

Elli Prastyo

Analisis Kinerja Kondensor *Direct Contact* Tipe *Jetspray* Berdasarkan Efektivitas dan Efisiensi *Thermal PT Geothermal Energy* Ulubelu

Ni Kadek Sri Ebtha Yuni, I Nyoman Suardika, dan I Wayan Sudiasa

Analisis Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Konstruksi Bangunan Gedung dengan Tahap HIRADC

Ni Putu Indah Yuliana dan Ni Kadek Sri Ebtha Yuni

Evaluasi Kinerja Proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu Berdasarkan *Earned Value Analysis*

Laras Andria Wardani, Hernowo Widodo, Lisa Adhani, Everlita Sabrina, dan Amaliah Annisa

Pengaruh Suhu pada Inhibitor Daun Pandan Terhadap Laju Korosi pada Baja SS-304 dalam Larutan Asam HCL 0,1M

R. Wahyuni, B. S. Wignyosukarto, dan B. Kamulyan

Penilaian Keberhasilan Pengelolaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh

Rida Norina dan Insan Fauzi

Peningkatan Kualitas Jasa Pewarnaan Produk Celana Jeans dengan Penerapan *Six Sigma* & Eksperimen *Taguchi Attribute Characteristic* (Kasus CV. Ciharuman Laundry)

Rahmi Risayani Deri, Rafika Ratik Srimurni, dan Ega Triyandi Permana

Analisis Pengaruh Kualitas Produk, Harga dan Promosi Terhadap Keputusan Pembelian Mobil Honda BRV di Dealer Honda Abadi Cibiru dengan Metode *Analitycal Hierarchy Process* dan Statistik

Muhamad Yusuf, Anton Budiharjo, dan Mohammad Archi Maulyda

Dampak Pembangunan Minapolitan Terhadap Kinerja Lalu Lintas

Agus Sulaeman, Muhamad Agung, dan Regi Fasya Septrian

The Effect of w/c Ratio of Compacted Bored Pile to Friction Resistance of Unjani Clay

Hari Rionaldo, Zulfansyah, dan Mazlani

Perancangan dan Pembuatan Program Simulasi Kesetimbangan Termodinamika untuk Proses Gasifikasi Biomassa

TIM REDAKSI

- Pimpinan Redaksi : Dr. Yudi Herdiansah, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 6717762)
- Dewan Redaksi : • Dr. Ir. Ferry Rusgiarto, M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 56688583600)
- Dr. Hendriyana, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 57189732631)
 - Yuda Bakti Zainal, ST., MT
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 6083767)
 - Agus Juhara, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani)
 - Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.
(Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) - Bandung,
Scopus ID: 6507211795)
- Editor Teknis : • Deny Bayu Saefudin, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 133135)
- Atik Charisma, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 57188567470)
 - Giri Angga Setia, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia. Scopus ID: 57194215122)
 - Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57188573899)
 - Xbal Meiprastyo, S.T., M.Eng.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Sinta ID: 6722189)
 - Andri Rahmat Kumalasian, S.T., M.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
 - Tiara Ariani Putri, S.T.
(Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
-

Penerbit :

Fakultas Teknik

Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Bandung)

Jl. Terusan Gatot Subroto Tromol Pos 807

Bandung – Jawa Barat

Indonesia

40285

Telp. : 022-731-2741

Fakultas Teknik

Universitas Jenderal Achmad Yani (Kampus Cimahi)

Jl. Terusan Jenderal Sudirman P.O. Box 148

Cimahi – Jawa Barat

Indonesia

40531

Telp. : 022-665-4572

022-664-3006

Jurnal Teknik merupakan **jurnal *peer-reviewed*** dalam **Bahasa Indonesia** di bidang keteknikan yang terbit **2 kali dalam setahun**. Terbit di bulan **Mei** dan **November** sejak tahun 2001. Jurnal Teknik versi online baru terbit pada tahun 2017 dengan fasilitas pengumpulan dan penerbitan online yang berbasis **Open Access Journal** dan mengikuti [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Harga Berlangganan : Institusi Rp. 170.000,-/tahun

Individu Rp. 160.000,-/tahun

Harga Tidak Berlangganan : Rp. 100.000,-/nomor

MITRA BESTARI

Anggota Tim Mitra Bestari Jurnal Teknik Tahun 2021

- Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo, Dipl. Ing. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 6506054959)
- Prof. I. N. Suprpta Winaya, S.T., M.A.Sc., Ph.D. (Universitas Udayana, Indonesia, Scopus ID: 18635759300)
- Prof. Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg. (Politeknik Negeri Bali, Scopus ID: 55189864100)*
- Prof. Dr. Ir. Indra Surjati, M.T., IPM. (Universitas Trisakti, Scopus ID: 15128239500)
- Dr. Suhartono, S.T., M.Si. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57189075734)*
- Dr. Damawidjaya Biksono, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- Dr. Asep Najmurokhman, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 55919091000)
- Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D. (Politeknik Negeri Semarang, Indonesia, Scopus ID: 57194209980)
- Ir. Nur Indrianti, M.T., D.Eng. (UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia, Scopus ID: 15071306300)
- Dr. P. Y. M. Wibowo Nd, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 55983351800)
- Dr. Sutarno, Ir., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57205031839)
- Dr. Nita Puspita Hidayat, Ir., M.T. (Universitas Islam Bandung, Indonesia, Scopus ID: 57201677362)
- Dr. Rinto Yusriski, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 56582391600)
- Dr. Eng. Christina Wahyu K., S.T., M.T. (Universitas Brawijaya, Indonesia, Scopus ID: 56688583600)
- Dr. Nadiem Anwar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- Dr. Ir. Iskandar Muda, M.Eng. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57195229456)
- Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.T. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, Scopus ID: 15838524700)
- Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME. (Badan Tenaga Nuklir Nasional, Indonesia, Scopus ID: 6507211795)

- Putu Doddy Sutrisna S.T., M.Sc., Ph.D. (Universitas Surabaya, Indonesia, Scopus ID: 6504553709)*
- Dr.Eng. Achmad Munir, S.T., M.Eng. (Institut Teknologi Bandung, Scopus ID: 25638780900)
- Ir. Kusharjanto, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia, Scopus ID: 57193392775)
- Sofyan Basuki, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Indonesia)
- Ir. Emi Prasetyawati Umar, S.Si., M.T., IPP (Universitas Muslim Indonesia, Makasar, Scopus ID: 57201065526)*
- Dr, Ir. Ariani Budi Safarina, M.T., (Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 57200635517)
- Ir. Nana Heryana, IPM (Institut Teknologi Bandung, Scopus ID: 35174665300)
- Dr. Hendriyana, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 57189732631)
- Dr. Eng. Heriansyah Putra, S.Pd., M.Eng. (Institut Pertanian Bogor, Scopus ID: 57195301854)*
- Dr. Charles Sitompul, ST., MT., MIM (Universitas Khatolik Parahyangan, Scopus ID: 23975188900) *
- Ir. Harry Ramza, M.T., Ph.D (Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Scopus ID: 55189898100)
- Dr. Ir. Endang Prasetyaningsih, M.T. (Universitas Islam Bandung, Scopus ID: 57189580587)
- Annisa Uswatun Khasanah, S.T., MBA., M.Sc (Universitas Islam Indonesia, Scopus ID: 57195477115)
- Syah Alam, S.Pd., M.T. (Universitas Trisakti, Scopus ID: 57191903622)
- Dr. Imroatul Chalimah Juliana, S.T., M.T. (Universitas Sriwijaya, Scopus ID: 57193694034)*
- Dr. Khoiruddin, S.T., M.T. (Institut Teknologi Bandung, Scopus ID: 55584284500)
- Salita Ulitia Prini, S.Kom, M.T. (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Scopus ID: 57208581701)
- Edwar, S.T., M.T. (Universitas Telkom, Scopus ID: 57188569370)
- Dr. Putu Teta Prihartini, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 56951380600)*
- Dr. Joko Waluyo, S.T., M.T. (Universitas Sebelas Maret, Scopus ID: 37114996900)*
- Dr. Hendy Suryana, S.T., M.T., IPM. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID: 57200332569)*
- Dr. Ir. Oviyan Patra, M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Sinta ID: 6756651)*

*Reviewer yang terlibat pada Vol 20 No 1 Tahun 2021

DAFTAR ISI

Analisis Kinerja Kondensor <i>Direct Contact</i> Tipe <i>Jetspray</i> Berdasarkan Efektivitas dan Efisiensi <i>Thermal PT Geothermal Energy</i> Ulubelu Elli Prastyo	01-10
Analisis Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Konstruksi Bangunan Gedung dengan Tahap HIRADC Ni Kadek Sri Ebtha Yuni, I Nyoman Suardika, dan I Wayan Sudiasa	11-20
Evaluasi Kinerja Proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu Berdasarkan <i>Earned Value Analysis</i> Ni Putu Indah Yuliana dan Ni Kadek Sri Ebtha Yuni	21-30
Pengaruh Suhu pada Inhibitor Daun Pandan Terhadap Laju Korosi pada Baja SS-304 dalam Larutan Asam HCL 0,1M Laras Andria Wardani, Hernowo Widodo, Lisa Adhani, Everlita Sabrina, dan Amaliah Annisa	31-41
Penilaian Keberhasilan Pengelolaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh R. Wahyuni, B. S. Wignyosukarto, dan B. Kamulyan	42-51
Peningkatan Kualitas Jasa Pewarnaan Produk Celana Jeans dengan Penerapan <i>Six Sigma</i> & Eksperimen <i>Taguchi Attribute Characteristic</i> (Kasus CV. Ciharuman Laundry) Rida Norina dan Insan Fauzi	52-62
Analisis Pengaruh Kualitas Produk, Harga dan Promosi Terhadap Keputusan Pembelian Mobil Honda BRV di Dealer Honda Abadi Cibiru dengan Metode <i>Analytical Hierarchy Process</i> dan Statistik Rahmi Rismayani Deri, Rafika Ratik Srimurni, dan Ega Triyandi Permana	63-72
Dampak Pembangunan Minapolitan Terhadap Kinerja Lalu Lintas Muhamad Yusuf, Anton Budiharjo, dan Mohammad Archi Mauliyda	73-82
<i>The Effect of w/c Ratio of Compacted Bored Pile to Friction Resistance of Unjani Clay</i> Agus Sulaeman, Muhamad Agung, dan Regi Fasya Septrian	83-93
Perancangan dan Pembuatan Program Simulasi Kesetimbangan Termodinamika untuk Proses Gasifikasi Biomassa Hari Rionaldo, Zulfansyah, dan Mazlani	94-103

DARI REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa atas perkenan-Nya kami dapat menerbitkan Jurnal Teknik (JT) Volume 20 Nomor 1, bulan Mei 2021. Dalam edisi ini disajikan 6 (enam) makalah berkaitan dengan bidang Ilmu Teknik, yang mencakup Teknik Kimia, Teknik Elektro, Teknik Mesin, Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, dan Teknik Industri yang meliputi: (1) Analisis Kinerja Kondensor *Direct Contact* Tipe *Jetspray* Berdasarkan Efektivitas dan Efisiensi *Thermal* PT *Geothermal Energy* Ulubelu, (2) Analisis Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Konstruksi Bangunan Gedung dengan Tahap HIRADC, (3) Evaluasi Kinerja Proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu Berdasarkan *Earned Value Analysis*, (4) Pengaruh Suhu pada Inhibitor Daun Pandan Terhadap Laju Korosi pada Baja SS-304 dalam Larutan Asam HCL 0,1M, (5) Penilaian Keberhasilan Pengelolaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh, (6) Peningkatan Kualitas Jasa Pewarnaan Produk Celana Jeans dengan Penerapan *Six Sigma* & Eksperimen *Taguchi Attribute Characteristic* (Kasus CV. Ciharuman Laundry), (7) Analisis Pengaruh Kualitas Produk, Harga dan Promosi Terhadap Keputusan Pembelian Mobil Honda BRV di Dealer Honda Abadi Cibiru dengan Metode *Analytical Hierarchy Process* dan Statistik, (8) Dampak Pembangunan Minapolitan Terhadap Kinerja Lalu Lintas, (9) *The Effect of w/c Ratio of Compacted Bored Pile to Friction Resistance of Unjani Clay*, (10) Perancangan dan Pembuatan Program Simulasi Keseimbangan Termodinamika untuk Proses Gasifikasi Biomassa

Redaksi menyampaikan rasa terima kasih kepada peneliti-peneliti untuk mempublikasikan hasil penelitiannya dalam Jurnal Teknik edisi 20 (1) ini. Tak lupa juga kami ucapkan terima kasih kepada Mitra Bestari yang telah membantu hingga Jurnal Teknik ini dapat diterbitkan. Redaksi senantiasa mengundang peneliti, perekayasa, dan para fungsional lain untuk memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya bidang ilmu teknik. Kritik dan saran atas ketidak-sempurnaan dalam Jurnal Teknik sangat kami harapkan demi kemajuan dan penyempurnaan dalam terbitan selanjutnya. Semoga pemuatan karya dalam terbitan kali ini dapat menjadi pemicu peneliti-peneliti untuk melahirkan karya-karya lain dengan ide-ide original dan bermanfaat untuk masyarakat.

Cimahi, 31 Mei 2021

Dewan redaksi

Analisis Kinerja Kondensor *Direct Contact* Tipe *Jetspray* Berdasarkan Efektivitas dan Efisiensi *Thermal* PT *Geothermal Energy* Ulubelu

Elli Prastyo

Teknik Kimia, Akamigas Balongan, Indramayu, Indonesia

elli.prastyo@gmail.com

Abstrak

PT Pertamina *Geothermal Energy* (PGE) Ulubelu menggunakan kondensor tipe *jetspray* dengan tugas mengubah fase vapour dari turbin (*steam tubin*) menjadi *liquid*. Fluida input kondensor merupakan output dari turbin (*steam* dan *non condensable gas*), yang beroperasi pada tekanan konstan 0,08 bar dan temperatur rata-rata 28°C. Evaluasi kinerja kondensor dilakukan berdasarkan temperatur dan laju alir (fluida masuk kondensor dan laju alir *cooled water*) terhadap nilai efisiensi thermal dan efektivitas. Nilai efektivitas tertinggi sebesar 79,4% terjadi pada saat nilai Q_{aktual} sebesar 10,891°C, sedangkan nilai efektivitas terendah sebesar 78,2% terjadi pada saat nilai Q_{aktual} sebesar 10,306°C. Efisiensi termal kondensor tertinggi terjadi pada minggu ke 4 sebesar 52,3% dengan Q_{air} 441.149.944,2 kJ/h. Nilai Q_{air} 417.424.072,6 kJ/h menghasilkan Efisiensi termal kondensor sebesar 49,5% pada minggu pertama. Hasil perhitungan kemudian divisualisasi menggunakan grafik menunjukkan ketika Q dinaikkan dari $4,17 \cdot 10^8$ kJ/kg ke $4,4 \cdot 10^8$ kJ/kg efisiensi kondensor meningkat sebesar 0,6%.

Kata kunci: efektivitas, efisiensi, kondensor, laju alir, temperatur

Abstract

PT Pertamina geothermal energy (PGE) Ulubelu uses jetspray-type condensers with the task of changing the vapour phase from turbine (*steam tubin*) to liquid. Condenser input fluid is the output of turbines (*steam* and *non condensable gas*), operating at a constant pressure of 0,08 bar and an average temperature of 28°C. Evaluation of condenser performance is based on the temperature and flow rate (condenser entry fluid and cooled water flow rate) against the value of thermal efficiency and effectiveness. The highest effectiveness value of 79,4% occurred when the Q_{aktual} value was 10,891°C, while the lowest effectiveness value of 78,2% occurred when the Q_{aktual} value was 10,306°C. The highest condenser thermal efficiency occurred in week 4 at 52,3% with Q_{air} 441,149,944.2 kJ/h. Q_{air} value of 417.424.072,6 kJ/h resulted in a condenser thermal efficiency of 49,5% in the first week. The calculation results were then visualized using a graph showing when Q was raised from $4,17 \cdot 10^8$ kJ/kg to $4,4 \cdot 10^8$ kJ/kg condenser efficiency increased by 0,6%.

Keywords: effectiveness, efficiency, condenser, flow rate, temperature

1. Pendahuluan

Energi panas bumi atau bisa disebut *energy geothermal* merupakan energi yang terbentuk dari fluida panas di dalam perut bumi karena adanya aktivitas tetonik dan memiliki nilai kalor untuk dalam dimanfaatkan menjadi energi panas bumi untuk menggerakkan turbin. *Reservoir* yang mengandung uap panas kemudian di alirkan sampai menembus reservoir melalui sumur produksi sampai menuju ke permukaan untuk kemudian dimanfaatkan (Neny, 2018). PT Pertamina *Geothermal Energy* Area Ulubelu Lampung terdapat 54 sumur produksi dan ada 3 sumur yang sedang uji coba produksi. Uap yang di gunakan untuk suplai listrik melalui beberapa proses salah satunya *exhaust steam* atau uap sisa yang diproses menggunakan kondensor (Wahyuningsih, 2005).

Kondensor pada sistem turbin uap di PT Pertamina *Geothermal Energy* Area Ulubelu merupakan alat proses yang penting untuk mendapatkan nilai efisiensi sistem yang tinggi. Kondensor yang digunakan memiliki fungsi mengubah fase *vapour* menjadi *liquid*. Perpindahan panas yang baik merupakan salah satu parameter yang dapat mempengaruhi kinerja kondensor. Perhitungan variable-variable terikat khususnya perubahan tekanan, temperatur, dan laju alir diperlukan untuk mendapatkan nilai efisiensi kondensor sesuai standart.

Tekanan vakum kondensor merupakan parameter yang sangat mempengaruhi dari nilai efisiensi turbin uap ketika bekerja pada *low pressure*, sehingga menjadi hal yang penting untuk menjaga level tekanan tetap berada pada kondisi *vacuum*. Kondensor yang memiliki nilai tekanan *vacuum* semakin rendah berdampak terhadap munculnya fenomena kembalinya tekanan menuju *low pressure* turbin. Fenomena kembalinya tekanan menuju *low pressure* pada turbin

Info Makalah:

Dikirim : 03-31-21;

Revisi 1 : 05-25-21;

Revisi 2 : 06-10-21;

Diterima : 06-22-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +6282331855757

e-mail : elli.prastyo@gmail.com

berdampak terhadap penurunan nilai efisiensi turbin uap karena rusaknya sudu-sudu turbin. Nilai efisiensi *low pressure* turbin dapat meningkat karena faktor nilai tekanan *vacuum* yang semakin tinggi.

Tekanan uap merupakan nilai yang berkorelasi terhadap nilai tekanan dan temperatur ketika suatu alat beroperasi, khususnya pada kondisi *vacuum*, dimana nilai tekanan dan temperatur merupakan suatu besaran yang saling berkorelasi. Tekanan dan suhu kondensor perlu dijaga serendah mungkin

sehingga menghasilkan daya turbin yang besar. Tekanan vakum dapat meningkatkan efisiensi termal, dimana perubahan tekanan pada kondensor mempengaruhi efisiensi dan kemampuan proses kondensasi (Gokcen, 2008). Pemakaian suatu kondensor memungkinkan suatu fluida kerja yang berasal dari air hasil pemurnian karena proses recycle yang berkesinambungan.

Water Jet Ejector merupakan sistem yang berfungsi untuk mempertahankan keadaan vacuum pada kondensor. *Water Jet Ejector System* memanfaatkan sistem air yang bersirkulasi secara tertutup (*Closed System*). Cara kerja dari *Water Jet* adalah dengan memanfaatkan air yang dipompakan oleh *water jet pump*. Air yang dipompakan ke *Ejector* melewati Line pipa yang terhubung dengan ruangan kondensor yang *vacuum*. Ketika air melewati pipa yang terhubung dengan ruangan kondensor, air yang bersirkulasi dalam sistem ini memberikan tarikan udara pada ruangan *vacuum* di kondensor, sehingga kevacuman di kondensor tetap terjaga.

Beberapa penelitian yang telah dilakukan menjadi rujukan dalam penelitian ini diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Fadly HI. Abbas mengenai “Pengaruh Sistem *Cooling Water Ejector* terhadap Stabilitas Vacuum Kondensor PLTU Tidore” tahun 2020. Peneliti menyatakan bahwa saat kondensor beroperasi pada siang hari terjadi penurunan tekanan *vacuum* pada kondensor, dan kondisi vacuum mengalami kenaikan pada malam hari. Berdasarkan data menyebutkan bahwa kondisi *vacuum* kondensor pada malam hari lebih baik daripada kondisi vacuum pada siang hari. Hal ini karena malam hari system cooling bekerja dengan optimal dengan memanfaatkan udara malam yang dingin, daripada saat kondisi siang hari yang memanfaatkan udara panas untuk proses *cooling* / pendinginan. Data menunjukkan nilai temperatur *water ejector* berkorelasi terhadap nilai tekanan *vacuum* pada kondensor. Nilai temperatur yang lebih rendah meningkatkan kinerja kondensor karena tekanan vacuum dapat dijaga serendah mungkin. Dari evaluasi yang dilakukan, temperatur air dalam tanki sangat berpengaruh terhadap kinerja *water ejector system*. Hal ini dibuktikan dengan data riwayat temperatur air tanki yang tinggi dapat menyebabkan *pressure ejector* menurun yang kemudian dapat mempengaruhi tekanan *vacuum condenser*. Dari data dapat disimpulkan dengan temperature air *water jet tank* < 50 °C maka kinerja *water jet system* lebih maksimal sehingga vacuum condenser lebih terjaga di *pressure* – 0,09 Mpa.

Asrorin Safira Zata Lini tahun 2016 melakukan penelitian mengenai efektivitas dan efisiensi dari kondensor turbin. Peneliti menyatakan suatu pembangkit listrik memiliki nilai efisiensi yang baik jika efektivitas kondensor tinggi. Hasil analisis menyatakan nilai tekanan *vacuum* bukan merupakan parameter utama penyebab dari nilai efektivitas kondensor. Proses perubahan fase dari *vapour steam* menjadi liquid merupakan salah satu faktor dari naik atau turunnya tekanan pada kondensor. Perbedaan nilai densitas antara *condensate water* dan *steam* menjadi penyebab munculnya *vacuum condensate* yang terjadi pada kondensor. Nilai tekanan vakum akan meningkat seiring dengan semakin cepatnya kondensor melakukan proses kondensasi *vapour steam* yang berasal dari *low pressure* turbin menjadi *condensate water*. Kondensor 2 atau kondensor 1 memiliki nilai perhitungan efektivitas yang tidak berbeda secara signifikan dilihat dari data secara actual dengan data kondensor saat terjadi *commissioning* dengan selisih nilai sebesar 0,08%. Nilai efektivitas yang tidak berbeda jauh atau sama ketika kondensor beroperasi dalam waktu tertentu dengan kondensor ketika *commissioning* menjadi indikator kinerja kondensor dikatakan baik. Kondensor unit 5 memiliki kinerja yang baik berdasarkan evaluasi yang dilakukan jika ditinjau dari nilai efektivitas. Hal ini dikarenakan nilai efektivitas kondensor ketika *commissioning* dan aktual tidak berbeda jauh. Nilai efektivitas data aktual pada kondensor dua sebesar 0,262 dan ketika *commissioning* diperoleh nilai efektivitas sebesar 0,323. Nilai efektivitas data actual dari kondensor satu sebesar 0,234 dan dari data *commissioning* dihasilkan efektivitas sebesar 0,345

Nilai tingkat kevacuman dari kondensor dapat menurun karena adanya *non condensable gases*. *Non condensable gases* merupakan gas yang berasal dari luar dan masuk pada bagian *air leakage* kondensor sehingga menyebabkan turunnya tingkat kevacuman karena tidak dapat terkondensasi. Udara masuk ke dalam kondensor karena desain dari kondensor berada pada tekanan dibawah atmosfer, sehingga udara dari lingkungan dapat dengan mudah masuk ke dalam kondensor jika terjadi *air leakage*. Nilai kecepatan transfer panas yang terjadi antara *steam* sebagai *hot fluid* dengan *water* sebagai *cold fluid* menjadi berkurang. Berkurangnya kecepatan transfer panas ini dikarenakan *non condensable gases* menyelimuti permukaan luar pada tube–tube kondensor. Penurunan kecepatan transfer panas ini berdampak terhadap kenaikan tekanan pada kondensor dan turunnya efisiensi ketika turbin uap dioperasikan. Kadar oksigen yang terdapat pada kondensor juga dapat mengakibatkan terjadinya korosi pada line–line kondensor. Salah satu cara agar komponen yang terdapat pada kondensor bertahan lama, maka kondensor di dalam oksigen yang masuk melalui *air leakage* dibuang keluar. *Air removal equipment* atau bisa disebut *vacuum prime* merupakan salah satu metode untuk menghilangkan *non condensable gases* ataupun oksigen yang terdapat di kondensor. Gas–gas penghambat yang masuk ke dalam kondensor tadi kemudian dibuang menggunakan pompa yang disebut *vacuum prime*. Maulana F pada tahun 2014 melakukan penelitian yang membahas kinerja kondensor terhadap perubahan nilai tekanan *vacuum*. Metode NTU–*effectiveness* digunakan untuk menentukan nilai efisiensi kondensor terhadap perubahan nilai tekanan *vacuum*. *Output* dari metode ini merupakan nilai efektivitas sebagai nilai efisiensi kondensor karena kualitas dari perpindahan panas yang terjadi.

Data analisis nilai temperatur air pendingin terhadap tekanan vakum terhadap menyatakan temperature *cooled water* yang semakin tinggi menyebabkan nilai efisiensi kondensor menurun karena tekanan juga semakin naik.

Temperatur air pendingin pada 35,03°C menghasilkan tekanan *vacuum* tertinggi yaitu sebesar -711,74 mmHg, sedangkan pada temperature *cooled water* 49,02 °C menghasilkan tekanan *vacuum* terendah sebesar -605,75 mmHg.

Data hubungan tekanan vakum kondensor terhadap efektivitas pada kondensor menyatakan dimana semakin besar tekanan di dalam kondensor atau semakin kecil vakum pada kondensor, maka semakin kecil pula efektivitas kondensor yang dihasilkan. Efektivitas kondensor terbesar dihasilkan pada tekanan vakum kondensor 711,74 mmHg yaitu 93,14 %. Sedangkan efektivitas kondensor terkecil dihasilkan pada tekanan vakum kondensor -610,50 mmHg yaitu 75,42 %.

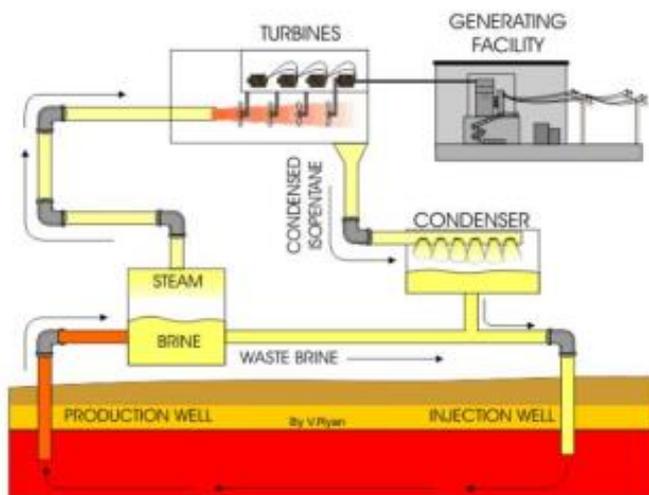
Hasil evaluasi dan analisis menunjukkan nilai tekanan *vacuum* -711,74 mmHg memberikan efisiensi tertinggi pada kondensor sebesar 93,14%. Nilai tekanan *vacuum* sebesar -610,50 mmHg memberikan nilai efisiensi terendah sebesar 75,42%. Nilai efisiensi meningkat seiring dengan nilai tekanan yang dijaga tingkat kevacumannya.

Kondensor mengalami beberapa permasalahan salah satunya adalah fenomena *Vacuum Condensor Drop* yang disebabkan oleh kinerja *Water Jet Ejector* kurang maksimal, hal ini dipengaruhi oleh temperature *cooled water* yang digunakan oleh sistem *Water Jet Ejector* lebih. Studi analisa merupakan salah satu tujuan dari penelitian yang dilakukan untuk mengetahui kondisi operasi kondensor terhadap kinerja kondensor dilihat dari nilai efisiensi termal dan efektivitas.

2. Metode

2.1. Rangkaian alat PLTP Ulubelu

Sistem *flash steam* merupakan sistem yang diterapkan pada pembangkit listrik tenaga panas bumi di Ulubelu. Sumur uap yang menghasilkan uap basah dapat mengaplikasikan siklus *flash steam*. Fluida kering dan basah yang dihasilkan dari sumur uap dan masih bercampur dipisahkan menggunakan separator. Pembangkit energi listrik dihasilkan dari uap kering yang digunakan untuk memutar turbin yang dikopel dengan generator.

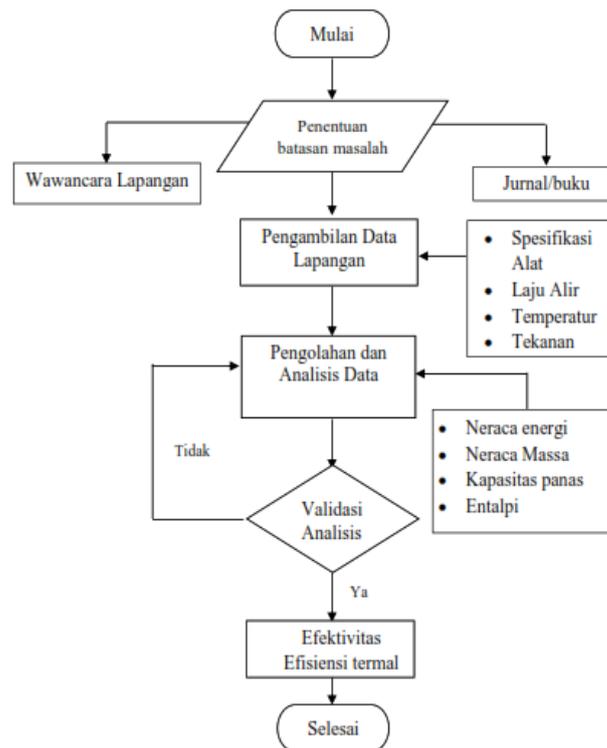


Gambar 1. Rangkaian alat PLTP Ulubelu

Sistem dua fasa dominasi air (*water dominated system*) merupakan sistem yang terdapat pada PT Pertamina Geothermal Energy Area Ulubelu dengan jenis fluida produksi dan kandungan utama fluida *hydro thermal* nya. Campuran *liquid – vapour* merupakan sistem dominasi air yang dihasilkan dari panas bumi.

PT Pertamina Geothermal Energy Area Ulubelu menggunakan sistem *separated steam* untuk memisahkan fase *vapour* terhadap fase *liquid*. Proses pemisahan fluida dilakukan jika fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran fluida dua fasa, yaitu fasa uap dan fasa cair yang kemudian disebut sebagai *separated steam system*. Separator digunakan untuk memisahkan antara fasa uap dan fasa cair sebelum digunakan sebagai pemutar turbin. Uap kering bebas kandungan air dialirkan menuju ke turbin. Energi listrik dihasilkan dari putaran generator akibat kerja turbin yang mengubah energy panas bumi menjadi energi kinetik.

Analisis pada penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan. Mengacu pada pengolahan data secara kuantitatif dan kualitatif, hasil eksperimen dilakukan analisis kemudian ditarik kesimpulan. Terdapat dua parameter utama yang dilakukan analisis yaitu efektivitas dan efisiensi thermal kondensor. Berikut ditampilkan diagram alir penelitian yang membahas analisis kinerja kondensor *direct contact* tipe *jetspray*.



Gambar 2. Flowchart Analisis Kinerja Kondensor

Data penelitian didapat dari sektor pembangkitan PT Geothermal Energy Ulubelu. Data yang diperoleh antara lain berupa spesifikasi kondensor, laju alir, temperatur *inlet* dan *outlet* fluida kerja. Analisis dilakukan berdasarkan trend yang terjadi dalam grafik sebagai akibat dari hasil pengolahan data. Variabel apa saja yang mempengaruhi nilai efisiensi dan efektivitas kondensor dapat diketahui dari analisa tersebut.

2.2. Kondisi Operasi

Kondensor *direct contact* dengan jenis *jetspray* digunakan oleh PT Pertamina *Geothermal Energy* Ulubelu. Siklus terbuka merupakan prinsip kerja dari kondensor tipe *direct contact* dengan sistem *jetspray*. *Cooled water* yang keluar dari *nozzle* dilakukan kontak secara langsung dengan fluida panas sehingga terjadi perpindahan panas tanpa ada pembatas antara fluida panas dan dingin. *Cooled water* diambil dari sebagian hasil bawah kondensor dan sisa dari air kondensat yang tidak dimanfaatkan dialirkan menuju *cooling tower*. Berikut ditampilkan spesifikasi kondensor *direct contact* yang digunakan PT Pertamina *Geothermal Energy* Ulubelu.

Tabel 1. Kondisi Operasi Kondensor

No	Keterangan	Satuan	Nilai
1	<i>Flow rate</i>	kg/jam	367710
2	Tekanan	Bar	0,08
3	<i>Cooled water</i>	m ³ /jam	16500
4	Temperatur <i>cooled water</i>	°C	28
5	Temperatur <i>exhaust steam</i>	°C	41

2.3. Efektivitas Kondensor

Laju perpindahan panas actual dibanding dengan laju perpindahan panas maksimal pada kondensor merupakan variable hitung yang digunakan untuk menentukan nilai efektivitas. Efektivitas digunakan untuk mengetahui kinerja kondensor dengan laju masa input berupa air pendingin dan exhaust steam turbin dengan output berupa kondensat dengan temperatur tertentu untuk masing – masing bagian. Efektivitas kondensor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Suanardwipa, 2017).

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{maximal}} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{co}-T_{ci}}{T_{hi}-T_{ci}} \quad (2)$$

2.4. Efisiensi Kondensor

Efisiensi termal menunjukkan kinerja suatu alat termal atau alat penukar kalor dengan ukuran tanpa dimensi. Efisiensi termal kondensor dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Suarnadwipa, 2017)

$$\eta = \frac{Q_{air}}{Q_{kond}} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{m \cdot cp \cdot (T_{co} - T_{ci})}{m \cdot (h_1 - h_2)} \quad (4)$$

Terdapat beberapa parameter dalam rumus yang digunakan diantaranya adalah η yang menyatakan Efisiensi termal kondensor (%); Q_{air} yang menyatakan panas sensible air pendingin, m yang menyatakan masa dari air pendingin yang digunakan (kg/jam); kapasitas kalor air pendingin pada tekanan konstan (cp) dengan satuan kJ/kg; dan $h_1 - h_2$ yang merupakan entalpi penguapan (kJ/kg).

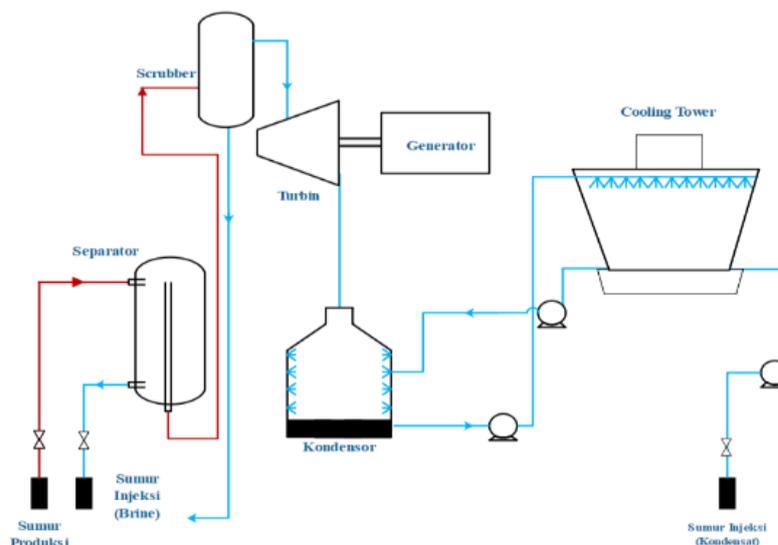
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Siklus Kondensor Pertamina Ulubelu

PLTP Ulubelu menggunakan uap yang diperoleh dari *reservoir*. *Steam receiving header* menerima suplai uap yang diperoleh dari sumur produksi melalui sistem transmisi uap. *Stabilizer vapour pressure* digunakan untuk mencegah terjadinya kondisi *over pressure* yang membuang sebagian uap menuju *rock muffler*. *Separator* digunakan untuk memisahkan uap kering dan basah sebelum masuk menuju turbin, sehingga turbin hanya menerima uap kering. *Output* dari separator berupa uap kering diproses lebih lanjut oleh *scrubber* guna menghilangkan *impurities* seperti gas Metana (CH_4), Argon (Ar), Nitrogen (N_2), Hidrogen (H), Karbon Dioksida (CO_2), Amonia (NH_3), dan Hidrogen Sulfida (H_2S). Uap kering dan bebas kandungan *impurities* kemudian dialirkan menuju turbin untuk diproses menjadi energi listrik. Proses pre-treatment yang dilakukan bertujuan untuk menghindari kerusakan pada sudu sudu turbin akibat masih adanya kandungan uap air dan *impurities* lainnya.

Generator kemudian mengubah energi kinetik yang dihasilkan dari turbin menjadi energi listrik. Energi kinetik dihasilkan karena memanfaatkan energi panas dan tekanan yang terdapat pada uap kering untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. *Cooling tower* berfungsi untuk mensuplai air pendingin kepada kondensor *jetspray* untuk memproses *exhaust steam* yang dihasilkan dari turbin.

Ejector digunakan pada komponen kondensor untuk menghilangkan *non condensable gases*. *Non condensable gases* yang dihisap oleh *ejector* kemudian dialirkan menuju *intercondensor* sebagai media pendingin dan penjerap *non condensable gases*. *Fan cooling tower* digunakan untuk membuang *non condensable gases* menuju atmosfer. Media pendingin yang digunakan pada kondensor disuplai dari *cooling tower*. Sistem *reinjeksi* digunakan melalui *overflow* dari basin *cooling tower* yang ditampung menuju *pond*.



Gambar 3. Siklus PGE Pertamina Ulubelu

PLTP Ulubelu menggunakan kondensor vertikal dimana sistem pendinginan dijalankan secara *cross flow* pada kondisi tekanan vakum. Sistem kondensor menggunakan *ejector* yang berfungsi untuk menjaga tingkat kevacuman kondensor dengan membuang udara atau gas lainnya menuju atmosfer.

Kondisi vakum dari kondensor terjadi secara termodinamika bukan secara mekanik karena adanya proses perpindahan panas. Hal ini dimungkinkan karena setelah fluida keluar dari turbin yang masih berupa uap terjadi kontak dengan air pendingin mengalami perpindahan panas hingga mencapai kesetimbangan masa dan energi. Penyusutan volume uap mengakibatkan kondisi ruangan dalam kondensor menjadi vakum. Derajat kevakuman tergantung pada nilai *fouling factor*, temperatur, dan kandungan gas yang tidak dapat terkondensasi (NCG).

Steam dan air merupakan fase yang terdapat pada *exhaust steam* masuk menuju kondensor. Steam atau gas yang tidak dapat terkondensasi pada kondensor disebut *Non Condensable Gases* (NCG) dengan nilai laju alir rata-rata sebesar 155,035 kmol/jam. Kondisi vacuum kondensor dijaga dengan mengeluarkan *non condensable gases* ke lingkungan menggunakan *cooling tower*. *Non condensable gases* terdiri dari beberapa komposisi penyusun yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Kandungan *Non Condensable Gases* (NCG)

No	Keterangan	Nilai
1	Karbon dioksida (CO ₂)	90%
2	Hidrogen Sulfida (H ₂)	5%
3	Ammonia (NH ₃)	0,14%
4	Nitrogen (N ₂)	4,86%

3.2. Analisis Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Efektivitas Kondensor

Metode penentuan efisiensi *thermal* dan efektivitas kondensor *direct contact* tipe *jetspray* didasarkan pada fenomena perpindahan panas secara konveksi menggunakan persamaan empiris. Pengolahan data menggunakan data yang diperoleh dari lapangan berupa laju alir fluida masuk dan keluar kondensor, temperatur *cooled water*, temperatur *hot* fluida, dan tekanan yang terdapat pada kondensor. Data fluida *cooled water* diambil dari data desain kondensor pada suhu 28°C. Data – data yang diambil setiap hari selama satu bulan tersebut kemudian dirata – rata dan ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Data Operasi Kondensor

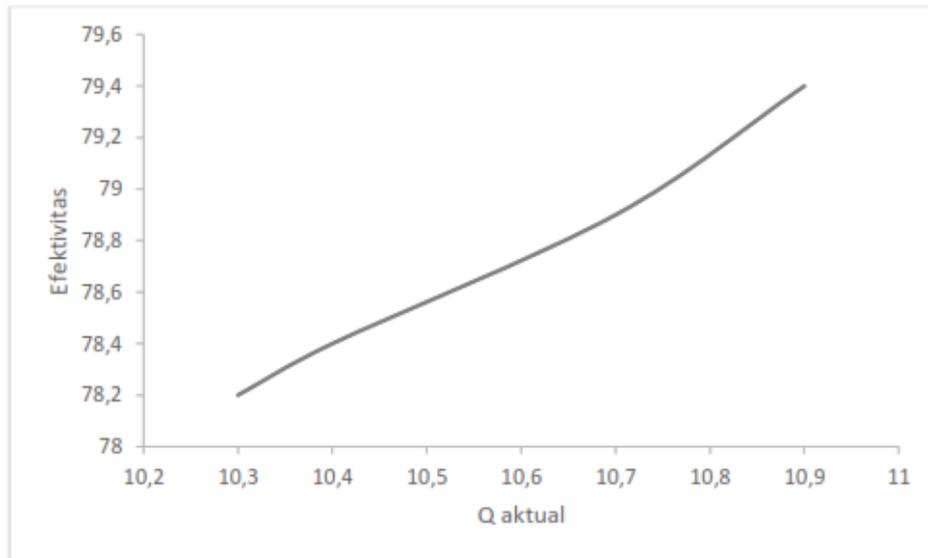
Waktu	Laju Alir exhaust steam (kg/jam)	Temperatur masuk (°C)	Laju alir cooled water (kg/jam)	Temperatur keluar (°C)
Minggu 1	349.779	41,17	9.643.575	38,30
Minggu 2	351.131	41,26	9.640.540	38,40
Minggu 3	353.953	41,55	9.634.310	38,70
Minggu 4	350.032	41,71	9.644.266	38,90

Efektivitas kondensor ditentukan berdasarkan persamaan yang terdapat pada bab metodologi menggunakan data kondisi operasi yang ada. Berikut disajikan data hitung nilai efektivitas kondensor *direct contact* tipe *jetspray*.

Tabel 4. Nilai Efektivitas Kondensor

Waktu	Temperatur masuk (°C)	Temperatur keluar (°C)	Efektivitas (%)
Minggu 1	41,17	38,30	78,2
Minggu 2	41,26	38,40	78,4
Minggu 3	41,55	38,70	78,9
Minggu 4	41,71	38,90	79,4

Hasil perhitungan efektivitas kondensor kemudian dilakukan analisis berdasarkan kondisi operasi yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 4. Perbandingan Efektivitas terhadap Q aktual Kondensor

Efektivitas kondensor digunakan untuk mengetahui kinerja kondensor berdasarkan laju masa input berupa *cooled water* dan *exhaust steam* dengan laju masa keluar berupa kondensat (*water brine*). Gambar 3 menunjukkan terjadi kenaikan nilai efektivitas pada setiap minggu diikuti dengan kenaikan nilai Q aktual. Hal ini dikarenakan kondisi operasi kondensor dijaga pada tekanan vakum (0,08 bar) sehingga berpengaruh terhadap nilai entalpi yang rendah dan selisih nilai temperatur keluar - masuk *cooled water* semakin tinggi. Nilai efektivitas dengan trend kenaikan setiap minggu ini berkorelasi dengan nilai temperatur *exhaust steam* yang cenderung meningkat setiap minggu yang dapat dilihat pada tabel 4.

Nilai efektivitas tertinggi kondensor sebesar 79,4% tercapai pada saat nilai Q aktual 10,891°C terjadi pada minggu ke empat. Nilai efektivitas terendah kondensor sebesar 78,2% tercapai pada saat nilai Q aktual sebesar 10,306°C terjadi pada minggu pertama. Nilai laju alir *cooled water* maupun *exhaust steam* berkorelasi secara tidak langsung terhadap nilai efektivitas. Laju alir fluida yang semakin kecil dapat meningkatkan temperatur kondensat, begitu juga sebaliknya (Lekic, 1980). Keefektifan merupakan rasio antara laju perpindahan panas yang terjadi dalam kondensor dengan laju perpindahan panas maksimum yang terjadi pada kondensor tersebut. (Clinton, 2020). Nilai selisih temperatur *cooled water* terhadap temperatur *water brine* yang semakin tinggi menunjukkan proses perpindahan panas dapat berjalan semakin maksimal.

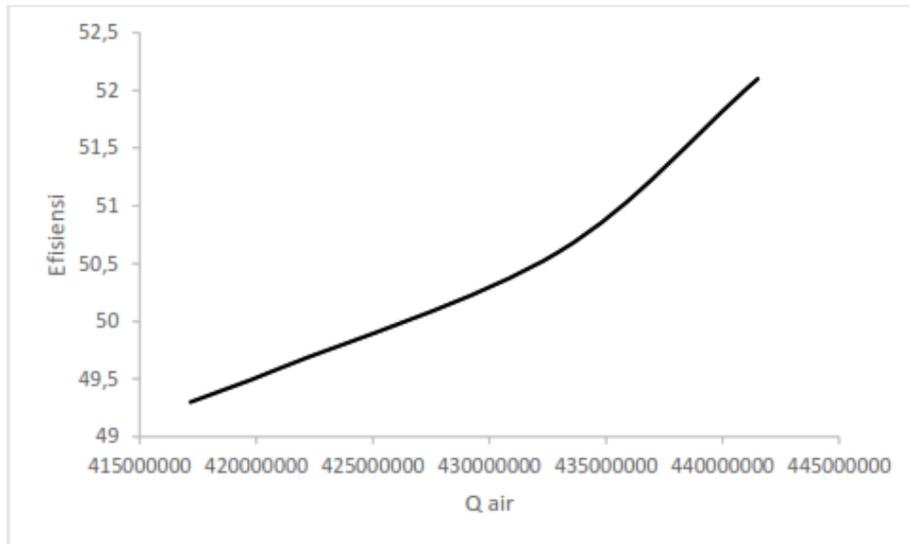
3.3. Analisis Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Efisiensi Termal Kondensor

Energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan kondensor harus dievaluasi untuk melakukan penghematan biaya melalui analisis tingkat efisiensi. Nilai efisiensi kondensor yang diketahui dapat digunakan untuk mengoptimalkan kinerja dari kondensor atau dapat digunakan untuk menentukan apakah alat harus dilakukan proses *maintenance*. Efisiensi kondensor dapat dicari dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada metodologi berdasarkan variable – variable terkait. Berikut disajikan nilai hasil hitung efisiensi kondensor.

Tabel 5. Nilai Efisiensi Kondensor

Waktu	Laju Alir exhaust steam (kg/jam)	Laju alir cooled water (kg/jam)	Efisiensi (%)
Minggu 1	349.779	9.643.575	49,3
Minggu 2	351.131	9.640.540	49,6
Minggu 3	353.953	9.634.310	50,6
Minggu 4	350.032	9.644.266	52,1

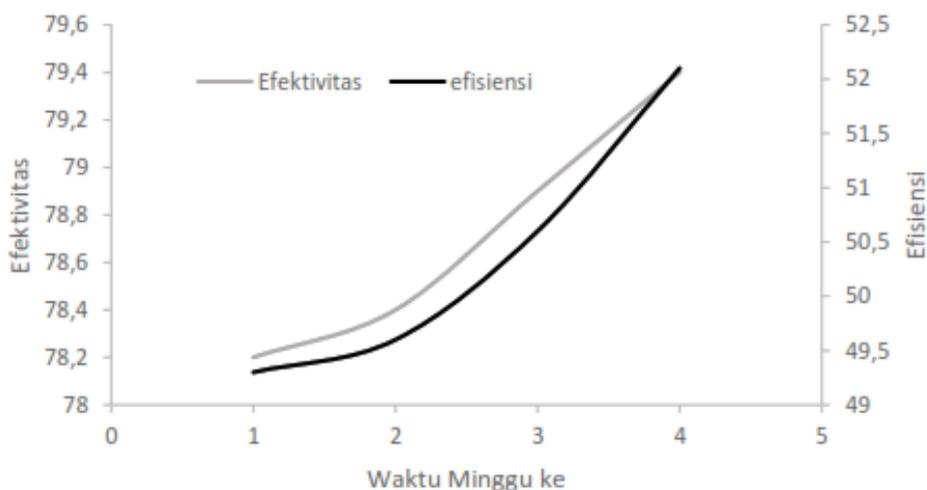
Hasil perhitungan efisiensi kondensor kemudian dilakukan analisis berdasarkan laju alir dan temperatur yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



Gambar 5. Perbandingan Efisiensi terhadap Q_{air} Kondensator

Gambar 4 menunjukkan hubungan nilai efisiensi terhadap laju alir dan temperatur yang diwakili oleh Q_{air} berbanding lurus. Nilai efisiensi termal kondensator menunjukkan trend peningkatan setiap minggu. Hal ini berkorelasi dengan nilai laju alir *cooled water* yang secara keseluruhan cenderung meningkat setiap minggu yang dapat dilihat pada tabel 3. Nilai Q_{air} sebesar 441.149.944,2 kJ/h menghasilkan efisiensi termal kondensator 52,1% yang terjadi pada minggu ke 4. Nilai Q_{air} sebesar 417.424.072,5 kJ/h menghasilkan efisiensi termal kondensator 49,3% yang terjadi pada minggu pertama. Hal ini membuktikan bahwa semakin tinggi nilai Q_{air} yang dihasilkan saat kondensator beroperasi dapat meningkatkan nilai efisiensi kondensator.

Nilai laju alir *cooled water* dan perbedaan temperatur masuk dan keluar kondensator yang semakin tinggi berpengaruh nyata terhadap nilai efisiensi termal kondensator. Aliran kalor terjadi dari fluida dengan temperature lebih tinggi ke temperatur lebih rendah dengan atau melalui perantara. Jumlah nilai dari Q_{lepas} berkorelasi dengan nilai Q_{terima} pada alat penukar kalor. Hal ini disebabkan karena nilai Q_{kond} sebagai pelepas panas dapat melepaskan panasnya kepada Q_{air} sebagai penyerap panas. Efisiensi kondensator semakin besar ketika nilai Q_{air} dan $Q_{kondensator}$ memiliki selisih semakin kecil. Hal ini menandakan bahwa proses perpindahan panas dapat terjadi secara maksimal dengan diserapnya kalor yang terdapat pada Q_{air} menuju ke $Q_{kondensator}$. Nilai efisiensi terhadap efektivitas kemudian dilakukan analisis yang ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 6. Perbandingan Nilai Efisiensi dan Efektivitas Kondensator

Gambar 5 menunjukkan nilai efisiensi termal berbanding lurus terhadap nilai efektivitas kondensator. Efisiensi termal kondensator menunjukkan nilai lebih rendah dibanding efektivitas jika ditinjau dari hubungan keduanya dari grafik diatas. Hal ini dikarenakan kondensator pada PT PGE Ulubelu beroperasi pada tekanan vakum sehingga berpengaruh terhadap nilai entalpi pengembunan. Nilai entalpi pengembunan semakin tinggi ketika kondensator

beroperasi pada temperatur rendah yang berimplikasi terhadap nilai Q kondensor. Nilai efisiensi kondensor rendah akibat dari nilai $Q_{\text{kondensor}}$ lebih tinggi sebagai fluida pelepas kalor dibanding dengan Q_{air} sebagai fluida penyerap kalor. Hal ini dikarenakan terjadinya kenaikan tekanan pada kondensor sehingga mempengaruhi tingkat kevacuman pada kondensor. Nilai kevacuman yang menurun akan berdampak terhadap kecepatan perpindahan panas antara Q_{air} dan $Q_{\text{kondensor}}$ sehingga akan menurunkan nilai efisiensi termal kondensor. Penurunan temperatur *steam* merupakan akibat dari nilai efektivitas yang meningkat jika ditinjau dari persamaan matematis yang digunakan. Nilai efektivitas tertinggi kondensor sebesar 79,4% dicapai pada minggu ke empat berdasarkan hasil pengolahan data dan perhitungan yang digunakan. Nilai efektivitas kondensor sebesar 78,2% merupakan nilai terendah jika dilihat dari data hitung ketika kondensor beroperasi selama satu bulan. Nilai efektivitas tertinggi dicapai ketika kondensor menerima laju alir *exhaust steam* 350.032 kg/jam dengan laju alir *cooled water* 9.644.266 kg/jam.

Nilai efisiensi termal sebesar 52,1% merupakan yang tertinggi dibanding dengan yang lain tercapai pada minggu ke 4 ketika kondensor menerima *exhaust steam* pada temperatur 41,71°C dan temperature kondensat sebesar 38,90°C. Hal ini membuktikan bahwa ketika selisih antara fluida dingin dan fluida panas semakin tinggi, maka kecepatan perpindahan kalor semakin meningkat yang berdampak terhadap nilai efisiensi termal.

Kesimpulan

Nilai temperatur air pendingin (T_{ci}) terhadap temperatur *water brine* (T_{co}) pada perhitungan Q_{aktual} sangat berpengaruh terhadap nilai efektivitas. Temperatur *cooled water* yang semakin rendah berdampak terhadap peningkatan nilai efektivitas kondensor. Nilai laju alir dan temperatur berpengaruh nyata terhadap nilai efisiensi termal kondensor. Nilai Q_{air} yang semakin tinggi berkorelasi terhadap nilai efisiensi termal kondensor. Hubungan antara efektivitas dan efisiensi berkorelasi berbanding lurus yang ditunjukkan dengan nilai efektivitas lebih tinggi dibandingkan efisiensi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas Akamigas Balongan atas dukungan baik secara moril maupun finansialnya pada penelitian ini dan mahasiswa Akamigas Balongan dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada PT Pertamina Ulubelu yang bersedia menyediakan waktu dan tempat.

Daftar Notasi

ϵ	: efektivitas kondensor (%)
T_{co}	: Temperatur output cooled water [°C]
T_{ci}	: Temperatur input cooled water [°C]
T_{hi}	: Temperatur exhaust steam input [°C]
T_{ho}	: Temperatur exhaust steam output [°C]
η	: efisiensi termal kondensor [%]
m	: laju alir masa cooled water [kg/h]
cp	: kapasitas panas cooled water [kJ/kg]
h_1 - h_2	: entalpi penguapan exhaust steam [kJ/kg]

Daftar Pustaka

- Apriyanti, V. (2015). Perancangan Perangkat Eksperimen Kondensasi Kontak Langsung dengan Keberadaan Non Condensable Gas. Banjarmasin: Fakultas Teknik Mesin Dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung. *Proceeding seminar Nasional Tahun Tahunan Teknik Mesin Xiv (snttm Xiv)*: 62.
- Celata, G. P., Cumo, M., D'Annibale, F., Farello, G. E. (1991). Direct Contact Condensation of Steam on Droplets. *International Journal Multiphase Flow*, 191-211
- Dippipo, R. (2012). Geothermal Power Plant: Principle, Application and Case Study, Elsevier Science, Oxford, UK.
- Gokcen, G., Yildirim, N. (2008). Effect of Non-condensable Gases on Geothermal Power Case Study: Kizildere Geothermal Power Plant-Turkey. *International Journal of Exergy*, 684-695
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. (2005). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5th ed, John Wiley & Son Pte. Ltd. Singapore.
- Lee, H., Kim, M., Park, S. (2001). The Effect of Non-Condensable Gas on Direct Contact Condensation of Steam/Air Mixture. *Journal of the Korean Nuclear Society*, 585-595.
- Lekic, A., Ford, J. D. (1980). Direct Contact Condensation of Vapour on A Spray of Subcooled Liquid Droplets. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1531-1537.
- Neny, M.S. (2018). Teknik Geotermal: Institut Teknologi Bandung
- Clinton, S. (2020). Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi: Politeknik Energi dan Mineral Akamigas.

