

PEMBUATAN PUPUK MAJEMUK (SP-15) DENGAN OPTIMALISASI PEMANFAATAN LIMBAH HASIL DARI PROSES PRODUKSI DI PT. PETROKIMIA GRESIK

Novita Yuly Triyaningsih^{1*}, Lailatul Qadariyah², Gatot Kustyadi³

¹Program Profesi Insinyur, Sekolah Interdisiplin Manajemen Teknologi ITS; Jl. Cokroaminoto No.12A, DR. Soetomo, Kec. Tegalsari, Surabaya, Jawa Timur 60264, Indonesia; Telp (031) 5666172

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem ITS; Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111, Indonesia; Telp (031) 5946240

³Departemen Manajemen, Universitas Internasional Semen Indonesia; Jl. Veteran, Kompleks PT Semen Indonesia, Kecamatan Gresik, Kabupaten Gresik, Jawa Timur 61122; Telp (031) 3985482

Keywords:

Fertilize;
Fly Ash and Bottom Ash
(FABA)
Neutralized Crude Gypsum
(NCG)
Sludge Run of Pile (ROP)
Sludge Wastewater
Treatment (WWT).

Correspondent Email:

novitayulytrianingsih@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk membuat dan mengevaluasi formulasi pupuk berbasis limbah produk samping dalam pembuatan pupuk majemuk (SP-15) melalui proses granulasi. Variasi formulasi berjumlah 14 dengan memodifikasi komposisi masing-masing bahan baku, sementara kondisi operasi granulasi dijaga konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah produk samping mampu menghasilkan pupuk majemuk (SP-15) yang memenuhi spesifikasi kimia serta karakteristik fisika granul yang sesuai dengan standar. Penentuan variasi terbaik dilakukan dengan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan mempertimbangkan karakteristik kimia dan fisika. Variasi 14 merupakan variasi terbaik dengan karakteristik kimia dengan kadar fosfat sebesar 16,031%, kadar sulfur 5,622% dan karakteristik fisika dengan nilai kekuatan menahan beban (hardness) sebesar 1,74 kg/butir, kemampuan higroskopis sebesar 3,28%, kadar air sebesar 0,68% dan distribusi ukuran sebesar 65,23%. Penelitian ini membuktikan bahwa pemanfaatan sludge ROP, NCG dan FABA sebagai bahan baku dalam formulasi pupuk SP-15 berpotensi mengurangi beban pengelolaan limbah, sehingga memperkuat implementasi ekonomi sirkular secara berkelanjutan.



Copyright © [JPI](https://doi.org/10.23960/jpi.v7n1.376) (Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung).

Abstract. This study aims to develop and produce fertilizer formulations from by-product waste used in the manufacture of compound fertilizer (SP-15) through the granulation process. There are 14 variations of the formulation by modifying the composition of each raw material, while the granulation operating conditions are kept constant. The results of the study indicate that the utilization of by-product waste can produce compound fertilizer (SP-15) that meets chemical specifications and granule physical characteristics in accordance with the standards. Determination of the best variation was carried out using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method by considering the chemical and physical characteristics. Variation 14 is the best characteristic variation with a chemical with a phosphate content (P₂O₅) of 16,031%, a sulfur content of 5.622%, and physical characteristics with a hardness value of 1.74 kg/granule, a hygroscopic ability of 3.28%, a water content of 0.68%, and a size distribution of 65.23%. This study proves that the use of ROP, NCG, and FABA sludge as raw materials in the SP-15 fertilizer formulation has the potential to reduce the burden of waste management, strengthening the implementation of a sustainable circular.

1. PENDAHULUAN

PT. Petrokimia Gresik merupakan pabrik pupuk terbesar dan terlengkap di Indonesia yang termasuk dalam bagian dari Pupuk Indonesia Holding Company (PIHC), memegang peranan penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional dengan memproduksi pupuk dan bahan kimia non-pupuk yang berkualitas [1]. Sebagai penunjang dalam produksi pupuk dan bahan kimia nonpupuk PT. Petrokimia Gresik memiliki 3 unit departemen yang terdapat 31 pabrik di dalamnya dengan total keseluruhan kapasitas produksi mencapai 8,9 juta ton/tahun [2].

Besarnya skala produksi tersebut berpotensi menimbulkan dampak terhadap lingkungan, baik dari penggunaan sumber daya, konsumsi energi maupun limbah yang dihasilkan selama proses produksi berlangsung. Dengan demikian, diperlukan adanya pengelolaan sehingga tidak mencemari lingkungan, terutama permasalahan limbah dengan menerapkan ekonomi sirkular yang berfokus pada pemanfaatan limbah dan produk samping (byproduct) menjadi produk yang lebih bernilai.

Beberapa limbah non-B3, limbah B3, serta produk samping yang dihasilkan oleh PT. Petrokimia Gresik, antara lain, sludge run of pile (ROP) berupa padatan asam fosfat yang berasal dari sisa proses pembuatan pupuk fosfat. Padatan ini berupa kerak (scale) yang menempel pada dinding reaktor akibat dari proses reaksi yang tidak sempurna antara fosfat rock, asam fosfat, dan asam sulfat. Selain itu, terdapat sludge wastewater treatment (WWT) yang merupakan endapan lumpur dari proses pengolahan air limbah. Produk samping lainnya adalah gipsum yang dihasilkan dari proses produksi asam fosfat. Gipsum tersebut kemudian dinetralkan menggunakan bahan bersifat basa sehingga menghasilkan neutralized crude gypsum (NCG). Selanjutnya, fly ash dan bottom ash (FABA) merupakan residu dari proses pembakaran batu bara pada dua unit boiler di Unit Utilitas Batu Bara (UBB) dengan kapasitas masing-masing boiler 15 ton/jam, digunakan untuk menghasilkan energi pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan kapasitas pembangkitan 32 MW (neto 25 MW) [3]. Data limbah non-B3, limbah B3, serta produk samping sebagai berikut.

Tabel 1. Data jumlah limbah pada tahun 2023 hingga tahun 2025

Jenis Limbah	Data	2023 (ton)	2024 (ton)	2025 (ton)
Limbah Non B3	Fly ash	10.053	11.409	14.090
	Bottom ash	599	641	496
Limbah B3	Sludge WWT	55	71	27
Produk samping	NCG	98.516	196.708	224.785
	Sludge endapan asam fosfat (sludge ROP)	17.554	14.755	-

Sumber: Data internal PT.Petrokimia Gresik

Dari data di atas dapat dilihat bahwa banyaknya jumlah limbah dan hasil produk samping yang dihasilkan, sehingga diperlukan adanya pengolahan yang sejalan dengan kebijakan pemerintah melalui Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER). Program tersebut mendorong perusahaan untuk tidak hanya memenuhi ketentuan peraturan lingkungan (beyond compliance), tetapi juga menerapkan efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, serta inovasi melalui prinsip ekonomi sirkular.

Pemanfaatan sludge ROP, sludge WWT, NCG, dan FABA menjadi bahan baku alternatif pupuk atau produk lain yang lebih bernilai, merupakan bentuk implementasi pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, sekaligus mendukung pencapaian peringkat PROPER yang lebih baik. Produk pupuk yang dibuat dari pemanfaatan sludge ROP, sludge WWT, NCG, dan FABA harus mempertimbangkan kandungan mineral yang masih ada didalamnya. Dimana endapan asam fosfat (ROP) memiliki kandungan P_2O_5 yang cukup tinggi sekitar 33,05%, kadar ini menunjukkan bahwa sludge endapan asam fosfat memiliki potensi sebagai sumber fosfor pada pembuatan pupuk [4]. Selain itu, terdapat kandungan mineral pada air limbah industri pupuk (WWT), diantaranya ammonia, fosfat yang jauh lebih besar dibandingkan dengan kandungan mineral lain seperti silika, magnesium dan kalsium. Sehingga kandungan fosfat yang tinggi dapat

berkontribusi sebagai sumber sekunder untuk memproduksi pupuk [5].

Selanjutnya, gipsum merupakan produk samping dari produksi asam fosfat dengan metode wet process, yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber kalsium, sulfur dan pengurang salinitas tanah pada bidang pertanian [6]. Kemudian FABA yang berasal dari boiler UBB, dengan adanya perubahan regulasi penetapan FABA sebagai limbah Non-B3 pada Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, menjadikan FABA dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi (filler) karena memiliki struktur partikel halus dan porus dengan kandungan aluminosilikat (SiO_2 dan Al_2O_3) yang berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik granul. Kandungan Al_2O_3 berkontribusi terhadap pembentukan struktur partikel yang lebih kompak dan stabil, sehingga menghasilkan granul pupuk yang lebih kuat, bulat, serta mampu mengurangi terjadinya caking selama penyimpanan [7]. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Verona *et al* (2022) menunjukkan bahwa FABA dapat digunakan sebagai filler pada pupuk NPK tanpa menurunkan mutu produk sesuai standar SNI 2083:2012 pupuk NPK padat [8].

Secara keseluruhan, kandungan fosfat, sulfur dan kandungan mineral lainya pada bahan-bahan diatas, dapat dimanfaatkan untuk pembuatan pupuk. Dimana sludge ROP dan sludge WWT berkontribusi sebagai sumber fosfat, sedangkan neutralized crude gypsum (NCG) menyediakan kalsium dan sulfur, serta fly ash bottom ash (FABA) berperan dalam meningkatkan sifat fisik granul. Kombinasi karakteristik tersebut memungkinkan seluruh limbah produk samping diformulasikan menjadi pupuk SP-15 dengan kadar P_2O_5 total 15%, sehingga dapat mendukung PT. Petrokimia Gresik dalam mencapai keunggulan operasional yang efisien dan berkelanjutan, serta memperkuat komitmen perusahaan dalam solusi agroindustri yang ramah lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pupuk Fosfat

Pupuk fosfat merupakan pupuk yang mengandung senyawa fosfat. Pupuk fosfat umumnya dibuat dengan bahan baku berupa batuan fosfat (Phosphate Rock) yang direaksikan dengan asam fosfat dan asam sulfat.

