada pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan saat aktivasi dengan hasil akhir surfaktan. Sedangkan pada hasil uji adsorben bentonit, didapatkan p value senilai 0,005 yang menandakan bahwa H_0 ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa dengan adanya pengaruh signifikan terhadap suhu yang digunakan untuk aktivasi dengan hasil surfaktan pada adsorben bentonit. Dapat dilihat pula adanya perbedaan dari 10-20% pada hasil adsorpsi terhadap berbedanya suhu pada tiap aktivasi asam. Hal itu memungkinkan terjadi dikarenakan proses utama adsorben bentonit adalah dengan tingginya luas permukaan yang ada sehingga surfaktan akan menempel pada permukaan dengan jaringan hidrofobiknya. Pada aktivasi termal dengan suhu 500 maka tanah liat berada pada suhu diatas dehidrasi yang akan menjadi bentuk amorf, dengan sedikitnya pembentukan kristal yang mengubah struktur tanah liat yang mempengaruhi pori adsorbent [5].

Analysis of Variance						Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Suhu Tanah	1	9787	9787	0,51	0,493	Suhu Tanah	1	116585	116585	12,54	0,005
Error	10	193046	19305			Error	10	92953	9295		
Total	11	202833				Total	11	209537			

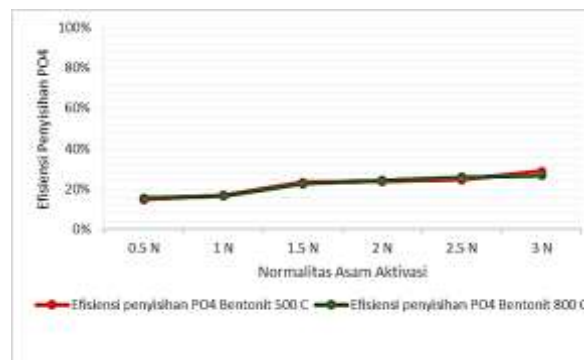
Gambar 5. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Kaolin (kiri) dan Adsorben Bentonit (kanan) terhadap Hasil Surfaktan

3.1.2 Fosfat terhadap Suhu Aktivasi

Untuk hasil fosfat didapatkan dengan hasil terbaiknya pada masing masing adsorben dengan aktivasi termal ber suhu 500°C. Hasil terbaik pada adsorben kaolin menunjukkan kemampuan penurunan fosfat hingga 65,05% dengan hasil akhirnya 21 mg/l, dan dengan 28,74% dengan hasil akhir 42,9 mg/l pada bentonit.



Gambar 6. Perbandingan Efisiensi Penurunan Fosfat antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Kaolin terhadap Aktivasi Asam



Gambar 7. Perbandingan Efisiensi Penurunan Fosfat antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Bentonit terhadap Aktivasi Asam

Dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan suhu terhadap hasil akhir fosfat memberikan pengaruh yang signifikan. Diketahui jika hasil p value < 5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan aktivasi dengan hasil akhir fosfat. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan saat aktivasi dengan hasil akhir fosfat.

Hasil pada kedua uji statistik menunjukkan bahwa p value >5% sehingga memberikan kesimpulan bahwa H0 diterima. Menandakan pada kedua adsorben, tidak ada pengaruh signifikan terhadap suhu pada aktivasi termal dengan hasil akhir fosfat yang didapat. Hal tersebut memungkinkan terjadi karena penurunan kadar fosfat utamanya teradsorpsi dengan menggunakan mineral positif pada permukaan adsorben. Dengan dinaikannya suhu, tidak ada pengaruh dengan jumlah kandungan muatan positif awal pada adsorben, sedangkan dengan ditambahkan tingkat keasaman, dapat dilihat pada grafik adanya peningkatan efisiensi penurunan fosfat. Hal itu dapat terjadi dikarenakan pada pemberian aktivasi asam yang tinggi, akan menurunkan impuritas dan membuat ruang sehingga membuat jumlah aktif muatan positif bertambah pada permukaan adsorben, Sebagian mineral yang mengalami pelindian akan membentuk mesopori, yang mana jumlahnya dipengaruhi oleh durasi lama waktu aktivasi [13].