- Idawati, S. (2016). Pengaruh Suhu Terhadap Perpindahan Panas Pada Material Yang Berbeda. Pogram Studi Fisika, Fakultas Sains. Universitas Cokroaminoto Palopo
- Erich, H. (2006).
Wahyuningsih, R., Sitorus, K. (2005). Pengawasan Eksplorasi dan Eksploitasi Lapangan Panas Bumi yang Telah Beroperasi. Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral, Jakarta.
- Zarrouk, J. S. (2012). Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review, Department of Engineering Sciences, University of Auckland, New Zealand.

Analisis Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Konstruksi Bangunan Gedung dengan Tahap HIRADC

Ni Kadek Sri Ebtha Yuni¹, I Nyoman Suardika², I Wayan Sudiasa³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bali, Badung, Bali

ebthayuni@pnb.ac.id¹, nsuardika@gmail.com², sudiasawayan@yahoo.com³

Abstrak

Salah satu risiko yang terjadi pada proyek konstruksi bersumber dari aspek keselamatan dan kesehatan kerja. Oleh karena itu perlu dilakukan identifikasi terhadap risiko yang mungkin terjadi dan menentukan pengendalian agar risiko tersebut bisa diminimalisasi. Penelitian dilakukan pada proyek konstruksi gedung pada pekerjaan struktur dan arsitektur. Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat 36 risiko yang berada pada tingkat prioritas 1 yang menyebabkan dampak kematian dan cedera permanen, prioritas tingkat 2 sebanyak 20 risiko yang masuk dalam kategori sedang, dan prioritas tingkat 3 sebanyak 26 risiko yang masuk dalam kategori rendah dan ringan. Adapun urutan prioritas utama pekerjaan yang harus dikendalikan adalah pekerjaan dinding dan plat lantai dasar basement, pekerjaan atap, pekerjaan dinding, pekerjaan dinding dan kolom struktural, struktur beton bertulang pondasi dan lantai, pekerjaan railing, struktur kolam renang, pekerjaan plafond, dan pekerjaan pintu jendela. Risiko-risiko tersebut dikendalikan dengan rekayasa teknik dengan metode kerja yang baik, mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat, APK dengan memberikan rambu peringatan, APD dengan menggunakan sepatu kerja, helm, sarung tangan, *safety belt*, sepatu kerja.

Kata kunci: proyek konstruksi, K3, risiko proyek, konstruksi gedung

Abstract

One of the risks that occur in construction projects comes from aspects of occupational safety and health. Therefore, it is necessary to identify the risks that may occur and determine controls so that these risks can be minimized. The research was conducted on building construction projects on structural and architectural works. From the research there are 36 risks the level of priority 1 that causes the impact of death and permanent injury, priority level 2 as many as 20 risks that fall into the medium category, and priority level 3 as much as 26 risks that fall into the low and mild category. The main priority sequence of work that must be controlled is basement walls and floor plates, roof, wall, structural columns, reinforced concrete structures for foundations and floors, railing work, swimming pool structures, ceiling work, and door window. These risks are controlled by engineering technique with methods, regulating electric lines, working in good lighting, conducting periodic checks on electrical installations and tools, by providing warning signs, using work shoes, helmets, gloves, safety belt, work shoes.

Keywords: construction projects, occupational health and safety, project risks, building construction projects

1. Pendahuluan

Berdasarkan pada penelitian Setiawan, dkk (2016), kecelakaan kerja yang sering terjadi adalah tersengat listrik, tertimpa benda dan terjatuh dari ketinggian. Kecelakaan yang terjadi sangat berbahaya karena mengancam nyawa seseorang. Bangunan gedung terdiri dari kelompok pekerjaan Struktur, Arsitektur, Mekanikal dan Elektrikal, *Plumbing*, Interior, *Landscape*, dan pekerjaan tambahan lainnya. Masing-masing kelompok pekerjaan memiliki risiko kesehatan dan keselamatan kerja yang berbeda-beda. Kesehatan kerja merupakan suatu unsur yang berkaitan dengan lingkungan kerja dan pekerjaan yang mempengaruhi produktivitas kerja (Tarwaka, 2014). Sumber bahaya berasal dari manusia itu sendiri, peralatan yang digunakan, material, metode kerja dan lingkungan. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis yang spesifik terhadap semua item pekerjaan agar tercapai tujuan proyek yaitu tepat biaya, mutu, waktu dan tertib administrasi. Luaran dari penelitian ini adalah berupa identifikasi risiko, dan pengendalian risiko. Berdasarkan hasil yang diperoleh, diharapkan dapat memberikan informasi kepada masyarakat umum dan pelaku jasa konstruksi tentang bahaya dalam proyek konstruksi.

Info Makalah:

Dikirim : 07-30-20;
Revisi 1 : 02-06-21;
Revisi 2 : 04-15-21;
Revisi 3 : 06-21-21;
Diterima : 06-23-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +6281916490820
e-mail : ebthayuni@pnb.ac.id

pengendaliannya.

2. Metode

Rancangan Penelitian

Penelitian dilakukan pada dua proyek pembangunan gedung swasta di Kabupaten Badung. Metode yang digunakan adalah deskriptif. Gedung ini dijadikan objek penelitian karena merupakan gedung bertingkat dengan item pekerjaan yang kompleks dan melibatkan banyak disiplin ilmu. Pengumpulan dilakukan melalui observasi dan wawancara kepada pihak proyek yang terlibat di dalamnya. Hasilnya adalah berupa opini tentang kecelakaan kerja yang terjadi serta cara pengendaliannya.

Tahapan Penelitian

Secara singkat, tahapan-tahapan dalam melaksanakan penelitian ini adalah:

- (1.) Melakukan studi pustaka terhadap penelitian-penelitian sebelumnya, jurnal, makalah, artikel dan media internet.
- (2.) Melakukan wawancara dan obeservasi ke lapangan untuk memperoleh identifikasi risiko pekerjaan yang mungkin terjadi.
- (3.) Menyusun kuesioner berdasarkan identifikasi yang diperoleh dari wawancara dan obeservasi.
- (4.) Penyebaran kuesioner. Penyebaran dilakukan 2 tahap, yaitu survey pendahuluan dan penyebaran lanjutan.
- (5.) Melakukan tabulasi data hasil dari penyebaran kuesioner untuk memperoleh penilaian terhadap risiko yang terjadi.
- (6.) Menyusun identifikasi risiko berdasarkan hasil jawaban responden.
- (7.) Menentukan pengendalian risiko berdasarkan hirarki penilaian risiko yaitu eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administrasi, dan penggunaan alat pelindung diri

Teknik Pengumpulan Data

Data sekunder berupa identifikasi awal risiko yang diperoleh melalui jurnal dan literature lainnya. Identifikasi risiko merupakan hal yang paling awal dilakukan dalam manajemen risiko (Norken, 2015). Data primer diperoleh melalui observasi dan wawancara dengan pihak-pihak yang terlibat di proyek. Total responden yang digunakan adalah 25 orang, terdiri dari pihak kontraktor pelaksana lapangan: *project manager* 2 orang, *engineer* 4 orang, *supervisor* 10 orang, *safety officer* 4 orang, konsultan Pengawas selaku tim yang mengontrol pekerjaan lapangan berjumlah 5 orang. Dari hasil wawancara dan observasi hasil yang diperoleh adalah identifikasi risiko keselamatan dan kesehatan kerja pada tahap pelaksanaan proyek. Data untuk mendapatkan penilaian dan opini responden terhadap risiko yang teridentifikasi, dilakukan dengan penyebaran kuesioner dengan orang-orang yang ditunjuk sebagai responden.

Analisis Data

Untuk penilaian terhadap risiko digunakan PERMEN PU No. 05-PRT-M-2014 nilai frekuensi atau kemungkinan terjadi yaitu nilai 1 (satu) jarang terjadi dalam kegiatan konstruksi, nilai 2 (dua) kadang-kadang terjadi dalam kegiatan konstruksi, nilai 3 (tiga) sering terjadi dalam kegiatan konstruksi. Nilai konsekuensi atau tingkat keparahan yaitu 1 (ringan), 2 (sedang), 3 (berat). Pengendalian risiko yang teridentifikasi ini dilakukan dengan hirarki pengendalian risiko, yaitu eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administrasi, dan penggunaan alat pelindung diri. Adapun pengendalian dengan hirarki adalah (a) eliminasi adalah menghilangkan kondisi berbahaya, (b) substitusi adalah penggantian suatu tindakan dan kondisi yang berbahaya, (c) rekayasa adalah menggunakan teknologi dan metode kerja yang dipantau serta diawasi dengan ketat untuk meminimalisir risiko, (d) administratif prosedur atau metode yang terarah, (e) APD adalah penggunaan alat pelindung diri yang tepat, agar pekerja terlindung dari paparan bahaya dan risiko.

Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian tentang K3 pada proyek gedung adalah seperti tabel berikut:

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Pekerjaan	Risiko	Sumber
1	Galian tanah	Tanah longsor/runtuhnya dinding samping	(Sari, 2016)
2	Penulangan	Tangan pekerja terkena barbender, Terjatuh dari ketinggian, Terluka karena besi	(Sari, 2016)
3	Pengecoran	Pekerja jatuh dari ketinggian, Pekerja terjatuh saat mendirikan cetakan beton	(Sari, 2016)
4	Pemasangan penutup atap	Terjatuh dari ketinggian	(Sari, 2016)
5	Pekerjaan finishing	Tersengat listrik mesin, Terkena mesin finishing, Potongan partikel material mengenai mata	(Sari, 2016)
6	Pekerjaan dinding	terjatuh dari ketinggian, tertimpa material, terjepit, tergores, iritasi, tersengat listrik	(Abryandoko, 2018).
7	Pekerjaan struktur atas	Terjatuh dari ketinggian	(Sari, 2016)
8	Pekerjaan pondasi	Adanya pekerja yang sakit atau mengalami kecelakaan hingga terjadi kematian	(Astiti, 2014)
9	Pekerjaan gedung pada masa pemeliharaan	Kecelakaan pada fasilitas umum dalam masa pemeliharaan.	(Manuasri, 2011)
10	Pekerjaan pemipaan	Terganggunya sistem pernapasan	(Purba, 2015)
11	Pekerjaan struktur, arsitektur	Kerusakan peralatan	(Rumimper, 2015)

3. Hasil dan Pembahasan

Hazard Identifikation/ Identifikasi Bahaya

Identifikasi bahaya diperoleh melalui wawancara dengan pelaksana K3 di lapangan dan juga *project manager*. Adapun *Hazard Identifikation/* identifikasi bahaya diperoleh melalui adalah seperti table berikut.

Tabel 2. *Hazard Identifikation/* Identifikasi Bahaya

No	Uraian Pekerjaan	Sumber Bahaya	Identifikasi Bahaya
A	PEKERJAAN TANAH		
		Galian Tanah	Galian longsor Terperosok ke lubang galian
		Buang Tanah dan Urugan	Tertimbun akibat urugan
B	STRUKTUR BETON BERTULANG PONDASI DAN LANTAI		
		Urugan pasir tebal 10 cm	Terjatuh saat loading unloading Dehidrasi bekerja di siang hari
		Lantai kerja tebal 5 cm	Terjatuh saat loading unloading Dehidrasi bekerja di siang hari
		Pembesian pondasi	Terjepit oleh besi Terpotong barbender/ bar cutter Tertusuk besi Tertimpa besi Tersengat listrik
		Pemasangan bekisting batako	Terjepit material batako Tertimpa material batako
		Pengecoran Pondasi	Tertimpa beton
		Penyemprotan Anti Rayap	Terpapar bahan kimia
C	PEK. DINDING & PELAT LANTAI DASAR BASEMENT		
		Urugan Limestone tebal 2,3 m	Tertimbun limestone Tergilas alat pemadat Tertabrak alat berat
		Pembesian dinding penahan tanah	Terjepit oleh besi Terpotong barbender/ bar cutter Tertusuk besi Tertimpa besi Tersengat listrik
		Pemasangan Bekisting Dinding	Terjepit bekisting/ sklafolding Tertimpa bekisting/ skafolding Tertusuk paku Terperosok dari ketinggian
		Pengecoran Dinding	Terjatuh dari ketinggian Tertimpa beton
		Waterproofing Coating	Terjatuh dari ketinggian Tertusuk skafolding Terpapar bahan kimia
D	DINDING DAN KOLOM STRUKTURAL		
		Pemasang Bekisting Kolom, Plat & Balok	Terjepit bekisting/ sklafolding Tertusuk paku Terjatuh dari ketinggian Tertimpa bekisting/ skafolding
		Pembesian Kolom, Balok, & Plat	Terpotong barbender/ bar cutter Tertusuk besi Tertimpa besi Tersengat listrik Terjatuh dari ketinggian
		Pengecoran Kolom, Balok & Plat	Tertimpa beton
E	STRUKTUR KOLAM RENANG		
		Pembesian pondasi	Terjepit besi Terpotong barbender/ bar cutter Tertusuk besi Tertimpa besi

No	Uraian Pekerjaan	Sumber Bahaya	Identifikasi Bahaya
			Tersengat listrik
		Pemasangan bekisting batako	Terjepit batako
		Pengecoran Pondasi	Tertimpa beton
F	PEKERJAAN DINDING		
		Pemasangan Dinding Bata	Terjepit bata Terjatuh dari ketinggian
		Plesteran Dinding Bata Ringan	Tertimpa spesi Terjatuh dari ketinggian
		Acian Dinding Bata Ringan	Tertimpa acian Terjatuh dari ketinggian
		Pengecatan Dinding	Terjatuh dari ketinggian Terpapar bahan kimia
G	PEKERJAAN PINTU & JENDELA		
		Pemasangan Pintu dan Jendela	Terjepit pintu/ jendela Tertimpa pintu/ jendela Tersengat listrik
H	PEKERJAAN PLAFOND		
		Pemasangan Plafond termasuk Rangka	Terjepit rangka Tertimpa plafond dan rangka Terjatuh dari ketinggian Tertusuk bor Tersengat listrik
I	FINISHING LANTAI		
		Pemasangan keramik lantai Floor Hardener	Tersengat listrik Tersengat listrik Terpapar bahan kimia
J	PEKERJAAN RAILING		
		Pemasangan Railing	Tertusuk holo Tersengat listrik Terpotong gerinda Terjatuh dari ketinggian
K	PEKERJAAN ATAP		
		Pemasangan rangka atap baja	Tertusuk paku Tersengat listrik Terpotong gerinda Terjatuh dari ketinggian Terjepit rangka baja
		Pemasangan penutup atap	Tertusuk rangka baja Tersengat listrik Terpotong gerinda Terjatuh dari ketinggian

Berdasarkan tabel di atas, diperoleh 82 identifikasi bahaya dari 29 sumber bahaya K3 pada pekerjaan Struktur dan Arsitektur.

Risk Assesment / Penilaian Risiko

Analisis data untuk mengetahui risiko yang signifikan pada pekerjaan struktur dan arsitektur bangunan gedung dilakukan frekuensi dan konsekuensi yang teridentifikasi dari penilaian responden melalui kuesioner. Berdasarkan jawaban responden yang dilihat dari modus, maka penilaian risiko diperoleh dari hasil perkalian modus jawaban responden terhadap frekuensi dengan modus jawaban responden terhadap konsekuensi, dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Risk Assesment/ Penilaian Risiko

No	Sumber Risiko	Identifikasi Risiko	Modus Skala Frekuensi	Modus Skala Konsekuensi	Nilai Risiko	Kategori
	PEKERJAAN STRUKTUR					
A	PEKERJAAN TANAH					
1	Galian Pondasi	Galian longsor	2	2	4	Sedang
		Terperosok ke lubang galian	2	2	4	Sedang
2	Buang Tanah dan Urugan	Tertimbun akibat urugan	1	2	2	Rendah

No	Sumber Risiko	Identifikasi Risiko	Modus Skala Frekuensi	Modus Skala Konsekuensi	Nilai Risiko	Kategori
B STRUKTUR BETON BERTULANG PONDASI DAN LANTAI						
1	Urugan pasir tebal 10 cm	Terjatuh saat loading unloading	1	1	1	Ringan
		Dehidrasi bekerja di siang hari	2	2	4	Sedang
2	Lantai kerja tebal 5 cm	Terjatuh saat loading unloading	1	1	1	Ringan
		Dehidrasi bekerja di siang hari	2	2	4	Sedang
3	Pembesian pondasi	Terjepit oleh besi	2	1	2	Rendah
		Terpotong barbender/ bar cutter	1	3	3	Sedang
		Tertusuk besi	1	2	2	Rendah
		Tertimpa besi	2	2	4	Sedang
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
4	Pemasangan bekisting batako	Terjepit material batako	2	1	2	Rendah
		Tertimpa material batako	2	2	4	Sedang
5	Pengecoran Pondasi	Tertimpa beton	2	2	4	Sedang
6	Penyemprotan Anti Rayap	Terpapar bahan kimia	1	3	3	Sedang
C PEK. DINDING & PELAT LANTAI DASAR BASEMENT						
1	Urugan Limestone tebal 2,3 m	Tertimbun limestone	1	2	2	Rendah
		Tergilas alat pematik	1	3	3	Sedang
		Tertabrak alat berat	1	3	3	Sedang
2	Pembesian dinding penahan tanah	Terjepit oleh besi	2	1	2	Rendah
		Terpotong barbender/ bar cutter	1	3	3	Sedang
		Tertusuk besi	1	2	2	Rendah
		Tertimpa besi	2	2	4	Sedang
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
3	Pemasangan Bekisting Dinding	Terjepit bekisting/ sklafolding	2	1	2	Rendah
		Tertimpa bekisting/ skafolding	2	2	4	Sedang
		Tertusuk paku	1	2	2	Rendah
		Terperosok dari ketinggian	2	2	4	Sedang
4	Pengecoran Dinding	Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
		Tertimpa beton	2	2	4	Sedang
5	Waterproofing Coating	Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
		Tertusuk skafolding	1	2	2	Rendah
		Terpapar bahan kimia	1	3	3	Sedang
D DINDING DAN KOLOM STRUKTURAL						
1	Pemasang Bekisting Kolom, Plat & Balok	Terjepit bekisting/ sklafolding	2	1	2	Rendah
		Tertusuk paku	1	2	2	Rendah
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
		Tertimpa bekisting/ skafolding	2	1	2	Rendah
2	Pembesian Kolom, Balok, & Plat	Terpotong barbender/ bar cutter	1	3	3	Sedang
		Tertusuk besi	1	2	2	Rendah
		Tertimpa besi	2	2	4	Sedang
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
3	Pengecoran Kolom, Balok & Plat	Tertimpa beton	2	2	4	Sedang
E STRUKTUR KOLAM RENANG						
1	Pembesian pondasi	Terjepit besi	2	1	2	Rendah
		Terpotong barbender/ bar cutter	1	3	3	Sedang
		Tertusuk besi	1	2	2	Rendah

No	Sumber Risiko	Identifikasi Risiko	Modus Skala Frekuensi	Modus Skala Konsekuensi	Nilai Risiko	Kategori
		Tertimpa besi	2	2	4	Sedang
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
2	Pemasangan bekisting batako	Terjepit batako	2	1	2	Rendah
3	Pengecoran Pondasi	Tertimpa beton	2	2	4	Sedang
PEKERJAAN ARSITEKTUR						
F PEKERJAAN DINDING						
1	Pemasangan Dinding Bata Ringan	Terjepit bata	2	1	2	Rendah
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
2	Plesteran Dinding Bata Ringan	Tertimpa spesi	2	2	4	Sedang
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
3	Acian Dinding Bata Ringan	Tertimpa acian	2	2	4	Sedang
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
4	Pengecatan Dinding	Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
		Terpapar bahan kimia	1	3	3	Sedang
G PEKERJAAN PINTU & JENDELA						
1	Pemasangan pintu dan jendela	Terjepit pintu/ jendela	2	2	4	Sedang
		Tertimpa pintu/ jendela	1	2	2	Rendah
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
H PEKERJAAN PLAFOND						
1	Pemasangan plafond	Terjepit rangka	2	1	2	Rendah
		Tertimpa plafond dan rangka	1	2	2	Rendah
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
		Tertusuk bor	1	2	2	Rendah
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
I FINISHING LANTAI						
1	Pemasangan keramik lantai	Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
2	Floor Hardener	Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
		Terpapar bahan kimia	1	3	3	Sedang
J PEKERJAAN RAILING						
		Tertusuk holo	2	2	4	Sedang
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
		Terpotong gerinda	1	3	3	Sedang
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
K PEKERJAAN ATAP						
1	Pemasangan rangka atap baja	Tertusuk paku	2	2	4	Sedang
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
		Terpotong gerinda	1	3	3	Sedang
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
		Terjepit rangka baja	2	1	2	Rendah
2	Pemasangan penutup atap	Tertusuk rangka baja	1	2	2	Rendah
		Tersengat listrik	1	3	3	Sedang
		Terpotong gerinda	1	3	3	Sedang
		Terjatuh dari ketinggian	1	3	3	Sedang
Rata-Rata Kategori Penilaian					3	Sedang

Tabel di atas menjelaskan bahwa tingkat penerimaan risiko K3 diperoleh empat kategori, yaitu kategori ringan (nilai 1) sebanyak 2 risiko, kategori rendah (nilai 2) sebanyak 24 risiko, kategori sedang (nilai 3,4) sebanyak 56 risiko. Terdapat 36 risiko yang berada pada tingkat prioritas 1 yang masuk kategori sedang namun menyebabkan dampak kematian dan cedera permanen, prioritas tingkat 2 sebanyak 20 risiko yang masuk dalam kategori sedang yang dampaknya cedera parah namun tidak permanen, dan prioritas tingkat 3 sebanyak 26 risiko yang masuk dalam kategori rendah.

Risiko yang berada pada tingkat prioritas 1 yang harus dikendalikan berturut-turut yaitu pekerjaan dinding dan plat lantai dasar basement, pekerjaan atap, pekerjaan dinding, pekerjaan dinding dan kolom *structural*, struktur beton bertulang pondasi dan lantai, pekerjaan railing, struktur kolam renang, pekerjaan plafond, dan pekerjaan pintu jendela.

Determining Control / Pengendalian Risiko

Identifikasi tindakan pengendalian ini dilakukan dengan hirarki pengendalian risiko, yaitu eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administrasi, dan penggunaan alat pelindung diri.

- a. Eliminasi adalah menghilangkan kondisi berbahaya
- b. Substitusi adalah penggantian suatu tindakan dan kondisi yang berbahaya
- c. Rekayasa adalah menggunakan teknologi dan metode kerja yang dipantau serta diawasi dengan ketat untuk meminimalisir risiko
- d. Administratif prosedur atau metode yang terarah
- e. APD adalah penggunaan alat pelindung diri yang tepat, agar pekerja terlindung dari paparan bahaya dan risiko.

Adanya risiko-risiko yang masuk dalam kategori sedang, rendah, dan ringan akan sangat mempengaruhi pelaksanaan pekerjaan konstruksi gedung swasta di Kabupaten Badung. Penetapan skala prioritas ditetapkan berdasarkan item pekerjaan yang mempunyai tingkat risiko K3 tinggi, sedang dan kecil, dengan penjelasan: prioritas 1 (risiko tinggi), prioritas 2 (risiko sedang), dan prioritas 3 (risiko kecil). Apabila tingkat risiko dinyatakan tinggi, maka item pekerjaan tersebut menjadi prioritas utama (peringkat 1) dalam upaya pengendalian. Risiko dikatakan memiliki prioritas utama ketika mengancam keselamatan pekerja yang paling fatal adalah kematian. Adapun pengendalian risiko prioritas utama dengan hirarki pengendalian risiko yaitu eliminasi, substitusi, pengendalian teknis, administratif dan penyediaan alat keselamatan dan kesehatan kerja. Tahapan ini dilakukan dengan mempertimbangkan waktu penyelesaian pekerjaan. Adapun pengendalian risiko seperti tabel berikut.

Tabel 4. *Determining Control/* Pengendalian Risiko

No	Item Pekerjaan	Sumber Bahaya Prioritas Utama (1)	Identifikasi	Dampak	Pengendalian Risiko yang Direkomendasikan
1	PEK. DINDING & PELAT LANTAI DASAR BASEMENT				
		Urugan Limestone tebal 2,3 m	Tergilas alat pematat	Cedera permanen Meninggal dunia	APK (mengatur posisi alat, memberi rambu peringatan), Rekayasa (menyusun metode kerja yang tepat, menggunakan operator yang bersertifikat), mengajukan ijin bekerja.
			Tertabrak alat berat	Cedera permanen Meninggal dunia	APK (mengatur posisi alat, memberi rambu peringatan, menggunakan operator yang bersertifikat menyediakan pengatur lalu lintas), mengajukan ijin bekerja.
		Pembesian dinding penahan tanah	Terpotong barbender/ bar cutter	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (memberi pembatas pada meja kerja, bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi), APD (menggunakan sarung tangan)
			Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunakan sepatu kerja)
		Pengecoran Dinding basement	Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, pemasangan scaffolding yang kokoh), mengajukan ijin bekerja, APD (menggunakan <i>safety belt</i> , helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
		Waterproofing Coating	Terpapar bahan kimia	Cedera permanen Meninggal dunia	APD (menggunakan masker, sarung tangan, pakian tertutup, sepatu kerja)
2	PEKERJAAN ATAP				
		Pemasangan rangka atap baja	Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunakan sepatu kerja)
			Terpotong gerinda	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan)
			Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat berat untuk pengangkatan material), mengajukan ijin bekerja, APD (menggunakan <i>safety belt</i> , helm kerja, sepatu dan sarung tangan)

No	Item Pekerjaan	Sumber Bahaya Prioritas Utama (1)	Identifikasi	Dampak	Pengendalian Risiko yang Direkomendasikan
		Pemasangan penutup atap	Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunakan sepatu kerja)
	Terpotong gerinda		Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi, mengatur jam kerja), APD (menggunakan sarung tangan)	
	Terjatuh dari ketinggian		Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik), mengajukan ijin bekerja, APD (menggunakan <i>safety belt</i> , helm kerja, sepatu dan sarung tangan)	
3	PEKERJAAN DINDING				
		Pemasangan Dinding Bata Ringan	Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat bantu scaffolding yang dipasang kokoh), APK (pemasangan jarring pengaman) mengajukan ijin bekerja, APD (helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
		Plesteran Dinding Bata Ringan	Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat bantu scaffolding yang dipasang kokoh), APK (pemasangan jarring pengaman) mengajukan ijin bekerja, APD (helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
		Acian Dinding Bata Ringan	Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat bantu scaffolding yang dipasang kokoh), APK (pemasangan jarring pengaman) mengajukan ijin bekerja, APD (helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
		Pengecatan Dinding	Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat bantu scaffolding yang dipasang kokoh), APK (pemasangan jarring pengaman) mengajukan ijin bekerja, APD (helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
			Terpapar bahan kimia	Cedera permanen Meninggal dunia	APD (menggunakan masker, sarung tangan, pakian tertutup, sepatu kerja)
4	DINDING DAN KOLOM STRUKTURAL				
		Pemasang Bekisting Kolom, Plat & Balok	Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (memasang scaffolding dengan kokoh, bekerja dengan penerangan yang baik, membersihkan area lingkungan kerja), mengajukan ijin kerja, APD (menggunakan <i>safety belt</i> , sepatu kerja, helm, sarung tangan)
		Pembesian Kolom, Balok, & Plat	Terpotong barbender/ bar cutter	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (memberi pembatas pada meja kerja, bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi), APD (menggunakan sarung tangan)
			Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunakan sepatu kerja)
			Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat berat untuk pengangkatan material), mengajukan ijin bekerja, APD (menggunakan <i>safety belt</i> , helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
5	STRUKTUR BETON BERTULANG PONDASI DAN LANTAI				
		Pembesian pondasi	Terpotong barbender/ bar cutter	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (memberi pembatas pada meja kerja, bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi), APD (menggunakan sarung tangan)

No	Item Pekerjaan	Sumber Bahaya Prioritas Utama (1)	Identifikasi	Dampak	Pengendalian Risiko yang Direkomendasikan
			Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunkan sepatu kerja)
		Penyemprotan Anti Rayap	Terpapar bahan kimia	Cedera permanen Meninggal dunia	Mengajukan ijin bekerja, APD (menggunkan masker, sarung tangan, pakian tertutup, sepatu kerja)
6	FINISHING LANTAI				
		Pemasangan keramik lantai	Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunkan sepatu kerja)
		Floor Hardener	Terpapar bahan kimia	Cedera permanen Meninggal dunia	Mengajukan ijin bekerja, APD (menggunkan masker, sarung tangan, pakian tertutup, sepatu kerja)
7	PEKERJAAN RAILING				
		Pekerjaan railing	Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunkan sepatu kerja)
			Terpotong gerinda	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (memberi pembatas pada meja kerja, bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi), APD (menggunkan sarung tangan)
			Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat berat untuk pengangkatan material), mengajukan ijin bekerja, APD (menggunkan safety belt, helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
8	STRUKTUR KOLAM RENANG				
		Pembesian pondasi kolam	Terpotong barbender/ bar cutter	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (memberi pembatas pada meja kerja, bekerja dengan penerangan yang baik, menata lingkungan kerja agar rapi), APD (menggunkan sarung tangan)
			Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunkan sepatu kerja)
9	PEKERJAAN PLAFOND				
		Pemasangan plafond	Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APK (memberikan rambu peringatan) APD (menggunkan sepatu kerja)
			Terjatuh dari ketinggian	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (metode kerja yang baik, menggunakan alat berat untuk pengangkatan material), mengajukan ijin bekerja, APD (menggunkan safety belt, helm kerja, sepatu dan sarung tangan)
10	PEKERJAAN PINTU & JENDELA				
		Pemasangan pintu dan jendela	Tersengat listrik	Cedera permanen Meninggal dunia	Rekayasa (mengatur jalur listrik, memberikan rambu peringatan, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat), APD (menggunkan sepatu kerja)

Kesimpulan

Jumlah risiko pada pelaksanaan pekerjaan konstruksi gedung pada pekerjaan struktur dan arsitektur adalah 82 risiko, yang bersumber dari 29 jenis pekerjaan. Penilaian risiko keselamatan dan kesehatan kerja konstruksi bangunan gedung pada tahap pekerjaan struktur dan arsitektur diperoleh empat kategori, yaitu kategori ringan (nilai 1) sebanyak 2 risiko, kategori rendah (nilai 2) sebanyak 24 risiko, kategori sedang (nilai 3,4) sebanyak 56 risiko. Terdapat 36 risiko yang berada pada tingkat prioritas 1 yang menyebabkan dampak kematian dan cedera permanen, prioritas tingkat 2 sebanyak 20 risiko yang masuk dalam kategori sedang, dan prioritas tingkat 3 sebanyak 26 risiko yang masuk dalam kategori rendah dan ringan. Adapun urutan prioritas utama pekerjaan yang harus dikendalikan adalah pekerjaan dinding dan plat lantai dasar *basement*, pekerjaan atap, pekerjaan dinding, pekerjaan dinding dan kolom struktural, struktur beton bertulang pondasi dan lantai, pekerjaan railing, struktur kolam renang, pekerjaan *plafond*, dan pekerjaan pintu jendela. Pengendalian risiko berdasarkan hirarki pengendalian risiko dilakukan dengan Rekayasa teknik dengan metode kerja yang baik, mengatur jalur listrik, bekerja dengan penerangan yang baik, melakukan pengecekan berkala pada instalasi listrik dan alat, APK dengan memberikan rambu peringatan, APD dengan menggunakan sepatu kerja, helm, sarung tangan, *safety belt*, sepatu kerja.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada keluarga yang selalu memotivasi untuk menyelesaikan penelitian ini. Terima kasih pula penulis sampaikan kepada tim peneliti yang membantu survey pencarian data.

Daftar Pustaka

- Abryandoko, E.W. 2018. *Penilaian Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja dengan Menggunakan Metode HIRADC dan Safety Policy*. Universitas Bojonegoro.
- Astiti. N.P.M. 2014. *Analisis Risiko Pelaksanaan Pembangunan Jalan Tol Benoa-Bandara-Nusa Dua*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Manuasri, L.K.A. 2011. *Manajemen Risiko pada Proyek Konstruksi di Pemerintah Kabupaten Jembrana*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Norken, I Nyoman. 2015. *Pengantar Analisis Manajemen Risiko Proyek Konstruksi*. Denpasar: Udayana University Press.
- Purba, E.A., Monica, A.K.B. dkk. 2015. *Analisa Manajemen Risiko pada Proyek PDAM Semarang*. [Online] Tersedia di: <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkts>.
- Rumimper, R. R. 2015. *Analisis Resiko pada Proyek Konstruksi Perumahan di Kabupaten Minahasa Utara*. [Online] Tersedia di: <http://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jime/article/view/9966/9552>.
- Tarwaka. (2014), *Keselamatan dan Kesehatan Kerja Manajemen dan Implementasi K3 di Tempat Kerja*, Harapan Press, Surakarta.
- Sari.N. 2016. *Manajemen Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Pekerjaan Konstruksi*. Universitas Tanjungpura.
- Setiawan, P. F. 2014. *Manajemen Risiko Proyek Vale di PT. Multipanel Intermitra Mandiri*. [Online] Tersedia di: <http://e-journal.uajy.ac.id/5660/1/Jurnal.pdf>. [Diakses pada: 15 Januari 2016].

Evaluasi Kinerja Proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu Berdasarkan *Earned Value Analysis*

Ni Putu Indah Yuliana dan Ni Kadek Sri Ebtha Yuni

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bali, Badung, Indonesia

putuindah3107@pnb.ac.id, ebthayuni@pnb.ac.id

Abstrak

Peninjauan prestasi proyek peningkatan jaringan irigasi Tukad Petanu masih menggunakan konsep manajemen biaya tradisional sehingga evaluasi berdasarkan konsep nilai hasil perlu dilakukan. Tujuan penelitian adalah menganalisis kinerja biaya dan waktu proyek didasarkan konsep *earned value analysis*. Penelitian menggunakan deskriptif kuantitatif dengan *earned value analysis*. Berdasarkan hasil analisa, bulan ke-1 sampai bulan ke-8 nilai *Budgeted Cost Work Performance* (BCWP) ada di atas *Budgeted Cost Work Schedule* (BCWS) dan berakhir di titik yang sama di bulan ke-9 sehingga proyek dikategorikan berjalan lebih cepat 6,52% dari waktu rencana dan berakhir sesuai waktu rencana. Nilai *Actual Cost Work Performance* (ACWP) berada di bawah BCWP sehingga biaya aktual lebih kecil dari biaya rencana yaitu 21,14% dari biaya rencana. Analisis varians biaya dan waktu berdasarkan kumulatif bernilai positif (+), menunjukkan pekerjaan dilaksanakan lebih cepat dari jadwal dan biaya yang dikeluarkan lebih kecil dari anggaran. Indeks prestasi kinerja biaya dan waktu berdasarkan kumulatif memiliki nilai rata-rata *Cost Performance Index* (CPI) 1,21 dan rata-rata *Schedule Performance Index* (SPI) 1,02 sehingga proyek berjalan lebih cepat dari waktu rencana dan biaya lebih kecil dari anggaran rencana.

Kata kunci: *Earned Value Analysis*, *Budgeted Cost Work Schedule*, *Budgeted Cost Work Performance*, *Actual Cost Work Performance*

Abstract

The achievements review of Tukad Petanu irrigation network improvement project still uses traditional cost management concept so that the evaluation based on value analysis needs to be done. The purpose of the research's is to analyze project's cost and time performance based on earned value analysis. This research uses quantitative descriptive with earned value analysis. Based on analysis, from 1st to 8th month the value of Budgeted Cost Work Performance (BCWP) is above Budgeted Cost Work Schedule (BCWS) and ends at the same point in 9th month so it categorized run faster 6,52% of planned time and ends according to planned time. The Actual Cost Work Performance (ACWP) value is below the BCWP so the actual costs are less than planned costs, which is 21.14% of planned costs. Analysis of cost and time variance based on cumulative have a positive value (+), shows the work is run faster than planned and the costs are smaller than the budget. The cumulative cost and time performance index have an average Cost Performance Index (CPI) of 1.21 and an average Schedule Performance Index (SPI) of 1.02 so the project runs faster than planned time and costs are smaller than planned budget.

Keywords: *Earned Value Analysis*, *Budgeted Cost Work Schedule*, *Budgeted Cost Work Performance*, *Actual Cost Work Performance*

1. Pendahuluan

Indonesia adalah negara berkembang yang sedang giat melaksanakan pembangunan infrastruktur penunjang di segala bidang. Salah satu pembangunan infrastruktur yang banyak dilakukan adalah pembangunan di bidang konstruksi, baik itu jalan raya, gedung, bangunan air dan lain sebagainya. Perkembangan proyek yang pesat ini menjadi tolak ukur bagi para penyedia jasa untuk bersaing secara ketat dan bekerja profesional agar mendapatkan kepercayaan untuk melaksanakan pembangunan proyek konstruksi. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi pelaksanaan suatu proyek konstruksi dimana salah satunya adalah manajemen proyek konstruksi. Konsep dari manajemen proyek konstruksi adalah menyelesaikan proyek sesuai biaya, mutu dan waktu yang direncanakan. Namun, pada prakteknya proyek konstruksi memiliki keterbatasan sumber daya sehingga diperlukan peningkatan sistem pengelolaan proyek yang baik dan terintegrasi (Ahuja et al., 1994).

Perencanaan dan pengendalian waktu dan biaya menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari aspek manajemen konstruksi. Kinerja proyek selain dinilai dari kinerja kualitasnya, juga dapat dinilai prestasinya dari segi biaya dan waktu. Biaya yang dikeluarkan dan waktu yang digunakan untuk menyelesaikan suatu proyek dari tahap awal hingga berakhirnya proyek harus dapat diukur penyimpangannya terhadap rencana. Apabila terjadi penyimpangan biaya dan waktu yang signifikan maka hal tersebut menunjukkan pengelolaan proyek yang buruk. Adanya penilaian kinerja dari sisi biaya juga waktu akan memberikan kesempatan pada manager proyek untuk menetapkan kebijakan agar pekerjaan tetap terlaksana seperti rencana (Nurtsani dkk., 2017).

Info Makalah:

Dikirim : 05-13-20;

Revisi 1 : 06-19-20;

Diterima : 07-22-20.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-878-6245-1583

e-mail : putuindah3107@pnb.ac.id

Metode umum yang dipakai untuk mengendalikan biaya dan waktu adalah metode *earned value*. Metode *earned value* memakai komponen jadwal, biaya juga *progress* pekerjaan sehingga bisa menjadi peringatan dini apabila terjadi ketidaksesuaian kinerja proyek (Nurtsani dkk., 2017). Namun, masih banyak penyedia jasa yang tidak menggunakan konsep nilai hasil ini untuk menilai prestasi pekerjaan yang sedang dilakukan. Penyedia jasa cenderung hanya menggunakan manajemen biaya tradisional untuk menilai pekerjaan yang mereka kerjakan. Penelitian Sudipta (2013), berdasarkan analisis varians diperoleh estimasi biaya total hingga akhir pekerjaan adalah Rp 605.140.555,00 lebih kecil dari anggaran biaya proyek Rp 730.000.000., keuntungan yang diperoleh sebesar Rp 124.859.445,00 (17,1% dari anggaran biaya proyek) dan perkiraan total waktu sampai akhir proyek dapat diselesaikan sesuai dengan jadwal yang direncanakan yaitu 6 bulan. Berdasarkan penelitian Nurtsani, dkk (2017) hasil analisa *earned value* menunjukkan Proyek Pembangunan Jembatan Petuk 1 Ruas Jalan Lingkar Kota Kupang terlambat 30 minggu dan akibatnya biaya proyek membesar 206 juta. Penelitian Ghozali, dkk (2017) tentang Monitoring Proyek Rehabilitasi Saluran Irigasi Ngrejo dengan Metode Konsep Nilai Hasil Berdasarkan *Time Based* dan *Progress Based* menunjukkan biaya aktual yang dikeluarkan 41,89% lebih kecil dari biaya rencana. Nilai *cost variance* (CV) minggu ke-1 sampai ke-3 bernilai negatif (biaya yang keluar lebih besar dari rencana) dan minggu ke-4 sampai ke-9 bernilai positif (biaya keluar lebih kecil dari rencana). Nilai *schedule variance* (SV) minggu ke-1 hingga ke-8 memiliki nilai minus (berjalan lambat) dan minggu ke-9 bernilai 0 (selesai tepat waktu). Selain itu, penelitian terkait kinerja biaya dan waktu proyek oleh Febriani (2018) menunjukkan bahwa Proyek Pembangunan Gedung Auditorium IAIN Samarinda memiliki nilai *schedule performance index* (SPI) 0,853 dan *cost performance index* (CPI) 1,006 sehingga proyek mengalami keterlambatan 9,62% dari rencana waktu dimana biaya aktual lebih sedikit dari biaya rencana.

Proyek peningkatan jaringan irigasi Tukad Petanu merupakan salah satu proyek yang didanai oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat melalui unit kerjanya yaitu Balai Wilayah Sungai Bali-Penida. Proyek ini dilaksanakan untuk meningkatkan fungsi saluran irigasi sehingga memberikan dampak positif pada peningkatan intensitas tanam dan kesejahteraan petani. Namun, peninjauan prestasi proyek ini masih menggunakan konsep manajemen biaya tradisional sehingga perlu dilakukan analisis untuk mengevaluasi kinerja proyek dengan konsep nilai hasil untuk mengetahui kinerja dari biaya dan waktu pada saat proyek dikerjakan. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis kinerja biaya dan waktu proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu didasarkan pada konsep *earned value analysis*. Evaluasi kinerja biaya dan waktu dilakukan tiap bulan selama waktu pelaksanaan proyek. Penelitian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja biaya dan waktu tanpa melakukan analisis untuk memperkirakan waktu dan biaya untuk menyelesaikan proyek.

2. Metode

Manajemen Proyek Konstruksi

Proyek konstruksi adalah suatu kegiatan untuk mencapai hasil akhir yang ditentukan dan dilaksanakan secara berkelanjutan dengan melibatkan sumber daya periode waktu yang terbatas di suatu lokasi tertentu. Proyek konstruksi memiliki 3 (tiga) sifat yaitu unik, melibatkan sumber daya dan memerlukan organisasi. Proses penyelesaiannya berpegang pada tiga kendala (*triple constrain*) yaitu sesuai waktu yang direncanakan, sesuai biaya yang dianggarkan dan sesuai spesifikasi yang ditetapkan. Manajemen proyek konstruksi adalah seluruh kegiatan perencanaan, pengaturan dan pengendalian pelaksanaan suatu proyek dari awal hingga akhir sehingga tercapai proyek yang tepat waktu, tepat mutu dan tepat biaya (Ervianto, 2005). Lingkup kegiatan dari perencanaan, pengaturan dan pengendalian suatu proyek adalah siklus yang saling tergantung satu sama lainnya yang akan terus terulang dimulai dari adanya ide proyek sampai berakhirnya pekerjaan konstruksi (Ghozali dkk., 2017). Manajemen proyek mempunyai fungsi diantaranya menjaga kesesuaian antara perencanaan dan pelaksanaan, memantau prestasi dan kemajuan proyek, mengantisipasi adanya perubahan kondisi lapangan dan mengatasi keterbatasan waktu pelaksanaan.

Metode Nilai Hasil (*Earned Value Analysis*)

Metode nilai hasil adalah metode yang dipakai untuk menganalisis kesesuaian anggaran yang harus dikeluarkan dibandingkan dengan kemajuan pekerjaan yang berhasil diselesaikan (Soeharto, 2001). Jika dilihat dari besaran persentase pekerjaan yang telah berhasil diselesaikan, dapat diartikan bahwa metode ini dipakai untuk menghitung besaran persentase pekerjaan suatu proyek yang berhasil diselesaikan pada waktu tertentu didasarkan pada besaran anggaran yang disediakan untuk penyelesaian pekerjaan proyek tersebut. Analisis yang dilakukan dengan konsep ini dapat memberikan gambaran apakah penggunaan nilai anggaran senilai atau sebanding dengan kemajuan pelaksanaan fisik pekerjaan. Apabila hasil analisis menunjukkan penyimpangan maka dapat dilakukan tindakan pencegahan lebih awal sehingga tidak berdampak pada hasil akhir pekerjaan (Maromi dkk., 2015). Sebelum adanya metode nilai hasil, konsep yang banyak digunakan untuk mengevaluasi kinerja biaya dan waktu pelaksanaan suatu proyek adalah konsep manajemen biaya tradisional yang masih digunakan hingga sekarang. Dalam konsep manajemen biaya tradisional hanya bisa dilihat hubungan antara biaya dan waktu rencana juga biaya dan waktu realisasi, namun seperti apa kinerja proyek terhadap biaya dan waktu tidak bisa diketahui. Kebalikannya, metode nilai hasil bisa memberikan gambaran seperti apa kinerja proyek yang lainnya selain biaya dan waktu rencana juga biaya dan waktu realisasi. Kinerja proyek ini adalah persentase pekerjaan yang berhasil diselesaikan dengan anggaran dialokasikan padanya atau sering disebut dengan *earned value* (Bulo dkk., 2013).

Indikator *Earned Value Analysis*

Analisis kinerja proyek dengan konsep nilai hasil (*earned value analysis*) memerlukan 3 (tiga) indikator menurut Nurhayati (2010) yaitu:

a. BCWS (*Budgeted Cost of Work Schedule*)

BCWS adalah besaran biaya yang dialokasikan untuk melaksanakan pekerjaan sesuai rencana kerja yang disusun dalam jadwal pelaksanaan pekerjaan. BCWS dihitung dari jumlah anggaran yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan dalam suatu waktu sesuai periode yang ditetapkan. BCWS mencerminkan besaran anggaran yang diserap pada tiap-tiap item pekerjaan berdasarkan urutan pada jadwal yang telah ditetapkan. BCWS juga bisa disebut dengan *planned value* (PV).

b. BCWP (*Budgeted Cost of Work Performance*)

BCWP adalah besaran biaya yang diterima berdasarkan pekerjaan yang telah diselesaikan dalam periode waktu tertentu. BCWP dihitung dari besaran biaya yang dibayarkan berdasarkan besaran persentase suatu item pekerjaan yang berhasil diselesaikan. BCWP ini juga bisa disebut dengan *earned value* (EV).

c. ACWP (*Actual Cost of Work Performance*)

ACWP adalah besaran biaya aktual yang dikeluarkan untuk menyelesaikan pekerjaan yang telah diselesaikan dalam periode waktu tertentu. Biaya aktual ini bisa diperoleh dari catatan keuangan proyek dan akuntansi yang dimiliki khusus oleh penyedia jasa meliputi biaya-biaya yang dikeluarkan selama pelaksanaan paket pekerjaan, biaya tak terduga/ *overhead* dan lain sebagainya. ACWP juga bisa disebut dengan *actual cost* (AC).

Analisis Varians Biaya dan Waktu

Analisis varians biaya dan waktu adalah analisis yang dilakukan untuk mengetahui informasi kinerja pengelolaan biaya dan waktu. Nilai varians atau penyimpangan biaya dan waktu dihitung dari masing-masing nilai parameter atau indikator *earned value*. Varian biaya dipakai untuk melihat apakah biaya yang digunakan untuk pelaksanaan pekerjaan masih sesuai ketersediaan dana, di bawah ketersediaan dana (*cost underrun*) atau di atas ketersediaan dana (*cost overrun*) (Ghozali dkk., 2017). Varian biaya (CV) dihitung dengan pengurangan antara nilai BCWP dengan ACWP. Sedangkan varian waktu dipakai untuk melihat apakah pekerjaan yang dilaksanakan sesuai waktu yang ditetapkan, di bawah waktu yang ditetapkan atau di atas waktu yang ditetapkan. Varian waktu (SV) dihitung dengan pengurangan antara nilai BCWP dan BCWS.

Berdasarkan hasil penilaian varians biaya dan waktu, dapat diketahui gambaran kondisi proyek sesuai dengan hasil nilai CV dan SV menurut Nurhayati (2010) yaitu:

Tabel 1. Analisis Varians Biaya dan Waktu

No	Varians Biaya (CV)	Varians Waktu (SV)	Keterangan
1	Positif	Positif	Biaya yang dikeluarkan di bawah ketersediaan dana dan terlaksana lebih maju dari waktu yang ditetapkan
2	Nol	Positif	Biaya yang dikeluarkan sesuai ketersediaan dana dan terlaksana lebih maju dari waktu yang ditetapkan
3	Positif	Nol	Biaya yang dikeluarkan di bawah ketersediaan dana dan terlaksana sesuai waktu yang ditetapkan
4	Nol	Nol	Biaya yang dikeluarkan sesuai ketersediaan dana dan terlaksana sesuai waktu yang ditetapkan
5	Negatif	Negatif	Biaya yang dikeluarkan di atas ketersediaan dana dan terlaksana lebih lambat dari waktu yang ditetapkan
6	Nol	Negatif	Biaya yang dikeluarkan sesuai ketersediaan dana dan terlaksana lebih lambat dari waktu yang ditetapkan
7	Negatif	Nol	Biaya yang dikeluarkan di atas ketersediaan dana dan terlaksana sesuai waktu yang ditetapkan
8	Positif	Negatif	Biaya yang dikeluarkan di bawah ketersediaan dana dan terlaksana lebih lambat dari waktu yang ditetapkan

Indeks Prestasi Biaya dan Waktu

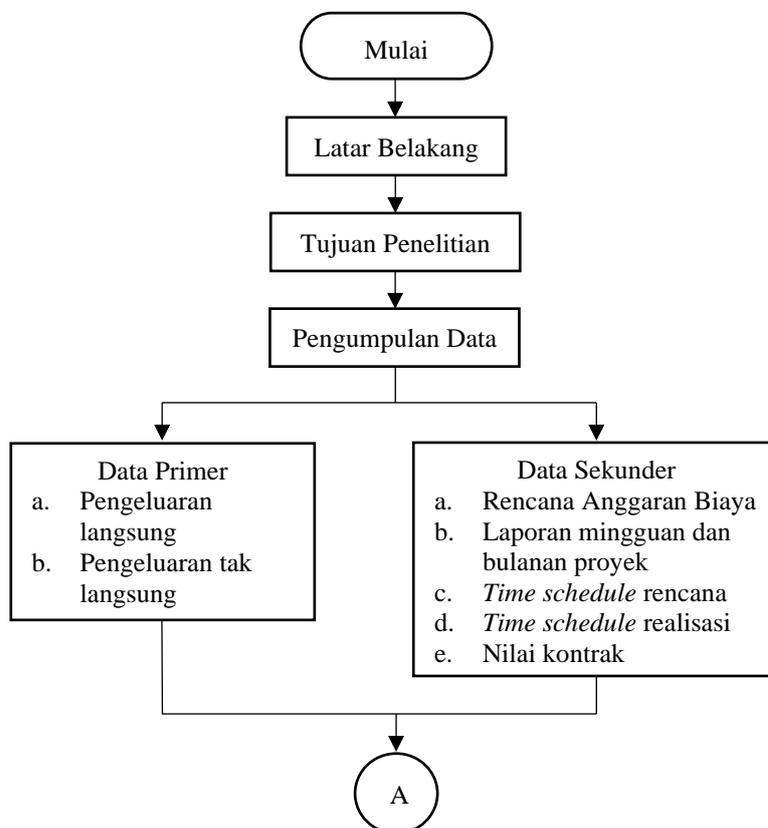
Analisis indeks prestasi biaya (CPI) dan waktu (SPI) dilakukan untuk mengetahui faktor efisiensi dari sumber daya yang digunakan. Indeks prestasi biaya adalah keadaan efisiensi biaya terhadap anggaran atau dana yang telah dikeluarkan dimana perhitungan dilakukan dengan perbandingan antara nilai BCWP dengan ACWP. Indikator penilaiannya adalah apabila nilai $CPI > 1$ (biaya lebih kecil), apabila nilai $CPI = 1$ (biaya sesuai anggaran) dan apabila nilai $CPI < 1$ (biaya lebih besar/boros). Indeks prestasi waktu adalah keadaan efisiensi waktu terhadap waktu yang telah direncanakan dimana perhitungan indeks prestasi waktu (SPI) dilakukan dengan membandingkan antara nilai BCWP dengan BCWS. Indikator penilaiannya adalah apabila nilai $SPI > 1$ (proyek lebih cepat), apabila nilai $SPI = 1$ (proyek tepat waktu) dan apabila nilai $SPI < 1$ (proyek terlambat) (Ghozali dkk., 2017).

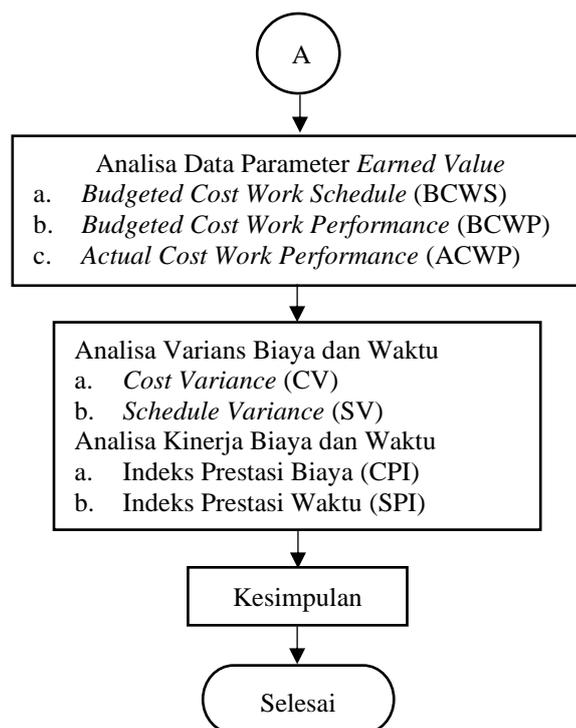
Rancangan Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu yang dilaksanakan pada tahun 2019 oleh pihak Balai Wilayah Sungai Bali-Penida. Metode penelitian yang digunakan adalah metode deskriptif kuantitatif dimana analisa data dengan konsep *earned value analysis* untuk mengevaluasi kinerja proyek dari objek studi. Data yang digunakan dalam penelitian ada 2 (dua) yaitu data sekunder dan data primer. Data sekunder adalah data yang telah dikumpulkan oleh pihak yang memiliki kuasa dan kewenangan untuk mengumpulkan data tersebut dimana data sekunder untuk penelitian ini diperoleh dari pihak Balai Wilayah Sungai Bali-Penida berupa rencana anggaran biaya (RAB), laporan mingguan dan bulanan proyek, *time schedule* rencana, *time schedule* realisasi dan nilai kontrak. Sedangkan data primer adalah data yang dikumpulkan secara langsung dari pihak pelaksana dimana data primer penelitian ini diperoleh dari wawancara dengan kontraktor pelaksana untuk menentukan pengeluaran langsung dan tidak langsung yang diperlukan selama masa pelaksanaan pekerjaan. Adapun tahapan analisis data yang akan dilakukan yaitu:

- a. Mengumpulkan data primer dan sekunder yang diperlukan untuk analisis dan mengelompokkan semua data ke dalam tabel sesuai dengan jenis datanya.
- b. Melakukan perhitungan berdasarkan data primer dan sekunder yang telah diperoleh untuk mendapatkan nilai dari masing-masing parameter *earned value* yaitu BCWS, BCWP dan ACWP. Perhitungan dilakukan tiap bulan selama rentang waktu pelaksanaan proyek. Selain itu, perhitungan secara komulatif bulanan juga dilakukan selama rentang waktu pelaksanaan proyek. Apabila telah diperoleh nilai dari masing-masing parameter maka selanjutnya dibuatkan grafik komulatif untuk masing-masing nilai parameter dan grafik gabungan semua parameter.
- c. Melakukan perhitungan varians atau penyimpangan terhadap waktu dan biaya sesuai dengan hasil nilai masing-masing parameter sehingga bisa diketahui hasil kinerja proyek berdasarkan nilai CV (*cost variance*) dan SV (*schedule variance*). Perhitungan juga dilakukan tiap bulan selama waktu pelaksanaan proyek. Selain itu, perhitungan secara komulatif bulanan juga dilakukan selama rentang waktu pelaksanaan proyek. Hasil perhitungan dituangkan ke dalam bentuk tabel untuk selanjutnya diberikan penjelasan terkait dengan hasil analisa sesuai ketentuan dalam tabel 1.
- d. Melakukan perhitungan terhadap indeks prestasi biaya dan waktu proyek sehingga dapat diperoleh faktor efisiensi biaya dan waktu sesuai indeks prestasi biaya (CPI) dan indeks prestasi waktu (SPI). Perhitungan dilakukan tiap bulan selama waktu pelaksanaan proyek. Selain itu, perhitungan secara komulatif bulanan juga dilakukan selama rentang waktu pelaksanaan proyek. Hasil perhitungan dituangkan ke dalam bentuk tabel untuk selanjutnya diberikan penjelasan terhadap hasil analisa sesuai ketentuan yang telah dicantumkan di atas.
- e. Menyusun kesimpulan berdasarkan keseluruhan analisa yang telah dilakukan.

