

Pemanfaatan *Slurry* Biogas dari Penanganan Air Limbah Agroindustri Kopi sebagai Pupuk Cair

Utilization of Biogas Slurry from Coffee Agro-Industrial Wastewater Treatment for Liquid Fertilizer

Elida Novita^{1*}, Khofifah Faulina Rizki¹, Hendra Andiananta Pradana²

¹Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Jember 68121, Indonesia

²Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan, Jurusan Pertanian, Politeknik Negeri Banyuwangi, Banyuwangi 68461, Indonesia

*E-mail: elida_novita.ftp@unej.ac.id

Diterima: 5 Mei 2025; Disetujui: 28 Juli 2025

ABSTRAK

Air limbah pengolahan kopi dari metode olah basah mengandung bahan organik yang tinggi. Bioremediasi menjadi salah satu alternatif penanganan air limbah pengolahan kopi dengan beberapa jenis reaktor anaerobik yang mampu mereduksi bahan organik berkonsentrasi tinggi dan dapat memproduksi biogas sebagai sumber energi dan memproduksi *slurry*. *Slurry* proses bioremediasi ini berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber input unsur hara tanah. Tujuan penelitian ini yaitu karakterisasi berdasarkan nilai C/N dan merekomendasikan aplikasi konsentrasi *slurry* dari reaktor biogas konvensional, *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), dan *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) sebagai pupuk cair guna mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman tomat. Metode penelitian meliputi karakterisasi *slurry* dari reaktor tiga jenis reaktor, pengamatan pertambahan jumlah daun, tinggi tanaman, dan diameter batang tanaman tomat dengan aplikasi variasi konsentrasi *slurry* 25%, 50%, dan 100%. Uji Anova dilakukan menggunakan taraf nyata 5% dilanjutkan dengan Uji DMRT untuk analisis *post hoc*. Nilai C/N *slurry* biogas dari CSTR yakni 1,47 dan lebih kaya unsur hara daripada dua reaktor lainnya. Variasi pupuk cair dari ketiga reaktor biogas konvensional, UASB, dan CSTR tidak berbeda nyata pada semua parameter pertumbuhan vegetatif tanaman tomat yang mencakup jumlah daun, tinggi tanaman, dan diameter batang. Pemberian konsentrasi pupuk cair *slurry* hanya berpengaruh pada diameter batang minggu ke-2 (14 hari setelah tanam) sampai dengan ke-4 (30 hari setelah tanam) dengan konsentrasi terbaik yaitu 100% (200 ml pupuk cair + 0 ml air) dengan persentase kenaikan sebesar $20,18 \pm 1\%$. Pupuk cair dari biogas *slurry* dari pengolahan air limbah kopi dapat mendukung pertumbuhan tanaman tomat dan aplikasi *zero waste* pada agroindustri.

Kata kunci: air limbah pengolahan kopi; pupuk cair; *slurry* biogas; variasi reaktor biogas

ABSTRACT

Bioremediation offers an alternative treatment using various anaerobic reactor types, which effectively reduce organic load and produce biogas as a renewable energy source and slurry production. The slurry has potential as a liquid fertilizer due to its nutrient content. The study aimed to evaluate characterize based on the C/N value and recommend a slurry formulation from conventional, UASB, and CSTR biogas reactors as liquid fertilizer to support the vegetative growth of tomato plants. The research method includes characterizing slurry from three types of reactors, observing the enhancing in the number of leaves, plant height, and stem diameter of tomato plants with the application of slurry concentration 25%, 50%, and 100%. Anova test had significance level of 5% followed by DMRT test for post hoc analysis. The C/N value of slurry from CSTR i.e. 1.47, richer in nutrients between other reactors. Variations in liquid fertilizer from the three conventional biogas reactors, UASB, and CSTR are not significantly different in all vegetative growth parameters of tomato plants which include the number of leaves, plant height, and stem diameter. Giving the concentration of slurry liquid fertilizer only affects the diameter of the stem in weeks 2nd (14 days after planting) to 4th (30 days after planting) with the best concentration of 100% (200 mL liquid fertilizer + 0 mL water) with a percentage increase of $20.18 \pm 1\%$. The biogas slurry as biofertilizer from coffee wastewater treatment can support the growth of tomato plants and zero waste applications in agro-industry.

Keywords: biogas slurry; coffee wastewater processing; liquid fertilizer; variation of biogas reactor

PENDAHULUAN

Perkembangan hilirisasi dan agroindustri kopi cukup potensial dalam mendukung perekonomian di Indonesia. Subsektor Perkebunan dalam hal ini komoditi kopi memberikan sumbangsih positif terhadap devisa Negara Indonesia (Supriyati, Mas'ud, & Wahyuningsih, 2023) dengan kontribusi sebesar 2,73% per tahun dari total ekspor komoditas perkebunan (Ashardiono & Trihartono, 2024). Selanjutnya Negara Indonesia memiliki urutan ke – 11 di dunia sebagai negara eksportir dalam bentuk *green bean*

coffee. Adapun estimasi produksi rata – rata kopi nasional dari tahun 2023 – 2027 adalah 775.194 ton/tahun dengan nilai pertumbuhan 0,02% per tahun (Widaningsih, 2023).

Hilirisasi komoditi kopi memproduksi dituntut untuk menghasilkan produk olahan yang memiliki mutu tinggi. Metode olah basah menjadi salah satu alternatif pengolahan kopi yang dapat memproduksi biji kopi dengan kualitas yang baik namun memiliki konsekuensi negatif terhadap kualitas lingkungan baik pada badan air maupun lahan berupa paparan bahan pencemar dari air limbah yang dihasilkan. Estimasi produksi air limbah pengolahan kopi adalah 10 – 30

m³/ton buah kopi (Novita, Wahyuningsih, Andika, & Pradana, 2023). Selanjutnya, beberapa permasalahan lingkungan yang terjadi di beberapa negara seperti Indonesia (Novita et al., 2023), Brazil (Campos, Pinto, Melo, da Rocha, & Coimbra, 2021), dan Kolumbia (Lemma & Debebe, 2023) jika air limbah tersebut tidak ditangani terlebih dahulu sebelum dibuang ke lahan atau ke badan air yakni munculnya bau, timbulnya potensi kematian biota, gangguan estetika, dan penurunan kualitas sumber air. Pengendalian pencemaran air limbah pengolahan kopi secara bijak dan berkelanjutan harus mempertimbangkan penggunaan teknologi yang dipilih, modal, dan peluang dampak permasalahan lingkungan lanjutan.