Analysis of Variance						Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Suhu Tanah	1	67,12	67,12	0,93	0,357	Suhu Tanah	1	0,0208	0,02083	0,00	0,963
Error	10	720,73	72,07			Error	10	90,1283	9,01283		
Total	11	787,85				Total	11	90,1492			

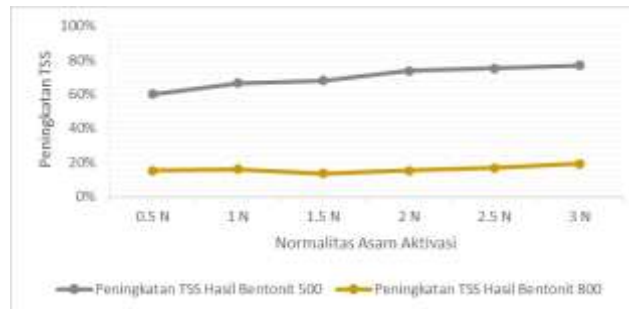
Gambar 8. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Kaolin (kiri) dan Adsorben Bentonit (kanan) terhadap Hasil Fosfat

3.1.3 TSS terhadap Suhu Aktivasi

Hasil yang didapat dari perbandingan hasil akhir TSS terhadap suhu aktivasi termal untuk adsorben menunjukkan nilai yang terbaik dengan penggunaan jenis tanah liat bentonit pada adsorben bentonit, karena didapat peningkatan yang lebih sedikit. Hasil terbaik pada adsorben kaolin dengan suhu aktivasi 800°C menunjukkan kemampuan peningkatan TSS hanya hingga 70% dengan hasil akhirnya 213 mg/l, dan dengan 19% dengan hasil akhir 149 mg/l pada adsorben bentonit dengan suhu aktivasi 800°C.



Gambar 9. Perbandingan Peningkatan TSS antar Tingkat aktivasi Suhu Adsorben Kaolin terhadap Aktivasi Asam



Gambar 10. Perbandingan Peningkatan TSS antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Bentonit terhadap Aktivasi Asam

Kemudian dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan suhu terhadap hasil akhir memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan TSS. Diketahui jika hasil p value < 5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan aktivasi dengan hasil akhir TSS. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan terhadap suhu termal yang digunakan saat aktivasi dengan hasil akhir TSS.

Hasil pada kedua uji statistik menunjukkan bahwa p value < 5% sehingga memberikan kesimpulan bahwa H0 ditolak. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan adanya suhu termal pada aktivasi adsorben memberikan pengaruh terhadap hasil akhir TSS. Hal itu dapat terjadi dikarenakan ketika dilakukan aktivasi termal hingga suhu diatas 750, maka struktur kaolin akan menghilangkan hampir seluruh gugus hidroksil hingga menjadikan bentuk kristal [14].

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Suhu Tanah	1	238854	238854	2064,72	0,000
Error	10	1157	116		
Total	11	240011			

Analysis of Variance

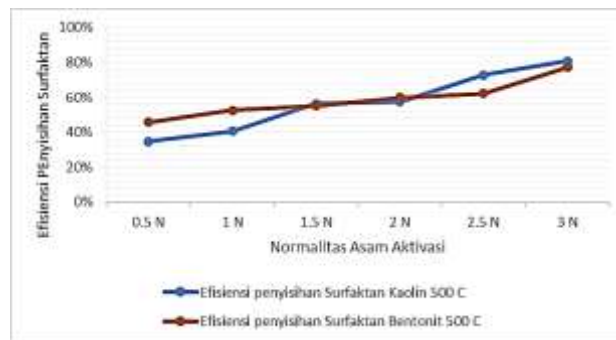
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Suhu Tanah	1	13668,8	13668,8	395,62	0,000
Error	10	345,5	34,6		
Total	11	14014,3			

Gambar 11. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Tingkat Aktivasi Suhu Adsorben Kaolin (kiri) dan Adsorben Bentonit (kanan) terhadap Hasil Peningkatan TSS

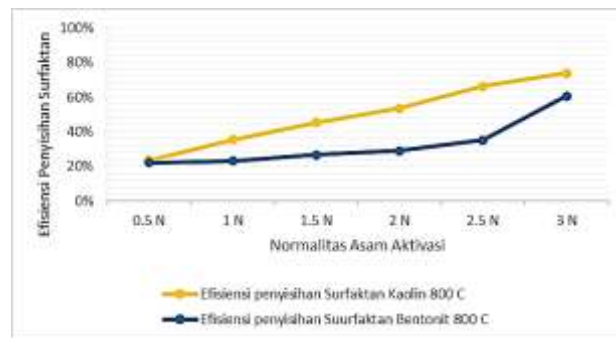
3.2 Perbandingan terhadap Jenis Adsorben

3.2.1 Surfaktan terhadap Jenis Adsorben

Berdasarkan hasil uji kemampuan adsorben secara batch, perbandingan nilai akhir surfaktan terhadap jenis tanah liat menunjukkan bahwa adsorben kaolin memberikan hasil terbaik pada aktivasi termal 500°C dan 800°C. Pada suhu aktivasi 500°C, adsorben mampu menurunkan surfaktan hingga 80,82% dengan konsentrasi akhir 145,4 mg/l. Sementara itu, pada suhu aktivasi 800°C, penurunan surfaktan mencapai 73,81% dengan konsentrasi akhir 198,6 mg/l.



