Jurnal Serambi Engineering JSE
Volume XI, No.3, Juli 2026 Hal 21625 - 21631
p-ISSN : 2528-3561
e-ISSN : 2541-1934

Sintesis Pupuk Organik Cair dari Yeast Mud

Serafine Noelani Gunawan*, Risda Shabira Khoirunisa, Ketut Sumada, Caecilia Pujiastuti, Sani

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional 'Veteran' Jawa Timur, Surabaya, Indonesia
***Koresponden email**: serafine.ptk2@gmail.com

Diterima: 3 Juli 2026 Disetujui: 8 September 2026

Abstract
Yeast mud is a solid by-product of bioethanol production that contains considerable amounts of organic carbon (37.2%) and total nitrogen (1.10%), yet its initial C/N ratio of 33.82 substantially exceeds the range of 15–25 mandated by Indonesian National Standard (SNI) No. 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 for liquid organic fertilizer (LOF). This study synthesized LOF from yeast mud through a sequential two-stage process comprising solubilization in 1% citric acid followed by aerobic biodegradation via aeration. Variables investigated were yeast mud mass (100–500 g) and aeration duration (4–20 hours) at a constant airflow rate of 1.5 L/min. Yeast mud solubility in 1% citric acid reached 98.70–99.30% within the first four hours through simultaneous hydrolysis of protein, carbohydrate, and lipid fractions alongside mineral complexation by the carboxylate groups of citric acid. Subsequent aeration progressively reduced organic carbon from 37.2% to 18.20–24.60% and increased total nitrogen from 1.10% to 1.52–1.65% by the twentieth hour, thereby decreasing the C/N ratio from 33.82 to 11.03–16.18. All treatment combinations satisfied SNI requirements at 20 hours of aeration, with the most efficient optimum condition identified at 100 g yeast mud mass and 12 hours of aeration, yielding LOF with 24.80% organic carbon, 1.46% total nitrogen, a C/N ratio of 16.99, and pH 6.
Keywords*: yeast mud, liquid organic fertilizer, citric acid, aeration, c/n ratio*

Abstrak
Yeast mud merupakan limbah padat hasil samping produksi bioetanol yang mengandung karbon organik sebesar 37,2% dan nitrogen total sebesar 1,10% dalam jumlah yang cukup signifikan, namun rasio C/N awalnya sebesar 33,82 jauh melampaui kisaran 15–25 yang dipersyaratkan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 untuk pupuk organik cair (POC). Penelitian ini bertujuan mensintesis POC dari yeast mud melalui proses dua tahap secara berurutan, yakni solubilisasi menggunakan asam sitrat 1% yang dilanjutkan dengan biodegradasi aerobik melalui aerasi. Variabel yang dikaji meliputi massa yeast mud (100–500 g) dan durasi aerasi (4–20 jam) pada laju alir udara tetap sebesar 1,5 L/menit. Kelarutan yeast mud dalam asam sitrat 1% mencapai 98,70–99,30% sejak jam keempat melalui mekanisme hidrolisis simultan pada fraksi protein, karbohidrat, dan lipid, serta kompleksasi mineral oleh gugus karboksilat asam sitrat. Aerasi selanjutnya secara progresif menurunkan kadar C-organik dari 37,2% menjadi 18,20–24,60% dan meningkatkan kadar nitrogen total dari 1,10% menjadi 1,52–1,65% pada jam ke-20, sehingga rasio C/N turun dari 33,82 menjadi 11,03–16,18. Seluruh kombinasi perlakuan memenuhi persyaratan SNI pada jam ke-20, dengan kondisi optimum paling efisien diperoleh pada massa yeast mud 100 g dan waktu aerasi 12 jam, menghasilkan POC dengan C-organik 24,80%, nitrogen total 1,46%, rasio C/N 16,99, dan pH 6.
Kata Kunci*: yeast mud, pupuk organik cair, asam sitrat, aerasi, rasio c/n*

1. Pendahuluan

Perkembangan industri bioetanol di Indonesia yang pesat dalam rangka mendukung ketahanan energi dan transisi menuju energi terbarukan turut menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar yang memerlukan pengelolaan tepat guna. Salah satu limbah tersebut adalah yeast mud, yaitu biomassa khamir (Saccharomyces cerevisiae) yang mengendap sebagai produk samping proses fermentasi dan pengolahan limbah cair secara anaerobik. Hingga saat ini, sebagian besar yeast mud masih dibuang atau ditampung di lahan penimbunan tanpa dimanfaatkan lebih lanjut, padahal limbah sejenis dari industri fermentasi telah terbukti memiliki potensi agronomis yang berarti apabila diolah secara tepat [1].