Air limbah pengolahan kopi memiliki kandungan bahan organik terlarut yang tinggi dengan indikasi nilai *Biochemicals Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemicals Oxygen Demand* (COD) secara berurutan sebesar 1.434 – 14.200 mg/L (Novita et al., 2023) dan 2.274,5 – 25.600 mg/L (Novita et al., 2023; Mohan, Behera, & Shanthakumar, 2025). Alternatif bioremediasi dianggap tepat dalam mereduksi kandungan bahan organik terlarut yang tinggi. Beberapa kajian perbaikan kualitas air limbah kopi ramah lingkungan yang sudah dilakukan yakni proses anaerobik (Novita, Pradana, Wahyuningsih, Marhaenanto, Sujarwo, & Hafidz, 2019) dan fitoremediasi (Novita, Pradana, Wahyuningsih, Marhaenanto, Sujarwo, & Hafidz, 2019; Novita et al., 2023). Implementasi proses anaerobik memberikan *feedback* positif dalam degradasi bahan pencemar dan memproduksi biogas sebagai sumber energi ramah lingkungan. Selain itu, metode ini menghasilkan *effluent* cair berupa *slurry* dan padat yakni *sludge*. Pemanfaatan *slurry* sebagai sumber bahan organik untuk budidaya tanaman menjadi salah satu alternatif guna mendukung keberlanjutan teknologi pengolahan ramah lingkungan dengan basis *zero waste* dan ekonomi sirkular. Selajan dengan hal tersebut beberapa kajian pemanfaatan bahan organik yang berasal dari sampah domestik (Putra, Suparyanto, Nugraha, Firmansyah, & Suparyanto, 2024) dan pertanian dalam bentuk pupuk berkontribusi positif dalam keberlanjutan penerapan teknologi lingkungan dalam remediasi limbah dan memberikan nilai ekonomi dari hasil samping tersebut (Chojnacka, Moustakas, & Witek-Krowiak, 2020).

Slurry dari biogas cukup berpotensi dimanfaatkan sebagai pupuk cair karena masih memiliki kandungan unsur hara seperti nitrogen dan karbon yang belum terdekomposisi secara sempurna. Kajian yang dilakukan oleh Novita et al., (2019), kandungan nilai BOD dan COD pada *slurry* biogas dari reaktor konvensional, *Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), dan *Continuous Stirrer Tank Reactor* (CSTR) secara berurutan yakni 203 – 1.481 mg/L dan 309 – 2.342 mg/L. *Effluent* dari ketiga reaktor bersifat beragam dan dipengaruhi oleh mekanisme kerja proses anaerobik dan metode *feeding*. Selanjutnya, *slurry* memiliki volume yang lebih banyak dari pada berkisar antara 60-80% (Tim Biogas Biru, 2014; Novita, 2016; Feng, Guldborg, Hansen, Ma, Ohrt, Moller, 2022). Faktor lain yang mempengaruhi aplikasi pupuk cair dalam mendukung optimalisasi pertumbuhan tanaman yakni pengenceran. Hal ini didukung oleh beberapa kajian yang dilakukan bahwa dosis pupuk cair 10-30% berdampak positif terhadap kenaikan pada pertambahan tinggi tanaman hortikultura (Wang, Ren, Ashraf, Gui, Deng, Dai, Tang, Wang, & Mo, 2023) seperti tanaman tomat (Yunitasari, Widiwurjani, & Makhziah, 2025). Dampak positif lainnya dari aplikasi pupuk cair hayati terhadap pemulihan tanah terdegradasi yakni mampu meningkatkan nilai Nitrogen (N), Kalium (K), dan Karbon – organik (C), dan KTK tanah secara signifikan (Ganestri, Winarso, & Asyiah, 2021). Pupuk cair *slurry* juga memiliki kelebihan mampu memberikan hara

sesuai kebutuhan, pemberiannya dapat lebih merata dibandingkan dengan pupuk organik padat, dan kepekatannya dapat diatur sesuai kebutuhan tanaman. Sejalan dengan hal ini, *slurry* biogas memiliki jika ditinjau dari aspek ekonomi yakni mereduksi biaya penggunaan *input* produksi sintesis dan tidak memerlukan biaya dalam pemulihan kualitas lahan produksi (Mukhtiar, Mahmood, Zia, Ameen, Dong, Shoujun, Javaid, Khan, dan Nadeem, 2024).

Tujuan penelitian ini yaitu karakterisasi berdasarkan nilai C/N dan merekomendasikan formulasi pengenceran *slurry* dari reaktor biogas konvensional, (UASB), dan (CSTR) sebagai pupuk cair guna mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman tomat. Kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi atau rujukan dalam implementasi konsep produksi bersih dan ekonomi sirkular menggunakan integrasi teknologi penanganan limbah ramah dengan proses anaerobik dan pemanfaatan *slurry* sebagai pupuk cair menjadi produk bernilai ekonomi. Hal ini sejalan dengan dampak positif dari implementasi ekonomi sirkular baik tingkat domestik (Putra et al., 2024) dan agroindustri dengan teknologi bioremediasi anaerobik yakni memaksimalkan efisiensi proses dan pengelolaan limbah bernilai ekonomi (Rabbi & Amin, 2024).

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Alat – alat penunjang pelaksanaan penelitian yakni jerigen air dengan kapasitas 5 liter, pH meter Calibration Check HI 223 merk Hanna dengan akurasi 10⁻², aerator merk Basisto, spektrofotometer UV-Visible merk SHIMADZU 1240, flamefotometer merk Jenway PFP7, dan vortex mixer merk Stuart A7.

Adapun bahan – bahan pada penelitian ini yakni *slurry* atau *effluent* proses anaerobik dari reaktor konvensional, CSTR dan UASB, benih tomat OR Diana F1 5 gr, air, tanah, dan air suling bebas ion. Tanah yang digunakan pada penelitian ini yaitu tanah yang diambil di sekitar tanaman bambu. Pemilihan sumber tanah ini didasarkan pada secara fisik tanah di sekitar tanaman bambu mengandung humus, memiliki pH cenderung netral, dan tinggi unsur N yang bermanfaat untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Nath, Lal, & Das, 2015; Wu, Guo, Tang, Wang, Li, Wang, Cui, Hu, & Qi, 2024).