Sedangkan batuan fosfat merupakan bahan non-renewable energi, sehingga diperlukan adanya bahan alternatif sebagai bahan baku pembuatan pupuk fosfat [9]. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk membuat pupuk fosfat adalah mendaur ulang fosfor dengan langsung menggunakan lumpur limbah sebagai pupuk pada lahan pertanian. Lumpur limbah mengandung konsentrasi fosfor yang tinggi, yang dapat berpotensi sebagai sumber pupuk fosfat alternatif yang sesuai [10].

Batuan fosfat pada umumnya direaksikan dengan asam sulfat untuk menghasilkan asam fosfat. Asam fosfat tersebut kemudian dipekatan atau di reaksikan dengan amonia menghasilkan pupuk fosfat (P_2O_5), seperti Diammonium Phosphate (DAP) dan Monoammonium Phosphate (MAP) [11]. Berdasarkan SNI 02-3766-2005, standar mutu pupuk fosfat alam untuk pertanian mencakup beberapa parameter utama sebagai berikut.

Tabel 2. Standar mutu pupuk fosfat alam untuk pertanian

Parameter Uji	Standar Mutu (SNI 02-3776-2005)
Kadar P_2O_5 Total	Minimal 28% b/b (Mutu A) Minimal 24% b/b (Mutu B) Minimal 14% b/b (Mutu C) Minimal 10% b/b (Mutu D)
Kadar Air	Maksimal 5% b/b
<u>Kehalusan Lolos 80 mesh Tyler</u>	Minimal 50% b/b
<u>Kehalusan Lolos 25 mesh Tyler</u>	Minimal 80% b/b

Berdasarkan parameter uji kandungan P_2O_5 pada SNI 02-3776-2005 maka terdapat jenis-jenis pupuk fosfat sebagai berikut.

1. Enkel Superfosfat (ES)

Merupakan pupuk fosfat yang sudah populer digunakan sejak jaman Belanda. Pupuk ini sering disebut single superfosfat. Pupuk enkel superfosfat dibuat dengan menggunakan bahan baku batuan fosfat (Phosphate Rock) yang kemudian diasamkan menggunakan asam sulfat untuk mengubah fosfat yang tidaktersedia menjadi tersedia bagi tanaman. Pupuk enkel superfosfat mengandung 18%-24% P_2O_5 yang

masih terdapat kandungan gipsum (CaSO_4) yang cukup tinggi

2. Double Superfosfat (DS)

Merupakan pupuk yang dianggap sudah tidak mengandung gipsum, mengandung 36-38% P_2O_5 . Pembuatan pupuk ini menggunakan asam fosfat yang berfungsi sebagai pengasaman dan meningkatkan kadar fosfat yang terkandung dalam pupuk. Pupuk ini digunakan untuk pupuk dasar karena pupuk bekerja lambat dalam penyerapannya

3. Triple Superfosfat (TSP)

Merupakan pupuk dengan kadar P_2O_5 sekitar 44-46%. Walaupun secara teoritis dapat mencapai kadar 56% P_2O_5 . Pembuatan pupuk ini menggunakan sistem *wet process* (proses basah) [9].

2.2. Granulasi

Granulasi adalah proses pembentukan granul yang berasal dari pembesaran partikel-partikel dengan proses aglomerasi partikel. Sedangkan aglomerasi sendiri merupakan proses dimana partikel-partikel halus saling menempel membentuk butiran lebih besar untuk menciptakan butiran dengan sifat yang diinginkan dari bahan cair atau partikulat. Dibandingkan dengan bentuk bubuk, pupuk granul menawarkan ketahanan mekanik yang lebih baik, komposisi yang seragam, dan sifat pelepasan lambat ketika digunakan dalam pertanian [12]. Berdasarkan buku Perry's Chemical Engineering Handbook (edisi ke-8) dimana proses *principles of size enlargement* (pembesaran ukuran partikel) merupakan salah teknik yang digunakan untuk mengubah partikel halus menjadi bentuk yang lebih besar. Proses ini merupakan proses yang paling umum digunakan dalam industri pupuk untuk menghasilkan produk dalam bentuk granul dengan ukuran yang seragam. Dimana ukuran granul yang dihasilkan pada metode ini berkisar antara 0,2 mm – 20 mm, dengan standar internal ukuran granul yaitu 2 mm – 4 mm [13].

2.3. Faktor – faktor Pembuatan Pupuk Fosfat

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi pada saat pembuatan pupuk dengan proses granulasi sebagai berikut.

- Konsentrasi

Kadar P_2O_5 dalam pupuk akan berbanding lurus dengan konsentrasi fosfat yang ditambahkan dalam proses granulasi

- Kualitas bahan baku

Bahan baku yang digunakan harus memiliki daya rekat agar mudah untuk dibentuk granul pada saat proses granulasi.

- Ukuran granul

Densitas dan viskositas berpengaruh terhadap pembentukan granul berukuran besar pada proses konsolidasi. Sehingga penambahan *steam* dan *slurry* diharapkan dapat mempermudah proses penggranulan.

- Cara penyemprotan

Apabila lubang *Sprayer* terlalu besar akan mengakibatkan penyemprotan *slurry* kurang merata dan kurang baik. Hal ini akan mengakibatkan ukuran granul akan terlalu besar. Sehingga diperlukan *sprayer* dengan ukuran lubang yang merata agar terbentuk granul dengan ukuran yang seragam.

- Suhu dan waktu

Suhu dan waktu penggranulan akan berdampak pada kandungan air yang ada pada pupuk. Maka apabila suhu yang digunakan besar dan waktu penggranulan semakin lama, maka kadar air pada granul akan berkurang [14].

2.4. Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)

Abu batu bara (*Coal Ash*) merupakan residu padat yang tersisa dari hasil pembakaran batu bara pada boiler. Jenis abu batu bara ini meliputi *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) [3]. Sekitar 55 – 85% abu yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara tersebut merupakan *Fly Ash* dan sisanya berupa *Bottom Ash* [15]. Kedua jenis abu batu bara ini memiliki karakteristik dan pemanfaatan yang berbeda. *Fly Ash* merupakan partikel halus yang terbawa oleh gas hasil pembakaran, salah satu material yang paling kompleks karena tersusun oleh mineral yang sangat bervariasi [7]. Sedangkan, *Bottom Ash* merupakan material yang tidak terbakar dengan sempurna dari pembakaran batu bara dan biasanya menempel pada bagian bawah atau dinding dari tungku pembakaran tersebut. *Bottom Ash* memiliki ukuran partikel yang lebih besar serta lebih berat dari *Fly Ash*, sehingga memungkinkan *Bottom Ash* dapat jatuh ke dasar tungku pembakaran boiler [16]. Kandungan unsur dan logam berat *Fly Ash* dan *Bottom Ash* tidak hanya tergantung pada jenis

batu bara yang digunakan dalam proses pembakaran, namun juga pada jenis boiler, suhu dan tekanan yang digunakan dalam proses pembakaran. Selain itu, komposisi kimia FABA sebagian besar didominasi oleh oksida silikon (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), dan besi (Fe_2O_3), serta memiliki sedikit kandungan unsur-unsur lain [7]. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, FABA dikategorikan sebagai limbah Non-B3 yang dapat dimanfaatkan secara luas. Hal inilah yang menjadikan FABA memiliki potensi untuk bahan pengganti *Clay* dalam industri pupuk pada pembuatan pupuk NPK.



Gambar 1. Abu terbang (Fly ash)



Gambar 2. Abu dasar (Bottom ash) [15]

2.5. Sludge Run of Pile (ROP)

Dalam produksi pupuk fosfat (seperti SP-36) menggunakan bahan baku bernama ROP, pembuatannya dilakukan dengan mereaksikan antara fosfat rock dengan asam fosfat dan asam sulfat [17]. Dalam proses pembuatan ROP didalam reaktor yang terus menerus akan meninggalkan sebagian kecil padatan (*scaling*) yang menempel pada dinding reaktor akibat dari proses reaksi yang tidak sempurna antara phosphate rock, asam fosfat, dan asam sulfat, padatan ini harus dikuras dengan waktu tertentu untuk memperlancar proses. Hasil dari pembersihan inilah yang disebut dengan *sludge* ROP (*sludge* endapan asam fosfat). Penelitian Praditya (2025) menyatakan bahwa *sludge* endapan asam fosfat (ROP) memiliki kandungan P_2O_5 yang cukup tinggi sekitar 33,05%, kadar ini menunjukkan bahwa *sludge* endapan asam fosfat memiliki potensi sebagai sumber fosfor pada pembuatan pupuk [4].

2.6. Sludge Wastewater Treatment (WWT)

Sludge waste water treatment (WWT) di PT. Petrokimia Gresik adalah lumpur hasil dari proses pengolahan limbah cair di instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Sludge WWT berasal dari unit effluent treatment (unit pengolahan akhir). Limbah cair di Petrokimia Gresik, khususnya dari kompartemen produksi III yang memproduksi asam fosfat dan pupuk fosfat cenderung bersifat asam, sehingga disebut sebagai acidic water. Sludge yang dihasilkan dari pengolahan air ini mengandung endapan kalsium sulfat (gypsum), padatan tersuspensi (TSS), dan sisa-sisa mineral seperti fosfat (P_2O_5) dan fluor (F) [14]. Lumpur limbah diketahui mengandung fosfor dalam jumlah cukup tinggi (sekitar 5–10%) dengan karakteristik yang mendekati batuan fosfat, sehingga berpotensi menjadi sumber alternatif bahan baku pupuk fosfat. Namun, penggunaan langsung lumpur limbah sebagai pupuk masih menjadi tantangan karena adanya kandungan logam berat dan senyawa organik berbahaya, sehingga diperlukan proses pemurnian sebelum pemanfaatannya di sektor pertanian. Secara keseluruhan, teknologi pemulihan fosfor dari lumpur limbah memiliki potensi besar untuk mendukung konsep ekonomi sirkular, sehingga mengurangi ketergantungan pada batuan fosfat alam, serta meningkatkan keberlanjutan produksi pupuk [10].