Karakterisasi kimia yeast mud menunjukkan kandungan karbon organik sebesar 37,2%, nitrogen total 1,10%, serta berbagai unsur hara makro dan mikro seperti fosfor, kalium, kalsium, magnesium, seng, tembaga, dan mangan, sebagaimana lazim ditemukan pada biomassa sel khamir yang berasal dari industri fermentasi [2]. Komposisi organik yeast mud tersusun atas fraksi protein, karbohidrat, lipid, dan mineral

yang masing-masing memiliki jalur reaksi kimia yang berbeda ketika dikontakkan dengan pelarut asam, sehingga limbah ini berpotensi besar untuk dikonversi menjadi pupuk berkualitas tinggi alih-alih dibuang sebagai limbah semata. Pemanfaatan biomassa sisa fermentasi semacam ini juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular pada industri bioetanol [3].

Pupuk organik cair (POC) menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan pupuk organik padat konvensional, antara lain kemudahan aplikasi melalui penyiraman atau penyemprotan, kecepatan penyerapan hara oleh akar tanaman, serta efisiensi biaya pengangkutan dan penyimpanan. Kendati demikian, tantangan utama dalam mengonversi yeast mud menjadi POC terletak pada rasio C/N awal yang sangat tinggi, yaitu 33,82, jauh melampaui kisaran 15–25 yang dipersyaratkan Keputusan Menteri Pertanian No. 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 [4]. Rasio C/N yang berlebihan mengindikasikan bahan baku masih kaya karbon namun miskin nitrogen relatif, sehingga apabila diaplikasikan langsung ke tanaman akan terjadi kompetisi antara tanaman dan mikroba dalam memperebutkan unsur hara tersedia.

Penelitian ini mengembangkan strategi dua tahap untuk mengonversi yeast mud menjadi POC berstandar SNI. Tahap pertama memanfaatkan asam sitrat 1% sebagai pelarut sekaligus agen chelasi: sebagai pelarut, asam sitrat menghidrolisis komponen protein, karbohidrat, dan lipid menjadi senyawa terlarut; sebagai chelator, asam sitrat mengomplekskan ion-ion mineral sehingga tetap tersedia dalam fase cair [5]. Sifat asam organik lemah triprotik yang dimiliki asam sitrat menjadikannya pilihan yang relatif aman, murah, dan efektif untuk solubilisasi limbah organik [5]. Tahap kedua menerapkan aerasi intensif untuk mendorong degradasi biologis bahan organik melalui reaksi oksidasi aerobik, sebagaimana telah terbukti efektif dalam proses pengomposan untuk menurunkan rasio C/N dan mematangkan produk akhir [6].

Studi terdahulu telah menunjukkan bahwa aerasi pada proses pengomposan mampu menurunkan rasio C/N secara signifikan melalui oksidasi intensif bahan organik dan transformasi nitrogen ke bentuk yang lebih stabil [7], sedangkan laju serta pola aerasi sangat menentukan derajat kematangan kompos maupun emisi gas yang dihasilkan [8]. Kemampuan asam sitrat dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi mineral dari bahan organik melalui mekanisme khelasi juga telah banyak dilaporkan pada berbagai substrat organik [9],[10]. Pemanfaatan yeast mud sebelumnya telah dikaji untuk produksi pupuk organik padat melalui pengomposan aerob [11], namun penelitian mengenai kombinasi simultan antara solubilisasi asam sitrat dan aerasi intensif untuk sintesis POC dari yeast mud masih sangat terbatas.

