



## Optimisasi sistem poligenerasi air di dalam produksi *etilen glikol* menggunakan *mixed integer nonlinear programming*

**Triana Prihatin**

Akademi Komunitas Industri Pertambangan Bukit Asam

[triana.prihatin@akipba.ac.id](mailto: triana.prihatin@akipba.ac.id)

---

### Info Artikel :

Diterima :

6 Agustus 2023

Disetujui :

11 Agustus 2023

Dipublikasikan :

25 Agustus 2023

---

### ABSTRAK

Meningkatnya konsumsi air tawar di industri dan dampak pembuangan air limbah memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap kehidupan manusia dan sumber daya air dunia. Berbagai pendekatan telah diteliti untuk memberikan solusi terhadap permasalahan tersebut. Sistem poligenerasi merupakan salah satu strategi menjanjikan yang menunjukkan potensi besar bagi kelestarian sumber daya alam, khususnya air, dari sudut pandang energi, lingkungan, dan ekonomi. Penelitian ini menyajikan model sistem poligenerasi berbasis air untuk meminimalkan konsumsi air tawar dan produksi air limbah. Dilakukan kajian berupa superstruktur yang terdiri dari tiga subsistem, yaitu. pembangkit listrik dan panas, sistem sirkulasi ulang air pendingin, dan produksi bahan kimia, dengan pilihan pengolahan air limbah. Studi kasus menggunakan model mixed integer non-linear programming (MINLP) yang merupakan gabungan produksi etilen glikol dan sistem utilitas dikembangkan untuk menunjukkan penerapan model tersebut.

**Kata kunci:** Poligenerasi, Konservasi air, Optimisasi matematis

---

### ABSTRACT

*The increasing of freshwater consumption in industry and the impacts of the wastewater discharges bring enormous pressures on human living and world water resources. Numerous approaches have been investigated to give a solution for that global world problem. Polygeneration system is one of the promising strategies which shows the great potential for natural resource sustainability, particularly water, in view of energy, environment, and economic. This paper presents a model of water-based polygeneration system to minimize the freshwater consumption and the wastewater generation. A superstructure contains three subsystems, i.e. heat and power generations, re-circulating cooling water system, and chemical production, with wastewater treatment options, is introduced. A case study using mixed integer non-linear programming (MINLP) model of a combined of the ethylene glycol production and the utility system is developed to demonstrate the applicability of the model.*

**Keywords :** Polygeneration, water conservation, mathematical optimization



©2022 Penulis. Diterbitkan oleh Arka Institute. Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

---

## PENDAHULUAN

Penggunaan air tawar global telah meningkat enam kali lipat selama 100 tahun terakhir dan terus bertumbuh dengan laju sekitar 1% per tahun sejak tahun 1980an (AQUASTAT, n.d.). Pertumbuhan ini dapat disebabkan oleh pertumbuhan penduduk, pembangunan ekonomi, dan perubahan pola konsumsi. Faktanya, penggunaan air oleh industri, termasuk pembangkit listrik, menyumbang sekitar 19% dari konsumsi air tawar global (UNESCO, 2021). Hal ini menciptakan lebih banyak pengaruh pada sumber daya air tawar akibat dampak pembuangan air limbah. Daripada dipandang sebagai masalah, air limbah harusnya diakui sebagai sumber daya air sehingga dapat meminimalkan konsumsi air tawar dan produksi air limbah dalam industri proses.

Poligenerasi adalah pendekatan terpadu pada proses industri yang menghasilkan banyak produk dari satu atau lebih sumber daya alam, yaitu batubara, gas alam, biomassa, sumber energi terbarukan, dan hybrid (Jana et al., 2017). Dimulai dengan konsep sistem kogenerasi dan trigenerasi (Gao et al., 2008 dan Serra et al., 2009), sistem poligenerasi telah menunjukkan potensi besar dalam melestarikan sumber daya alam khususnya energi dan air, serta menjaga kelestarian lingkungan. Kebanyakan sintesis sistem poligenerasi yang menarik minat para peneliti adalah integrasi pembangkit listrik dan produksi proses kimia. Sebagian besar dari proses tersebut dikembangkan melalui simulasi flowsheet

berdasarkan bahan baku batubara, gas alam, dan biomassa yang berfokus pada evaluasi pabrik yang ada dan teknologi proses, desain konfigurasi proses, serta kinerja dan pengoperasian pabrik.