Tabel 1. Karakteristik proses dan *feeding* tiga reaktor biogas

Jenis Reaktor	Karakteristik Proses	Input (Liter)	Output (<i>Slurry</i>) -Liter
Konvensional	Tanpa sistem kontrol otomatis dan pengadukan	4	3,5
UASB	Dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis suhu dan pH, dan air limbah dialirkan dari bawah ke atas reaktor	5	4,2
CSTR	Dilengkapi dengan sistem kontrol otomatis suhu dan pH, dan pengadukan secara kontinyu	5	4

Sumber: (Novita et al., 2019)

Tabel 2. Rincian metode analisis parameter kualitas *slurry* dan tanah

Parameter	Satuan	Metode Analisis	Rujukan
Nitrogen N-Total	%	Kjeldahl dan Titrasi	SNI 06-6989.52-2005
Fosfat (P) dalam P ₂ O ₅	%	Spektrofotometri	SNI 06-6989.31-2005
pH	-	Elektrometri	SNI 6787:2015
Kalium (K) dalam K ₂ O	%	Spektrofotometri	SNI 19-7030-2004
Karbon (C)	%	Spektrofotometri	SNI 13-4720-1998

Pengumpulan dan Penyiapan *Slurry*

Slurry dikumpulkan dari *effluent* reaktor biogas konvensional, UASB, dan CSTR, ditampung pada jerigen plastik 15 Liter, dan diaerasi selama 24 jam. Aerasi bertujuan untuk menetralkan pH, menghilangkan gas, dan kandungan amonia yang dikhawatirkan dapat merusak tanaman. Ciri-ciri kandungan amonia telah hilang dan *slurry* siap digunakan yaitu tidak berbau, berwarna lebih gelap dan tidak terlihat gelembung. Setelah tahapan ini maka *slurry* dapat diaplikasikan pada tanaman sebagai pupuk cair *slurry*. Adapun mekanisme kerja dan neraca *feeding* dapat dilihat pada Tabel 1. *Feeding* atau input proses anaerobik dari reaktor konvensional, UASB, dan CSTR yakni air limbah pengolahan kopi dan *bio-starter* dari kotoran sapi dengan kombinasi penambahan ulang kotoran sapi pada hari ke 7 dan 14, dengan tujuan stabilisasi kandungan substrat serta bakteri metanogen (Novita et al., 2019). Penambahan dilakukan dengan persentase air limbah pengolahan kopi sebagai substrat 5-10% dan kotoran sapi 6-15% selama satu siklus proses anaerobik 35 hari (Novita et al., 2019).

Penanaman dan Pemeliharaan Tanaman Tomat

Penyiapan tanaman tomat dimulai dengan penyemaian benih, penyapihan, pemindahan pada *polybag*, dan pemeliharaan. Tahap penyemaian dilakukan pennebaran benih pada media tanam tanah yang sudah diayak hingga bibit tomat tumbuh sehat (berumur 10 hari setelah tanam). Bibit tanaman yang sudah disemai, selanjutnya dilakukan penyapihan selama 3 minggu pada media tanam tanah di dalam plastik. Tujuan metode ini yakni agar diperoleh individu tanaman tomat yang siap dipindahkan ke *polybag* berukuran 15 x 30 cm yang diisi oleh tanah sekitar 2 kg. Pemindahan ini dilakukan dengan cara mengeluarkan bibit beserta tanah pada plastik penyapihan agar akar tanaman tidak rusak, kemudian diletakkan ke dalam *polybag*. Tahap selanjutnya yakni pemeliharaan yang terdiri atas penyiraman yang dilakukan pagi dan sore hari dengan volume 100 mL tiap penyiraman atau disesuaikan dengan kondisi tanah saat akan disiram, pemasangan ajir yang terbuat dari bambu dengan tinggi 10 – 15 cm, dan penyiangan gulma.

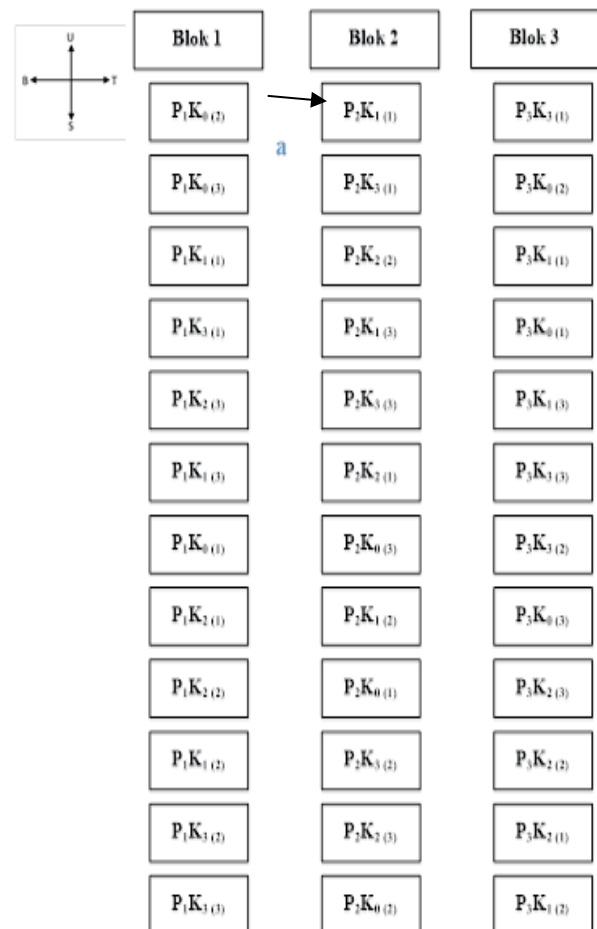
Pengukuran Parameter Kualitas Pupuk Cair dan Tanah, serta Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Tomat

Pengukuran parameter kualitas pupuk cair dan tanah dilakukan untuk mengidentifikasi kandungan dan karakteristik unsur hara aktual sebelum diberikan perlakuan (perlakuan dirinci pada sub bab Rancangan Percobaan). Parameter kualitas pupuk cair dari *slurry* dan tanah yakni pH, Nitrogen (N) dalam N – Total, Fosfat (P) dalam P₂O₅, Kalium

(K) dalam K₂O, Karbon (C), dan nilai C/N. Secara mendetail parameter – parameter tersebut diuji dengan metode yang merujuk pada Standar Nasional Indonesia yang dirinci pada Tabel 2. Adapun nilai C/N diukur berdasarkan perbandingan nilai karbon (C) (Lu, Cheng, Pu, Wang, Cheng, & Liu, 2016) dan nitrogen (N-Total) dengan menggunakan rumus pada persamaan 1 (Novita et al., 2019).