Adapun bagan alir rancangan penelitian yang akan dilaksanakan ditampilkan dalam gambar 1. berikut:





Gambar 1. Bagan Alir Rancangan Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

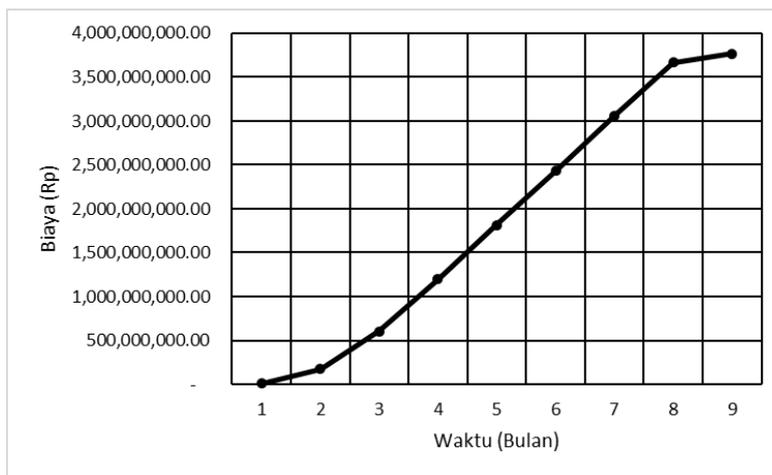
Proyek Peningkatan Jaringan Irigasi Tukad Petanu di Kabupaten Gianyar memiliki rentang waktu rencana pelaksanaan 9 (sembilan) bulan mulai dari tanggal 8 April – 16 Desember 2019. Evaluasi terhadap kinerja proyek ini dilakukan tiap bulan selama rentang waktu pelaksanaan sehingga bisa diketahui kinerja biaya dan waktu tiap bulannya. Selain itu, evaluasi berdasarkan komulatif bulanan juga dilakukan agar dapat dilihat kinerja biaya dan waktu apabila didasarkan pada komulatif bulannya. Pemilik proyek ini adalah Balai Wilayah Sungai Bali-Penida dengan kontraktor pelaksana CV. Wisnu Karya dan memiliki nilai kontrak Rp. 4.141.674.000,00 dengan sistem kontrak *unit price*. Perhitungan terhadap parameter *Budgeted Cost of Work Schedule (BCWS)*, *Budgeted Cost of Work Performance (BCWP)* dan *Actual Cost of Work Performance (ACWP)* merupakan langkah awal yang harus dikerjakan sebelum dilakukan perhitungan terhadap analisa varians berupa analisis CV dan SV juga indeks prestasi biaya dan waktu berupa analisis terhadap CPI dan SPI.

Analisa BCWS (*Budgeted Cost of Work Schedule*)/ *Planned Value (PV)*

BCWS adalah besaran biaya yang dialokasikan untuk melaksanakan pekerjaan sesuai rencana kerja yang disusun dalam jadwal pelaksanaan pekerjaan. BCWS dihitung dengan cara mencari nilai perbandingan dari *progress* rencana dengan *progress* total pekerjaan tiap bulannya untuk selanjutnya dikalikan dengan RAB (Rencana Anggaran Biaya) tiap bulan yang telah dikurangi dengan PPN (Pajak Penambahan Nilai). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan besaran nilai BCWS agar sesuai dengan *real cost* yang dialokasikan untuk pelaksanaan pekerjaan tanpa adanya penambahan akibat pajak yang harus dikenakan dalam pelaksanaan pekerjaan. Perhitungan dilakukan tiap bulan selama waktu pelaksanaan proyek dengan cara yang sama untuk kemudian dikumulatifkan dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Perhitungan BCWS disajikan dalam tabel 2 dan grafik komulatif disajikan dalam gambar 2.

Tabel 2. Nilai BCWS (*Budgeted Cost of Work Schedule*)

Bulan Ke-	Progress Rencana	Progress Rencana Kumulatif	Nilai BCWS	Nilai BCWS Kumulatif
1	0,239%	0,239%	Rp 9.000.000,00	Rp 9.000.000,00
2	4,342%	4,581%	Rp 163.466.349,24	Rp 172.466.349,24
3	11,472%	16,053%	Rp 431.954.226,86	Rp 604.420.576,10
4	15,750%	31,803%	Rp 593.010.490,99	Rp 1.197.431.067,09
5	16,407%	48,209%	Rp 617.732.671,00	Rp 1.815.163.738,09
6	16,452%	64,661%	Rp 619.428.587,11	Rp 2.434.592.325,20
7	16,662%	81,323%	Rp 627.335.421,06	Rp 3.061.927.746,26
8	16,044%	97,367%	Rp 604.098.622,37	Rp 3.666.026.368,63
9	2,633%	100,000%	Rp 99.132.653,27	Rp 3.765.159.021,90



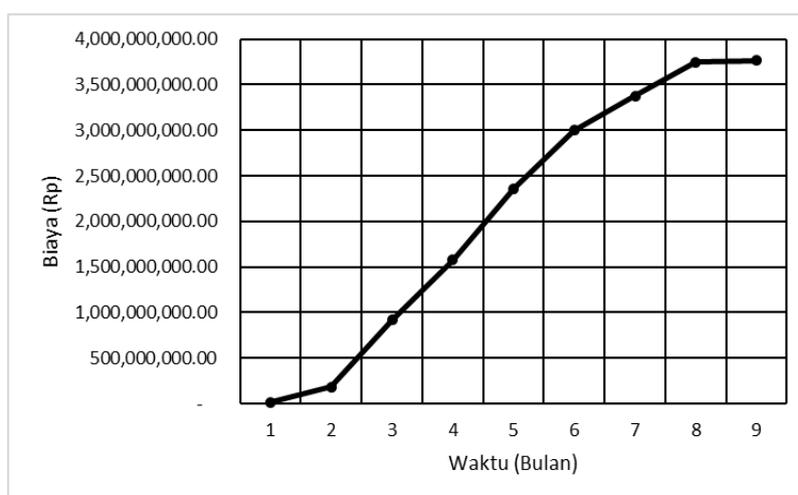
Gambar 2. Grafik Komulatif BCWS

Analisa BCWP (Budgeted Cost of Work Performance)/ Earned Value (EV)

BCWP adalah besaran biaya yang diterima berdasarkan pekerjaan yang telah diselesaikan dalam periode waktu tertentu. BCWP dihitung dengan cara mencari nilai perbandingan dari *progress* realisasi dengan *progress* total pekerjaan untuk selanjutnya dikalikan dengan RAB (Rencana Anggaran Biaya) tiap bulan yang telah dikurangi dengan PPN (Pajak Penambahan Nilai). Perhitungan dilakukan tiap bulan dengan cara yang sama untuk kemudian dikumulatifkan dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Perhitungan BCWP disajikan dalam tabel 3 dan grafik komulatif disajikan dalam gambar 3.

Tabel 3. Nilai BCWP (Budgeted Cost of Work Performance)

Bulan Ke-	Progress Realisasi	Progress Realisasi Komulatif	Nilai BCWP	Nilai BCWP Komulatif
1	0,398%	0,398%	Rp 15.000.000,00	Rp 15.000.000,00
2	4,406%	4,804%	Rp 165.877.108,25	Rp 180.877.108,25
3	19,629%	24,433%	Rp 739.050.010,99	Rp 919.927.119,24
4	17,417%	41,849%	Rp 655.762.918,65	Rp 1.575.690.037,88
5	20,765%	62,615%	Rp 781.848.343,24	Rp 2.357.538.381,13
6	17,108%	79,722%	Rp 644.125.513,32	Rp 3.001.663.894,45
7	9,894%	89,616%	Rp 372.526.009,85	Rp 3.374.189.904,30
8	9,866%	99,482%	Rp 371.461.906,57	Rp 3.745.651.810,87
9	0,518%	100,000%	Rp 19.507.211,03	Rp 3.765.159.021,90



Gambar 3. Grafik Komulatif BCWP

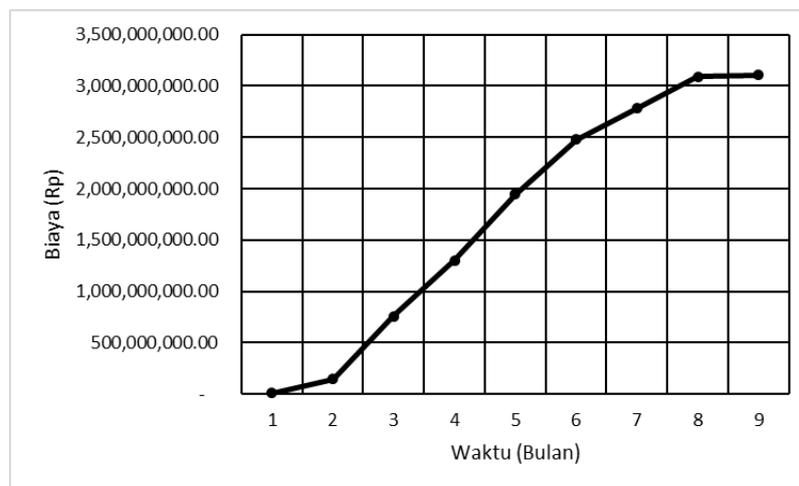
Analisa ACWP (Actual Cost of Work Performance)/ Actual Cost (AC)

ACWP adalah biaya aktual yang dikeluarkan untuk menyelesaikan pekerjaan selama rentang waktu yang direncanakan. Biaya ACWP diperoleh dari pelaksana yang terdiri dari pengeluaran langsung dan tidak langsung.

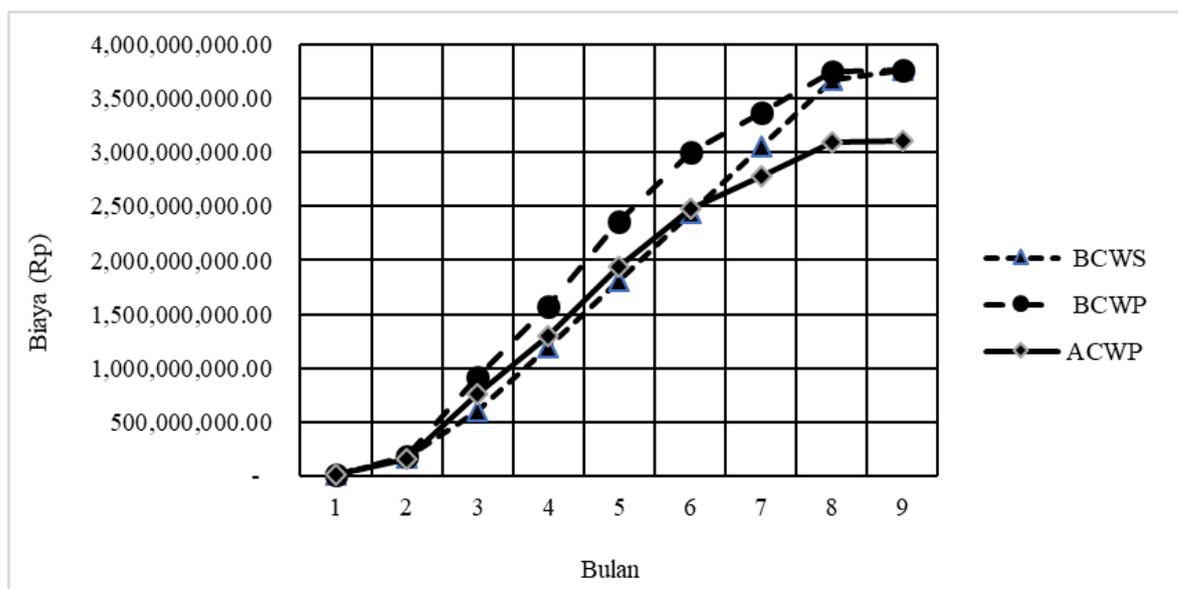
Kedua biaya dijumlahkan guna melihat besaran biaya aktual yang dikeluarkan tiap bulan selama waktu pelaksanaan. Perhitungan dilakukan tiap bulan dengan cara yang sama untuk kemudian dikumulatifkan dan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Perhitungan ACWP disajikan dalam tabel 4 dan grafik komulatif disajikan dalam gambar 4.

Tabel 4. Nilai ACWP (*Actual Cost of Work Performance*)

Bulan Ke-	Progress Realisasi	Progress Realisasi Kumulatif	Nilai ACWP	Nilai ACWP Kumulatif
1	0,398%	0,398%	Rp 12.381.928,38	Rp 12.381.928,38
2	4,406%	4,804%	Rp 136.925.231,63	Rp 149.307.160,01
3	19,629%	24,433%	Rp 610.057.620,38	Rp 759.364.780,39
4	17,417%	41,849%	Rp 541.307.299,56	Rp 1.300.672.079,95
5	20,765%	62,615%	Rp 645.386.012,71	Rp 1.946.058.092,65
6	17,108%	79,722%	Rp 531.701.064,94	Rp 2.477.759.157,60
7	9,894%	89,616%	Rp 307.506.024,92	Rp 2.785.265.182,52
8	9,866%	99,482%	Rp 306.627.648,22	Rp 3.091.892.830,74
9	0,518%	100,000%	Rp 16.102.459,33	Rp 3.107.995.290,07



Gambar 4. Grafik Komulatif ACWP



Gambar 5. Grafik Komulatif BCWS, BCWP dan ACWP

Berdasarkan grafik komulatif indikator *earned value* diatas, dapat dilihat bahwa dari bulan ke-1 hingga bulan ke-8, nilai BCWP berada di atas nilai BCWS sehingga mengindikasikan bahwa pekerjaan berjalan rata-rata 6,52% lebih cepat dari jadwal rencana, meskipun pada bulan terakhir ada di titik yang sama yang mengindikasikan bahwa

pekerjaan di bulan ke-9 sudah sesuai dengan rencana. Nilai ACWP selama pelaksanaan proyek ada di bawah BCWP sehingga dikategorikan biaya nyata yang keluar lebih kecil dari *budget* rencana yaitu sebesar Rp3.107.995.290,00 atau 21.14% dari biaya rencana.

Analisis Varians Biaya dan Waktu

Berdasarkan hasil perhitungan dari masing-masing indikator *earned value*, dapat dihitung besaran penyimpangan kinerja biaya (*cost variance*) dan waktu (*schedule variance*) sehingga bisa ditentukan kinerja biaya dan waktu proyek. *Cost variance* (CV) dihitung dengan pengurangan antara nilai BCWP dan ACWP sedangkan *schedule variance* (SV) dihitung dengan pengurangan antara nilai BCWP dengan BCWS. Adapun hasil perhitungan analisis varians biaya dan waktu secara bulanan dapat dilihat pada tabel 5 dan analisis secara kumulatif dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 5. Analisis Varians Biaya dan Waktu Bulanan

Bulan Ke-	BCWS	BCWP	ACWP	Cost Variance (CV)	Schedule Variance (SV)
1	Rp 9.000.000,00	Rp 15.000.000,00	Rp 12.381.928,38	Rp 2.618.071,62	Rp 6.000.000,00
2	Rp 163.466.349,24	Rp 165.877.108,25	Rp 136.925.231,63	Rp 28.951.876,63	Rp 2.410.759,01
3	Rp 431.954.226,86	Rp 739.050.010,99	Rp 610.057.620,38	Rp 128.992.390,60	Rp 307.095.784,13
4	Rp 593.010.490,99	Rp 655.762.918,65	Rp 541.307.299,56	Rp 114.455.619,09	Rp 62.752.427,66
5	Rp 617.732.671,00	Rp 781.848.343,24	Rp 645.386.012,71	Rp 136.462.330,54	Rp 164.115.672,24
6	Rp 619.428.587,11	Rp 644.125.513,32	Rp 531.701.064,94	Rp 112.424.448,38	Rp 24.696.926,21
7	Rp 627.335.421,06	Rp 372.526.009,85	Rp 307.506.024,92	Rp 65.019.984,92	Rp (254.809.411,21)
8	Rp 604.098.622,37	Rp 371.461.906,57	Rp 306.627.648,22	Rp 64.834.258,35	Rp (232.636.715,80)
9	Rp 99.132.653,27	Rp 19.507.211,03	Rp 16.102.459,33	Rp 3.404.751,71	Rp (79.625.442,23)

Berdasarkan tabel 5 dapat dilihat bahwa analisis varians biaya (CV) dan varians waktu (SV) dari bulan ke-1 sampai bulan ke-6 bernilai positif (+) sehingga dapat diartikan bahwa pekerjaan berjalan maju dari jadwal dengan dana lebih kecil dari anggaran sesuai dengan ketentuan dalam tabel 1. Hal ini dikarenakan medan kerja yang mudah untuk diakses juga pintu air irigasi yang selalu ditutup sehingga pelaksanaan pekerjaan dapat berjalan tanpa gangguan buka tutup pintu air irigasi. Sedangkan kinerja dari bulan ke-7 sampai bulan ke-9 menunjukkan kinerja waktu yang lebih lambat dari waktu rencana (SV bernilai negatif) dan biaya yang dikeluarkan lebih kecil dari anggaran (CV bernilai positif) sesuai dengan ketentuan dalam tabel 1. Hal ini dikarenakan sebagian besar bobot realisasi dikerjakan di bulan ke-1 sampai ke-6 sehingga sisa bulan selanjutnya mengerjakan pekerjaan sisa hingga akhirnya pekerjaan selesai sesuai batas waktu yang ditentukan.

Tabel 6. Analisis Varians Biaya dan Waktu Kumulatif

Bulan Ke-	BCWS Kumulatif	BCWP Kumulatif	ACWP Kumulatif	Cost Variance (CV) Kumulatif	Schedule Variance (SV) Kumulatif
1	Rp 9.000.000,00	Rp 15.000.000,00	Rp 12.381.928,38	Rp 2.618.071,62	Rp 6.000.000,00
2	Rp 172.466.349,24	Rp 180.877.108,25	Rp 149.307.160,01	Rp 31.569.948,25	Rp 8.410.759,01
3	Rp 604.420.576,10	Rp 919.927.119,24	Rp 759.364.780,39	Rp 160.562.338,85	Rp 315.506.543,13
4	Rp 1.197.431.067,09	Rp 1.575.690.037,88	Rp 1.300.672.079,95	Rp 275.017.957,94	Rp 378.258.970,79
5	Rp 1.815.163.738,09	Rp 2.357.538.381,13	Rp 1.946.058.092,65	Rp 411.480.288,47	Rp 542.374.643,04
6	Rp 2.434.592.325,20	Rp 3.001.663.894,45	Rp 2.477.759.157,60	Rp 523.904.736,85	Rp 567.071.569,25
7	Rp 3.061.927.746,26	Rp 3.374.189.904,30	Rp 2.785.265.182,52	Rp 588.924.721,78	Rp 312.262.158,04
8	Rp 3.666.026.368,63	Rp 3.745.651.810,87	Rp 3.091.892.830,74	Rp 653.758.980,13	Rp 79.625.442,23
9	Rp 3.765.159.021,90	Rp 3.765.159.021,90	Rp 3.107.995.290,07	Rp 657.163.731,83	Rp 0,00

Perhitungan dalam tabel 6 menunjukkan analisis varians biaya dan waktu dari bulan ke-1 sampai ke-8 bernilai positif (+) sehingga dapat diartikan bahwa keseluruhan pekerjaan dilaksanakan maju dari jadwal yang ditetapkan dengan dana lebih kecil dari anggaran sesuai ketentuan dalam tabel 1. Sedangkan bulan ke-9, nilai SV adalah 0 sehingga disimpulkan bahwa realisasi pekerjaan di bulan ke-9 sesuai dengan jadwal yang ditetapkan seperti ketentuan dalam tabel 1. Hasil penelitian menunjukkan hal yang sama dengan penelitian oleh Ghazali, dkk (2017) dimana proyek selesai tepat waktu rencana dimana dana yang keluar lebih sedikit dibanding rencana.

Analisis Indeks Prestasi Biaya dan Waktu

Berdasarkan hasil perhitungan dari masing-masing indikator *earned value*, selanjutnya dapat dihitung indeks prestasi biaya (*cost performance index*) dan indeks prestasi waktu (*schedule performance index*) sehingga bisa ditentukan faktor efisiensi berupa prestasi dari kinerja biaya dan waktu proyek yang ditinjau. *Cost performance index* (CPI) diperoleh dari pembagian antara angka BCWP dan ACWP sedangkan *schedule performance index* (SPI) diperoleh dari pembagian antara angka BCWP dan BCWS. Adapun hasil analisis indeks prestasi kinerja biaya dan waktu secara bulanan dapat dilihat pada tabel 7 dan analisis secara kumulatif dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 7. Analisis Indeks Prestasi Biaya dan Waktu Bulanan

Bulan Ke-	BCWS	BCWP	ACWP	Schedule Performance Index (SPI)	Cost Performance Index (CPI)
1	Rp 9.000.000,00	Rp 15.000.000,00	Rp 12.381.928,38	1,67	1,21
2	Rp 163.466.349,24	Rp 165.877.108,25	Rp 136.925.231,63	1,01	1,21
3	Rp 431.954.226,86	Rp 739.050.010,99	Rp 610.057.620,38	1,71	1,21
4	Rp 593.010.490,99	Rp 655.762.918,65	Rp 541.307.299,56	1,11	1,21
5	Rp 617.732.671,00	Rp 781.848.343,24	Rp 645.386.012,71	1,27	1,21
6	Rp 619.428.587,11	Rp 644.125.513,32	Rp 531.701.064,94	1,04	1,21
7	Rp 627.335.421,06	Rp 372.526.009,85	Rp 307.506.024,92	0,59	1,21
8	Rp 604.098.622,37	Rp 371.461.906,57	Rp 306.627.648,22	0,61	1,21
9	Rp 99.132.653,27	Rp 19.507.211,03	Rp 16.102.459,33	0,20	1,21

Berdasarkan tabel 7, nilai CPI dan SPI dari bulan ke-1 sampai bulan ke-6 menunjukkan nilai lebih dari 1 sehingga proyek dikategorikan berjalan lebih cepat dan menelan biaya yang lebih kecil dari anggaran. Sedangkan dari bulan ke-7 sampai bulan ke-9, nilai SPI lebih kecil dari 1 dan nilai CPI yang lebih besar dari 1 sehingga dalam 3 (tiga) bulan terakhir proyek dikategorikan berjalan lambat dimana biaya keluar lebih sedikit dibandingkan rencana. Proyek dinilai prestasinya berjalan lambat di bulan ke-7 sampai ke-9 dikarenakan sebagian besar bobot realisasi dikerjakan di bulan ke-1 sampai ke-6 sehingga sisa bulan selanjutnya mengerjakan pekerjaan yang masih tersisa.

Tabel 8. Analisis Indeks Prestasi Biaya dan Waktu Kumulatif

Bulan Ke-	BCWS	BCWP	ACWP	Schedule Performance Index (SPI)	Cost Performance Index (CPI)
1	Rp 9.000.000,00	Rp 15.000.000,00	Rp 12.381.928,38	1,67	1,21
2	Rp 172.466.349,24	Rp 180.877.108,25	Rp 149.307.160,01	1,05	1,21
3	Rp 604.420.576,10	Rp 919.927.119,24	Rp 759.364.780,39	1,52	1,21
4	Rp 1.197.431.067,09	Rp 1.575.690.037,88	Rp 1.300.672.079,95	1,32	1,21
5	Rp 1.815.163.738,09	Rp 2.357.538.381,13	Rp 1.946.058.092,65	1,30	1,21
6	Rp 2.434.592.325,20	Rp 3.001.663.894,45	Rp 2.477.759.157,60	1,23	1,21
7	Rp 3.061.927.746,26	Rp 3.374.189.904,30	Rp 2.785.265.182,52	1,10	1,21
8	Rp 3.666.026.368,63	Rp 3.745.651.810,87	Rp 3.091.892.830,74	1,02	1,21
9	Rp 3.765.159.021,90	Rp 3.765.159.021,90	Rp 3.107.995.290,07	1,00	1,21

Berdasarkan tabel 8, nilai CPI dari bulan ke-1 sampai ke-9 menunjukkan nilai lebih dari 1 sehingga proyek dikategorikan menghabiskan biaya yang lebih kecil dari anggaran. Nilai SPI dari bulan ke-1 sampai ke-8 menunjukkan nilai lebih dari 1 sehingga dikategorikan proyek berjalan lebih cepat dari waktu rencana meskipun di bulan ke-9, nilai SPI sama dengan 1 yang menunjukkan bahwa proyek selesai tepat dengan waktu rencana. Hasil penelitian oleh Bulo, dkk (2013) juga menunjukkan hasil serupa dimana masing-masing nilai CPI dan SPI berada diatas nilai 1 sehingga disimpulkan proyek berjalan lebih cepat dan menghabiskan biaya lebih sedikit dari rencana.

Kesimpulan

Berdasarkan evaluasi indikator *earned value*, diperoleh hasil bahwa nilai BCWP berada di atas BCWS mulai dari bulan ke-1 sampai bulan ke-8 dan berakhir di titik yang sama di bulan ke-9 sehingga dalam prosesnya proyek dikategorikan berjalan lebih cepat dari waktu rencana dan berakhir sesuai dengan waktu yang ditentukan dimana rata-rata proyek berjalan 6,52% lebih cepat dari waktu rencana. Nilai ACWP selama pelaksanaan proyek ada di bawah BCWP sehingga dikategorikan biaya nyata yang keluar lebih kecil dari *budget* yaitu Rp 3.107.995.290,07 atau 21,14% dari biaya rencana. Analisis varians biaya (CV) memiliki nilai positif (+) artinya dana yang keluar lebih kecil dari anggaran seperti ketentuan dalam tabel 1. Nilai varians waktu (SV) berdasarkan kumulatif bulanan masing-masing memiliki nilai positif (+), artinya waktu pelaksanaan pekerjaan lebih cepat dari jadwal rencana sesuai dengan ketentuan dalam tabel 1. Indeks prestasi kinerja biaya dan waktu berdasarkan kumulatif bulanan menunjukkan nilai rata-rata CPI adalah 1,21 dan rata-rata SPI 1,02 sehingga menunjukkan proyek berjalan lebih cepat dari waktu rencana dan menghabiskan biaya lebih kecil dari anggaran rencana karena rata-rata nilai CPI dan SPI diatas nilai "1".

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Balai Wilayah Sungai Bali-Penida dan kontraktor CV. Wisnu Karya yang telah bersedia memberikan bantuan dan data kepada penulis untuk bisa menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

Ahuja, H., Dozki, S. P., & Abourizk, S. M. (1994). *Project Analysis Techniques in Planning and Controlling Construction Project*. New York: John Willey & Sons.

- Bulo, M. W., Balaka, R., & Sriyani, R. (2013). Pengaplikasian Metode *Earned Value* pada Pengendalian Waktu Terhadap Biaya (Studi Kasus: Proyek Penggantian Jembatan Sungai Langkolome Cs Kabupaten Muna). *Jurnal Stabilita*, 1(3), 359-372.
- Ervianto, W. I. (2005). *Manajemen Proyek Konstruksi*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Febriani, N. F. (2018). Analisa Kinerja Terhadap Waktu dan Biaya dengan Metode *Earned Value Analysis* pada Pembangunan Gedung Auditorium IAIN Samarinda. *Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknik Sipil*, 1(1), 1813-1826.
- Ghozali, A. A., Harimurti., & Hasyim, H. (2017). Monitoring Proyek Rehabilitasi Saluran Irigasi Ngrejo dengan Metode Konsep Nilai Hasil Berdasarkan *Time Based* dan *Progress Based*. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*, 1(1), 501-508.
- Maromi, M. I., & Indryani, R. (2015). Metode *Earned Value* untuk Analisa Kinerja Biaya dan Waktu Pelaksanaan pada Proyek Condotel De Vasa Surabaya. *Jurnal Teknik ITS*, 4(1), 54-59.
- Nurhayati. (2010). *Manajemen Proyek*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Nurtsani, R. A., Septiadi, D. R., & Suharyanto, S. (2017). Pengendalian Biaya dan Waktu Proyek dengan Metode Konsep Nilai Hasil (*Earned Value*). *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 6(4), 460-470.
- Soeharto, I. (2001). *Manajemen Proyek (Dari Konseptual Sampai Operasional)*. Jakarta: Erlangga.
- Sudipta, I. G. (2013). Studi Manajemen Proyek Terhadap Sumber Daya pada Pelaksanaan Proyek Konstruksi (Studi Kasus: Pembangunan Villa Bali Air). *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 17(1), 73-83.

Pengaruh Suhu pada Inhibitor Daun Pandan Terhadap Laju Korosi pada Baja SS-304 dalam Larutan Asam HCL 0,1M

Laras Andria Wardani¹, Hernowo Widodo², Lisa Adhani³, Everlita Sabrina⁴, dan Amaliah Annisa⁵

^{1,2,3,4,5}Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Bhayangkara Jakarta Raya

laras.andria.wardani@dsn.ubharajaya.ac.id, hernowo.widodo@dsn.ubharajaya.ac.id,

lisa.adhani@dsn.ubharajaya.ac.id, everlitasabrina17@gmail.com, amaliah.annisa@ubharajaya.ac.id

Abstrak

Fenomena korosi tidak bisa dihindari dalam penggunaan industri logam, oleh karena itu dibutuhkan inhibitor korosi untuk menghambat laju korosi pada baja. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan inhibitor alami yang efektif menghambat laju korosi. Pada penelitian ini sampel yang dipakai adalah baja tahan karat yang paling sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari yaitu SS (*Stainless Steel*)-304. Beberapa inhibitor organik atau alami yang digunakan dalam penelitian ini adalah daun pandan. Variabel yang digunakan adalah waktu perendaman dan temperatur. Selanjutnya, parameter yang diteliti adalah laju korosi baja dan morfologi pada baja SS-304 dengan menggunakan uji SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju korosi dan morfologi paling baik menggunakan daun pandan dengan suhu 60°C yang di rendam dengan larutan HCL 0,1 N selama 5 minggu.

Kata kunci: baja SS-304, laju korosi, inhibitor alami, daun pandan

Abstract

The phenomenon of corrosion cannot be avoided in the use of the metal industry, therefore a corrosion inhibitor is needed to inhibit the corrosion rate of steel. The aim of this research is to obtain natural inhibitors that are effective in inhibiting the corrosion rate. In this study, the sample used is stainless steel which is most often used in everyday life, namely SS (*Stainless Steel*)-304. Some of the organic or natural inhibitors used in this study is pandan leaves. The variables used were immersion time and temperature. Furthermore, the parameters studied were the corrosion rate of steel and the morphology of SS-304 steel using the SEM test. The results showed that the best corrosion rate and morphology using pandan leaves at a temperature of 60°C soaked with 0,1 N HCL solution for 5 weeks.

Keywords: SS-304 steel, corrosion rate, natural inhibitor, pandan leaves

1. Pendahuluan

Sejak tahun 1950-an, baja tahan karat/*stainless steel* (SS) telah menjadi bahan yang paling banyak digunakan karena sifat-sifatnya yang sangat baik seperti kemampuan proses, kekuatan mekanik, ketahanan korosi, dan biokompatibilitasnya (K.T Oh et al., 2005 dan F.L Nie 2011). Pada penelitian ini digunakan baja SS-304, dimana baja SS tipe 304 merupakan baja yang multifungsi dan banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari karena harganya yang relatif terjangkau. *Stainless steel* tipe 304 ini banyak digunakan baik dalam dunia industri skala besar maupun skala kecil. Penggunaan baja *stainless steel* tipe 304 ini antara lain sebagai tanki dan *container* untuk berbagai macam cairan dan padatan, peralatan pertambangan, kimia, makanan, dan industri farmasi (Sumarji, 2011). Baja SS-304 ini adalah salah satu jenis baja yang tahan terhadap karat yang memiliki komposisi unsur karbon 0,42%; 8,15% Ni; 18,24% Cr; 0,049% Si; 0,006% S; 0,034% P; 1,19% Mn; dan sisanya adalah besi/Fe. Selain komposisinya, baja SS-304 juga memiliki sifat mekanik yaitu kekerasan sebesar 82 HRB; *elongation* sebesar 50%; *yield strength* sebesar 270 Mpa; serta kekuatan tarik sebesar 646 Mpa. Walaupun memiliki kekuatan Tarik yang besar, mudah dibersihkan, dan tahan terhadap kondisi lingkungan yang dingin maupun panas, namun konsentrasi asam mineral dengan kereaktifan yang cukup tinggi dapat mengakibatkan terjadinya korosi (Mardhani & Harmami, 2013). Korosi logam adalah proses yang disebabkan oleh reaksi reduksi dan oksidasi logam dengan lingkungannya dan mengakibatkan degradasi permukaan logam itu sendiri, baik dimulai dari aktivitas alami maupun terjadi akibat perbuatan manusia. Sifat penghambatan korosi dari inhibitor bergantung pada banyak faktor seperti sifat lingkungan korosif, suhu larutan, struktur elektronik dari inhibitor, dll (Goyal et al., 2018). Hal ini juga didukung dengan pendapat Hakim yang menyatakan bahwa ada beberapa faktor yang mempengaruhi laju korosi dalam sistem elektrolit larutan (*aqueous*) yaitu: (1) konsentrasi larutan dan komponen ionnya: Konsentrasi larutan menyatakan jumlah zat terlarut dalam pelarut atau setiap satuan larutan. Sebuah larutan dengan suatu konsentrasi tertentu memiliki zat yang dapat terurai

Info Makalah:

Dikirim : 10-09-2020;

Revisi : 04-18-2021;

Diterima : 05-23-2021.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-813-19177867

e-mail : laras.andria.wardani@dsn.ubharajaya.ac.id

menjadi ion-ion (baik berupa kation maupun anion) pembentuknya dan (2) kadar oksigen: Oksigen yang terlarut akan meningkatkan reaksi pada katoda sehingga logam akan semakin terkorosi atau teroksidasi (Hakim, 2011). Selain itu, Suhu memiliki efek yang sangat nyata pada karakteristik penghambatan molekul inhibitor. Mirip dengan kebanyakan laju reaksi kimia, laju korosi juga meningkat secara linier dengan meningkatnya suhu sekitar (Abdel-

Azim et al., 2014). Kehadiran kelembaban, garam dan kotoran organik dan anorganik meningkatkan laju korosi karena peningkatan konduktivitas muatan elektrolit (Glass & Page, 1991); (Abd El Haleem *et al.*, 2013). Seiring dengan semua faktor lingkungan ini, laju korosi logam juga dipengaruhi secara alami oleh sifat produk korosi yang terkumpul di permukaan (Mazères *et al.*, 2016). Sifat produk korosi bisa didapat ketika proses pelapisan baja. Keseluruhan proses korosi ini dapat berlangsung dalam media atau larutan asam, seperti asam klorida dan asam sulfat (Bentiss et al., 2000). Korosi juga dapat menyebabkan kerusakan bertingkat pada lapisan baja akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya.

Proses korosi termasuk proses pelarutan material logam secara spontan dapat mengakibatkan kerugian ekonomi yang sangat besar (Revie & Uhlig, 2008); (Verma et al., 2016). Kerugian ekonomi yang dimaksud adalah karena adanya penurunan mutu dan daya guna logam tersebut. Dibalik sifatnya yang relatif kuat, keras, mengkilap, mudah dibersihkan dan tahan terhadap kondisi dingin maupun panas, penurunan kualitas baja SS-304 juga dapat terjadi secara alamiah dalam jangka waktu yang lama, maupun jika terpapar oleh asam-asam mineral di lingkungannya yang dapat mempercepat proses korosi itu sendiri. Berdasarkan hal tersebut, maka dibutuhkan suatu pencegahan yang bersifat alami untuk menghindari kerugian-kerugian yang dapat ditimbulkan akibat dari proses oksidasi yaitu korosi. Salah satu cara untuk mencegah kerugian tersebut adalah dengan menambahkan atau melapiskan suatu senyawa atau inhibitor korosi pada logam (Scendo, 2007). Inhibitor dapat ditambahkan langsung ke dalam zat atau pelapis sehingga dapat meningkatkan sifat lapisan pelindung dalam menghadapi proses oksidasi. Selain berfungsi sebagai lapisan pasif anodik, inhibitor juga dapat meningkatkan sifat adhesi lapisan. Selain itu, daerah aktif senyawa juga mampu melindungi logam dari pengaruh lain karena adanya efek penghalang sterik dan interaksi polaritas (A. Thom *et al.*, 2006 dan D. Li *et al.*, 2011). jika suatu zat atau senyawa kimia yang apabila ditambahkan ke dalamnya dan dapat menurunkan laju korosi terhadap suatu logam maka zat tersebut dinamakan inhibitor korosi (Yanuar *et al.*, 2017). Sedangkan menurut penelitian terdahulu, penambahan senyawa atau zat ke dalam lingkungan yang korosif, dalam dosis kecil dan berfungsi untuk mengurangi laju korosi adalah makna dari inhibitor (Hye-Young Klose, 1997). Jika dilihat dilapangan, penambahan jumlah inhibitor haruslah sedikit namun dilakukan baik secara periodik maupun kontinu dengan selang waktu tertentu (Saputra, 2011). Senyawa atau zat inhibitor ini jika diklasifikasikan berdasarkan kandungan dan bahan pembuatannya terbagi atas dua yaitu inhibitor alami yang berasal dari bahan baku alam dan anorganik atau zat buatan. Pemilihan penggunaan antara inhibitor organik dan inhibitor anorganik harus didasari pengetahuan mengenai toksisitas yang dihasilkannya, selain hanya melihat keefektifannya dalam menghambat korosi. Selain itu, pertimbangan pemilihan inhibitor juga harus mempertimbangkan dampak negatifnya yang dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Perihal ini juga telah di atur oleh Lembaga lingkungan di berbagai negara, tentang pemberlakuan aturan penggunaan dan pembuangan inhibitor korosi (Yanuar et al., 2017). Peraturan lingkungan tersebut mengatur penuh tentang inhibitor korosi yang dapat digunakan, bersifat ramah lingkungan serta aman bagi kesehatan (Sastri, 2011). Berdasarkan peraturan-peraturan tersebut, penggunaan inhibitor anorganik mulai dibatasi, dan inhibitor alami atau organik yang berasal dari bahan alam seperti contohnya tanaman dan buah-buahan mulai banyak diteliti. Inhibitor organik ini memiliki sifat yang ramah lingkungan, dapat diperbaharui, mudah didapatkan dan tidak bersifat toksik (Karim & Yusuf, 2012). Berdasarkan pernyataan tersebut, maka pada penelitian ini digunakan senyawa inhibitor organik yang berasal dari alam.

Semakin berkembangnya zaman, perkembangan ilmu pengetahuan akan bahan inhibitor korosi alami semakin banyak ditemukan. Hal ini terjadi karena sifatnya yang ramah lingkungan dan aman, serta sebagai inhibitor efektif untuk logam. Beberapa penelitian tentang inhibitor alami diantaranya adalah Souza pada tahun 2012 melaporkan penelitiannya bahwa ekstrak tumbuhan dapat memperlambat laju korosi spesimen logam lebih efisien dan efektif dalam media asam sulfat (Fernando Sílvio De Souza et al., 2012). Sejalan dengan hal tersebut, peneliti lain juga meneliti bahwa ekstrak *Zenthoxylum alatum* digunakan sebagai penghambat korosi hijau ramah lingkungan untuk baja ringan dalam larutan asam fosfat melalui metode penurunan bobot dan elektrokimia (Gunasekaran & Chauhan, 2004). Selain itu, Gunasekaran dan Chauhan juga melaporkan bahwa pengaruh temperatur juga dapat bertindak sebagai inhibitor yang baik untuk baja ringan, variable temperatur dibuat antara 50°C-80°C, dan hasil terbaik yaitu 70°C dalam larutan asam fosfat (Gunasekaran & Chauhan, 2004). Penelitian Singh mengenai inhibitor ramah lingkungan, yaitu ekstrak *Hibiscus cannabinus* dipelajari dalam larutan 0,5M H₂SO₄ menghasilkan bahwa efisiensi penghambatan *Hibiscus cannabinus* meningkat dengan meningkatnya konsentrasi (Singh & Singh, 2012).

Saat ini, ada banyak sekali senyawa organik yang diketahui bekerja secara efisien dalam menurunkan laju korosi tembaga, sebagaimana ditinjau secara komprehensif oleh (Antonijevic & Petrovic Mihajlovic, 2015). Raja dan Sethuraman juga telah meninjau penggunaan produk alami sebagai penghambat korosi untuk logam (Raja & Sethuraman, 2008). Senyawa inhibitor secara keseluruhan memiliki sifat yang netral, tetapi gugus nitrogen pada senyawa memiliki pasangan elektron bebas yang menyebabkan inhibitor cenderung bermuatan negatif, sehingga senyawa inhibitor akan tertarik ke permukaan logam dan membentuk lapisan (Yanuar et al., 2017). Lapisan tersebut yang nantinya akan membentuk film dan melindungi baja dari korosifitas. Senyawa-senyawa inhibitor alami di Indonesia sangat banyak dan beragam jenisnya, namun yang sering kita jumpai di kehidupan sehari-hari dan mudah didapat menjadi kunci pemanfaatannya dalam penelitian ini. Oleh karena itu, peneliti menggunakan inhibitor organik yang berasal dari alam yaitu daun pandan (*Pandanus amaryllifolius Roxb*). Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah

mendapatkan inhibitor alami yang efektif menghambat laju korosi. Percobaan dilakukan dengan menambahkan ekstrak senyawa inhibitor organik kepada baja SS-304 dengan variabel waktu perendaman dan temperatur.

2. Material dan Metode

Pada penelitian ini akan dijelaskan mengenai bahan, peralatan, dan perhitungan laju korosi yang digunakan, serta persiapan pengujiannya:

a. Bahan dan peralatan

Bahan pada penelitian ini dibagi menjadi 3 yaitu: inhibitor alami, sampel baja SS-304, dan medium korosi: HCL 0,1N. Beberapa inhibitor alami yang digunakan pada penelitian ini adalah daun pandan (*Pandanus amaryllifous Roxb*). Peralatan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya adalah timbangan analitik, oven, beaker glass, gelas ukur, pipet ukur, lemari asam, gelas kaca, lumping & alu, dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

b. Perhitungan laju korosi

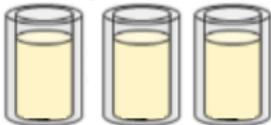
Laju korosi dipengaruhi oleh kehilangan berat, luas permukaan, waktu tepapar, dan masa jenis logamnya. Perhitungan laju korosi dapat dilihat sebagai berikut:

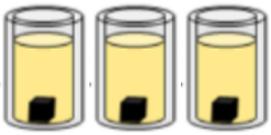
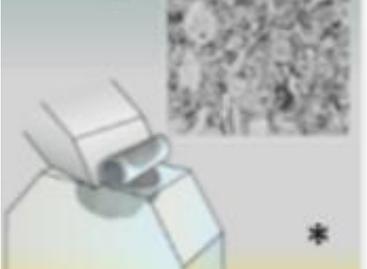
$$\text{Laju Korosi (mm/tahun)} = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (1)$$

c. Tahapan Pengujian

Secara terperinci tahapan persiapan dan pengujian akan diuraikan pada Tabel 1, sebagai berikut:

Tabel 1. Tahapan Pengujian

Keterangan Proses	Tahapan proses
a. Potong <i>specimen</i> baja SS-304 masing-masing menjadi 5 cm panjangnya menggunakan alat pemotong baja khusus, dan dilakukan secara triplo, kemudian catat berat awal baja yaitu kurang lebih 31 gram per potongan baja	 <p>3 potongan <i>specimen</i> baja SS-304</p>
b. Siapkan medium korosi yang akan dipakai yaitu larutan HCL dengan konsentrasi 0,1 N. Larutan HCL terdiri atas ion H ⁺ dan Cl ⁻ , maka keberadaan ion asam atau H ⁺ dapat mengakibatkan sifat agresif terhadap pelarutan logam	 <p>3 gelas larutan HCL dengan konsentrasi 0,1N</p>
c. Siapkan inhibitor alami yaitu daun pandan. Lalu tumbuk semua daun pandan hingga keluar air dari daun (larutan inhibitor alami). Penumbukan daun pandan dilakukan dengan menambahkan air/aquades dengan perbandingan 1:1 antara daun pandan dan air. Lalu diambil ekstraknya.	 <p>Daun Pandan. Larutan inhibitor alam</p> <p>Sesuai dengan penelitian Kayadoe, menyatakan bahwa semakin banyak jumlah atau konsentrasi inhibitor yang digunakan, maka persen EI atau efisiensi inhibisinya akan juga menjadi semakin besar. Hal ini akan membuat laju korosifitas pada baja <i>Stainless steel-304</i> juga menjadi akan semakin menurun (Kayadoe & Dkk, 2009). Penurunan laju korosifitas dapat disebabkan karena adanya bahan aktif yang dihasilkan dari ekstrak daun pandan, dimana senyawa tersebut dapat menurunkan frekuensi interaksi aktif antara larutan korosif dengan permukaan baja langsung. Sisi aktif dari bahan aktif yang dihasilkan dari ekstrak daunpandan akan membentuk lapisan pasif (<i>passive layer</i>) yang stabil. Berdasarkan hal tersebut, maka semakin besar area permukaan baja yang tertutupi senyawa inhibitor maka akan melindungi logam dari larutan yang bersifat korosif (Soltani et al., 2012); (Amin & Ibrahim, 2011).</p>
d. balurkan inhibitor alami terhadap baja SS-304 secara bergantian dengan cara digosokkan merata keseluruhan permukaan baja SS-304	

Keterangan Proses	Tahapan proses
e. Selanjutnya Baja yang sudah dibalurkan ekstrak daun pandan secara merata segera dimasukkan kedalam oven dan dipanaskan sesuai dengan suhu variabel yang diinginkan yaitu 50°C dan 60°C. Rentang variabel suhu tersebut dipilih berdasarkan suhu efektif penelitian Gunasekaran dan Chauhan tahun 2004.	 <p>Potongan <i>specimen</i> baja SS-304 yang telah dioles dengan larutan inhibitor dan dipanaskan dan pada variabel temperatur yang diinginkan.</p>
f. Setelah dikeluarkan baja dari dalam oven, lalu rendam baja ke dalam medium korosi yang sudah di siapkan yaitu HCl 0,1N dengan kondisi seluruh permukaan potongan baja terendam ke dalam medium korosi HCl sekitar 100ml, dan juga dengan kondisi tertutup untuk mencegah senyawa lain masuk ke dalam larutan	 <p>Perendaman baja ke dalam medium korosi HCl 0,1N</p>
g. Setelah seminggu kemudian ambil baja yang sudah terendam medium korosi selama seminggu lamanya, dibersihkan, diseka hingga kering dan timbang beratnya.	 <p>Uji SEM dan didapatkan hasil gambar dan analisis</p>
h. Setelah itu baja direndam kembali didalam medium korosi dan diperlakukan sama dengan sebelumnya hingga minggu kelima, sehingga dapat dihitung persamaan laju korosinya	
i. Selanjutnya dipilih sampel dengan persen terkorosi yang paling tinggi, kemudian sampel dilakukan uji SEM di laboratorium untuk melihat permukaan baja yang terkorosi.	

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan tahap terakhir pengujian, didapat dua sampel yang memiliki korosititas tertinggi yaitu satu hasil dari perlakuan suhu 50°C dan yang satunya berasal dari sampel hasil dari perlakuan 60°C. Selanjutnya kedua sampel tersebut diamati dengan menghitung akumulatif beratnya dan dilanjutkan pengujian SEM.

3.1 Tabel Hasil Pengamatan Kehilangan Berat Baja SS-304

Hasil ekstrak daun pandan yang dijadikan sebagai inhibitor organik alami diaplikasikan kepada baja dengan dua perlakuan suhu yaitu pada suhu 50°C dan 60°C, serta diamati setiap minggunya hingga minggu ke lima. Terlihat pada Tabel 2, bahwa di dalam metode ini juga dapat diketahui berat baja yang terlarut karena adanya proses oksidasi.

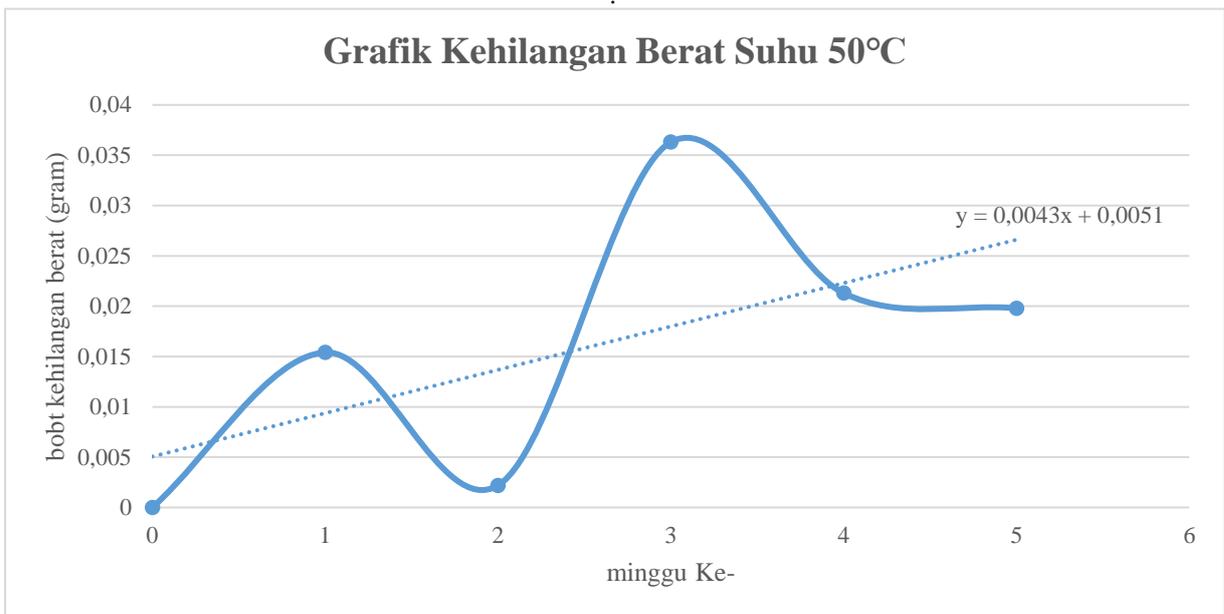
Tabel 2. Kehilangan Berat di Suhu 50°C dan 60°C

Waktu	Suhu 50°C	Akumulatif Kehilangan berat	Suhu 60°C	Akumulatif Kehilangan berat
Minggu ke 0 (M ₀)	31,4945 gram		31,3362 gram	
Minggu ke 1 (M ₁)	31,4791 gram	0,0154 gram	31,3353 gram	0,0009 gram
Minggu ke 2 (M ₂)	31,4769 gram	0,0176 gram	31,3345 gram	0,0017 gram
Minggu ke 3 (M ₃)	31,4406 gram	0,0539 gram	31,3329 gram	0,0033 gram
Minggu ke 4 (M ₄)	31,4283 gram	0,0662 gram	31,3269 gram	0,0093 gram
Minggu ke 5 (M ₅)	31,4085 gram	0,086 gram	31,3250 gram	0,0112 gram
Rata-rata kehilangan berat		0,019 gram		0,00224 gram
% Korosi pada Minggu ke 5	0,2730%		0,0357%	

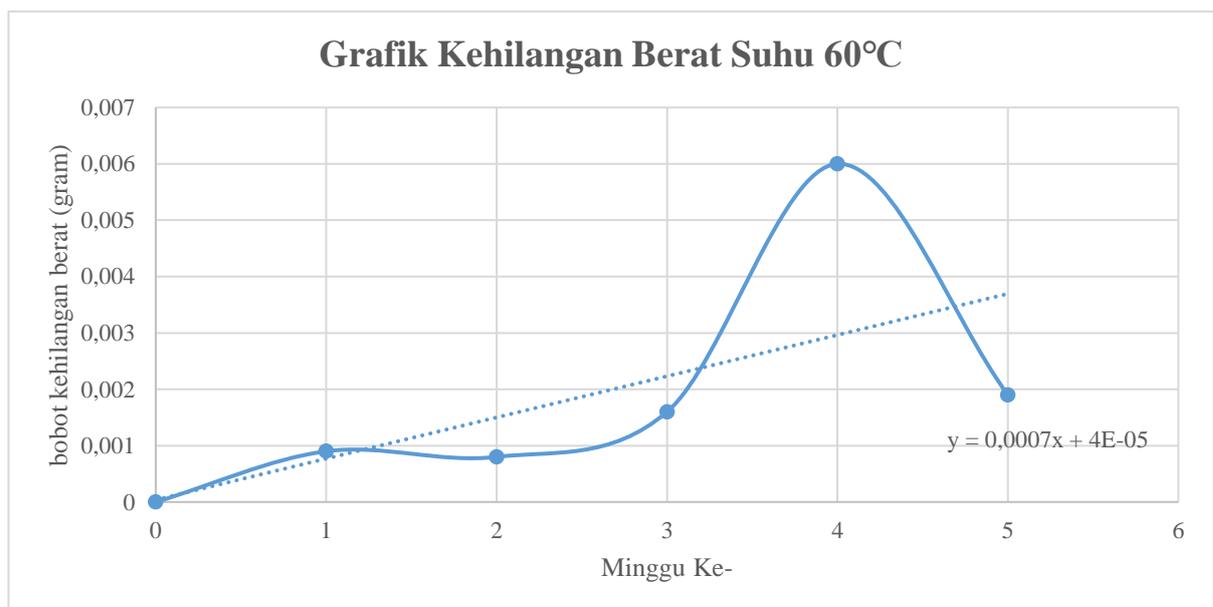
Berdasarkan Tabel 2. dapat dilihat bahwa baja SS-304 yang telah ditambahkan dengan inhibitor alami daun pandan yang telah diatur pada suhu 50°C, lalu direndam dengan medium korosi larutan HCl dengan konsentrasi 0,1N, maka didapat pada minggu ke 5 terdapat pengurangan akumulatif berat baja sebesar 0,0856 gram dan dengan berat kehilangan rata-rata sebesar 0,019 gram perminggu. Persen korosi yang didapat pada minggu ke 5 suhu 50°C dapat dihitung dengan perbandingan antara berat awal potongan baja yaitu 31,4945 gram dengan kehilangan berat akumulatif diminggu ke-5 yaitu 0,086 gram, maka didapatkan perhitungannya adalah 0,2730%. Sedangkan potongan baja SS-304 yang telah ditambahkan dengan inhibitor alami daun pandan yang telah diatur pada suhu 60°C, lalu direndam dengan medium korosi larutan HCl dengan konsentrasi 0,1N, maka pada minggu ke 5 terdapat pengurangan akumulatif berat baja sebesar 0,0112 gram, dan dengan berat kehilangan rata-rata sebesar gram perminggu. Persen korosi yang didapat pada minggu ke 5 suhu 60°C juga dapat dihitung dengan perbandingan

antara berat awal potongan baja yaitu 31,3362 gram dengan kehilangan berat akumulatif diminggu ke-5 yaitu 0,0112 gram, maka didapatkan perhitungannya adalah 0,0357%.

