

Pemilihan Jenis Reaktor pada Proses *Mixed Acid Route* di Pabrik Pupuk NPK

Annisa Ridha Nahara, Aghin Asrofi Mustafa, dan Daril Ridho Zuchrillah
Departemen Teknik Kimia Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: aghinasrofi@gmail.com

Abstrak—Seiring bertambahnya populasi negara, demikian pula jumlah kebutuhan pangan di dalam maupun luar negeri. Pertanian menjadi sektor yang sangat penting bagi negara agraris dalam menyediakan bahan pangan. Pertanian sangat erat hubungannya dengan media tanam. Media tanam yang optimal akan membantu tanaman dalam menghasilkan produk yang berkualitas dan mampu menghasilkan jumlah banyak. Beberapa hal yang dibutuhkan oleh media tanam agar optimal adalah perairan yang lancar, penyiangan, dan pemupukan. Pupuk mengambil peran penting sebagai penyedia unsur karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, kalium, kalsium, magnesium, dan unsur-unsur lain yang dibutuhkan tanaman agar tumbuh subur. Unsur N, P, dan K dapat didapatkan dari pupuk NPK. Pupuk NPK berbahan dasar NH_3 , H_2SO_4 , dan H_3PO_4 serta bahan padat lain seperti KCl, Urea, ZA, MAP, dan DAP. Senyawa NH_3 , H_2SO_4 , dan H_3PO_4 berbahan cair akan diolah terlebih dahulu dengan cara merekasikan ketiga senyawa tersebut dalam sebuah alat bernama reaktor *pre-neutralizer*. Suhu ammonia masuk sebesar 5°C , asam sulfat dan asam fosfat sebesar 30°C , sedangkan suhu *slurry* ZA dan MAP sebesar 120°C . Reaksi netralisasi Asam Sulfat menghasilkan *slurry* ZA dengan mole *ratio* N/S 1,8. Reaksi netralisasi selanjutnya yaitu asam fosfat menghasilkan *slurry* MAP dengan mole *ratio* N/P 0,9 dengan tujuan agar *slurry* tidak membubur karena semakin tinggi N/P maka *slurry* akan mengental/membubur sehingga menghambat pemompaan *slurry* ke granulator. Serta pH di jaga 2-3,5 agar tidak mudah kering. Kedua reaksi netralisasi tersebut berlangsung secara simultan. Maka dari itu diperlukan reaktor dalam keadaan *steady state*. Berdasarkan tinjauan kinetika didapatkan reaktor CSTR yang lebih sesuai untuk digunakan dalam proses reaksi netralisasi bila dibandingkan dengan reaktor *plug flow*.

Kata Kunci—Pupuk NPK, Reaksi Netralisasi, Reaktor.

I. PENDAHULUAN

PERTANIAN menjadi sektor yang sangat penting bagi negara agraris guna mencukupi kebutuhan pangan. Dalam mendukung ketahanan pangan dalam negeri, maka perlu tindakan dukungan penuh terhadap sektor pertanian dalam mengembangkan hasil tani. Pertanian sangat erat halnya dengan media tanam. Tanaman tidak akan tumbuh dengan subur apabila tidak ditanam pada media yang sesuai. Pembibitan akan dapat bertumbuh dengan baik bila didukung dengan pemupukan, perairan yang baik, dan juga penyiangan.

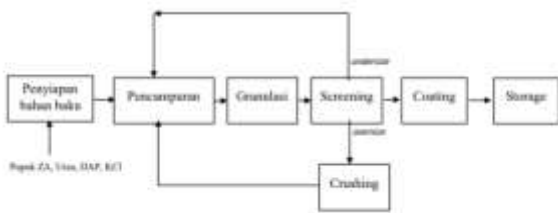
Petani mudah menyimpulkan bahwa pupuk organik tidak cukup membantu dalam menghasilkan hasil panen dengan jumlah banyak sedangkan manfaat dari penggunaan pupuk organik akan terlihat secara sistem seperti memperbaiki kesuburan tanah, biologi tanah, dan fisik tanah [1]. Dominasi pemilihan pupuk anorganik yang digunakan petani mulai dari pupuk tunggal maupun pupuk majemuk karena memiliki kapasitas hasil tani yang cukup besar serta kandungan yang lebih tinggi, tetapi penggunaan secara berlebih akan menurunkan produksi tanaman.

Pupuk adalah tambahan nutrisi yang diberikan pada media tanam dengan tujuan yang beragam. Salah satu tujuan yaitu agar pertumbuhan dan produktivitas tanaman menjadi optimal, maka dibutuhkan nutrisi dari beberapa unsur, antar lain N, P, K, H, C, O, Mg, Ca dan unsur lainnya. Unsur N, P, dan K sangat diperlukan oleh tanaman. Pemberian ketiga unsur tersebut dapat dilakukan secara bersamaan ataupun terpisah. Unsur N dapat diberikan secara terpisah dengan penambahan cairan amoniak (NH_3) ataupun pupuk jenis urea ($\text{CO}_2(\text{NH}_2)_2$). Pemberian unsur P dapat dilakukan dengan pemberian pupuk NSP (*normal superphosphate*) ataupun pupuk TSP (*triple superphosphate*). Pemberian unsur K dapat melalui pemberian pupuk MOP (*Muriate of Potash*).