2.7. Neutralized Crude Gypsum (NCG)

Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) merupakan produk samping yang dihasilkan dari proses pembuatan asam fosfat pada industri pupuk fosfat melalui reaksi antara batuan fosfat dan asam sulfat. Dalam proses tersebut, setiap produksi 1 ton P_2O_5 dapat menghasilkan sekitar 4,5 ton gipsum. Secara kimia, gipsum mengandung sekitar 17,7% sulfur (S), 30,9% kalsium oksida (CaO), 0,2% fluorida (F), serta 0,7% P_2O_5 . Pemanfaatan gipsum di sektor pertanian menjadi salah satu upaya penggunaan kembali limbah industri secara lebih berkelanjutan, sekaligus mengurangi dampak lingkungan akibat penumpukan limbah dalam jumlah besar. Sebagai produk samping industri pupuk fosfat, gipsum banyak digunakan untuk memperbaiki kondisi lapisan tanah bagian bawah, terutama dalam menurunkan kadar aluminium (Al) yang bersifat toksik dengan memindahkannya ke lapisan tanah yang lebih dalam

Penggunaan gipsum pertanian tidak hanya membantu menekan toksisitas aluminium pada tanah permukaan maupun lapisan bawah tanah terutama pada kondisi di mana pengapuran kurang memberikan hasil yang optimal, tetapi juga menyediakan unsur hara penting berupa kalsium (Ca) dan sulfur (S) bagi tanaman. Kedua unsur tersebut berperan penting dalam menjaga struktur tanah serta menunjang proses pertumbuhan tanaman. Selain itu, pemberian gipsum dapat merangsang pertumbuhan akar yang lebih dalam, sehingga tanaman lebih kuat menghadapi kondisi lingkungan yang kurang mendukung, seperti kekurangan air.

Gipsum juga diketahui memberikan manfaat bagi tanaman utama seperti jagung dan kedelai, antara lain dengan meningkatkan ketersediaan Ca dan S, memperbaiki pertumbuhan akar, meningkatkan hasil panen, serta menurunkan kadar aluminium yang bersifat racun. Pada tanaman jagung, aplikasi gipsum dapat memperluas area penyerapan unsur hara sehingga pertumbuhan tanaman menjadi lebih optimal. Sementara itu, pada tanaman kedelai, penggunaan gipsum memberikan keuntungan terutama pada daerah yang rentan mengalami kekurangan air karena membantu akar menjangkau sumber air di lapisan tanah yang lebih dalam [18].

2.8. Ekonomi Sirkular

Ekonomi Sirkular (*circular economy*) adalah kerangka kerja sistemik yang bertujuan untuk mengurangi pemborosan sumber daya alam dan meminimalkan limbah dengan cara mendesain produk-produk agar dapat didaur ulang, menggunakan kembali, atau dipulihkan setelah selesai digunakan. Konsep ini merupakan alternatif dari model ekonomi linear, yaitu model ekonomi yang didesain dengan cara "*take-make-dispose*", dimana sumber daya alam diambil, kemudian diolah menjadi produk, selanjutnya digunakan, setelah itu dibuang sebagai limbah [19].

Konsep ekonomi sirkular sangat berbeda dari model ekonomi linier yang bersifat lurus (*take-make-dispose*). Ekonomi sirkular justru mengusung model melingkar berdasarkan prinsip 3R, yaitu *Reduction*, *Reuse* dan *Recycling*. Jika dalam model ekonomi linier produk akhir dari proses produksi akan berakhir sebagai limbah (*dispose*). Sebaliknya, ekonomi sirkular dirancang secara berkelanjutan melalui

siklus produk, penggunaan, akhir masa pakai, dan pembuatan ulang (*remanufacture*). Sehingga sisa produksi atau produk yang telah habis masa pakainya akan diolah menjadi bentuk baru. Prinsip dasarnya adalah mengurangi material yang tidak mudah terurai-menggunakan kembali-mendaaur ulangnya, sehingga menjadi barang prrosoduktif yang dapat dimanfaatkan kembali. Selain mempertimbangkan aspek ekonomis, upaya ini juga bertujuan melestarikan dan menjaga keharmonisan ekosistem lingkungan [20].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif yang dilakukan dengan pembuatan pupuk di laboratorium. Pembuatan pupuk didasarkan pada proses granulasi dengan tahapan awal, yaitu pengujian bahan baku meliputi kadar fosfat (P_2O_5) dan kadar air (H_2O) yang digunakan sebagai dasar perhitungan consumption rate untuk 14 variasi. Selanjutnya, menyamaratakan ukuran dari masing-masing bahan baku dengan ayakan mesh 30, dilanjutkan dengan proses pencampuran bahan baku pada setiap variasinya. Kemudian dilakukan proses granulasi untuk membuat butiran pupuk granul. Pupuk granul yang dihasilkan dari proses granulasi akan dianalisis karakteristiknya melalui beberapa uji, yaitu uji distribusi ukuran partikel, uji kekerasan (*hardness*), uji kadar air (H_2O), uji kemampuan higroskopis, uji kadar fosfat (P_2O_5), dan uji kadar sulfur (S).

3.1. Variabel Penelitian

1.) Variabel tetap

- Suhu granulasi : 60 – 70 °C
- Kecepatan granulasi : 300 rpm
- Waktu granulasi : 13 menit
- Suhu pengeringan produk : 60 °C
- Waku pengeringan produk : ±12 jam

2.) Variabel berubah

Rancangan formulasi dibuat berdasarkan perbandingan consumption rate (CR) dari bahan baku sludge ROP dan sludge WWT. Perbandingan yang digunakan adalah 3:1; 2:1; 1:1; 1:2; 1:3, dan sebagai blanko/dasar menggunakan sumber utamanya, yaitu sludge ROP, maka dilakukan formulasi dengan memakai seluruhnya sludge ROP, yaitu 1:0 tanpa sludge WWT. Sementara NCG dan

FABA berperan sebagai filler sehingga massa yang dibutuhkan menyesuaikan. Dapat dilihat pada Tabel 3. sebagai berikut:

Tabel 3. Formulasi pembuatan pupuk SP-15 Variasi 1 – 14

Variasi	Bahan Baku	Perbandingan Consumption Rate (CR)	Mass (g)	Mass Fract.
1	Sludge ROP	1	256,32	0,000
	Sludge WWT	0	0,00	0,604
	FABA		89,33	0,210
	NCG		78,85	0,186
	Total		424,5	1,000
2	Sludge ROP	3	192,24	0,160
	Sludge WWT	1	66,48	0,463
	FABA		0,00	0,000
	NCG		156,20	0,376
	Total		414,92	1,000
3	Sludge ROP	1	132,95	0,312
	Sludge WWT	1	128,16	0,301
	FABA		87,64	0,206
	NCG		77,36	0,182
	Total		426,11	1,000
4	Sludge ROP	1	128,16	0,320
	Sludge WWT	1	132,95	0,308
	FABA		0,00	0,000
	NCG		154,72	0,372
	Total		415,83	1,000
5	Sludge ROP	1	128,16	0,315
	Sludge WWT	1	132,95	0,304
	FABA		52,59	0,125
	NCG		108,30	0,257
	Total		422,00	1,000
6	Sludge ROP	1	270,0	0,000
	Sludge WWT	0	0,00	0,621
	FABA		87,17	0,200
	NCG		77,63	0,179
	Total		434,83	1,000
7	Sludge ROP	1	132,82	0,316
	Sludge WWT	1	136,96	0,306
	FABA		86,76	0,200
	NCG		77,26	0,178

	Total		433,80	1,000
8	Sludge ROP	3	199,23	0,156
	Sludge WWT	1	68,48	0,454
	FABA		132,30	0,301
	NCG		39,27	0,089
	Total		439,28	1,000
9	Sludge ROP	1	66,41	0,479
	Sludge WWT	3	205,45	0,155
	FABA		42,66	0,100
	NCG		113,97	0,266
	Total		428,49	1,000
10	Sludge ROP	1	79,69	0,439
	Sludge WWT	2	191,75	0,182
	FABA		119,85	0,274
	NCG		45,74	0,105
	Total		437,03	1,000
11	Sludge ROP	1	58,58	0,332
	Sludge WWT	2	145,39	0,134
	FABA		147,72	0,337
	NCG		86,29	0,197
	Total		437,98	1,000
12	Sludge ROP	2	117,15	0,188
	Sludge WWT	1	83,08	0,266
	FABA		174,96	0,397
	NCG		65,70	0,149
	Total		440,89	1,000
13	Sludge ROP	1	97,63	0,237
	Sludge WWT	1	103,85	0,223
	FABA		149,21	0,341
	NCG		87,17	0,199
	Total		437,86	1,000
14	Sludge ROP	1	308,74	0,000
	Sludge WWT	0	0,00	0,7264
	FABA		64,976	0,1368
	NCG		62,855	0,1368
	Total		436,57	1,000

3.2. Bahan dan Peralatan Penelitian

1.) Bahan penelitian

Adapun bahan yang digunakan sebagai penelitian sebagai berikut:

- Sludge run of pile (ROP)
 - Sludge wastewater treatment (WWT)
 - Fly ash and bottom ash (FABA)
 - Neutralized crude gypsum (NCG)
- 2.) Peralatan penelitian
- Berikut merupakan peralatan laboratorium yang digunakan pada penelitian granulasi dan pengujian sampel pupuk majemuk SP-15
- Peralatan granulasi
 - a. neraca analitik (merk mettler toledo)
 - b. baki plastik
 - c. plastik ziplock
 - d. Satu Set Granulator (merk Erweka GTE pelletizer stainless steel 9,5L)
 - e. Sendok Spatula
 - f. Spatula Plastik
 - g. Heat Gun
 - h. Mortar dan alu porselen
 - i. Mesh No. 30
 - j. Sieve Shaker (merk Retsch AS 200 basic)
 - Peralatan pengujian
 - a. Mesh No. 4 dan No.10
 - b. Alat Hardness (Tester Fujiwara Seisakusho KHT-40N)
 - c. Oven (merk TCN4M)
 - d. Climatic chamber
 - e. Spektrofotometer UV-Vis PerkinElmer LAMBDA 365+

3.3. Pengujian Karakteristik Fisika dan Kimia

Pupuk dengan ukuran 2 mm – 4 mm dilakukan pengujian untuk mengetahui kuliatas secara fisika dan kandungan kimianya. Prosedur uji yang dilakukan yaitu uji fisika meliputi, uji kekerasan (hardness), uji higroskopis dan uji kadar air. Sedangkan uji kimia dilakukan meliputi, uji kandungan fosfat (P_2O_5) total dan uji sulfur (S).