Penelitian ini dirancang untuk mengisi celah tersebut dengan menginvestigasi pengaruh dua variabel kritis, yakni massa yeast mud dan durasi aerasi, terhadap parameter kualitas POC (kadar C-organik, nitrogen, rasio C/N, dan pH). Penelitian ini juga menjabarkan mekanisme reaksi stoikiometri yang mendasari proses pelarutan dan oksidasi, sehingga temuan dapat dipahami secara mendalam dan berpotensi dikembangkan menuju skala pilot sebagai bagian dari pengelolaan limbah industri bioetanol menjadi input pertanian bernilai tambah.

2. Metode Penelitian

Bahan dan Alat

Yeast mud diperoleh dari PT Energi Agro Nusantara (Mojokerto, Jawa Timur) dalam bentuk slurry hasil pengendapan dari tangki settling primer proses fermentasi bioetanol. Slurry dikeringkan menggunakan sinar matahari selama 24 jam hingga terbentuk padatan, selanjutnya dihaluskan menggunakan alu dan mortar hingga homogen, kemudian dianalisis komposisi awalnya. Asam sitrat grade analitik dilarutkan dalam akuades hingga konsentrasi 1% (b/v) sebagai pelarut utama dalam penelitian ini.

Peralatan yang digunakan meliputi neraca analitik (ketelitian ±0,0001 g), tangki aerasi berkapasitas 10 L, kompresor udara yang dilengkapi flowmeter (1–3 L/menit), kertas indikator pH (skala 0–14), beaker glass 1 L, gelas ukur 500 mL, magnetic stirrer, alu dan mortar, serta loyang pengering. Analisis kadar nitrogen total dan C-organik dilakukan menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS), sedangkan kadar air ditentukan dengan metode gravimetri.

Desain Eksperimen

Percobaan dirancang menggunakan rancangan faktorial dua faktor dengan kondisi tetap berupa 1 liter larutan asam sitrat 1% (pH ≈ 4) dan laju alir udara 1,5 L/menit. Faktor variabel pertama adalah massa yeast mud (100, 200, 300, 400, dan 500 g), sedangkan faktor variabel kedua adalah durasi aerasi (4, 8, 12, 16, dan 20 jam). Yeast mud dicampurkan ke dalam larutan asam sitrat 1% kemudian diaerasi menggunakan kompresor yang mendistribusikan udara ke dalam tangki aerasi melalui selang distribusi. Setelah setiap periode aerasi, campuran disaring untuk memisahkan filtrat POC dari residu padatan yang tidak terlarut, kemudian filtrat dianalisis parameter kualitasnya.

Metode Analisis

Kadar C-organik ditentukan dengan metode AAS *(Atomic Absorption Spectrophotometry)* menggunakan larutan standar karbon pada panjang gelombang yang sesuai. Kadar nitrogen total ditetapkan dengan metode AAS melalui preparasi sampel menggunakan larutan pengekstrak dan pembacaan absorbansi pada panjang gelombang nitrogen. Derajat keasaman (pH) diukur menggunakan kertas indikator pH. Kelarutan yeast mud dinyatakan sebagai rasio massa terlarut terhadap massa awal (%). Kepatuhan mutu POC terhadap standar regulasi dinilai berdasarkan Keputusan Menteri Pertanian No. 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 yang mensyaratkan C-organik ≥ 10%, nitrogen total ≥ 0,5%, rasio C/N 15–25, dan pH 4–9 [4].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakterisasi Bahan Baku

Hasil uji awal terhadap 100 g padatan yeast mud tersaji pada **Tabel 1**. Kadar air yang relatif rendah (9,16%) mengindikasikan bahwa pengeringan slurry menggunakan sinar matahari selama 24 jam telah berjalan cukup efektif, sehingga sampel cukup stabil untuk dianalisis lebih lanjut. Kandungan C-organik yang cukup tinggi (37,2%) menegaskan bahwa yeast mud masih kaya akan bahan organik, sementara kadar nitrogen yang jauh lebih rendah (1,10%) menghasilkan rasio C/N sebesar 33,82, yang secara signifikan melampaui batas atas SNI (15–25). Hal ini menunjukkan perlunya proses pematangan lebih lanjut sebelum yeast mud layak digunakan sebagai POC.