$$\frac{\text{Karbon (C)}}{\text{Nitrogen (N)}} = \frac{C - \text{Organik (Slurry atau Tanah)} (\%) }{N \text{ Total (Slurry atau Tanah)} (\%)} \quad (1)$$

Selain parameter kualitas *slurry* dilakukan pengukuran pertumbuhan vegetatif tanaman tomat yang terdiri atas pertambahan jumlah daun, tinggi tanaman, dan diameter batang. Pengamatan parameter tersebut selama 30 hari setelah tanam (HST). Perhitungan jumlah daun dilakukan dengan cara penghitungan jumlah daun secara visual yang berwarna hijau. Pengukuran tinggi tanaman dilakukan dengan pengukuran 1 cm dari permukaan tanah pada pangkal batang sampai titik tumbuh pada batang utama tanaman menggunakan penggaris (Yelli, Maizal, Hendarto, & Ramadiana, 2022; Yunitasari et al., 2025). Parameter diameter tanaman diukur setelah diketahui keliling batang berdasarkan rumus keliling lingkaran. Representasi pertumbuhan vegetatif tanaman tomat selama 30 HST dalam bentuk persentase peningkatan jumlah daun, tinggi tanaman, dan diameter batang.



Deskripsi kode, a: jarak antar blok; P: sumber *slurry*; K: variasi konsentrasi pupuk cair

Gambar 1. Desain percobaan

Rancangan Percobaan dan Analisis Data

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen rancangan acak kelompok (RAK) dengan 3 blok dan masing-masing blok terdapat 4 perlakuan. Total kombinasi perlakuan sebanyak 12 dengan 3 kali pengulangan, sehingga tanaman tomat yang digunakan yaitu 36 tanaman. Komponen keragaman unit yang perlu diperhatikan dalam menentukan pembentukan kelompok adalah komponen keragaman diluar perlakuan yang ikut mempengaruhi respon dari unit percobaan (Mathews & Crossa, 2022). Tujuan pengelompokan adalah untuk membuat keragaman dalam kelompok menjadi sekecil mungkin dan keragaman antar kelompok menjadi sebesar mungkin. Rancangan percobaan secara rinci diperjelas pada posisi blok percobaan yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Merujuk pada Gambar 1, terdapat beberapa kode yakni a, P, dan K. Kode a merupakan jarak antar blok dengan dimensi 10 cm dan terdapat keterangan angka dalam tanda kurung buka – tutup yang mengindikasikan urutan ulangan percobaan. Terdapat kode blok dalam rancangan percobaan ini yang menandakan asal *slurry* sebagai pupuk cair yakni reaktor konvensional (P1), UASB (P2), dan CSTR (P3). Terdapat 4 taraf dan kode perlakuan dari aplikasi konsentrasi pupuk cair yang terdiri atas konsentrasi pupuk cair 0% yakni 0 mL pupuk cair + 200 mL air (K0), konsentrasi pupuk cair 25% yakni 50 mL pupuk cair + 150 mL air (K1), konsentrasi pupuk cair 50% yakni 100 mL pupuk cair + 100 mL air (K2), konsentrasi pupuk cair 100% yakni 200 mL pupuk cair + 0 mL air (K3). Volume pupuk cair yang diaplikasikan pada setiap tanaman tomat yakni 100 mL dan diberikan setiap 2 minggu sekali yakni 7 HST dan 14 HST. Semua perlakuan diletakkan pada area semi terbuka dan tidak terhalang oleh cahaya matahari secara langsung serta dilindungi oleh atap transparan *fiberglass*. Pengamatan perubahan jumlah daun, tinggi tanaman, dan diameter batang setiap satu minggu sekali selama fase vegetatif (15-30 HST) dan dilanjutkan perhitungan persentase peningkatannya.

Analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Analysis of Variant* (Anova) dengan taraf nyata 5% untuk menentukan perbedaan masing-masing perlakuan pemberian pupuk cair dari tiga jenis reaktor dan variasi konsentrasi menggunakan *software* SPSS 16.0 dan apabila perlakuan berbeda nyata maka ditentukan pada analisis lanjut (*post hoc*). Analisis lanjut (*post hoc*) yang digunakan pada penelitian ini yaitu uji jarak berganda Duncan (DMRT) taraf nyata 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik *Slurry* dari Beberapa Jenis Reaktor Anaerobik sebagai Pupuk Cair

Slurry dari ketiga reaktor dibandingkan dengan standar mutu persyaratan teknis minimal pupuk organik dari instalasi pengolahan limbah industri guna mengetahui kelayakannya sebagai bahan baku pupuk cair. Merujuk pada Tabel 3, *slurry* keluaran reaktor CSTR memiliki nilai tertinggi pada unsur N, P, K dan C – organik. Total unsur hara N, P, K pada *slurry* keluaran reaktor berpengaduk (CSTR) yaitu 7,46%, sedangkan pada *slurry* reaktor konvensional dan UASB memiliki nilai 4,23% dan 6,13%. Nilai tersebut sudah memenuhi standar mutu persyaratan teknis minimal pupuk cair yakni 4%. Nilai C-organik *slurry* keluaran reaktor anaerobik tertinggi yaitu 2,95% pada reaktor berpengaduk (CSTR). Hal ini menunjukkan bahwa *slurry* hasil keluaran reaktor berpengaduk (CSTR) memiliki kandungan unsur hara yang lebih tinggi dibandingkan *slurry* hasil keluaran reaktor lainnya. Sehingga diasumsikan bahwa *slurry* tersebut lebih memiliki potensi sebagai pupuk cair. Nilai C/N *slurry*

hanya berkisar antara 1,09-2,83. Secara umum, nilai C/N merupakan indikator nisbah dari unsur C dan N yang memiliki peran penting dalam penyediaan substrat yang optimal yang dapat dimanfaatkan oleh tanah dalam menopang pertumbuhan tanaman dan mikroorganisme dalam ekosistem lahan pertanian. Meskipun, nilai C/N pupuk cair dari CSTR dan konvensional, namun demikian yang menjadi acuan standar adalah C-Organik dan kandungan hara total (N+ P₂O₅+ K₂O) yang merujuk pada Kementerian Pertanian Republik Indonesia (2019). Teknik pengadukan secara kontinyu pada CSTR menimbulkan efek homogenisasi dan optimalisasi reaksi kimia pemecahan bahan organik terlarut pada proses anaerobik yang lebih baik dari pada reaktor konvensional.