Sistem poligenerasi berdasarkan batu bara dan gas alam dikembangkan untuk menghasilkan listrik dan methanol (Gao et al., 2008), kemudian Wang et al. (2009) melakukan penelitian tentang sistem poligenerasi produksi asetilena berbasis gas alam yang terintegrasi dengan sel bahan bakar untuk menghasilkan tenaga dan asetilena. Qian et al. (2009) juga mengembangkan sistem poligenerasi berbasis gas alam tetapi menghasilkan listrik dan olefin. Sistem poligenerasi berbasis batubara yang dikombinasikan dengan CO<sub>2</sub> capture juga merupakan solusi yang menarik dan menjanjikan karena manfaatnya terhadap lingkungan (Lin et al., 2011). Studi tentang sistem poligenerasi juga berkembang di banyak sektor dengan mempertimbangkan lebih banyak pilihan bahan baku bahan bakar, seperti pemanfaatan biomassa sebagai co-production bioethanol, panas dan listrik (Song et al., 2011), gasifikasi thermal solar-biomassa (Bai et al., 2014), co-feed batubara dan biomassa (Guo et al., 2015), dan hybrid tenaga matahari-geothermal (Calise et al., 2016).

Kompleksitas integrasi antara sisi produksi listrik dan kimia telah menyebabkan penyelidikan sistem poligenerasi berdasarkan pemrograman matematika untuk menemukan desain yang optimal. Liu et al. (2007) mengembangkan superstruktur dan model pemrograman linier bilangan bulat campuran (MILP) untuk perencanaan investasi sistem poligenerasi metanol dan listrik. Kajian yang lebih rinci mengenai kombinasi teknologi dengan variabel desain dan operasional kemudian dikembangkan dalam model pemrograman nonlinier bilangan bulat campuran (MINLP) (Liu et al., 2009), diterapkan dalam pendekatan optimisasi multi-objektif (Liu et al., 2010a) dan pemrograman stokastik dalam ketidakpastian (Liu et al., 2010b). Dengan menggunakan metode sistematis yang dikembangkan dalam optimisasi matematik, kompleksitas dan masalah waktu komputasi dapat dikurangi.

Terkait sistem poligenerasi berbasis air, kebanyakan studi tentang minimalisasi air hanya berfokus pada poin-poin umum pada heat exchanger network dan terutama dikembangkan untuk prosedur penargetan tetapi tidak termasuk 3R sebagai strategi untuk menghemat pemakaian air. Optimisasi matematis pada sistem poligenerasi yang menggabungkan produksi energi dan air telah dipelajari oleh C-Rubio Maya et al. (2009, 2011a, 2011b) sebagai rincian pengembangan untuk simulasi sistem poligenerasi pada pabrik trigenerasi dan desalinasi. Kemungkinan teknologi yang diwakili oleh model superstruktur dinyatakan sebagai masalah pemrograman matematika. Studi-studi ini hanya memperhitungkan produksi air yang terkait dengan energi, dimana menggunakan panas dan tenaga yang dihasilkan oleh pembangkit listrik untuk air desalinasi. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki sistem poligenerasi berbasis air yang menghasilkan panas dan listrik, air pendingin, dan bahan kimia, dengan menggabungkan strategi 3R (regenerate, reuse, dan recycle) dimana produksi etilen glikol disajikan sebagai studi kasus. Model MINLP dikembangkan melalui superstruktur dan kemungkinan teknologi yang diwakili oleh model superstruktur tersebut dinyatakan sebagai masalah pemrograman matematika.