Perbandingan akumulatif kehilangan berat antara suhu 50°C lebih besar dibandingkan dengan suhu 60°C, hal ini menunjukkan pertanda bahwa semakin tinggi suhu juga mempengaruhi akumulatif berat baja SS-304. Hal ini dapat terjadi karena inhibitor alami dapat menyerap secara lebih sempurna pada lapisan permukaan baja disuhu 60°C dibandingkan dengan temperatur oven 50°C. Penyerapan ekstrak inhibitor alami yang lebih sempurna pada permukaan baja dapat menghambat laju korosi dan hal ini dibuktikan pada Tabel 2. Kehilangan berat di suhu 50°C dan 60°C. Jika disajikan dalam bentuk grafik maka, hasil yang didapat yaitu berat baja SS-304 semakin lama semakin berkurang, namun pada suhu 60°C kehilangan beratnya lebih sedikit dibandingkan dengan suhu 50°C yang cukup signifikan. Hasil akumulatif kehilangan berat pada suhu pemanasan 50°C dan 60°C berbanding dengan waktu terpapar (minggu ke-) ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Grafik Kehilangan Berat Suhu 50°C



Gambar 2. Grafik Kehilangan Berat Suhu 60°C

Berdasarkan Gambar 1 tentang grafik kehilangan berat pada suhu 50°C, didapatkan degradasi linier yang terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu paparan larutan korosi. Hal ini sejalan dengan penelitian Gunasekaran dan Chauhan yang menyatakan bahwa tempertaur dan waktu lama papar dapat meningkatkan bobot kehilangan berat pada logam (Gunasekaran & Chauhan, 2004). Persamaan kehilangan berat pada suhu 50°C yang diperoleh adalah $y = 0,0043x + 0,0051$, dimana x adalah jumlah minggu dan y adalah bobot kehilangan berat dalam gram. Sesuai dengan data yang diperoleh standar deviasi yang dihasilkan oleh data kehilangan berat pada suhu 50°C adalah 0,013 gram. Jika spesimen baja tersebut direndam terus menerus, maka sesuai dengan rumus perhitungan tersebut didapat pada minggu ke 7323 potongan baja akan habis (dengan mengabaikan faktor hambatan lain). Sedangkan jika dilihat pada Gambar 2 tentang grafik kehilangan berat pada suhu 60°C, didapatkan degradasi linier yang terus meningkat seiring dengan bertambahnya waktu paparan larutan korosi, namun grafik masih cenderung lebih landai dibandingkan dengan grafik kehilangan bobot pada suhu 50°C. Persamaan kehilangan berat pada suhu 60°C yang diperoleh adalah $y = 0,0007X + 0,00004$, dimana x adalah jumlah minggu dan y adalah bobot kehilangan berat dalam gram. Sesuai dengan data yang diperoleh standar deviasi yang dihasilkan oleh data kehilangan berat pada suhu 60°C adalah 0,0021 gram. Jika spesimen baja tersebut direndam terus menerus, maka sesuai dengan rumus perhitungan tersebut didapat pada minggu ke 44767 potongan baja akan habis (dengan mengabaikan faktor hambatan lain).

Tahap selanjutnya, kedua sampel (sampel 1 perlakuan suhu 50°C dan sampel 2 perlakuan suhu 60°C) yang memiliki korosititas tertinggi tersebut di analisis lebih lanjut untuk melihat permukaan baja yang terkorosi dengan menggunakan uji SEM, dan diuraikan pada sub bab selanjutnya.

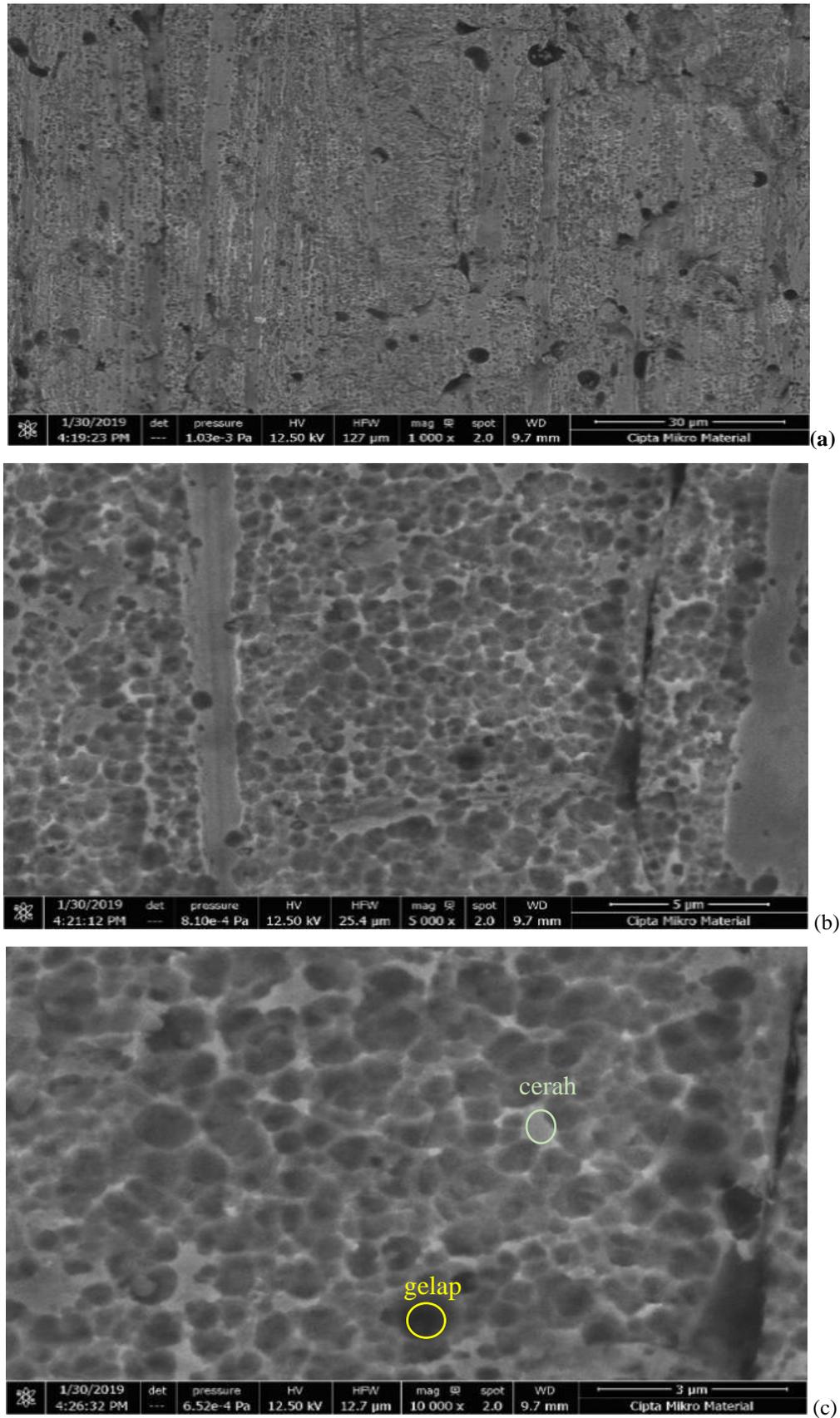
3.2 Hasil Uji SEM

Dibawah ini adalah gambar hasil uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui bentuk struktur atau permukaan material baja SS-304 pada suhu 50°C dan 60°C yang telah dilapisi pelindung ekstrak daun pandan. Prinsip uji SEM ini adalah menggunakan elektron yang memiliki resolusi lebih tinggi dari pada cahanya. Resolusi yang dihasilkan dari SEM ini dapat memperbesar resolusi gambar dan hasil ukuran hingga mencapai 2000 kali dibanding cahaya. Oleh karena itu, pengujian SEM pada permukaan sampel SS-304 ini diarahkan untuk mengamati terbentuknya lapisan oksida pada permukaan sampel.

Prinsip pencitraan SEM dapat melihat dari warna permukaannya, dimana permukaan yang rendah akan memiliki warna yang lebih gelap dibandingkan dengan permukaan yang tinggi. Selain tingginya permukaan, berat atom-atom penyusun baja tersebut juga dapat mempengaruhi pencitraan uji SEM ini, dimana berat molekul yang lebih kecil akan memberikan warna gelap jika dibandingkan dengan atom yang memiliki berat molekul lebih besar. Atau dengan kata lain bahwa warna cerah yang dihasilkan pada permukaan baja yang lebih tinggi dapat disebabkan oleh berat molekul yang lebih besar, sedangkan warna gelap yang dihasilkan pada permukaan baja yang lebih rendah dapat disebabkan oleh berat molekul yang lebih kecil. Perbedaan warna tersebut dapat dilihat pada gambar-gambar hasil uji SEM di bawah ini.

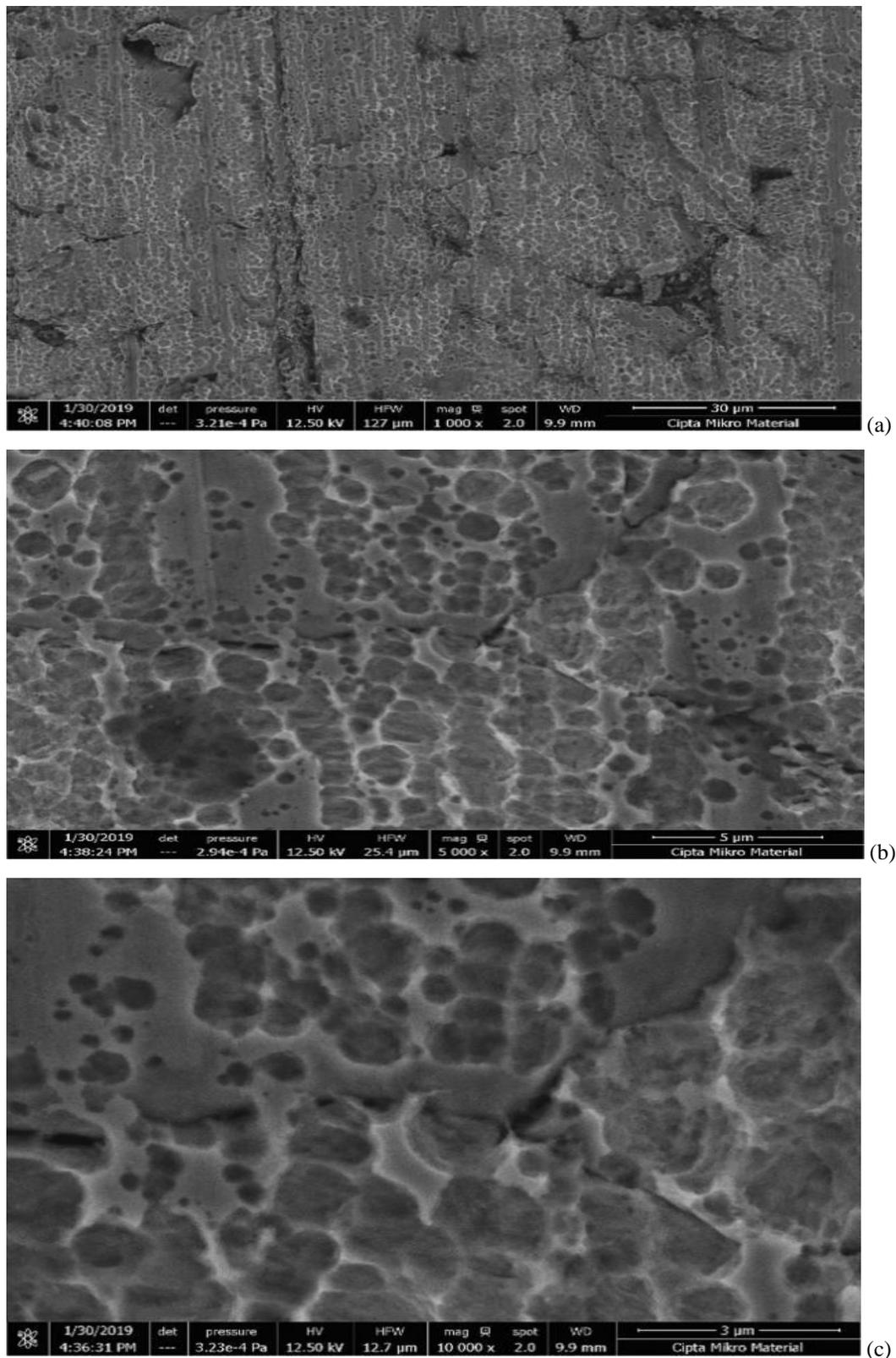
Mekanisme perubahan warna pada permukaan baja SS-304 tersebut dapat terjadi karena permukaan yang lebih tinggi akan lebih banyak melepaskan elektron dan menghasilkan gambar yang lebih cerah atau terang dibandingkan dengan permukaan yang lebih rendah. Begitu juga mekanisme ini terjadi juga secara prinsip atom, dimana densitas atau massa jenis atau berat molekul atom yang lebih besar akan memantulkan elektron yang lebih banyak sehingga warna yang didapat dari hasil uji SEM ini menjadi lebih cerah dari pada atom yang memiliki densitas yang lebih rendah akan memantulkan elektron yang lebih sedikit sehingga warna yang didapat dari hasil uji SEM ini menjadi lebih gelap. Berdasarkan hasil pencitraan uji SEM tersebut juga dapat terlihat jelas, bahwa walaupun permukaan baja telah teroksidasi, namun pembentukan film pelapis atau penambahan keberadaan senyawa organik yaitu daun pandan pada permukaan logam baja SS-304 ini tetap dapat menghambat korosifitas dan melindungi morfologi permukaan baja SS-304. Pada prinsipnya ekstrak daun pandan menghasilkan lapisan pelindung yang mencegah air dan/atau molekul oksigen berinteraksi dengan permukaan logam yang dapat menghasilkan oksidasi atau pengkaratan. Ekstrak daun pandan yang di uji fitokimia dalam laboratorium, memiliki senyawa metabolit sekunder seperti tannin, antrakuinon, alkaloid, steroid, flavonoid, dan polifenol (Kayadoe *et al.*, 2015). Senyawa-senyawa organik yang terkandung dalam ekstrak daun pandan tersebut dapat berperan sebagai inhibitor korosi karena memenuhi karakteristik inhibitor senyawa organik seperti adanya hetero atom, gugus polar, ikatan π , serta pasangan elektron bebas yang menjadi sarana bagi inhibitor berikatan dengan logam secara koordinasi (F. S. de Souza & Spinelli, 2009).

Berdasarkan keterangan tersebut, maka untuk lebih jelasnya hasil uji pencitraan SEM untuk struktur mikro pada sampel pemanasan suhu 50°C pada minggu ke 5 dengan struktur permukaan baja yang diperbesar dari 1000 kali, 5000 kali, hingga 10.000 kali, dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. (a) Hasil Uji SEM pada Suhu 50°C dengan Perbesaran 1000× (b) Hasil Uji SEM pada Suhu 50°C dengan Perbesaran 5000× (c) Hasil Uji SEM pada Suhu 50°C dengan Perbesaran 10.000×.

Proses oksidasi ini juga terjadi pada pada struktur permukaan baja SS-304 pemanasan suhu 60°C, yang telah dilapisi dengan inhibitor alami. Hasil uji SEM untuk struktur mikro pada sampel pemanasan suhu 60°C pada minggu ke 5, dengan struktur permukaan baja yang diperbesar dari 1000 kali, 5000 kali, hingga 10.000 kali ditunjukkan pada Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. (a) Hasil Uji SEM pada Suhu 60°C dengan Perbesaran 1000× (b) Hasil Uji SEM pada Suhu 60°C dengan Perbesaran 5000× (c) Hasil Uji SEM pada Suhu 60°C dengan Perbesaran 10000×

Korosifitas terjadi karena adanya pelepasan (*flaking*) lapisan oksida secara lokal yang terjadi selama proses oksidasi. Selain itu, proses oksidasi juga dapat teramati dengan timbulnya gelembung-gelembung udara yang berasal dari gas yang dihasilkan dari atom H dan teramati pada lapisan permukaan *baja*, hal ini menunjukkan bahwa proses korosi pada reaksi katodik akibat *discharge* ion hidrogen yang berasal dari larutan asam (Caliskan & Akbas, 2011). Hal ini sesuai dengan pengamatan langsung pada keadaan uji perendaman baja SS-304 di dalam larutan asam laboratorium yang dilakukan, bahwa selama proses korosifitas berlangsung terdapat gelembung-gelembung gas yang menempel pada permukaan baja SS-304, walaupun jumlahnya hanya sedikit karena adanya penambahan senyawa inhibitor alami yaitu daun pandan lapisan permukaan baja SS-304.

Tanpa adanya larutan inhibitor organik alami daun pandan, seharusnya morfologi permukaan baja SS-304 dapat berubah secara drastis sebagai akibat dari korosi asam yang menghasilkan permukaan logam berpori dan tidak teratur. Namun terlihat pada Gambar 3 dan 4 tersebut hasil uji SEM dengan jelas menunjukkan bahwa proses korosi jauh lebih ringan karena lapisan pelindung dari senyawa organik daun pandan. Jika dilihat morfologi kedua sampel ini (perbedaan antara Suhu 50°C dan Suhu 60°C), hanya menunjukkan sedikit perbedaan yang terlihat dari ketebalan lapisan oksidanya pada sampel yang teroksidasi. Berdasarkan percobaan tersebut, dapat disimpulkan bahwa ekstrak daun pandan secara spontan teradsorpsi dan menghasilkan lapisan pelindung pada permukaan logam SS-304 dan mengurangi proses korosi dalam larutan HCl. Dimana, proses korosi cenderung mengubah distribusi komposisi di atas permukaan, menciptakan permukaan yang heterogen yang juga dapat mempengaruhi sudut kontak karena peningkatan karakter hidrofilik permukaan elektroda (Fernando Sílvia De Souza et al., 2012). Perbandingan gambar yang terjelas yaitu antara Gambar 3c dan Gambar 4c mendeskripsikan bahwa hasil uji SEM pada suhu 50°C dengan perbesaran 10000× memiliki warna yang lebih cerah atau terang dibandingkan dengan hasil uji SEM pada suhu 60°C dengan perbesaran 10000×. Hal ini terjadi karena adanya lapisan oksida, dimana jika lapisan oksidanya lebih tebal maka hal ini menunjukkan laju oksidasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pengujian SEM ini berfungsi untuk mengetahui hasil mikrostruktur material baja SS-304 serta analisis ketahanan oksidasi pada setiap variabel temperatur dan waktu terpapar.

3.3 Perhitungan Laju Korosi

Perhitungan laju korosi baja SS-304 juga terbagi menjadi dua perlakuan suhu yaitu pada suhu 50°C dan 60°C, dan dapat dihitung:

1. Perhitungan laju korosi (mm/tahun) *Stainless Steel* -304 dengan penambahan inhibitor alami daun pandan pada suhu 50°C

$$\begin{aligned} \text{Laju Korosi (mm/tahun)} &= \frac{K \times W}{A \times T \times D} \\ &= \frac{87,6 \times 112000}{14,3079 \times 840 \times 7,2114} \\ &= \frac{9811200}{86671,1917} \\ &= 113,2002 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

Perhitungan laju korosi *Stainless Steel* -304 dengan inhibitor alami daun pandan pada suhu 50°C yang didapat adalah 113,2002 mm/tahun.

2. L Perhitungan laju korosi (mm/tahun) *Stainless Steel* -304 dengan penambahan inhibitor alami daun pandan pada suhu 60°C

$$\begin{aligned} \text{Laju Korosi (mm/tahun)} &= \frac{K \times W}{A \times T \times D} \\ &= \frac{87,6 \times 86000}{14,5991 \times 840 \times 7,4289} \\ &= \frac{7533600}{91102,4134} \\ &= 82,6937 \text{ mm/tahun} \end{aligned}$$

Perhitungan laju korosi *Stainless Steel* -304 dengan inhibitor alami daun pandan suhu 60°C yang didapat adalah 82,6937 mm/tahun.

Berdasarkan hasil perhitungan yang didapat, terlihat bahwa pada suhu 60°C, laju korosi yang didapat hanya 82,6937 mm/tahun atau lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan laju korosi pada suhu 50°C yaitu sebesar **113,2002** mm/tahun. Hal ini dapat terjadi karena meningkatnya suhu juga dapat membuat reaksi antara

ekstrak daun pandan dengan permukaan baja SS-304 semakin menyatu dan meresap sehingga kecepatan proses korosif dalam larutan HCl akan terhambat. Hal ini terjadi karena makin tinggi suhu yang digunakan maka energi kinetik dari partikel-partikel yang bereaksi akan meningkat sehingga melampaui besarnya harga energi aktivasi dan akibatnya laju kecepatan reaksi (korosi) juga akan makin cepat, begitu juga sebaliknya. Pada peningkatan suhu tertentu, laju difusi reaktan akan meningkat dua kali lipat dan dapat mengakibatkan proses aktivasi meningkat menjadi 10-100 kali lipat (Shreir & Burstein, 2013). Dengan adanya suhu tinggi, ionisasi larutan asam akan semakin cepat dan pori-pori permukaan logam akan semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan difusi zat asam dan molekul oksigen pada permukaan logam akan semakin cepat, sehingga pelarutan logam akan semakin cepat. Peningkatan suhu menyebabkan tingkat energi molekul pada permukaan logam mengalami persaingan antara gaya adsorpsi dan gaya desorpsi dari logam (Wahyuningsih *et al.*, 2010). Oleh karena itu Baja SS-304 pada suhu pemanasan 60°C ketahanan korosinya lebih baik dibandingkan suhu 50°C.

Kesimpulan

Baja SS-304 pada suhu pemanasan 60°C memiliki ketahanan korosi lebih baik dibandingkan suhu 50°C. Begitu pula yang terjadi pada inhibitor daun pandan di suhu 60°C memiliki laju korosi 82,6937 mm/tahun atau lebih rendah dibandingkan dengan kondisi suhu 50°C yaitu 113,2002 mm/tahun. Inhibitor organik alami daun pandan cukup efektif dalam menghambat korosifitas baja SS-304.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan dan memberikan bantuan dalam penelitian ini, sehingga dapat dituangkan dalam bentuk tulisan dan dapat diinformasikan serta bermanfaat bagi khalayak umum.

Daftar Notasi

- K = Faktor Konstanta
- W = Kehilangan Berat [gram]
- A = Luas Permukaan [cm²]
- T = Waktu Terpapar [jam]
- D = Densitas specimen [gram/cm³]

Daftar Pustaka

- A. Thorn, A. Adam, T. Gichuhi, W. Novelli, M.A. Sapp. (2006). Improved corrosion control through nontoxic corrosion inhibitors synergies, *J. Coat. Technol.* 3 (2006) 24–30.
- Abd El Haleem, S. M., Abd El Wanees, S., Abd El Aal, E. E., & Farouk, A. (2013). Factors affecting the corrosion behaviour of aluminium in acid solutions. I. Nitrogen and/or sulphur-containing organic compounds as corrosion inhibitors for Al in HCl solutions. *Corrosion Science*, 68, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.03.021>
- Abdel-Azim, A. A., Milad, R., El-Ghazawy, R., & Kamal, R. (2014). Corrosion inhibition efficiency of water soluble ethoxylated trimethylol propane by gravimetric analysis. *Egyptian Journal of Petroleum*, 23(1), 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.02.003>
- Amin, M. A., & Ibrahim, M. M. (2011). Corrosion and corrosion control of mild steel in concentrated H₂SO₄ solutions by a newly synthesized glycine derivative. *Corrosion Science*, 53(3), 873–885. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.022>
- Antonijevic, M. M., & Petrovic Mihajlovic, M. B. (2015). Copper Corrosion Inhibitors. Period 2008-2014. A Review. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(2), 1027–1053. <http://electrochemsci.org/papers/vol10/100201027.pdf>
- Bentiss, F., Traisnel, M., & Lagrenee, M. (2000). The substituted 1,3,4-oxadiazoles: A new class of corrosion inhibitors of mild steel in acidic media. *Corrosion Science*, 42(1), 127–146. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(99\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(99)00049-9)
- Caliskan, N., & Akbas, E. (2011). The inhibition effect of some pyrimidine derivatives on austenitic stainless steel in acidic media. *Materials Chemistry and Physics*, 126(3), 983–988. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.11.051>
- D. Li, F. Wang, X. Yu, J. Wang, Q. Liu, P. Yang, et al., (2011). Anticorrosion organic coating with layered double hydroxide loaded with corrosion inhibitor of tungstate, *Prog. Org. Coat.* 71 (2011) 302–309, <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.03.023>
- De Souza, F. S., Giacomelli, C., Gonçalves, R. S., & Spinelli, A. (2012). Adsorption behavior of caffeine as a green corrosion inhibitor for copper. *Materials Science and Engineering C*, 32(8), 2436–2444. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.07.019>

- de Souza, F. S., & Spinelli, A. (2009). Caffeic acid as a green corrosion inhibitor for mild steel. *Corrosion Science*, 51(3), 642–649. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.12.013>
- F.L. Nie, S.G. Wang, Y.B. Wang, S.C. Wei, Y.F. Zheng. (2011). *Dental Mater.* 27, 677–683.
- Glass, G. K., & Page, C. L. (1991). *FACTORS AFFECTING THE CORROSION RATE OF STEEL IN CARBONATED MORTARS.* 32(12), 1283–1294.
- Goyal, M., Kumar, S., Bahadur, I., Verma, C., & Ebenso, E. E. (2018). Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256(2017), 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.045>
- Gunasekaran, G., & Chauhan, L. R. (2004). Eco friendly inhibitor for corrosion inhibition of mild steel in phosphoric acid medium. *Electrochimica Acta*, 49(25), 4387–4395. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.04.030>
- Hakim, A. Al. (2011). Pengaruh Inhibitor Korosi Berbasis Sunyawa Fenolik untuk Proteksi Pipa Baja Karbon pada Lingkungan 0.5, 1.5, 2.5, 3.5% NaCl yang Mengandung Gas CO₂. *Universitas Indonesia, Depok*.
- Hye-Young Klose, A. (1997). *vapor phase corrosion inhibitors for navy application.* 21(3), 295–316.
- K.T. Oh, S.U. Choo, K.M. Kim, K.N. Kim, Eur. J. (2005). *Orthodontics* 27, 237–244.
- Karim, A. A. ., & Yusuf, Z. A. (2012). Analisa Pengaruh Penambahan Inhibitor Kalsium Karbonat dan Tapioka Terhadap Tingkat Laju Korosi pada Pelat Baja Tangki Ballast Air Laut. *Jurnal Riset Dan Teknologi Kelautan*, 10(2), 205–2011. <http://repository.unhas.ac.id/bitstream/handle/123456789/4363/8.20ASIS20dan20P.zul20master.pdf?sequence=1>
- Kayadoe, & Dkk. (2009). *Ekstrak daun pandan.* 88–96.
- Mardhani, & Harmami. (2013). Pengaruh Suhu Terhadap Korosi Baja SS 304 dalam Media 1 M HCL dengan Adanya Inhibitor Kinina. *Sains Dan Seni Pomits*, 2(2), 2–4.
- Mazères, B., Desgranges, C., Toffolon-Masclat, C., & Monceau, D. (2016). Experimental study and numerical simulation of high temperature (1100–1250°C) oxidation of prior-oxidized zirconium alloy. *Corrosion Science*, 103, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.10.018>
- Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media - A review. *Materials Letters*, 62(1), 113–116. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.079>
- Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). Definition and Importance of Corrosion. *Corrosion and Corrosion Control*, 1–8. <https://doi.org/10.1002/9780470277270.ch1>
- Saputra, R. (2011). Studi pengaruh konsentrasi ekstrak the rosella (*Hibiscus Sabdariffa*) sebagai green corrosion inhibitor untuk material baja karbon rendah di lingkungan NaCl 3,5% pada Temperatur 40 derajat celcius, Roni Saputra, FT UI, 2011. *Skripsi*.
- Sastri, V. S. (2011). *green corrosion inhibitors. Theory and Practice.* Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Scendo, M. (2007). The effect of purine on the corrosion of copper in chloride solutions. *Corrosion Science*, 49(2), 373–390. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.06.022>
- Shreir, L. L., & Burstein, G. T. (2013). Outline of Chemical Thermodynamics. *Corrosion: Third Edition*, 2, 20:57–20:75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052351-4.50145-X>
- Singh, M. R., & Singh, G. (2012). Hibiscus cannabinus extract as a potential green inhibitor for corrosion of mild steel in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Journal of Materials and Environmental Science*, 3(4), 698–705.
- Soltani, N., Tavakkoli, N., Khayatkashani, M., Jalali, M. R., & Mosavizade, A. (2012). Green approach to corrosion inhibition of 304 stainless steel in hydrochloric acid solution by the extract of *Salvia officinalis* leaves. *Corrosion Science*, 62, 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.05.003>
- Sumarji. (2011). Studi Perbandingan Ketahanan Korosi Stainless Steel Tipe Ss 304 Dan Ss 201 Menggunakan Metode U-Bend Test Secara Siklik Dengan Variasi Suhu Dan Ph. *Jurnal ROTOR*, 4(1), 1–8.
- Verma, C., Olasunkanmi, L. O., Ebenso, E. E., Quraishi, M. A., & Obot, I. B. (2016). Adsorption Behavior of Glucosamine-Based, Pyrimidine-Fused Heterocycles as Green Corrosion Inhibitors for Mild Steel: Experimental and Theoretical Studies. *Journal of Physical Chemistry C*, 120(21), 11598–11611. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b04429>
- Wahyuningsih, A., Sunarya, Y., & Aisyah, S. (2010). Metanamina sebagai Inhibitor Korosi Baja Karbon dalam Lingkungan Sesuai Kondisi Pertambangan Minyak Bumi. *Jurnal Sains Dan Teknologi Kimia*, 1(1), 17–29.
- Yanuar, A. P., Pratikno, H., & Titah, H. S. (2017). Pengaruh Penambahan Inhibitor Alami terhadap Laju Korosi pada Material Pipa dalam Larutan Air Laut Buatan. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), 8–13. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.18938>

Penilaian Keberhasilan Pengelolaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh

R. Wahyuni¹, B. S. Wignyosukarto², dan B. Kamulyan³

^{1,2,3}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
¹rizkiwahyuni4@gmail.com, ²budiws@ugm.ac.id, ³budi.kamulyan@ugm.ac.id

Abstrak

Program PAMSIMAS merupakan salah satu program pemerintah yang mendukung program nasional dalam mencapai target 100% akses air minum dan sanitasi. Program PAMSIMAS juga memfasilitasi dan mempromosikan sanitasi yang layak, perilaku hidup bersih dan sehat. Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran mengenai pelaksanaan program PAMSIMAS di Desa Lam Reh, Desa Lambaro Sukon, dan Desa Lambaro Biluy di Kabupaten Aceh Besar. Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi faktor-faktor keberlanjutan program serta menilai keberhasilan Program PAMSIMAS di masing-masing desa agar fasilitas yang dibangun program PAMSIMAS dapat digunakan sebaik-baiknya. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan menggunakan metode induktif. Data yang digunakan data sekunder dan data primer yang didukung dengan wawancara terhadap pelaku terkait program PAMSIMAS tingkat kabupaten maupun desa. Analisis yang digunakan yaitu analisis deskriptif kualitatif. Adapun hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa keberhasilan dari Desa Lam Reh dan Desa Lambaro Sukon sudah dalam kategori Amat Baik, beberapa variabel seperti sumber air, PHBS, pengelolaan masyarakat, dan keberfungsian sarana sudah lebih dari 50%. Namun, untuk Desa Lambaro Biluy, pengelolaan masyarakat dan keberfungsian sarana masing-masing sebesar 44,4% dan 0%, sarana air minum yang dibangun oleh program PAMSIMAS tidak lagi difungsikan.

Kata kunci: PAMSIMAS, program, air minum, sanitasi, keberhasilan

Abstract

The PAMSIMAS program is one of the government programs supporting the national program to achieve 100% access to drinking water and sanitation. The PAMSIMAS program also facilitates and cleans proper sanitation, living, and healthy behavior. This study aims to provide an overview of the PAMSIMAS program's implementation in Lam Reh Village, Lambaro Sukon Village, and Lambaro Biluy Village in Aceh Besar District. The research also identifies factors of program sustainability and assesses the PAMSIMAS program in each village so that the facilities built by the PAMSIMAS program can be used properly. This study uses a quantitative approach using inductive methods. The data used are secondary data and primary data supported by interviews with actors related to the district and village PAMSIMAS program. The analysis used is descriptive qualitative analysis. This study's results indicate that Lam Reh and Lambaro Sukon Villages' belief is already in the Very Good category. Several variables, such as water sources, PHBS, community management, and facilities functioning, are more than 50%. However, for Lambaro Biluy Village, community management and functioning of the facilities were 44.4% and 0%, respectively, the drinking water facilities built by the PAMSIMAS program are no longer functioning.

Keywords: PAMSIMAS, program, drinking water, sanitation, success

1. Pendahuluan

Air dan sanitasi menjadi sangat penting terutama pada negara berkembang. Akses air minum dan sanitasi menjadi kunci bagi kesehatan masyarakat. Akses air yang tidak aman dapat menjadi penyebab utama penyakit diare dan dapat dicegah melalui akses air minum yang aman, sanitasi yang memadai, dan perilaku hidup sehat. (WHO, 2021). Pemerintah Indonesia melanjutkan keberhasilan capaian target *Millenium Development Goals* dalam sektor air minum dan sanitasi melalui program nasional dalam mencapai target 100% akses air minum dan sanitasi (Widayanti, 2017). Sampai akhir tahun 2018 masyarakat yang mendapatkan akses air minum yang aman hanya 88% dan untuk kebutuhan sanitasi mencapai 75% dari total penduduk Indonesia. (Pedoman Umum Program PAMSIMAS, 2020). Umumnya, masyarakat yang belum mendapatkan akses air minum dan sanitasi yang aman merupakan masyarakat desa yang berpenghasilan rendah.

Program nasional untuk air bersih dan sanitasi yaitu Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) yang menjadi salah satu program andalan nasional untuk meningkatkan akses perdesaan terhadap fasilitas air minum dan sanitasi yang layak. Program PAMSIMAS dilaksanakan oleh pemerintah pusat secara langsung ke pemerintah desa.

Info Makalah:

Dikirim : 01-22-21;
Revisi 1 : 04-08-21;
Revisi 2 : 05-01-21;
Revisi 3 : 05-29-21;
Diterima : 05-31-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +6282361834745
e-mail : rizkiwahyuni4@gmail.com

Dalam Undang-Undang No. 23 Tahun 2014 tentang Pemerintah Daerah bahwa memenuhi kebutuhan air minum dan sanitasi telah menjadi urusan dari Pemerintah Daerah setempat. Program PAMSIMAS melakukan pendekatan berbasis masyarakat yaitu melalui keterlibatan seluruh masyarakat dan tanggap terhadap kebutuhan dari masyarakat. Masyarakat desa juga diberi kesempatan berpartisipasi langsung dalam pengelolaan dan perencanaan serta pemeliharaan sarana dan telah menjadi tanggungjawab masyarakat. (Pedoman Umum Program PAMSIMAS, 2020).

Program PAMSIMAS I dimulai pada tahun 2006 sampai tahun 2012, program PAMSIMAS II pada tahun 2013 sampai dengan tahun 2015 dan program PAMSIMAS III dilaksanakan pada tahun 2016 sampai dengan tahun 2020 untuk mendukung dua agenda nasional yaitu 100% air minum dan sanitasi yang aman dan layak serta berbasis masyarakat. Program PAMSIMAS juga menyediakan dukungan finansial baik untuk investasi fisik dalam bentuk sarana dan prasarana, maupun investasi non-fisik dalam bentuk manajemen, dukungan teknis, dan pengembangan kapasitas. Program PAMSIMAS juga mengajak masyarakat desa untuk terlibat dalam menjalankan program, agar masyarakat mandiri dalam pengelolaan, operasional, dan juga pemeliharaan sarana yang dibangun. Program PAMSIMAS juga menjadi program air minum dan sanitasi yang dapat digunakan oleh berbagai pemangku kepentingan untuk menjadi program bersama dalam rangka pencapaian akses universal air minum dan sanitasi di perdesaan. Pelayanan air yang dilakukan program PAMSIMAS kepada masyarakat yang berada di luar jangkauan pelayanan PDAM untuk memenuhi kebutuhan air minum.

Program PAMSIMAS juga memiliki sasaran program untuk mencapai tujuan dari program tersebut, *key performance indicator*/kunci indikator kinerja (KPI) program PAMSIMAS dalam Pedoman Umum Program PAMSIMAS adalah sebagai berikut.

- a. Terdapat tambahan 8,50 % penduduk yang mendapatkan akses sarana air minum aman
- b. Terdapat tambahan 5,50 % penduduk yang dapat mengakses sarana sanitasi yang layak dan berkelanjutan
- c. Minimal pada 60% masyarakat dusun lokasi program seluruh penduduknya menerapkan Stop Buang Air Besar Sembarangan (Stop-BABS).
- d. Minimal 70% masyarakat mengadopsi perilaku program Cuci Tangan Pakai Sabun (CTPS)
- e. Minimal 70% pemerintah kabupaten memiliki dokumen perencanaan daerah bidang air minum dan sanitasi untuk mendukung adopsi dan pengarusutamaan pendekatan Pamsimas dan pencapaian target pembangunan air minum dan sanitasi daerah
- f. Minimal 60% pemerintah kabupaten mempunyai peningkatan belanja di bidang air minum dan sanitasi dalam rangka pemeliharaan sistem pelayanan air minum dan sanitasi saat ini serta pencapaian akses universal air minum dan sanitasi.

Berdasarkan Juknis Penguatan Keberlanjutan Program PAMSIMAS (Direktur Pengembangan Air Minum, 2013), penguatan keberlanjutan dari pengelolaan program PAMSIMAS diwajibkan mampu menunjukkan keberhasilan berdasarkan beberapa indikator. Beberapa variabel yang dapat digunakan untuk menilai keberhasilan berdasarkan Petunjuk Teknis Penguatan Keberlanjutan Program PAMSIMAS antara lain.

- a. Tingkat keberfungsian SPAM yang terbangun
- b. Tingkat penerapan tarif penggunaan air minum, diharapkan seluruh KPSPAMS telah menerapkan tarif yang memenuhi biaya operasional dan pemeliharaan bahkan memenuhi biaya pemulihan
- c. Luasnya jangkauan pelayanan air minum dengan pendekatan berbasis masyarakat
- d. Jumlah penduduk yang menggunakan jamban sehat bertambah
- e. Penambahan dusun, desa/kelurahan, dan kabupaten/kota yang mencapai status 100% Stop-BABS
- f. Tingginya kinerja KPSPAMS di desa

Sumber dana pada program PAMSIMAS berupa APBN, APBD, APB Desa, dan dana masyarakat. Satuan Pelaksanaan membantu kegiatan masyarakat di desa juga membentuk kelembagaan masyarakat agar mempermudah masyarakat dalam bekerja sama untuk menjalankan program PAMSIMAS. Peran aktif dari masyarakat berpengaruh pada proses pembangunan juga proses keberlanjutan program yang menghasilkan efektifitas dan efisiensi program meningkat. Dana Bantuan Langsung Masyarakat (BLM) yang disalurkan kepada masing-masing desa atau kelurahan sasaran untuk membiayai Rencana Kerja Masyarakat (RKM) terdiri dari 80% dana APBN dan 20% kontribusi masyarakat. Kontribusi pemerintah desa sebesar 10% yang sumber dananya dari APB Desa. Keterlibatan masyarakat dalam pengelolaan program PAMSIMAS dapat berupa 16% *inkind* dan 4% *incash*.

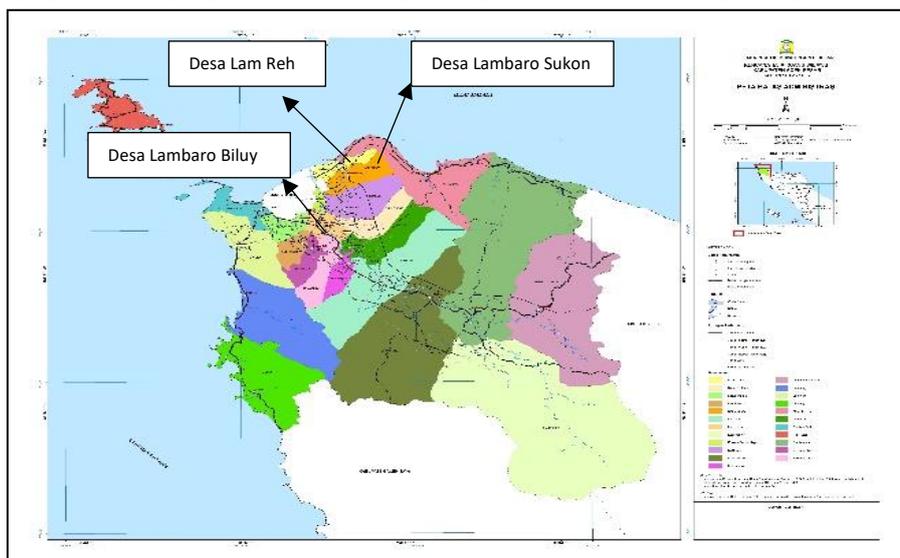
Selain sasaran program, sasaran lokasi penerima program PAMSIMAS yaitu perdesaan yang belum memiliki akses air minum yang aman dan sehat. Dalam Pedoman Umum Program PAMSIMAS Tahun 2016, kriteria desa sasaran baru PAMSIMAS adalah sebagai berikut.

- a. Tidak menerima program PAMSIMAS pada tahun sebelumnya.
- b. Akses air minum di desa belum mencapai 100%
- c. Akses sanitasi layak belum mencapai 100%
- d. Kemungkinan terkena penyakit diare (yang ditularkan oleh air) masih tinggi
- e. Menerima biaya penerima manfaat yang efisien
- f. Adanya pernyataan kesanggupan pemerintah desa untuk menyediakan 10% (minimal) pembiayaan untuk RKM yang bersumber dari APBDesa

- g. Adanya pernyataan kesanggupan masyarakat untuk:
- 1) Menyediakan Kader Pemberdayaan Masyarakat yang menangani bidang AMPL (Kader AMPL)
 - 2) Menyediakan kontribusi sebesar 20% (minimal) dari kebutuhan biaya RKM, terdiri dari 4% *incash* dan 16% *inkind*.
 - 3) Menghilangkan kebiasaan buang air besar sembarangan

Kabupaten Aceh Besar menjadi salah satu kabupaten penerima program PAMSIMAS, desa-desa di Kabupaten Aceh Besar masih banyak yang belum mendapatkan akses air minum dan sanitasi yang baik. Berdasarkan Laporan Akhir Penyusunan Rencana Induk Sistem Penyediaan Air Minum (RISPAM) Kabupaten Aceh Besar. Penduduk miskin di Kabupaten Aceh Besar pada tahun 2013 tercatat sebesar 16,88% dari jumlah penduduk, sedangkan penduduk miskin tingkat provinsi yaitu sebesar 17,6%. Masyarakat dipedesaan masih belum mendapatkan pengaruh yang signifikan dari dampak pembangunan. Untuk itu, pemerintah setempat mengusulkan beberapa desa di Kabupaten Aceh Besar untuk bergabung dalam program PAMSIMAS yang membantu masyarakat desa dalam akses air minum. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Nazar (2017), kondisi internal PAMSIMAS II di Kabupaten Aceh Besar memiliki faktor keberhasilan yang besar, sebesar 96% responden berpendapat bahwa PAMSIMAS II telah mampu meningkatkan akses air minum di Kabupaten Aceh Besar, hanya saja keterlambatan penyelesaian program dan pelatihan pengelolaan tidak memadai. Oleh karena itu, dengan adanya PAMSIMAS III diharapkan masyarakat dapat menjalankan program dengan baik, dan dapat memperbaiki kekurangan pada PAMSIMAS II.

Beberapa desa di Kabupaten Aceh Besar terpilih mendapatkan bantuan program PAMSIMAS yaitu Desa Lam Reh dan Desa Lamabro Sukon di Kecamatan Darussalam, dan Desa Lambaro Biluy di Kecamatan Darul Kamal. Program PAMSIMAS II di Desa Lam Reh dilaksanakan tahun 2015 dan masih berjalan sampai sekarang, program PAMSIMAS III di Desa Lambaro Sukon dimulai tahun 2018, sedangkan program PAMSIMAS II di Desa Lambaro Biluy tidak digunakan kembali, padahal sebelumnya dapat beroperasi. Oleh karena itu, perlu dilakukan penilaian keberhasilan melalui data kuesioner yang disebar mengenai kondisi fisik program PAMSIMAS dalam memenuhi kebutuhan air bersih masyarakat Desa Lam Reh, Desa Lambaro Sukon dan Desa Lambaro Biluy agar sarana yang dibangun dapat berfungsi dalam jangka waktu yang lama dan berfungsi dengan baik. Berikut merupakan gambaran lokasi penelitian.



Gambar 1. Desa Lokasi Penelitian

2. Metode

Penelitian ini dilakukan di Desa Lam Reh, Desa Lambaro Sukon, dan Desa Lambaro Biluy di Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh. Kabupaten ini merupakan salah satu kabupaten penerima program PAMSIMAS dengan jumlah desa yang masih banyak mengalami kesulitan mendapatkan akses air minum serta sanitasi yang baik. Desa penerima Program PAMSIMAS II di Kabupaten Aceh Besar sebanyak 15 desa dan pada program PAMSIMAS III yang masih berjalan saat ini yaitu sebanyak 20 desa. Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif dengan teknik analisis deskriptif induktif. Analisis deskriptif induktif digunakan untuk menilai permasalahan dengan pengujian beberapa teori. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder dan primer. Data sekunder berupa studi literatur, peta topografi, dan data umum mengenai program PAMSIMAS yang didapat dari *website* resmi program PAMSIMAS. Pengambilan data primer diambil langsung di lapangan dengan penyebaran kuesioner dan wawancara. Pertanyaan kuesioner disusun berdasarkan beberapa indikator dari Pedoman Program PAMSIMAS dan Purwanti (2015). Metode sampling yang digunakan adalah jenis *nonprobability sampling* yaitu dengan teknik *sampling purposive*. Perhitungan jumlah sampel menggunakan beberapa metode antara lain.

- a. Metode Issac dan Michael, dengan rumus menentukan jumlah sampel sebagai berikut.

$$s = \frac{\lambda^2 \cdot N \cdot P \cdot Q}{d^2(N-1) + \lambda^2 \cdot P \cdot Q} \quad (1)$$

- b. Metode Slovin, dengan rumus menentukan jumlah sampel sebagai berikut.

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad (2)$$

Penilaian keberhasilan program PAMSIMAS yang ada di Desa Lam Reh, Desa Lambaro Sukon, dan Desa Lambaro Biluy menggunakan kriteria berdasarkan Pedoman program PAMSIMAS dalam Purwanti (2015). Kerangka pikir dari variabel yang akan diteliti pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1 adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Variabel Penilaian Keberhasilan Program PAMSIMAS

No.	Variabel	Indikator
1.	Sumber Air	Mayarakat mendapatkan akses air minum dengan mudah
2.	PHBS	Masyarakat mencuci tangan pakai sabun
		Masyarakat buang air besar di jamban
		Masyarakat tidak terkena penyakit setelah adanya program
3.	Pengelolaan PAMSIMAS	Pihak pengelola secara transparan mengenai pelaporan keuangan terhadap masyarakat desa
		Masyarakat desa membayar iuran setiap bulannya
		Seluruh masyarakat desa terlibat dalam pemeliharaan fasilitas
4.	Pemberdayaan masyarakat	Seluruh masyarakat turut serta dalam penyusunan proposal dan RKM
		Seluruh masyarakat mengetahui pentingnya peran masyarakat dalam keberhasilan program
5.	Keberfungsian sarana	Sarana air minum berfungsi
		Sarana air minum dikelola dan dibiayai secara efektif oleh masyarakat

Berdasarkan indikator di atas, dapat dikategorikan nilai persentase untuk menilai keberhasilan program PAMSIMAS seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Persentase Keberhasilan Program PAMSIMAS

No.	Persentase	Keterangan
1.	76-100%	Amat Baik
2.	51-75%	Baik
3.	26-50%	Sedang
4.	0-25%	Kurang Baik

Sumber: Purwanti (2015)

3. Hasil dan Pembahasan

Program PAMSIMAS II yang dilaksanakan di beberapa desa di Kabupaten Aceh Besar mengalami keterlambatan dan pelatihan pengelolaan yang tidak memadai (Nazar, 2017). Dalam penelitian ini, desa yang dilaksanakan pada Program PAMSIMAS II yaitu Desa Lam Reh dan Desa Lambaro Biluy, untuk Desa Lambaro Sukon masuk dalam Program PAMSIMAS III. Desa Lam Reh dan Desa Lambaro Sukon di Kecamatan Darussalam dan Desa Lambaro Biluy di Kecamatan Darul Kamal. Berdasarkan data awal yang didapat bahwa ketiga desa tersebut merupakan desa penerima Program PAMSIMAS pada tahun yang berbeda dan memiliki proses keberlanjutan dan keberhasilan yang berbeda pula. Tahun perencanaan dan pembangunan Program PAMSIMAS yang dilakukan pada ketiga desa seperti ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3. Tahun Perencanaan dan Pembangunan PAMSIMAS di Ketiga Desa

No.	Desa	Perencanaan PAMSIMAS	Pembangunan PAMSIMAS
1.	Lam Reh	2014	2014
2.	Lambaro Sukon	2017	2018
3.	Lambaro Biluy	2015	2015

Sumber : Penulis (2020)

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret-Juni 2020 pada masa pandemic *Corona Virus Disease-19* (COVID-19) yang menyebabkan terbatasnya peneliti berhadapan langsung dengan masyarakat. Jumlah sampel yang diambil berdasarkan perhitungan antara lain sebagai berikut.

Tabel 4. Jumlah Sampel yang Digunakan dalam Penelitian

No.	Nama Desa	Jumlah Populasi (KK)	Metode Isaac dan Michael	Metode Slovin
1.	Desa Lam Reh	193	153	66
2.	Desa Lambaro Sukon	193	153	66
3.	Desa Lambaro Biluy	156	129	61

Sumber: Penulis (2020)

Kuesioner disebar pada 3 (tiga) desa secara bertahap. Tahap pertama dilakukan pada tanggal 16 Maret 2020 sampai dengan 23 Maret 2020 pada Desa Lam Reh kecamatan Darussalam dimana peneliti mendapatkan 46 kuesioner. Tahap selanjutnya di desa Lambaro Sukon kecamatan Darussalam dengan jumlah 22 kuesioner pada tanggal 23 Maret 2020 sampai dengan 28 Maret 2020. Tahap terakhir dilakukan tanggal 02 Juli 2020 sampai dengan 10 Juli 2020 di desa Lambaro Biluy kecamatan Darul Kamal dengan jumlah sampel 9 buah. Jumlah sampel yang didapatkan di lapangan tidak sesuai dengan perhitungan berdasarkan Metode Isaac dan Michael juga Metode Slovin, dikarenakan kondisi yang tidak memungkinkan.

Kondisi sumber air

Berdasarkan analisis kuesioner dengan menggunakan *Microsoft Excel* yang dibagikan pada masyarakat, air minum yang digunakan masyarakat setempat yaitu sumur gali dan dari program PAMSIMAS. Pada desa Lam Reh, seluruh masyarakat desa mendapatkan akses air minum dari program PAMSIMAS, dilihat dari hasil survei, bahwa terdapat 58,7% masyarakat desa menggunakan sumber air lain yaitu sumur pribadi selain dari program PAMSIMAS dan 41,3% masyarakat desa hanya menggunakan air yang bersumber dari program PAMSIMAS. Di Desa Lambaro Sukon masyarakat yang masih menggunakan sumur pribadi sebanyak 62,5% namun bersedia mengganti air mereka menggunakan air dari program PAMSIMAS dan sebanyak 70,8% masyarakat menggunakan keduanya, yaitu sumur gali pribadi dan air dari program PAMSIMAS. Namun, masyarakat bersedia meninggalkan sumur pribadi mereka jika fasilitas PAMSIMAS dan surat keputusan desa sudah ada dan berjalan. Selanjutnya di Desa Lambaro Biluy, masyarakat yang menggunakan sumur pribadi sejumlah hampir 100%.

Kondisi PHBS

Desa Lam Reh masih banyak masyarakat yang belum membiasakan mencuci tangan sebelum dan setelah makan, yaitu sebesar 52,1% dan 93,5% masyarakat sudah mencuci tangan mereka setelah Buang Air Besar (BAB) dan sudah membuang air besar di jamban yang memenuhi kriteria kesehatan. Pada Desa Lambaro Sukon, 54,1% masyarakat sudah mencuci tangan mereka sebelum dan sesudah makan dan 91% masyarakat mencuci tangan mereka setelah buang air di jamban yang sudah sesuai kriteria. Masyarakat Desa Lambaro Biluy juga sudah mulai membiasakan mencuci tangan sebelum dan setelah makan yaitu sebesar 66,7% dan 88,9% masyarakat mencuci tangan setelah buang air di jamban.

Pengelolaan program PAMSIMAS

Berdasarkan hasil analisis kuesioner yang didapat di lapangan, dalam pengelolaan program PAMSIMAS di Desa Lam Reh 52,2% masyarakat menganggap tidak ada tambahan sambungan perpipaan air minum PAMSIMAS dikarenakan di Desa Lam Reh sudah 100% masyarakat menggunakan air dari program PAMSIMAS, masyarakat sebesar 71,7% juga tidak tahu tentang pihak pengelola yang melaksanakan rapat dalam rangka pelaporan keuangan. Masyarakat Desa Lambaro Sukon yang menganggap adanya pertambahan sambungan perpipaan air minum PAMSIMAS sejumlah 54,2%. Banyak masyarakat yang belum menyambung rumah mereka dengan SPAM PAMSIMAS dikarenakan harus menunggu keputusan dari pemerintah desa mengenai tarif dan sebagainya, masyarakat yang sudah tersambung PAMSIMAS hanya 24 rumah saja. Selanjutnya Desa Lambaro Biluy, masyarakat

tidak tahu mengenai rapat pelaporan keuangan terhadap perwakilan pengguna PAMSIMAS sebanyak 77,7% dan seluruh masyarakat (dahulu) bersedia ikut serta dalam perencanaan pembangunan PAMSIMAS yang dianggap berjalan dengan cukup baik. Bentuk bantuan yang diberikan masyarakat yaitu tarif per bulan dengan semua warga disamaratakan dalam jumlah pembayarannya. Walaupun, sejak tahun 2016 fasilitas PAMSIMAS di desa ini tidak difungsikan lagi dengan alasan sumur bor PAMSIMAS mengganggu sumur gali masyarakat yang ada disekitarnya.

Pemberdayaan program PAMSIMAS

Desa Lam Reh, masyarakat yang aktif membayar tarif meskipun 65,2% masyarakat tidak tahu cara menentukan tarif dan terlibat dalam pemeliharaan fasilitas sejumlah 69,5% masyarakat dan 86,7 % masyarakat bersedia memperbaiki fasilitas jika ada kerusakan jika itu berhubungan dengan sambungan rumah mereka. Jika terjadi kerusakan pada fasilitas diluar rumah, masyarakat hanya lapor melalui pesan singkat *Whatsapp* (WA) di grup WA pengelola program PAMSIMAS desa. Pemberdayaan program di Desa Lambaro Sukon masih belum terlihat, namun dalam analisis kuesioner mengatakan bahwa 70,8% masyarakat terlibat dalam pemeliharaan fasilitas PAMSIMAS yang baru selesai tahun 2018 dan 87,5% masyarakat bersedia membantu jika ada kerusakan pada fasilitas air program PAMSIMAS dan masyarakat bersedia membayar tarif yang nantinya akan ditetapkan oleh pemerintah desa. Desa Lambaro Biluy, pemberdayaan masyarakat diawali dengan antusias yang tinggi, dengan bukti bahwa masyarakat menghibahkan tanahnya untuk fasilitas penyedia air PAMSIMAS yaitu menara air, namun seiring waktu berjalan, fasilitas sir tersebut tidak lagi digunakan karena dianggap sumur bor PAMSIMAS menyerap habis air yang ada disekitarnya, sehingga debit air sumur gali masyarakat yang ada di sekitar sumur bor mengalami kekeringan saat musim kemarau. Sebagian masyarakat yaitu sebesar 55,5% masyarakat tahu bahwa tidak ada penambahan sambungan perpipaan air minum PAMSIMAS dikarenakan fasilitas air sudah lama tidak digunakan.

Keberfungsian sarana program PAMSIMAS yang terbangun

Berdasarkan hasil survei lapangan, berikut gambaran sarana yang terbangun di masing-masing desa.



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Keran Umum di Desa Lam Reh (b) Menara Air di Desa Lam Reh
(Dokumentasi Lapangan, 2020)

Kondisi saat ini, fasilitas air minum di Desa Lam Reh dapat berfungsi dengan baik. Masyarakat sekitar dapat menerima air minum langsung ke rumah-rumah dengan menggunakan sambungan perpipaan. Untuk Desa Lambaro Sukon, fasilitas air minum belum berjalan dikarenakan masih menunggu surat keputusan oleh pemerintah desa dalam menerapkan tarif yang akan dibayarkan oleh masyarakat. Berikut merupakan gambar fasilitas air minum di Desa Lambaro Sukon.



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Menara Air di Desa Lam Reh (b) Keran Umum di Desa Lambaro Sukon (Dokumentasi Lapangan,2020)

Fasilitas air minum di Desa Lambaro Biluy tidak lagi berfungsi, berdasarkan keterangan yang didapat dari wawanca kepala desa, fasilitas air minum sudah lama tidak digunakan karena sumur bor yang digunakan mempengaruhi debit yang masuk ke dalam sumur gali masyarakat yang ada di sekitar sumur bor PAMSIMAS. Oleh karena itu, masyarakat lebih memilih menggunakan sumur gali mereka yang dianggap cukup bersih dan aman dan juga tidak dipungut biaya. Berikut merupakan gambaran menara air Desa Lambaro Biluy yang sudah tidak difungsikan kembali.