Selanjutnya, nilai pH cenderung netral dan memenuhi standar teknis pupuk cair yang berlaku. Namun demikian, unsur C – organik dari semua reaktor belum memenuhi standar teknis untuk pupuk cair dengan nilai minimal 10%. Optimalisasi nilai C-Organik *slurry* sebagai pupuk dapat ditempuh dengan memperhatikan karakteristik dan komposisi *feeding* proses anaerobik yang mengacu pada nilai C/N (Novita et al., 2019). *Nutrient recovery* menjadi salah satu metode yang diasumsikan cukup tepat untuk pengayaan unsur C-Organik dengan memanfaatkan kandungan hara kotoran ternak dan limbah – limbah pertanian (Deng, Jiang, Xie, Chen, Zhou, Liu, & Li, 2022).

Derajat keasaman atau pH berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman, juga terhadap kegiatan organisme tanah dalam menguraikan bahan organik dan ketersediaan unsur hara yang dapat diserap oleh tanaman (Ganestri et al., 2021). Apabila derajat keasaman tidak sesuai dengan kisaran pH tanaman tomat maka pertumbuhan tanaman akan terhambat. Nilai pH semua *slurry* dari semua reaktor bernilai 4 – 9 dan memenuhi standar teknis pupuk cair menurut Kementerian Pertanian Republik Indonesia (2019).

Merujuk pada Tabel 3, Kandungan hara N pada reaktor konvensional memiliki nilai terendah dari ketiga jenis reaktor yaitu 1,02% sedangkan kandungan hara N tertinggi yaitu pada pupuk cair *slurry* reaktor berpengaduk CSTR dengan nilai N yaitu 2,01%. Hal ini diduga karena adanya tuas pengaduk pada reaktor CSTR yang berfungsi mengaduk bahan di dalam reaktor agar tercampur sempurna atau homogen, sehingga bahan bisa terfermentasi dengan baik. Reaktor CSTR dan UASB memiliki kontrol suhu otomatis yang dapat disesuaikan dengan suhu optimum, sehingga proses perombakan bahan organik menjadi lebih maksimal jika dibandingkan dengan reaktor konvensional. Suhu optimum pertumbuhan mikroorganisme untuk merombak bahan organik di dalam reaktor yaitu 30-45 °C. Unsur hara N yang tidak terdegradasi sempurna dan tertinggal pada *slurry* jika dimanfaatkan sebagai pupuk cair berfungsi untuk mendorong pertumbuhan organ-organ yang berkaitan dengan fotosintesis yaitu daun. Beberapa kajian menyebutkan bahwa kandungan N yang memadai mampu mendukung peningkatan pertumbuhan vegetatif pada parameter diameter batang (Yelli et al., 2022) dan tinggi tanaman hortikultura (Yunitasari et al., 2025).

Sejalan dengan kandungan kadar N, kadar fosfat dalam bentuk P₂O₅ dan C- Organik *slurry* dari reaktor CSTR cenderung lebih tinggi dari pada *slurry* dari reaktor konvensional dan UASB. Hal ini menunjukkan dengan input bahan baku yang sama pada ketiga jenis reaktor tidak menghasilkan kandungan unsur hara yang sama. Hal tersebut diduga akibat perbedaan prinsip kerja masing-masing reaktor sehingga mempengaruhi *effluent* atau *slurry*. Misalnya pada reaktor konvensional, untuk mencampur atau pengadukan bahan baku pembuatan biogas hanya dilakukan dengan cara menggoyang-goyang reaktor (Novita et al., 2019). Proses pencampuran ini mengakibatkan bahan baku

tidak tercampur secara sempurna sehingga proses fermentasi anaerobik tidak berjalan secara maksimal. Fermentasi yang tidak sempurna mengakibatkan banyak bahan organik didalam reaktor tidak terdekomposisi dengan baik sehingga kandungan unsur hara yang dihasilkan memiliki nilai yang rendah. Pengadukan memiliki pengaruh penting dalam homogenisasi antara inokulum dan air limbah pengolahan kopi (Novita et al., 2019) dan degradasi oleh bakteri metanogen (Czekala, Lukomska, Pulka, Bojarski, Pochwatka, Kowalczyk-Jusko, Oniszczyk, & Dach, 2023). Kadar N dan C pada *slurry* dari ketiga reaktor mempengaruhi rasio C/N.

Merujuk pada Tabel 3, nilai C/N tertinggi pada keluaran reaktor konvensional yaitu 2,83 dan terendah pada keluaran reaktor UASB. Rendahnya nilai C/N ini diduga akibat proses penguapan karbon dalam bentuk CO₂ yang terjadi di dalam reaktor anaerobik. Nilai C/N dapat digunakan sebagai indikasi kemungkinan kekurangan nitrogen dalam tanah. Apabila N di dalam tanah dan pupuk cair *slurry* sedikit, maka akan terjadi persaingan antara jasad renik dan tanaman untuk memperoleh nitrogen. Semakin tinggi C/N maka karbohidrat dengan cepat diuraikan oleh jasad renik. Jasad renik terutama bakteri akan memanfaatkan C sebagai sumber energi dan membutuhkan N untuk pembentukan

tubuhnya. Apabila N yang diperoleh dari tanah dan pupuk cair *slurry* habis, maka tanaman akan mengalami kekurangan nitrogen. C/N keluaran reaktor konvensional memiliki nilai yang paling tinggi diantara lainnya, hal ini diduga terjadi akibat bahan organik yang belum terurai sempurna (Afifah, Setyono, & Rachmawati, 2024).

Pengamatan Perubahan Parameter Pertumbuhan Tanaman Tomat

Semakin tinggi tanaman maka berat buah semakin meningkat. Hal ini juga berlaku pada diameter batang, semakin besar batang tanaman tomat maka berat buah per tanaman juga semakin meningkat. Hal ini sejalan dengan hasil kajian yang disajikan pada Gambar 2, yang memperlihatkan *trend* peningkatan parameter tinggi, jumlah daun, dan diameter batang tanaman tomat selama 30 HST. Parameter pertumbuhan tanaman tomat yang diamati yaitu tinggi, jumlah daun dan diameter batang. Merujuk pada kajian yang dilakukan oleh Yelli et al., (2022), parameter pertumbuhan vegetatif yang memiliki hubungan erat dengan produksi tanaman tomat yaitu tinggi tanaman dan diameter batang sehingga parameter tersebut dapat dijadikan sebagai acuan untuk memprediksi berat buah per tanaman.