Gambar 12. Perbandingan Efisiensi Penurunan Surfaktan antar Adsorben dengan Aktivasi Suhu 500°C dan Aktivasi Asam



Gambar 13. Perbandingan Efisiensi Penurunan Surfaktan Hasil Adsorben dengan Aktivasi Suhu 800°C terhadap Jenis Adsorben

Dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan jenis tanah liat untuk adsorben terhadap hasil akhir memberikan pengaruh yang signifikan. Diketahui jika hasil p value < 5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir surfaktan. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir surfaktan.

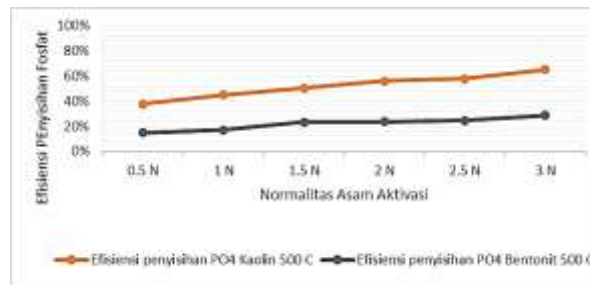
Dari kedua hasil menunjukkan nilai p value >5%. Yang menandakan H0 diterima pada adsorben dengan aktivasi suhu 500°C dan 800°C. hal itu memungkinkan terjadi karena pada adsorben memiliki kemampuan tersendiri untuk mengadsorpsi surfaktan anionik. Dengan kaolin menggunakan muatan positif pada lapisan adsorben dan dengan luas permukaan adsorben yang terbentuk, membuat adanya adsorpsi dengan adanya *ligand exchange* dan menempelnya surfaktan pada jaringannya yang hidrofobik [15]. Sedangkan untuk bentonit, memiliki kemampuan luasnya permukaan adsorben yang terbentuk sehingga memungkinkan banyaknya surfaktan anionik yang menempel dengan jaringan hidrofobiknya [16].

Analysis of Variance						Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Tanah	1	465	465.0	0,04	0,850	Jenis Tanah	1	48820	48820	3,01	0,114
Error	10	123575	12357,5			Error	10	162424	16242		
Total	11	124040				Total	11	211244			

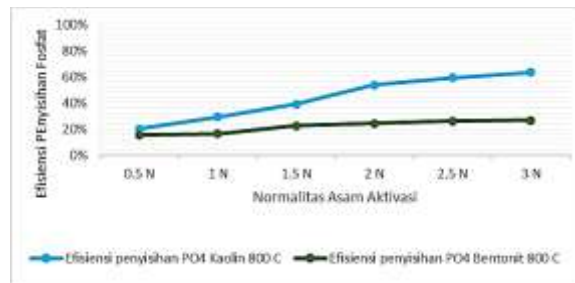
Gambar 14. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Jenis Adsorben dengan Suhu Aktivasi 500°C (kiri) dan Suhu Aktivasi 800°C (kanan) terhadap Hasil Surfaktan

3.2.2 Fosfat terhadap Jenis Adsorben

Hasil yang didapat dari perbandingan hasil akhir fosfat terhadap jenis tanah liat untuk adsorben menunjukkan nilai yang terbaik dengan penggunaan jenis tanah liat kaolin pada adsorben dengan aktivasi termal 500 C dan 800 C. Hasil terbaik pada adsorben dengan suhu aktivasi 500°C menunjukkan kemampuan penurunan surfaktan hingga 65,05% dengan hasil akhirnya 21 mg/l, dan dengan 63,37% dengan hasil akhir 22,1 mg/l pada adsorben dengan suhu aktivasi 800 C.



Gambar 15. Perbandingan Efisiensi Penurunan Fosfat antar Adsorben dengan Aktivasi Suhu 500°C dan Aktivasi Asam



Gambar 16. Perbandingan Efisiensi Penurunan Fosfat antar Adsorben dengan Aktivasi Suhu 800°C dan Aktivasi Asam

Dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan jenis tanah liat untuk adsorben terhadap hasil akhir memberikan pengaruh yang signifikan. Diketahui jika hasil p value <5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir fosfat. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir fosfat.

Pada kedua hasil tersebut menunjukkan p value <5% sehingga H0 ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh signifikan jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir fosfat pada adsorben dengan aktivasi termal 500°C dan 800°C. Hal ini memungkinkan terjadi dikarenakan adanya perbedaan kandungan mineral sebagai muatan positif. Diketahui bahwa surfaktan mempunyai perbandingan 1:1 dalam sedangkan bentonit 2:1. Dengan nilai tersebut, memungkinkan lebih banyaknya gugus aktif positif pada adsorben, sehingga jenis adsorben memiliki pengaruh terhadap hasil akhir fosfat [8] [13].