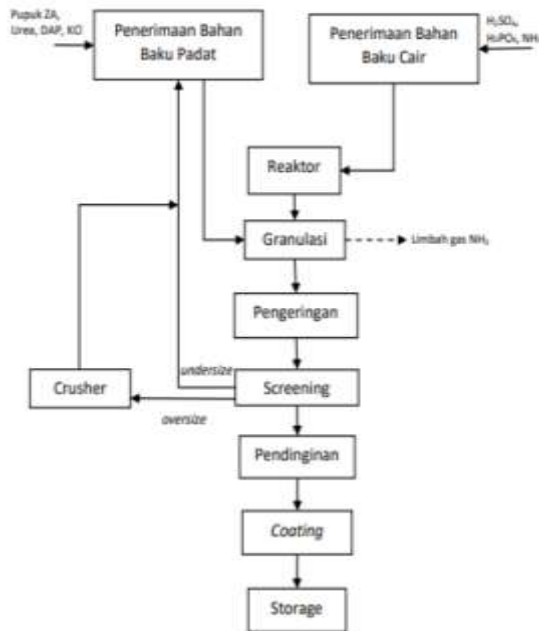
Jumlah unsur N atau nitrogen di dalam ekosistem tanah, tidaklah banyak. Padahal unsur N merupakan nutrisi utama bagi tanaman. Salah satu contoh pengaruh unsur N atau nitrogen pada tanaman yaitu pada tanaman padi. Unsur nitrogen mempercepat laju pertumbuhan serta meningkatkan kualitas gabah melalui peningkatan jumlah anakan, luas daun yang bertambah, pembentukan gabah, pengisian dan juga sintesis protein. Kekurangan unsur nitrogen pada tanaman padi dapat mengakibatkan jumlah anakan sedikit serta pertumbuhan padi yang terhambat, sehingga padi berbentuk kerdil. Kekurangan unsur nitrogen juga mengakibatkan daun padi berwarna hijau kekuningan hingga daun mulai mati dari bagian ujung dan menjalar ke tengah helai daun. Namun, jumlah unsur nitrogen yang berlebihan pada tanaman juga memiliki dampak *negative*. Contoh akibat unsur nitrogen yang berlebihan pada tanaman yaitu Jerami menjadi lunak, tanaman mudah rebah serta kualitas tanaman yang akan menurun [2].

Pupuk NPK sebagai salah satu pupuk dengan peran penting dijadikan pupuk bersubsidi oleh pemerintah Indonesia dalam upaya peningkatan hasil tani. Kandungan pupuk NPK didapatkan dari percampuran beberapa senyawa hingga membentuk senyawa baru. Beberapa senyawa yang dibutuhkan agar terbentuk butiran pupuk NPK didapat dari dua bahan berfase cair dan padat yang akan berlangsung dalam sebuah alat granulator. Sebelum senyawa NH_3 , H_3PO_4 , dan H_2SO_4 dibawa ke alat granulator, ketiga senyawa tersebut melalui *pre-treatment* bahan di alat reaktor *Pre-Neutralizer*. Proses reaksi ini menjadi proses utama terbentuknya pupuk NPK. Peran penting keberhasilan proses reaksi ini yang akan menentukan banyaknya konsentrasi kandungan pada pupuk NPK.

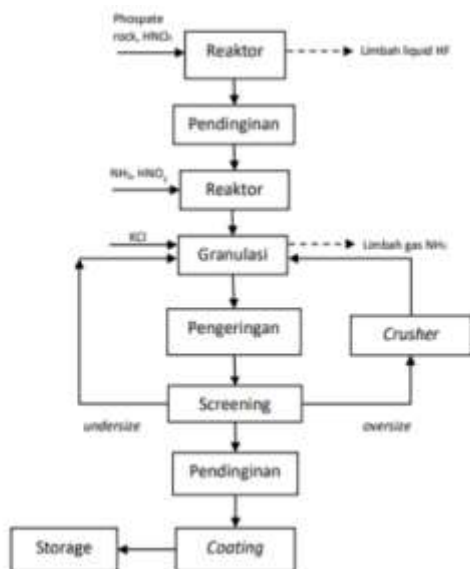
Secara umum tahapan produksi pupuk NPK menggunakan metode *Mixed Acid Route* diawali dari reaksi pada reaktor dengan mereaksikan Amonia dan Asam Sulfat serta Asam Fosfat yang menghasilkan *Monoammonium Phosphate* (MAP) Dilanjutkan sintesis *Diammonium Phosphate* (DAP) di granulator, kemudian granulasi MAP, DAP dengan KCl,



Gambar 1. Diagram Proses Bulk Blending.



Gambar 2. Diagram Proses Mixed Acid Route.



Gambar 3. Diagram Proses Nitrophosphate Route.

Urea dan ZA pada granulator. Setelah itu granul NPK dikeringkan di *rotary dryer* dan dilakukan pendinginan pada *cooler* untuk selanjutnya dilakukan pelapisan dan pewarnaan pada proses *coating*.

Reaksi yang terjadi pada reaktor adalah reaksi netralisasi asam sulfat dan asam fosfat oleh ammonia cair. Reaksi netralisasi asam sulfat akan menghasilkan *slurry* Ammonium Sulfat (ZA). Sedangkan reaksi netralisasi asam fosfat

menghasilkan *slurry Monoammonium Phosphate* (MAP). Agar reaksi netralisasi dapat menghasilkan produk secara efisien dan optimal, maka diperlukan adanya proses pemilihan jenis reaktor dimana proses pemilihan ini dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya adalah fase suatu zat, zat pereaksi dan hasil, tipe reaksi dan persamaan laju reaksi, dan kapasitas produksi dan volume reaktor yang dibutuhkan. Reaktor adalah suatu alat proses tempat terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia atau nuklir dan bukan secara fisika. Reaktor kimia adalah segala tempat terjadinya reaksi kimia, baik dalam ukuran kecil seperti tabung reaksi sampai ukuran yang besar seperti reaktor skala industri. Reaktor harus mempertimbangkan efisiensi agar dapat menghasilkan produk lebih banyak, sehingga biaya operasional dapat diminimalisir dan hasil produk maksimal [3].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Ada beberapa metode yang dapat digunakan dalam produksi pupuk NPK. Tiga metode diantaranya, yaitu:

1. Pencampuran secara mekanik (*Bulk blending*).
2. Granulasi secara fisika (*Mixed Acid Route*).
3. Granulasi secara kimia (*Nitrophosphate Route*).