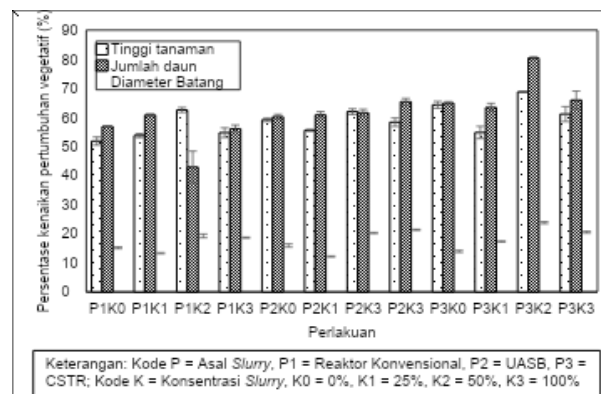
Tabel 3. Karakterisasi *slurry* dari reaktor konvensional, UASB, dan CSTR

Parameter	Satuan	Sumber <i>slurry</i>			Tanah	Standar Mutu Pupuk Cair*
		Konvensional	UASB	CSTR		
N – Total	%	1,02	1,87	2,01	0,19	-
P ₂ O ₅	%	1,19	2,17	2,58	12,49	-
K ₂ O	%	2,02	2,09	2,87	45,37	-
(N+ P ₂ O ₅ + K ₂ O)	%	4,23	6,13	7,46	58,05	2 – 6
C – Organik	%	2,89	2,04	2,95	1,87	Minimal 10
C/N		2,83	1,09	1,47	9,84	-
pH		6,7	7	7	6	4 – 9

*Sumber: Kementerian Pertanian Republik Indonesia (2019)

Tabel 4. Rekomendasi konsentrasi pupuk cair dari *slurry* biogas CSTR

Sumber Pupuk Cair	Konsentrasi (%)	Lama Aplikasi Pupuk Cair (HST)	Pertambahan Diameter Batang	Hasil Uji Duncan
<i>Slurry</i> Biogas dari CSTR	100 (K3)	14	19 ± 1	0,294ab
		18	20,53 ± 1	0,352b
		35	21 ± 1	0,436c
Rata – rata pertambahan diameter batang			20,18 ± 1	



Gambar 2. Perubahan parameter pertumbuhan vegetatif tanaman tomat akibat aplikasi pupuk cair dari *slurry*

Hasil persentase perubahan atau peningkatan pertumbuhan vegetatif pada Gambar 2, diperoleh dari selisih antara nilai parameter akhir dan awal. Merujuk pada Gambar 2, aplikasi pupuk cair dari *slurry* reaktor konvensional, UASB, dan CSTR berdampak positif terhadap pertumbuhan tanaman tomat. Namun demikian, variasi sumber *slurry* baik dari reaktor konvensional, UASB, dan CSTR tidak berpengaruh secara signifikan pada pertumbuhan tanaman tomat baik pada parameter tinggi tanaman, diameter batang, dan jumlah daun. Hal ini didukung oleh hasil uji signifikansi dengan taraf galat 5% yang menunjukkan tidak terdapat perbedaan nyata pada semua kelompok dan perlakuan. Sejalan dengan hal ini aplikasi pupuk cair pada tanaman tomat dari *slurry* dengan variasi konsentrasi K0, K1, K2, dan K3 tidak berpengaruh terhadap parameter pertumbuhan yang meliputi tinggi tanaman dan jumlah daun. Hasil kajian ini mengindikasikan bahwa *slurry* dari air limbah pengolahan kopi dari beberapa jenis reaktor baik konvensional, UASB, dan CSTR dapat dimanfaatkan sebagai pupuk cair guna mendukung pertumbuhan tanaman dan perbaikan kualitas tanah. Hal ini juga didukung oleh hasil kajian terkait dampak positif dari *slurry* yang dimanfaatkan sebagai pupuk cair yakni meningkatkan produktivitas tanaman, perbaikan kualitas tanah, dan penjagaan kualitas ekosistem lahan (Tang, Yin, Davy, Pan, Han, Huang, & Wu, 2022; Ivanchenko & Yelatontsev, 2024).

Rekomendasi Konsentrasi dan Aplikasi Pupuk Cair *Slurry*

Dampak positif yang signifikan dari aplikasi *slurry* sebagai pupuk cair untuk tanaman tomat terlihat pada pertambahan diameter batangnya. Rata – rata pertambahan diameter tanaman tomat yakni $20,18 \pm 1\%$ yang dapat dilihat pada Tabel 4. Pertambahan diameter ini diperoleh dari hasil pengamatan selama 30 HST. Pengaruh nyata perlakuan terhadap pengaruh kelompok dalam hal ini parameter diameter batang didukung oleh hasil uji signifikansi dengan galat 5%. Hasil uji statistik Anova dari perlakuan konsentrasi pemberian pupuk cair *slurry* terhadap diameter batang tanaman tomat menunjukkan perbedaan yang sangat nyata pada minggu kedua sampai keempat. Selanjutnya, hasil uji lanjut menggunakan Uji Duncan (DMRT) dengan taraf 5% menunjukkan bahwa pemberian *slurry* sebagai pupuk cair dengan konsentrasi 0, 25, 50 dan 100% memberikan hasil berbeda nyata terhadap pertumbuhan diameter batang minggu kedua – keempat (30 HST).

Merujuk pada Tabel 4, diketahui bahwa konsentrasi pupuk cair *slurry* terbaik yaitu K3 konsentrasi 100%. Hal ini dikarenakan pada konsentrasi K3 diameter batang tanaman tomat tiap minggu mengalami pertambahan yang lebih besar jika dibandingkan dengan konsentrasi lain. Pada minggu kedua diameter tanaman tomat sebesar 0,294 cm bertambah 0,058 cm pada minggu ke 3 menjadi 0,352 cm dan bertambah 0,084 cm pada minggu keempat atau 30 HST menjadi 0,436 cm. Rata – rata pertambahan pada perlakuan K3 lebih dari 20%. Pertumbuhan diameter yang baik dapat mendukung optimalisasi fotosintesis, penyerapan nutrisi, pertumbuhan tanaman yang kokoh, dan pembentukan buah yang optimal pada tanaman hortikultura dan tanaman keras (Rahmiana, Basri, Widyastuti, Isnaini, & Padidi, 2023).