1.) Uji kekerasan

Pengujian Hardness dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan mekanik granul hasil proses granulasi dan pengeringan dengan prosedur pengujian sebagai berikut.

1. 20 butir granul Onsize diambil secara acak
2. Setiap butir granul diletakkan pada bagian tengah landasan alat uji kekerasan

untuk memastikan distribusi gaya tekan yang merata

3. Alat uji kekerasan dioperasikan hingga granul mengalami keretakan dan nilai gaya tekan maksimum dicatat dalam satuan Newton force (N).
4. Nilai kekerasan yang diperoleh kemudian dikonversi ke satuan kilogram force (kgf) dengan cara membagi nilai Newton force dengan 10.
5. Pengujian dilakukan terhadap seluruh 20 butir granul, sehingga diperoleh 20 data nilai kekerasan.
6. Seluruh data kekerasan yang diperoleh kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai kekerasan granul yang representatif.

2.) Uji kadar air (H_2O)

Metode gravimetri untuk uji kadar air dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Memanaskan cawan uji dengan menggunakan oven pada suhu $105^\circ C$ selama 20 menit.
2. Mendinginkan cawan uji dalam desikator selama 30 menit
3. Menimbang berat cawan kosong dengan menggunakan neraca analitik.
4. Menimbang 5 g sampel di dalam cawan kosong.
5. Kemudian memanaskan cawan yang berisi sampel ke dalam oven selama 4 jam pada suhu $105^\circ C$.
6. Setelah itu, mendinginkan cawan yang berisi sampel kedalam desikator selama 30 menit
7. Selanjutnya menimbang cawan yang berisi sampel setelah pemanasan.
8. Penentuan kadar air dihitung dengan cara sebagai berikut.

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan :

W_0 = berat cawan kosong

W_1 = berat cawan + sampel awal (sebelum pemanasan dalam oven)

W_2 = berat cawan + sampel akhir (setelah pendinginan dalam desikator)

3.) Uji higroskopis

Uji higroskopis dilakukan untuk mengetahui kemampuan granul pupuk dalam menyerap uap air dari lingkungan pada kondisi suhu dan kelembapan tertentu. Perubahan massa sampel setelah dipaparkan pada kondisi

terkontrol di Climatic Chamber digunakan sebagai dasar perhitungan tingkat higroskopisitas granul. Adapun tahapan pada uji higroskopis adalah sebagai berikut.

1. Mengambil sampel granul yang telah dikeringkan melalui uji kadar air (oven).
2. Menimbang cawan timbang tertutup beserta sampel granul kering dan mencatat massanya sebagai bobot setelah oven (M_1).
3. Memasukkan cawan berisi sampel ke dalam climatic chamber
4. Mengatur kondisi climatic chamber pada suhu 30 °C dan kelembapan relatif (RH) 70%
5. Membiarkan sampel berada di dalam climatic chamber selama waktu pengujian yang ditentukan.
6. Mengeluarkan sampel dari climatic chamber setelah waktu pengujian selesai
7. Menimbang kembali cawan timbang tertutup beserta sampel dan mencatat massanya sebagai bobot setelah climatic chamber (M_2)
8. Mencatat seluruh data massa untuk perhitungan nilai higroskopis granul.
9. Melakukan perhitungan higroskopisitas dengan menggunakan rumus:

$$\% \text{ Higroskopis} = \frac{(M_2 - M_1)}{M_w} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan :

M_1 = bobot cawan timbang + sampel setelah di Oven 2 jam

M_2 = bobot cawan timbang + sampel setelah climatic chamber 3 jam

M_w = bobot pupuk kering = bobot sampel – (% kadar air × bobot sampel)

4.) Uji kadar fosfat (P_2O_5)

Jumlah fosfor dalam pupuk ditentukan dalam bentuk fosfat (P_2O_5) yang biasa tertera pada label pupuk. Penentuan kadar ini menggunakan metode vanadomolybdate. Dimana sampel pupuk terlebih dahulu didekomposisi dengan menggunakan larutan asam untuk diuraikan menjadi larutan fosfat, selanjutnya direaksikan dengan amonium molibdat dan amonium vanadat sehingga terbentuk kompleks vanadomolybdophosphate berwarna kuning yang diukur penyerapannya dengan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang sekitar 420 nm, nilai absorbansi yang terukur akan dibandingkan

dengan larutan standard [21]. Tahapan dari uji kadar P_2O_5 sebagai berikut.

1. Menimbang 1 gram sampel dan memasukkannya ke dalam beaker glass 150 ml
2. Menambahkan 6 mL asam nitrat (HNO_3) dan 10 mL asam perklorat ($HClO_4$) ke dalam beaker glass yang berisi sampel
3. Memanaskan campuran di atas hot plate hingga proses destruksi selesai, ditandai dengan terbentuknya sisa larutan berwarna putih atau jernih
4. Menghentikan pemanasan dan mendinginkan larutan, kemudian menambahkan akuades $\pm$ 50 mL untuk melarutkan sisa hasil destruksi
5. Memindahkan larutan hasil destruksi ke dalam labu ukur 500 mL, kemudian menambahkan akuades hingga tanda tera dan menghomogenkan larutan
6. Menyaring larutan menggunakan kertas saring Whatman No. 40 dan menampung filtrat ke dalam Erlenmeyer
7. Memipet 5 mL filtrat, kemudian memasukkannya ke dalam labu ukur 100 ml
8. Menambahkan 5 ml campuran pereaksi ammonium molibdat dan ammonium vanadat (1:1) ke dalam labu ukur
9. Menambahkan akuades hingga tanda tera, kemudian menghomogenkan larutan dan mendiamkannya selama 15 menit hingga warna berkembang sempurna
10. Mengukur absorbansi larutan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 420 nm
11. Melakukan tahapan yang sama (langkah 7–10) untuk larutan standar P_2O_5 dengan konsentrasi 0,5 mg/ml sebanyak 5 ml serta larutan blanko.
12. Penentuan kadar P_2O_5 dihitung dengan cara sebagai berikut.

$$\%P_2O_5 = \frac{\text{Abs sampel}}{\text{Abs standar}} \times 0,5 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \times 5 \text{ ml} \times \left(\frac{500 \text{ ml}}{5 \text{ ml}} \right) \times \frac{100 \text{ mg}}{\text{mg sampel}} \quad (3)$$

Keterangan:

Abs sampel = Nilai absorbansi larutan sampel

Abs standar = nilai absorbansi larutan standar

mg sampel = massa sampel yang diambil (1 gram = 1000 mg)

5.) Uji kadar sulfur (S)

Uji kadar sulfur hanya dilakukan apabila kadar fosfat (P_2O_5) pada pupuk sebesar 15% - 16%. Dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Mengambil dan menyaring sampel yang akan dilakukan pengujian sebanyak 50 ml
2. Menambahkan filtrat/aquadest sebanyak 200 ml
3. Selanjutnya memanaskan larutan (tidak sampai mendidih/hangat)
4. Menambahkan larutan $BaCl_2$ 10% sebanyak 25 ml, kemudian di aduk agar homogen
5. Memanaskan larutan yang sudah homogen selama 1 jam, sampai terbentuk endapan putih
6. Menyaring endapan yang terbentuk, kemudian dilakukan pengeringan didalam oven suhu $230^\circ C$ selama 2 jam
7. Menimbang massa endapan yang diperoleh
8. Dalam prosedur gravimetri, sulfur dapat diendapkan sebagai barium sulfat ($BaSO_4$), dimana endapan $BaSO_4$ ditimbang, sehingga kandungan sulfur (S) dalam sampel dapat dihitung dengan cara sebagai berikut.

$$\% SO_3 = \frac{(M_2 - M_1)}{\text{sampel (g)}} \times FP \times \text{Rasio BM} \times 100 \quad (4)$$

Keterangan :

M_2 = massa cawan setelah dilakukan pengovenan (gram)

M_1 = massa cawan sebelum dilakukan pengovenan (gram)

Sampel = massa sampel yang diambil sebagai sampel uji (gram)

FP = faktor pengenceran ($\frac{500 \text{ ml}}{50 \text{ ml}}$)

Rasio BM = rasio perbandingan berat molekul ($\frac{Mr SO_3}{Mr BaSO_4}$)

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Uji Kandungan Fosfat Fosfat (P_2O_5) Pada Bahan Baku

Tabel 4. Hasil uji kandungan fosfat (P_2O_5) pada baku variasi 1 – 10

Sampel	Kadar P_2O_5 (%)
Sludge ROP	23,61
Sludge WWT	23,11

Tabel 5. Hasil uji kandungan fosfat (P_2O_5) pada baku variasi 11 – 13

Sampel	Kadar P_2O_5 (%)
Sludge ROP	31,596
Sludge WWT	29,977
NCG	0,883

Tabel 6. Hasil uji kandungan fosfat (P_2O_5) pada baku variasi 14

Sampel	Kadar P_2O_5 (%)
Sludge ROP	20,65

Data dari Tabel 4. digunakan sebagai dasar perhitungan Consumption Rate (CR) formulasi pupuk SP-15 untuk variasi 1–10, untuk data pada Tabel 5. digunakan sebagai dasar perhitungan Consumption Rate (CR) formulasi pupuk SP-15 untuk variasi 11 – 13. Sedangkan Tabel 6. digunakan sebagai dasar perhitungan Consumption Rate (CR) formulasi pupuk SP-15 untuk variasi 14. Dengan demikian, perbedaan nilai kandungan P_2O_5 pada masing-masing tabel menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan komposisi bahan baku pada setiap variasi formulasi pupuk SP-15.