Gambar 4. Menara Air Program PAMSIMAS di Desa Lambaro Biluy (Dokumentasi Lapangan,2020)

Beberapa variabel keberhasilan berdasarkan *Key Performance Indicator* (KPI) dan indikator keberhasilan PAMSIMAS di tingkat masyarakat menggunakan teori berdasarkan Petunjuk Teknis Program PAMSIMAS dalam Purwanti (2015) dapat dilihat pada tabel 5 dibawah ini.

Penilaian Keberhasilan Pengelolaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh

Tabel 5. Variabel dan Indikator Keberhasilan Program PAMSIMAS di Tiap Desa

No.	Variabel	Indikator	Nama Desa		
			Lam Reh	Lambaro Sukon	Lambaro Biluy
1.	Sumber Air	Masyarakat mendapatkan akses air minum dengan mudah	100%	100%	0%
		Masyarakat mencuci tangan pakai sabun	45,8%	58,1%	66,7%
2.	PHBS	Masyarakat buang air besar di jamban	100%	100%	100%
		Masyarakat tidak terkena penyakit setelah adanya program	100%	100%	100%
3.	Pengelolaan PAMSIMAS	Pihak pengelola secara transparan mengenai pelaporan keuangan terhadap masyarakat desa	28,3%	45,4%	22,2%
		Masyarakat desa membayar iuran setiap bulannya	100%	100%	0%
4.	Pemberdayaan masyarakat	Seluruh masyarakat desa terlibat dalam pemeliharaan fasilitas	69,6%	70,8%	33,3%
		Seluruh masyarakat turut serta dalam penyusunan proposal dan RKM	0%	0%	0%
		Seluruh masyarakat mengetahui pentingnya peran masyarakat dalam keberhasilan program	100%	100%	100%
5.	Keberfungsian sarana	Sarana air minum berfungsi	100%	100%	0%
		Sarana air minum dikelola dan dibiayai secara efektif oleh masyarakat	100%	100%	0%

Sumber : Penulis (2020)

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Purwanti (2015) dan Pedoman PAMSIMAS untuk kategorisasi kriteria presentase keberhasilan Program PAMSIMAS, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan dari masing-masing indikator dengan rata-rata persentase berdasarkan tujuan umum program PAMSIMAS di setiap desa dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 6. Presentase Keberhasilan Program PAMSIMAS di Desa Lam Reh

No.	Indikator	Rata-rata Persentase	Keterangan
1.	Sumber Air	100%	Amat Baik
2.	PHBS	81,93%	Amat Baik
3.	Pengelolaan PAMSIMAS	64,15%	Baik
4.	Pemberdayaan masyarakat	56,53%	Baik
5.	Keberfungsian sarana	100%	Amat Baik

Sumber : Penulis (2020)

Persentase keberhasilan program PAMSIMAS di Desa Lam Reh dikategorikan Amat Baik. Sejak tahun 2014 sampai tahun 2020, program PAMSIMAS di Desa Lam Reh berjalan dengan baik dan sarana masih berfungsi. Tabel 5 menunjukkan presentase keberhasilan program PAMSIMAS yang ada di Desa Lambaro Sukon.

Tabel 7. Presentase Keberhasilan Program PAMSIMAS di Desa Lambaro Sukon

No.	Indikator	Rata-rata Persentase	Keterangan
1.	Sumber Air	100%	Amat Baik
2.	PHBS	86,03%	Amat Baik
3.	Pengelolaan PAMSIMAS	72,70%	Baik
4.	Pemberdayaan masyarakat	56,93%	Baik
5.	Keberfungsian sarana	100%	Amat Baik

Sumber : Penulis (2020)

Begitu pula dengan keberhasilan program PAMSIMAS di Desa Lambaro Sukon, program berjalan dengan baik, namun untuk saat ini Desa Lambaro Sukon masih menunggu keputusan dari pemerintah desa setempat dalam kelanjutan program.

Tabel 8. Presentase Keberhasilan Program PAMSIMAS di Desa Lambaro Sukon

No.	Indikator	Rata-rata Persentase	Keterangan
1.	Sumber Air (sumur dangkal)	100%	Amat Baik
2.	PHBS	88,90%	Amat Baik
3.	Pengelolaan PAMSIMAS	61,10%	Baik
4.	Pemberdayaan masyarakat	44,43%	Sedang
5.	Keberfungsian sarana	0%	Kurang Baik

Sumber : Penulis (2020)

Desa Lambaro biluy menggunakan sumur dangkal pribadi sebagai sumber air. Sehingga, sarana yang dibangun oleh Program PAMSIMAS tidak terpakai lagi.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa keberhasilan dari ketiga desa penelitian yaitu Desa Lam Reh, Desa Lambaro Sukon, dan Desa Lambaro Biluy sudah cukup baik, dengan rata-rata persentase diatas 50%, akan tetapi untuk Desa Lambaro Biluy pemberdayaan masyarakat sebesar 44,4% yang berarti kurang baik, dan untuk keberfungsian sarana sebesar 0% yang berarti sarana program PAMSIMAS yang dibangun tidak difungsikan lagi. Pentingnya membentuk persepsi yang sama antara masyarakat desa dan pemerintah daerah agar program dapat berjalan dengan baik. Beberapa saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah untuk mencapai tujuan pemerintah dalam program nasional yaitu 100% akses air minum dan sanitasi perlu diadakan diskusi lebih lanjut mengenai kebutuhan masyarakat akan sarana program PAMSIMAS, agar dapat mencegah alokasi program yang kurang tepat. Adapun pentingnya data yang lebih banyak dibutuhkan dalam penelitian ini seperti data pemeriksaan kualitas air dan data kebutuhan air minum setiap orang.

Daftar Notasi

S = jumlah sampel (Metode Isaac dan Michael)

N = jumlah populasi

λ^2 = Chi kuadrat yang harganya tergantung harga kebebasan dan tingkat kesalahan, dk 1 dan kebebasan 5% harga Chi Kuadrat = 3,841, taraf kesalahan bisa 1% = 6,634, 10% = 2,706.

P = Q = 0,5

d = 0,05

n = jumlah sampel (Metode Slovin)

e = batas toleransi kesalahan (*error tolerance*)

Daftar Pustaka

Anon., 2016. *Pedoman Umum Program PAMSIMAS*. Jakarta: Sekretariat PAMSIMAS.

Anon., 2020. *pamsimas*. [Online] Available at: <http://pamsimas.org/data-aplikasi/arsip-pelaporan-sim/data-sim/> [Accessed 2020].

Badan Pusat Statistik. (2019). *Kabupaten Aceh Besar dalam Angka 2019*. Aceh.

Dinas Bina Marga dan Cipta Karya. (2015). *Laporan Akhir Penyusunan Rencana Induk Sistem Penyediaan Air Minum (RISPAM) Kab. Aceh Besar*. Banda Aceh: PT. Quantum Design Consultant.

- Direktur Jenderal Cipta Karya. (2016). *Pedoman Umum Program PAMSIMAS*. Jakarta: Sekretariat PAMSIMAS.
- Direktur Pengembangan Air Minum. (2013). *Petunjuk Teknis Penguatan Keberlanjutan Program PAMSIMAS*. Jakarta: Sekretariat CPMU PAMSIMAS.
- Hidayat, A. R., 2019. *Analisis Dampak Bencana Gempa Bumi Terhadap Jaringan Air Bersih*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Kodoatie, R. J., Suharyanto, Sangkawati, S., & Edhisono, S. (2002). *Pengelolaan Sumber Daya Air dalam Otonomi Daerah* (Ed. I ed.). Yogyakarta: ANDI Yogyakarta.
- Nazar, T.M., 2017. *Evaluasi Keberhasilan Pengelolaan Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Aceh Besar*, Banda Aceh: Universitas Syiah Kuala
- Nugrahini, D., 2014. *Faktor-Faktor Adopsi Inovasi Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Desa Haluabau dan Desa Jimamun Kabupaten Balangan*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Perdana, W. & Karyatin, H., 2019. *pamsimas.org*. [Online] Available at : <http://pamsimas.org> [Accessed 10 Agustus 2021].
- PT. Quantum Design, 2015. *Laporan Akhir-Penyusunan Rencana Induk Sistem Penyediaan Air Minum Kabupaten Aceh Besar*, Kota Jantho: Dinas Bina Marga dan Cipta Karya.
- Panduan Pendamping Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) Perpipaan Berbasis Masyarakat*. (n.d.). Jakarta: Kementrian PUPR.
- Pedoman Umum Program PAMSIMAS*. (2016). Jakarta: Sekretariat PAMSIMAS.
- Pedoman Umum Program PAMSIMAS*. (2020). Jakarta.
- Purwanti. (2015). *Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Keberlanjutan Program PAMSIMAS di Desa Margoyoso Kec. Salaman Kab. Magelang*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Susilo, A., Vidyattama, Y., & Wishanti, D. A. (2020). Water and Sanitation Program in Decentralised Eastern Indonesia Roles of Community and Social Dynamics. *Australasian Journal of Regional Studies*, Vol.26, No. 1.
- Weststrate, J., Dijkstra, G., Eshius, J., Gianoli, A., & Rusca, M. (2018). The Sustainable Development Goal on Water and Sanitation: Learning from the Millenium Development Goals. *Social Indicators Research*.
- WHO. (2021). *Water sanitation hygiene, diseases and risks*. Retrieved January 12, 2021, from https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases-risks/en/
- Widayanti, M. R. (2017). *Efektivitas Program Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat (PAMSIMAS) di Kabupaten Klaten*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Wignyosukarto, B. S. (2016). *Pidato Pengukuhan Guru Besar Fakultas Teknik*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

Peningkatan Kualitas Jasa Pewarnaan Produk Celana Jeans dengan Penerapan *Six Sigma* & Eksperimen *Taguchi Attribute Characteristic* (Kasus CV. Ciharuman Laundry)

Rida Norina¹ dan Insan Fauzi²

^{1,2}Jurusan Teknik Industri, Universitas Jenderal Achmad Yani

¹rida.reza.raffa@gmail.com, ²insanfauzi8@gmail.com

Abstrak

CV. Ciharuman Laundry adalah sebuah industri pencelupan celana. Proses produksi perusahaan sering menghasilkan produk cacat. Konsekuensi dari tindakan pekerjaan *rework* pada produk cacat adalah meningkatnya biaya produksi dikarenakan adanya biaya tambahan bahan serta tambahan jam kerja operator untuk memperbaiki produk cacat tersebut. Belum lagi kalau produk cacat tersebut harus di reject tentu biaya yang ditimbulkan lebih besar lagi. Cacat dominan yang terjadi adalah warna produk yang tidak merata sebesar 19,8%. Metode yang digunakan untuk menurunkan prosentase cacat adalah *six sigma* (DMAIC). Penyebab cacat tersebut dilakukan analisis dengan menggunakan diagram sebab akibat dan FMEA di dapatkan kesimpulan bahwa penyebab cacat dominan adalah adanya perbandingan antara obat pewarna, air dan suhu yang tidak tepat pada proses *washing*, sehingga perlu dilakukan perbaikan pada proses tersebut dengan penerapan eksperimen *Taguchi*. Tahap pelaksanaan eksperimen terbagi menjadi 3, yaitu eksperimen yang merupakan kondisi aktual perusahaan saat ini, eksperimen 2 yang dilakukan dengan menggunakan *setting Taguchi* pada OA L8(27), serta eksperimen 3 yang merupakan hasil eksperimen konfirmasi. Didapatkan kondisi optimal untuk melakukan proses *washing* adalah suhu 100°C, takaran obat 8 kg dan rasio air 400lt. Hasil konfirmasi terhadap 120 sampel dengan 24 kali percobaan kondisi optimal terbukti mampu menurunkan prosentase cacat sebesar 79%.

Kata kunci: Kualitas, Six Sigma, eksperimen *Taguchi*, setting optimal

Abstract

CV. Ciharuman Laundry is a pants dyeing services industry. Company's production process often defect produce. The consequences of the action defect product will have an impact on increasing production costs. One of dominant defect is not equal coloring for about 19,8%. The method used to reduce the percentage of defects is the six sigma concept (DMAIC). To find out the cause of the defect is analysis by using a casual diagram and FMEA conclusion the dominant cause is not right a compare coloring agent, water and temperature on the washing process, so improvements needed to the process with implementation of experiment *Taguchi*. Implementation stage of experiment divided into 3, that is first experiment which is actual condition of company right now, second experiment was done using *Taguchi* settings on an orthogonal array L8(27), and third experiment which was the result of confirmation experiment. The result of experiment obtained optimal settings for do the washing process temperature is 100°C, dose of the drug is 8 kilograms and the water ratio is 400 liters. The confirmation result of 120 sample by 24 attempts optimal settings proved to be able to reduce percentage of defect by 79%.

Keywords: quality, six sigma, *Taguchi* experiment, optimal settings

1. Pendahuluan

CV. Ciharuman Laundry terdapat masalah mengenai biaya yang dikeluarkan untuk produk reject setiap tahunnya. Biaya tambahan yang harus ditanggung perusahaan akibat pekerjaan *rework* produk cacat pada tahun pertama sebesar Rp. 203.439.200 dan pada tahun kedua sebesar Rp.176.080.350, dimana kalau tidak ada produk cacat tentunya perusahaan tidak perlu mengeluarkan biaya tersebut. Dari gambar 1 dapat dilihat jenis kecacatan terbesar adalah warna tidak merata dengan frekuensi cacat sebesar 13794 kecacatan dengan persentase cacat sebesar 87,70 dari total frekuensi cacat 15729. Dengan menggunakan konsep *six sigma* kita dapat mengetahui nilai *DPMO* dan nilai *sigma*. Seperti pada Gambar 1.

Info Makalah:

Dikirim : 04-07-19;

Revisi 1 : 12-10-19;

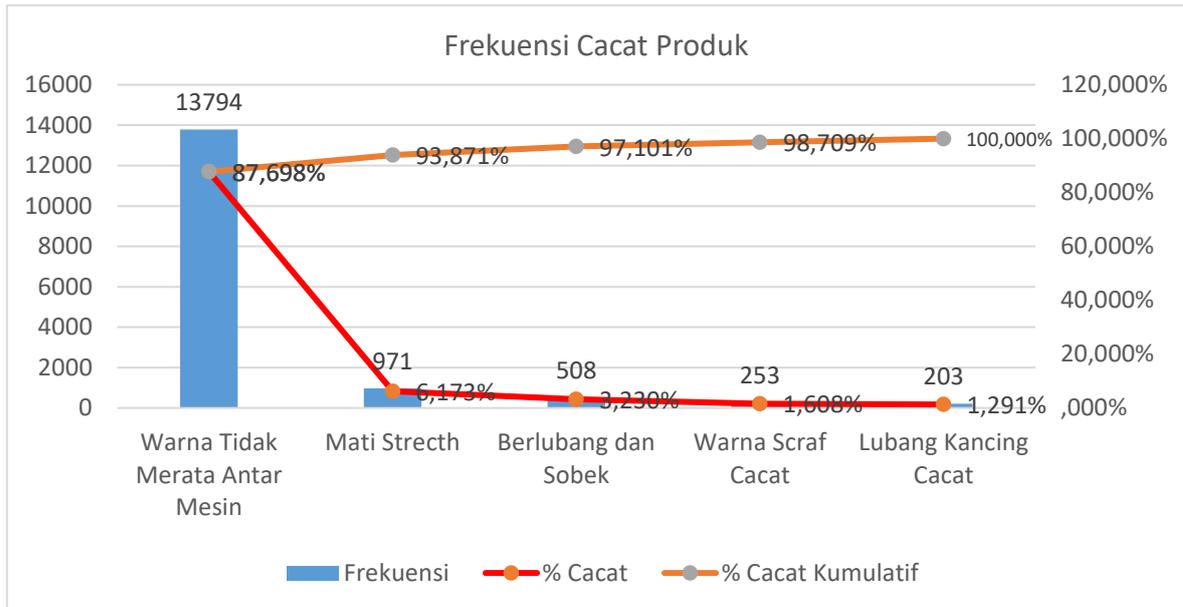
Revisi 2 : 05-03-21;

Diterima : 05-04-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +6287821264458

e-mail : rida.reza.raffa@gmail.com

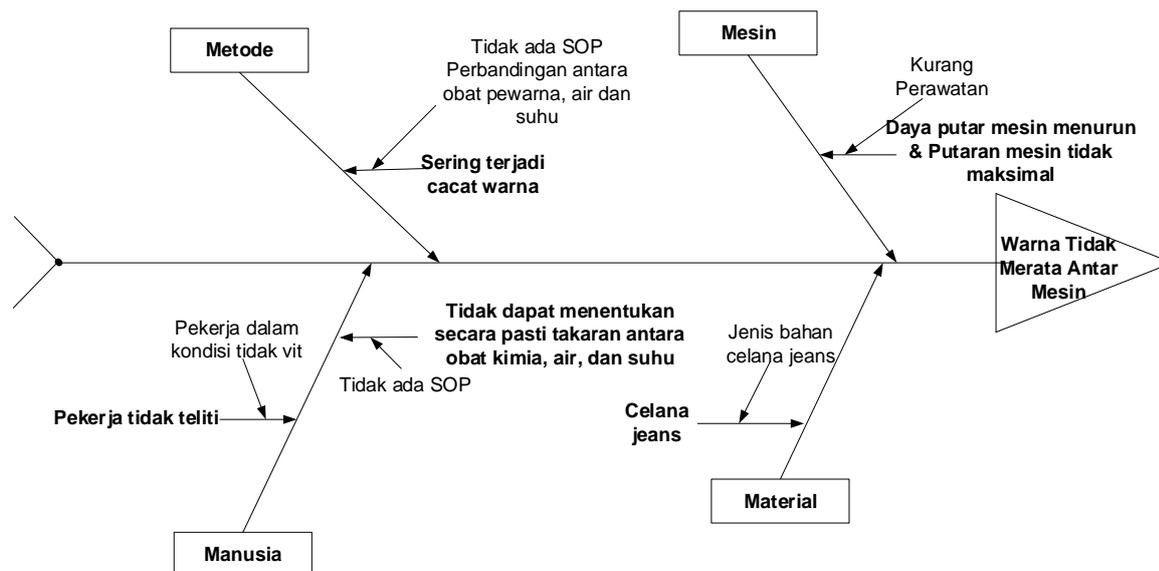


Gambar 1. Frekuensi Cacat

Dapat dilihat dari tabel 1 untuk produk cacat terbesar adalah warna tidak merata antar mesin dengan persentase cacat sebesar 87,7% % dan frekuensi cacat sebesar 13794 unit. Menggunakan konsep analisis *six sigma*, didefinisikan bahwa CTQ dalam proses pewarnaan ini adalah warna tidak merata, mati *stretch*, sobek dan lubang kancing cacat. dan cacat warna tidak merata merupakan jenis cacat yang dominan. *DPMO* untuk produk cacat warna tidak merata sebesar 198554,81 dan nilai sigmanya $2,35\sigma$, sedangkan target yang diinginkan oleh perusahaan sebesar $3,25\sigma$. Sehingga fokus penelitian ini adalah upaya mengatasi produk cacat warna tidak merata. Penyebab cacat warna tidak merata antar mesin adalah karena pada saat proses *washing* operator yang bertanggung jawab untuk proses pewarnaan masih menggunakan perbandingan yang tidak baku. Warna tidak merata antar mesin dapat disebabkan karena tingkat kepekatan cairan antara obat pewarna dan air serta waktu proses setiap jenis bahan baku. Untuk mengetahui penyebab cacat paling dominan yaitu warna tidak merata antar *batch* digambarkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai DPMO dan Sigma

s	Kriteria Cacat	Frekuensi	DPMO (%)	Defect (%)	Yield (%)	Sigma
69472	Warna Tidak Merata antar mesin	13794	198554.8	19.86%	80.14%	2.35
	Mati Stretch	971	13976.85	1.40%	98.60%	3.7
	Berlubang dan Sobek	508	7312.299	0.73%	99.28%	3.94
	Warna Scraf Cacat	253	3641.755	0.36%	99.64%	4.18
	Lubang Kancing Cacat	203	2922.041	0.29%	99.71%	4.26



Gambar 2. Diagram Sebab Akibat

Dari beberapa penyebab yang dicurigai menyebabkan cacat warna tidak merata, maka dilakukan analisis penilaian dengan metode *FMEA* dan diperoleh hasil bahwa nilai *RPN* terbesar yaitu 810 dengan penyebab cacat adalah tidak ada formulasi perbandingan atau takaran antara obat pewarna, air dan suhu. Sehingga diperlukan metode eksperimen *Taguchi* untuk mencari *setting* optimal dari perbandingan takaran antara obat pewarna, air dan suhu.

Eksperimen ini merupakan salah satu jenis eksperimen yang paling sederhana, karena memiliki jumlah eksperimen yang minimal karena metode *Taguchi* memiliki karakteristik menghasilkan produk yang lebih tangguh (*robust*), yaitu mampu merancang suatu proses yang tidak sensitif terhadap faktor gangguan. Hal ini yang menjadi keunggulan dari metode *Taguchi*, sehingga metode ini sering disebut sebagai *robust design*.

2. Metode

Penyusunan metodologi penelitian ditunjukkan untuk memperjelas dan menuntun proses penelitian agar tujuan yang diinginkan dapat tercapai dengan baik. Keberhasilan suatu penelitian sangat dipengaruhi oleh tahapan yang dilalui, karena hasil dari satu tahap merupakan masukan bagi tahap selanjutnya, sehingga tahap sebelumnya akan sangat menentukan tahap berikutnya, maka diperlukan penentuan yang cermat mengenai tahapan proses penelitian.

a. Identifikasi Persoalan

Tahapan ini dilakukan dengan cara pengamatan secara langsung (observasi) lapangan dan wawancara bagian produksi perusahaan. Studi pendahuluan dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui dan mengamati secara langsung setiap gejala atau fenomena yang dihadapi oleh perusahaan yang akan dijadikan sebagai objek penelitian.

i. Tahap Define

Tahap *Define* merupakan tahapan pertama dalam program peningkatan kualitas metode *six sigma*. Tahap ini dilakukan dengan cara pengamatan proses produksi, identifikasi produk cacat dan pengamatan jenis cacat.

ii. Tahap Measure

Tahapan pengukuran ini dilakukan untuk mendefinisikan *defect* (cacat produk). Tahapan ini untuk melihat seberapa besar pengaruh dari masing-masing kriteria cacat yang ada. Tahapan ini dilakukan dengan cara penentuan cacat paling dominan yaitu warna tidak merata, Penentuan karakteristik kualitas / *Critical To Quality* (CTQ), nilai DPMO sebesar 18554,81 dan nilai sigma sebesar $2,35\sigma$ pada cacat warna tidak merata.

iii. Tahap Analyze

Tahap *analyze* merupakan tahap ketiga dalam konsep *Six Sigma*, pada tahap ini dilakukan untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh terhadap penyebab cacat. Pada tahap ini menggunakan diagram *fishbone* atau diagram sebab akibat. Pada tahap ini dilakukan analisis sebab akibat pada cacat warna tidak merata. Menggunakan alat analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi penyebab cacat terbesar dengan cara menilai *severity*, *occurrence* dan *detection*. Hasil dari FMEA berupa nilai *RPN* sebesar 810 pada warna tidak merata dengan tindakan perbaikan menggunakan metode eksperimen *Taguchi* untuk menentukan *setting* optimal pada suhu, takaran obat dan air.

b. Metode Pemecahan Masalah

Dalam tahapan pemecahan masalah ini dilakukan tahap *improvement* sesuai dengan informasi yang telah didapatkan berdasarkan tahapan awal yaitu *Define – Measure-Analyze*.

i. Tahap *Improvement*

Pada tahap *improvement* dilakukan metode eksperimen untuk mengetahui takaran perbandingan antarjumlah produk : obat : air : suhu.

ii. Identifikasi Variabel tak Bebas

Dalam penelitian ini dari hasil pembahasan diatas dapat diketahui bahwa variabel tak bebas yang sesuai dengan penelitian ini adalah karakteristik atribut (*Attribute Characteristic*). Pada kasus ini ditetapkan karakteristik atribut berdasarkan hasil akhir produk yang tidak dapat diukur dengan skala kontinyu, tetapi dapat diklasifikasikan secara kelompok yaitu kelompok berhasil dan kelompok cacat.

iii. Identifikasi Variabel tak Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang nilainya tidak dipengaruhi oleh variabel-variabel lainnya. Sedangkan variabel tak bebas adalah kebalikannya. Penelitian ini bertujuan meminimasi terjadinya cacat warna tidak merata pada proses produksi. Namun tidak semua faktor dapat dijadikan faktor penelitian. Untuk itu dalam menentukan variabel bebas, dilakukan dengan memilih beberapa variabel yang paling penting seperti pada tabel 3.

Dari hasil kuesinor faktor yang berpengaruh dapat dilihat bahwa dipilih faktor yang berpengaruh terhadap proses pewarnaan jeans pada mesin *washing* adalah takaran obat, Suhu perendaman dan takaran air. Ketiga faktor tersebut dipilih dikarnakan dari hasil kuesioner dengan persentase yang melebihi dari 50% suara responden.

iv. Identifikasi Faktor yang Bisa Dikendalikan dan Faktor yang Tidak bisa Dikendalikan.

Pada tahap ini, dilakukan identifikasi faktor-faktor yang dapat dikendalikan, dan faktor yang tidak dapat dikendalikan untuk memisahkan faktor mana saja yang dapat dikendalikan dan tidak, agar dapat dilakukan pengaturan optimal pada mesin (Lihat Tabel 2).

Tabel 2. Faktor Terkendali dan tidak

No	Faktor yang bisa dikendalikan	Faktor yang tidak bisa dikendalikan
1	Suhu pendam (A)	Tidak ada faktor tidak terkendali atau faktor gangguan
2	Takaran Obat (B)	
3	Interaksi Faktor A dan B	
4	Rasio Air (C)	
5	Interaksi Faktor A dan C	
6	Interaksi Faktor B dan C	

v. Penentuan Jumlah Level dan Nilai Faktor

Penentuan banyaknya level faktor sangat penting terhadap hasil penelitian. Semakin banyak level faktor yang digunakan maka hasil eksperimen akan lebih teliti, tetapi cara ini akan menimbulkan biaya yang besar, serta waktu yang lebih lama. Nilai level faktor kontrol ini didapat dari hasil kuesioner penentuan nilai level pada masing-masing faktor. Penentuan level kontrol untuk masing-masing faktor dilakukan dengan menyebarkan kuesioner kepada kepala produksi, supervisi dan 14 operator mesin, Kuesioner berisi 2 bagian yaitu pemilihan faktor yang berpengaruh dan pilihan tentang level faktor yang tentu isi kuesioner tersebut telah didiskusikan dengan kepala produksi sebagai penanggung jawab proses dan telah memahami masalah yang terjadi di lapangan. Hasil rekap kuesioner tentang faktor yang berpengaruh terhadap kecacatan warna yang tidak rata dapat di lihat di Tabel 3 dan hasil level faktor dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Faktor-faktor yang berpengaruh

Faktor	frekuensi	Frekuensi Kumulatif	Persentase	Persentase Kumulatif
Takaran Obat	18	18	100,00%	33,33%
Suhu Pendam	16	34	88,89%	62,96%
Rasio Air	11	45	61,11%	83,33%
RPM Mesin	4	49	22,22%	90,74%
Waktu pewarnaan	2	51	11,11%	94,44%
Jumlah berbolak-balik putaran	2	53	11,11%	98,15%
Derajat kenaikan suhu	1	54	5,56%	100,00%
Standarisasi metode/ SOP	0	54	0,00%	100,00%
Cara penuangan obat	0	54	0,00%	100,00%
Perawatan mesin	0	54	0,00%	100,00%
Skill Operator	0	54	0,00%	100,00%
Tingkat Pendidikan	0	54	0,00%	100,00%
Pengecekan obat	0	54	0,00%	100,00%

c. Penentuan derajat kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menghitung jumlah percobaan minimum yang harus dilakukan untuk mengetahui faktor yang diamati.

Tabel 4. Level Kontrol Faktor *Taguchi*

No	Faktor	Level I	Level II
1	Suhu Pendam	80oC	100oC
2	Takaran Obat	7 Kg	8 Kg
3	Rasio Air	400 lt	450

d. Pemilihan *Orthogonal Array*

Untuk menentukan matriks orthogonal yang sesuai, harus memperhatikan jumlah faktor, jumlah level dan jumlah pengamatan yang dilakukan. Bentuk umum dari model *matriks orthogonal* adalah:

$$L_a = (b^c) \tag{1}$$

Berdasarkan jumlah Dof (Total Derajat Kebebasan faktor dan level), yaitu 6 dengan jumlah faktor sebanyak 3 yang masing-masing memiliki 2 level. Maka untuk memilih *matriks orthogonal* yang cocok atau sesuai dengan eksperimen yaitu:

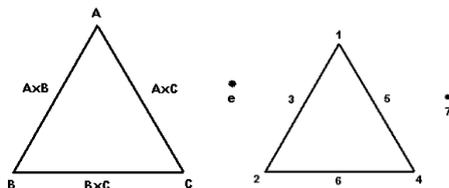
Perhitungan untuk $L_8 (2^7)$ adalah:

$$\begin{aligned} \text{Derajat Kebebasan} &= (\text{Banyaknya faktor}) \times (\text{banyaknya level} - 1) \\ &= 3 \times (2-1) \\ &= 3 \text{ derajat kebebasan} \end{aligned} \tag{2}$$

Perhitungan derajat kebebasan faktor dan level = 6 derajat kebebasan. Jadi dilihat dari hasil perhitungan diatas, dari hasil perhitungan derajat kebebasan diperoleh 6 derajat kebebasan yang cocok atau sesuai dengan eksperimen adalah derajat kebebasan pada *matriks orthogonal* standar harus lebih besar atau sama dengan perhitungan derajat kebebasan pada eksperimen (6 derajat kebebasan). Jadi matriks ortogonal yang dipilih adalah $L_8(2^7)$ yang mempunyai 7 derajat kebebasan yang telah mencukupi.

e. Penempatan kolom faktor kedalam *matriks orthogonal*

Untuk mendapatkan faktor pada kolom *orthogonal* yang tersedia, maka digunakan grafik linier yang sesuai dengan masing-masing matriks. Grafik linier yang sesuai untuk matriks $L_8 (2^7)$ dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Matriks orthogonal $L_8(2^7)$

Berdasarkan gambar 3, maka penempatan kolom Faktor A menempati kolom 1, Faktor B menempati kolom 2, Interaksi Faktor A dan B menempati kolom 3, Faktor C menempati kolom 4, Interaksi Faktor A dan C menempati kolom 5, Interaksi Faktor B dan C menempati kolom 6, *Error* pada kolom 7. Hasil penempatan tersebut dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Matriks orthogonal array $L_8(2^7)$

Matriks Ortogonal $L_8(2^7)$							
Eksperimen	1	2	3	4	5	6	7
	A	B	A x B	C	A x C	B x C	E
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

f. Pelaksanaan eksperimen awal

Merupakan percobaan dengan menggunakan *setting* aktual perusahaan, untuk mengetahui karakteristik kualitas yang dihasilkan pada kondisi *actual Loss Function* Eksperimen awal. Analisa fungsi kerugian yang diakibatkan penyimpangan karakteristik kualitas pada kondisi aktual. Penyimpangan tersebut merupakan produk cacat yang tidak sesuai spesifikasi yang kemudian di-*rework*. Hal ini merupakan kerugian bagi perusahaan, karena adanya nilai yang hilang. Misalnya ongkos produksi, biaya penyusutan serta kerugian waktu target. Persamaan matematis untuk fungsi kerugian (*Loss Function*) data atribut adalah sebagai berikut.

$$\text{Loss} = k \frac{p}{(1-p)} \quad (3)$$

g. Eksperimen Taguchi

Eksperimen dilakukan dengan setting faktor pada level yang telah ditentukan dengan *orthogonal array* yang terpilih. Dari eksperimen ini, akan dihasilkan setting faktor terbaik.

h. Pelaksanaan Eksperimen konfirmasi

Eksperimen pada tahap ini merupakan implementasi dari setting faktor terpilih berdasarkan eksperimen *Taguchi*. Faktor-faktor tersebut merupakan setting pada level faktor terbaik. Tujuan dari eksperimen konfirmasi adalah memastikan dan memeriksa hasil percobaan telah memenuhi target dan tujuan dari penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

a. Percobaan I (Kondisi Aktual)

Percobaan dilakukan sebanyak 24 kali percobaan dengan masing-masing percobaan 120 sampel produk celana dalam 1 mesin. Dari 5 mesin washing yang ada di lantai produksi di pilih satu mesin washing yaitu mesin washing 5, hal ini didukung data pengamatan langsung selama 1 minggu (13 – 18 April) diperoleh kesimpulan bahwa mesin washing 5 penyumbang prosentase cacat terbesar yaitu 22,1 %. Dari hasil wawancara pada bagian produksi mesin washing 5 didapatkan data aktual mengenai proses produksi washing, dengan suhu 80°C, takaran obat 7 kg/120 pcs dan rasio air 400 lt/120 pcs. Percobaan 1 dilakukan pada kondisi aktual perusahaan yang diterapkan pada saat ini. Percobaan 1 dilakukan 24 kali percobaan berdasarkan *matriks ortogonal array L₈(2⁷)* dengan eksperimen 8 kali percobaan dengan replika disetiap percobaan sebanyak 3 kali.

Dari hasil percobaan 1 kondisi aktual perusahaan terdapat 720 produk yang mengalami cacat perbedaan warna pada mesin 5 dari 2.880 sampel produk yang dilakukan percobaan.

$$\text{Proporsi cacat} = \frac{x}{n} \quad (5)$$

$$\text{Proporsi cacat} = \frac{6}{24} = 0,25$$

Nilai fungsi kerugian satu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar dampak kerugian biaya yang dikeluarkan dari keadaan aktual perusahaan dalam proses produksi. Hal ini dimaksudkan untuk membandingkan dengan hasil akhir percobaan pada tahap eksperimen 3. Untuk mengetahui kerugian yang dikeluarkan pada percobaan 1 ini harus mengetahui harga pokok produk. Harga pokok produk adalah Rp. 8.833,-. Perhitungan *Loss Function* pada kondisi aktual jika diketahui bahwa persentase cacat pada percobaan adalah 25%.

$$\begin{aligned} \text{Loss} &= k \frac{p}{(1-p)} \quad (6) \\ &= \text{Rp.}8.833 \frac{25\%}{(1-25\%)} \\ &= \text{Rp.}8.833 \frac{0.25}{(1-0.25)} \\ &= \text{Rp.} 2.944 / \text{produk} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Loss function for eks ke - i (1)} &= \text{loss/produk} \times \text{banyaknya cacat} \quad (7) \\ &= \text{Rp.} 2.944 \times 120 \\ &= \text{Rp.} 353.320 \end{aligned}$$

$$\text{Total Kerugian hasil percobaan} = \text{Rp.} 2.119.920$$

$$\text{Total Produksi} = 2880$$

$$\text{Kerugian rata-rata} = \frac{\text{Totalkerugian}}{\text{totalproduksi}} \quad (8)$$

$$= \frac{Rp.2.119.920}{2880} = Rp. 736/ \text{produk}$$

Dari perhitungan diatas dapat dilihat bahwa kerugian yang ditanggung oleh perusahaan per unit satu produk sebesar Rp. 2.944/produk. sedangkan kerugian yang ditanggung oleh perusahaan setiap dilakukan eksperimen (percobaan) adalah Rp. 736/produk.

b. Percobaan II (Taguchi)

Eksperimen 2 ini dilakukan berdasarkan *setting Taguchi* yang akan dilakukan. *Setting Taguchi* ini didapatkan dari hasil kuesioner masing-masing level. Pada faktor suhu *setting level* yang akan digunakan adalah level I suhu 80°C dan level II suhu 100°C. Pada faktor takaran obat *setting level* yang akan digunakan adalah level I 7 kg/120 pcs dan level II 8 kg/120 pcs. Pada faktor rasio air *setting level* yang akan digunakan adalah level I 400 lt/120 pcs dan level II 450 lt/120 pcs. Pada eksperimen II ini akan dilakukan percobaan sebanyak 8 kali percobaan dengan replika 3 kali pada masing-masing percobaan. Untuk *setting* eksperimen II ini pada masing-masing percobaan dipengaruhi oleh setiap level pada masing-masing faktor. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan tabel *matriks orthogonal* $L_8(2^7)$.

Berdasarkan hasil perhitungan tahapan ANOVA untuk mengetahui besarnya kontribusi masing-masing Faktor terhadap respon yang ada dalam eksperimen kualitas dari pewarnaan, maka dapat disimpulkan pada table 6.

Tabel 6. Hasil perhitungan ANOVA

FAKTOR	SQ	DF	Mq	F-ratio	Rho (%)
A	164,57	1	164,57	1149,20	5,71%
B	658,29	1	658,29	4596,80	22,86%
AB	0,00	1	0,00	0,00	0,00%
C	1481,14	1	1481,14	10342,80	51,4%
AC	164,57	1	164,57	1149,20	5,71%
BC	0,00	1	0,00	0,00	0,00%
error	411,43	2873,00	0,14		14,32%

Jika terdapat nilai Mq_{faktor} lebih kecil (\leq) dari nilai Mq_{error} maka dilakukan *pooling up* untuk memberikan keyakinan terhadap tingkat signifikansi faktor tersebut. Dari tabel di atas, maka nilai Mq untuk interaksi AB (0.0) dan interaksi BC (0.0) lebih kecil dari nilai Mq_{error} yaitu 0.14.

Pooling up bertujuan agar adanya penghindaraan dari estimasi yang berlebihan dan juga menghindari kesalahan pada eksperimen. *Pooling up* dilakukan pada faktor-faktor yang mempunyai variansi terkecil Mq faktor dibandingkan Mq_{error} . Pertama dari *pooling up* adalah menggabungkan nilai Mq_{faktor} yang tidak signifikan (Mq_{faktor} lebih kecil nilai Mq_{error}).

Tabel 7. *Pooling Up* ANOVA

FAKTOR	Sq'	V	Mq'	F-ratio	Rho (%)
A	164,57	1	164,43	1150,00	5,709%
B	658,29	1	658,14	4600,00	22,852%
AB	0,00	1	0	POOLED	
C	1481,14	1	1481,00	10350,00	51,424%
AC	164,57	1	164,43	1150,00	5,709%
BC	0,00	1	0	POOLED	
Error	411,43	2873	0,14	1	
Pooled e	412,00	2875	0,14		14,31%

Berdasarkan hasil perhitungan tahapan POOLING UP untuk mengetahui besarnya kontribusi masing-masing faktorterdhadap respon yang ada dalam eksperimen kualitas dari pewarnaan, maka dapat disimpulkan pada tabel 7.

Dari hasil tersebut dapat dinyatakan bahwa faktor A, B, C dan interaksi AC ada pengaruh terhadap eksperimen pewarnaan celana jeans.

Tabel 8. Hipotesa

NO	Hipotesa	Nilai F	f (0,05;6;360)	Hasil Hipotesa
1	H0 : Tidak ada pengaruh Faktor A	1150	2,10	Ho DITOLAK
	H1 : Ada pengaruh Faktor A			
2	H0 : Tidak ada pengaruh Faktor B	4600	2,10	Ho DITOLAK
	H1 : Ada pengaruh Faktor B			
3	H0 : Tidak ada pengaruh Faktor AB	0	2,10	Ho DITERIMA
	H1 : Ada pengaruh Faktor AB			
4	H0 : Tidak ada pengaruh Faktor C	10350	2,10	Ho DITOLAK
	H1 : Ada pengaruh Faktor C			
5	H0 : Tidak ada pengaruh Faktor AC	1150	2,10	Ho DITOLAK
	H1 : Ada pengaruh Faktor AC			
6	H0 : Tidak ada pengaruh Faktor BC	0	2,10	Ho DITERIMA
	H1 : Ada pengaruh Faktor BC			

Pemilihan faktor dilakukan berdasarkan nilai perbandingan F-ratio hitung dengan F-tabel. Jika nilai F-hitung \geq F-tabel, maka faktor dinyatakan berpengaruh terhadap respon, dan dijadikan faktor terpilih. Nilai F-tabel didapat dari tabel F dengan tingkat kepercayaan 95%. Nilai dari $F_{(0,05;6;360)}$ adalah 2,10. Dari hasil hipotesa pada Tabel 8 bahwa faktor yang memberikan pengaruh terhadap eksperimen pewarnaan celana jeans adalah faktor A, B, C dan interaksi AC. Untuk mengetahui respon dari masing-masing faktor maka dilakukan perhitungan respon rata-rata faktor untuk menentukan level mana yang paling baik. Level yang dipilih adalah level yang memberikan nilai terkecil, karena mengacu pada karakteristik atribut, maka *setting* parameter faktor terpilih untuk penelitian ini diambil dari nilai respon rata-rata terkecil. Perhitungan respon rata-rata faktor

$$A = \frac{\text{Respon total cacat}}{\text{Banyaknya eksperimen}} \quad (9)$$

$$A1 = \frac{720}{4} = 180$$

$$A2 = \frac{480}{4} = 120$$

Tabel 9. Respon Faktor Terpilih

Level	respon rata-rata			
	faktor			
	A	B	C	AC
1	180	210	60	120
2	120	90	240	180

Berdasarkan hasil perhitungan pada table 9 maka didapatkan faktor terpilih untuk *setting* parameter *Taguchi* dalam percobaan ini adalah A2B2C1 berdasarkan respon rata-rata. Berdasarkan dari ANOVA untuk data atribut, faktor yang berpengaruh dan mempunyai kontribusi terbesar untuk meminimasi kelompok cacat adalah faktor A2B2C1. Berikut penghitungan perkiraan kondisi optimal dan selang kepercayaan disajikan dengan menerapkan formula 10 hingga 19. Perkiraan kondisi optimal

$$\Omega_{predicted} = \Omega_{cacat} + (\Omega_{A2} - \Omega_{cacat}) + (\Omega_{B2} - \Omega_{cacat}) + (\Omega_{C1} - \Omega_{cacat}) (\Omega_{Ax1} - \Omega_{cacat}) \quad (10)$$

$$\Omega_{predicted} = -1,46 + (-3,01 - (-1,46)) + (-4,77 - (-1,46)) + (-6,99 - (-1,46)) + (-3,01 - (-1,46))$$

$$\Omega_{predicted} = -13,46$$

Transformasi persentase cacat:

$$\mu = \frac{1}{1 + 10^{\frac{\Omega}{-10}}} \quad (11)$$

$$\mu = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-13,46}{-10}}}$$

$$\mu = 0,0691 = 6,91 \%$$

Penghitungan confident interval:

$$n_{eff} = \frac{vT}{vu+vA+vB+vC+vAxvC} \quad (12)$$

$$n_{eff} = \frac{2879}{5} = 575,8$$

$$CI = \sqrt[2]{(F0,05,1,2875 \times Vpooled \times \mu \times (1 - \mu) \times \frac{1}{n_{eff}})} \quad (13)$$

$$CI = \sqrt[2]{(3,84 \times 0,143 \times 0,0691 \times (1 - 0,0691) \times \frac{1}{575,8}}$$

$$CI = \sqrt[2]{(0,038 \times 0,93 \times 0,0017}$$

$$CI = \pm 0,0078$$

Maka selang kepercayaan untuk proses optimal adalah:

$$\mu_{prediksi} - CI \leq \mu_{prediksi} \leq \mu_{prediksi} + CI \quad (14)$$

$$0,0691 - 0,0078 \leq \mu_{prediksi} \leq 0,069 + 0,0078$$

$$0,0613 \leq \mu_{prediksi} \leq 0,077$$

c. Eksperimen Konfirmasi Eksperimen III

Percobaan konfirmasi ini berdasarkandari hasil setting parameter terpilih pada eksperimen tagusci II. Faktor terpilih beserta levelnya adalah A2B2C1, dimana A2 (suhu pedam 100°C), B2 (takaran obat 8 kg) dan C1 (rasio air 400 lt). Hasil percobaan Eksperimen III diperoleh sebagai berikut.

Perhitungan SNR-fraction defective rata-rata dari 24 percobaan :

$$p = \frac{x}{n} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{24}$$

$$= 0,0417$$

$$nP = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{0,0417} - 1 \right] \quad (16)$$

$$= -13,62$$

Menghitung selang kepercayaan eksperimen konfirmasi

$$\mu = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-n}{-10}}} \quad (17)$$

$$\mu = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-13,61}{-10}}}$$

$$\mu = \frac{1}{14,61} = 0,069$$

$$\mu = CI = \sqrt[2]{(F0,05,1,2875 \times Vpooled \times \mu \times (1 - \mu) \times \frac{1}{n_{eff}})} \quad (18)$$

$$CI = \sqrt[2]{(3,84 \times 0,143 \times 0,069 \times (1 - 0,069) \times \frac{1}{575,8}} = \pm 0,007$$

Maka selang kepercayaan untuk proses konfirmasi adalah:

$$\mu_{konfirmasi} - CI \leq \mu_{konfirmasi} \leq \mu_{konfirmasi} + CI \quad (19)$$

$$0,069 - 0,007 \leq \mu_{konfirmasi} \leq 0,069 + 0,007$$

$$0,062 \leq \mu_{konfirmasi} \leq 0,076$$

Berdasarkan gambar 5 menunjukkan bahwa hasil eksperimen konfirmasi untuk nilai rata-rata dapat diterima dengan pertimbangan selang kepercayaan karena pada gambar diatas menjelaskan bahwa hasil dari eksperimen konfirmasi masih berada dalam interval optimal. Hal ini berarti hasil eksperimen *Taguchi* dapat direproduksi dan *setting level* optimal dapat dijadikan acuan dalam proses pewarnaan celana jeans.

Untuk mengetahui kerugian yang dikeluarkan pada eksperimen III ini harus mengetahui harga pokok produksi. Harga pokok produksi eksperimen tiga ini berdasarkan hasil dari *setting* optimal. Dengan *setting* sebagai berikut ini A2B2C1, dimana A2 (suhu pendam 100°C), B2 (takaran obat 8 kg) dan C1 (rasio air 400 lt). diketahui harga pokok produksi eksperimen III sebesar Rp. 9.171.

$$\begin{aligned} \text{Loss function /product} &= \text{Rp.}9.171 \times \frac{4,17\%}{(1-4,17\%)} \\ &= \text{Rp.}9.171 \times 0,04348 \\ &= \text{Rp.} 399/ \text{produk} \end{aligned}$$

Berikut ini adalah perhitungan *loss function for eksperimen ke-i* :

$$\begin{aligned} \text{Loss function for eks ke -i} &= \text{banyaknya cacat} \times \text{loss/produk} \\ &= \text{Rp.} 399 \times 120 \\ &= \text{Rp.} 47.849,- \end{aligned}$$

Untuk kerugian rata-rata per *part loss function*

Total Kerugian : Rp. 47.849
Total Produksi : 2880

$$\text{Kerugian rata-rata} = \frac{\text{total kerugian}}{\text{total produksi}}$$

$$\text{Kerugian rata-rata} = \frac{\text{Rp.}47.849}{2880}$$

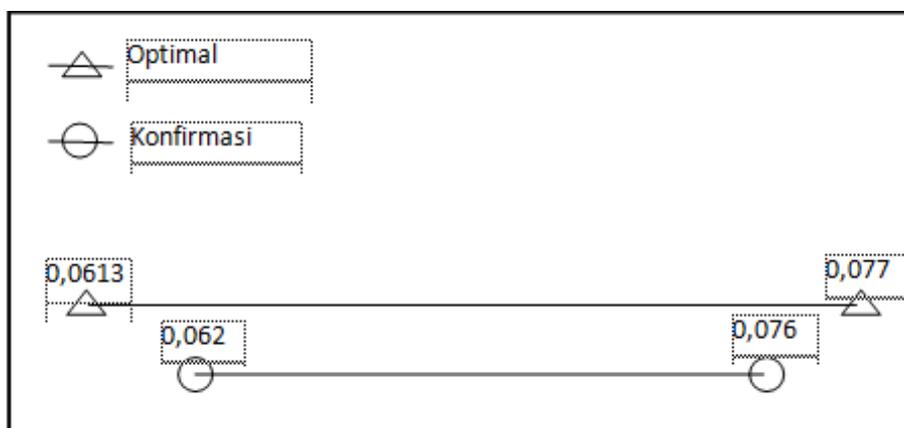
Kerugian rata-rata = Rp. 16,61 / produk

Dari hasil perhitungan diatas dapat dilihat bahwa kerugian pada satu produk sebesar Rp. 399 persatu unit produk. Total kerugian yang ditanggung oleh perusahaan sebesar Rp. 47.849 pada tahap eksperimen III. Pada eksperimen III ini dengan 24 kali percobaan, rata-rata kerugian yang ditanggung oleh perusahaan sebesar Rp. 16,61 persatu unit produk.

d. Uji Selisih antara 2 Proporsi

Uji selisih dua proporsi ini berguna untuk mengetahui apakah terjadi perubahan proporsi yang cukup signifikan sebelum dilakukan percobaan dengan implementasi. Uji selisih antara dua proporsi untuk membuktikan bahwa terjadi peningkatan dalam perbaikan *setting* proses pewarnaan celana jeans pada mesin washing. Dimana untuk P_1 merupakan data awal sedangkan untuk P_2 merupakan proporsi data konfirmasi.

Kriteria penerimaan hipotesa adalah terima H_1 jika nilai Z tabel < Z hitung. Nilai Z tabel untuk $\alpha = 0,05$ adalah 1,65. Berdasarkan hasil dari perhitungan nilai Z hitungan lebih besar dari Z tabel. Maka H_1 diterima, karena proporsi cacat $P_1 > P_2$ dan ada pengaruh eksperimen *Taguchi* dengan *setting* optimal.



Gambar 5. Perbandingan Selang Kepercayaan

Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa hasil identifikasi faktor yang berpengaruh terhadap kualitas pewarnaan celana jeans berdasarkan hasil kuesioner dengan persentase diatas 50% adalah faktor Suhu, Rasio Air dan Takaran Obat. Selain itu, hasil eksperimen *Taguchi* didapatkan formulasi takaran perbandingan setting optimal terpilih beserta level adalah A2B2C1, dimana A2 (suhu 100°C), B2 (takaran obat 8 kg) dan C1 (rasio air 400 lt). Setting optimal hasil eksperimen *Taguchi* ini akan diimplementasikan dalam instruksi kerja yang berupa SOP yang berguna untuk mengurangi kesalahan operator dalam menentukan takaran perbandingan. Perbandingan kondisi actual dan hasil rancangan adalah sebagai berikut:

Variabel perbandingan	Kondisi Aktual	Kondisi Usulan
Setting Proses Washing		
Suhu:	80 derajat Celcius	100 derajat Celcius
Takaran obat pewarna:	7 kg	8 kg
Air:	400 liter	450 liter
Tingkat Kecacatan	19,86 %	4,16%
Total Kerugian	Rp. 2.199.920	Rp. 47.849

Daftar Notasi

- L = Rancangan Bujur sangkar latin
- a = Banyaknya Baris / eksperimen
- b = banyaknya level
- c = banyak kolom / factor
- k = Harga pokok produk (Rp.)
- p = Persentase cacat (%)
- x = Jumlah cacat (unit)
- n = jumlah sampel (unit)

Daftar Pustaka

- Balavendram, N. (1995). *Quality By Design : Taguchi Techniques For Industrial Experimentation*, New York: Prentice Hall.
- Basuki, Mahmud. (2013). Desain Eksperimen Menggunakan Metode *Taguchi* untuk Mengurangi Tingkat Kecacatan Produk Nata De Coco di CV. Agrindo Suprafood Yogyakarta, *Jurnal penelitian Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga : Yogyakarta*.
- Gaspersz, Vincent. (2002). *Pedoman Implementasi Program Six Sigma Terintegrasi dengan ISO 9001:2000, MBNQA & HACCP*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Hicks. (1993). *Fundamental Concepts in the Design of Eksperiments, 4th Edition*. New York: Oxford University Press
- Kesuma, Zurnila Marli, M. Si. (2006). Analysis Of Attribute Data in *Taguchi's* Approach, *Jurnal penelitian Universiti Sains Malaysia : Malaysia*.
- Muis, Saludin. (2011). *Metodologi 6 Sixma, Edisi Pertama*, Yogyakarta: Graha Ilmu
- Peace, Glen Stuart. (1993). *Taguchi Medhods: a Hands-On Approach*. New York: Addison-Wesley Publishing Company
- Permatasari, Shabrina Rahma.(2013). Penerapan Metode Six Sigma dengan Pendekatan Metode Metode *Taguchi* Untuk Menurunkan Produk Cacat, (Studi Kasus : Sentra Industri Genteng Tanah Liat Desa Pacar Peluk, Kecamatan Megaluh, Kabupaten Jombang). *Jurnal Penelitian Universitas Brawijaya:Malang*.
- Phadke, Madhav Shridhar. (1989). *Quality Engineering Using Robust Design*, P T R Prentice-Hall, America.
- Putra, Boy Isma. (2010). Penerapan Metode Six Sigma Untuk Menurunkan Kecacatan Produk Frypan Di CV. Corning Sidoarjo, *Jurnal penelitian Universitas Muhammadiyah: Sidoarjo*
- Ross, Phillip J. (1998). *Taguchi Techniques For Quality Engineering, Loss Function, Orthogonal Experiment, Parameter and Tolerance Desain*. New York: Mc. Graw-Hill Book Company
- Soejanto, Irwan. (2009). *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi, Edisi Pertama*, Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Soejanto, Irwan. (2008). *Rekayasa kualitas: Eksperimen dengan Teknik Taguchi*. Surabaya: Yayasan Humaniora.
- Triawati, Nina. (2007). Penentuan Setting Level Optimal untuk Meningkatkan Kualitas Benang Rayon (30R) dengan Eksperimen *Taguchi* Sebagai Upaya Jaminan Atas Spesifikasi Kualitas Benang, *Jurnal penelitian Universitas Sebelas Maret: Surakarta*.
- Windarti, Tantri. (2014). Pengendalian Kualitas untuk Meminimasi Produk Cacat Pada Proses Produksi Besi Beton, *Jurnal penelitian STMK Surabaya: Surabaya*.

Analisis Pengaruh Kualitas Produk, Harga dan Promosi Terhadap Keputusan Pembelian Mobil Honda BRV di Dealer Honda Abadi Cibiru dengan Metode *Analytical Hierarchy Process* dan Statistik

Rahmi Rismayani Deri¹, Rafika Ratik Srimurni², Ega Triyandi Permana³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Islam Nusantara, Bandung, Indonesia

¹rahmirismayani@uninus.ac.id, ²rafikaratiksm@gmail.com, ³egha.triandy@gmail.com

Abstrak

Dealer Mobil Honda Abadi Cibiru tidak dapat mencapai target penjualan Honda BRV yang telah ditetapkan. Hal ini menimbulkan berbagai masalah di dealer tersebut. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk mengatasinya. Tujuan penelitian untuk mengetahui pengaruh kualitas produk, harga dan promosi terhadap keputusan pembelian secara analisis uji statistic (uji F dan uji t). Metode yang digunakan adalah AHP dan statistik. Berdasarkan pengolahan data AHP dari kelima alternatif berpengaruh besar terhadap keputusan pembelian mobil Honda BRV adalah harga dan promosi. Berdasarkan hasil responden terhadap kualitas produk, harga, promosi, dan keputusan pembelian adalah tinggi. Secara simultan hasil Uji F menyatakan variabel kualitas produk, harga dan promosi berpengaruh terhadap keputusan pembelian. Hasil pengujian parsial (Uji T), kualitas produk tidak memiliki pengaruh nyata terhadap keputusan pembelian. Variabel harga mempunyai pengaruh yang nyata terhadap Keputusan Pembelian. Variabel promosi mempunyai pengaruh terhadap Keputusan Pembelian. Untuk peneliti selanjutnya untuk menambah variable lainnya yang dapat mempengaruhi keputusan pembelian.

Kata kunci: kualitas, harga, promosi, AHP, keputusan.

Abstract

The Honda Abadi Cibiru Car Dealer was unable to achieve the sales target of the Honda BRV. This causes various problems at the dealer. Therefore, research needs to be done to overcome it. This research aims to determine the effect of product quality, price and promotion on purchasing decisions statistically analysis (F-test and t-test). The methods used are AHP and statistics. Based on the AHP data processing of the five alternatives that have a big influence on the decision to purchase a Honda BRV car are price and promotion. Based on the results of respondents to product quality, price, promotion, and purchasing decisions are high. Simultaneously the results of the F test state that the variables of product quality, price and promotion have an effect on purchasing decisions. The results of the partial test (T test), the quality of the product does not have a real influence on purchasing decisions. The price variable has a real influence on the Purchase Decision. The promotion variable has an influence on purchasing decisions. For further researchers to add other variables that can affect purchasing decisions.