Tabel 1. Karakteristik Awal Yeast Mud

Parameter	Hasil Uji
Kadar Air (%)	9,16
C-Organik (%)	37,2
Nitrogen Total (%)	1,10
pH	7
Rasio C/N	33,82

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Larutan asam sitrat 1% dalam 1 liter akuades menunjukkan pH ≈ 4, yang berada tepat pada batas bawah persyaratan SNI untuk pH POC (4–9). Kondisi ini membuktikan bahwa konsentrasi 1% sudah memadai untuk menciptakan lingkungan asam yang diperlukan bagi proses hidrolisis dan solubilisasi, sekaligus lebih efisien dari segi penggunaan bahan dibandingkan konsentrasi yang lebih tinggi. Asam sitrat sebagai asam organik lemah triprotik memiliki sifat chelating terhadap ion logam, sehingga tidak hanya berfungsi menurunkan pH tetapi juga memfasilitasi pelepasan komponen hara mineral ke fase cair [5].

3.2 Pelarutan Yeast Mud dalam Larutan Asam Sitrat 1%

Tabel 2 menyajikan persentase kelarutan yeast mud terhadap massa awal pada berbagai kombinasi massa dan waktu aerasi. Kelarutan yeast mud dalam asam sitrat 1% mencapai 98,70–98,88% sejak jam keempat dan relatif konstan hingga jam ke-20 (99,06–99,30%). Tingginya kelarutan sejak awal ini merupakan konsekuensi langsung dari serangkaian reaksi stoikiometri yang berlangsung segera begitu asam sitrat berkontak dengan keempat fraksi utama penyusun yeast mud.

Tabel 2. Persentase Kelarutan Yeast Mud dalam Asam Sitrat 1% (%)

Waktu Aerasi (jam)	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g
4	98,70	98,75	98,77	98,88	98,86
8	99,00	98,90	98,87	98,95	98,92
12	99,10	99,00	98,93	99,00	98,96
16	99,20	99,10	99,00	99,05	99,02
20	99,30	99,15	99,07	99,10	99,06

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Fraksi protein yang diwakili alanin ($C_3H_7NO_2$) mengalami hidrolisis oleh ion H^+ dari asam sitrat ($C_6H_8O_7$) membentuk serin ($C_3H_7NO_3$) yang larut sempurna disertai pelepasan CO_2 dan H_2O. Fraksi karbohidrat berupa sukrosa ($C_{12}H_{22}O_{11}$) terhidrolisis menjadi glukosa ($C_6H_{12}O_6$) yang mudah larut dalam

suasana asam. Fraksi lipid berupa tripalmitin ($C_{51}H_{98}O_6$) terhidrolisis menghasilkan gliserol dan asam palmitat bebas, sedangkan komponen mineral seperti magnesium membentuk kompleks magnesium sitrat ($MgC_6H_5O_7$) yang larut berkat sifat chelating asam sitrat [5],[9]. Keempat mekanisme reaksi ini secara bersama-sama menjelaskan mengapa kelarutan yeast mud mendekati 99% bahkan sejak jam pertama kontak.

Peningkatan kelarutan dari jam ke-4 menuju jam ke-20 yang relatif kecil (0,6–1,0 g pada seluruh variasi massa) menunjukkan bahwa proses pelarutan utama berlangsung sangat cepat pada tahap awal, sedangkan aerasi lanjutan berperan lebih sebagai faktor pendukung homogenisasi dan penyedia O_2 untuk reaksi oksidasi tahap berikutnya [5]. Keseragaman persentase kelarutan (≈99%) di seluruh variasi massa awal mengindikasikan bahwa efektivitas asam sitrat 1% sebagai pelarut bersifat proporsional terhadap jumlah substrat yang tersedia.

3.3 Pengaruh Massa dan Waktu Aerasi terhadap Kadar C-Organik

Tabel 3 menampilkan hasil pengukuran kadar C-organik POC pada seluruh kombinasi perlakuan. Kadar C-organik menurun secara konsisten seiring bertambahnya waktu aerasi pada semua variasi massa. Nilai awal C-organik yeast mud sebelum aerasi adalah 37,2%; setelah 4 jam aerasi turun menjadi 32,50–35,50%, dan pada jam ke-20 mencapai 18,20–24,60%. Seluruh nilai tersebut telah melampaui ambang minimum SNI sebesar 10%, sehingga semua perlakuan dinyatakan memenuhi persyaratan C-organik.