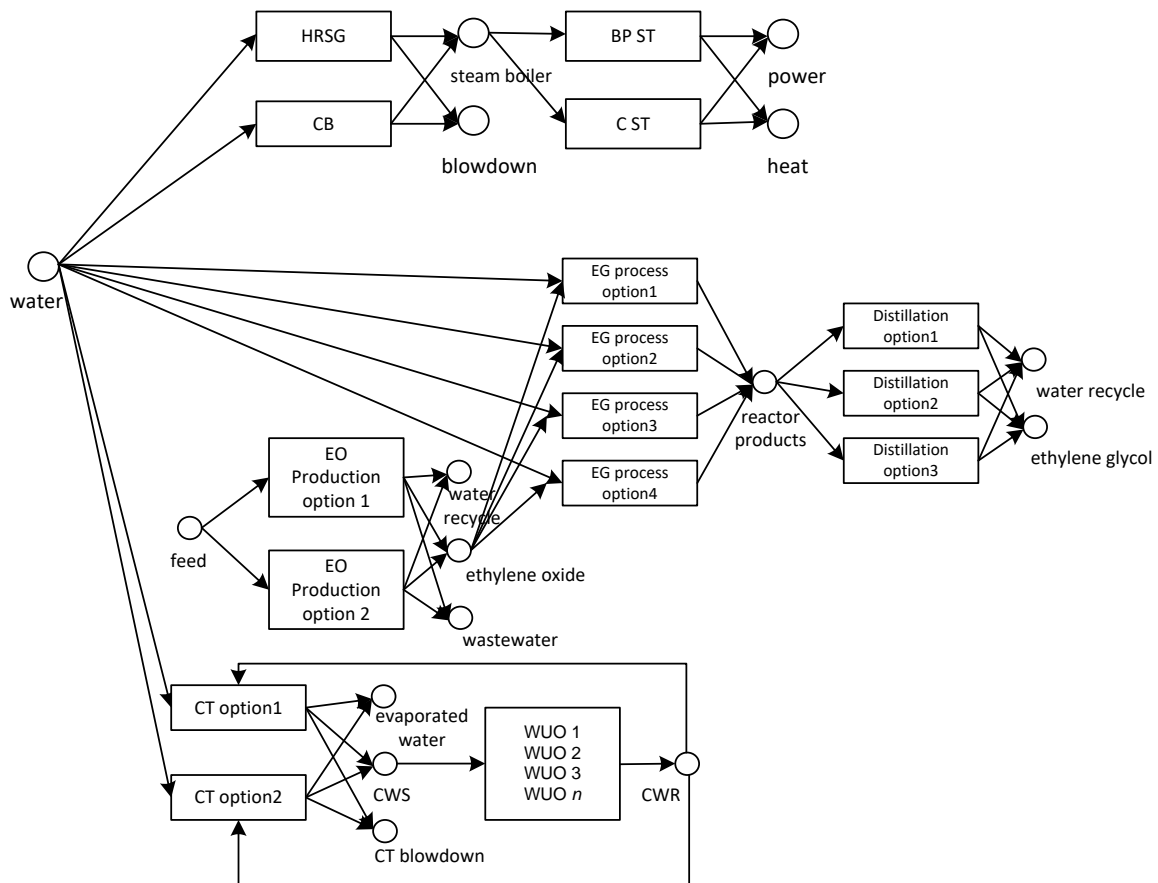
## METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dikembangkan formulasi model komprehensif untuk sintesis dan desain sistem poligenerasi air. Penelitian ini menampilkan representasi superstruktur berdasarkan berbagai alternatif teknologi dan model optimisasi matematis dalam teknik MINLP untuk mencapai optimalitas biaya dan minimalisasi dampak lingkungan. Gagasan tentang superstruktur adalah mempertimbangkan masukan dan keluaran untuk setiap unit. Hal ini dapat membantu untuk mengetahui kemungkinan interaksi yang akan diintegrasikan, misalnya kebutuhan pemanasan dan pendinginan, kebutuhan listrik, konsumsi air, dan pengolahan air limbah. Superstruktur yang diinginkan adalah superstruktur yang menguntungkan.

Dalam penelitian ini dilakukan pendekatan strategi secara simultan (*simultaneous*). Proses optimisasinya adalah untuk dapat meminimalkan konsumsi air tawar dan biaya pengolahan air limbah melalui integrasi strategi pemulihan air (3R: regenerasi, reuse, dan recycle) ke dalam sistem poligenerasi untuk mendapatkan solusi optimal. Permasalahan diawali dengan subsistem gabungan panas dan listrik, sistem air pendingin, dan pabrik kimia. Subsistem ini kemudian diperbaiki dengan penerapan strategi 3R dan diselesaikan secara bersamaan.