Kandungan fosfor tertinggi terdapat pada sludge ROP, kemudian sludge WWT dan paling rendah terdapat pada NCG. Kandungan fosfor yang relatif tinggi pada sludge ROP disebabkan sumber asal diperolehnya dari hasil samping proses produksi pupuk fosfat, sehingga masih mengandung fosfor dalam jumlah yang cukup besar. Hal ini sejalan dengan penelitian Praditya (2025) yang menyatakan bahwa limbah dari proses pembuatan pupuk fosfat masih memiliki kandungan fosfor yang cukup tinggi [4]. Selain itu, penelitian Pasalari (2024) juga menjelaskan bahwa lumpur limbah diketahui masih mengandung fosfor dalam kisaran sekitar 5 – 10% serta memiliki karakteristik yang mendekati batuan fosfat. Pernyataan tersebut sesuai dengan hasil pengujian dimana terdapat kandungan P_2O_5 pada sludge WWT [10].

Sementara itu, penelitian De Souza (2025) menyebutkan bahwa gipsium masih mengandung P_2O_5 sekitar 0,7% [18]. Oleh karena itu, kadar P_2O_5 pada NCG yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sludge ROP dan sludge WWT memiliki potensi sebagai

sumber fosfor alternatif yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam pembuatan pupuk SP-15.

4.2. Hasil Uji Kandungan Kadar Air (H_2O) Pada Bahan Baku

Tabel 7. Hasil uji kandungan air (H_2O) pada bahan baku variasi 1 – 10

Sampel	Kadar air (%)
Sludge ROP (basah)	22,09
Sludge ROP (kering)	0,83
Sludge WWT	2,34
NCG	7,53
FABA	18,38

Tabel 8. Hasil uji kandungan air (H_2O) pada baku variasi 11 – 13

Sampel	Kadar air (%)
Sludge ROP	2,7438
Sludge WWT	3,6296
NCG	5,9407
FABA	17,5795

Tabel 9. Hasil uji kandungan air (H_2O) pada baku variasi 14

Sampel	Kadar air (%)
Sludge ROP	5,89
NCG	15,78
FABA	12,94

Kadar air merupakan parameter penting karena mempengaruhi proses granulasi, kestabilan produk, serta kualitas fisik pupuk yang dihasilkan. Dimana kadar air yang rendah lebih diharapkan karena dapat meningkatkan efisiensi proses pengeringan dan mengurangi kemungkinan terbentuknya penggumpalan (aglomerasi) yang berlebihan selama proses granulasi. Penelitian Rosmayani (2021) mengenai komposisi batuan fosfat yang berpengaruh pada produk gipsum yang dihasilkan menunjukkan bahwa kadar air bahan baku umumnya berada pada kisaran rendah, sekitar 2–4% [22], sehingga memudahkan proses reaksi dalam pembuatan pupuk fosfat. Oleh karena itu, hasil pengujian kadar air ini digunakan sebagai salah satu dasar pertimbangan dalam menentukan Consumption Rate (CR) pada setiap variasi campuran bahan baku pada pembuatan pupuk SP-15.

4.3. Hasil Uji Kandungan Fosfat Fosfat (P_2O_5) Pada Pupuk

Tabel 10. Hasil uji kandungan fosfat (P_2O_5) pada pupuk variasi 1 – 14

Sampel	Absorbansi			Kadar P_2O_5 (%)
	1	2	avg	
Standar	0,588	0,588	0,588	
Variasi 1	0,432	0,434	0,433	18,410
Variasi 2	0,412	0,415	0,413	17,574
Variasi 3	0,409	0,410	0,409	17,398
Variasi 4	0,433	0,434	0,434	18,435
Variasi 5	0,404	0,401	0,403	17,117
Standar	0,5990	0,5910	0,5950	
Variasi 6	0,4760	0,4760	0,4760	20,000
Variasi 7	0,4560	0,4560	0,4560	19,160
Variasi 8	0,4620	0,4600	0,4610	19,370
Variasi 9	0,4920	0,4870	0,4895	20,567
Variasi 10	0,4830	0,4840	0,4835	20,315
Standar	0,5827	0,5827	0,5827	
Variasi 11	0,3648	0,3710	0,3679	15,696
Variasi 12	0,3903	0,3645	0,3774	15,725
Variasi 13	0,3572	0,3831	0,3702	15,694
Standar	0,5932	0,5932	0,5932	
Variasi 14	0,3993	0,3843	0,3918	16,031

Berdasarkan Tabel 10. menunjukkan hasil pengujian kadar fosfat (P_2O_5) pada pupuk SP-15 berdasarkan nilai absorbansi yang diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Nilai absorbansi menggambarkan intensitas serapan cahaya oleh larutan sampel, dimana semakin tinggi nilai absorbansi, maka semakin besar konsentrasi fosfat yang terkandung dalam sampel. Adanya kecenderungan hubungan linier antara nilai absorbansi dan kadar P_2O_5 , dimana peningkatan nilai absorbansi diikuti oleh peningkatan kadar fosfat.

Berdasarkan data diatas, kadar P_2O_5 pada variasi 1 – 10 berada pada rentang 17,117% hingga 20,567%. Dimana nilai kadar P_2O_5 tertinggi terdapat pada Variasi 9 sebesar 20,567%. Pada variasi 1 – 10 menunjukkan kadar P_2O_5 yang jauh lebih tinggi dari kadar P_2O_5 yang telah ditentukan yaitu 15%, hal ini dikarenakan kadar fosfat dan kadar air yang

tidak merata pada bahan baku, sehingga terdapat perbedaan kandungan bahan baku yang ada didalam data yang digunakan sebagai dasar perhitungan consumption rate dengan kadar fosfat dan kadar air pada bahan baku yang sesungguhnya. Pada variasi 10 – 14 menunjukkan bahwa kadar fosfat yang ada didalam pupuk mencapai 15,694% – 15,725%, kadar ini telah sesuai dengan target yang diharapkan dengan persentase yang ditargetkan untuk SP-15 memiliki rentang kadar fosfat (P_2O_5) sebesar 15% – 16%.

4.4. Hasil Uji Kandungan Sulfur (S) Pada Pupuk

Tabel 11. Hasil uji kandungan sulfur (S) pada pupuk variasi 1 – 14

Sampel	Berat Sampel	Berat Cawan Kosong	Berat Setelah Oven	%S
Variasi 11	(gram)			
	1,006	60,656	60,679	3,088
	1,051	65,644	65,681	4,797
Rata - rata				3,942
Variasi 12	1,030	57,743	57,772	3,789
	1,024	63,860	63,891	4,174
Rata - rata				3,982
Variasi 13	1,012	60,000	60,032	4,453
	1,048	59,245	59,288	5,626
Rata - rata				5,040
Variasi 14	1,050	35,922	35,975	7,000
	1,010	34,890	34,921	4,244
Rata - rata				5,622

Berdasarkan Tabel 11. dapat dilihat bahwa kadar sulfur yang ada hanya dari variasi 11 – 14, dimana untuk variasi 1 – 10 tidak dilakukan pengujian kadar sulfur (S) karena pada variasi 1 – 10 memiliki kadar fosfat (P_2O_5) lebih dari rentang kadar fosfat yang ditargetkan, sehingga tidak dilanjutkan untuk pengujian sulfur. Dari Tabel 11. menunjukkan kadar sulfur pada variasi 11 sebesar 3,9425%, variasi 12 sebesar 3,9817%, variasi 13 sebesar 5,0396% dan variasi 14 sebesar 5,6223%. Secara umum, sulfur merupakan unsur hara makro sekunder yang berperan penting dalam pembentukan asam amino seperti sistein dan metionin, pembentukan klorofil, serta meningkatkan

efisiensi penyerapan unsur hara lain seperti nitrogen dan fosfor. Kekurangan sulfur dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil panen [23]. Jumlah sulfur dalam pupuk SP-15 belum ditentukan batasan oleh PT. Petrokimia Gresik, tetapi pupuk yang sudah diproduksi seperti SP-36 dengan memiliki kadar sulfur sebesar 5% dan hasil dari pupuk majemuk SP-15 menunjukkan kadar sulfur dengan rentang 3% – 5%. Namun diperlukan adanya pengujian lanjutan sehingga didapatkan kandungan sulfur yang optimal sehingga tumbuhan dapat bertumbuh dengan baik.

4.5. Hasil Uji Distribusi Ukuran Partikel Pada Pupuk

Tabel 12. Hasil uji distribusi ukuran partikel

Sampel	Presentase ukuran butir (%)		
	< 2 mm	2 – 4 mm	> 4 mm
Variasi 1	12,15	22,53	65,32
Variasi 2	8,99	28,13	62,89
Variasi 3	70,69	18,96	10,35
Variasi 4	77,52	21,45	1,03
Variasi 5	3,72	35,90	60,38
Variasi 6	4,76	86,85	8,39
Variasi 7	42,23	41,13	16,63
Variasi 8	51,52	40,93	7,55
Variasi 9	9,20	33,68	57,12
Variasi 10	8,77	42,74	48,49
Variasi 11	6,77	67,41	25,82
Variasi 12	3,75	71,04	25,22
Variasi 13	43,73	44,72	11,56
Variasi 14	2,48	65,23	32,29
Variasi 14	2,48	65,23	32,29

Berdasarkan Tabel 12. hasil uji distribusi ukuran yang dilakukan terhadap 14 variasi granulasi, diperoleh presentasi ukuran butiran < 2 mm berada pada rentang 2,48% – 77,52%. Untuk presentase ukuran butiran 2 – 4 mm berada pada rentang 18,96% – 71,04%. Selanjutnya untuk presentase ukuran butiran > 4 mm berada pada 1,03% – 65,32%.

Jika dibandingkan dengan standar yang ada yaitu presentase ukuran butiran yang harus terbentuk minimal 70% dengan ukuran butiran 2 mm – 4 mm. Dari data diatas hanya ada 1 variasi yang sesuai dengan standar yang ada yaitu variasi 12. Hal ini dikarenakan faktor penambahan air pada saat proses granulasi dengan ritme penambahan yang berbeda- beda dan bahan baku yang digunakan apabila tidak kering sempurna akan mudah terbentuk gumpalan (aglomerasi) lebih dulu dalam mesin granulator, sehingga akan membentuk gumpalan yang lebih besar lagi. Selain itu, tidak ada sensor suhu sehingga suhu pemanasan pada saat granulasi tidak diketahui secara tepat dan waktu pemanasan pan granulator untuk tiap variasi tidak tepat sama.