Keywords: quality, price, promotion, AHP, decision.

1. Pendahuluan

Kemajuan yang cepat dan pesat dalam perkembangan industri di Indonesia membuat semakin banyak industri-industri baru berdiri dengan keunggulan kualitas produknya masing-masing. Hal ini membuat setiap industri harus dapat terus berinovasi mengembangkan terus kualitas produknya sesuai dengan kebutuhan dari konsumennya untuk dapat bersaing dengan industri lainnya. Oleh karena itu analisis keputusan pembelian sangat penting dilakukan oleh setiap perusahaan untuk supaya diminati oleh konsumen dan dapat mencapai target penjualannya (Panji & Indria, 2020). Konsumen akan membeli dan menggunakan produk apabila dapat memenuhi kebutuhannya yang cenderung lebih individualis serta lebih pribadi. Sehingga produk dapat diterima atau tidak tergantung dari persepsi konsumen terhadap produk tersebut (Kotler & Keller, 2015).

Salah satu industri yang mengalami persaingan sangat ketat adalah industri otomotif, khususnya persaingan pada industri mobil. Dimana para Agen Pemegang Merek (APM) akan terus meningkatkan kualitas produknya, melakukan riset pasar untuk dapat lebih diminati oleh konsumen dan meningkatkan penjualannya. PT. Honda Prospek Motor merupakan salah satu APM yang sedang sering mengeluarkan produk barunya. Honda BR-V (*Bolt Runabout Vehicle*) merupakan salah satu produk baru PT. Honda Prospek Motor yang termasuk dalam kelas *Low Sport Utility Vehicle* (L-SUV). Dengan adanya produk tersebut meningkatkan pilihan bagi konsumen dalam memilih kendaraan bermobil dalam segem MPV dan *low* SUV. Mobil BRV dikeluarkan sebagai pengisi kekosongan produk Honda dalam kelas *low* SUV, berdasarkan hasil riset tim R&D PT. Honda Prospek Motor. Berdasarkan hasil riset yang sudah dilakukan oleh tim bidang R&D di PT. Honda Prospek Motor, bahwa mobil Honda BR-V merupakan produk yang di buat untuk mengisi kekosongan produk dalam kelas tersebut karena

Info Makalah:

Dikirim : 01-28-21;
Revisi 1 : 06-17-21;
Revisi 2 : 07-14-21;
Diterima : 07-15-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 856-2118-387

e-mail : rahmirismayani@uninus.ac.id

mobil Honda BR-V memiliki peluang yang cukup besar menarik minat konsumen dalam membeli produk tersebut dengan menggunakan strategi segmenting, targeting dan positioning.

Peluncuran mobil Honda BR-V pada yang dilakukan pada bulan Januari tahun 2019 konsumen sangat antusias, namun setelah kurang lebih 2 (dua) bulan setelah pemasaran, penjualan Honda BR-V menjadi *stagnan* dan lebih cenderung mengalami penurunan.

Berikut data permulaan pencapaian target PT. Honda Prospek Motor pada dealer-dealer yang berada di dalam kota Bandung. Data dealer kota Bandung yang terdiri dari 6 dealer 3S (*Sales, Service dan Sparepart*) yaitu: Honda IBRM, Honda Autobest, Honda Pasteur, Honda Ahmad Yani, Honda Sonic dan Honda Abadi Cibiru. Data tersebut disajikan di dalam Tabel 1 yang berada dibawah ini:

Tabel 1 Data Capaian Target Penjualan Mobil Honda BR-V 6 Dealer Honda Bandung

Bulan	DEALER						TOTAL
	HAY	IBRM	AUTOBEST	SONIC	PASTEUR	HAC	
Januari	42	56	67	34	63	41	303
Februari	44	54	47	24	49	36	254
Maret	24	31	20	10	18	24	117
April	38	48	39	26	28	18	197
Total	138	189	173	94	158	119	871
Target	194	282	241	187	236	164	1304
Ach (%)	71,1%	67,0%	71,8%	50,3%	66,9%	72,5%	66,6%

Berdasarkan tabel di atas target penjualan mobil Honda BR-V hanya tercapai 66,6% di dealer Kota Bandung. Hal ini menunjukkan bahwa target yang telah ditentukan di dealer honda tidak tercapai. Ketidak tercapai target ini menimbulkan berbagai masalah bagi perusahaan, dimana selain keuntungan yang diperoleh berkurang juga terjadi penumpukan barang di dalam gudang dengan berbagai resikonya. Sehingga di perlukan penelitian untuk dapat meningkatkan penjualan dan mencapai target yang telah ditetapkan. Oleh karena itu dilakukukan penelitian “Pengaruh Kualitas Produk, Harga, dan Promosi Terhadap Keputusan Pembelian Mobil Honda BR-V Di Dealer Honda Abadi Cibiru Bandung Dengan Metode *Analitycal Hierarchy Process* (AHP) dan Statistik”. Dimana metode AHP merupakan salah satu metode dalam penentuan keputusan alternatif terbaik (Miandri dkk, 2020). Metode ini adalah metode pendukung keputusan yang dapat menguraikan permasalahan multi faktor yang kompleks dijadikan suatu hierarki kriteria melalui pengembangan bobot atau paling utama (Munthafa & Mubarok, 2017).

Dengan latar belakang tersebut, dirumuskan pertanyaan penelitian sebagai berikut :

1. Bagaimana konsumen dalam menentukan pilihan mobil Honda BRV berdasarkan alternatif produk dengan menggunakan metode *Analitycal Hierarchy Process* (AHP)?
2. Bagaimana tanggapan responden mengenai kualitas produk, harga, dan promosi, terhadap keputusan pembelian dalam membeli mobil Honda BR-V di dealer Honda Abadi Cibiru Kota Bandung?
3. Bagaimana pengaruh kualitas produk, harga, dan promosi, terhadap keputusan pembelian dalam membeli mobil Honda BR-V di dealer Honda Abadi Cibiru Kota Bandung secara simultan?
4. Bagaimana pengaruh kualitas produk, harga, dan promosi, terhadap keputusan pembelian dalam membeli mobil Honda BR-V di dealer Honda Abadi Cibiru Kota Bandung secara parsial?

Dimana tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk meneliti konsumen dalam menentukan pilihan mobil Honda BRV berdasarkan alternatif produk dengan menggunakan metode *Analitycal Hierarchy Process* (AHP).
2. Mengetahui tanggapan responden mengenai kualitas produk, harga, dan promosi, terhadap keputusan pembelian dalam membeli mobil Honda BR-V di dealer Honda Abadi Cibiru Bandung.
3. Untuk mengetahui pengaruh kualitas produk, harga, promosi, terhadap keputusan pembelian dalam membeli mobil Honda BR-V di dealer Honda Abadi Cibiru Bandung secara simultan.
4. Untuk mengetahui pengaruh kualitas produk, harga, promosi, terhadap keputusan pembelian dalam membeli mobil Honda BR-V di dealer Honda Abadi Cibiru Bandung secara parsial.

2. Metode

Penelitian yang dilakukan di Dealer mobil Honda Abadi Cibiru kota Bandung merupakan penelitian studi kasus. Pengumpulan data dimulai studi pendahuluan, perumusan masalah, penyusunan metode, pengambilan data, pengolahan data dan melakukan analisis dari hasil pengolahan data. Dimana semua itu untuk mendapat data, analisis dan kesimpulan yang ditarik dapat dipertanggung jawabkan. Sampel dalam penelitian ini diambil dari sejumlah responden yang dilakukan secara *accidental sampling*. Di dalam penelitian ini terdapat 2 (dua) variabel, yaitu:

- 1) Variabel terikat (*dependent variable*) adalah variabel yang menjadi akibat atau terpengaruh karena ada variabel lain atau variabel bebas, variabel respons/endogen (Siregar, 2012). Variabel terikat di dalam penelitian ini adalah minat beli (Y).
- 2) Variabel bebas (*independent variable*) adalah variabel yang dijadikan penyebab atau mempengaruhi variabel yang lainnya atau *variable dependent*, atau yang sering disebut juga sebagai variabel bebas, stimulus, bebas, eksogen atau antecedent (Siregar, 2012). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah
- Variabel Kualitas Produk (X_1);
 - Variabel Harga (X_2);
 - Variabel Promosi (X_3).
- Kemudian variabel bebas (*independent variable*) dan (*independent variable*) dibuat definisi operasionalnya beserta dimensi dan indikatornya yang dijadikan dasar dalam penyusunan kuesioner untuk mengambil data-data yang dibutuhkan dalam penelitian ini yang disajikan dalam tabel 2. Dimana seluruh pertanyaan - pertanyaan dalam kuesioner di lakukan pengukuran validitas dan reliabilitasnya.

Tabel 2. Operasional Variabel

Variabel	Definisi Variabel	Dimensi	Indikator	Skala	Item pernyataan
Kualitas Produk (X1)	Kualitas Produk adalah Keandalan suatu produk mampu menjalankan fungsinya yang meliputi ketahanan, keandalan, kemudahan, ketepatan, operasi serta perbaikan lainnya (Kotler & Armstrong, 2014).	1. Kinerja (<i>Performance</i>)	Kemampuan produk untuk melakukan fungsinya.	Ordinal	1
		2. Keandalan (<i>Reability</i>)	Memiliki mesin yang handal.		2
		3. Ketahanan (<i>Durability</i>)	Memiliki mesin dengan daya tahan tinggi.		3
		4. Kesesuaian (<i>Conformance</i>)	Produk sesuai dengan harapan.		4
		5. Desain (<i>Design</i>)	Warna/corak		5
Harga (X2)	Harga adalah salah satu bauran pemasaran yang menghasilkan pendapatan, elemen lain menghasilkan biaya (Kotler dan Keller, 2016).	1. Daftar harga (<i>Price list</i>)	Informasi mengenai harga produk.	Ordinal	6
		2. Diskon (<i>Discount</i>)	Tingkat Potongan harga.		7
		3. Potongan harga khusus (<i>Allowance</i>)	Potongan harga musiman.		8
		4. Periode Pembayaran (<i>Payment period</i>)	Kelonggaran jangka waktu pembayaran.		9
		5. Syarat kredit (<i>Credit term</i>)	Sistem pembayaran secara kredit.		10
Promosi (X3)	Promosi adalah sarana dimana perusahaan berusaha menginformasikan, membujuk, dan meningkatkan komunikasi secara langsung maupun tidak langsung tentang produk yang mereka jual (Kotler dan Keller, 2016).	1. Periklanan (<i>Advertising</i>)	Media massa (televisi, radio)	Ordinal	11
		2. Promosi Penjualan (<i>Sales promotion</i>)	Memberikan insentif kepada pembeli.		12
		3. Acara/pengalaman (<i>Event & experinces</i>)	Banyaknya pengunjung saat event.		13
		4. Online dan pemasaran media social (<i>Online and social media marketing</i>)	Iklan online/website.		14
		5. Penjualan personal (<i>Personal selling</i>)	Pengetahuan produk.		15
		6. Dari mulut ke mulut (<i>Word of mouth</i>)	Mereferensikan kepada orang lain.		16
Keputusan Pembelian (Y)	tahap dalam proses pengambilan keputusan pembeli di mana konsumen benar-benar membeli (Kotler & Amstrong, 2014).	1. Pilihan produk	Perhatian pada suatu produk.	Ordinal	17
		2. Pilihan merek	kebiasaan dalam membeli produk.		18
		3. pilihan penyalur	memberikan rekomendasi pada orang lain.		19
		4. waktu pembelian	melakukan pembelian ulang.		20

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh konsumen mobil BR-V di Dealer Honda Abadi Cibiru Bandung dari Januari sampai April 2019 yaitu sebanyak 164 orang. Populasi merupakan wilayah generalisasi yang terdiri di

dalamnya subjek atau obyek yang memiliki kualitas dan karakteristik tertentu yang telah ditetapkan dalam penelitian selanjutnya di teliti serta diambil kesimpulan. Teknik pengambilan sample di lakukan dengan pendekatan *probably sampling*, dimana merupakan teknik sampling yang memeberikan peluang untuk dipilih sama untuk menjadi sample dari populasi tersebut. Serta ditetapkan juga jumlah minimum sample untuk dapat mewakili populasi. Rumus *random sampling* menggunakan rumus *sampling* dari Taro Yamane (Fahma, Zakaria & Hary, 2012) :

$$n = \frac{N}{N \cdot d^2 + 1} \quad (1)$$

$n = 62,12$ dibulatkan 63 orang.

Dimana berikut deskripsi karakteristik dari sample yang menjadi responden berdasarkan usia ditampilkan dalam tabel 3 dan berdasarkan pekerjaan pada tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 3. Karakteristik Sample yang Menjadi Responden Berdasarkan Usia

Umur (Tahun)	Jumlah
17-25	9
26-30	18
31-40	23
>40	13
TOTAL	63

Tabel 4. Karakteristik Sample yang Menjadi Responden Berdasarkan Pekerjaan

Pekerjaan	Jumlah
Mahasiswa	4
Pegawai Swasta	31
PNS/POLRI/TNI	17
Wiraswasta	11
TOTAL	63

Teknik pengumpulan data sekunder dilakukan melalui studi literatur atau studi kepustakaan. Data primer untuk mengukur pengaruh Kualitas produk, Harga, Promosi terhadap Keputusan Pembelian, maka menggunakan kuesioner dengan skala *likert* (Nugroho, Budi dan Safi'I, 2020). Interpretasi angka dilakukan untuk dapat mengetahui hubungan rendah atau tingginya anatar variabel yang didasarkan pada nilai r (koefisien korelasi) (Sugiyono,2011). Pengolahan data menggunakan rumus uji validitas teknik korelasi *product moment* adalah :

$$R = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n(\sum X^2) - (\sum X)^2] [n(\sum Y^2) - (\sum Y)^2]}} \quad (2)$$

Uji reliabilitas dengan menggunakan teknik *Alpha Crosnchbach*

$$r_{11} = \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[1 - \frac{\sum ab^2}{at^2} \right] \quad (3)$$

Regresi linier berganda merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh antar variabel, dimana pada penelitian ini adalah variabel kualitas produk, harga, promosi terhadap variabel keputusan pembelian Mobil Honda BR-V pada Dealer Honda Abadi Cibiru Bandung. Model hubungan nilai pelanggan terhadap variabel bebas dan variabel terikat tersebut disusun dalam persamaan matematis sebagai berikut (Ghozali, 2008) :

$$Y = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \varepsilon \quad (4)$$

Tingkat signifikasi pengaruh variable-variabel bebas terhadap variabel terikat secara Bersama-sama (simultan) dapat diketahui dengan analisis uji F (Jhosua & Padmalia, 2016). Hipotesis untuk uji parsial yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

H₁ : Pengaruh Kualitas Produk dan Harga terhadap Keputusan Pembelian.

H₀ : Kualitas Produk dan Harga tidak berpengaruh nyata secara bersama-sama terhadap Keputusan Pembelian.

H₁ : Kualitas Produk dan Harga berpengaruh nyata secara bersama-sama terhadap Keputusan Pembelian.

H₂ : Pengaruh Harga dan Promosi terhadap Keputusan Pembelian.

H_0 : Harga dan Promosi tidak berpengaruh nyata secara bersama-sama terhadap Keputusan Pembelian.

H_1 : Harga dan Promosi berpengaruh nyata secara bersama-sama terhadap Keputusan Pembelian.

H_3 : Pengaruh Kualitas Produk dan Promosi terhadap Keputusan Pembelian.

H_0 : Kualitas Produk dan Promosi tidak berpengaruh nyata secara bersama-sama terhadap Keputusan Pembelian.

H_1 : Kualitas Produk dan Promosi berpengaruh nyata secara bersama-sama terhadap Keputusan Pembelian.

Uji T digunakan untuk menguji signifikansi hubungan antara variabel bebas (X) dan variabel terikat (Y) secara terpisah, apakah masing-masing variabel bebas X_1 , X_2 , X_3 (Kualitas Produk, Harga, Promosi) benar-benar berpengaruh terhadap variabel terikat Y (Keputusan Pembelian) secara terpisah ataupun secara parsial (Jhosua & Padmalia, 2016).

Hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini adalah :

H_4 : Pengaruh Kualitas Produk terhadap Keputusan Pembelian.

H_0 : Kualitas Produk tidak berpengaruh secara nyata terhadap Keputusan Pembelian (variabel terikat).

H_1 : Kualitas Produk mempunyai pengaruh secara nyata terhadap Keputusan Pembelian (variabel terikat).

H_5 : Pengaruh Harga terhadap Keputusan Pembelian.

H_0 : Harga tidak berpengaruh secara nyata terhadap Keputusan Pembelian (variabel terikat).

H_1 : Harga berpengaruh secara nyata terhadap Keputusan Pembelian (variabel terikat).

H_6 : Pengaruh Promosi terhadap Keputusan Pembelian.

H_0 : Promosi tidak berpengaruh secara nyata terhadap Keputusan Pembelian (variabel terikat).

H_1 : Promosi berpengaruh secara nyata terhadap Keputusan Pembelian (variabel terikat).

Dengan kriteria dimana apabila nilai probabilitas signifikan > 0.05 , maka terima H_0 dan tolak H_1 , begitu sebaliknya apabila nilai probabilitas signifikan < 0.05 , maka tolak H_0 dan terima H_1 .

Pengambilan keputusan pada penelitian ini berdasarkan pada angka probabilitas signifikansi, yaitu:

a. Apabila probabilitas signifikansi > 0.05 , maka terima H_0 dan tolak H_1 . Artinya variabel bebas tidak mempunyai pengaruh yang nyata secara bersama-sama terhadap variabel terikat.

b. Apabila probabilitas signifikansi < 0.05 , maka terima H_0 dan tolak H_1 . Artinya variabel bebas mempunyai pengaruh yang nyata secara bersama-sama terhadap variabel terikat.

Uji Koefisien determinasi (R^2) dilakukan untuk menilai kesesuaian model regresi linier dugaan apakah persamaan regresi yang diperoleh sudah cukup baik, dalam hal ini ditunjukkan oleh besarnya koefisien determinasi (R^2) antara 0 (nol) dan 1 (satu).

Dasar pengambilan keputusan uji normalitas adalah sebagai berikut:

a. Jika data menyebar disekitar garis diagonal dan mengikuti arah garis diagonal, maka model regresi memenuhi normalitas (nilai R^2 semakin dekat dengan 1 atau 100%)

b. Jika data menyebar jauh dari garis diagonal dan tidak mengikuti arah garis diagonal, maka model regresi tidak memenuhi normalitas (nilai R^2 semakin dekat dengan 0 atau 0%)

Nilai *tolerance* dan *variance inflation factor* digunakan untuk mendeteksi Uji Multikolonieritas. Uji heteroskedastisitas dengan melihat grafik *scatter plot* antara nilai prediksi variabel terikat (ZPRED) dengan residualnya (SRESID)

Dealer Honda Abadi Cibiru dapat menggunakan konsep system pendukung keputusan sebagai alat bantu dalam mengetahui pengaruh beberapa kriteria seperti kualitas produk, harga dan promosi. Kriteria-kriteria tersebut diduga berpengaruh terhadap keputusan pembelian mobil Honda BRV. Menurut Munthafa & Mubarak (2017), salah satu metode relevan yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konsistensi dalam menentukan tingkat prioritas dari beberapa factor atau kriteria adalah menggunakan metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Metode AHP dipilih karena memiliki banyak kelebihan dari metode lainnya, seperti memberikan suatu model tunggal yang mudah dimengerti serta luwes, kompleksifitas, saling ketergantungan, penyusunan hierarki, memberi skala untuk mengukur, melacak konsistensi logis, sintesis, tawar menawar, mensintesis dan pengulangan proses (Viarani & Zadry, 2015). Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas mengenai penerapan metode AHP dalam mengetahui pengaruh kriteris kualitas produk, harga, dan promosi terhadap keputusan pembelian mobil Honda BRV pada Delaer Honda Abadi Cibiru Bandung.

Tahapan-tahapan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) sebagai berikut:

1. Mendefinisikan masalah untuk menentukan solusi

2. Membuat struktur hirarki diawali dengan tujuan utama

3. Membuat matriks perbandingan berpasangan untuk mendapat gambaran bagaimana setiap elemen mempengaruhi tujuan atau kriteria yang satu tingkat di atasnya.

4. Perbandingan berpasangan didefinisikan untuk memperoleh sebanyak $n \times [(n-1)/2]$ buah penilaian.

5. Menghitung nilai eigen dan mengukur konsistensi.

6. Mengulag langkah 3 -5 untuk seluruh tingkatan hirarki,

7. Melakukan proses *Overall Composite Weight* dengan cara menghitung *Composite Weight* yang diperoleh dari hasil penjumlahan terhadap perkalian setiap nilai *Priority Vector* alternatif dengan nilai *Priority Vector* kriteria.

Dimana dalam menyelesaikan permasalahan dengan AHP menggunakan beberapa prinsip yaitu :

1. Hirarki dibuat untuk memahami sistem kompleks dapat dengan cara melakukan pemecahan elemen menjadi elemen-elemen yang mendukung, elemen tersusun secara hierarki serta menggabungkan atau mensintesisnya.
2. Perbandingan berpasangan dilakukan untuk melakukan penilaian Kriteria dan Alternatif.
3. Menentukan prioritas, perbandingan berpasangan untuk setiap kriteria dan alternative perlu dilakukan. Nilai-nilai perbandingan relatif dari seluruh alternatif kriteria dapat disesuaikan dengan *judgement* yang sudah ditentukan dalam memperoleh bobot dan prioritas.
4. Konsistensi yang logis, objek yang serupa dikelompokkan berdasarkan keseragaman dan relevansi, atau hubungan antar objek berdasarkan kriteria tertentu.

3. Hasil dan Pembahasan

a). Analisis Hasil Perhitungan Data Dengan Metode Statistik

1. Kualitas Produk

Berdasarkan analisis satuan skor, secara keseluruhan variabel kualitas produk mencapai angka sekitar 0,775 atau 77,5% dari skor ideal, hal ini menunjukkan bahwa kualitas produk masuk pada kategori tinggi, yang artinya kualitas produk yang ditawarkan tergolong sangat baik.

2. Harga

Berdasarkan analisis satuan skor, secara keseluruhan variabel harga mencapai angka sekitar 0,789 atau 78,9% dari skor ideal, hal ini menunjukkan bahwa harga masuk pada kategori tinggi, yang artinya harga yang ditawarkan tergolong sangat baik.

3. Promosi

Berdasarkan analisis satuan skor, secara keseluruhan promosi mencapai angka sekitar 0,786 atau 78,6% dari skor ideal, hal ini menunjukkan bahwa promosi masuk pada kategori tinggi, yang artinya promosi yang dilakukan tergolong baik.

4. Keputusan Pembelian

Berdasarkan analisis satuan skor, secara keseluruhan keputusan pembelian mencapai angka sekitar 0,623 atau 62,3% dari skor ideal, hal ini menunjukkan bahwa keputusan pembelian masuk pada kategori tinggi, yang artinya keputusan pembelian yang dilakukan konsumen tergolong tinggi.

b). Uji Hipotesis

Diperoleh Konstanta sebesar 1,688. Konstanta tersebut menunjukkan suatu kondisi dimana bila kualitas produk buruk, harga tinggi dan promosi buruk, maka keputusan pembelian akan buruk, juga ada variabel lain yang memengaruhinya di luar model. Sementara itu, nilai sigma harga (0,016) dan promosi (0,039) yaitu lebih kecil dari derajat kepercayaan (α) 5 persen. Hal ini menunjukkan bahwa harga dan promosi berpengaruh positif terhadap keputusan pembelian harus diterima secara statistik. Sedangkan kualitas produk (0,326) lebih besar daripada derajat kepercayaan $\alpha = 5\%$ (0,05), atau berarti tidak signifikan. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini, yaitu pengaruh kualitas produk terhadap keputusan pembelian secara parsial harus ditolak. Sedangkan hipotesis yang menyatakan harga terhadap keputusan pembelian secara parsial harus diterima secara statistik dan hipotesis yang menyatakan pengaruh promosi terhadap keputusan pembelian secara parsial harus diterima secara statistik. Berdasarkan uji parsial (Uji t) diperoleh hasil sebagai berikut :

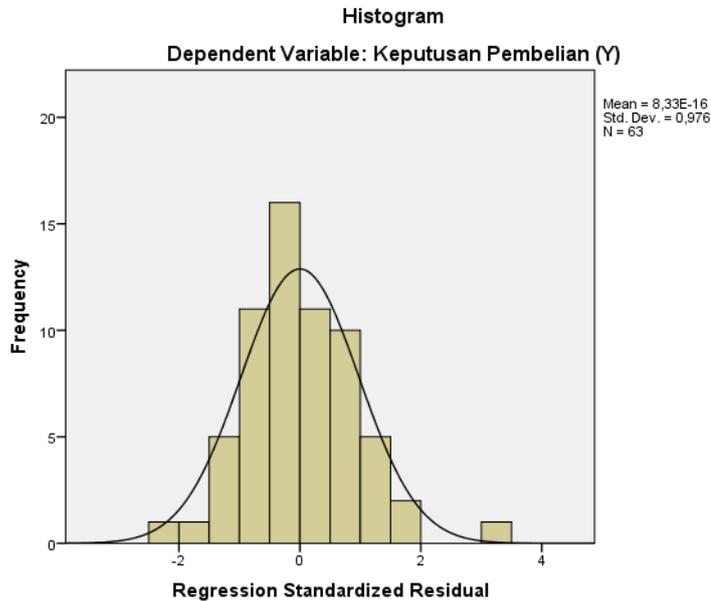
Tabel 5. Rangkuman Hasil Uji t

Variabel	T Hitung	T Tabel	Rekomendasi
Kualitas Produk (X ₁)	0,989	2,001	Tidak Berpengaruh
Harga (X ₂)	2,484	2,001	Berpengaruh
Promosi (X ₃)	2,111	2,001	Berpengaruh

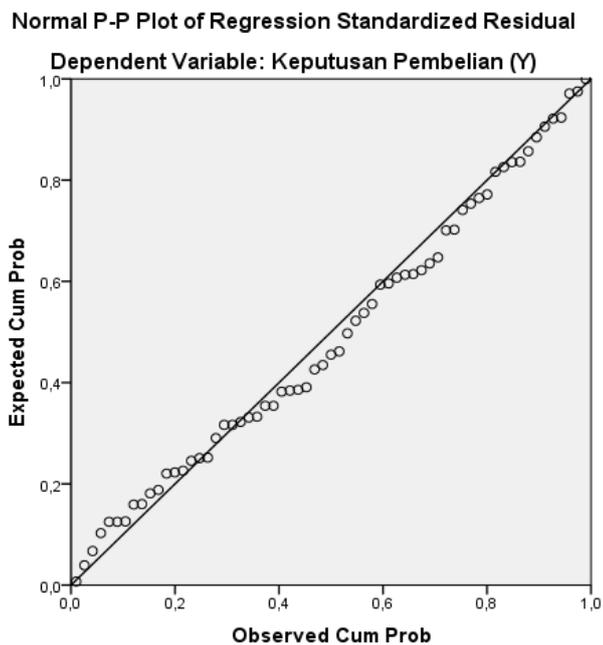
Menunjukkan nilai signifikansi yang dihasilkan yaitu lebih besar dari 0,05. Nilai t hitung untuk Kualitas Produk (X₁) lebih kecil dari pada nilai t tabel 2,001 ($0,989 \geq 2,001$) maka tolak H₀, sehingga dapat disimpulkan bahwa Kualitas Produk tidak mempunyai pengaruh yang nyata terhadap Keputusan Pembelian. Nilai signifikansi untuk variabel Harga adalah 0,016 lebih kecil dari nilai taraf kepercayaan 0,05. Sedangkan nilai t hitung untuk variabel Harga (X₂) lebih besar dari pada nilai t tabel 2,001 ($2,484 \geq 2,013$) sehingga H₀ diterima yang artinya variabel Harga mempunyai pengaruh yang nyata terhadap Keputusan Pembelian. Kemudian diperoleh nilai signifikansi untuk variabel Promosi sebesar 0,039 dimana nilai ini lebih kecil dari 0,05. Uji parsial untuk variabel Promosi (X₃) diperoleh nilai t hitung sebesar 2,111, dimana nilai t hitung lebih besar dari pada nilai t tabel 2,001 ($2,111 \leq 2,001$). Sehingga tidak ada alasan untuk menerima H₀, maka dapat disimpulkan bahwa variabel Promosi mempunyai pengaruh yang nyata terhadap Keputusan Pembelian.

Berdasarkan hasil uji simultan diperoleh F hitung sebesar 52,888 dengan nilai probabilitas sebesar 0,000 atau lebih kecil daripada derajat kepercayaan (α) 5%. Dengan demikian hipotesis penelitian yang menyatakan bahwa variabel

kualitas produk, harga dan promosi secara *simultan* berpengaruh terhadap keputusan pembelian harus diterima secara statistik. Dengan koefisien determinasi (*Adjusted R square*) sebesar 0,715. Artinya perubahan dari variabel keputusan pembelian (Y) dapat dijelaskan atau dipengaruhi oleh variabel kualitas produk (X_1), harga (X_2) dan promosi (X_3) sebesar 71,5%. Sisanya sebesar 28,5% dijelaskan atau dipengaruhi oleh variabel lain yang tidak diteliti. Dimana berdasarkan uji normalitas diperoleh grafik sebagai berikut :



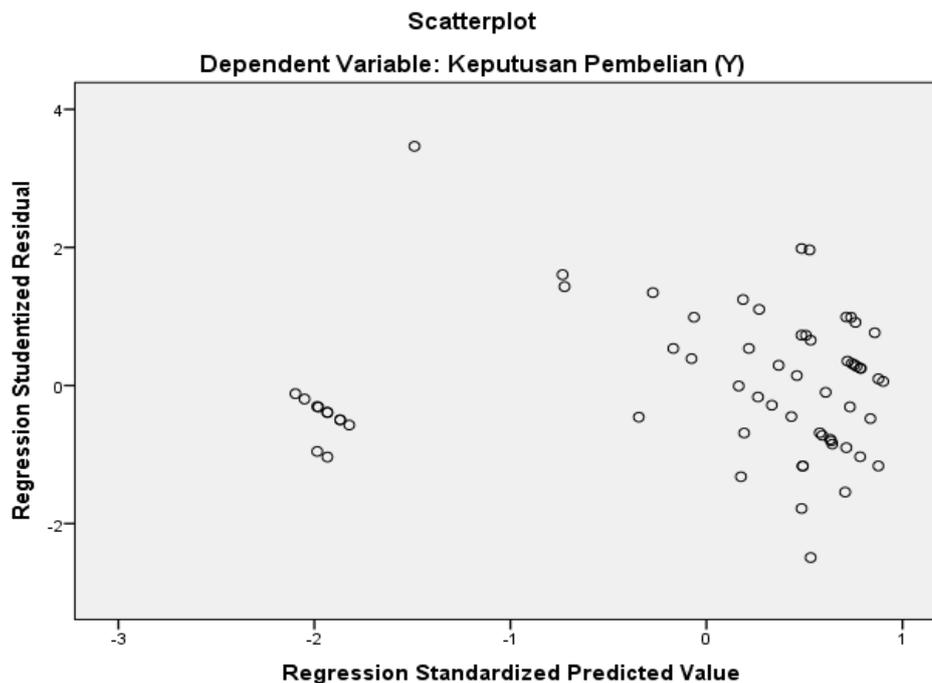
Gambar 1. Grafik Histogram Keputusan Pembelian



Gambar 2 Normal Probability Plot

Dari Gambar 1 terlihat bahwa pola distribusi mendekati normal atau tidak melenceng ke kiri/kanan (*skewness*). Begitu juga bila dilihat pada Gambar 2 titik-titik menyebar sekitar garis diagonalnya, sehingga distribusinya termasuk normal.

Dari hasil pengujian multikolonieritas diketahui bahwa besarnya nilai VIF (*Varians Inflation Factor*) dari masing-masing variabel bebas memiliki nilai VIF tidak lebih dari 10 dan *Tolerance* tidak kurang dari 0,1. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh variabel bebas tidak terdapat adanya multikolonieritas. Berdasarkan hasil uji heterogenitas diperoleh hasil sebagai berikut:



Gambar 3. *Output* Heteroskedastisitas

Gambar 3 di atas menunjukkan output heteroskedastisitas antara nilai sumbu Y (Nilai Y yang diprediksi) dan sumbu X (Nilai residual) yakni menunjukkan suatu pola yang tidak jelas, serta titik menyebar diatas dan dibawah sumbu Y secara tidak teratur. Hal ini menunjukkan tidak adanya heteroskedastisitas antara nilai Y prediksi dan nilai residual.

Analisis hasil perhitungan data dilakukan dengan *Analytical Hierarchy Process* yang di hitung menggunakan *Software Expert Choice* 11. Dimana dengan jumlah responden sebanyak 5 orang ahli dan jumlah pernyataan yang ada di kuesioner sebanyak 4 pernyataan. Hasil perhitungan setiap kriteria dan alternatif sebagai berikut :

a) Analisa *Inconsistency Ratio*

Nilai *overall inconsistency index* yang didapat untuk pembobotan alternatif adalah 0.05. dengan demikian jawaban kuesioner tersebut telah benar karena responden telah mengerti dengan kuesioner yang diberikan, dengan tingkat kekonsistensian dibawah 10% (0,1) dari keseluruhan data.

b) Analisa Pemilihan Terhadap Alternatif

Pada penelitian ini, alternatif yang dikembangkan ada 3 untuk memilih alternatif terbaik antara lain Honda BRV, Toyota Avanza, dan Suzuki Ertiga. Dari hasil kuesioner data diolah pada *Analytical Hierarchy Process* dengan *Software Expert Choice* 11. Dari hasil perhitungan yang dilakukan didapat data Honda BRV (0,221), Toyota Avanza (0,525), Suzuki Ertiga (0,255).

Dari hasil pengolahan data kriteria kualitas produk Honda BRV dengan bobot 0,613, Toyota Avanza dengan bobot 0.189 dan Suzuki Ertiga dengan bobot 0,198, Honda BRV lebih unggul dari Toyota Avanza dan Suzuki Ertiga. Dari kriteria harga Honda BRV dengan bobot 0,174, Toyota Avanza dengan bobot 0.548 dan Suzuki Ertiga dengan bobot 0,278, Toyota Avanza lebih unggul dari Honda BRV dan Suzuki Ertiga. Dari kriteria promosi Honda BRV dengan bobot 0,124, Toyota Avanza dengan bobot 0,673 dan Suzuki Ertiga dengan bobot 0,203, Toyota Avanza lebih unggul dari Honda BRV dan Suzuki Ertiga.

Hasil tersebut merupakan hasil penjumlahan dari seluruh bobot dengan menggunakan *Software Expert Choice* 11. Hasil diatas menunjukkan bahwa responden banyak memilih mobil Toyota Avanza karena memiliki nilai bobot sebesar 0.525.

Bobot penilaian untuk masing-masing kriteria adalah sebagai berikut:

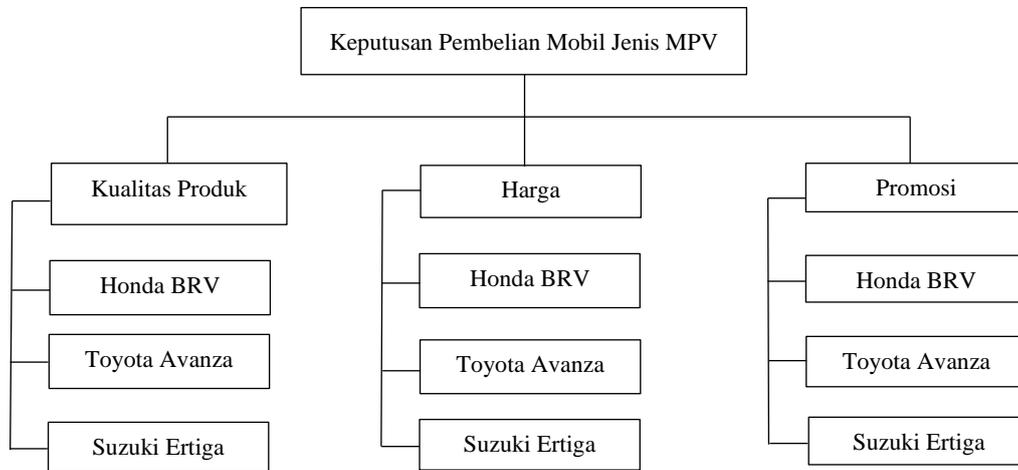
- 1) Kualitas Produk: 12,6%
- 2) Harga : 69,8%
- 3) Promosi : 17,6%

Dengan demikian dapat diketahui bahwa fokus penilaian lebih menitik beratkan pada kriteria Harga. Dengan menggunakan persentase pembobotan untuk masing-masing kriteria diatas maka didapat hasil sebagai berikut:

- 4) Honda BRV : 22,1%
- 5) Toyota Avanza : 52,5%
- 6) Suzuki Ertiga : 25,5%

c) Analisa *Sensitivitas*

Pada bobot penilaian tentang analisa sensitivitas keputusan pembelian, didapatkan nilai dari toyota Avanza tidak akan berubah apabila digeser sedemikian rupa. Namun Toyota Avanza menjadi keputusan pembelian. Jadi sensitivitas kemenangan dari semua kriteria yang ada adalah mobil Toyota Avanza.



Gambar 4. Hirarki Keputusan Pembelian Mobil Jenis MVP

Kesimpulan

Hasil pengolahan data AHP dari kelima alternatif yang memiliki pengaruh besar terhadap keputusan pembelian mobil Honda BRV adalah harga dan promosi. Berdasarkan hasil responden terhadap kualitas produk, harga, promosi, dan keputusan pembelian adalah tinggi. Secara simultan hasil Uji F menyatakan variabel kualitas produk, variabel harga dan variabel promosi mempengaruhi keputusan pembelian. Hasil uji parsial (Uji T), nilai t Kualitas Produk lebih kecil dari t tabel $2,001$ ($0,989 \leq 2,001$), maka Kualitas produk tidak mempunyai pengaruh yang nyata terhadap keputusan pembelian. Nilai t hitung untuk Harga lebih besar dari pada nilai t tabel ($2,484 \geq 2,001$) maka variabel harga mempunyai pengaruh nyata terhadap Keputusan Pembelian. Nilai t hitung untuk variabel promosi lebih besar dari pada nilai t tabel ($2,111 \geq 2,001$), sehingga promosi mempunyai pengaruh yang nyata terhadap Keputusan Pembelian. Berdasarkan data di atas penulis memberikan saran mobil Honda BRV sebaiknya menambah fitur yang lebih canggih untuk kenyamanan yang lebih nyaman saat digunakan dan banyak memberikan diskon disaat *event* tertentu.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih Penulis sampaikan kepada semua pihak atas seluruh kontribusi yang diberikan dalam penelitian ini dari mulai penelitian dimulai sampai dengan penelitian ini selesai. Karena berkat kontribusinya penelitian ini dapat berjalan dengan lancar sesuai dengan perencanaan serta penelitian ini dapat diselesaikan tepat pada waktu yang telah ditentukan.

Daftar Notasi

- n = ukuran sampel
- N = ukuran populasi
- d = persentase kelonggaran ketidaktelitian sampel yang masih dapat ditolerir atau diinginkan (10%)
- n = Jumlah Responden
- X = Skor Variabel (Jawaban Responden)
- Y = Skor total variabel untuk responden n
- n = Jumlah sampel
- X = Nilai skor yang dipilih
- σ^2 = Varians total
- $\sum \alpha_b^2$ = Jumlah varians butir
- K = Jumlah butir pertanyaan
- r_{11} = Koefisien reliabilitas instrumen
- Y = Variabel terikat (Keputusan Pembelian)
- b_1 = Nilai slope variabel X_1 (Kualitas Produk)
- b_2 = Nilai slope variabel X_2 (Harga)

- b_3 = Nilai slope variabel X_3 (Promosi)
 X_1 = Variabel bebas 1 (Kualitas Produk)
 X_2 = Variabel bebas 2 (Harga)
 X_3 = Variabel bebas 3 (Promosi)
 e = sisaan/galat (peubah acak)

Daftar Pustaka

- Fahma, F., Zakaria, R., & Hary, M. (2012). *Pengukuran Kinerja Perbankan Menggunakan Kriteria Malcom Baldrige National Quality Award (Studi Kasus pada Bank. XYZ)*. Surakarta : Performa. 11(2). 85-94.
- Indria, N & Panji, A. (2020) . *Pengaruh Harga, Kualitas Produk & Citra Merek Terhadap Keputusan Pembelian Sepeda Moto Honda Scoopy*. Surakarta. *Jurnal Manajemen, bisnis dan pendidikan*, 8 (1), 104-115.
- Kotler, & Keller. (2015). *Manajemen Pemasaran* (13 ed.). New York: Pearson.
- Kotler, & Keller. (2016). *Manajemen Pemasaran di Indonesia*. England: Kendallville.
- Kotler, P., & Armstrong, G. (2013). *Prinsip-prinsip Pemasaran* (13 ed., Vol. 1). Jakarta: Erlangga.
- Kotler, P., & Armstrong, G. (2014). *Prinsip-prinsip Manajemen* (14 ed.). Jakarta: Erlangga.
- Kotler, P & Armstrong, G. (2014). *Principles of marketing* (15th ed). New York : Pearson Publishing.
- Miandri, M., Amalia, R., & Vibiola, V. (2020, November). Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Hotel Di Kota Pontianak Menggunakan Metode *Analytical Hierarchy Process*. *Jurnal Digital Intelegent*,1 (1),1-10.
- Munthafa, A.G., & Mubharok, H. (2017). Penerapan Metode *Analytical Hierarchy Process* dalam Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Mahasiswa Berprestasi. *Jurnal Siliwangi Seri Sains dan Teknologi*, 3(2), 192-201.
- Nugroho, E., Budi, H & Safi'I I. (2020). *Analisis Pengaruh Kualitas Produk Terhadap Kepuasan Pelanggan. Kediri. Jurnal Ilmiah Teknik Industri Universitas Kadiri*. 2(2). 106-117.
- Siregar, S. (2012). *Statistika Deskriptif Untuk Penelitian*. Jakarta: Rajawali Pers.
- Sugiyono. (2011). *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. Bandung: CV. Alfabeta.
- Viarani, S.,& Zadry, H. (2015). Analisis Pemilihan Pemasok Dengan Metode *Analytical hierarchy process* Di Proyek Indarung IV PT. Semen Padang. *Jurnal Laporan Kerja Praktek* 14 (1), 55-70.

Dampak Pembangunan Minapolitan Terhadap Kinerja Lalu Lintas

Muhamad Yusuf¹, Anton Budiharjo², Mohammad Archi Mauliyda³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pancasakti, Tegal, Indonesia

²Manajemen Keselamatan Transportasi Jalan, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Tegal, Indonesia

³Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

muhyusuf0431@gmail.com, anton@pktj.ac.id, archimaulyda@unram.ac.id

Abstrak

Pembangunan kawasan wisata minapolitan di Kota Semarang, diperkirakan akan menimbulkan tarikan dan bangkitan perjalanan baru. Pembangunan kawasan tersebut akan berdampak kepada kinerja lalu lintas disekitarnya. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan memprediksi dampak lalu lintas akibat adanya pembangunan Kawasan minapolitan dan memberikan rekomendasi untuk mitigasinya. Dalam pengumpulan data primer dilakukan melalui survei langsung dilapangan antara lain survei kecepatan sesaat, inventarisasi ruas dan simpang, volume lalu lintas, angkutan umum dan pejalan kaki serta data sekunder yang diperoleh dari data dinas terkait. Dampak yang ditimbulkan pada masa konstruksi yaitu aktivitas mobilisasi dari alat berat, tarikan dan bangkitan aktivitas pekerja, masalah keselamatan dan kesehatan. Sedangkan pada masa operasional yaitu ketersediaan lahan parkir, aktivitas pejalan kaki, geometrik jalan dan desain pintu masuk dan keluar serta keselamatan dan kelancaran lalu lintas. Kinerja ruas dan simpang Sumurgunung mengalami kenaikan dari tahap eksisting, masa konstruksi, masa operasional sampai dengan masa 5 tahun mendatang dari masa operasional. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa pembangunan minapolitan akan menimbulkan tarikan perjalanan sebesar 103,31 smp/jam dan bangkitan sebesar 102,82 smp/jam.

Kata kunci: pembangunan minapolitan, andalalin, mitigasi dampak

Abstract

The development of the minapolitan tourist area in Semarang City, is expected to generate attraction and generation of new trips. The development of this area will have an impact on the performance of the surrounding traffic. The purpose of this research is to analyze and predict the impact of traffic due to the development of the minapolitan area and provide recommendations for mitigation. Primary data collection is carried out through direct field surveys, including instantaneous speed surveys, inventory of sections and intersections, traffic volume, public transport and pedestrians and secondary data obtained from data from related agencies. The impact during the construction period is the mobilization of heavy equipment, the pull, and generation of worker activities, safety, and health issues. Meanwhile, during the operational period, namely the availability of parking space, pedestrian activity, geometric roads and entrance, and exit design as well as traffic safety and smoothness, the performance of sections and intersections, has increased from the existing stage, the construction period, the operational period to the next 5 years from the operational period. The results of the analysis show that minapolitan development will cause travel attraction of 103.31 pcu/hour and a generation of 102.82 pcu/hour.

Keywords: Minapolitan development, andalalin, impact mitigation

1. Pendahuluan

Pembangunan dikawasan perkotaan sangat pesat perkembangannya (Oktinova & Rudiarto, 2019), (Purwanto, 2015). Setiap pembangunan akan menimbulkan dampak bagi kawasan lalu lintas disekitarnya (Sumajouw et al., 2013), (Bent Thagesen, 2018). Analisis Dampak Lalu Lintas (Andalalin) merupakan serangkaian kegiatan kajian mengenai dampak lalu lintas dari pembangunan pusat kegiatan, permukiman dan infrastruktur (Permenhub, 2015), (Munawar, 2009). Andalalin diperlukan untuk meminimalisir ataupun menghilangkan dampak yang akan terjadi pada saat bangunan tersebut dioperasikan (Lestari et al., 2014). Kajian andalalin dikerjakan sebelum dimulai pembangunan atau pra konstruksi (Brash J, Kenneth William. Ogden., Young, W., 2003).

Rencana pembangunan kawasan wisata dan edukasi minapolitan Kota Semarang diperkirakan akan menimbulkan dampak lalu lintas dikawasan sekitar. Konsep minapolitan meliputi area minawisata yang terdiri dari wisata edukasi, rekreasi, dan produksi yang akan berdiri dilahan seluas 62.329 M². Pengembangan kawasan minapolitan kedepan tentunya akan memberikan dampak, baik dari segi teknis, sosial, lingkungan maupun aspek transportasi. Pada aspek

Info Makalah:

Dikirim : 10-09-21;
Revisi 1 : 06-22-21;
Revisi 2 : 07-13-21;
Diterima : 10-19-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-813-9190-0290
e-mail : muhyusuf0431@gmail.com

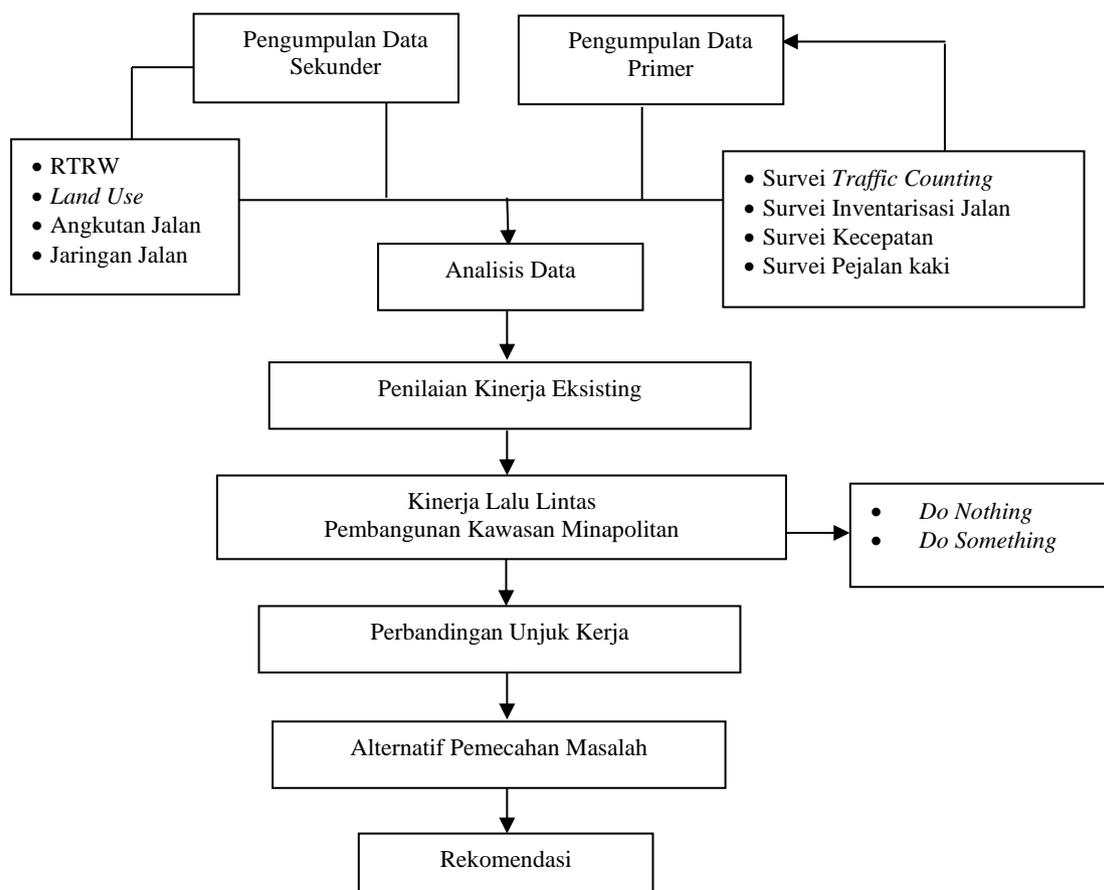
transportasi ini keberadaan bangunan kawasan minapolitan tersebut nantinya akan memberikan penambahan kegiatan terkait bangkitan-tarikan perjalanan baik tahapan konstruksi (peralatan berat, material, mesin-mesin perlatan konstruksi) dan tahapan operasional serta masa paska operasional. Pembangunan suatu kawasan atau lokasi tertentu mempunyai pengaruh terhadap lalu lintas di sekitarnya (Ibad, M. Z., Tamara, 2020).

Adanya pembangunan minapolitan diprediksi akan menimbulkan tarikan dan bangkitan lalu lintas baru, sehingga diperlukan suatu kajian untuk

memprediksi dampak lalu lintas yang akan terjadi. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan memprediksi dampak yang akan terjadi dan memberikan solusi penanganan atau mitigasi dampak sehingga dampak tersebut dapat dihilangkan atau diminimalisir.

2. Metode

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian kualitatif dengan metode survey lapangan. Lokasi penelitian terletak di Jalan Ungaran-Cangkiran (126) Kelurahan Sumurrejo, Kecamatan Gunungpati, Kota Semarang, Jawa Tengah. Jalan tersebut statusnya adalah jalan Provinsi, sehingga kewenangan berada di Dinas Perhubungan Provinsi Jawa Tengah (SK Gubjateng, 2016). Metodologi pekerjaan merupakan kerangka pendekatan pola pikir dalam penyusunan dokumen yang sangat dibutuhkan untuk mengkaji sesuatu sebagai proses dalam penyusunan studi dan untuk mencapai sasaran yang diinginkan (Suryana, 2012). Proses pengolahan data dan analisis data hingga mendapatkan kesimpulan, penyusun menggunakan metode pendekatan sebagaimana terdapat pada bagan alir dengan tahapan-tahapan sebagai berikut.



Gambar 1. Alur Penelitian

Disamping itu juga dilakukan survei-survei primer dalam rangka penyelesaian penelitian Analisis Dampak Lalu Lintas dengan adanya Rencana Pembangunan Kawasan Minapolitan. Adapun survei-survei yang dilakukan meliputi.

Tabel 1. Jenis Survei dan Metodenya

No	Jenis Survei	Metode Survei
1	Survei Inventarisasi	Pengukuran dan pencatatan
2	Survei Pencacahan Lalu Lintas	Penjumlahan kendaraan di ruas jalan dengan counter baik satu arah/dua arah
3	Survei Volume Pergerakan Membelok	Penjumlahan kendaraan di kimpang jalan dengan counter pada saat berbelok
4	Survei Kecepatan dan Hambatan	Pengukuran kecepatan kendaraan dengan menggunakan stop watch dan roll meter
5	Survei Pejalan Kaki	Mencatat jumlah pejalan kaki baik menyusuri maupun menyeberang jalan
6	Survei Parkir	Menghitung kendaraan yang keluar-masuk lokasi proyek

Permodelan dalam transportasi adalah tahapan untuk mendapatkan jumlah permintaan atau pergerakan yang berasal dari suatu zona atau tata guna lahan menuju suatu zona atau tata guna lahan yang lain (Hasibuan et al., 2018), (Molugaram, 2017). Adapun permodelan transportasi yang digunakan terbagi dalam 4 tahapan (O'Flaherty, 1997), (Spraggs, 2000) yaitu:

a) Perkiraan tarikan perjalanan (*trip attraction*) dan Bangkitan Perjalanan (*Trip Generation*)

Tahap awal dari empat tahapan proses pemodelan (*modelling*) ini adalah bangkitan perjalanan (*Trip Generation*) yang di dalam hal ini sesuai dengan kategori tata guna lahan kawasan dipergunakan konsep tarikan perjalanan (*Trip Attraction*). Dengan mengambil asumsi adanya keterkaitan antara intensitas tata guna lahan dengan jumlah perjalanan keluar masuk lokasi, maka dapat ditentukan hubungan matematis yang menggambarkan tingkat tarikan perjalanan ke lokasi tersebut. Pada tahap awal ini dilakukan pengambilan data dengan teknik pencacahan volume lalu lintas terklasifikasi di ruas jalan dan simpang serta mengambil pembandingan tarikan dan bangkitan pada bangunan yang sejenis.

b) Distribusi Perjalanan (*Trip Distribution*)

Trip Distribution pada intinya adalah tahapan untuk mendapatkan matriks asal-tujuan (O-D Matrix, Origin-Destination Matrix) yang akan digunakan dalam proses selanjutnya. Dasar distribusi yang digunakan adalah dengan proses skim, yaitu berupa penentuan minimum path jarak tempuh perjalanan proporsional terhadap intensitas tata guna lahan daerah pengaruh kegiatan ini. Pada tahap ini distribusi perjalanan kendaraan dan orang dalam memilih rute jalan yang dilaluinya di analisis, rute jalan mana saja yang dilewati di lokasi studi.

c) Pemilihan Moda (*Modal Split*)

Dalam melaksanakan tahapan modal split, ada 2 (dua) macam konsep pendekatan, yaitu *Trip End Model* dan *Trip Interchange Modal Split Model*. Dalam studi ini, dipergunakan konsep pendekatan *Trip End Model* untuk membagi total *person trip* menjadi *vehicle trip*. Pemilihan moda digunakan dalam menganalisis jenis kendaraan apa yang akan digunakan dalam perjalanan dari rumah ke tempat kerja dan sebaliknya, sehingga bisa diprediksi kebutuhan akan jenis kendaraan beserta ruang parkir yang tersedia.

d) Pembebanan Perjalanan (*Trip/Traffic Assignment*)

Tahapan terakhir adalah *trip/traffic Assignment*. Tahapan ini mengkaji mengenai pembebanan lalu lintas berdasarkan data input yang diberikan, yaitu data jaringan jalan dan data permintaan lalu lintas. Pembebanan untuk mengetahui prediksi volume lalu lintas yang akan terdistribusi kedalam jaringan jalan pada masa pembangunan sudah selesai dan operasional, sehingga diketahui indek volume di banding kapasitas jalannya.