Superstruktur untuk pembangkit listrik dan panas, sistem air pendingin, dan produksi Etilen Glikol (EG) diperlihatkan pada Gambar 1. Pada subsistem pembangkit listrik dan panas, superstruktur mencakup pilihan turbin gas atau turbin uap, sementara boiler mencakup boiler konvensional atau *Heat*

Recovery Steam Generator (HRSG) yang memulihkan gas buang dari turbin gas, turbin gas dapat mencakup siklus turbin gas sederhana atau regeneratif, dan turbin uap dapat terdiri dari turbin uap *backpressure* atau kondensasi. Untuk subsistem air pendingin, superstruktur dilengkapi dengan tipe cooling tower, yaitu *forced* dan *induced mechanical draft*. Untuk superstruktur produksi etilen glikol, proses alternatif dan tipe reaktor yaitu tipe pemisahan dan pemurnian diteliti melalui simulasi HYSYS menggunakan persamaan UNIQUAC, dimana sesuai untuk liquid dan dapat diterapkan pada campuran yang mengandung air. Ada dua metode umum produksi etilen glikol, yaitu hidrasi etilen oksida (Kirk-Othmer, 2005) dan teknologi monoetilen glikol (MEG) saja (Rekers et al., 2008). Dua tipe reaktor adalah *continuous stirred tank reactor (CSTR)* dan *plug flow reactor* sedangkan unit pemisahan meliputi *direct sequence*, *indirect sequence*, dan *dividing wall column*.



Gambar 1. Superstruktur Sistem Poligenerasi Air

Model superstruktur kemudian dirumuskan sebagai permasalahan MINLP dimana variabel biner 0-1 merupakan *logical constraint* yang berfungsi sebagai keputusan ya-tidak untuk diperoleh pilihan yang optimum. Variable biner diperlihatkan sebagai berikut:

$$\sum_{i \in I} y_i = 1 \tag{1}$$

Dimana  $i$  adalah indeks unit operasi. Untuk unit  $i$ , variable  $y_i=1$  jika unit  $i$  terpilih untuk superstruktur optimum, dan jika sebaliknya  $y_i=0$ .

#### Subsistem Pembangkit Listrik dan Panas

Neraca massa dan energi di sekitar steam boiler dinyatakan sebagai:

$$\sum_j \sum_b F_{j,b} \cdot y_b - \sum_k \sum_b F_{k,b} \cdot y_b = 0 \tag{2}$$

$$\sum_j \sum_b F_{j,b} \cdot H_j \cdot y_b - \sum_k \sum_b F_{k,b} \cdot H_k \cdot y_b = 0 \tag{3}$$

$F$  dan  $H$  adalah laju alir dan nilai enthalpi untuk aliran inlet  $j$  dan aliran outlet  $k$ , dan  $y_b$  adalah variabel biner yang mewakili pemilihan tipe boiler. Sementara itu, neraca massa turbin uap dinyatakan sebagai berikut:

$$\sum_j \sum_{st} F_{j,st} \cdot y_{st} - \sum_k \sum_{st} F_{k,st} \cdot y_{st} = 0 \quad (4)$$

$y_{st}$  adalah variabel biner untuk pemilihan tipe turbin uap, yaitu *back pressure* dan *condensing steam turbines*. Untuk neraca energi di sekitar turbin uap, kebutuhan daya ( $W_{st,i}$ ) dan enthalpi uap pada *steam pressure level* ( $\Delta H_{st,i}$ ) berhubungan dengan intake laju alir turbin uap ( $FT_{st,i}$ ) sebagaimana dinyatakan berikut (R. Smith, 2005):

$$F_{stB} - \sum_{i \in I} FT_{st,i} = 0 \quad (5)$$

$$FT_{st,i} = W_{st,i} / \Delta H_{st,i} \quad (6)$$

Di persamaan (5),  $F_{stB}$  merupakan laju alir uap yang berasal dari boiler yang terpilih. Adapun *constraints* yang berhubungan dengan perhitungan enthalpi di header *high pressure*, *medium pressure*, dan *low pressure* sebagai berikut (Bruno et al., 1998):

$$H_n^m(HP, T_n) = a_1 + a_2 T_n + a_3 T_n^2 \quad (7)$$

$$H_n^m(MP, T_n) = b_1 + b_2 T_n + b_3 T_n^2 \quad (8)$$

$$H_n^m(LP, T_n) = c_1 + c_2 T_n + c_3 T_n^2 \quad (9)$$

dengan  $T$  adalah temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) dan  $m$  adalah header pada inlet pembuangan turbin uap menuju header  $n$ . Untuk turbin gas, neraca massa dan energi dinyatakan sebagai berikut:

$$\sum_j \sum_{gt} F_{j,gt} \cdot y_{gt} - \sum_k \sum_{gt} F_{k,gt} \cdot y_{gt} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_j \sum_{gt} F_{j,gt} \cdot H_j \cdot y_{gt} - \sum_k \sum_{gt} F_{k,gt} \cdot H_k \cdot y_{gt} - W = 0 \quad (11)$$