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Tanah	1	976,7	976,69	44,64	0,000
Error	10	218,8	21,88		
Total	11	1195,5			

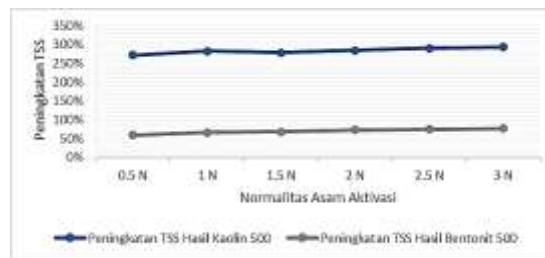
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Tanah	1	538,4	538,41	9,09	0,013
Error	10	592,1	59,21		
Total	11	1130,5			

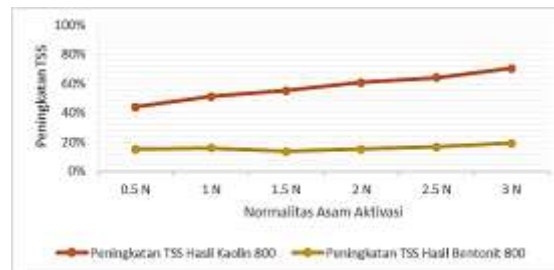
Gambar 17. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Jenis Adsorben dengan suhu aktivasi 500°C (kiri) dan suhu aktivasi 800°C (kanan) terhadap Hasil Fosfat

3.2.3 TSS terhadap Jenis Adsorben

Hasil yang didapat dari perbandingan hasil akhir TSS terhadap jenis tanah liat untuk adsorben menunjukkan nilai yang terbaik dengan penggunaan jenis tanah liat bentonit pada adsorben dengan aktivasi termal 500 C dan 800 C. Hasil terbaik pada adsorben dengan suhu aktivasi 500 C menunjukkan kemampuan peningkatan TSS hanya hingga 77% dengan hasil akhirnya 221 mg/l, dan dengan 19% dengan hasil akhir 149 mg/l pada adsorben dengan suhu aktivasi 800 C.



Gambar 18. Perbandingan Peningkatan TSS Hasil antar Adsorben dengan Aktivasi Suhu 500°C terhadap Jenis Adsorben



Gambar 19. Perbandingan Peningkatan TSS Hasil Adsorben dengan Aktivasi Suhu 800°C terhadap Jenis Adsorben

Dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan jenis tanah liat untuk adsorben terhadap hasil akhir memberikan pengaruh yang signifikan. Diketahui jika hasil p value < 5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir TSS. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan jenis tanah liat untuk adsorben dengan hasil akhir TSS.

Pada kedua hasil tersebut menunjukkan p value < 5% sehingga H0 ditolak. Dapat diketahui bahwa pada adsorben bentonit memiliki kekutan yang lebih baik daripada kaolinit. Hal ini dikarenakan secara komposisi natural bentonit yang berbentuk Struktur 2:1 untuk perbandingan lapis silika dan alumina. Dengan pemberian aktivasi termal, bentonit lebih bersifat padat karena tekanan pada pemberian panas akan menekan gaya tarik menarik antar lapisan. Membentuk agregat kuat sebelum adanya dikenakan gaya geser [8].

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Tanah	1	213333	213333	2747,96	0,000
Error	10	776	78		
Total	11	214110			

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Jenis Tanah	1	8112,0	8112,00	111,74	0,000
Error	10	726,0	72,60		
Total	11	8838,0			

Gambar 20. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Jenis Adsorben dengan Suhu Aktivasi 500°C (kiri) dan Suhu Aktivasi 800°C (kanan) terhadap Hasil Peningkatan TSS

Dapat diketahui bahwa nilai kadar surfaktan, dan fosfat terlalu tinggi sehingga dilakukannya upaya peningkatan efisiensi untuk mereduksi kadar tersebut. Salah satu upayanya adalah dengan mengatur kondisi pH pada limbah laundry. Karena dengan kondisi limbah yang lebih asam, akan merubah spesiasi fosfat serta membuat permukaan adsorben menjadi lebih aktif dengan muatan positifnya [17] [18] [19].