Setelah itu dilakukan analisis Kinerja Jaringan Jalan dan simpang, dimana kinerja ruas (link) dari suatu jaringan akan sangat berpengaruh pada kinerja jaringan secara keseluruhan (Bent Thagesen, 2018). Parameter yang umum dipakai untuk menentukan kinerja suatu ruas dan simpang antara lain rasio volume dibanding kapasitas (v/c rasio), derajat kejenuhan, kecepatan dan waktu tempuh. Kinerja ruas ini sangat ditentukan dari kondisi ruas itu sendiri, misalnya: jumlah lajur, lebar lajur, hambatan samping (tata guna lahan) pada sisi kiri dan kanan jalan, tundaan dan lain-lain. Untuk analisa dari kondisi ruas jalan akan digunakan prosedur yang ada dalam Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI, 1997). Analisis ini dilakukan untuk mengetahui permasalahan lalu lintas saat ini sebelum dilakukannya pengembangan dan membandingkannya dengan kondisi jika dilakukan pengembangan dan sudah terbangun. Parameter yang dipergunakan adalah dengan mengukur derajat kejenuhan (volume per kapasitas) pada ruas jalan, mengukur derajat kejenuhan dan panjang antrian yang terjadi pada persimpangan dan mengukur kecepatan pada ruas jalan.

3. Hasil dan Pembahasan

Kondisi lalu lintas eksisting terdiri dari beberapa variabel yang sangat diperlukan sebagai tolak ukur menentukan kondisi dasar (*baseline*) dan pelingkupan (*scooping*). Kondisi dasar akan digunakan sebagai bahan dasar untuk hipotesa permasalahan lalu lintas di sekitar kawasan terdampak (Tamin, 2000). Hasil dari analisis ruas jalan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Karakteristik Ruas Jalan Terdampak

No	Ruas Jalan	Tipe	lebar lajur	lebar bahu	pemisah arah	hambatan samping
1	Ungaran - Cangkiran	2/2 UD	7	1	50 - 50	VL
2	Sumurgunung	2/2 UD	6	1	50 - 50	L
3	Moedal 2	2/2 UD	5.4	<0.5	50 - 50	M
4	Koesbiyono Tw	2/2 UD	7	1	50 - 50	M
5	Moedal 1	2/2 UD	5.5	<0.5	50 - 50	M
6	Pringgodani II	2/2 UD	4.6	<0.5	50 - 50	M
7	Moedal Raya	2/2 UD	3	<0.5	50 - 50	M
8	Pramuka	2/2 UD	6	>1	50 - 50	VL

Tabel 3. Kapasitas Ruas Jalan Terdampak

No	Ruas Jalan	Co	FCw	FCsp	FCsf	C (smp/jam)
1	Ungaran - Cangkiran	3000	1	1	0.99	2970.00
2	Sumurgunung	3000	0.91	0.91	0.97	2409.77
3	Moedal 2	3000	0.69	0.94	0.88	1712.30
4	Koesbiyono Tw	3000	1	0.94	0.97	2735.40
5	Moedal 1	3000	0.69	1	0.88	1821.60
6	Pringgodani II	3000	0.69	0.94	0.88	1712.30
7	Moedal Raya	3000	0.69	1	0.88	1821.60
8	Pramuka	3000	0.91	1	0.97	2648.10



Gambar 2. Ruas Jalan Terdampak

Tabel 4. Kinerja Eksisting Ruas Jalan Terdampak

No	Ruas Jalan	Volume smp/jam	Kapasitas (smp/jam)	Kecepatan (km/jam)	V/C ratio	LoS
1	Ungaran - Cangkiran	812,4	2970,00	61	0,274	B
2	Sumurgunung	545,3	2409,77	56	0,226	B
3	Moedal 2	115,8	1712,30	39	0,068	A
4	Koesbiyono Tw	527,2	2735,40	53	0,193	A
5	Moedal 1	16,3	1821,60	29	0,009	A
6	Pringgodani I	123,4	1712,30	29	0,072	A
7	Moedal Raya	54,2	1821,60	38	0,030	A
8	Pramuka	466,2	2648,10	40	0,176	A

Dari analisis kinerja ruas jalan terdampak diatas dapat diketahui bahwa pada saat eksisting sebelum adanya pembangunan minapolitan V/C ratio yang paling besar adalah jalan Ungaran-Cangkiran dengan nilai 0,274 dengan tingkat pelayanan jalan/ *Level of Service* (LoS) pada kisaran B. Secara umum kondisi lalu lintas pada jalan terdampak *relative* baik dan lancar. Kecepatan relatif baik sesuai kelas jalan, namun kontrol terhadap kecepatan pada saat beroperasi Minapolitan sangat diperlukan, mengingat akan menimbulkan tarikan dan bangkitan baik orang dan kendaraan yang besar, sehingga aspek keselamatan perlu diutamakan dan hal ini sejalan dengan penelitian dari (Pramesti & Budiharjo, 2020).

Sedangkan kinerja simpang terdampak pada lokasi studi dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut ini.



Gambar 3. Simpang Terdampak

Tabel 5. Kinerja Eksisting Simpang Terdampak

Nama Simpang	Kode	Nama Ruas Jalan	Q	C	DS	DTI	DG	D	LoS
Simpang Tiga Sumurgunung	T	Ungaran - Cangkiran	1249	3504.30	0.356	4.925	2.262	7.188	B
	B	Ungaran - Cangkiran	1081	3047.22	0.355	4.912	2.258	7.170	B
	S	Sumurgunung	279	2257.20	0.124	3.015	1.634	4.648	A
Simpang Empat Makam Sumurjurag	T	Ungaran - Cangkiran	1162	3763.88	0.309	4.534	2.134	6.667	B
	B	Ungaran - Cangkiran	1008	3151.72	0.320	4.625	2.164	6.789	B
	S	Moedal 2	182	2349.63	0.077	2.636	1.509	4.145	A
	U	Koesbiyono Tw	109	2729.36	0.040	2.328	1.408	3.736	A
Simpang Tiga Moedal	T	Ungaran - Cangkiran	1600	3688.74	0.434	5.560	2.471	8.031	B
	B	Ungaran - Cangkiran	1592	3207.60	0.496	6.074	2.640	8.714	B
	S	Moedal 1	22	2257.20	0.010	2.080	1.326	3.406	A
Simpang Empat Alfamaret Sumurgunung	T	Ungaran - Cangkiran	1586	3763.88	0.421	5.459	2.438	7.896	B
	B	Ungaran - Cangkiran	1558	3151.72	0.494	6.057	2.635	8.692	B
	S	Moedal 2	32	2349.63	0.014	2.112	1.337	3.449	A
	U	Koesbiyono Tw	67	2729.36	0.025	2.201	1.366	3.568	A
Simpang Tiga SMPN 24	T	Ungaran - Cangkiran	1593	4009.50	0.397	5.261	2.373	7.634	B
	B	Ungaran - Cangkiran	2288	4009.50	0.571	6.684	2.841	9.524	B
	U	Pramuka	377	2257.20	0.167	3.371	1.751	5.122	A

Simpang terdampak pada kondisi eksisting sebelum ada pembangunan relatif kinerjanya masih baik, LoS nya pada kisaran A dan B. Seluruh simpang terdampak merupakan simpang prioritas yang tidak diatur oleh sinyal lampu lalu lintas. Tarikan dan bangkitan perjalanan dilakukan analisis dengan metode membandingkan bangunan yang serupa. Bangunan yang serupa yaitu Wisata Ngrembel Asri yang terletak di Kota Semarang. Dari hasil perhitungan perbandingan model serupa diperoleh *trip rate* tarikan sebesar 0,0020 kendaraan/jam untuk motor dan sebesar 0,0017 kendaraan/jam untuk mobil. Sedangkan *trip rate* bangkitan sebesar 0,0019 kendaraan/jam untuk motor dan sebesar 0,0018 kendaraan/jam untuk mobil. Setelah itu dikonversikan kedalam luasan wilayah minapolitan didapatkan hasil tarikan perjalanan total sebesar 103,31 smp/jam dan bangkitan perjalanan sebesar 102,82 smp/jam seperti ditampilkan pada table berikut ini.

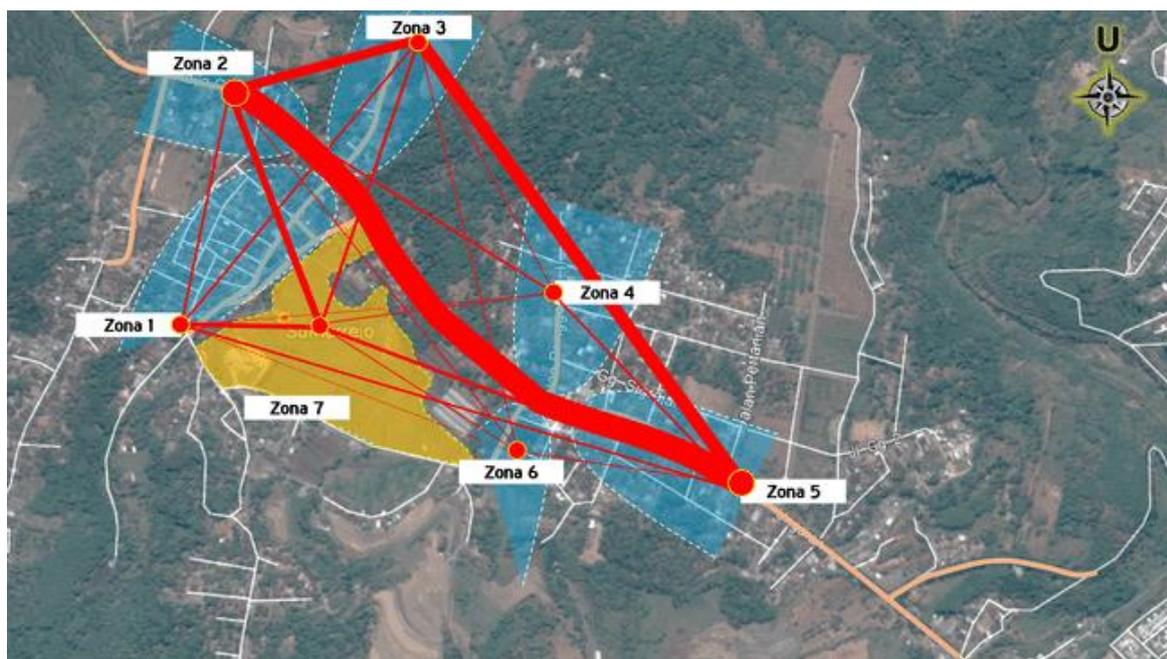
Tabel 6. Prediksi Bangkitan dan Tarikan Perjalanan

Nama Wisata	Luas (m ²)	Tarikan		Bangkitan	
		Motor	Mobil	Motor	Mobil
Wisata Ngrembel Asri	33.371	Kend/jam		Kend/jam	
		68	57	62	59
<i>Trip rate</i>		0.0020	0.0017	0.0019	0.0018
Wisata Minapolitan	40.946	Kend/jam		Kend/jam	
		83.44	69.94	76.07	72.39
		Smp/jam		Smp/jam	
		33.37	69.94	30.43	72.39
Prediksi Bangkitan Tarikan Minapolitan		103.31		102.82	

Tabel 7. Matrik Asal dan Tujuan Perjalanan

OD	1	2	3	4	5	6	7	Pi
1	0	9.6	16.2	1.4	10.2	2	27.9	67.3
2	13.2	0	109	2.8	526.2	0.8	25.8	677.8
3	9	95.1	0	2	311.4	1	32.5	451
4	1.2	20.2	4.4	0	3.5	0.4	1.8	31.5
5	2	706.2	124.5	8.4	0	4.4	12.3	857.8
6	4.8	4.2	3.2	0	3.2	0	5	20.4
7	28.3	18.5	7.2	6.2	38.4	5.8	0	104.4
Aj	58.5	853.8	264.5	20.8	892.9	14.4	105.3	2210.2

Matrik Asal tujuan (MAT) diperoleh dari hasil survei pencacahan lalu lintas di ruas dan di simpang. Untuk memudahkan dalam kajian perjalanan perlu dibuat zona. Pembagian zona dilokasi studi dilakukan dengan metode sehomogen mungkin dengan karakteristik yang serupa (R. E. Wibisono, 2020). Zona kajian dibagi menjadi 7 dengan tetap mempertimbangan kaidah pembagian zona. Hasil MAT diperoleh bahwa perjalanan paling tinggi adalah dari zona 5 ke 2 dan sebaliknya, artinya jalan Ungaran-Cangkiran merupakan jalan dengan tingkat pembebanan yang paling tinggi. Semakin tipis garis mengindikasikan semakin kecil perjalanan di ruas jalan tersebut, sebaliknya semakin tebal mengindikasikan semakin banyak perjalanan di ruas jalan tersebut. Garis keinginan perjalanan (*desire line*) dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4. Garis Keinginan Perjalanan

Tabel 8. Perbandingan Kinerja Lalu Lintas

No	Nama Jalan	Simulasi Kinerja											
		Konstruksi 2021 - 2022				Operasional 2023				Tahun Rencana 2028			
		<i>Do Something</i>		<i>Do Nothing</i>		<i>Do Something</i>		<i>Do Nothing</i>		<i>Do Something</i>		<i>Do Nothing</i>	
		v/c r	LoS	v/c r	LoS	v/c r	LoS	v/c r	LoS	v/c r	LoS	v/c r	LoS
1	Ungaran – Cangkiran	0,307	B	0,290	B	0,385	B	0,326	B	0,495	C	0,436	B
2	Sumurgunung	0,240	B	0,240	B	0,342	B	0,270	B	0,433	B	0,361	B
3	Moedal 2	0,072	A	0,072	A	0,183	A	0,081	A	0,210	B	0,108	A
4	Koesbiyono Tw	0,214	B	0,204	B	0,293	B	0,230	B	0,371	B	0,307	B
5	Moedal 1	0,009	A	0,009	A	0,107	A	0,011	A	0,110	A	0,014	A
6	Pringgodani II	0,076	A	0,076	A	0,188	A	0,086	A	0,217	B	0,115	A
7	Moedal Raya	0,032	A	0,032	A	0,131	A	0,035	A	0,143	A	0,047	A
8	Pramuka	0,187	A	0,187	A	0,276	B	0,210	B	0,347	B	0,281	B

Tabel 9. Perbandingan Kinerja Lalu Lintas Simpang

No	Nama Simpang	Kaki Simpang	Konstruksi 2021 - 2022		Operasional 2023		Tahun Rencan 2028	
			D	LoS	D	LoS	D	LoS
1	Simpang Tiga Tak Bersinyal Sumurgunung	Ungaran – Cangkiran (T)	7.430	B	7.508	B	7.585	B
		Ungaran – Cangkiran (B)	7.448		7.538		7.564	
		Sumurgunung (S)	4.738		4.745		4.648	
2	Simpang Empat Tak Bersinyal Makam Sumurjurang	Ungaran – Cangkiran (T)	6.893	B	6.966	B	7.678	B
		Ungaran – Cangkiran (B)	7.058		7.145		7.835	
		Moedal 2 (S)	4.178		4.270		4.398	
		Koesbiyono Tw (U)	3.846		3.925		3.866	
3	Simpang Tiga Tak Bersinyal Moedal 1	Ungaran – Cangkiran (T)	8.261	B	8.336	B	9.313	B
		Ungaran – Cangkiran (B)	8.978		9.064		10.129	
		Moedal 1 (S)	2.182		3.588		3.618	
4	Simpang Empat Tak Bersinyal Alfamaret	Ungaran – Cangkiran (T)	8.122	B	8.195	B	9.275	B
		Ungaran – Cangkiran (B)	8.961		9.049		10.310	
		Moedal Raya (S)	3.475		3.482		3.493	
		Pringgodani I (U)	3.593		3.609		3.648	
5	Simpang Tiga Tak Bersinyal SMPN 24	Ungaran – Cangkiran (T)	7.845	B	7.914	B	15.813	C
		Ungaran – Cangkiran (B)	9.736		9.805		16.657	
		Pramuka (U)	3.427		5.246		6.094	

Dari hasil perbandingan kinerja baik ruas dan simpang pada tabel 8 dan 9 diatas dapat diketahui bahwa kinerja ruas jalan terdampak dari mulai masa konstruksi (tahun 2021-2022), masa operasional (2023) sampai masa 5 tahun paska operasional (2028) terdapat perbedaan antara dilakukan pembangunan (*do something*) dan tidak dilakukan pembangunan (*do nothing*). Namun pada prediksi pada tahun rencana (2028) terdapat kinerja ruas yang sudah pada level kritis C, yaitu ruas jalan Ungaran-Cangkiran dan simpang tak bersinyal SMPN 24. oleh karena itu diperlukan mitigasi dampak supaya kinerjanya menjadi optimal. Dampak lalu lintas tidak akan terjadi secara signifikan apabila langkah mitigasi telah dilakukan dan diimplementasikan dengan memperhatikan langkah-langkah manajemen dan rekayasa lalu lintas dan prosedur yang tepat (Combs et al., 2020) dan hal ini sejalan dengan penelitian dari. (Budiharjo et al., 2021) yang menyebutkan bahwa implementasi manajemen dan rekayasa lalu lintas yang tepat dan terukur akan meningkatkan kinerja jalan menjadi baik.

Tabel 10. Perhitungan Kapasitas Parkir Kendaraan

Nama Wisata	Kebutuhan Ruang Parkir	
	Sepeda Motor	Mobil
Ngrembel Asri	135	159
<i>Prosentase</i>	<i>0.46</i>	<i>0.54</i>
Minapolitan (<i>koefisien 1.23</i>)	166	195
Pengelola	164	6
Kendaraan operasional	-	5
Total Kebutuhan Parkir Minapolitan	330	206

Tabel 11. Analisis Kebutuhan Pejalan Kaki

Waktu	Volume	
	Pejalan Kaki (org/jam)	Kendaraan (kend./jam)
weekend	19	1.257
weekday	24	3.174
Rata-rata	21.5	2.215,5

Hasil dari perhitungan kapasitas parkir seperti ditunjukkan pada tabel 10 diatas dapat diketahui bahwa koefisien yang didapatkan dari lokasi pembandingan (Ngrembel Asri) adalah 1,23. Sehingga untuk menghitung kebutuhan lahan parkir untuk mobil dan motor di lokasi minapolitan didapatkan kebutuhan sebanyak 330 satuan ruang parkir (SRP) untuk sepeda motor dan sebanyak 206 SRP untuk mobil.

Sedangkan untuk menentukan jenis fasilitas penyeberangan bagi pejalan kaki, sesuai tabel 11 diatas ditentukan dari nilai $P.V^2$. Nilai PV^2 yang didapatkan adalah sebesar $21,5 \times 2.215,5^2$ dimana P (penyeberang) = 21,5 orang/jam dan V (volume lalu lintas) = 2.215,5 kend./jam. Berdasarkan hasil tersebut rekomendasi untuk fasilitas penyeberang jalan yaitu adalah zebra cross, dan untuk lebih aman dilengkapi dengan *warning light* dan petugas pengatur lalu lintas. Oleh karena itu dalam perencanaan suatu kawasan baru harus memperhatikan juga aspek fasilitas pejalan kaki, demi terciptanya keselamatan dan kelancaran lalu lintas seperti dalam penelitian milik (Hasibuan et al., 2018).

Tabel 12. Matrik Mitigasi Dampak Masa Konstruksi

No	Permasalahan dan Dampak	Aksi Mitigasi
1	Aktivitas keluar masuk kendaraan proyek dapat menimbulkan kemacetan	<ul style="list-style-type: none"> Menyediakan dan Memasang perlengkapan jalan di jalan terdampak Menyediakan petugas pengatur lalu lintas di pintu masuk
2	Keselamatan dan Kesehatan Pekerja Proyek	<ul style="list-style-type: none"> Menyediakan dan memasang rambu-rambu maupun keterangan mengenai K3 di sekitar kawasan pembangunan Pekerja proyek wajib memakai APD pada saat bekerja Kontraktor wajib memasang rambu-rambu K3 di area proyek Memisahkan antara pergerakan kendaraan dengan manusia di area proyek dengan barrier atau yang lainnya. Mematuhi regulasi K3 dan jam kerja yang telah ditetapkan
3	Pengangkutan material proyek dapat menimbulkan kerusakan jalan	<ul style="list-style-type: none"> Melarang kendaraan pengangkut material yang over dimension dan over loading (ODOL) Kendaraan melalui kelas jalan yang telah ditentukan Pengemudi mempunyai Surat Izin Mengemudi (SIM) yang sesuai dengan jenis kendaraannya Pengembang wajib membersihkan dan menempatkan petugas pembersih cecceran material di jalan dalam radius 20-meter dari pintu masuk Kendaraan pengangkut material wajib mematuhi peraturan tata cara pengangkutan Menyediakan water trap untuk kebersihan roda kendaraan Pemrakarsa wajib melakukan perbaikan jalan rusak yang diakibatkan oleh aktivitas dari kendaraan proyek

Tabel 13. Matrik Mitigasi Masa Operasional

No	Permasalahan dan Dampak	Aksi Mitigasi
1	Aktivitas keluar masuk kendaraan pengunjung dan pegawai dapat menimbulkan kemacetan	<ul style="list-style-type: none"> Menyediakan dan Memasang perlengkapan jalan di jalan terdampak Menyediakan petugas pengatur lalu lintas di pintu masuk
2	Akses pintu utama	<ul style="list-style-type: none"> Radius putar minimal 14 meter Pekerja proyek wajib memakai APD pada saat bekerja Kontraktor wajib memasang rambu-rambu K3 di area proyek Memisahkan antara pergerakan kendaraan dengan manusia di area proyek dengan barrier atau yang lainnya. Mematuhi regulasi K3 dan jam kerja yang telah ditetapkan
3	Pedagang di sekitar pintu masuk dan aktivitas parkir di pinggir jalan disekitar pintu masuk	<ul style="list-style-type: none"> Melarang pedagang jualan di pinggir jalan disekitar pintu masuk Melarang parkir di pinggir jalan disekitar pintu masuk Memasang rambu larangan parkir dan berhenti serta papan himbuan larangan berjualan disekitar pintu masuk
4	Parkir Kendaraan internal	<ul style="list-style-type: none"> Menyediakan lokasi parkir untuk motor sebanyak 330 SRP, mobil 206 SRP Pemasangan rambu lokasi parkir
5	Konflik lalu lintas internal dan eksternal	<ul style="list-style-type: none"> Penataan sirkulasi kendaraan dan pejalan kaki secara terpisah Memasang rambu-rambu dan marka jalan
6	Keamanan asset dan kondisi darurat	<ul style="list-style-type: none"> Memasang CCTV di titik-titik tertentu pada masing-masing zona di Kawasan Minapolitan Mengaktifkan piket penjagaan untuk keamanan dalam Memasang dan menempatkan APAR di titik-titik tertentu Membuat SOP penanganan darurat/ emergency response di masing-masing gedung Memasang rambu dan area titik kumpul pada kondisi darurat
7	Ruas jalan dan simpang terdampak	<ul style="list-style-type: none"> mengusulkan pelebaran jalan pada tahun 2028 perambuan dan pemarkaan ulang

Kesimpulan

Pembangunan minapolitan akan berdampak signifikan terhadap kinerja jaringan jalan di kawasan sekitarnya pada tahun 2028, khususnya jalan Ungaran-Cangkiran dengan nilai V/C Rasionya paling tinggi sebesar 0,495 dengan tingkat pelayanan jalan (LoS) kategori C. Penyediaan lahan parkir juga harus diperhatikan mengingat hasil analisis memprediksi adanya tarikan sebesar 103,31 smp/jam dan bangkitan sebesar 102,82 smp/jam pada masa operasional, sehingga diperlukan ruang parkir untuk roda 2 (motor) sebesar 330 satuan ruang parkir/jam (SRP/jam) dan roda 4 atau lebih (mobil) sebesar sebesar 206 SRP/jam. Fasilitas pejalan kaki juga harus diperhatikan untuk kenyamanan dan keselamatan pengunjung. Secara umum dampak lalu lintas pembangunan pada masa konstruksi dan operasional dapat dilakukan pengendalian dan mitigasi dampak, sehingga selama masa konstruksi maupun operasional minapolitan dapat diminimalisir dampak yang akan terjadi dan diharapkan tercipta kondisi lalu lintas di kawasan minapolitan yang lancar dan tertib. Disarankan agar dalam membangun suatu kawasan baru harus memperhatikan dan terintegrasi dengan jaringan dan fasilitas transportasi, sehingga tercipta kelancaran dan kenyamanan berlalu lintas serta dapat dipenuhi rekomendasi mitigasinya, sehingga permasalahan dan dampak lalu lintas yang akan terjadi dapat diminimalisir dan dihilangkan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kepada semua pihak yang turut membantu penelitian ini khususnya di Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pancasakti (UPS) Tegal, Jawa Tengah.

Daftar Pustaka

- Bent Thagesen. (2018). Highway and Traffic Engineering in Developing Countries. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Brash J, Kenneth William. Ogden., Young, W., S. T. (2003). Traffic engineering and management. *Institute of Transport Studies, Dept. of Civil Engineering, Monash University*.
- Budiharjo, A., Sahri, A., & Purwanto, E. (2021). Kajian Manajemen Lalu Lintas Kawasan Central Business District (CBD) di Kota Tegal. *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan (Indonesian Journal of Road Safety)*, 8(1), 38–

52. <https://doi.org/10.46447/ktj.v8i1.291>
- Combs, T. S., McDonald, N. C., & Leimenstoll, W. (2020). Evolution in Local Traffic Impact Assessment Practices. *Journal of Planning Education and Research*, January. <https://doi.org/10.1177/0739456X20908928>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (1997). Manual Kapasitas Jalan Indonesia, 1997. In *Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI)* (Vol. 1, Issue I). <https://doi.org/10.1021/acsami.7b07816>
- Hasibuan, H. S., Harmain, R., Berkademi, W., & Sari, I. P. (2018). Daya Dukung Kawasan Transit Oriented Development Di Lebak Bulus Provinsi Dki Jakarta. *Jurnal Plano Madani*, 7, 174–184.
- Ibad, M. Z., Tamara, A. (2020). Pengaruh Kawasan Pendidikan Tinggi Terhadap Lalu Lintas Kota Bandar Lampung. 9(April), 56–63.
- Lestari, F. A., Teknik, A., Universitas, S., Belitung, B., Apriyani, Y., Pengajar, S., Teknik, J., Universitas, S., & Belitung, B. (2014). *Analisis Dampak Lalu Lintas Akibat Adanya Pusat. 2.*
- Molugaram, K. (2017). Road Side Interview (RSI) Technique for calculation of Traffic growth rates at Micro level. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 12(2012), 556–564. <https://doi.org/10.11175/easts.12.556>
- Munawar, A. (2009). Analisis Dampak Lalulintas Pembangunan Pusat Perbelanjaan: Studi Kasus Plaza Ambarukmo. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 1(1), 27–37. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol1.iss1.art2>
- O'Flaherty, C. A. (1997). Transport Planning and Traffic Engineering. In *Transport Planning and Traffic Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-034066279-3/50008-6>
- Oktinova, N., & Rudiarto, I. (2019). Kajian Penggunaan Lahan Di Sekitar Kawasan Bukit Semarang Baru. *Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota*, 15(4), 262. <https://doi.org/10.14710/pwk.v15i4.21534>
- Permenhub 75 Tentang Penyelenggaraan Analisis Dampak Lalu Lintas, 2015.
- Pramesti, Y. T., & Budiharjo, A. (2020). Efektivitas Rambu Batas Kecepatan di Jalan Kolektor. *Jurnal Teknik*, 18(2), 73–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.37031/jt.v18i2.98>
- Prof. Dr. Suryana, Ms. (2012). Metodologi Penelitian : Metodologi Penelitian Model Praktis Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif. *Universitas Pendidikan Indonesia*, 1–243. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Purwanto, D. (2015). Pengelolaan Transportasi Berwawasan Lingkungan Sebagai Dampak Perkembangan Perkotaan Tak Terkendali (Studi Kasus Kota Semarang). *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 20(1), 93–101. <https://doi.org/10.14710/mkts.v20i1.9250>
- R. E. Wibisono. (2020). Analisa Dampak Lalu Lintas Jalan Tambak Osowilangun Akibat Pembangunan Teluk Lamong Surabaya. *U KaRsT*, 4(1), 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.12.002.A>
- SK Gubjateng Tentang Penetapan Status Ruas Jalan Sebagai Jalan Provinsi Jawa Tengah, 2016, 53 1689 (2016).
- Spraggs, S. (2000). Traffic engineering. In *BT Technology Journal* (Vol. 18, Issue 3). <https://doi.org/10.1023/A:1026701215511>
- Sumajouw, J., Sompie, B., & Timboeleng, J. (2013). Analisis Dampak Lalu Lintas (Andalalin) Kawasan Kampus Universitas Sam Ratulangi. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 3(2), 98676.
- Tamin, O. Z. (2000). Perencanaan dan Pemodelan Transportasi. In *Perencanaan dan pemodelan transportasi*.

The Effect of w/c Ratio of Compacted Bored Pile to Friction Resistance of Unjani Clay

Agus Sulaeman¹, Muhamad Agung² and Regi Fasya Septrian³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

¹agussulaeman@lecture.unjani.ac.id, ²magunghermawanputra@gmail.com, ³regifasyaseptrian12@gmail.com

Abstract

The small scale physical model of drum type was set-up to obtain the effect of water cement ratio (w/c) to pile capacity and original soil. The simulation of the process of providing bored piles model, soils model, installation and tests (pile loading tests and direct shear tests) under different water cement ratio of mortar and various moisture content of clay were done. The results reveal that the higher water content of original clay the bigger friction resistance, α value as clay soil is softer and the optimum w/c-ratio (w/c = 0,4) provides more pile capacity. It is understandable that water plays an important role, contributes to the change of surrounding clay properties. The improvement of S_u ($\pm 75\%$ increase) due to compaction of concrete in bored pile, migration of moisture and reaction with surrounding clay leads to take benefit of design and construction of bored pile in clay soil for the sake of efficiency and stability.

Keywords: Compaction pile, undrained shear strength, water-cement ratio, bored pile

1. Introduction

In order to get a positive effect during installation of bored pile, any type of pile is expected to provide parameters which can behave as stabilizer either on short or long term condition. In the current practice of deep foundation technology, there are some methods of ground improvement pile as mentioned by Apageo, S.V (2016): Ground Improvement with and without admixtures, Ground Improvement with inclusions, Ground Improvement with grouting and Earth reinforcement. The improvement effect during installation of pile to bearing capacity of pile on sandy soil is clearly mentioned in many literatures compared to the effect of improvement on pile installation in clay soil.

To change non displacement pile become displacement type, the surrounding soil should move horizontally by any means. Compaction is one of the ways to displace soil horizontally. At the process of compacting concrete, soil pressure will increase then the change of parameters occur after consolidation is allowed as described by Zhu, Y (2016).

The ultimate capacity Q_u of displacement/drilled pile is shown in eq 1,

$$Q_u = Q_p + Q_f \quad (1)$$

The standard formula for point resistance, $Q_p = 9 A_p C_u$ and skin resistance, $Q_f = p L \alpha C_u$ as described eq (2).

$$Q_u = A_p 9 C_u + p L \alpha C_u \quad (2)$$

Based on explanation by Das, B.M (2008) the value of adhesion factor, α normally in the range of 0,3 to 0,8 of undrained shear strength, S_u . However, some reported slightly less than 0,6 for top margin.

By the improvement, the impact of improved sub-soil can be as high as two fold to original shear strength even some reported higher. As mentioned in eq. 3, S_u value can increase significantly after grouting as elaborated by (Hung, J. L, 2006).

$$\left\{ \frac{S_{u-r}}{S_u} \right\} \max = 1 + \frac{2S_u}{\sigma'_p} \ln(0,5\sqrt{I_r}) \quad (3)$$

In the process of installing a bored pile leads to increase of pressure in the vicinity of piles. At first, the parameters of soil will softening, recovery and after that regain the properties to go up. The phenomena of soil stabilization in this methods are very close to the concept of lateral displacement of material which causes change their structure. Clayton, R. I. and Milititsky, M. (1983) added that the installation of this type of compaction pile will result in a large radial displacement in the surrounding soil and non-uniformly distributed excess pore water pressure (pwp) inside the soil also. If sufficient time is allowed for the excess pore water pressure to dissipate, shear strength increase in the surrounding soil is expected.

Majority the causes of improvement in this category closely related with moisture migration, Since either concrete or grouted concrete made of cast-in-place concrete, a certain amount of water will migrate into the surrounding soil from the fresh concrete. The amount of water that migrates between concrete and soil is not well known. Meyerhof and Murdock and Skempton, who studied bored piles in London Clay, concluded that the water migrated from fresh concrete into the surrounding soil to a distance of 2,5 to 3 inches. Meyerhof found that the

Info Makalah:

Dikirim : 05-07-21;
Revisi 1 : 05-23-21;
Revisi 2 : 06-16-21;
Diterima : 06-25-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-812-2040-2545
e-mail : agussulaeman@lecture.unjani.ac.id

water migration caused the clay next to the pile wall to have a moisture content from 6 to 7 percent higher than the original moisture content for London Clay. Skempton found further that the increase of water content in the soil surrounding the shaft caused a decrease in the soil strength along the shaft surface.

The nature of moisture migration from cement mortar to soil is a complex problem. Described by Narong, T, et al. (2000) that the influence of factors which affect moisture migration can be studied separately, but the analysis of the relationship of multiple factors to moisture migration is still an intricate problem. However, it can be concluded that the degree of moisture migration between cement mortar and soil is greatly affected by (1) void ratio, (2) initial moisture content, (3) water-cement ratio, and (4) other variables such as temperature, type of cement, hydraulic pressure, and time.

Water-cement ratio is the one to contribute in moisture migration, it is the ratio of the weight of water to the weight of cement used in a concrete mix. A lower ratio leads to higher strength and durability, but may make the mix difficult to work with and to form. Workability can be resolved with the use of plasticizers or super-plasticizers. At high w/c ratio, the strength decreases as the nature of concrete mix was clearly mentioned by Hoque, M.I and Alamgir, M (2014).

Concrete hardens as a result of the chemical reaction between cement and water (known as hydration, this produces heat and is called the heat of hydration) was mentioned by Zhu, Y (2016). For every pound (or kilogram or any unit of weight) of cement, about 0,35 pounds (or 0,16 kg or corresponding unit) of water is needed to fully complete hydration reactions. However, a mix with a ratio of 0,35 may not mix thoroughly, and may not flow well enough to be placed. More water is therefore used than is technically necessary to react with cement. Water-cement ratios of 0,45 to 0,60 are more typically used. For higher-strength concrete, lower ratios are used, along with a plasticizer to increase flowability. Too much water will result in segregation of the sand and aggregate components from the cement paste. Also, water that is not consumed by the hydration reaction may leave concrete as it hardens, resulting in microscopic pores (bleeding) that will reduce final strength of concrete. A mix with too much water will experience more shrinkage as excess water leaves, resulting in internal cracks and visible fractures (particularly around inside corners), which again will reduce the final strength as mentioned by Briaud, J. L (1987).

The main purpose of this research is to observe the behavior of various water content of clay in the installation of bored pile as well as observation into various cement ratio of concrete mortar in the process of installation with compaction effort. Performed in the small scale model as shown in Figure1, the amount of increasing S_u at original clay should be compared to S_u after treatment in order to obtain the efficacy of this method.

2. Method

Small scale physical modelling consist of 1-gravity simulation and enhanced gravity simulation (centrifugal physical modelling) to simulate geotechnical case. In the condition where the full scale prototype of model is intended to be scaled down, it needs scaling factor law, however, it doesn't need scaling factors when full scale prototype is similar size with small scale model was described by Sulaeman, A, et.al (2015). In this research, the latter condition was selected.

The works consists of setting up the model tank, sample preparation, simulation of bored pile, loading test and direct shear test, the work was done as follow:

1. Set-up a model tank

The model tank was set up as shown in Figure 1, consist of drum in half cut equipped with steel frame and other appurtenances then furnished with necessary instrumentations: settlement gauge and loading gauge.

2. Determination of properties of original clay

Original clay was taken from clay soil 1 to 2 m depth in the Unjani area, Particle size distribution analysis and Atterberg limit test was performed as well as other engineering properties.

3. Simulation of bored pile installation

After first soil model condition finished, the simulation of drilling a hole to simulate drilling process was initiated before installing pile model. At the same time, the bored pile model (8 nos.) under various water cement ratio were prepared. In the process of making concrete in a bored hole, each piles should be compacted 10 blows by suitable hammer.

4. Pile loading test in small scale

At the first condition of modeled soil, the PLT to obtain L-S curve were performed to each piles. The second, third and fourth soil model were also prepared subsequently, followed by PLT to each piles.

5. Direct shear test in full scale

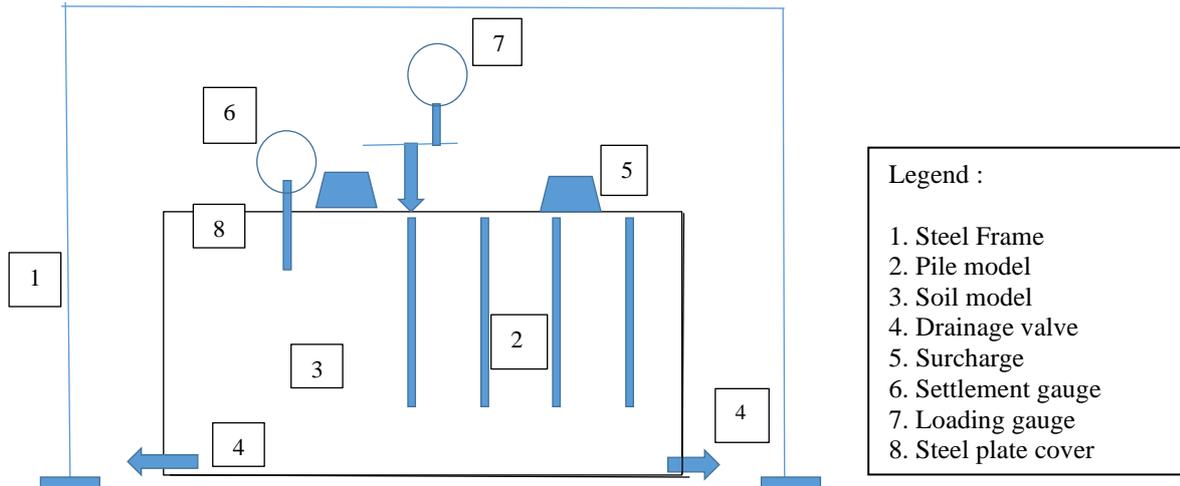


Figure 1. Schematic Diagram of Drum model (ot to scale)

The planned of small scale model in the drum type as shown in the Figure 1 was then materialized. Numbers of pile models as well as clay soil which excavated from nearby Unjani area was selected. The necessary instrumentations to support simulation was then calibrated before performing real test to obtain an accuracy of the results. Figure 2 shows the simulation of pile loading test was being carried out for soil condition of LI-1. The test consist of applying load gradually while at the same time, the settlement in dial gauge is recorded every 30 seconds until the pile is considered failure (pile settlement reach 10 % pile diameter).



Figure 2. Pile loading test was being carried out

The soil condition of LI-2 was then prepared by application of loading on top of clay soil which was consolidated 3 days as shown in the Figure 3. As of LI-2, to obtain the various clay condition LI-3, similar treatment was done. In this step, the water was allowed to drain in a similar 3 days of loading to achieve different properties with LI-1.



Figure 3. During Loading and Consolidation

At LI-2 condition, the following similar step with LI-1 was being performed. Subsequently, the similar steps were also done to LI-3. The next stage of this work, was performing direct shear test to 3 type of soil LI-1, LI-2 and LI-3 by using 5 type of sample conditions:

- a) Soil – soil
- b) Soil – mortar with w/c-1
- c) Soil – mortar with w/c-2
- d) Soil – mortar with w/c-3
- e) Soil – mortar with w/c-4

The schematic diagram of DST to Soil – mortar with various w/c was shown in the Figure 4, the ordinary DST was also being tested as a standard. Figure 5 shows the preparation in making the sample of soil-mortar specimen.

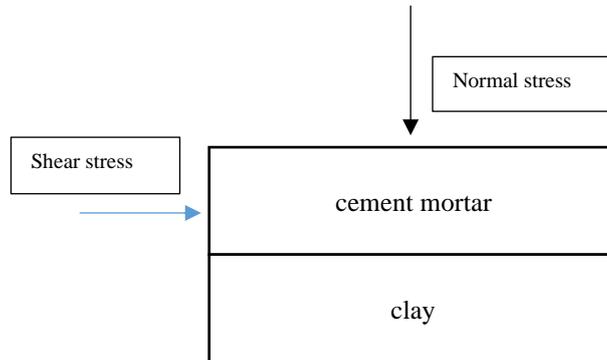


Figure 4. Schematic Diagram of DST on Interface Cement Mortar – lay

The DST to the various specimen of all soil-soil and soil with various w/c ratio of mortar is intended to follow the simulation of correspond condition with LI and w/c condition during pile loading test. The matching soil condition was needed to obtain correct simulation of PLT and DST at various LI-1, LI-2 and LI-3 under various w/c of mortar as representation of the nature of concrete material in PLT and DST.



Figure 5. Preparing a DST material

3. Data collection, Analysis and Discussion

3.1 Data collection and Analysis

In every site investigation to obtain the comprehensive properties of original soil, the physical properties is normally highlighted in advance. The parameters of soil at UNJANI area:

Liquid Limit = 140; Plastic Limit = 48; Plasticity Index = 92 Classified as CH. q_u from UCT = 7,6 kPa leads to $S_u = 3,8$ kPa. Liquidity index, LI-1 obtained from $\{(82 - 48)/92\} \times 100 \% = 37 \% = 0,37$ and subsequently LI-2 and LI-3 can be calculated accordingly.

The properties of pile model was: Diameter (D) of drilled pile model = 2,2 cm; the length of model pile (L_p)= 11,5 cm; L_p/D ratio = $115/22 = 5,2$

Shown in table 1 was soil model at various moisture content and various modelled pile at different w/c ratio to be further used for observation during installation and tests.

Table 1. Data for further soil modelling

	Water to cement ratio
w1 = 82 % LI-1 = 0,37	Water to cement ratio 1 = 0,35
	Water to cement ratio 2 = 0,51
	Water to cement ratio 3 = 0,72
	Water to cement ratio 4 = 0,91
w2 = 61 % LI-2 = 0,14	Water to cement ratio 1 = 0,35
	Water to cement ratio 2 = 0,51
	Water to cement ratio 3 = 0,72
	Water to cement ratio 4 = 0,91
w3 = 54 % LI-3 = 0,07	Water to cement ratio 1 = 0,35
	Water to cement ratio 2 = 0,51
	Water to cement ratio 3 = 0,72
	Water to cement ratio 4 = 0,91

The capacity of pile is normally can be obtained from plotted load versus settlement, interpretation to predict the ultimate capacity from that curves can adopt the Terzaghi method. The L-S curve of 3 days curing period were plotted in the Figure 6, Figure 7 and Figure 8. The curves show that failure occur on 8 – 10 % of D. At the water to cement ratio of 0,40 the ultimate capability is maximum, as it can be elaborated that in small water cement ratio, the migration of water from mortar to clay is considered small, this condition is also agreeable with Hung, J. L (2006).

According to Hung, J.L (2006) 10 nos. of blow given to any piles is significant energy to increase the parameters of clay and it can be recorded on the investigations in the process of installing pile model. For high water cement ratio, there are some amount of water from cement mortar moves out resulting to decrease the properties , due to high portion of water in the cement mortar inducing cement to move then mix with surrounding clay. It can be observed the curves almost coincide each other, start at initial point O, the curves gradually rise linearly then bends until reaching ultimate capacity. The test can be regarded as reaching failure as pile settlement value around 10 % pile diameter (around 2 mm) as shown in Figure 6, 7 and 8.

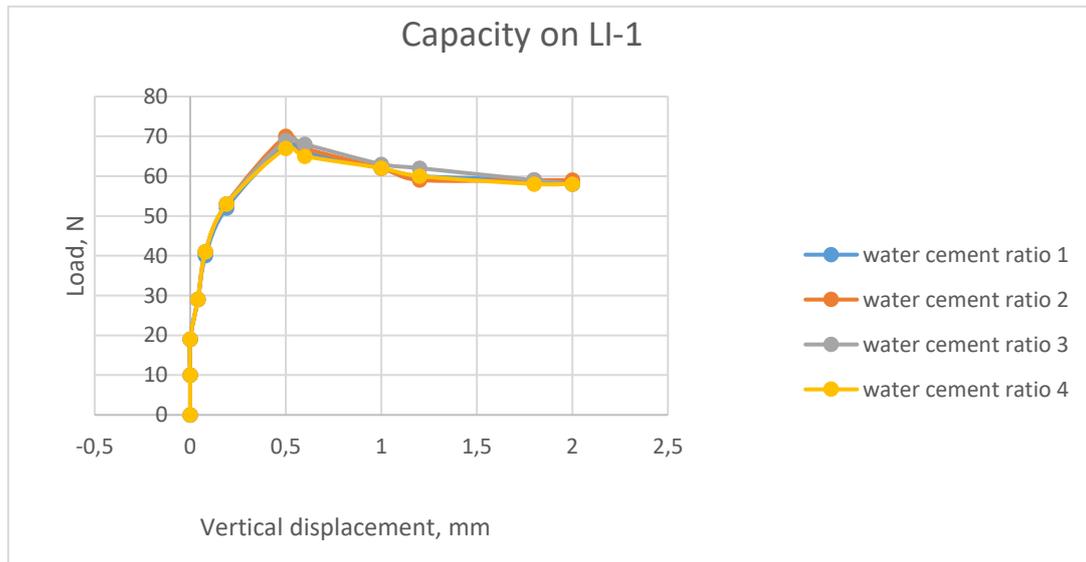


Figure 6 L-S Curve of PLT on LI-1 at Various w/c Ratio at 3 Days Curing

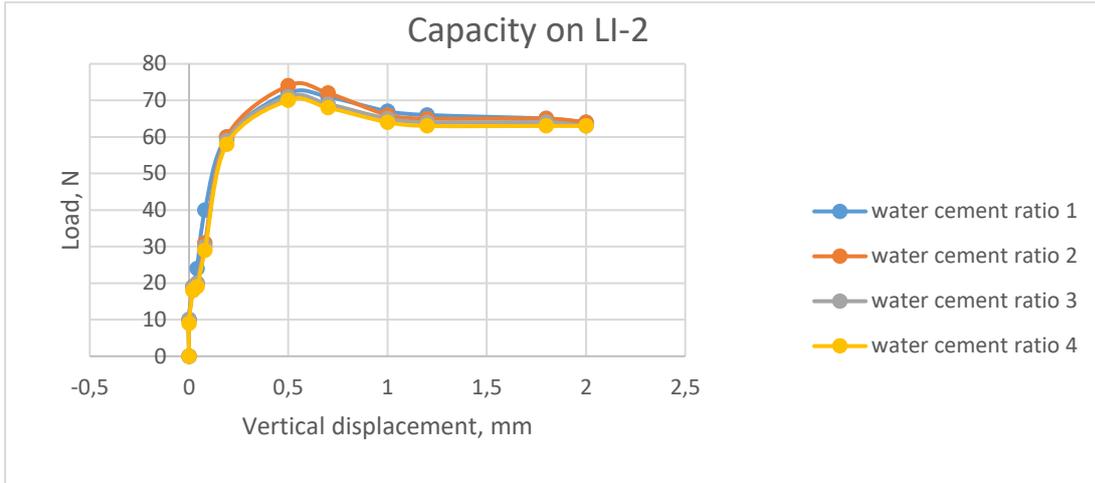


Figure 7. L-S Curve of PLT on LI-2 at Various w/c Ratio at 3 Days Curing

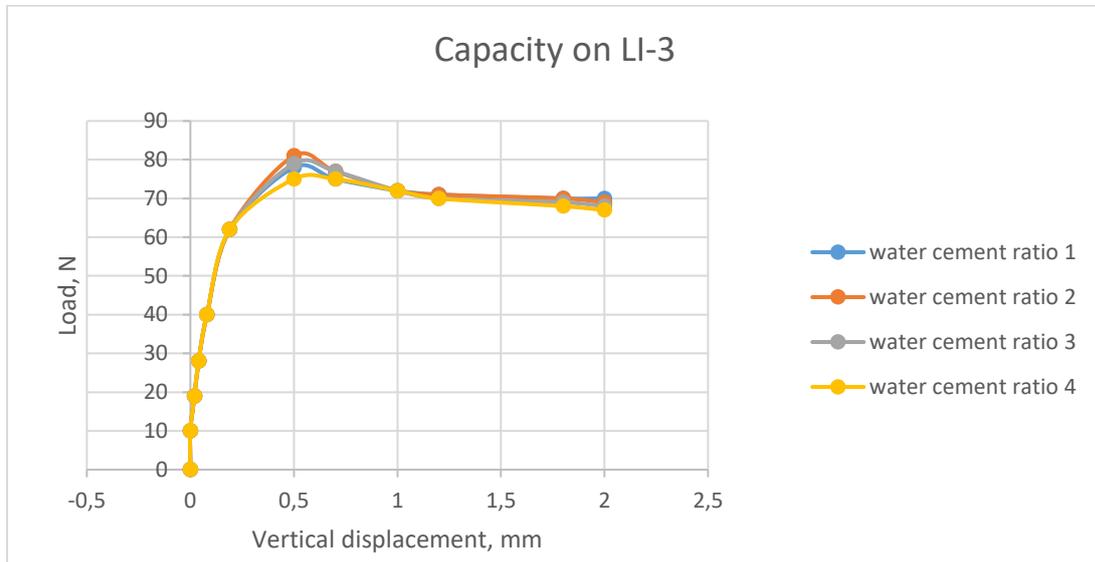


Figure 8. L-S Curve of PLT on LI-3 at Various w/c Ratio at 3 Days Curing

In seven days of curing, the pile capacity increases slightly, as a result of mixture of cement with clay.

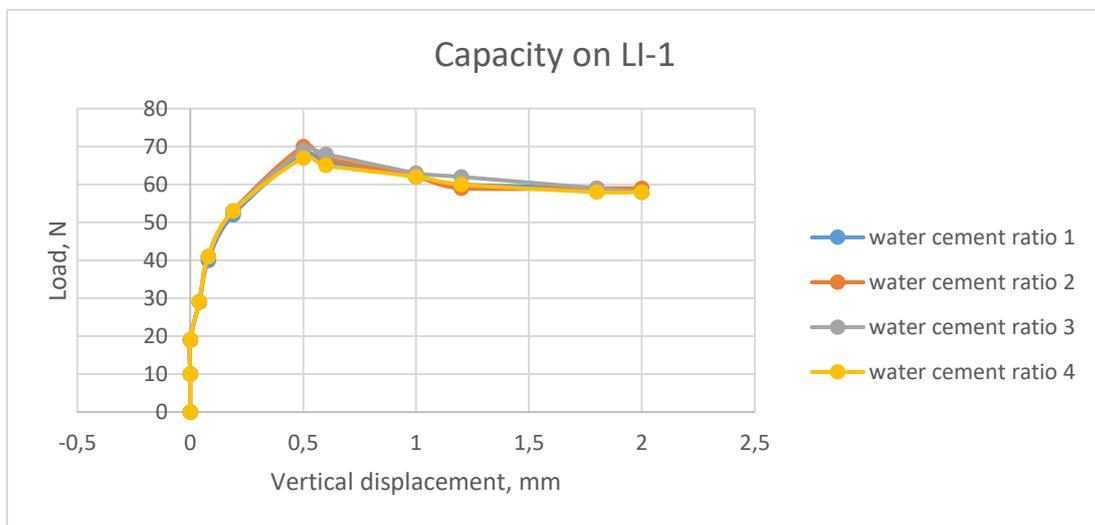


Figure 9. L-S Curve of PLT on LI-1 at Various w/c Ratio at 7 Days Curing

This results is slightly comparable with the findings by Chuang, J. L and Reese, L. C (1969), They concluded that by $w/c = 0,2$ the optimum moisture content was settled. The curves as shown in Figure 10 described that at low moisture content the bearing capacity is high. As some amount of water increases, the capability of pile to resist load become decreases, this condition is make sense and agreeable with natural phenomena. Optimum w/c ratio of 0,4 was found from this research of Unjani clay indicates that this optimum water to cement ratio is needed to increase undrained shear strength or pile capacity, slightly need more water compared to what was found by Chuang, J.L and Reese, L.C (1969).

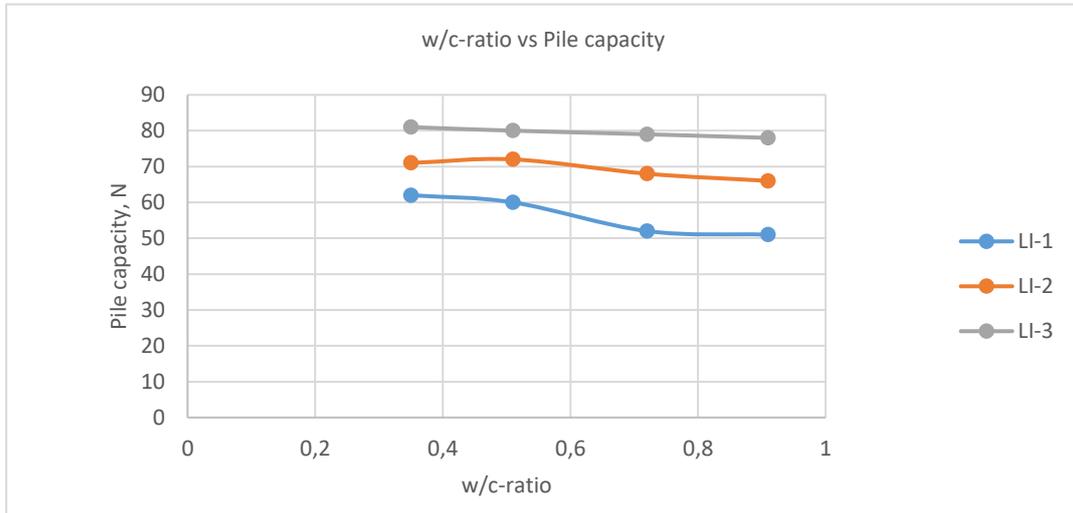


Figure 10. The decreasing trend capacity of pile on various Liquidity Index

The α values is linearly corresponds with pile capacity, The α values as a result of investigation, revealed the tendency of decreases when liquidity index getting high or vice versa as can be seen in Figure 11.

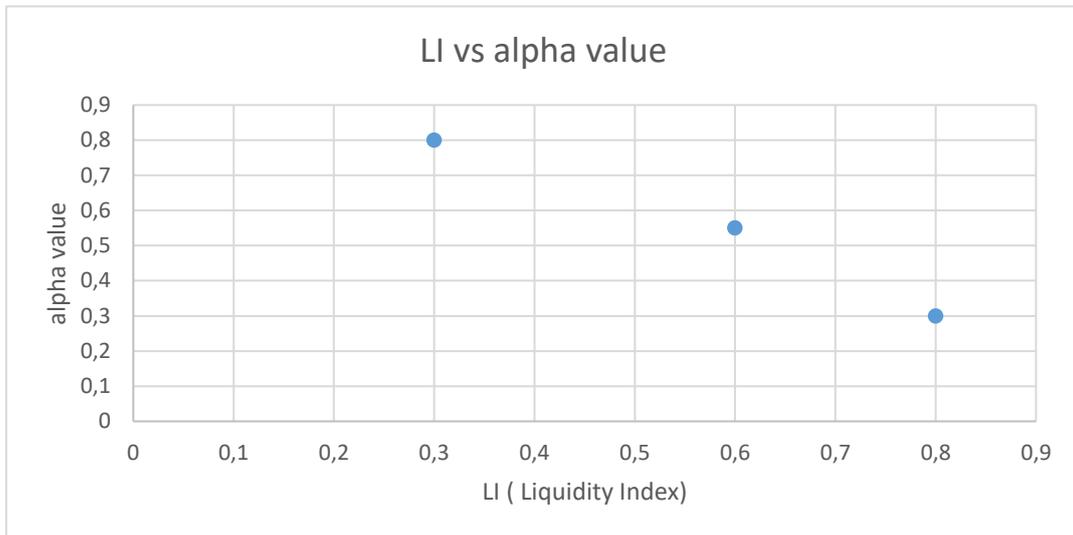


Figure 11. Correlation between α with LI

The liquidity index is corresponding with moisture content, from this reason, it is clear that α values can be correlated with moisture content. According to the data in the previous figures show the similar trend with above mentioned, this is agreeable with the basic understanding of the nature of clay soil. DST result on Fig.12, 13 and 14 showed agreeable with the results of pile simulation test. By the condition of $LI-3 < LI-2 < LI-1$ indicated increasing strength of LI-1 due to high water content of LI-1 compared with LI-3.