A. Pencampuran Secara Mekanik (*Bulk Blending*)

Proses *bulk blending* dilakukan dengan mencampurkan granul-granul pupuk dalam keadaan kering secara mekanik. Bahan baku terdiri atas padatan yaitu KCl, pupuk Urea, pupuk DAP dan pupuk ZA yang merupakan pupuk jadi. Maka dari itu, metode ini tidak memerlukan alat reaktor. Secara garis besar proses pada metode *bulk blending* cukup sederhana dimulai dari penerimaan komponen bahan baku, pencampuran, granulasi, *screening*, dan *coating*. Bahan baku padat berupa pupuk dengan perbandingan berat yang sesuai dicampur di dalam alat *pug mill*. Kemudian campuran bahan-bahan tersebut dialirkan menuju granulator untuk membentuk padatan halus menjadi granul. Granul pupuk yang sudah terbentuk akan disaring sesuai ukuran yang diinginkan menggunakan *screening*. Granul *undersize* dan *oversize* digunakan kembali bersama dengan bahan baku di dalam *pug mill*. Proses terakhir adalah pelapisan granul pupuk oleh *coating agent* agar pupuk yang bersifat higroskopis tidak rusak saat disimpan di *storage*. Perhatikan Gambar 1.

Dibandingkan metode lainnya, *bulk blending* merupakan metode yang paling sederhana. Pada metode ini secara garis besar adalah proses pencampuran dan tidak dibutuhkan reaksi kimia. Selain itu karena prosesnya tidak rumit, waktu produksinya singkat karena tidak memerlukan banyak alat. Sehingga biaya investasi dari metode ini rendah. Kelemahan metode *Bulk blending* adalah produk pupuk yang dihasilkan kurang merata (homogen) mengingat bahan baku yang digunakan berbentuk solid dan berupa bahan baku jadi. Keunggulan dari *bulk blending* adalah:

1. Mengurangi biaya tenaga kerja.
2. Penanganan penyimpanan dan produksi yang ekonomis.
3. Modal investasi pada unit ini cukup rendah.

Kelemahan dari proses *bulk blending* adalah:

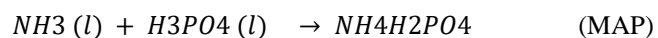
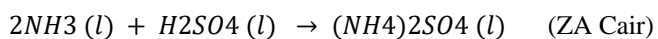
1. Pencampuran sering tidak merata karena semua bahan baku yang dicampur sesuai kebutuhan adalah berbentuk granul.

2. Bila bahan baku yang dihasilkan bersifat higroskopis, maka bahan baku akan meleleh di udara terbuka, lalu menguap, dan hilang percuma dalam penyimpanan.

B. Granulasi secara Fisika (Mixed Acid Route)

Mixed Acid Route merupakan salah satu metode produksi pupuk NPK yang terdiri atas proses reaksi dan proses pencampuran. Secara garis besar metode ini terdiri atas mereaksikan bahan baku cair sehingga menghasilkan *slurry*, dan kemudian *slurry* akan dicampurkan dengan bahan baku padat.

Bahan baku terdiri atas bahan baku cair dan bahan baku padat. Bahan baku padat pada metode ini yaitu KCl, pupuk urea, dan pupuk ZA yang masing-masing ditampung di dalam *hopper* kemudian dicampur dengan hasil dari *recycle product* di alat *granulator*. Bahan-bahan baku cair terdiri atas asam fosfat dan asam sulfat yang keduanya dinetralisasi menggunakan amoniak cair. Reaksi netralisasi dilakukan di dalam reaktor *pre-neutralize* yang direaksikan menggunakan reaktor *pre-neutralizer* dengan kondisi operasi suhu sekitar 120°C. Bahan baku cair asam fosfat dan asam sulfat dimasukkan dari bagian atas reaktor, sedangkan amoniak cair dimasukkan dari bagian bawah reaktor agar menghindari adanya *knocking* pada pipa dan reaktor. Reaksi ini menghasilkan asam sulfat cair dan juga *slurry* MAP. Pembentukan *slurry* diatur dengan mempertahankan rasio N dibanding P berkisar antar 0,6 hingga 0,9. Reaksi netralisasi yang menghasilkan asam sulfat (ZA) cair dan juga *slurry* monoammonium fosfat (MAP) seperti Berikut:



Kemudian *slurry* yang terbentuk akan dicampur dengan bahan baku padat serta *recycled product* di dalam *granulator*. Hingga menghasilkan granul basah, yaitu kandungan kadar air mencapai 2,5% Kemudian granul tersebut diumpan ke arah bawah (gravitasi) ke dalam *rotary dryer* untuk mengurangi kandungan kadar air pada granul hingga mencapai 1%. Granul kering hasil proses pengeringan kemudian disaring menggunakan ayakan (*screen*) untuk memisahkan produk dengan ukuran yang dikehendaki yaitu 4 sampai 10 mesh. Produk dengan ukuran yang tidak sesuai, terlalu besar (*oversize*) dan terlalu kecil (*undersize*), selanjutnya akan digunakan sebagai *recycle product*. Produk dengan ukuran yang sesuai kemudian didinginkan menggunakan *cooler* agar suhu produk tidak terlalu tinggi saat proses pelapisan. Pendinginan produk menggunakan udara kering dengan suhu yang rendah. Suhu yang terlalu tinggi pada produk dapat menyebabkan *caking* atau penggumpalan, sehingga proses pelapisan tidak optimal. Pelapisan produk dilakukan dalam alat *coating rotary drum*. Bahan yang digunakan untuk pelapisan yaitu *coating oil* dan juga *coting agent*. Setelah dilapisi, produk dikemas dan kemudian disimpan di penyimpanan. Tujuan dari pelapisan adalah menjaga kualitas produk yang bersifat higroskopis agar tidak rusak saat disimpan di tempat yang lembap. Pada Gambar 2 adalah bagan proses dari metode *mixed acid route*. Keunggulan dari *mixed acid route* adalah:

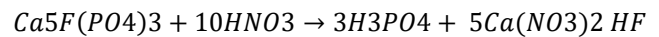
1. Kualitas produk yang homogen baik.
2. Biaya perawatan alat kecil dibandingkan *Nitrophosphate Route*.

Kelemahan dari proses *mixed acid route* adalah:

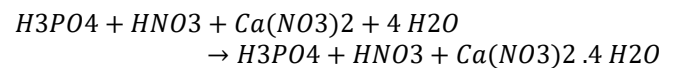
1. Biaya bahan baku asam fosfat yang cukup mahal dibandingkan batuan fosfat.
2. Bila dibandingkan dengan *bulk blending*, terdapat limbah berupa gas.