4.6. Hasil Uji Kekerasan Pada Pupuk

Tabel 13. Hasil uji kekerasan (hardness) pada pupuk variatis 1 – 14

Sampel	Nilai Hardness (kg/butir)
Variasi 1	2,32
Variasi 2	3,45
Variasi 3	0,44
Variasi 4	0,63
Variasi 5	0,92
Variasi 6	0,86
Variasi 7	0,91
Variasi 8	1,13
Variasi 9	0,31
Variasi 10	0,35
Variasi 11	0,48
Variasi 12	0,89
Variasi 13	0,35
Variasi 14	1,74

Berdasarkan Tabel 13. hasil uji kekerasan (hardness) yang dilakukan terhadap 14 variasi granulasi, diperoleh nilai hardness yang berbeda untuk setiap variabelnya. Dengan rentang kekerasan pupuk dari sebesar 0,35 kg – 3,45 kg. Berdasarkan informasi internal dari Laboratorium PT. Petrokimia Gresik, standar kekerasan pupuk untuk skala laboratorium sebesar 1 kg/butir granul. Sedangkan, standar kekerasan pupuk untuk skala pabrik sebesar 2 kg/butir. Jika dibandingkan dengan standar hardness yang ada, maka variabel 1 dan variabel

2 telah memenuhi standar untuk skala laboratorium dan skala pabrik, sedangkan variasi 14 telah memenuhi standar skala laboratorium tetapi untuk skala pabrik belum memenuhi. Sementara itu, variabel 3 hingga 13 belum memenuhi standar hardness untuk skala laboratorium maupun skala pabrik, yang menunjukkan bahwa granul yang dihasilkan memiliki kekuatan mekanik yang rendah dan berpotensi mudah hancur selama proses penanganan dan penyimpanan.

Perbedaan nilai hardness pada setiap variasi granulasi dipengaruhi oleh perbedaan komposisi bahan baku, yaitu sludge ROP, sludge WWT, NCG, dan FABA. Variasi dengan kandungan NCG dan sludge ROP yang lebih tinggi serta kadar sludge WWT yang terkendali menghasilkan granul dengan struktur lebih kompak dan ikatan antar partikel yang lebih kuat, sehingga memiliki nilai hardness lebih tinggi. Sebaliknya, variasi dengan kandungan sludge WWT dan FABA yang relatif tinggi namun binder yang terbatas menghasilkan granul yang lebih berpori dan rapuh, sehingga nilai hardness yang diperoleh lebih rendah.

4.7. Hasil Uji Kadar Air dan Higroskopisitas Pada Pupuk

Tabel 14. Hasil uji kadar air (H₂O) dan uji higroskopis pupuk variasi 1 – 14

Sampel	Parameter	
	Kadar air (%)	Higroskopis (%)
Variasi 1	1,92	5,72
Variasi 2	0,92	2,45
Variasi 3	1,76	2,33
Variasi 4	1,84	1,25
Variasi 5	0,52	1,64
Variasi 6	2,69	3,70
Variasi 7	0,56	1,60
Variasi 8	0,62	1,17
Variasi 9	0,99	1,46
Variasi 10	0,82	1,49
Variasi 11	0,75	1,52

Variasi 12	0,53	1,95
Variasi 13	0,53	1,86
Variasi 14	0,68	3,28

Berdasarkan Tabel 14. menunjukkan hasil uji kadar air dan uji higroskopis pupuk variasi 1 – 14 yang diuji telah memenuhi standar kadar air pupuk maksimum 5% berdasarkan SNI 02-3776-2005 yaitu standar mutu pupuk fosfat alam untuk pertanian dan standar kadar air yang telah ditentukan oleh pihak perusahaan sebesar 3%. Dimana rentang kadar air dari variasi 1 – 14 sebesar 0,52% – 2,69%. Persentase kadar air menunjukkan kuantitas air permukaan pupuk yang teruapkan pada proses drying. Semakin besar nilainya, menunjukkan semakin banyak kadar air yang terkandung pada pupuk tersebut. Sementara itu, hasil uji higroskopisitas menunjukkan bahwa variasi 8 memiliki persentase higroskopis terkecil sebesar 1,17 dan variasi 1 memiliki persentase higroskopis terbesar yaitu 5,72.

Nilai higroskopisitas menunjukkan kemampuan pupuk dalam menyerap air. Semakin besar nilainya, menunjukkan semakin mudah pupuk tersebut menyerap air dari kelembapan udara atau air murni dari lingkungan. Pengujian kadar air dilakukan dengan metode gravimetri dengan menghitung jumlah kehilangan air melalui proses drying di oven. Sementara itu pengujian higroskopisitas dilakukan dengan metode yang sama namun memanfaatkan climatic chamber sebagai suplay humiditas, kemudian akan dihitung jumlah penambahan kadar air pada sampel pupuk.

4.8. Penentuan Variasi Terbaik Pupuk SP-15

Tabel 15. Perbandingan karakteristik tiap variasi berdasarkan hasil uji kimia Kadar Fosfat

Sampel	Kadar Fosfat (P ₂ O ₅) (%)	Kadar Sulfur (S) (%)
Variasi 1	18,410	–
Variasi 2	17,574	–
Variasi 3	17,398	–
Variasi 4	18,435	–

Variasi 5	17,117	–
Variasi 6	20,000	–
Variasi 7	19,160	–
Variasi 8	19,370	–
Variasi 9	20,567	–
Variasi 10	20,315	–
Variasi 11	15,696	3,943
Variasi 12	15,725	3,982
Variasi 13	15,694	5,039
Variasi 14	16,031	5,622

Berdasarkan Tabel 15. menunjukkan bahwa hasil uji kadar fosfat (P₂O₅) dari variasi 1 – 10 belum memenuhi kriteria dari pupuk SP-15 yaitu kadar fosfat (P₂O₅) sebesar 15%-16% dan yang memenuhi kriteria dari pupuk SP-15 adalah variasi 11 – 14 dengan rentang kadar fosfat (P₂O₅) sebesar 15,694% – 16,031% . Pupuk yang tidak memenuhi kriteria tidak bisa dilanjutkan untuk pengujian kadar sulfur, dikarenakan spesifikasi awal yang sudah tidak memenuhi. Selanjutnya untuk variasi 11 – 14 dilakukan pengujian kadar sulfur dan didapatkan nilai kadar sulfur secara berurutan yaitu 3,943%; 3,982%; 5,039%; 5,622%. kadar sulfur terendah dihasilkan oleh variasi 11 dan kadar sulfur tertinggi dihasilkan oleh variasi 14. Dapat disimpulkan bahwa setiap formulasi bahan baku mempengaruhi kandungan fosfat dan sulfur pada pupuk yang dihasilkan.

Tabel 16. Perbandingan karakteristik tiap variasi berdasarkan hasil uji fisika

Sampel	Kekerasan (kg)	Kadar air (%)	Higroskopis (%)	Distribusi Ukuran (2mm – 4mm) (%)
Standar	2	3	< 5	70
Variasi 1	2,32	1,92	5,72	22,53
Variasi 2	3,45	0,92	2,45	28,13
Variasi 3	0,44	1,76	2,33	18,96
Variasi 4	0,63	1,84	1,25	21,45
Variasi 5	0,92	0,52	1,64	35,90
Variasi 6	0,86	2,69	3,70	86,85
Variasi 7	0,91	0,56	1,60	41,13
Variasi 8	1,13	0,62	1,17	40,93
Variasi 9	0,31	0,99	1,46	33,68
Variasi 10	0,35	0,82	1,49	42,74
Variasi 11	0,48	0,75	1,52	67,41
Variasi 12	0,89	0,53	1,95	71,04
Variasi 13	0,35	0,53	1,86	44,72
Variasi 14	1,74	0,68	3,28	65,23

Berdasarkan Tabel 16. menunjukkan hasil karakteristik fisika dari 14 variasi pupuk SP-15. Berdasarkan hasil karakteristik tersebut dapat dilihat variasi 1 dan 2 sudah memenuhi standar kekerasan pupuk (*hardness*), kadar air dan higroskopis, akan tetapi tidak memenuhi distribusi ukuran partikel yang dipersyaratkan, sedangkan pada variasi 3 – 13 menunjukkan hasil kekerasan pupuk (*hardness*) yang relatif rendah dibawah 2 kg/butir yang mengakibatkan butiran granul akan mudah pecah. Selanjutnya untuk variasi 14 dengan nilai *hardness* 1,74 kg sebenarnya belum memenuhi standar yang ada, akan tetapi nilai *hardness* yang diperoleh mendekati standar, untuk kadar air dan higroskopis sudah memenuhi standar,

sedangkan untuk distribusi ukuran partikel sebesar 65,23% mendekati standar yang dipersyaratkan yaitu 70%.