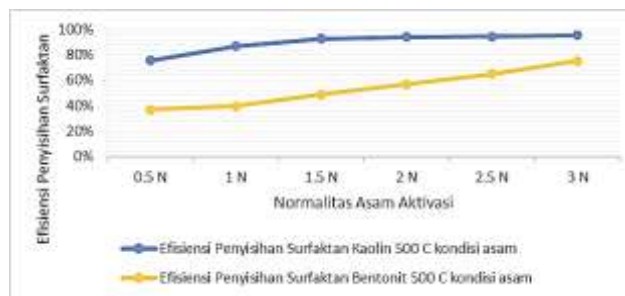
3.3 Pemberian asam

Pada pengolahan adsorpsi, nilai pH mampu mempengaruhi mekanisme adsorpsi yang akhirnya memberi perbedaan pada hasil adsorpsi. Dapat diketahui pada pH yang sedikit asam, gugus muatan positif pada adsorben menjadi lebih aktif meningkat sehingga memberikan kapasitas untuk pengikatan adsorpsi surfaktan anionik. Maka dari itu didapatkan hasil sebagai berikut pada masing masing jenis adsorben yang telah diaktivasi secara termal dengan suhu 500°C.

Tabel 2. Hasil Kemampuan Adsorben Aktivasi Termal 500°C ada Kondisi Limbah Laundry Sedikit Asam

Nama Sampel		Kadar Hasil pengujian			Efisiensi penyisihan		
Jenis adsorben	Aktivasi Asam	TSS	Surfaktan	PO4	TSS	Surfaktan	PO4
Kaolin	HCL 0,5 N	450,0 mg/l	184,4 mg/l	1,2 mg/l	- 260 %	75,68 %	98,01 %
	HCL 1 N	477,0 mg/l	101,2 mg/l	0,8 mg/l	- 282 %	86,65 %	98,65 %
	HCL 1,5 N	480,0 mg/l	53,8 mg/l	0,6 mg/l	- 284 %	92,90 %	99,09 %
	HCL 2 N	482,0 mg/l	46,2 mg/l	0,5 mg/l	- 286 %	93,91 %	99,14 %
	HCL 2,5 N	489,0 mg/l	43,6 mg/l	0,5 mg/l	- 291 %	94,25 %	99,25 %
	HCL 3 N	505,0 mg/l	34,9 mg/l	0,4 mg/l	- 304 %	95,40 %	99,30 %
Bentonit	HCL 0,5 N	191,0 mg/l	477,6 mg/l	33,4 mg/l	- 53 %	37,02 %	44,52 %
	HCL 1 N	199,0 mg/l	457,2 mg/l	31,6 mg/l	- 59 %	39,70 %	47,51 %
	HCL 1,5 N	200,0 mg/l	389,2 mg/l	27,6 mg/l	- 60 %	48,67 %	54,15 %
	HCL 2 N	204,0 mg/l	329,2 mg/l	26,5 mg/l	- 63 %	56,58 %	55,98 %
	HCL 2,5 N	210,0 mg/l	265,2 mg/l	25,6 mg/l	- 68 %	65,02 %	57,48 %
	HCL 3 N	215,0 mg/l	187,5 mg/l	19,7 mg/l	- 72 %	75,27 %	67,24 %

Dengan upaya peningkatan efisiensi tersebut, didapatkan hasil terbaru yang lebih baik. Dengan data bahwa efisiensi penurunan terbaik dijumpai pada adsorben kaolin yaitu dengan hasil efisiensi 95,4% dengan hasil akhir 34,9 mg/l, dibandingkan dengan hasil akhir bentonit yaitu dengan efisiensi penurunan hanya dengan jumlah 75,27% dengan 187,5mg/l.



Gambar 22. Perbandingan Efisiensi Penurunan Surfaktan antara Adsorben pada Kondisi Limbah Sedikit Asam

Didukung dengan hasil uji ANOVA *one-way* yang menunjukkan bagaimana gambaran pengaruh kondisi asam limbah dengan hasil akhir surfaktan pada masing masing adsorben. Diketahui jika hasil p value <5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap kondisi keasaman pada limbah dengan hasil akhir surfaktan. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan terhadap kondisi keasaman pada limbah dengan hasil akhir surfaktan.

Pada kedua hasil tersebut menunjukkan p value <5% pada adsorben kaolin dan p value > 5% pada adsorben bentonit. Sehingga secara statistik dapat disimpulkan bahwa H0 ditolak untuk adsorben kaolin dan H0 diterima pada adsorben bentonit. Dengan penjelasan bahwa pada adsorben kaolin, jenis keasaman pada limbah memberikan pengaruh secara signifikan terhadap hasil akhir surfaktan. Sedangkan pada kondisi adsorben bentonit, kondisi keasaman pada limbah tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap hasil akhir surfaktan [4] [15] [16].