C. Nitrophosphate Route

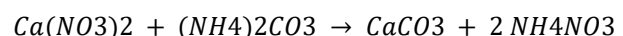
Proses pertama yang digunakan dalam metode ini adalah batuan fosfat diasamkan dengan asam nitrat hingga menghasilkan asam fosfat dan kalsium nitrat. Proses ini tidak menghasilkan limbah padat dan juga limbah emisi gas. Limbah cair yang dihasilkan juga minimal. Reaksi pengasaman yang terjadi sebagai berikut:



Namun proses pengasaman ini menghasilkan beberapa senyawa *volatile* yaitu karbon dioksida, *hydrogen fluoride* dan gas nitrous. Hasil senyawa-senyawa *volatile* tersebut tergantung pada batuan fosfat yang digunakan. Asam Fosfat yang dihasilkan kemudian digunakan untuk produksi P_2O_5 . Kristal-kristal akan dihasilkan dari pendinginan *calcium nitrate tetrahydrate* (CNTH) dengan reaksi sebagai berikut:



Asam *nitrophosphoric* yaitu asam dengan kandungan asam fosfat cair, serta sisa-sisa dari asam nitrat dan kalsium nitrat. Penyaringan dilakukan pada kristal CNTH sehingga memisahkan asam *nitrophosphoric*. Asam *nitrophosphoric* tersebut perlu melalui proses penetralan oleh campuran amoniak dan garam kalium/magnesium, sulfat dan/atau mikronutrisi. Setelah penetralan Asam *nitrophosphoric* diproses lebih lanjut dalam proses granulasi untuk mendapatkan pupuk majemuk padat dengan kandungan unsur N. Kemudian pemisahan kristal kalsium nitrat dengan melarutkannya dalam amonium nitrat dan amonium karbonat, seperti reaksi berikut:



Setelah itu dilakukan penyaringan kristal kalsium karbonat yang berfungsi untuk produksi kalsium granular pupuk ammonium nitrat. Hasil samping dari proses inilah yang digunakan untuk produksi pupuk NPK, yaitu larutan ammonium nitrat dengan cara menyalurkan larutan tersebut dan diuapkan untuk mendapatkan pupuk padat.

Dibandingkan metode lainnya, *Nitrophosphate Route* merupakan metode paling rumit. Metode ini membutuhkan bahan baku dan reaksi kimia yang banyak sehingga proses lebih panjang dan membutuhkan alat yang lebih banyak. Produk yang dihasilkan relatif paling homogen dari pada metode lain karena proses dilakukan dari bahan baku yang benar-benar diolah dari awal. Karena proses produksi yang panjang dan kebutuhan alat yang banyak. Untuk diagram proses *Nitrophosphate Route*, perhatikan Gambar 3.

Berdasarkan uraian tiga metode yang ada, berikut perbandingan proses dinilai dari aspek teknis, ekonomi dan lingkungan, seperti pada Tabel 1.

Untuk seleksi proses produksi, digunakan pembobotan pada setiap aspek yaitu aspek teknik (62%), aspek ekonomi (23%) dan aspek lingkungan (15%). Pembobotan ini dilakukan untuk menemukan metode yang paling sesuai agar

Tabel 1.
Seleksi Proses Pembuatan Pupuk NPK

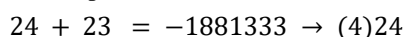
Parameter	Jenis Proses		
	<i>Bulk Blending</i>	<i>Mixed Acid Route</i>	<i>Nitrophosphate Route</i>
Aspek Teknis			
Waktu Produksi	Singkat	Sedang	Panjang
Metode Produksi	Mudah	Sedang	Tinggi
Bahan Baku	Urea, ZA, KCl	Urea, Asam fosfat, ZA, KCl, Asam sulfat dan Amoniak	Batuan Fosfat
Kondisi Operasi	Suhu: 120 °C	Suhu: 120-125 °C	Suhu: 150-180 °C
	Tekanan: 1 atm pH: 1-2	Tekanan : 1 atm pH: 1-2	Tekanan: 1,48 atm pH: 5
Keseragaman Produk	Rendah	Tinggi	Tinggi
Aspek Ekonomi			
Investasi	Rendah	Tinggi	Tinggi
Biaya Operasi	Rendah	Sedang	Sedang
Aspek Lingkungan			
Limbah	Tidak ada	Limbah gas	Limbah gas dan <i>liquid</i>

produk yang dihasilkan sebaik mungkin. Dengan kualitas produk yang baik maka konsumen akan merasa puas dan melakukan pembelian ulang serta menambah konsumen-konsumen baru. Sehingga produsen akan mendapatkan keuntungan yang lebih banyak akibat angka penjualan yang tinggi. Di sisi lain, penempatan aspek lingkungan di prioritas terakhir dikarenakan limbah yang dihasilkan dapat diolah kembali menjadi produk lain. Hasil pembobotan yang dilakukan pada seleksi proses adalah proses *Mixed Acid Route* dipilih sebagai proses produksi yang paling sesuai untuk digunakan. Pemilihan proses tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa proses ini memiliki nilai pembobotan tertinggi dan juga 2 kelebihan proses yaitu waktu produksi yang cukup singkat serta kualitas produk pupuk NPK yang baik. Selain itu pada proses ini juga terdapat *recycle* pada limbah padat yang menguntungkan.

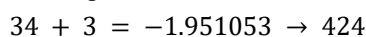
Secara umum tahapan pembuatan pupuk NPK dengan metode *Mixed Acid Route* dimulai dari reaksi pembuatan *Monoammonium Phosphate* (MAP) pada reaktor dengan mereaksikan Amonia dan Asam Sulfat serta Asam Fosfat. Dilanjutkan sintesis *Diammonium Phosphate* (DAP) di granulator, kemudian granulasi MAP, DAP dengan KCl, Urea dan ZA pada granulator. Setelah itu granul NPK dikeringkan di *rotary dryer* dan dilakukan pendinginan pada *cooler* untuk selanjutnya dilakukan pelapisan dan pewarnaan pada proses *coating*. Reaksi yang terjadi pada reaktor adalah reaksi netralisasi asam sulfat dan asam fosfat oleh ammonia cair. Reaksi netralisasi asam sulfat akan menghasilkan *slurry Ammonium Sulfat* (ZA).