Tabel 3. Kadar C-Organik POC pada Berbagai Massa Yeast Mud dan Waktu Aerasi (%)

Waktu Aerasi (jam)	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g
4	32,50	33,60	34,20	34,80	35,50
8	28,55	30,55	30,39	32,07	32,19
12	24,80	27,50	27,10	29,35	29,20
16	21,40	24,45	24,69	26,62	26,74
20	18,20	21,40	22,80	23,90	24,60

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Penurunan C-organik ini terjadi melalui tiga jalur oksidasi aerobik yang berlangsung simultan. Pertama, glukosa yang terbentuk dari hidrolisis karbohidrat dioksidasi sempurna oleh O_2 menjadi CO_2 dan H_2O. Kedua, asam palmitat yang dihasilkan dari hidrolisis lipid mengalami β-oksidasi menghasilkan CO_2. Ketiga, asam piruvat sebagai kerangka karbon sisa metabolisme protein turut teroksidasi menjadi CO_2. Secara stoikiometri, total CO_2 yang dilepaskan mencapai 2,7955 mol (setara 123,00 g) per 100 g basis yeast mud, yang menjelaskan penurunan kadar C-organik secara progresif selama aerasi berlangsung. Mekanisme ini sejalan dengan prinsip bahwa aerasi menyediakan O_2 sebagai akseptor elektron terminal yang mendorong oksidasi karbon organik secara berkelanjutan [7],[8].

Pada waktu aerasi yang sama, massa yeast mud yang lebih besar menghasilkan kadar C-organik akhir yang lebih tinggi. Pada jam ke-20, perlakuan 100 g menyisakan C-organik 18,20%, sedangkan perlakuan 500 g masih 24,60%. Fenomena ini berkaitan dengan menurunnya ketersediaan O_2 efektif per satuan massa substrat seiring bertambahnya massa yeast mud dalam volume larutan yang tetap, sehingga reaksi oksidasi karbon berjalan lebih lambat pada perlakuan bermassa besar. Kondisi ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa ketersediaan oksigen merupakan faktor penentu utama keberhasilan dekomposisi, karena kekurangan oksigen menekan laju evolusi CO_2 dan derajat degradasi substrat organik [8].

3.4 Pengaruh Massa dan Waktu Aerasi terhadap Kadar Nitrogen Total

Berbeda dari kecenderungan C-organik, kadar nitrogen total POC meningkat secara monoton seiring bertambahnya waktu aerasi pada seluruh variasi massa (**Tabel 4**). Kadar N awal yeast mud sebelum aerasi adalah 1,10%; sejak jam ke-4 kadar N pada semua perlakuan telah melampaui nilai awal (kisaran 1,12–1,28%), dan terus meningkat hingga jam ke-20 mencapai 1,52–1,65%. Seluruh nilai ini telah melampaui ambang minimum SNI sebesar 0,5% pada semua waktu aerasi yang diuji.

Peningkatan kadar N dapat dijelaskan melalui mekanisme retensi nitrogen bertahap. Deaminasi fraksi protein melepaskan amonia (NH_3) sebesar 0,4535 mol dari 49,63 g protein per 100 g yeast mud. Pada kondisi pH asam (4–6) yang dipertahankan oleh asam sitrat, NH_3 segera terprotonasi membentuk ion amonium (NH_4^+) yang tidak mudah menguap dan tetap terlarut dalam fase cair POC. Dengan demikian, nitrogen yang pada kondisi netral hingga basa berisiko hilang melalui volatilisasi justru tertahan dalam sistem sejak menit-menit pertama aerasi [5],[13].