Analysis of Variance

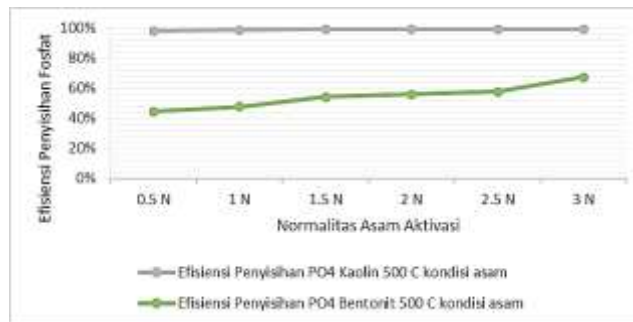
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
PH Tanah Liat_1	1	183893	183893	17,21	0,002
Error	10	106871	10687		
Total	11	290764			

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
PH Tanah Liat_1	1	4445	4445	0,46	0,513
Error	10	96519	9652		
Total	11	100964			

Gambar 21. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Kondisi Keasaman Limbah dengan Adsorben Kolin (kiri) dan Adsorben Bentonit (kanan) terhadap Hasil Surfaktan

Kemudian dilanjutkan dengan hasil fosfat, didapatkan hasil terbaru yang lebih baik. Dengan data bahwa efisiensi penurunan terbaik dijumpai pada adsorben kaolin yaitu dengan hasil efisiensi 93,3% dengan hasil akhir 0,4 mg/l, dibandingkan dengan hasil akhir bentonit yaitu dengan efisiensi penurunan hanya dengan jumlah 67,24% dengan 19,7 mg/l.



Gambar 23. Perbandingan Efisiensi Penurunan Fosfat antar Adsorben pada Kondisi Limbah Sedikit Asam

Didukung dengan hasil uji ANOVA *one-way* yang menunjukkan bagaimana gambaran pengaruh kondisi asam limbah dengan hasil akhir fosfat pada masing masing adsorben. Diketahui jika hasil p value <5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap kondisi keasaman pada limbah dengan hasil akhir fosfat. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan terhadap kondisi keasaman pada limbah dengan hasil akhir fosfat. Pada kedua hasil tersebut menunjukkan p value <5% pada adsorben kaolin dan bentonit. Sehingga secara statistik dapat disimpulkan bahwa H0 ditolak untuk kedua adsorben. Oleh karena itu, dapat diberi penjelasan bahwa pada kedua adsorben, jenis keasaman pada limbah memberikan pengaruh secara signifikan terhadap hasil akhir fosfat.

Analysis of Variance

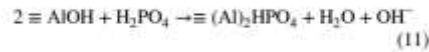
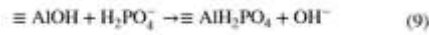
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
PH Tanah Liat_1	1	2396,7	2396,73	140,27	0,000
Error	10	170,9	17,09		
Total	11	2567,6			

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
PH Tanah Liat_1	1	1148,2	1148,17	69,54	0,000
Error	10	165,1	16,51		
Total	11	1313,3			

Gambar 24. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Kondisi Keasaman Limbah dengan Adsorben Kolin (kiri) dan Adsorben Bentonit (kanan) terhadap Hasil Fosfat

Pada fosfat, kondisi pH pada limbah juga mempengaruhi bagaimana fosfat dapat tereduksi. Tergantung kondisinya, terdapat spesies fosfat tergantung dari kondisi keasaman pada larutan. Ion ortofosfat $[PO_4]^{3-}$ berasal dari asam fosfat H_3PO_4 melalui pelepasan tiga proton H^+ . Pelepasan satu proton menghasilkan ion dihidrogen fosfat $H_2PO_4^-$, sedangkan pelepasan dua proton menghasilkan ion hidrogen fosfat HPO_4^{2-} . Spesiasi ini bergantung pada pH dan kekuatan ionik larutan. Dengan berbagai spesiasinya dapat diperkirakan adanya perbedaan potensi terikatnya fosfat dengan mineral pada adsorbent. Oleh karena itu adsorpsi dari ion dihidrogen fosfat ($H_2PO_4^-$) atau hidrogen fosfat (HPO_4^{2-}) dapat terjadi karena mekanisme pertukaran ligan. Dapat diketahui juga jika selama terjadi penambahan pH maka peningkatan terjadinya penolakan antara fosfat dengan permukaan adsorben. Terjadinya deprotonasi pada kondisi pH yang lebih tinggi pada permukaan adsorben menjadikan bermuatan lebih negatif. Kondisi tersebut dapat digambarkan sebagai berikut [17] [18] [19]:

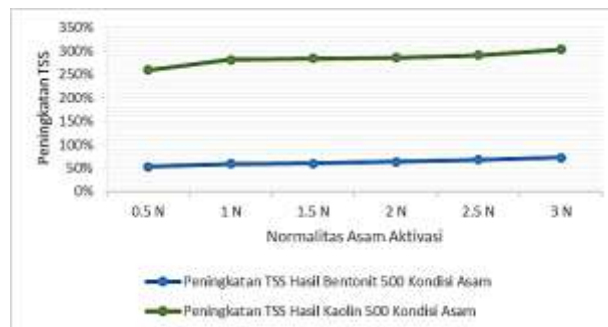


Gambar 25. Mekanisme Pertukaran Ligan pada Kaolinit

Kemudian dari kedua hasil tersebut dilakukan uji statistik ANOVA *one-way* yang akan menunjukkan apakah perbandingan kondisi keasaman pada limbah terhadap hasil akhir TSS memberikan pengaruh yang signifikan. Diketahui jika hasil p value <5% maka H0 ditolak dan H1 diterima. H0 yang dimaksud adalah hipotesa awal bahwa tidak ada nya pengaruh signifikan terhadap kondisi keasaman pada limbah dengan hasil akhir TSS. Sedangkan untuk H1 merupakan hipotesa yang menandakan bahwa adanya pengaruh signifikan terhadap kondisi keasaman pada limbah dengan hasil akhir TSS. Hasil pada kedua uji statistik menunjukkan bahwa p value >5% sehingga memberikan kesimpulan bahwa H0 diterima. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan adanya kondisi keasaman pada limbah tidak memberikan pengaruh terhadap hasil akhir TSS.

Analysis of Variance						Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
PH Tanah Liat_1	1	5,33	5,333	0,03	0,876	PH Tanah Liat_1	1	261,3	261,33	3,84	0,078
Error	10	2076,33	207,633			Error	10	680,3	68,03		
Total	11	2081,67				Total	11	941,7			

Gambar 26. Hasil Uji Statistik Anova One-way antar Kondisi Keasaman Limbah dengan Adsorben Kolin (kiri) dan Adsorben Bentonit (kanan) terhadap Peningkatan TSS



Gambar 27. Perbandingan Kenaikan TSS antar Adsorben pada Kondisi Limbah Sedikit Asam

4. Kesimpulan

Adsorben tanah liat teraktivasi khususnya kaolinit, mampu menurunkan kadar surfaktan dan fosfat secara efektif pada limbah *laundry*. Peningkatan konsentrasi asam pada aktivasi memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi, dengan semakin tinggi keasaman menghasilkan penurunan kadar surfaktan dan fosfat yang lebih besar. Pada kedua adsorben didapatkan hasil tertinggi pada masing masing aktivasi asam dengan 3N HCl. Hasil terbaik dari masing-masing adsorben pada aktivasi asam menunjukkan efisiensi penurunan surfaktan sebesar 80,82% pada kaolinit dengan konsentrasi akhir 145,4 mg/L, serta 77,33% pada bentonit dengan konsentrasi akhir 171,9 mg/L.

Aktivasi termal pada suhu 500°C memberikan kinerja terbaik, meskipun pengaruh suhu tidak selalu signifikan pada kemampuan untuk menurunkan surfaktan dikarenakan bergantung pada jenis tanah liat. Penurunan kemampuan pengurangan surfaktan terjadi secara signifikan terhadap suhu aktivasi termal 800°C bentonit, menghasilkan konsentrasi akhir surfaktan sebesar 298,4 mg/l dengan nilai penurunan efisiensi 60,64%. Oleh karena itu, didapatkan selisih efisiensi penurunan surfaktan dengan jumlah 16,69% lebih buruk terhadap kemampuan adsorben bentonit dengan aktivasi termal 500°C.

Kaolinit menunjukkan performa yang lebih optimal dibandingkan bentonit, terutama pada kondisi limbah yang sedikit asam, dengan efisiensi penurunan yang paling tinggi. Didapatkan hasil efisiensi penurunan kadar surfaktan sebesar 95,4% dengan hasil akhir 34,9 mg/l. Dari hasil tersebut didapatkan

selisih 14,58% lebih baik pada adsorben kaolinit. Sedangkan untuk bentonit, kondisi limbah sedikit asam tidak merubah kemampuan mereduksi kadar surfaktan, tetapi hanya memberikan pengaruh signifikan terhadap kemampuan mereduksi kadar fosfat.

Di sisi lain, nilai TSS mengalami peningkatan akibat abrasi adsorben selama proses berlangsung. Hasil peningkatan TSS dipengaruhi oleh suhu aktivasi termal dan jenis tanah liat adsorben yang dibuat. Kombinasi aktivasi termal dan asam pada kaolinit menunjukkan potensi sebagai metode pengolahan limbah *laundry* yang efektif dan ekonomis, meskipun diperlukan pengendalian lebih lanjut terhadap peningkatan TSS.