Sedangkan reaksi netralisasi asam fosfat menghasilkan *slurry Monoammonium Phosphate* (MAP).

1. Reaksi pembentukan *Ammonium Phosphat*



2. Reaksi pembentukan *Monoammonium Phosphat* (MAP)



Kedua reaksi bersifat eksotermis. Dimana untuk produk keluaran NPK 33.333 kg/jam, panas reaksi 1 sebesar 1881333 kkal dan panas reaksi 2 sebesar 1951053 kkal. Suhu ammonia masuk sebesar 5°C, asam sulfat dan asam fosfat sebesar 30°C, sedangkan suhu *slurry ZA* dan MAP sebesar 120°C. Reaksi netralisasi Asam Sulfat menghasilkan *slurry ZA* dengan mole *ratio* N/S 1,8. Reaksi netralisasi selanjutnya yaitu asam fosfat menghasilkan *slurry MAP* dengan mole

ratio N/P 0,9 dengan tujuan agar *slurry* tidak membubur karena semakin tinggi N/P maka *slurry* akan mengental atau membubur sehingga menghambat pemompaan *slurry* ke *granulator*. Serta pH di jaga 2 - 3,5 agar tidak mudah kering. Kedua reaksi netralisasi tersebut berlangsung secara simultan. Maka dari itu diperlukan reaktor dalam keadaan *steady state*. Agar reaksi netralisasi dapat menghasilkan produk secara efisien dan optimal, maka diperlukan adanya proses pemilihan jenis reaktor dimana proses pemilihan ini dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya adalah fase suatu zat, zat pereaksi dan hasil, tipe reaksi dan persamaan laju reaksi, dan kapasitas produksi dan volume reaktor yang dibutuhkan.

Reaktor adalah alat yang menjadi tempat bagi suatu reaksi berlangsung. Reaksi yang berlangsung dapat berupa reaksi kimia ataupun reaksi nuklir, namun bukan reaksi fisika. Reaktor kimia adalah segala tempat terjadinya reaksi kimia, baik dalam ukuran kecil seperti tabung reaksi sampai ukuran yang besar seperti reaktor skala industri. Reaktor harus mempertimbangkan efisiensi agar dapat menghasilkan produk lebih banyak, sehingga biaya operasional dapat diminimalisir dan hasil produk maksimal [3].

Dua jenis reaktor yang paling umum digunakan untuk perekasian kimia dalam kondisi tunak (*steady state*) adalah *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) dan *Plug Flow Reactor* (PFR) [4]. Kedua jenis reaktor tersebut memiliki perbedaan yaitu konsentrasi dari komponen-komponen yang bereaksi. Untuk jenis reaktor CSTR yang memiliki pengaduk, maka reaksi dan pengadukan dianggap sempurna sehingga konsentrasi komponen di dalam reaktor menjadi seragam. Jenis reaktor CSTR sering digunakan untuk reaksi homogen antara komponen *liquid-liquid*, dengan katalis fase cair pula [4].

Reaktor CSTR merupakan tempat terjadinya reaksi kimia yang berlangsung secara berkelanjutan atau kontinyu. Pada industri berskala besar, penggunaan reaktor CSTR lebih sering diaplikasikan karena memiliki kelebihan yang dapat diatur kapasitas reaktor. Reaktor CSTR beroperasi pada kondisi tunak dan mudah dalam mengendalikan suhu operasi. Waktu tinggal dari reaktan dipengaruhi oleh laju alir (debit) umpan reaktan dan laju alir (debit) produk. Hal ini menyebabkan waktu tinggal di dalam reaktor yang terbatas, sehingga konversi reaktan per volume reaktor sulit mencapai nilai yang tinggi. Maka dari itu, diperlukan reaktor dengan

volume yang sangat besar sehingga nilai konversi dapat mencapai nilai yang diharapkan.

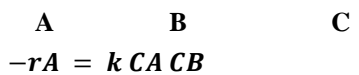
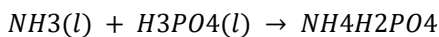
Reaktor CSTR memiliki mekanisme kerja dengan cara mengumpukan reaktan dan bahan baku secara bersamaan ke dalam reaktor, kemudian pengaduk akan bekerja sehingga reaksi terjadi dan dapat menghasilkan produk. Agar pengadukan sempurna dan reaksi dapat berlangsung optimal, maka pengaduk pada reaktor CSTR juga dirancang sesuai dengan bahan baku dan reaktan yang akan diaduk. Biasanya untuk mendapatkan konversi yang besar maka reaktor disusun secara seri akan dilengkapi dengan pemanas. Reaktor berpengaduk sebenarnya sama dengan reaktor *batch* namun yang membedakan adalah pada reaktor ini dilengkapi dengan pengaduk [5].

III. PETUNJUK TAMBAHAN

Dalam efisiensi dan optimasi proses ini akan melakukan pemilihan alat reaktor netralisasi yang didasarkan pada peninjauan kinetika.

A. Pembentukan $NH_4H_2PO_4$

Konstanta kecepatan reaksi ditentukan berdasarkan teori tumbukan, dengan persamaan reaksi:



Menurut Levenspiel, untuk tumbukan molekul NH_3 dan molekul H_3PO_4 dapat dihitung dengan persamaan [6]:

$$Z_{AB} = \left(\frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} \right)^2 \frac{N^2}{10^6} \left(8\pi k_b T \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right) \right)^{0,5} C_A C_B$$

Dimana:

1. Z_A = Jumlah tumbukan per satuan volume per satuan waktu.
2. N = $6,023 \times 10^{23}$ molekul/mol.
3. σ = Diameter molekul, cm.
4. M = Berat molekul / N , massa molekul, gram.
5. C = Konsentrasi, mol/liter.
6. k = $1,30 \times 10^{-16}$ erg/K.
7. $F_C = \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$

Dimana:

1. E = Energi aktivasi.
2. F_c = Fraksi tumbukan yang mempunyai energi yang lebih besar dari E minimum.
3. T = Suhu Abs.
4. R = Konstanta gas ideal.