$y_{gt}$  adalah variabel biner untuk pemilihan teknologi turbin gas dan  $W$  adalah daya yang dihasilkan oleh turbin gas. Constraints nilai enthalpi udara dan exhaust gas di turbin gas dihitung berdasarkan persamaan (12).

$$Hgt_g = aTgt_g^2 + bTgt_g - c \quad (12)$$

### Subsistem Air Pendingin

Pada subsistem air pendingin, neraca massa cooling tower dinyatakan sebagai:

$$\sum_j \sum_{cws} F_{j,cws} \cdot y_{cws} - \sum_k \sum_{cws} F_{k,cws} \cdot y_{cws} = 0 \quad (13)$$

dimana variabel biner  $y_{cws}$  menyatakan pemilihan tipe cooling tower. Adapun neraca massa sebagai berikut:

$$F_{in} + F_m - F_{out} - F_b = 0 \quad (14)$$

$F_{in}$  adalah inlet laju alir air menuju cooling tower,  $F_{out}$  adalah outlet laju alir air cooling tower,  $F_m$  adalah cooling water *makeup* dan  $F_b$  adalah cooling tower *blowdown*. Air yang hilang melalui evaporasi,  $F_{ev}$ , berhubungan dengan *blowdown* dan *makeup* melalui persamaan:

$$F_b = F_{ev} / (\pi_c - 1) \quad (15)$$

$$F_m = F_{ev} [\pi_c / (\pi_c - 1)] \quad (16)$$

dimana  $\pi_c$  adalah siklus konsentrasi cooling tower.

### Subsistem Proses Produksi Etilen Glikol

Pada subsistem produksi etilen glikol, parameter-parameter diestimasi melalui simulasi Aspen HYSYS. Constraints untuk suplai kebutuhan pendingin, panas, dan daya di dalam produksi etilen glikol dirumuskan sebagaimana kebutuhan proses. Contoh, suplai uap untuk kolom distilasi,  $St_{supply}$ , sama dengan kebutuhan uap di reboiler,  $St_{Dem}$ .

$$St_{supply} = St_{Dem} \quad (17)$$

Kebutuhan air pendingin,  $F_{CW}$ , untuk produksi etilen glikol, terutama di dalam proses pemisahan, berhubungan dengan *condenser duty*,  $Q_{cd}$ , sebagaimana persamaan (18).

$$F_{CW} = \frac{Q_{CD}}{CP \cdot \Delta T} \quad (18)$$

dimana  $CP = 4.18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$  dan  $\Delta T$  diasumsi  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Unit Pemulihan Air (Water Recovery Unit)

Unit pemulihan air akan mengolah *blowdown* dari boiler dan cooling tower, dan air limbah dari proses produksi etilen glikol. Selama pengoperasian cooling tower dan boiler, akan ada akumulasi padatan yang dapat mempengaruhi perpindahan panas ataupun operasi unit lainnya. Nilai ini merupakan  $xw_{r,b(i)}$  seperti dapat dilihat di persamaan (19) dimana  $r$  merupakan indeks untuk kontaminan tertentu, yaitu TSS dan TDS,  $b$  adalah indeks untuk *blowdown*,  $i$  adalah indeks untuk unit boiler dan cooling tower, dan  $F$  adalah laju alir.

$$xw_{r,b(i)} \cdot F_{b(i)} - F_{r,b(i)} = 0 \quad (19)$$

Untuk proses produksi etilen glikol,  $xww_{r,out}^{max}$  adalah konsentrasi maksimum TDS yang diizinkan di dalam air limbah.  $Fww_{r,out}$  adalah laju alir kontaminan tertentu di dalam air limbah dan  $Fww_{out}$  adalah laju alir yang keluar dari pabrik etilen glikol. Adapun persamaannya sebagai berikut:

$$Fww_{r,out} - xww_{r,out}^{max} \quad (20)$$

### Fungsi Objektif

Tujuan dari sistem poligenerasi air adalah untuk mengoptimalkan pemakaian laju alir air tawar (FW) pada *total annualized cost minimum*. Persamaan (21) memperlihatkan fungsi objektif ( $z$ ) yang meliputi biaya air tawar intake ( $C_{fw}$ ) dan biaya *water recovery* yang berkaitan dengan total daya yang dibutuhkan untuk pengoperasian pompa ( $P_{p(i)}$ ,  $i = \{1, \dots, 9\}$ ) dan listrik ( $C_{elect}$ ). Biaya pemulihan air dapat mencakup biaya operasi pompa dan juga biaya yang berkaitan dengan recycle air, reuse, dan regenerasi. Biaya dihitung setiap tahun (AOT), dengan waktu operasi tahunan 8000 jam/tahun.