5. Daftar Pustaka

- [1] Jones, E. R., Van Vliet, M. T., Qadir, M., & Bierkens, M. F., "Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse," *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 2, pp. 237-254, 2021.
- [2] Kumar, S., Mostafazadeh, A. K., Kumar, L. R., Tyagi, R. D., Drogui, P., & Brien, E., "Advancements in laundry wastewater treatment for reuse: a review," *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 57, no. 11, pp. 927-946, 2022.
- [3] Braga, J. K., & Varesche, M. B. A., "Commercial laundry water characterisation. *American Journal of Analytical Chemistry*," *American Journal of Analytical Chemistry*, vol. 5, no. 1, p. 8, 2014.
- [4] Fellah, M., Hezil, N., Guerfi, K., Djellabi, R., Montagne, A., Iost, A., ... & Obrosof, A., "Mechanistic pathways of cationic and anionic surfactants sorption by kaolinite in water," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 6, pp. 7307-7321, 2021.
- [5] Barakan, S., & Aghazadeh, V., "The advantages of clay mineral modification methods for enhancing adsorption efficiency in wastewater treatment: a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 3, pp. 2572-2599, 2021.
- [6] Amirianshoja, T., Junin, R., Idris, A. K., & Rahmani, O., "A comparative study of surfactant adsorption by clay minerals," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 101, pp. 21-27, 2013.
- [7] Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S., "Surfactant adsorption isotherms: A review," *ACS omega*, vol. 6, no. 48, pp. 32342-32348., 2021.
- [8] Zamanian, M., Payan, M., & Afsharnia, N., "Thermo-Mechanical Behavior of Clays: Divergent Responses of Kaolinite and Montmorillonite in Temperature-Controlled Shear Tests," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 80, p. 107857, 2026.
- [9] España, V. A. A., Sarkar, B., Biswas, B., Rusmin, R., & Naidu, R., "Environmental applications of thermally modified and acid activated clay minerals: Current status of the art," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 13, pp. 383-397, 2019.
- [10] Teğın, İ., & Saka, C., "Chemical and thermal activation of clay sample for improvement adsorption capacity of methylene blue," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, vol. 103, no. 16, pp. 4503-4514, 2023.
- [11] Usman, M. O., Aturagaba, G., Ntale, M., & Nyakairu, G. W., "A review of adsorption techniques for removal of phosphates from wastewater," *Water Science & Technology*, vol. 86, no. 12, pp. 3113-3132, 2022.
- [12] Mudhoo, A., Chu, K. H., & Mondal, P., "Attrition resistance, a sporadically studied factor in aqueous adsorption: Status quo and research outlook towards creating better adsorbents," *Particuology*, vol. 77, pp. 71-78., 2023.
- [13] Gao, W., Zhao, S., Wu, H., Deligeer, W., & Asuha, S. , "Direct acid activation of kaolinite and its effects on the adsorption of methylene blue," *Applied Clay Science*, vol. 126, pp. 98-106, 2016.
- [14] Moodi, F., Ramezani-pour, A. A., & Safavizadeh, A. S., " Evaluation of the optimal process of thermal activation of kaolins," *Scientia Iranica*, vol. 18, no. 4, pp. 906-912., 2011.
- [15] Kamal, S., Kamal, A., Shahzad, T., Rehman, S., Azeem, M., & Bibi, I., "Potential of kaolinite as adsorbent to remove anionic surfactant from simulated industrial wastewater," *Desalination and Water Treatment*, vol. 88, pp. 85-92, 2017.
- [16] Zhang, Y., Long, Y., Yuan-cheng, Z., Zhu, Y., Wang, H., Wu, H., & Lu, W., "Effect of a mixed anionic-nonionic surfactant adsorption on bentonite structure and on distribution of

-
- pentachlorophenol," *Applied clay science*, vol. 69, pp. 93-98., 2012.
- [17] Fizir, Meriem, Amina Richa, Sami Touil, Rachid Fermous, Chahinez Tahir, Imane Hassene, Liu Wei, and Houda Douba, "Comparing adsorption properties of algerian kaolinite towards phosphate with those of activated carbon: Adsorption experiments, molecular modeling and an initiative toward hydroponic wastewaters remediation," *Water, Air, & Soil Pollution* , vol. 235, no. 7, p. 422, 2024.
- [18] Adeyi, A. A., Abayomi, T. G., Purkait, M. K., & Mondal, P, "Adsorptive removal of phosphate from aqueous solution by magnetic-supported kaolinite: characteristics, isotherm and kinetic Studies.," *Open J. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 7, p. 544., 2019.
- [19] García, K. I., Quezada, G. R., Arumi, J. L., Urrutia, R., & Toledo, P. G. , "Adsorption of phosphate ions on the basal and edge surfaces of kaolinite in low salt aqueous solutions using molecular dynamics simulations," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 125, no. 38, pp. 21179-21190, 2021.