Persamaan kecepatan reaksi:

$$\begin{aligned} -r_A &= -\frac{1}{v} \frac{dN_A}{dt} = k C_A C_B \\ &= \left(\frac{\text{kecepatan tumbukan}}{\frac{\text{mol}}{\text{liter} \cdot \text{detik}}} \right) C_A C_B \end{aligned}$$

$$-r_A = Z_{AB} \frac{1000}{N} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Sehingga,

$$-r_A = \left(\frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} \right)^2 \frac{N}{10000} \left(8\pi k_b T \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right) \right)^{0,5} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Konstanta kecepatan reaksi:

$$K = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

Energi aktivasi (E_a):

$$E_a = (\Delta H^* - RT)$$

ΔH^* didekati dengan energi ikatan reaksi [7].

B. Perhitungan Neraca Massa

Rumus perhitungan neraca massa, diberikan sebagai berikut:

$$\text{Input rate} - \text{Output rate} - \text{Reaction rate} = \text{Accum. rate}$$

Dengan rumus persamaan Laju Reaksi ($-r_B$):

$$-r_B = k_1 C_A C_B$$

$$-r_B = k_1 (C_{A0} - B_{B0} X_B) (C_{B0} - C_{B0} X_B)$$

$$-r_B = k_1 C_{B0} (M - X_B) C_{B0} (1 - X_B)$$

Keterangan :

1. F_{AO} = Kecepatan mol NH_3 masuk (kmol/jam)
2. F_A = Kecepatan mol MAP keluar (kmol/jam)
3. r_A = Laju Reaksi (kmol/m³ jam)
4. V_L = Volume Cairan (m³)

Selanjutnya, untuk menghitung Reaktor Alir Tanki Berpengaduk (RATB):

$$\begin{aligned} \text{Akumulasi} &= \text{kecepatan massa masuk} \\ &\quad - \text{kecepatan massa keluar} \\ &\quad - \text{kecepatan reaksi} \end{aligned}$$

Pada keadaan *steady state* ~ Akumulasi = 0

$$F_{B0} - F_B - (-r_B)V_L = 0$$

$$F_V C_{B0} - F_V (C_{B0} - C_{B0} X_B) - (-r_B)V_L = 0$$

$$F_V C_{B0} - F_V C_{B0} (1 - X_B) - (-r_B)V_L = 0$$

$$F_V C_{B0} - F_V C_{B0} + F_V C_{B0} X_B - (-r_B)V_L = 0$$

$$F_V C_{B0} X_B = (-r_B)V_L$$

Dimana waktu tinggalnya, yaitu:

$$\frac{V_L}{F_L}$$

Sehingga menjadi,

$$\frac{V_L}{F_L} = \frac{C_{B0} X_B}{r_B}$$

Maka volume reaktor dirancang *over design* 10%:

$$V_R = (100\% + 10\%) \times V_L$$

$$V_R = 110\% \times V_L$$

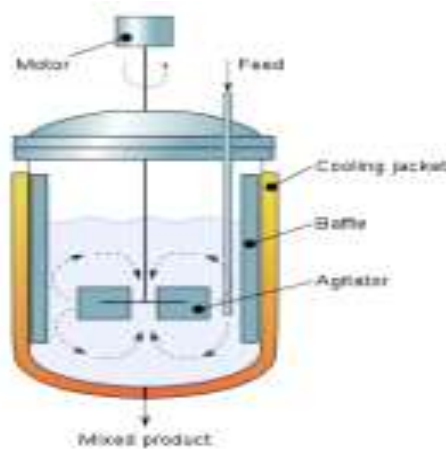
Menghitung Reaktor Alir Pipa (RAP):

$$P_O \cdot q_O = F_{to} \times R \times T_o$$

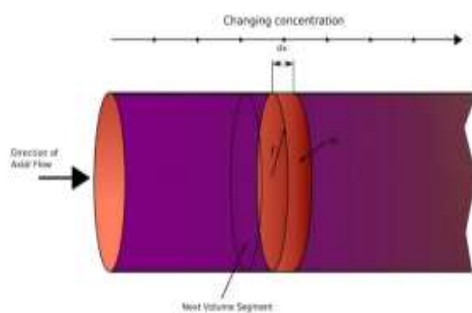
$$P_O \cdot q_O = (F_{A0} + F_{B0}) R T_o$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Reaktor CSTR merupakan tangki berpengaduk dengan dilengkapi beberapa instrumen lain seperti termometer. Tangki reaktor CSTR dilengkapi dengan mantel yang berisi



Gambar 4. Reaktor CSTR.



Gambar 5. Ilustrasi Aliran PFR.

air pendingin apabila kondisi reaktor eksotermis. Bentuknya hampir sama dengan tangki penyimpanan pada umumnya yakni dilengkapi dengan dinding dan tutup alas serta tutup atas. Desain tangki harus disesuaikan dengan kondisi fluida, viskositas fluida, massa jenis fluida dan volume fluida yang akan direaksikan dalam reaktor CSTR. Perhatikan Gambar 4.

Kondisi di dalam reaktor SCTR adalah seragam dan hal ini sesuai dengan Levenspiel sehingga perhitungan komposisi umpan atau *feed* dapat dihitung seragam secara keseluruhan [6].

Perhatikan kembali persamaan input = output + massa hilang dalam reaksi + akumulasi = 0. Persamaan tersebut kemudian dituliskan kembali sebagai:

$$V = \frac{\Delta X_A F_{AO}}{-r_A}$$

Dimana:

1. V = Volume reaktor
2. ΔX_A = Konversi komponen A keluar reaktor
3. F_{AO} = Laju alir molar komponen A
4. F_A = Laju alir molar komponen A keluar reaktor
5. $-r_A$ = Kecepatan reaksi

Sedangkan untuk persamaan kinerja reaksi orde pertama yang didapatkan dari turunan persamaan volume dan waktu tinggal adalah sebagai berikut:

$$k_\tau = \frac{X_A(1+\varepsilon_A X_A)}{1-X_A}, \text{ untuk setiap } \varepsilon_A$$

Reaktor CSTR memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan yang dapat dijadikan faktor pembanding dalam

pemilihan jenis reaktor. Berikut Kelebihan CSTR menurut Levenspiel [6]:

1. Produk lebih stabil.
2. Kualitas energi meningkat.
3. Campuran cepat merata dan seragam.
4. Suhu dan komposisi campuran dalam reaktor sama.
5. Waktu tinggal dan volume lebih besar.
6. Relatif murah konstruksi.
7. Mudah mengontrol.
8. Perawatan dan pembersihan relatif murah.
9. Dapat digunakan untuk mereaksikan bahan dengan satu jenis fasa.