Berdasarkan hasil analisis karakteristik tersebut, dapat dilakukan penilaian variasi terbaik berdasarkan karakteristik fisika dengan melakukan analisis menggunakan Analytical Hierarchy Process (AHP), ditetapkan nilai bobot untuk parameter nilai *hardness*, higroskopisitas, kadar dan distribusi ukuran granul yang sesuai berturut-turut sebesar 0,31; 0,26; 0,24; dan 0,19. Bobot lebih besar menunjukkan parameter tersebut memiliki prioritas yang dinilai lebih penting dan sebaliknya. Total bobot semua parameter bernilai satu. Sebagai berikut:

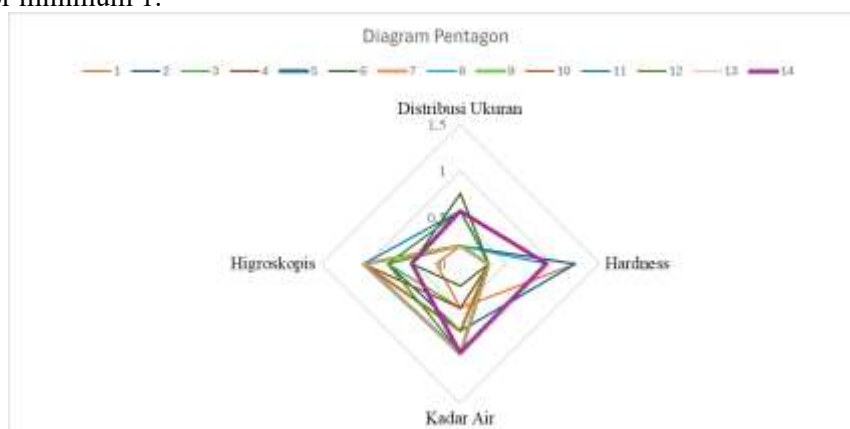
Tabel 17. Analytical Hierarchy Process dalam penentuan variasi terbaik berdasarkan uji fisika

No	Parameter	Bobot	Penilaian Variasi							Hasil Penilaian (Bobot × Nilai)						
			1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	<i>Hardness</i>	0,31	4	4	1	1	1	1	1	1,24	1,24	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
2	Higroskopis	0,26	1	3	3	4	4	2	4	0,26	0,78	0,78	1,04	1,04	0,52	1,04

3	Kadar air	0,24	2	3	2	2	4	1	4	0,48	0,72	0,48	0,48	0,96	0,24	0,96
4	Distribusi ukuran	0,19	1	1	1	1	1	4	1	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,76	0,19
Total										2,17	2,93	1,76	2,02	2,5	1,83	2,5
No	Parameter	Bobot	8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
1	Hardness	0,31	3	1	1	1	1	1	3	0,62	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,93
2	Higroskopis	0,26	4	4	4	4	3	4	2	1,04	1,04	1,04	1,04	0,78	1,04	0,52
3	Kadar air	0,24	4	3	4	4	4	4	4	0,96	0,72	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
4	Distribusi ukuran	0,19	1	1	1	3	3	1	3	0,19	0,19	0,19	0,57	0,57	0,19	0,57
Total										2,81	2,26	2,5	2,88	2,62	2,5	2,98
Keterangan: 4 (sangat baik), 3 (baik), 2 (cukup), 1 (kurang)																

Ditentukan nilai untuk tiap variasi terhadap tiap parameter dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Untuk parameter hardness, semakin tinggi nilai hardness maka semakin baik kualitasnya (kuat) dengan skor maksimum 4. Sebaliknya, semakin rendah nilai hardness maka semakin buruk kualitasnya (rapuh) dengan skor minimum 1.
2. Untuk parameter higroskopisitas, semakin rendah angka higroskopis akan dinilai semakin baik dengan skor maksimum 4. Sebaliknya, semakin tinggi angka higroskopis akan dinilai semakin buruk dengan skor minimum 1.
3. Untuk parameter kadar air, semakin rendah jumlah kadar air akan dinilai semakin baik dengan skor maksimum 4. Sebaliknya, semakin tinggi jumlah kadar air akan dinilai semakin buruk dengan skor minimum 1.
4. Untuk parameter distribusi ukuran, semakin besar presentase distribusi ukuran maka akan dinilai semakin baik dengan skor maksimum 4. Sebaliknya, semakin rendah besarnya presentase distribusi ukuran akan dinilai semakin buruk dengan skor minimum 1.



Gambar 3. Diagram pentagon performa hasil uji fisika tiap variasi

Berdasarkan Gambar 3. menunjukkan visualisasi performa tiap variasi terhadap keempat parameter fisika. Performa yang baik divisualisasikan dengan garis mendekati tepi dan menyentuh skor yang lebih besar

(mendekati nilai 1,5 dan menjauhi nilai 0). Secara visual, dapat disimpulkan bahwa variasi 14 dengan nilai kekuatan menahan beban (hardness) sebesar 1,74 kg/butir, kemampuan higroskopis sebesar 3,28%, kadar air sebesar

0,68%, dan distribusi ukuran sebesar 65,23%, merupakan variasi terbaik untuk formulasi pupuk SP-15. Karakteristik pupuk variasi 14 telah lolos standar skala laboratorium PT

4.9. Ekonomi Sirkular Pada Pembuatan Pupuk SP-15

Pembuatan pupuk majemuk (SP-15) dengan optimalisasi pemanfaatan limbah hasil dari proses produksi PT. Petrokimia Gresik merupakan implementasi penerapan ekonomi sirkular dimana limbah dimanfaatkan menjadi bahan baku alternatif yang mengurangi biaya

Tabel 18. Data potensi jumlah pemanfaatan limbah dalam pembuatan pupuk majemuk (SP-15) kapasitas produksi 10.000 ton/tahun

Data	Jumlah Limbah (ton/tahun)	Potensi Limbah Termanfaatkan (ton/tahun)	Potensi Limbah Termanfaatkan (%)	Sisa limbah (ton)
<i>Fly ash</i>	35.552	684,02	1,92	34.867,98
<i>Bottom ash</i>	1.736	684,02	39,40	1.051,98
<i>Sludge WWT</i>	153	-	0,00	153,00
NCG	520.009	1.368,04	0,26	51.8640,96
<i>Sludge endapan asam fosfat (sludge ROP)</i>	32.309	7.263,92	22,48	25.045,08

Pada Tabel 18. menunjukkan seberapa besar limbah yang dapat dimanfaatkan dalam pembuatan pupuk mejemuk (SP-15) yang selaras dengan ISO 59020. Dengan limbah fly ash termanfaatkan sebesar 684,02 ton/tahun atau 5,77% dari rata – rata jumlah limbah fly ash per tahun. Terlihat penggunaan ini sangat kecil, sehingga membutuhkan penanganan lebih lanjut untuk memanfaatkan jumlah limbah yang ada. PT. Petrokimia Gresik juga sudah memanfaatkan limbah fly ash dan bottom ash ssebagai filler pada pupuk NPK sebanyak 500 ton/tahun, sehingga sisa limbah yang ada selanjutnya dimanfaatkan untuk hal tersebut.

Selanjutnya banyaknya limbah bottom ash yang dapat dimanfaatkan yaitu 684,02 ton/tahun atau 39,40% dari rata – rata jumlah limbah bottom ash per tahun, hal ini menunjukkan bahwa limbah bottom ash yang digunakan dapat memberikan dampak untuk mengurangi biaya penanganan limbah. Untuk

Petrokimia Gresik yaitu hardness minimum 1 kg/butir dan kadar air maksimum 3%, tetapi masih kurang untuk memuni standar pupuk skala pabrik yaitu minimal 2 kg/butir.

penanganan limbah yang mahal karena melibatkan pihak ke 3. Selanjutnya prinsip ekonomi sirkular yang digunakan sejalan dengan ISO 59004 tahun 2024 yang menekankan eliminasi limbah dan pemanfaatan kembali meterial dalam proses produksi atau menjaga material tetap dalam proses produksi (keep materials in use).

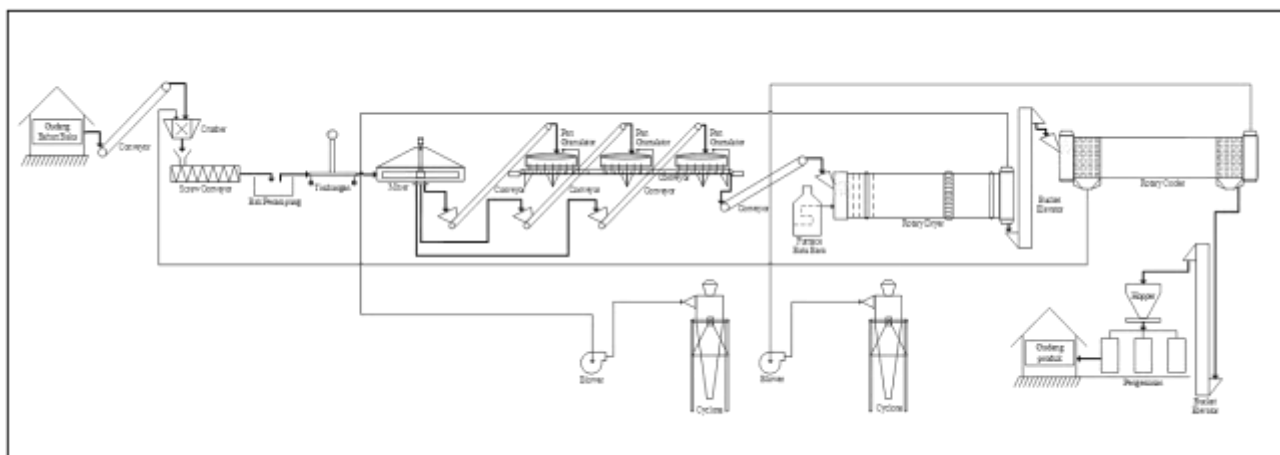
sludge WWT yang tidak termanfaatkan karena formulasi yang paling optimal adalah formulasi yang tidak melibatkan sludge WWT, sehingga sludge WWT akan diolah sesuai dengan peraturan dan izin yang berlaku yaitu dengan pengolahan di WWTP (wastewater treatment plant) komunal yang dapat mengolah keseluruhan limbah cair yang dihasilkan.

Kemudian untuk neutralized crude gypsum (NCG) banyaknya limbah yang dapat dimanfaatkan yaitu 1.368,04 ton/tahun atau 0,79% dari rata – rata jumlah limbah NCG per tahun. Produk NCG juga dapat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan bata ringan dan plasterboard. Selanjutnya sludge endapan asam fosfat (sludge ROP) banyaknya limbah yang dapat dimanfaatkan yaitu 7.263,93 ton/tahun atau 44,97% dari rata – rata jumlah limbah sludge ROP per tahun . Sisa sludge ROP yang belum termanfaatkan sebagai pupuk SP-15 dapat

menjadi potensi bahan baku alternatif pada produksi pupuk Phosgreen, dimana pada penelitian Hariyanto (2026) menjelaskan bahwa pemanfaatan ROP sludge menjadi pilihan yang layak secara teknis dan ekonomis, dalam upaya meningkatkan efisiensi biaya serta menjaga keberlanjutan proses produksi pupuk Phosgreen [24].