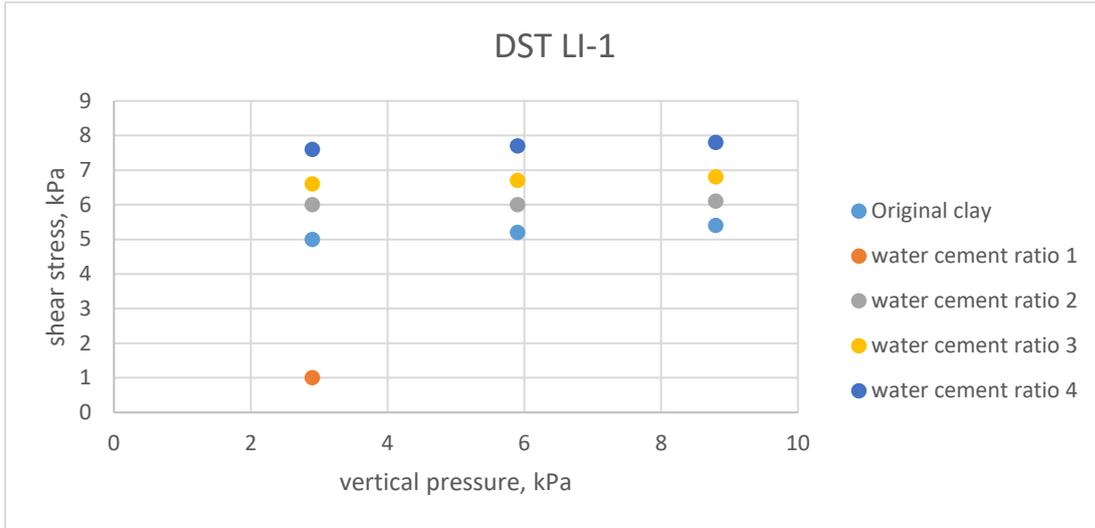


Figure 12. DST on LI-1

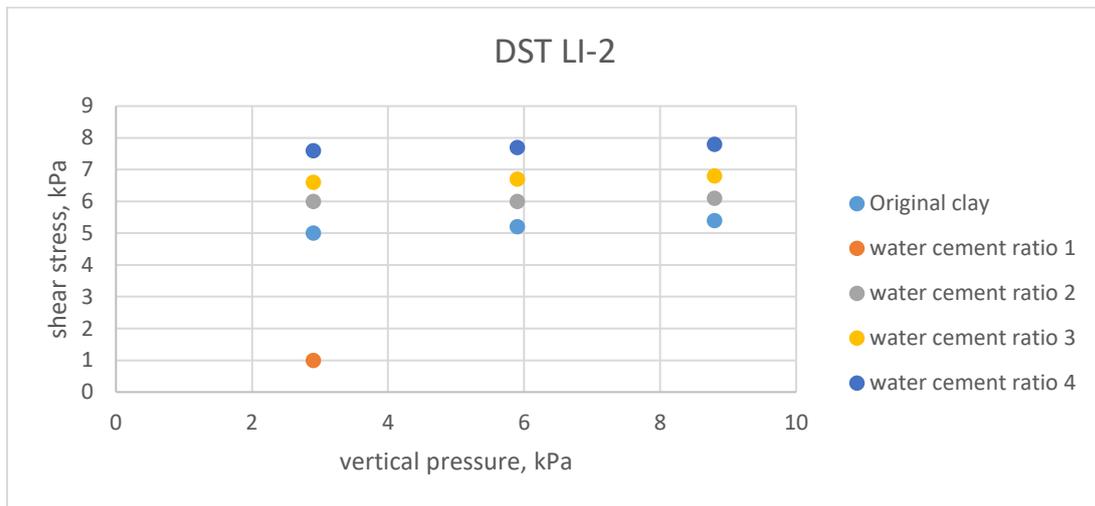


Figure 13. DST on LI-2

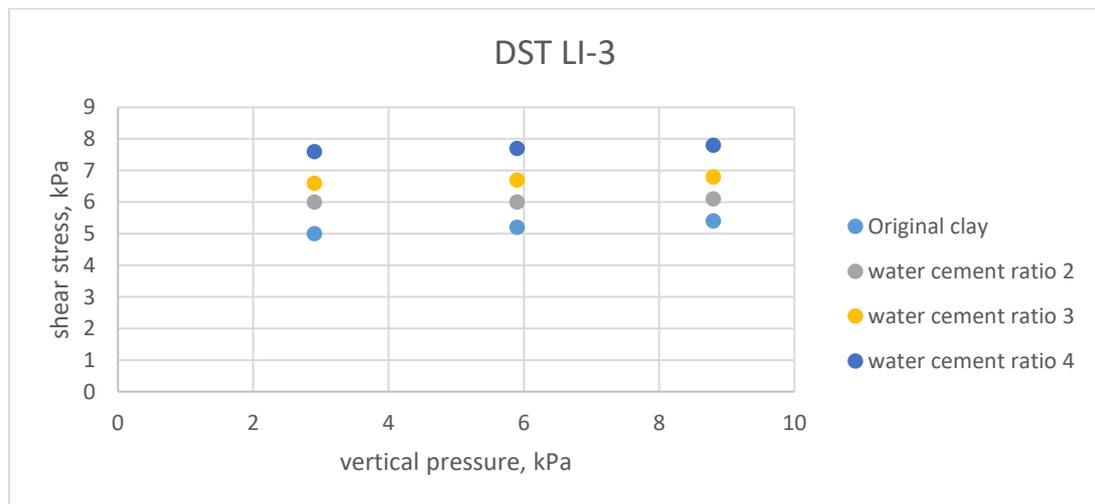


Figure 14. DST on LI-3

In order to gain the possibility of stabilization, the followings are the calculation and analysis to support it.

Pile diameter, $D = 22 \text{ mm}$; Cross section, $A_p = 2,98 \text{ cm}^2$; outskirts, $p = 6,9 \text{ cm}$; span of model, $L_p = 11,5 \text{ cm}$
 Based on loading test result: $0,06 = S_u (0,00268 + 0,00792)$, So $S_u = 0,06 / 0,009 = 6,64 \text{ kN/m}^2$

Whereas, $S_u = 3,8 \text{ kPa}$ from Unconfined Compressive Strength and Cohesion $= 3,6 \text{ kN/m}^2$; $\phi = 5^\circ$ in Direct Shear Test. From this calculation it shows improvement of strength properties is clear ($100\% \times (6,64 - 3,7) / 3,7 = 75\%$ increase). The percentage of increased S_u can use eq.3, however since the rigidity index of the soil sample was not measured, that of the equation 3 was not used. Another encouraging observation is shown in the Fig.15 and Fig.16 reveals that there are chemical reaction between cement with clay as a result of moisture migration, Some mm's thickness of clay-cement mix was produced. Diameter of failure slip surface is slightly bigger than original diameter of bored hole, which in turn increasing pile capacity. The real picture also shown in the Figure 16 on comparison of some extracted pile model (dark color) and the size of bore hole (white color in the middle), clearly showed the dark color size is bigger indicating chemical reaction and puzzolanic reaction occurs. The thickness of this hardened soil (t) was around 3 to 6 mm (take 4 mm average) or the $t/D = (4/22) \times 100\% = 18\%$. This increased in thickness should be verified further for different L/D and other clay type.

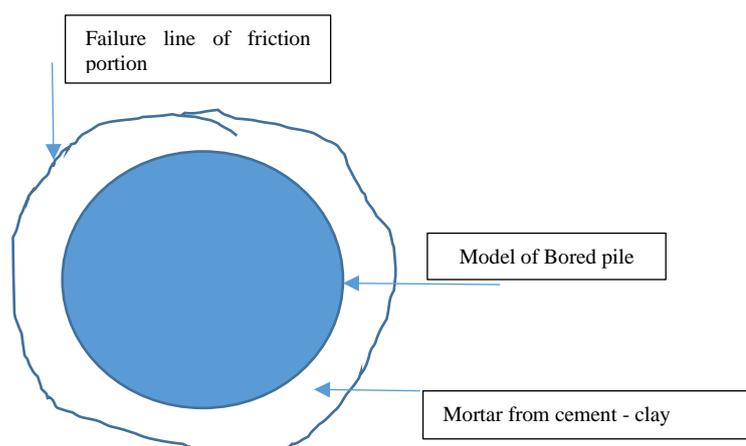


Figure 15. Schematic Diagram of Diameter of Drilled Bore Hole and Slip Failure Surface



Figure 16. Pile Model was Being Taken Out after Tested

3.2 Discussion

Equation 3) was a result of research by Hung, J. L, et.al in 2006's revealed that there was improvement of clay soil after grouting by cement mortar. The magnitude of increased S_u was more than 100 % even 200 % depending on soil rigidity, over-burden pressure and initial S_u . The behavior of increased S_u of this research is almost as similar as performed earlier by Chang, M.F and Zhu, H (2004), however the increasing of S_u as such that 75 % of original clay soil. It can make sense that there is slightly different of improvement mechanism between grouting and compaction pile.

In general, sandy soil is easily and effectively react with cement or lime to produce hardened soil which contribute in increasing strength added by Kinoshita, H, et al. (2010), instead the clay soil when blends with cement or lime produced less efficient mixture and less S_u . Nevertheless, in cement column or lime column stabilization, both sand

and clay soil can be used to be blended with cement or lime. Based on this reasons, this concept was adopted to be implemented on bored pile on clay. From the observations of this research, it can be pointed out that to obtained an effective increasing S_u , some elements should be taken into consideration during preparation and installation of this type, i.e : water migration, compaction, consolidation, chemical reaction and pozzolanic reaction/cementation.

Das, B.M. (2008) mentioned the value of α (coefficient of friction resistance) is in the amount of 0,3 to 0,8 of initial S_u , The bigger the S_u , the smaller value of α . The results of this research reveals the correlation of α with LI which LI has a correlation with consistency. Lower LI correlates with a drops of α as shown in Figure 11, therefore the lower LI is almost similar with the bigger S_u . In other words, the results of this research is supportive and agreeable with Das, B.M (2008).

4. Conclusion

The main objectives of ground improvement technology is to improve the unstable condition of original soil by some treatment to reach or exceed the minimum requirements. This observation and investigation reveal that clay soil in the bored pile can be improved by adding certain amount of energy (it could be hammer blow, injection of pressure in grouting, displacement of soil during installation process as well as selection of w/c ratio and consolidation). This Condition can increase 75 % of S_u compared to no treatment, the point should be kept in mind are:

1. Water content of original soil

The more water content of original clay the bigger α value as clay soil become softer. This is indicated by lower value of pile capacity of L-S curve from LI-3 to LI-2 and to LI-1.

2. Time

Sufficient time is needed to allow dissipation of excess pore pressure after hammer blow. Normal clay needs 30 days to fully dissipation. In this context, fully loading from upper structure is not allowed before complete dissipation.

3. Water cement ratio of concrete mix

The lower w/c-ratio provides more pile capacity, minimum w/c – ratio of 0,40 was selected in this type of clay, the other reference shows different value. To obtain minimum w/c – ratio for certain case, It is recommended to do some tests prior to begin installation of bored pile.

4. Energy from hammer blow

Hammer blow numbers was not studied thoroughly, too much hammer blow will produce uncontrolled compaction. Insufficient compactive effort will result in inefficient improvement. To control effectiveness of improvement, this blow count should be thoroughly investigated.

Recommendations

Further research is recommended to use soil media of another clay with various PI, as well as in order to save energy during bored pile installation, research to obtain optimum hammer blow in clay soil which contribute to maximum improvement is necessary.

Acknowledgements

This work was financially supported by the LPPM-UNJANI, The Authors is grateful to the fully support and encouragement to this project.

List of Symbols

α	= unit friction resistance /adhesion
ϕ	= internal friction angle
σ_p	= effective vertical stress
A_p	= Area of base
c	= Cohesion
C_u	= Undrain cohesion
D	= Pile diameter
DST	= direct shear test
I_r	= Rigidity Index
LL	= Liquid Limit
LI	= Liquidity Index
L-S	= Load settlement
PL	= Plastic Limit
Q_f	= Capacity of friction
Q_p	= Capacity of base/point
Q_u	= Ultimate capacity
q_u	= Unconfined compressive strength

Su = Undrained shear strength
S_{u-r} = Undrained shear strength after grouting
t = thickness of mortar

References

- Apageo, S.V, et al. (2016) "Ground Improvement vs. Pile Foundations" *ISSMGE - ETC 3 International Symposium on Design of Piles in Europe*. Leuven, Belgium,
- Briaud, J.L, (1987) "*Drilled and Grouted Piles: Construction, Integrity, Capacity*" Department of Civil Engineering, Texas A&M University
- Chang, M.F and Zhu, H (2004), "Construction effect on Load Transfer along Bored Piles", *Journal Geotechnical and Geoenvironmental engineering ASCE*
- Chuang, J.L and Reese, L.C (1969)." STUDIES OF SHEARING RESISTANCE BETWEEN CEMENT MORTAR AND SOIL "UNIVERSITY OF TEXAS at AUSTIN
- Clayton, R. I. and Milititsky, M. (1983) "*Installation effects and the performance. "of bored piles in stiff clay"* *Ground Engineering, Brazil*
- Das, B.M. (2008). *Foundation Engineering*. Publisher Co, New York.
- Hoque, M.I and Alamgir, M (2014) "STUDY ON THE FIELD PERFORMANCE OF GRANULAR PILE AS A GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUE "*Journal of Engineering Science 05(1), 2014, 103-114, Bangladesh*
- Hung, J.L, et al. (2006) "Ground Improvement piles induced shear strength in NC clay "*Journal of the Chinese Institute of engineers*.
- Kinoshita, H, et al. (2010) "Sand Compaction Pile Technology and its Performance in both Sandy and Clayey Grounds "*ISSMGE-TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI Brussels 31 May & 1 June 2012*.
- Narong,T, et al. (2000) "CONCRETE FOR WET PROCESS BORED PILES, *GEOTECH-YEAR 2000 Developments and Geotechnical Engineering 27-30 November 2000, Bangkok, Thailand*
- Sulaeman, A, et.al (2015) "The Determination Of Scaling Factor of Clay Properties On One-gravity Small Scale Physical Modeling , *International Journal of Integrated Engineering*, Vol. 7 No. 1 (2015) p. 12-20
- Zhu, Y (2016) "Mechanisms of Property Changes of Soft Clays Around Deep Mixing Column, *International Forum on Energy, Environment and Sustainable Development (IFEESD 2016)*

Perancangan dan Pembuatan Program Simulasi Kesetimbangan Termodinamika untuk Proses Gasifikasi Biomassa

Hari Ronaldo¹, Zulfansyah², dan Mazlani³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau

¹hari.ronaldo@lecturer.unri.ac.id, ²zulfansyah@lecturer.unri.ac.id, ³mazlani.mazlani@student.unri.ac.id

Abstrak

Program simulasi kesetimbangan termodinamika non-stoikiometri untuk proses gasifikasi biomassa dikembangkan dengan bahasa pemrograman Python. Program simulasi dilengkapi dengan antar muka program atau lebih dikenal sebagai GUI (*Graphical Users Interface*), untuk mempermudah interaksi pengguna dalam menggunakan program simulasi. Program dirancang untuk menghitung komposisi gas produser dengan 6 komponen yang terlibat, yaitu CH₄, CO, CO₂, H₂, N₂, dan H₂O. Rancangan algoritma komputasi perhitungan model kesetimbangan termokimia non-stoikiometri dikonversi ke dalam kode program bahasa Python. GUI terdiri dari fasilitas input data dan output berupa tabel dan grafik hasil perhitungan. Fasilitas input data dirancang sedemikian rupa sehingga pengguna dapat memvariasikan input, yaitu suhu gasifikasi dan rasio equivalen. Hasil perhitungan keluaran program simulasi diverifikasi dengan data hasil perhitungan secara manual untuk meyakinkan bahwa tidak terjadi kesalahan dalam algoritma maupun penulisan kode program. Keluaran hasil perhitungan dari program simulasi juga dibandingkan dengan data hasil percobaan penelitian terdahulu untuk melihat keakuratan model termodinamika dalam memprediksi komposisi CH₄, CO, CO₂, dan H₂. Program simulasi kesetimbangan termodinamika non-stoikiometri untuk proses gasifikasi biomassa dapat memprediksi komposisi gas produser dengan tingkat keakuratan yang cukup baik serta dapat dijadikan sebagai media pembelajaran dalam mempelajari kesetimbangan termodinamika.

Kata kunci: biomassa, GUI, komposisi syngas, non-stoikiometri, python

Abstract

The non-stoichiometric thermodynamic equilibrium simulation program for the biomass gasification process was developed using the Python programming language. It is featured with a GUI (Graphical Users Interface), to facilitate user interaction. The program is designed to calculate the composition of gas producer with 6 components involved, they are CH₄, CO, CO₂, H₂, N₂, and H₂O. The design of computational algorithms for calculating non-stoichiometric thermochemical equilibrium models is converted into Python code. The GUI consists of input and output facilities in form of tables and graphs of calculation results. The input facility is designed in such a way that the user can vary the gasification temperature and the equivalent ratio. The calculation results of the simulation program are verified with the calculated data manually to ensure that there are no errors in the algorithm or writing program code. It is also compared with the experimental data from previous studies to see the accuracy of the thermodynamic model in predicting the composition of gas producer. The non-stoichiometric thermodynamic equilibrium simulation program for the biomass gasification process can predict the composition of producer gas with a fairly good level of accuracy and can be used as a learning medium in studying thermodynamic equilibrium.

Keywords: biomass, GUI, syngas composition, non-stoichiometric, python

1. Pendahuluan

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang dapat dikonversi menjadi *syngas* melalui proses gasifikasi biomassa. *Syngas* yang dihasilkan selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan baku untuk mensintesis produk senyawa kimia lainnya. Gas yang keluar dari *gasifier* disebut dengan gas produser yang jenis dan komposisinya bergantung pada jenis agen gasifikasi yang digunakan seperti udara, uap, dan oksigen. Selain itu, konfigurasi dan kondisi operasi *gasifier* serta jenis biomassa yang digunakan juga mempengaruhi keluaran *gasifier* (Htut dkk., 2015).

Percobaan skala lab maupun pilot telah banyak dilakukan untuk mendapatkan rancangan optimal yang menghasilkan komposisi gas produser terbaik. Konversi kesetimbangan termodinamika dibutuhkan sebagai rujukan dalam mengukur tingkat keberhasilan dan kinerja gasifikasi. Konversi kesetimbangan termodinamika merupakan konversi maksimal yang dapat dicapai dan dapat dihitung menggunakan model kesetimbangan reaksi termodinamika. Model kesetimbangan non-stoikiometri merupakan salah satu model termodinamika yang dapat digunakan untuk

memprediksi komposisi gas produser pada gasifikasi biomassa. Model non-stoikiometri tidak membutuhkan data tentang reaksi-reaksi yang terlibat pada proses gasifikasi. Sehingga model tersebut banyak digunakan dalam simulasi kesetimbangan reaksi termodinamika.

Proses simulasi dengan teknik perhitungan manual sangatlah tidak mungkin untuk dilakukan, terlebih lagi jika proses simulasi tersebut melibatkan banyak persamaan matematis dan membutuhkan penyelesaian

Info Makalah:

Dikirim : 06-10-21;

Revisi 1 : 07-13-21;

Diterima : 07-16-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-8526-5904-741

e-mail : hari.ronaldo@lecturer.unri.ac.id

numerik. Dengan demikian peran ilmu komputasi dan komputer sangatlah penting dalam proses simulasi. Program simulasi dibangun menggunakan bahasa program, seperti C++, Java, C#, dan Python. Setiap bahasa program memiliki kelebihan dan kekurangan, serta pemilihan bahasa program bergantung pada produk yang akan dihasilkan. Python merupakan salah satu bahasa pemrograman *free* dan *open source* serta lintas platform (Raharjo, 2015). Sintak dan simantik bahasa Python sangat sederhana sehingga banyak digunakan di tingkat akademisi dalam pengajaran pemrograman. Selain itu, sudah banyak pustaka python yang mendukung kebutuhan komputasi teknik seperti matplotlib, numpy dan scipy. Python juga mendukung pembuatan program berbasis GUI menggunakan pustaka seperti Tkinter, Pyside2, dan WxPython. Meskipun demikian masih jarang dijumpai baik literatur maupun program simulasi yang dikembangkan menggunakan Python untuk komputasi teknik maupun dalam pembuatan program simulasi..

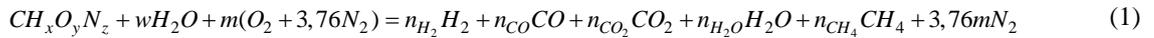
Ada banyak program simulasi untuk kebutuhan teknik kimia yang sudah komersial, namun sangat jarang yang bersifat *free* dan *opensource*. Sehingga pengembangan dari program tersebut hanya bergantung dari perusahaan pengembangnya. Dengan demikian program simulasi kesetimbangan termodinamika non-stoikiometri akan lebih baik jika dibangun dengan bahasa Python.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat program simulasi kesetimbangan termodinamika non-stoikiometri untuk proses gasifikasi biomassa yang dilengkapi dengan GUI untuk memudahkan pengguna dalam mengoperasikan program. Program simulasi yang dihasilkan bersifat *open source*. Kode program diunggah di portal Github agar dapat dipelajari dan dikembangkan secara berkala dan kolaborasi.

2. Metode

Identifikasi Sistem

Simulasi proses gasifikasi biomassa diterapkan dengan asumsi-asumsi, yaitu sistem tunak. Biomassa dianggap terdiri dari unsur C, H, O, dan N sehingga molekul $CH_xO_yN_z$ sebagai model molekul untuk biomassa. Reaksi dalam sistem terjadi dalam kondisi setimbang, produk yang dihasilkan adalah metana (CH_4), karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), hidrogen (H_2), nitrogen (N_2), dan air (H_2O), dan semua gas yang terlibat dalam proses dianggap sebagai gas ideal. Karena itu, seluruh reaksi yang terjadi di dalam proses gasifikasi biomassa dapat digambarkan dalam reaksi global pada Persamaan 1.



Minimisasi Energi Bebas Gibbs

Proses simulasi non-stoikiometri tidak membutuhkan data mekanisme reaksi. Kondisi kesetimbangan yang stabil dalam sistem pereaksi akan tercapai ketika energi bebas Gibbs bernilai minimum. Metode non-stoikiometri berprinsip pada minimisasi energi bebas Gibbs total. *Input* yang dibutuhkan pada metode non-stoikiometri adalah komposisi unsur umpan hasil dari analisis *ultimate*, suhu referensi (T_r), konstanta universal (R), massa atom relatif setiap unsur (M_{r_j}), kapasitas panas (C_p) setiap komponen yang terdiri dari nilai A, B, C, dan D, Entalpi standar ($\Delta H_{f,i}(T_r)$) dan energi Gibbs pembentukan ($\Delta G_{f,i}(T_r)$) tiap komponen. Jumlah karbon yang diketahui dari analisis *ultimate* harus sama dengan jumlah total semua karbon dalam campuran gas yang dihasilkan. Sehingga untuk setiap unsur j , dinyatakan pada Persamaan 2.

$$\sum_{i=1}^N a_{i,j}n_i = A_j \quad (2)$$

di mana $a_{i,j}$ adalah jumlah atom dari unsur j dalam spesies i , dan A_j adalah jumlah total atom unsur yang memasuki reaktor. Masalah optimisasi ini memiliki dua kelompok batasan yaitu neraca massa unsur dan non-negatifitas jumlah mol n_i dari senyawa kimia gas produser. Empat neraca massa dari setiap unsur pada Persamaan 1 dinyatakan pada Persamaan 3 – 6.

$$A_C = n_{CH_4} + n_{CO} + n_{CO_2} \quad (3)$$

$$A_H = 4n_{CH_4} + 2n_{H_2} + 2n_{H_2O} \quad (4)$$

$$A_O = n_{CO} + 2n_{CO_2} \quad (5)$$

$$A_N = 2n_{N_2} \quad (6)$$

Dimana A_C , A_H , A_O , dan A_N adalah jumlah mol unsur C, H, O, dan N pada umpan. Jumlah mol unsur O dan unsur N pada umpan bergantung pada jumlah mol unsur O dan N pada biomassa dan agen gasifikasi maka A_O dan A_N dapat dituliskan dalam fungsi rasio ekuivalen dan komposisi agen gasifikasi yang dapat dinyatakan pada Persamaan 7 dan 8.

$$A_O = F_O + \alpha\beta \quad (7)$$

$$A_N = F_N + \alpha\beta\theta \quad (8)$$

Dimana F_O merupakan jumlah mol unsur oksigen pada biomassa, F_N merupakan jumlah mol unsur nitrogen pada biomassa, α merupakan rasio ekuivalen, β merupakan rasio antara nitrogen dan oksigen pada agen gasifikasi, dan θ merupakan jumlah kebutuhan oksigen untuk pembakaran sempurna yang dapat dinyatakan dengan Persamaan 9.

$$\theta = 2F_C + 0,5F_H \quad (9)$$

Koefisien 2 dan 0,5 pada F_C dan F_H berasal dari jumlah mol unsur O yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna setiap mol unsur tersebut. Satu mol unsur C membutuhkan 2 mol unsur O untuk membentuk CO_2 dan satu mol unsur H membutuhkan 0,5 mol unsur O untuk membentuk H_2O . F_C dan F_H merupakan jumlah mol unsur C dan H pada biomassa yang nilainya sama dengan A_C dan A_H jika agen gasifikasi hanya terdiri dari komponen oksigen dan nitrogen. F_C , F_H , F_O , dan F_N dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 10.

$$F_i = \frac{w_i W}{M_i}, (i = C, H, O, N) \quad (10)$$

Menghitung energi bebas Gibbs tiap komponen ($\Delta G_{f,i}^0$) yang dinyatakan pada Persamaan 11.

$$\Delta G^o = \Delta H^o - T\Delta S^o \quad (11)$$

Hubungan panas reaksi standar dengan suhu dinyatakan pada Persamaan 12.

$$\Delta H^o = \Delta H_0^o + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} dT \quad (12)$$

Ketergantungan suhu terhadap perubahan entropi standar dari reaksi dikembangkan secara serupa.

$$dS = C_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dP \quad (13)$$

Persamaan 13 ditulis untuk entropi keadaan standar dari spesies i pada keadaan standar P konstan yang dinyatakan pada Persamaan 14.

$$d\Delta S^o = \Delta C_p^o \frac{dT}{T} \quad (14)$$

Hasil integrasi Persamaan 14 dinyatakan pada Persamaan 15.

$$\Delta S^o = \Delta S_0^o + R \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} \frac{dT}{T} \quad (15)$$

Dimana ΔS^o dan ΔS_0^o adalah perubahan entropi standar reaksi pada suhu T dan pada suhu referensi T_0 masing-masing. Penggabungan Persamaan 11, 12, dan 15 dinyatakan pada Persamaan 16.

$$\Delta G^o = \Delta H_0^o + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} dT - T\Delta S_0^o - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} \frac{dT}{T} \quad (16)$$

Dimana,

$$\Delta S_0^o = \frac{\Delta H_0^o - \Delta G_0^o}{T} \quad (17)$$

sehingga,

$$\Delta G^o = \Delta H_0^o - \frac{T}{T_r} (\Delta H_0^o - \Delta G_0^o) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} \frac{dT}{T} \quad (18)$$

Suku-suku integral pada Persamaan 18, dinyatakan dalam Persamaan 19 dan 20.

$$\int_{T_r}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} dT = \left(A + \frac{B}{2} T_r (\tau + 1) + \frac{C}{3} T_r^2 (\tau^2 + \tau + 1) + \frac{D}{\tau T_r^2} \right) \times (T - T_r) \quad (19)$$

$$\int_{T_r}^T \frac{\Delta C_p^o}{R} dT = \left(A + \left[B T_r + \left(C T_r^2 + \frac{D}{\tau^2 T_r^2} \right) \left(\frac{\tau + 1}{2} \right) \right] \left(\frac{\tau - 1}{\ln \tau} \right) \right) \times \ln \tau \quad (20)$$

dimana, $\tau = \frac{T}{T_r}$

Energi bebas pembentukan tiap komponen dapat disusun sebagai berikut:

$$\Delta G_{CH_4}(T) = \Delta H_{f,CH_4}(T_r) - \frac{T}{T_r} (\Delta H_{f,CH_4}(T_r) - \Delta G_{f,CH_4}(T_r)) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pCH_4}}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pCH_4}}{R} \frac{dT}{T} \quad (21)$$

$$\Delta G_{CO}(T) = \Delta H_{f,CO}(T_r) - \frac{T}{T_r} (\Delta H_{f,CO}(T_r) - \Delta G_{f,CO}(T_r)) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pCO}}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pCO}}{R} \frac{dT}{T} \quad (22)$$

$$\Delta G_{CO_2}(T) = \Delta H_{f,CO_2}(T_r) - \frac{T}{T_r} (\Delta H_{f,CO_2}(T_r) - \Delta G_{f,CO_2}(T_r)) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pCO_2}}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pCO_2}}{R} \frac{dT}{T} \quad (23)$$

$$\Delta G_{H_2}(T) = \Delta H_{f,H_2}(T_r) - \frac{T}{T_r} (\Delta H_{f,H_2}(T_r) - \Delta G_{f,H_2}(T_r)) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pH_2}}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pH_2}}{R} \frac{dT}{T} \quad (24)$$

$$\Delta G_{N_2}(T) = \Delta H_{f,N_2}(T_r) - \frac{T}{T_r} (\Delta H_{f,N_2}(T_r) - \Delta G_{f,N_2}(T_r)) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pN_2}}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pN_2}}{R} \frac{dT}{T} \quad (25)$$

$$\Delta G_{H_2O}(T) = \Delta H_{f,H_2O}(T_r) - \frac{T}{T_r} (\Delta H_{f,H_2O}(T_r) - \Delta G_{f,H_2O}(T_r)) + R \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pH_2O}}{R} dT - RT \int_{T_r}^T \frac{\Delta C_{pH_2O}}{R} \frac{dT}{T} \quad (26)$$

Energi bebas Gibbs total untuk masing-masing gas produk gasifikasi yang terdiri dari N spesies ($i = 1, \dots, N$) dinyatakan pada Persamaan 27.

$$G_{total} = \sum_{i=1}^N n_i \Delta G_{f,i}^0 + n_i RT \ln \left(\frac{n_i}{\sum_{i=1}^N n_i} \right) \quad (27)$$

Energi bebas Gibbs total dari sistem kompleks secara matematis harus bernilai minimum dengan menghitung nilai n_i yang tidak diketahui. Masalah optimasi ini dapat diselesaikan dengan menggunakan metode pengali Lagrange. Metode non-stoikiometri dengan empat unsur memiliki empat Pengali Lagrange yang dinyatakan sebagai λ_C , λ_H , λ_O , dan λ_N . Fungsi Lagrange L dapat dinyatakan pada Persamaan 28.

$$L = G_{total} - \sum_{j=1}^k \lambda_j \left(\sum_{i=1}^N a_{i,j} n_i - A_j \right) \quad (28)$$

Fungsi ini bernilai minimum jika semua turunan parsialnya bernilai nol. Kondisi tersebut dapat ditulis sebagai sistem 10 persamaan, 6 diantaranya non-linear. Persamaan linear dan nonlinear pada program diselesaikan menggunakan fungsi yang tersedia pada pustaka `scipy.optimize.fsolve` Python 3.7 untuk menghitung komposisi mol gas produser yaitu metana, karbon monoksida, karbon dioksida, hidrogen, nitrogen, dan air.

`Scipy.optimize` adalah pustaka program yang menyediakan fungsi `fsolve` untuk untuk menyelesaikan sistem persamaan linear dan nonlinear, baik yang memiliki batasan maupun tanpa batasan (Nagar, 2017). Sebagai contoh, fungsi `fsolve` digunakan untuk menemukan akar (nol) dari sistem persamaan non-linear.

$$f(x) = 0 \quad (29)$$

Dimana x adalah vektor dan $f(x)$ adalah fungsi yang mengembalikan nilai vektor. Sintak penggunaan fungsi *fsolve* adalah,

`x = fsolve(fun, x_tebakan)`

`fun` adalah fungsi penol yang akan diselesaikan dengan nilai tebakan awal yaitu `x_tebakan`. Fungsi *fsolve* digunakan untuk menyelesaikan sistem 10 persamaan, yaitu Persamaan 30 – 39.

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{CH_4}} \right) = \Delta G_{CH_4}(T) + RT \ln \left(\frac{n_{CH_4}}{n_{total}} \right) - \lambda_C - 4\lambda_H = 0 \quad (30)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{CO}} \right) = \Delta G_{CO}(T) + RT \ln \left(\frac{n_{CO}}{n_{total}} \right) - \lambda_C - \lambda_O = 0 \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{CO_2}} \right) = \Delta G_{CO_2}(T) + RT \ln \left(\frac{n_{CO_2}}{n_{total}} \right) - \lambda_C - 2\lambda_O = 0 \quad (32)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{H_2}} \right) = \Delta G_{H_2}(T) + RT \ln \left(\frac{n_{H_2}}{n_{total}} \right) - 2\lambda_H = 0 \quad (33)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{N_2}} \right) = \Delta G_{N_2}(T) + RT \ln \left(\frac{n_{N_2}}{n_{total}} \right) - 2\lambda_N = 0 \quad (34)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial n_{H_2O}} \right) = \Delta G_{H_2O}(T) + RT \ln \left(\frac{n_{H_2O}}{n_{total}} \right) - 2\lambda_H - \lambda_O = 0 \quad (35)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_C} \right) = n_{CH_4} + n_{CO} + n_{CO_2} - A_C \quad (36)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_H} \right) = 4n_{CH_4} + 2n_{H_2} + 2n_{H_2O} - A_H \quad (37)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_O} \right) = n_{CO} + 2n_{CO_2} - A_O \quad (38)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_N} \right) = 2n_{N_2} - A_N \quad (39)$$

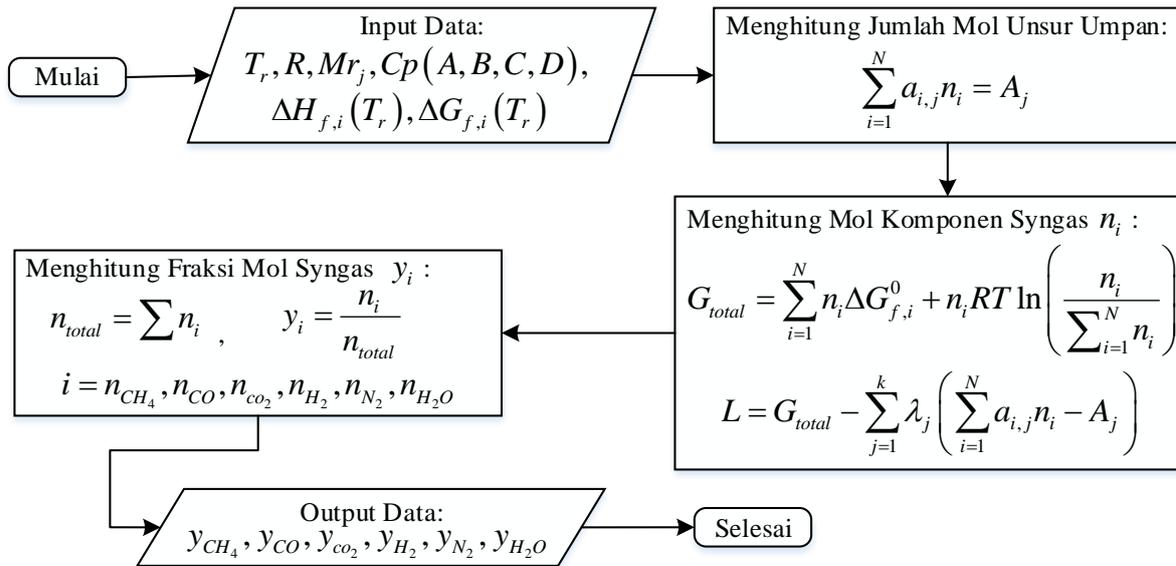
Dimana:

$$n_{total} = n_{CH_4} + n_{CO} + n_{CO_2} + n_{H_2} + n_{N_2} + n_{H_2O} \quad (40)$$

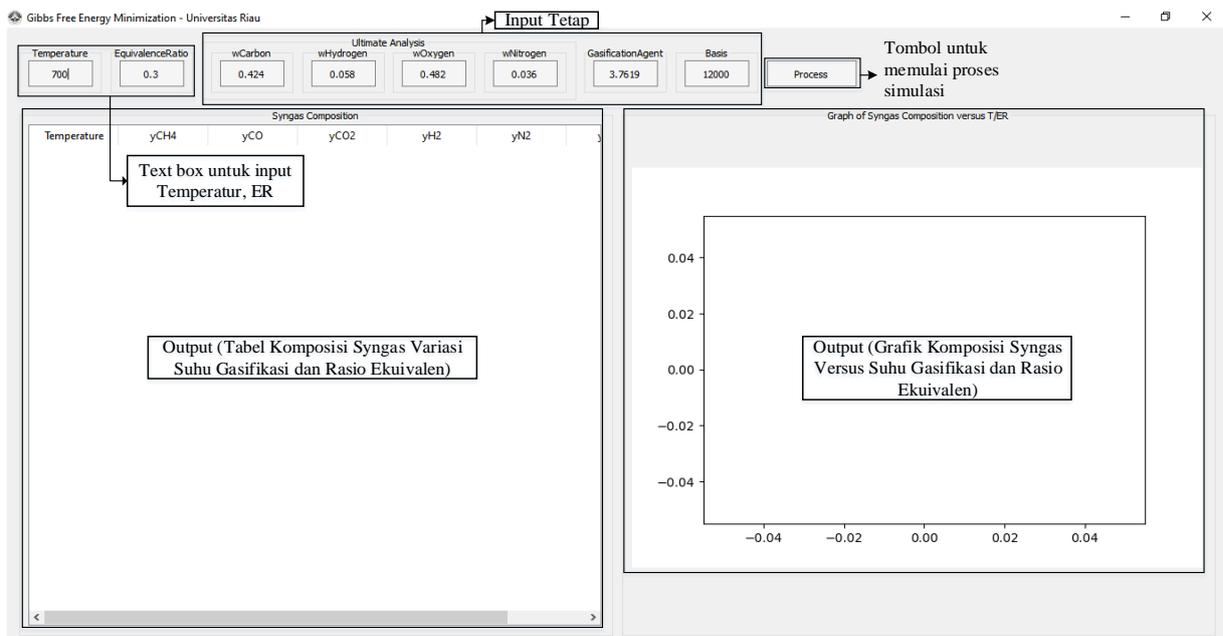
Untuk menghitung fraksi mol masing-masing komponen dapat digunakan Persamaan 41.

$$y_i = \frac{n_i}{n_{total}} \quad (41)$$

Algoritma perhitungan model kesetimbangan termodinamika non-stoikiometri proses gasifikasi biomassa dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Algoritma Perhitungan Model Kestimbangan Termodinamika Non-stoikiometri Proses Gasifikasi Biomassa.



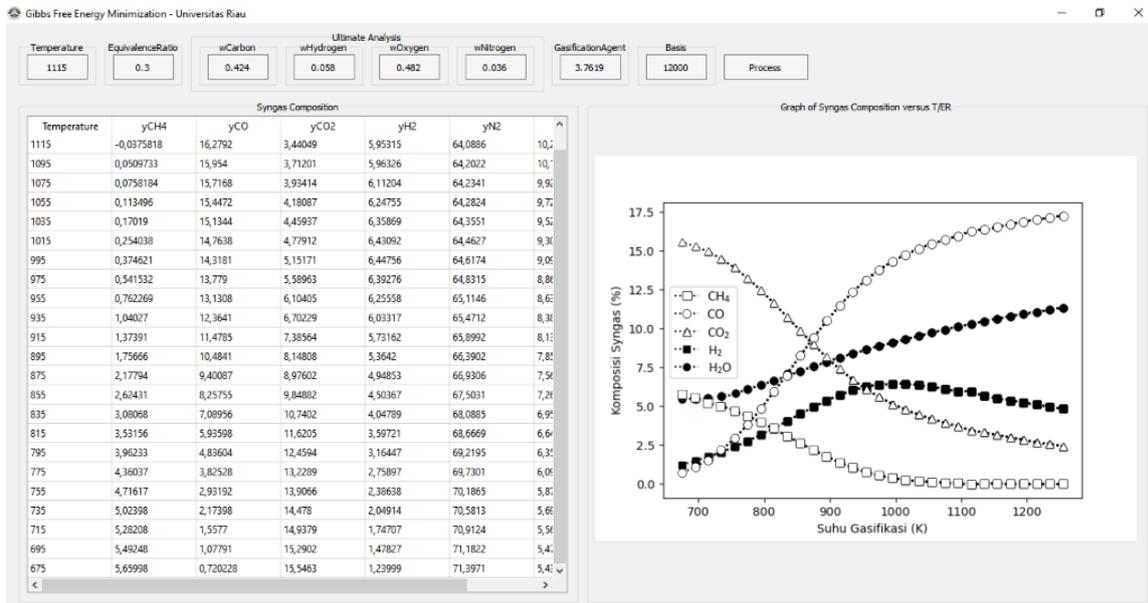
Gambar 2. Rancangan Antar Muka Program Simulasi Kestimbangan Termikimia Non-stoikiometri Gasifikasi Biomassa

Perancangan GUI

GUI merupakan antar muka pengguna untuk proses *input-output data*. Pustaka program yang digunakan untuk membuat GUI adalah *PySide2*, karena dapat digunakan secara gratis dan mendukung program berbasis Python. Rancangan GUI program minimasi energi bebas Gibbs dapat dilihat pada Gambar 2. Data input yang dibutuhkan untuk proses simulasi adalah Temperatur gasifikasi dan ER yang terletak di sudut kiri GUI. Kemudian data hasil analisis *ultimate* biomassa (w_j) berdasarkan *dry weight basis* yang merupakan data komposisi unsur penyusun biomassa, yaitu C, H, O, dan N, rasio antara nitrogen dan oksigen pada agen gasifikasi (β), dan basis (W). Setelah semua data yang dibutuhkan untuk simulasi diinput, pengguna dapat menekan tombol *Process* yang terdapat pada GUI untuk memulai simulasi, dan hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk tabel yang berisi data komposisi gas produser (y_i) (kiri bawah GUI) dan grafik ER/T VS y_i (kanan bawah GUI).

3. Hasil dan Pembahasan

Program simulasi yang telah dibuat dijalankan dengan data awal berdasarkan penelitian yaitu analisa *ultimate* pelepah sawit C, H, N, O masing-masing adalah 42,4%, 5,8%, 3,6%, 48,2%, agen gasifikasi 3,7619 dengan basis 12000 gram. Hasil simulasi secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.

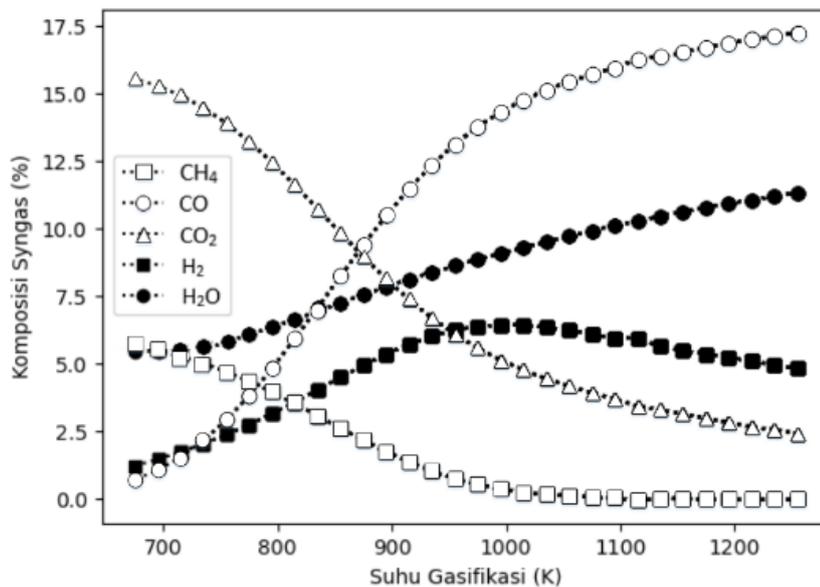


Gambar 3. Program Simulasi Setelah Dijalankan

Program simulasi dapat digunakan untuk menganalisa pengaruh dari variasi temperatur gasifikasi dan ER. Pengguna program dapat mengganti temperatur dan ER pada antar muka GUI yang tersedia, kemudian menekan tombol proses untuk menghitung kembali komposisi gas produser. Data hasil simulasi sebelumnya tetap terekam pada tabel antar muka GUI, dan grafik akan diperbaharui secara otomatis sesuai dengan data yang terdapat pada tabel GUI.

Pengaruh Suhu Gasifikasi terhadap Komposisi Gas Produser

Temperatur memiliki peran penting dalam proses gasifikasi biomassa secara keseluruhan karena mempengaruhi reaksi kesetimbangan yang terlibat dalam proses gasifikasi biomassa. Meskipun temperatur merupakan parameter penting dalam proses gasifikasi biomassa, temperatur merupakan parameter yang tidak dapat dikontrol secara langsung dalam sistem nyata, sehingga temperatur bergantung pada rasio ekuivalen (Silva dkk., 2019). Grafik pengaruh suhu gasifikasi terhadap komposisi gas produser diperlihatkan pada Gambar 4.



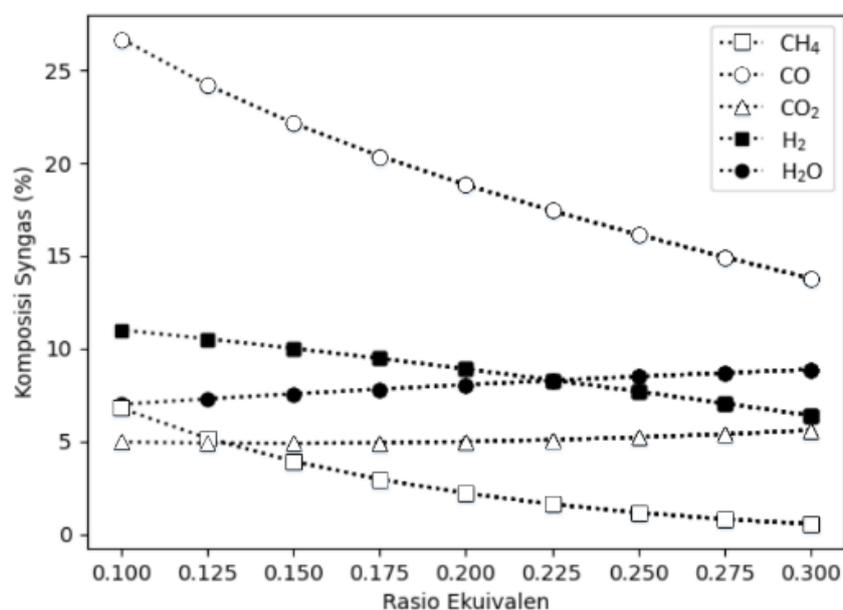
Gambar 4. Pengaruh Suhu Gasifikasi Terhadap Komposisi Syngas pada Rasio Ekuivalen 0,30

Gambar 4 memperlihatkan bahwa semakin tinggi suhu gasifikasi maka komposisi gas CH_4 mengalami penurunan yang disebabkan karena peningkatan suhu gasifikasi meningkatkan perengkahan termal kandungan tar ke dalam gas produk dan meningkatkan reaksi endotermik seperti pembentukan kembali uap CH_4 . CO mengalami peningkatan komposisi seiring dengan peningkatan suhu gasifikasi yang disebabkan karena peningkatan suhu reaksi mendukung produk dalam reaksi endotermik yang berarti lebih banyak menghasilkan gas CO dan H_2 yang sesuai dengan prinsip Le Chatelier (Tian dkk., 2018).

CO_2 mengalami penurunan komposisi seiring dengan peningkatan suhu gasifikasi. Komposisi CO_2 yang tinggi pada suhu rendah disebabkan oleh pengaruh reaksi pergeseran air-gas yang, sedangkan pada suhu tinggi reaksi Boudouard menjadi dominan yang mengarah pada pengurangan komposisi CO_2 (Yahaya dkk., 2019). H_2 mengalami peningkatan komposisi hingga suhu 1075 K kemudian mengalami penurunan komposisi hingga suhu 1255 K. Peningkatan komposisi H_2 dapat dijelaskan berdasarkan prinsip Le Chatelier yang sama seperti peningkatan komposisi CO .

Pengaruh Rasio Ekuivalen terhadap Gas Produser

Rasio ekuivalen (ER) adalah parameter yang mengkuantifikasi jumlah udara/oksigen per unit massa bahan bakar, dibandingkan dengan jumlah teoritis udara/oksigen yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna (Atnaw dkk., 2013). Grafik pengaruh rasio ekuivalen terhadap komposisi *syngas* dapat dilihat pada Gambar 5.

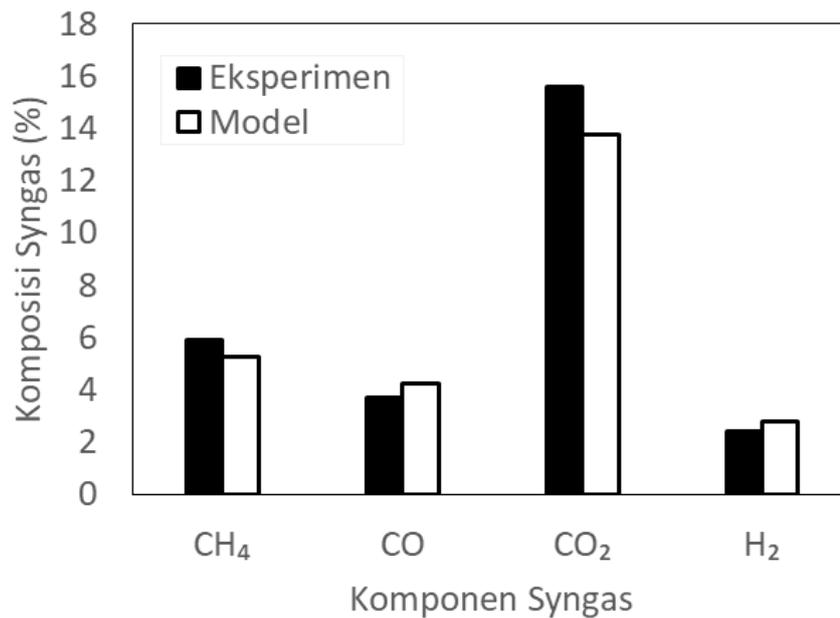


Gambar 5. Pengaruh Rasio Ekuivalen Terhadap Komposisi *Syngas* pada Suhu Gasifikasi 975 K

Gambar 5 memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya ER maka kandungan gas utama yang mudah terbakar yaitu CH_4 , CO , dan H_2 menurun, sedangkan kandungan CO_2 meningkat. Hal tersebut disebabkan karena, ketika ER meningkat jumlah oksigen yang disuplai dalam reaktor meningkat. Komponen gas yang dihasilkan selama proses gasifikasi terbakar jika terjadi peningkatan oksigen dan penurunan kandungan gas yang mudah terbakar. Sehingga suhu di dalam reaktor meningkat. Peningkatan ER berpengaruh baik pada kenaikan maupun penurunan kandungan gas yang mudah terbakar dalam gas tersebut (Lan dkk., 2019).

Verifikasi Model dengan Eksperimen

Data hasil pemodelan dibandingkan dengan data hasil eksperimen, hal ini bertujuan untuk melihat keakuratan model dengan eksperimen. Data perbandingan yang digunakan adalah data dari eksperimen yang dilakukan oleh (Atnaw dkk., 2013). Jenis biomassa yang disimulasi adalah pelepah sawit pada suhu gasifikasi 775 K dan ER 0,27. Grafik perbandingan komposisi *Syngas* antara hasil pemodelan dan eksperimen (Atnaw dkk., 2013) dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Komposisi *Syngas* antara Hasil Eksperimen Atnaw dkk. (2013) dengan Hasil Model

Gambar 6 dapat dijelaskan bahwa komposisi gas yang diperoleh dari hasil pemodelan memperlihatkan kesamaan *trend* terhadap komposisi gas yang dihasilkan dari eksperimen. Perbedaan ini diakibatkan karena komposisi biomassa (pelepah sawit) yang diinputkan pada model merupakan analisis *ultimate* biomassa berdasarkan *dry weight basis* yang memberikan data komposisi unsur penyusun biomassa seperti C, H, O, dan N dengan kadar air 0%. Biomassa yang digunakan pada eksperimen untuk proses gasifikasi dengan kadar air $16 \pm 2\%$. Keakuratan komposisi gas hasil pemodelan untuk setiap komponen CH₄, CO, CO₂, dan H₂ secara berturut-turut adalah 88,96%; 85,54%; 88,06%; dan 83,91%.

Kesimpulan

Python merupakan bahasa pemrograman yang mudah digunakan. Program simulasi keseimbangan termodinamika dengan model non-stoikiometri dapat dijalankan dengan baik, mampu digunakan untuk mempelajari pengaruh dari temperatur, dan ER, serta memiliki tingkat keakuratan yang baik jika dibandingkan dengan hasil percobaan. Program simulasi ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan penambahan fitur berupa pemodelan dan simulasi *gasifier*. Kode program secara lengkap dapat diakses pada portal Github dengan alamat <https://github.com/Mazlanizn/PyGibbs>.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada komunitas Python yang aktif diberbagai *platform online* yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Berkat berbagi ilmu dan pengetahuan dari komunitas *online* Python penelitian ini dapat terlaksana.

Daftar Notasi

i	= Mol unsur ke- i
j	= Mol unsur ke- j
y_i	= Fraksi mol untuk spesies i [%]
k	= Konstanta kesetimbangan [mol/L]
n_i	= Jumlah mol senyawa
P	= Tekanan [Atm]
P_0	= Tekanan pada keadaan standar [Atm]
ΔG	= Energi bebas Gibbs dari reaksi pada suhu tertentu [J.mol ⁻¹]
ΔH	= Entalpi dari reaksi pada suhu tertentu [J.mol ⁻¹]
ΔS	= Entropi dari reaksi pada suhu tertentu [J.mol ⁻¹]
A	= Faktor pra-eksponensial [s ⁻¹]
E_a	= Energi aktivasi [J.mol ⁻¹]
T	= Suhu [K]
R	= Konstanta gas universal [J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
$\Delta G_{f,i}^0$	= Energi bebas Gibbs dari pembentukan spesies i [J.mol ⁻¹]

- $a_{i,j}$ = Jumlah atom dari unsur j th dalam spesies i th
 A_j = Jumlah total atom unsur yang memasuki reaktor
 L = Fungsi Lagrange
 λ_j = Pengali Lagrangian untuk elemen j

Daftar Pustaka

- Atnaw, S. M., Sulaiman, S. A., & Yusup, S. (2013). Syngas production from downdraft gasification of oil palm fronds. *Energy*, *61*, 491-501.
- Htut, Y. M., Khine, M. M., & Win, M. M. (2015). Using a Simple Modeling and Simulation Scheme for Complicated Gasification System. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *1(12)*, 2250-3153.
- Lan, W., Chen, G., Zhu, X., Wang, X., Wang, X., & Xu, B. (2019). Research on the characteristics of biomass gasification in a fluidized bed. *Journal of the Energy Institute*, *92(3)*, 613-620.
- Raharjo, B. (2015). *Mudah belajar python untuk aplikasi desktop dan web*. Bandung, Indonesia: Informatika.
- Silva, I. P., Lima, R. M., Silva, G. F., Ruzene, D. S., & Silva, D. P. (2019). Thermodynamic equilibrium model based on stoichiometric method for biomass gasification: A review of model modifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *114(8)*, 109305.
- Tian, Y., Zhou, X., Lin, S., Ji, X., Bai, J., & Xu, M. (2018). Syngas production from air-steam gasification of biomass with natural catalysts. *Science of The Total Environment*, *645*, 518-523.
- Yahaya, A. Z., Somalu, M. R., Muchtar, A., Sulaiman, S. A., & Daud, W. R. W. (2019). Effect of particle size and temperature on gasification performance of coconut and palm kernel shells in downdraft fixed-bed reactor. *Energy*, *175*, 931-940.
- Nagar, S. (2017). *Introduction to Python for Engineers and Scientists: Open Source Solutions for Numerical Computation*. New York: Appers.
- Smith, J. M., van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2001). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. New York, USA: McGraw-Hill Higher Education.