$$\min z = [(FW_{opt} \times C_{fw}) + (\sum_i P_{p(i)} \times C_{elect})] \times AOT \quad (21)$$

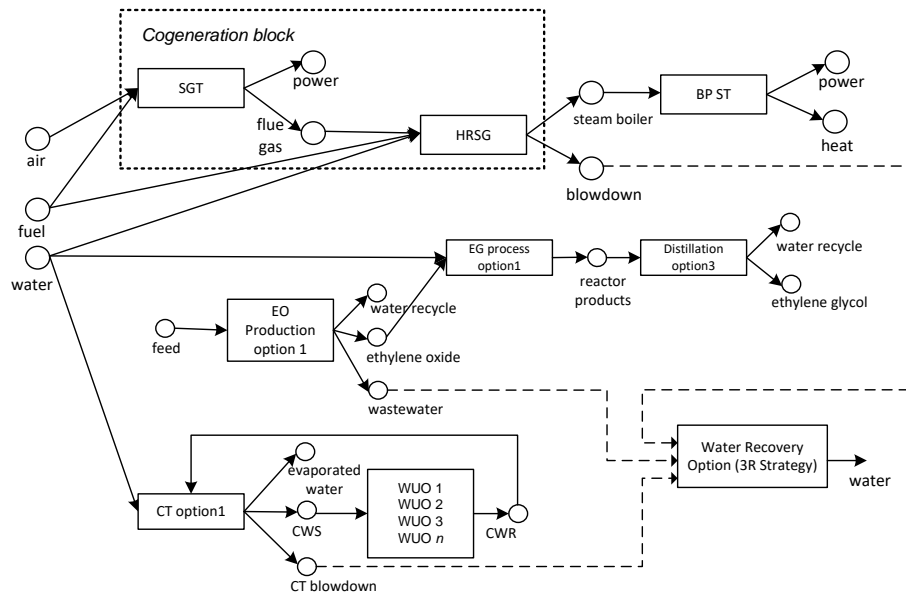
Daya yang dikonsumsi oleh pompa merupakan fungsi dari laju aliran air ke pompa,  $F_p$ , efisiensi pompa,  $\eta_p$ , dan massa jenis air,  $\rho$ , seperti pada persamaan (22) (Castro et al., 2000).

$$P_p = 1283 \frac{1}{\eta_p} \left[ \frac{F_p}{\rho} \right]^{0.476} \quad (22)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada sistem poligenerasi air untuk produksi etilen glikol ini, kebutuhan utilitas panas, daya, dan air pendingin pada tiga subsistem tercantum pada Tabel 1. Model dikembangkan dalam GAMS (*General Algebraic Modeling System*) dan diselesaikan secara optimal menggunakan DICOPT++. Sistem ini diselesaikan dalam model MINLP nonkonveks dengan 20 variabel biner, 330 variabel kontinu, dan 309 persamaan. Oleh karena model yang kompleks, hasil optimal diperoleh dalam 3683 iterasi dan terdapat 19 iterasi *major*. Model ini dapat membantu dalam memproyeksikan desain optimal

di antara konfigurasi yang diusulkan dengan mempertimbangkan pilihan peralatan/teknologi sebagai superstruktur yang diuraikan sebelumnya.