Pertambahan diameter batang dipengaruhi oleh unsur hara yang terkandung di dalam pupuk terutama unsur hara nitrogen dan fosfor. Hal ini sesuai dengan literatur Yunitasari et al., (2025), nitrogen dibutuhkan dalam jumlah relatif besar pada setiap pertumbuhan tanaman, khususnya pada tahap pertumbuhan vegetatif seperti pembentukan tunas atau perkembangan batang dan daun. Adapun unsur N bermanfaat untuk pertumbuhan vegetatif yaitu pembentukan sel-sel baru, seperti batang, daun, dan untuk

menggantikan sel-sel yang telah rusak (Rahmiana et al., 2023). Merujuk pada Gambar 2, menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi yang diberikan ke tanaman akan meningkatkan pertambahan diameter batang tanaman karena kebutuhan hara tanaman dapat terpenuhi. Pertambahan diameter batang pada fase vegetatif sangat mempengaruhi pertumbuhan pada fase selanjutnya. Semakin besar batang akan meningkatkan berat buah yang dihasilkan.

Parameter pertumbuhan vegetatif tanaman seperti jumlah daun dan tinggi tanaman dipengaruhi oleh ketersediaan unsur nitrogen, fosfor, dan kalium. Pupuk cair dari semua reaktor diduga memiliki unsur hara nitrogen, fosfor, dan kalium yang kurang memadai dalam mendukung pertumbuhan tinggi tanaman dan modifikasi sel menjadi jaringan daun. Sejalan dengan kajian Jiayang, Tingting, Jie, Weimeng, Baohua, Guangyan, Hubo, Juncia, Zhihai, Langxing, dan Guanfu (2022), fenomena kekurangan unsur hara *potassium* atau kalium pada tanaman berdampak pada rendahnya kekokohan batang tanaman dan potensi pertumbuhan daun yang kurang optimal serta memiliki struktur yang rapuh dan tidak segar. *Slurry* dari ketiga reaktor ini berpotensi dimanfaatkan sebagai pupuk cair organik meskipun memiliki nilai C/N organik yang lebih rendah dari pada pupuk cair organik komersial yang secara umum memenuhi standar teknik C/N 10 – 25.

Kajian ini dapat digunakan sebagai pertimbangan langkah pengayaan dan optimalisasi *slurry* dari proses anaerobik air limbah pengolahan kopi menggunakan CSTR. Hal ini dianggap penting mengingat *slurry* biogas berpotensi dimanfaatkan sebagai pupuk cair meskipun memerlukan upaya lanjut untuk menambah unsur hara organik agar sesuai dengan pupuk cair komersial. Optimalisasi potensi *slurry* sebagai pupuk cair dapat dilakukan dengan *nutrient recovery* seperti penambahan sumber C-Organik seperti kotoran ternak ruminansia (Mukhtiar el al., 2024). Pengayaan unsur hara lainnya baik untuk suplai unsur kalium dan nitrogen dapat berasal dari biomassa atau limbah dari aktivitas domestik dan pertanian (Tang el al., 2024). Pemanfaatan *slurry* biogas dari hasil pengolahan air limbah kopi berpotensi sebagai produk pupuk cair untuk mendukung pertumbuhan tanaman tomat dan aplikasi zero waste pada agroindustri. Selanjutnya, implementasi teknologi pemanfaatan *slurry* sebagai hasil sampingan seperti pada kajian ini dapat mendukung mewujudkan *green economic* dan sirkularitas ekonomi pada agroindustri kopi

KESIMPULAN

Slurry biogas berpotensi dimanfaatkan sebagai pupuk cair untuk mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman hortikultura seperti tomat. Nilai C/N *slurry* biogas dari CSTR yakni 1,47 dan memiliki nilai $(N + P_2O_5 + K_2O)$ 7,46 lebih tinggi daripada reaktor konvensional dan UASB dan memenuhi standar teknis pupuk cair organik. Variasi pupuk cair dari ketiga reaktor biogas konvensional, UASB, dan CSTR tidak berbeda nyata pada semua parameter pertumbuhan vegetatif tanaman tomat yang mencakup jumlah daun, tinggi tanaman, dan diameter batang. Pemberian konsentrasi pupuk cair *slurry* hanya berpengaruh pada diameter batang minggu ke-2 (14 hari setelah tanam) sampai dengan ke-4 (30 hari setelah tanam) dengan konsentrasi terbaik yaitu 100% (200 ml pupuk cair + 0 ml air) dengan persentase kenaikan sebesar $20,18 \pm 1\%$. Oleh sebab itu, pupuk cair dari CSTR menjadi alternatif yang direkomendasikan dalam mendukung pertumbuhan tanaman tomat. Optimalisasi potensi *slurry* sebagai pupuk cair dapat dilakukan dengan *nutrient recovery* seperti penambahan sumber C-Organik seperti kotoran