Tabel 4. Kadar Nitrogen Total POC pada Berbagai Massa Yeast Mud dan Waktu Aerasi (%)

Waktu Aerasi (jam)	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g
4	1,280	1,220	1,180	1,150	1,120
8	1,369	1,310	1,278	1,250	1,227
12	1,460	1,400	1,380	1,350	1,330
16	1,554	1,490	1,488	1,450	1,427
20	1,650	1,580	1,600	1,550	1,520

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Seiring bertambahnya waktu aerasi, NH_4^+ mengalami nitrifikasi dua tahap menjadi nitrit (NO_2^-) lalu nitrat (NO_3^-), yang secara stoikiometri menghasilkan 28,12 g nitrogen nitrat per 100 g basis yeast mud. Ion NO_3^- bersifat stabil dan tetap terlarut, sehingga nitrogen tidak hilang dari sistem melainkan berubah bentuk secara bertahap melalui jalur $NH_3 \rightarrow NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$. Transformasi nitrogen semacam ini berjalan lebih efisien dalam kondisi aerasi yang memadai [12]. Pengaruh massa yeast mud terhadap kadar N juga terlihat jelas, di mana massa yang lebih besar menghasilkan kadar N akhir yang lebih tinggi karena muatan awal senyawa organik bernitrogen yang tersedia turut lebih besar [6],[12].

3.5 Pengaruh Massa dan Waktu Aerasi terhadap Rasio C/N

Rasio C/N menurun secara sistematis seiring bertambahnya waktu aerasi pada seluruh variasi massa sebagai respons gabungan dari penurunan C-organik dan peningkatan nitrogen yang berlangsung simultan (**Tabel 5**). Nilai C/N pada jam ke-4 berkisar 25,39 (massa 100 g) hingga 31,70 (massa 500 g), kemudian menurun bertahap hingga jam ke-20 menjadi 11,03 (massa 100 g) hingga 16,18 (massa 500 g).

Tabel 5. Rasio C/N POC pada Berbagai Massa Yeast Mud dan Waktu Aerasi

Waktu Aerasi (jam)	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g
4	25,39	27,54	28,98	30,26	31,70
8	20,85	23,32	23,78	25,66	26,23
12	16,99	19,64	19,64	21,74	21,95
16	13,77	16,41	16,59	18,36	18,74
20	11,03	13,54	14,25	15,42	16,18

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Kondisi pertama yang memenuhi seluruh parameter SNI secara bersamaan adalah massa 100 g dengan waktu aerasi 12 jam, menghasilkan C-organik 24,80%, N 1,46%, dan C/N 16,99, yang berada tepat dalam kisaran SNI (15–25). Perlakuan bermassa lebih besar umumnya baru memenuhi kisaran C/N SNI pada jam ke-12 hingga ke-20, karena distribusi O_2 yang kurang merata per satuan massa memperlambat laju oksidasi karbon relatif terhadap laju retensi nitrogen [8]. Perlu dicatat bahwa beberapa perlakuan bermassa 100–300 g pada jam ke-20 menghasilkan C/N di bawah 15 (11,03–14,25); kondisi ini mencerminkan tingkat kematangan POC yang tinggi dan tidak mengindikasikan penurunan kualitas, karena kadar C-organik dan nitrogen masing-masing tetap berada jauh di atas ambang minimum SNI [7].

3.6 Pengaruh Massa dan Waktu Aerasi terhadap pH

Nilai pH POC cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu aerasi pada seluruh variasi massa (**Tabel 6**). Pada massa 100 dan 200 g, pH meningkat dari 4 pada jam ke-4 menjadi 6 pada jam ke-20; pada massa 300 g dari 5 menjadi 6; serta pada massa 400 dan 500 g dari 5 menjadi 7. Seluruh nilai pH pada semua perlakuan berada pada rentang 4–7, yang telah memenuhi persyaratan SNI (pH 4–9).

Tabel 6. pH POC pada Berbagai Massa Yeast Mud dan Waktu Aerasi

Waktu Aerasi (jam)	100 g	200 g	300 g	400 g	500 g
4	4	4	5	5	5
8	4	5	5	5	5
12	5	5	5	6	6
16	5	6	6	6	6
20	6	6	6	7	7