Sedangkan kekurangan CSTR menurut Levenspiel sebagai berikut [6]:

1. Volumetrik yang rendah menghasilkan produktivitas rendah.
2. Tidak sesuai untuk proses polimerasi.
3. Timbul endapan akibatnya gaya sentrifugal pada CSTR.
4. Waktu menunggu jalannya proses lebih lama.
5. Tidak efisien untuk fasa gas dan reaksi yang bertekanan tinggi.
6. Kecepatan perpindahan panas lebih rendah dibanding PFR.
7. Untuk menghasilkan konversi yang sama, volume yang dibutuhkan CSTR lebih besar dari PFR.

Selain tipe CSTR, reaktor yang umum digunakan di industri adalah tipe PFR. Nama lain dari reaktor aliran sumbat (PFR) adalah reaktor tubular aliran ideal, di mana cairan dicampur dalam aliran profil datar (aliran plug). Diasumsikan bahwa kecepatan fluida hanya merupakan fungsi dari posisi aksial di dalam tabung dan memiliki kecepatan yang sama di dalam reaktor tabung. Perilaku ideal PFR mirip dengan aliran sumbat, sehingga waktu tinggal dalam arah aksial dan semua molekul tidak bercampur dalam reaktor adalah sama. Dalam PFR, pencampuran terbalik kadang-kadang dapat terjadi [6].

PFR umumnya digunakan untuk mempelajari beberapa proses penting, seperti aliran gas yang cepat dan reaksi termal dan reaksi kimia plasma di zona katalitik. Dalam beberapa kasus, hasil yang diperoleh tidak hanya membantu kita memahami karakteristik proses kimia, tetapi juga memungkinkan kita memiliki pemahaman praktis tentang proses kimia penting. Dalam PFR, fluida mengalir dengan cara yang sama, sehingga waktu tinggal (τ) semua elemen fluida adalah sama. Cairan serupa yang mengalir melalui reaktor ideal disebut sumbat. Ketika sumbat mengalir di sepanjang PFR, cairan bercampur sepenuhnya dalam arah radial daripada ke arah aksial (depan atau belakang). Setiap colokan memiliki volume yang berbeda-beda [4]. Perhatikan Gambar 5.

PFR adalah reaktor dimana zat cair bekerja dengan kecepatan tinggi dan mengalir melalui suatu tabung (tube) tanpa membentuk arus yang berputar dalam aliran cepat. PFR pada dasarnya sama dengan pipa, dan desainnya relatif mudah. Reaktor biasanya dilengkapi dengan membran untuk meningkatkan hasil produk dalam reaktor.

Dari perspektif selektivitas reaktor, keseimbangan dalam reaktor terus berubah untuk membentuk lebih banyak produk [6]. Biasanya, PFR dilengkapi dengan katalis. Seperti kebanyakan reaksi dalam industri kimia, reaksi ini memerlukan penggunaan katalis pada suhu tertentu. Dalam PFR, satu atau lebih reagen dipompa ke dalam pipa. Reaksi

Tabel 2.
Hasil Perbandingan Volume Reaktor CSTR dengan PFR

No	Jenis Reaktor	Volume (Liter)
1.	CSTR	24.658
2.	PFR	5.421

yang umum digunakan dalam reaktor ini adalah reaksi fasa gas. Reaksi kimia terjadi di sepanjang pipa, sehingga semakin panjang pipa, semakin tinggi tingkat konversi hasil. Dalam reaktor PFR (tubular), proses reaksi berlangsung melalui reaktor, dimana konversi reaktan terbentuk di seluruh reaktor tubular. Namun, tidak mudah untuk meningkatkan tingkat konversi. Laju reaksi awal sangat cepat, tetapi setelah selang panjang tertentu, jumlah reagen akan berkurang. Dengan bertambahnya panjang pipa, kecepatan reaksi akan menjadi lebih lambat dan lebih lambat. Namun, di bawah volume yang sama, tingkat konversi PFR lebih tinggi daripada CSTR [8]. Menurut Levenspiel persamaan neraca komponen di dalam reaktor PFR adalah [6]:

$$Input = 0$$

$$Input = Output + \text{Massa hilang dalam reaksi} + \text{Akumulasi}$$

Persamaan tersebut kemudian dituliskan kembali sebagai:

$$V = F_{AO} \int_{X_{AO}}^{X_A} \frac{dX_A}{-r_A}$$

Dimana:

1. V = Volume Reaktor
2. X_A = Mol akhir A Keluar Reaktor
3. X_{AO} = Mol awal Komponen A
4. F_{AO} = Laju Alir Molar Komponen A

Untuk persamaan *space time* PFR berbeda dengan CSTR karena waktu tinggal reaktan untuk beraksi berada di sepanjang segmen-segmen reaktor maka:

$$\tau = \frac{V}{Q_{VO}}$$

$$\tau = \frac{F_{AO}}{Q_{VO}} \int_0^{X_{AF}} \frac{dX_A}{-r_A} = C_{AO} \int_0^{X_{AF}} \frac{dX_A}{-r_A}$$

Dimana:

1. Q_{VA} = Laju Alir Volumetrik
2. -r_A = Laju Reaksi
3. F_{AO} = Laju Alir Massa Umpan
4. X_A = Konversi Umpan menjadi Produk
5. V = Volume Reaktor

Menurut Levenspiel berikut ini kelebihan PFR [6]:

1. Memberikan volume CSTR yang lebih kecil untuk memperoleh konversi yang sama.
2. Reaktor dapat digunakan untuk operasi skala besar dalam produksi komersial, atau untuk laboratorium.