4.10. Pengaplikasian Formulasi Paling Optimal Pada Pabrik Pupuk Phonska Alam

Dengan terpilihnya formulasi pupuk majemuk (SP-15) yang paling terbaik yaitu variasi 14, maka variasi 14 akan direncanakan untuk pembuatan skala pabrik di pabrik pupuk phonska alam. Pemilihan pabrik ini didasarkan pada proses yang dipakai di dalam pabrik memiliki kesamaan dengan skala laboratorium, yaitu masih menggunakan pan granulator dengan ukuran yang lebih besar dengan diameter pan granulator 3 meter. Dimana flowsheet proses pembuatan pupuk majemuk (SP-15) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowsheet pembuatan pupuk majemuk (SP-15) skala pabrik

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembuatan pupuk majemuk (SP-15) dengan optimalisasi pemanfaatan limbah sebagai bahan baku, dapat disimpulkan bahwa kualitas pupuk majemuk (SP-15) yang dihasilkan pada 14 formulasi yang dibuat dengan memvariasikan masing – masing bahan baku mempengaruhi kualitas pupuk yang dihasilkan. Kandungan kimia dari pupuk yang dihasilkan untuk kadar fosfat (P_2O_5) seringkali lebih tinggi dari target yang sudah ditentukan dengan perhitungan consumption rate, hal ini dapat terjadi akibat faktor kandungan bahan baku yang merupakan limbah, seringkali kandungan fosfat tidaklah merata. Dengan demikian, pengujian awal bahan baku merupakan faktor utama agar target kandungan fosfat yang dihasilkan sesuai dengan batas rentang yang diharapkan

Formulasi yang paling optimal yang dapat dibuat dalam pembuatan pupuk majemuk (SP-15) adalah variasi 14 dengan massa sludge ROP sebesar 308,742 gram, massa FABA sebesar 64,976 gram dan massa NCG sebesar 62,855 gram. Dibuktikan dengan evaluasi keseluruhan

karakteristik kimia meliputi kandungan fosfat (P_2O_5) dan kandungan sulfur dan karakteristik fisika dengan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP), dimana variasi 14 dengan kadar fosfat (P_2O_5) sebesar 16,031% dan kadar sulfur 5,622%. Dan karakteristik fisika didapatkan nilai kekuatan menahan beban (hardness) sebesar 1,74 kg/butir, kemampuan higroskopis sebesar 3,28%, kadar air sebesar 0,68%, distribusi ukuran sebesar 65,23% merupakan variasi terbaik dan paling optimal untuk formulasi pupuk majemuk (SP-15)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dan Apresiasi kepada Ibu Ir. Verona Amelia, S.T selaku pembimbing di PT. Petrokimia Gresik, Bapak Dr. Ir. Gatot Kustiyadji, SE., M.Si., IPU., ASEAN Eng., APEC Eng, CRMP selaku pembimbing lapangan dan Ibu Prof. Dr. Lailatul Qadariyah, S.T., M.T., IPM., selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, masukan dan dukungan yang telah diberikan selama proses penelitian. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak terkait atas

kesempatan dan izin yang telah diberikan untuk melakukan penelitian secara langsung, serta rekan – rekan penulis yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Marwah, D. Widyaningrum, dan E. Ismiyah, “Analisi efektivitas pada Conveyor Continuous Ship Unloader I (CSU I) dengan metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) dan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA),” *JUSTI (Jurnal Sistem dan Teknik Industri)*, vol. 3, no. 1, pp. 75–85, 2022.
- [2] A. S. Az Zahra, M. Narulita, Mufid, dan A. Z. Fanani, “Perhitungan neraca massa converter (30-R-1201) pada unit asam sulfat pabrik III B PT Petrokimia Gresik,” *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 7, no. 2, pp. 629–634, 2021, doi: 10.33795/distilat.v7i2.295.
- [3] F. Q. Nada dan I. H. Siregar, “Pengaruh kualitas batu bara terhadap efisiensi boiler unit utilitas batu bara PT Petrokimia Gresik menggunakan metode indirect/heat loss mengacu pada ASME PTC 4,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, pp. 29–38, 2023..
- [4] F. A. Praditya dan R. Novembrianto, “Potensi pemanfaatan limbah endapan asam fosfat dan limbah kapur ZA II sebagai bahan baku pembuatan pupuk SP-15,” *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, vol. 3, no. 1, pp. 115–130, 2025, doi: 10.61132/venus.v3i1.723.
- [5] L. Edahwati dan I. N. Fauziyyah, “Meningkatkan daya saing industri pupuk: Mengubah limbah cair equalizer menjadi sumber daya terbarukan,” *TESME*, vol. 1, no. 1, pp. 56–70, 2024.
- [6] C. Shao, M. Ma, X. Zhu, B. Xing, C. Zhang, D. Du, dan R. Chi, “Phosphogypsum as an industrial byproduct: A critical review on environmental risks, remediation, and resource recovery-circular challenges,” *Process Safety and Environmental Protection*, p. 108456, 2026, doi: 10.1016/j.psep.2026.108456.
- [7] M. Asof, S. Arita, W. Andalia, dan M. Naswir, “Analisis karakteristik, potensi dan pemanfaatan fly ash dan bottom ash PLTU industri pupuk,” *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 28, no. 1, pp. 44–50, 2022.
- [8] A. Verona, A. P. Azhim, H. P. Liliek, D. U. Wahyu, and M. Ibrahim, “Utilization of Fly Ash and Bottom Ash as a Filler in the NPK Plant at Petrokima Gresik Ltd,” 2023, pp. 1112–1116. doi: 10.2991/978-94-6463-008-4_137.
- [9] A. Rismayanti, I. F. Ghovany, K. Sumada, dan S. Muljani, “Studi pupuk phospat granul berbahan limbah padat CaSO_4 dan asam fosfat,” *Chempro*, vol. 3, no. 2, pp. 8–14, 2022.
- [10] H. Pasalari, M. Farzadkia, F. Khosravani, S. Ganachari, dan T. M. Aminabhavi, “Phosphorous recovery from sewage sludge via chemical and thermal technologies,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 496, p. 153869, 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.153869.
- [11] D. Jones dan A. Deuss, *Understanding the Resilience of Fertiliser Markets to Shocks: An Overview of Fertiliser Policies*, OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers, no. 205. Paris, France: OECD Publishing, 2024, doi: 10.1787/cb3a4e5e-en.
- [12] M. P. W. Hardhianti, I. Sebastian, dan Wiratni, “The effect of ammonium sulfate concentrations on the size distributions of NPK-fertilizer granules in a rotating drum granulator,” *Eksergi*, vol. 22, no. 2, pp. 66–71, 2025.
- [13] “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook,” 2008.
- [14] Bagas Chrisma Pratama and Aussie Amalia, “Evaluasi Kandungan Hasil Pengolahan Limbah Cair pada Point L PT. Petrokimia Gresik,” *J. Tek. Mesin, Ind. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. 1, pp. 281–292, Jan. 2024, doi: 10.55606/jtmei.v3i1.3357.
- [15] U. Ayuningtyas, I. M. A. D. Susila, A. L. S. Sihombing, N. A. Sasongko, P. Anggraeni, T. P. A. Nugroho, dan N. T. E. Darmayanti, “Pemanfaatan fly ash dan bottom ash sebagai material konstruksi ramah lingkungan dalam rangka mendukung kriteria bangunan hijau,” *in Proceedings of National Colloquium Research and Community Service*, vol. 6, pp. 51–56, 2022.
- [16] S. U. Dewi dan F. Prasetyo, “Analisa penambahan bottom ash terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton,” *Journal of Infrastructural in Civil Engineering*, vol. 2, no. 02, pp. 31–45, 2021.
- [17] A. Sayyidah Achmad, D. F. Rosariawari, and K. Kunci, “Analisis Dampak Lingkungan pada Proses Produksi Pupuk SP-36 dengan Metode Life Cycle Assesment (LCA),” *” Envirous*, vol. 4, no. 1, pp. 109–116, 2023, doi: 10.33005/envirous.v4i1.160.
- [18] I. M. D. de Souza, W. L. B. Borges, P. H. G. Juliano, V. C. Modesto, V. A. M. Girardi, N. C. de Souza Júnior, dan M. Andreotti, “Methodologies for agricultural gypsum application recommendations in no-tillage systems on tropical sandy soils,” *Agronomy*, vol. 15, no. 2, p. 416, 2025.
- [19] I. Purwanti, “Konsep dan implementasi ekonomi sirkular dalam program bank sampah studi kasus: Keberlanjutan Bank Sampah

- Tanjung,” *AmaNU: Jurnal Manajemen dan Ekonomi*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, 2021.
- [20] U. Sari, S. Rusdiantini, S. Novianti, dan M. Maulidiah, “Ekonomi sirkular dalam industri manufaktur: Strategi untuk mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi,” *Jurnal Ekonomi & Bisnis*, vol. 13, no. 2, pp. 230–239, 2025.
- [21] P. Phansi, J. Chumkate, dan D. Nacapricha, “Determination of total phosphorus content in chemical fertilizer samples using flow injection analysis system,” *Science and Engineering Connect*, vol. 44, no. 2, pp. 225–236, 2021.
- [22] R. Rosmayani dan R. Kurniawan, “Pengaruh komposisi phosphate rock terhadap produk gypsum hemihydrate pada digester unit asam fosfat,” dalam *e-Proceeding FTI*, 2021.
- [23] O. P. Narayan, P. Kumar, B. Yadav, M. Dua, dan A. K. Johri, “Sulfur nutrition and its role in plant growth and development,” *Plant Signaling & Behavior*, vol. 18, no. 1, p. 2030082, 2023, doi: 10.1080/15592324.2022.2030082.
- [24] I. Hariyanto dan E. Suryani, “Pemilihan alternatif bahan baku dengan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) untuk minimasi biaya produksi pupuk Phosgreen,” *Jurnal Impresi Indonesia*, vol. 5, no. 3, pp. 1132–1150, 2026.