Sumber: Hasil analisis laboratorium

Kenaikan pH ini secara stoikiometri berkaitan dengan pembentukan ion OH^- dari kesetimbangan amonia-amonium (Reaksi 3) yang secara bertahap menetralkan keasaman larutan, serta terkonsumsinya H^+ dari asam sitrat selama reaksi hidrolisis tahap awal. Pengaruh ini lebih dominan dibandingkan produksi H^+ dari proses nitrifikasi tahap pertama, sehingga pH sistem secara neto cenderung meningkat [5]. pH akhir yang tetap berada pada rentang 4–7 dan tidak mencapai kondisi basa merupakan hasil interaksi antara pH yeast mud awal yang mendekati netral (≈7) dengan pH larutan asam sitrat 1% yang bersifat asam (≈4), sehingga campuran keduanya bergeser bertahap menuju kondisi lebih netral seiring berlangsungnya dekomposisi aktif [6]. Massa yeast mud yang lebih besar menghasilkan pH akhir yang lebih tinggi karena kapasitas penyangga biomassa yang lebih besar serta lebih banyaknya substrat bernitrogen yang mengalami amonifikasi menghasilkan akumulasi NH_4OH [6].

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa yeast mud dari industri bioetanol dapat dikonversi menjadi pupuk organik cair (POC) bermutu SNI melalui proses dua tahap yang terdiri atas solubilisasi menggunakan asam sitrat 1% dan biodegradasi aerobik melalui aerasi. Solubilisasi yeast mud dalam asam sitrat 1% mencapai kelarutan yang sangat tinggi (98,70–99,30%) sejak jam keempat melalui mekanisme hidrolisis simultan fraksi protein, karbohidrat, dan lipid serta kompleksasi mineral oleh gugus karboksilat asam sitrat.

Aerasi selanjutnya secara konsisten menurunkan kadar C-organik dari 37,2% menjadi 18,20–24,60% dan meningkatkan kadar nitrogen total dari 1,10% menjadi 1,52–1,65% pada jam ke-20, sehingga rasio C/N turun dari 33,82 menjadi 11,03–16,18. Seluruh perlakuan memenuhi persyaratan SNI (C-organik ≥ 10%, N ≥ 0,5%, C/N 15–25, pH 4–9) pada jam ke-20, dengan kondisi paling efisien yang memenuhi seluruh parameter SNI secara bersamaan dicapai pada massa yeast mud 100 g dengan waktu aerasi 12 jam (C-organik 24,80%, N 1,46%, C/N 16,99, pH 6).

Massa bahan dan waktu aerasi terbukti berpengaruh nyata terhadap kualitas POC yang dihasilkan. Penambahan waktu aerasi secara konsisten menurunkan C-organik dan rasio C/N melalui oksidasi karbon menjadi CO_2, sekaligus meningkatkan nitrogen melalui retensi sebagai NH_4^+ dan NO_3^-, sedangkan massa bahan yang lebih besar memperlambat laju penurunan C-organik akibat terbatasnya ketersediaan O_2 efektif per satuan massa substrat. Temuan ini menegaskan kelayakan teknis pemanfaatan limbah yeast mud menjadi input pertanian bernilai tambah.

5. Saran

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah diuraikan, beberapa saran dapat dikemukakan untuk penelitian selanjutnya. Pertama, perlu dilakukan analisis kandungan logam berat (Pb, Cd, As, Hg, Cr, Ni) dan cemaran mikroba (Escherichia coli dan Salmonella sp.) agar kepatuhan terhadap seluruh persyaratan teknis SNI dapat dipastikan secara komprehensif. Kedua, variasi konsentrasi asam sitrat (0,5%; 1%; 2%; 3%) perlu dikaji untuk menentukan konsentrasi optimal yang memberikan kualitas POC terbaik dengan efisiensi biaya tertinggi. Ketiga, rentang waktu aerasi yang lebih luas (kurang dari 4 jam dan lebih dari 20 jam) perlu dieksplorasi untuk menentukan titik optimum dari segi konsumsi energi dan biaya operasional. Keempat, uji aplikasi langsung pada tanaman diperlukan untuk memverifikasi efektivitas agronomis POC yang dihasilkan, sementara analisis kelayakan ekonomi menyeluruh diperlukan sebagai dasar pengembangan dari skala laboratorium menuju skala pilot maupun industri.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Energi Agro Nusantara (Mojokerto) atas penyediaan sampel yeast mud yang digunakan dalam penelitian ini. Terima kasih juga disampaikan kepada pihak laboratorium yang telah membantu pelaksanaan analisis kadar C-organik dan nitrogen menggunakan metode AAS.