**Gambar 2. Konfigurasi Optimal Sistem Poligenerasi Air**

Penyelesaian optimal untuk unit pembangkit listrik, diperlihatkan pada Gambar 2, memilih sistem kogenerasi yang terdiri dari satu turbin gas dengan HRSG dan tiga turbin uap. Siklus turbin gas sederhana dan turbin uap *back-pressure* dipilih untuk memenuhi kebutuhan panas dan daya. Untuk sistem air pendingin, *induced mechanical draft* dipilih sebagai hasil optimal. Untuk pabrik produksi etilen glikol, hidrolisis etilen oksida, dimana etilen oksida diproduksi berdasarkan oksidasi langsung oksigen, dipilih sebagai proses yang menguntungkan karena proses ini dapat menghemat konsumsi air tawar dan dapat menghasilkan lebih banyak etilen glikol dibandingkan proses teknologi monoetilen glikol saja. Untuk unit pemisahan, *dividing wall column* dipilih sehingga menghasilkan pengurangan yang signifikan dalam susunan kolom distilasi dan penghematan energi pada unit kondensor dan reboiler. Untuk opsi pemulihan air, dari variabel biner reuse, regeneration reuse, dan regeneration recycling regenerasi, opsi terakhir dipilih sebagai opsi terbaik. Pada Gambar 2, air tawar dikonsumsi sebagai air tambahan untuk air demineral di subsistem panas dan tenaga, diumpungkan ke reaktor etilen glikol, dan air tambahan untuk cooling tower. Biaya konsumsi air diminimalkan melalui regenerasi dan recycle air dari blowdown boiler dan cooling tower serta dari air limbah yang dihasilkan di pabrik etilen glikol.

Dalam penelitian ini terdapat dua kasus yang dikembangkan, yaitu kasus 1 merupakan *base case* dan kasus 2 merupakan *optimized case*. Kasus 1 adalah sistem poligenerasi berbasis air tanpa pemulihan air limbah dan kasus 2 adalah dengan pemulihan air limbah. Model MINLP telah dirumuskan secara bersamaan untuk kedua kasus tersebut. Fungsi objektif pada kasus 1 adalah untuk meminimalkan pemakaian air tawar dan terbentuknya air limbah tanpa mempertimbangkan strategi 3R dan *economic constraints*. Laju alir minimum air tawar adalah 447,7 t/jam dan laju alir air limbah adalah 228,4 t/jam, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Pemakaian air tawar mencakup laju alir air demineral ( $F_{dw}$ ), air tawar inlet reaktor etilen glikol ( $F_{fweg}$ ), dan air tambahan cooling tower ( $F_m$ ). Sementara itu, total air limbah mula-mula ( $F_{wvinitial}$ ) terdiri dari blowdown blower ( $F_{Bd}$ ), blowdown cooling tower ( $F_b$ ), dan air limbah yang terbentuk di dalam produksi etilen glikol ( $F_{wweg}$ ). Hasil ini digunakan sebagai nilai awal untuk menyelesaikan MINLP *problem* di kasus 2 (*optimized case*).

Pada *optimized case* diimplementasikan strategi 3R untuk pemulihan air. Gambar 2 memperlihatkan air tawar digunakan sebagai air tambahan untuk air demineral di subsistem panas dan listrik, air umpan reactor etilen glikol, dan air tambahan untuk cooling tower. Biaya pemakaian air tawar diminimalkan melalui regenerasi dan recycle air dari boiler dan blowdown cooling tower serta dari air limbah yang dihasilkan proses produksi etilen glikol.

**Tabel 1. Kebutuhan Utilitas**

HP Heating	1948 kW
MP Heating	33970 kW
LP Heating	4023 kW
Daya	5918 kW
Cooling water	6391 t/hr

**Tabel 2. Solusi Optimal**

	Konsumsi Air Tawar (t/jam)	Air limbah yang dihasilkan (t/jam)	Objective Function (\$/tahun)
Kasus 1: MINLP tanpa 3R	447,7	228,4	931161,08
Kasus 2: MINLP dengan 3R	224,4	5,1	648330,25

Perbandingan sistem poligenerasi berbasis air antara *base case* dan *optimized case* dirangkum dalam Tabel 2. Hal ini menunjukkan bahwa dalam sistem poligenerasi air yang diusulkan, kasus yang dioptimalkan dapat mengurangi konsumsi air tawar hampir 50% (dari 447,7 t/jam menjadi 224,4 t/jam) dan produksi air limbah lebih dari 90% (dari 228,4 t/jam menjadi 5,1 t/jam). Selain itu, untuk fungsi objektif konsumsi air tawar minimum pada TAC minimum diperoleh penurunan sekitar 30%, yaitu dari 931161 \$/tahun menjadi 648330 \$/tahun.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang kami lakukan, maka dapat disimpulkan bahwa Pada penelitian ini telah dikembangkan model komprehensif sistem poligenerasi air melalui superstruktur yang memberikan beberapa kemungkinan konfigurasi pembangkitan panas dan listrik, sistem air pendingin, produksi bahan kimia, dan opsi pemulihan air. Model matematika dirumuskan sebagai MINLP problem dalam GAMS (General Algebraic Modeling System) dan diselesaikan secara bersamaan untuk mencari konfigurasi optimal sistem yang diusulkan dengan pemakaian air tawar minimum. Dilakukan juga kajian strategi 3R (regenerasi, reuse, dan recycle) untuk pemulihan air dalam sistem poligenerasi yang diusulkan dan menunjukkan pengurangan konsumsi air tawar yang signifikan hampir 50%.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aspen Technology, Inc, 2006, Aspen Hysys Tutorials and Applications, Version 2006, Software Documentation.
- C. Rubio-Maya, J. Uche-Marcuello, A. Martinez-Gracia, A. A. Bayod-Rujula; Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources; Applied energy 88 (2011a) 449-457.
- C. Rubio-Maya, J. Uche-Marcuello, A. Martinez-Gracia; Selection and sizing procedure of polygeneration plants using mathematical programming; Proceedings of ECOS 2009 on 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, August 31 - September 3 (2009), Brazil.
- C. Rubio-Maya, J. Uche-Marcuello, A. Martinez-Gracia; Sequential optimization of a polygeneration plant; Energy conversion and management (2011b) 2861-2896.