ternak. Pemanfaatan slurry biogas dari hasil pengolahan air limbah kopi berpotensi sebagai produk pupuk cair untuk mendukung pertumbuhan tanaman tomat dan aplikasi zero waste pada agroindustri. Selanjutnya, implementasi teknologi pemanfaatan *slurry* sebagai hasil sampingan seperti pada kajian ini dapat mendukung mewujudkan *green economic* dan sirkularitas ekonomi pada agroindustri kopi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan pendanaan pada penelitian melalui Program Hibah Penelitian Skema Penelitian Strategis Nasional pada Periode 2014 – 2015 dengan Nomor 0263/E5/2014.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, R. N., Setyono, P. & Rachmawati, S. (2024). Utilization of WWTP Output into Liquid Organic Fertilizer on the Growth of Pak Choi (Brassica rapa L.). *Journal of Ecological Engineering*, 25(10): 76-90. <https://doi.org/10.12911/22998993/191746>
- Ashardiono, F. & Trihartono, A. (2024). Optimizing the potential of Indonesian coffee: a dual market approach. *Cogent Social Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23311886.2024.2340206>
- Chojnacka, K., Moustakas, K. & Witek-Krowiak, A. (2020). Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresource Technology*, 295(2020): 122223. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122223>
- Compas, R.C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., da Rocha, S. J. S. & Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for "coffee wastewater" and other by-products: A critical review. *Future Food*, 4(2021): 100058. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>
- Czekala, W., Lokomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Jusko, Oniszczyk, A. & Dach, J. (2023). Waste-to-energy: Biogas potential of waste from coffee production and consumption. *Energy*, 276(2023): 127604. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>
- Deng, F., Jiang, H., Xie, Z., Chen, Y., Zhou, P., Liu, X. & Li, D. (2022). Nutrient recovery from biogas slurry via hydrothermal carbonization with different agricultural and forestry residue. *Industrial Crops and Products*, 189(2022): 115891. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115891>
- Feng, L., Guldborg, L. B., Hansen, M. J., Ma, C., Ohrt, R. V. & Moller, H. B. (2022). Impact of slurry removal frequency on CH4 emission and subsequent biogas production; a one-year case study. *Waste Management*, 149(15): 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.024>
- Ganestri, R. G., Winarso, G. & Asyiah, I. N. (2021). Efektivitas pupuk organik dan pupuk hayati cair terhadap pemulihan tanah terdegradasi di Desa Sucopangepok. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 45(2): 175-186.
- Ivanchenko, A. & Yelatontsev, D. (2024). Improved agro-industrial waste utilization in biogas and fertilizer production ensuring CO₂ sequestration. *Environmental Challenges*, 14(2024): 100836. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100836>
- Jiaying, M., Tingting, C., Jie, L., Weimeng, F., Baohua, F., Guangyan, L., Hubo, L., Juncal, L., Zhihai, W., Longxing, T. & Guanfa, F. (2022). Functions of nitrogen, phosphorus and potassium in energy status and their influences on rice growth and development. *Rice Science*, 29(2): 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005>
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2019). *Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati, dan Pembenah Tanah*. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Lemma, D. & Debebe, W. A. (2023). Wet coffee processing wastewater treatment by using an integrated constructed wetland. *Desalination and Water Treatment*, 304(2023): 97-111. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29841>
- Lu, L., Cheng, H., Pu, X., Wang, J., Cheng, Q. & Liu, X. (2016). Identifying organic matter sources using isotopic ratios in a watershed impacted by intensive agricultural activities in Northeast China. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 222(2016): 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.033>
- Mathews, K. L. & Crossa, J. (2022). *Wheat Improvement: Experimental Design for Plant Improvement*. Switzeland: Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90673-3>
- Mohan, G., Behera, S. K. & Shanthakumar, S. (2025). Advanced oxidation processes for coffee processing wastewater treatment: Current developments and future directions. *Journal of Water Process Engineering*, 69(2025): 106737. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106737>
- Mukhtiar, A., Mahmood, A., Zia, M. A., Ameen, M., Dong, R., Shoujun, Y., Javaid, M. M., Khan, B. A. dan Nadeem, M. A. 2024. Role of biogas slurry to reclaim soil properties providing an eco-friendly approach for crop productivity. *Bioresource Technology Reports*, 25(2024): 101716. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101716>
- Nath, A. J., Lal, R. & Das, A. K. (2015). Ethnopedology and soil quality of bamboo (Bambusa sp.) based agroforestry system. *Science of the Total Environment*, 521-522(2015): 372-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.059>
- Novita, E. (2016). biodegradability simulation of coffee wastewater using instant coffee. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9(2016): 217-229. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.138>
- Novita, E., Pradana, H. A., Wahyuningsih, S. Marhaenanto, B., Sujarwo, M. W. & Hafidz, M. S. A. (2019). Anaerobic digester variation for biogas production on coffee wastewater treatment. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 8(3): 164-174. <http://dx.doi.org/10.23960/jtep-l.v8i3.164-174>
- Novita, E., Wahyuningsih, S., Andika, M. & Pradana, H. A. (2023). Water hyacinth potential in the pollution impact reduction of coffee agroindustry wastewater. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 14(2): 10-22. <https://doi.org/10.21771/jrtppi.2023.v14.no2.p10-22>
- Putra, S. P., Suparyanto, T., Nugraha, N. S., Firmansyah, E. & Suparyanto, T. (2024). Ekonomi sirkular lokal : pemanfaatan limbah organik pasar menjadi pupuk organik cair dan pupuk kompos di Pasar Cokro, Desa Daleman, Kecamatan Tulung, Kabupaten Klaten. *J-Dinamika*, 9(2): 284 – 288. <https://doi.org/10.25047/j-dinamika.v9i2>
- Rabbi, M. F. & Amin, M. B. (2024). Circular economy and sustainable practices in the food industry: A

- comprehensive bibliometric analysis. *Cleaner and Responsible Consumption*, 14(2024): 100206. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100206>.
- Rahmiana, Basri, B., Widyastuti, H., Isnaini, J. L. & Padidi, N. (2023). Application of various concentration of liquid organic fertilizer on vegetative growth of cocoa. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1230(2023): 012212. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012212>
- Supriyati, Y., Mas'ud, & Wahyuningsih, S. (2023). *Analisis Perdagangan Kinerja Kopi*. Jakarta: Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Sekretariat Jenderal, Kementerian Pertanian.
- Tang, J., Yin, J., Davy, A. J., Pan, F., Han, X., Huang, S. & Wu, D. (2022). Biogas slurry as an alternative to chemicals fertilizer: change in soil properties and microbial communities of Fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Sustainability (MDPI)*, 14(22): 15099. <https://doi.org/10.3390/su142215099>
- Tim Biogas Biru. (2014). *Pedoman, Penggunaan dan Pengawasan: Pengelolaan dan Pemanfaatan Bio-Slurry*. Jakarta: Yayasan rumag Energi (YRE) – Hivos SNV.
- Wang, X., Ren, Y., Ashraf, U., Gui, R., Deng, H., Dai, L., Tang, Wang, Z. & Mo, Z. (2023). Optimization of liquid fertilizer management improves grain yield, biomass accumulation, and nutrient uptake of late-season indica fragrant rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(14): 6800 – 6813. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12767>
- Wu, Y., Guo, J., Tang, Z., Wang, T., Li, W., Wang, X., Cui, H. & Qi, L. (2024). Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) expansion enhances soil pH and alters soil nutrients and microbial communities. *Science of the Total Environment*, 912(2024): 169346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169346>
- Yelli, F., Maizal, R., Hendarto, K. & Ramadania, S. (2022). Aplikasi pupuk cair organik terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman tomat (*Lycopersicon pimpinellifolium*). *Jurnal Agrotek Tropika*, 10(4): 593 – 599. <http://dx.doi.org/10.23960/jat.v10i4.6466>
- Yunitasari, Widiwujani, & Makhziah. (2025). Optimization of concentration and frequency of liquid organic fertilizer application on Cherry Tomato plants (*Lycopersicum esculentum var. Ruby*) growth and yield. *Juatika*, 7(1): 240 – 246. <https://doi.org/10.36378/juatika.v7i1.4049>