7. Daftar Pustaka

[1] A. Alayu and S. Leta, "Brewery sludge quality, agronomic importance and its short-term residual effect on soil properties," International Journal of Environmental Science and Technology, vol. 17, no. 4, pp. 2337–2348, 2020.

[2] S. B. Onofre, I. C. Bertoldo, D. Abatti, and D. Refosco, "Chemical composition of the biomass of Saccharomyces cerevisiae obtained from the beer manufacturing process," International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology, vol. 2, no. 2, pp. 558–562, 2017.

[3] M. F. Vargas, M. V. Mestre, C. Vergara, P. Maturano, D. Petrignani, V. Pesce, and F. Vazquez, "Residual brewer's Saccharomyces cerevisiae yeasts as biofertilizers in horticultural seedlings: towards a sustainable industry and agriculture," Frontiers in Industrial Microbiology, vol. 2, p. 1360263, 2024.
[4] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, Keputusan Menteri Pertanian Nomor 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah. Jakarta: Kementan RI, 2019.
[5] E. Książek, "Citric acid: Properties, microbial production, and applications in industries," Molecules, vol. 29, no. 1, p. 22, 2024.
[6] G. Mancuso, G. Bonanomi, M. Zotti, and A. Zoina, "Factors influencing the composting process of vegetal waste: A review of recent technological innovations, microbial dynamics, and operational challenges," Journal of Agricultural Engineering, vol. 76, no. 2, 2024.
[7] D. H. Nada, F. D. Y. P. Abi, and A. Nadut, "Pengaruh waktu dan metode fermentasi terhadap kandungan C, N, P, K dalam pupuk organik cair dari limbah air kelapa tua, limbah buah-buahan dan molase," Agroteknika, vol. 8, no. 1, pp. 54–64, 2025.
[8] L. Peng, R. Tang, G. Wang, R. Ma, Y. Li, G. Li, and J. Yuan, "Effect of aeration rate, aeration pattern, and turning frequency on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting," Environmental Technology & Innovation, vol. 29, p. 102997, 2023.
[9] S. Priyadi, P. Darmaji, U. Santoso, and P. Hastuti, "Chelation of plumbum and cadmium by citric acid in soybean seeds," Journal of Agritech, vol. 33, no. 4, pp. 407–414, 2013.
[10] Suparman, Suparto, and Eviati, "Peningkatan reaktivitas P-alam dengan pengasaman," Jurnal Tanah dan Iklim, vol. 20, pp. 69–79, 2002.
[11] A. P. Kusherawati, "Pengelolaan yeast mud menjadi pupuk organik padat menggunakan metode composting aerob," Jurnal Serambi Engineering, vol. 9, no. 3, 2024.
[12] Y. Wang, P. Xu, Y. Wang, J. Su, Z. Xu, Z. Jiang, Y. Wei, S. Hang, X. Ding, H. Zhang, L. Zhang, Y. Liu, and J. Li, "Effects of aeration modes and rates on nitrogen conversion and bacterial community in composting of dehydrated sludge and corn straw," Frontiers in Microbiology, vol. 15, p. 1372568, 2024.
[13] L. T. Ciobanu, D. Constantinescu-Aruxandei, I. C. Farcasanu, and F. Oancea, "Spent brewer's yeast lysis enables a best out of waste approach in the beer industry," International Journal of Molecular Sciences, vol. 25, no. 23, p. 12655, 2024.
[14] E. R. P. Redina, N. F. A. Awardani, and K. Sumada, "Pemanfaatan limbah mikroorganisme anaerob proses biogas menjadi pupuk organik padat," Jurnal Serambi Engineering, vol. 9, no. 4, pp. 10864–10869, 2024.
[15] D. S. Žmukić, L. Milovanović, N. Slijepčević, N. Duduković, Đ. Kerkez, L. Boudahmane, E. Caupos, J. Le Roux, R. Moilleron, and A. S. Leovac Maćerak, "Non-invasive acidic pretreatment technology of anaerobic digestion of waste-activated sludge (WAS) on biogas production: unveiling the role of extracellular polymeric substances (EPSs) and pharmaceutical degradation," Molecules, vol. 31, no. 2, p. 269, 2026.