Menurut Levenspiel berikut adalah kelemahan PFR [6]:

1. Harga alat dan biaya pemasangan tinggi.
2. Butuh waktu lama untuk mencapai keadaan stabil.
3. Dalam kasus reaksi eksotermis, "titik panas" terkadang muncul di titik masuk.
4. Temperatur yang sangat tinggi dalam pipa dapat menyebabkan kemiringan temperatur yang tidak diinginkan.

5. Oleh karena itu, perawatan PFR juga lebih mahal daripada perawatan CSTR.
6. dapat merusak dinding reaktor.

Berdasarkan dasar-dasar teori yang telah dijelaskan, dilakukan pemilihan reaktor yang tepat agar reaksi netralisasi dapat berjalan secara efisien dan optimal. Pertimbangan pertama dilihat dari besarnya volume reaktor yang diperlukan untuk membuat produk pupuk NPK sebanyak 33.333 kg/jam dengan konversi H₃PO₄ diasumsikan sebesar 95%. Hasil perhitungan volume reaktor yang dibutuhkan tertera pada Tabel 2.

Pada hasil perhitungan desain memiliki volume sebesar 24.658 L dengan memiliki *overdesign* sebesar 10% dengan volume sebenarnya sebesar 22.416,53 L pada jenis reaktor CSTR dengan konversi reaksi sebesar 95%. Sedangkan hasil perhitungan desain memiliki volume sebesar 5.421 L dengan memiliki *overdesign* sebesar 10% dengan volume sebenarnya sebesar 4.928,183 L pada jenis reaktor PFR dengan konversi reaksi sebesar 95%.

Hasil dari perhitungan desain memiliki perbedaan yang signifikan antara reaktor dengan jenis CSTR dan PFR yaitu hasil kapasitas volume reaktor jenis CSTR memiliki hasil kapasitas volume lebih besar dibandingkan dengan reaktor jenis PFR.

Hal ini sesuai dengan literatur bahwa dengan nilai konversi reaksi yang sama, volume yang dihasilkan CSTR memiliki hasil kapasitas volume lebih besar dibandingkan dengan reaktor jenis PFR, namun pada CSTR memiliki kecenderungan bahwa semakin kecil konversi yang akan dicapai maka semakin kecil pula volume reaktor yang dibutuhkan [6].

Jika ditinjau dari segi volume reaktor, PFR akan lebih direkomendasi dibanding dengan CSTR, karena semakin kecil volume yang dibutuhkan. Namun perlu dipertimbangkan aspek-aspek lain untuk pemilihan jenis reaktor yang tepat. Seperti dipaparkan di awal, masing-masing CSTR dan PFR memiliki kelebihan dan kekurangan. Ditinjau dari aspek harga, PFR memiliki harga alat dan biaya instalasi yang lebih mahal dibanding CSTR. Selain itu Plug Flow Reactor (PFR) memiliki waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi *steady state*. Reaksi yang berlangsung adalah eksotermis dan PFR sering terjadi *hot spot* pada tempat pemasukan bahan baku [6].

Dari aspek lain, reaktor CSTR memiliki keunggulan dalam pengendalian suhu, dan komposisi campuran dalam reaktor adalah sama dan seragam [6]. Dilihat dari fase bahan yang digunakan dalam proses produksi pupuk NPK yaitu fase cair-cair, reaktor memiliki keunggulan sebagai reaktor model berupa tangki berpengaduk. sempurna di dalam tangki, sehingga konsentrasi dalam reaktor Konsentrasi aliran yang meninggalkan reaktor seragam. CSTR biasanya digunakan dalam reaksi homogen dimana semua bahan baku dan katalis berbentuk cair [4].

Dari hasil pertimbangan yang dilakukan, reaktor jenis CSTR lebih unggul dari segi harga alat dan instalasi, pengendalian suhu, keseragaman komponen, serta kinerja reaktor yang lebih baik untuk fasa cair-cair. Maka dari itu dipilih reaktor jenis CSTR untuk reaksi netralisasi proses pembuatan NPK dengan metode *Mixed Acid*.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Pemilihan reaktor dapat ditinjau dari perhitungan kinetika dengan mempertimbangkan volume tiap reaktor, harga instalasi pemasangan alat, dan lama waktu terjadinya reaksi. Reaktor jenis CSTR lebih sesuai untuk digunakan pada proses *Mixed Acid Route* di pabrik pupuk NPK.

VI. SARAN

Melakukan perhitungan secara tepat pada neraca massa bahan dan dibandingkan dengan perhitungan spesifikasi alat reaktor yang akan digunakan dan meninjau kondisi operasi reaktor, fase fluida yang memasuki reaktor, dan hasil yang diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Hakim, Agustian, and Hermansah, "Pemanfaatan Agen Hayati dalam Budidaya dan Pengomposan *Tithonia diversifolia* Sebagai

Pupuk Alternatif dan Pengendali Erosipada Ultisol," Universitas Andalas, Padang, 2007.

- [2] P. S. Patti, E. Kaya, and C. Silahhooy, "Analisis status Nitrogen tanah dalam kaitannya dengan serapan N oleh tanaman padi sawah di Desa Waimital, Kecamatan Kairatu, Kabupaten Seram bagian Barat," *Agrol. J. Ilmu Budid. Tanam.*, vol. 2, no. 1, pp. 51–58, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.30598/a.v2i1.278>.
- [3] J. M. Smith, *Chemical Engineering Kinetics (McGraw-Hill Chemical Engineering Series) 3rd Edition*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill College, 1981.
- [4] E. B. Nauman, *Chemical Reactor Design, Optimization, and Scale Up*, 1st ed. Troy, New York, United States of America: The McGraw-Hill Companies, 2002.
- [5] N. A. Kundari and D. Marjanto, "Evaluasi unjuk kerja reaktor alir tangki berpengaduk menggunakan perunut radioisotop," *JFN*, vol. 3, no. 1, pp. 44–60, 2009.
- [6] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 1st ed. Singapore: John Wiley and Sons, Inc, 2002.
- [7] Perry, *Chemical Engineering Handbook, 8th*, 8th ed. New York: McGraw Hill, 2008.
- [8] H. Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering, 4th*, 4th ed. Michigan: Prentice Hall Profesional, 2006.