- F. Calise, et al., Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid-solar geothermal polygeneration system producing energy and water, *Energy Conversion and Management* 115 (2016) 200-220.
- H. Li, et al., Analysis of feasible polygeneration system for power and methanol production taking natural gas and biomass as materials, *Applied energy* 87 (2010) 2846-2853.
- H. Lin, et al., Techno-economic evaluation of coal-based polygeneration systems of synthetic fuel and power with CO<sub>2</sub> recovery, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 274-283
- H. Song, et al., Influence of drying process on the biomass-based polygeneration system of bioethanol, power and heat, *Applied energy* 90 (2011) 32-37.
- J.C. Bruno, et al., A rigorous MINLP model for the optimal synthesis and operation of utility plants. *Trans IChemE*, 76(A), 246-258, 1998.
- K. Jana, et al, Polygeneration as a future sustainable energy solution – A comprehensive review. *Applied Energy* 202 (2017) 88-111.
- Kirk-Othmer, 2005, *Encyclopedia of Chemical Technology*, 5th Edition, vol. 12. New Jersey: John Wiley & Sons.
- L. Gao, et al., Proposal of natural gas-based polygeneration system for power and methanol production, *Energy* 33 (2008) 206-212.
- L.M. Serra, et al, Polygeneration & efficient use of natural resources. *Energy* 34 (2009) 575-586.
- M.M. Castro, T.W. Song & J.M. Pinto, Minimization of operational costs in cooling water systems, *Trans IChemE*, Vol 78, Part A (2000) 192-201.
- P. Guo, et al., Fischer-tropschliquid fuel production by co-gasification of coal and biomass in a solar hybrid dual fluidized bed gasifiers, *Energy Procedia* 69 (2015) 1770-1779.
- P. Liu & E.N. Pistikopoulos, A multi-objective optimization approach to polygeneration energy systems design, *Process systems engineering AIChE Journal* 56 (2010a) 1218-1234.
- P. Liu, D. I. Gerogioris, & E.N. Pistikopoulos, Modeling and optimization of polygeneration energy systems, *Catalysis Today* 127 (2007) 347-359.
- P. Liu, E.N. Pistikopoulos, & Z. Li, A mixed-integer optimization approach for polygeneration energy systems design, *Computers and chemical engineering* 33 (2009) 759-768.
- P. Liu, E.N. Pistikopoulos, & Z. Li, Decomposition based stochastic programming approach for polygeneration energy systems design under uncertainty, *Ind. Eng. Chem. Res.* 49 (2010b) 3295-3305.
- R. Smith, 2005, *Chemical Process Design and Integration*, England: John Wiley & Sons.
- Rekers et al., Process for the production of ethylene oxide and ethylene glycol, US Patent, No.2008018299 A1, 2008.
- UNESCO, 2021, *The United Nations world water development report 2021: valuing water*
- Y. Qian, et al., Conceptual design and system analysis of a polygeneration system for power & olefin production from natural gas, *App energy* 86 (2009) 2088-2095.
- Z. Bai, et al., Performance analysis of a polygeneration system for methanol production and power generation with solar-biomass thermal gasification, *Energy Procedia* 61 (2014) 1561-1564.
- Z. Wang, D. Zheng, & H. Jin, Energy integration of acetylene and power polygeneration by flowrate-exergy diagram, *Applied energy* 86 (2009) 372-379.