

Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 15 NOMOR 3

Desember 2019

Strategi Pembebanan PLTS Off Grid untuk Peningkatan Kontinuitas Suplai Energi Listrik 157-161

Syafii, Yona Mayura, dan Muhardika

Rekayasa Transmitter dan Receiver untuk Sistem Komunikasi Akustik Bawah Air 162-168

Henry M Manik, Susilohadi, dan Billi R. Kusumah

Evaluasi Penerapan Metode Cell Splitting Terhadap Peningkatan Kapasitas dan Kualitas Jaringan LTE 169-176

Hasanah Putri, Febryyanti Nawang Wulan, Fiqhi Anugerah, Ainur Rizqi Aulia, dan Dhea Anjar Sari

Perancangan Struktur Kontrol Penggilingan Batubara pada Sistem Pembakaran Batubara 177-185

Stefanus Yudi Irwan, Awang N.I. Wardana, dan Ester Wijayanti

Evaluasi Inverse Kinematics untuk Robot Quadruped Menggunakan Sensor Accelerometer 186-194

Ahmad Iqbal Nasrudin, Khairul Anam, dan M. Agung Prawira N

Sistem Multi-Sensor Nirkabel Berbasis RFID untuk Pemantauan Keaktifan Siswa 195-202

Zakiah, Yuwaldi Away, Fitri Arnia, dan Andri Novandri

Strategi Pembebanan PLTS Off Grid untuk Peningkatan Kontinuitas Suplai Energi Listrik

Syafii, Yona Mayura, dan Muhardika
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang, Sumatera Barat, 25163
e-mail: syafii@eng.unand.ac.id

Abstrak—Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menggunakan teknologi yang ramah lingkungan dalam proses memanen energi dari matahari dapat menjadi solusi terhadap krisis energi listrik masa depan sehingga menjadi alternatif yang paling banyak dikembangkan dan dapat diandalkan. Namun demikian konversi energi surya sangat tergantung dari ketersediaan dan kondisi sinar matahari. Pada kondisi cerah PLTS dapat melayani beban-beban besar sekaligus mengisi baterai secara maksimal. Sedangkan pada kondisi cuaca mendung atau malam hari PLTS melayani beban dan tanpa ada pengisian baterai. Baterai akan meluahkan energi yang tersimpan sampai habis dan suplai ke beban akan terputus sebelum waktu yang diinginkan. Oleh karena itu diperlukan penelitian strategi pembebanan PLTS yang bertujuan untuk meningkatkan pasokan listrik dari energi surya dan menjaga kontinuitas suplai listrik ke beban. Strategi manajemen daya beban mengikuti ketersediaan energi matahari pada cuaca cerah, mendung, hujan atau malam hari dengan mempertimbangkan sisa kapasitas baterai yang dapat digunakan. Instalasi beban dirancang terdiri atas instalasi beban rendah, menengah dan beban tinggi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan strategi manajemen pembebanan PLTS dapat meningkatkan lama operasi PLTS. Pada saat sisa kapasitas baterai 15% dan PLN tersedia, sakelar pasokan akan dialihkan ke PLN. Sisa 15% kapasitas baterai PLTS dapat digunakan untuk mempertahankan pasokan listrik ke beban rendah sekiranya PLN padam. Dengan demikian penggunaan strategi pembebanan akan meningkatkan pasokan listrik dari energi terbarukan dan meningkatkan kontinuitas suplai energi listrik.

Kata kunci: manajemen pembebanan, PLTS off grid, peningkatan kontinuitas suplai

Abstract—Solar power plants using environmentally friendly technology in the process of harvesting energy from the sun can be a solution to the future electricity crisis so that it has been the most widely developed and reliable alternative. However, the conversion of solar energy depends on the availability and conditions of sunlight. In sunny conditions, the PV system can serve large loads while charging the battery to the maximum. While in cloudy weather conditions or at night, the PV system serves the load and without charge of the battery. The battery will discharge the stored energy until it runs out and the supply to the load will be cut off before the desired time. Therefore, research on PV system loading strategy is needed to increase the amount of electricity from solar energy and maintain the continuity of electricity supply to the load. The load power management strategy follows the conditions of sunny, cloudy, rainy or night time by considering the remaining capacity of the battery that can be used. Load installations are designed to consist of low, medium and high load installations. Simulation results show that the use of PV loading management strategies can increase the operating time of the PV system. When the remaining 15% battery capacity and PLN supply is available, the supply will be switched to PLN. The remaining 15% of PV battery capacity could be used to maintain electricity supply to a low load if the PLN supply interrupted. Thus the use of the charging strategy will increase the supply of electricity from renewable energy and improve the continuity of electricity supply.

Keywords: loading manajemen, off grid PV system, improve continuity supply

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Indonesia berada di daerah tropis dan mempunyai potensi energi surya sangat besar sekitar rata-rata 4,8 kWh/m²/hari atau setara dengan 112.000 GWp [1]. Oleh karena itu pembangkit listrik tenaga surya telah menjadi sumber energi listrik alternatif yang paling banyak dikembangkan dan dapat diandalkan [2]. Pemerintah Indonesia melalui Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014, tentang kebijakan energi nasional [3] telah menjadikan PLTS

sebagai prioritas sumber energi terbarukan yang akan dikembangkan di Indonesia untuk mencapai target EBT sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050.

Umumnya pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis menurut konfigurasi komponennya, yaitu PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik (*on grid*) dan PLTS yang berdiri sendiri (*off grid*). Komponen utama dalam PLTS on-grid adalah panel surya serta inverter yang dapat sinkron dengan grid PLN. Sistem on-grid dapat secara langsung

mengimbangi tagihan listrik. Namun sistem ini memiliki kekurangan yaitu jika listrik dari PLN terputus maka PLTS *on grid* juga akan terputus, demikian juga pada saat malam hari PLTS *on grid* akan lepas sinkron dengan sendirinya. Sedangkan sistem PLTS *off grid* dapat beroperasi mandiri untuk memasok beban DC atau AC. Sistem ini sangat sesuai untuk menjadi sumber daya listrik pada daerah terpencil yang sulit diakses oleh jaringan grid nasional [4]. Namun demikian jenis PLTS *off grid* sangat tergantung dari ketersediaan cahaya matahari dalam mencharging baterai. Pada saat matahari tidak tersedia, arus charging baterai akan berhenti, beban akan disuplai dari sisa energi listrik yang tersimpan pada baterai. Beban akan terputus pada saat sisa kapasitas baterai yang dapat digunakan habis. Sehingga isu peningkatan kontinuitas suplai listrik PLTS *off grid* menjadi penting.

Pada sistem *off grid*, kapasitas baterai harus memperhitungkan cadangan jika kondisi cuaca buruk yang berakibat pada produksi energi sinar matahari kurang optimal. Kementerian ESDM menyarankan masyarakat yang menggunakan sistem ini untuk menggunakan baterai dengan kapasitas cadangan minimal 3 hari sebagai patokan. Dengan demikian akan meningkatkan investasi baterai menjadi besar. Dengan demikian diperlukan penelitian untuk mengoptimalkan kapasitas PLTS *off grid* baik di sisi pembangkitan maupun sisi pembebanan.

II. STUDI PUSTAKA

Meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pelestarian lingkungan dan naiknya harga bahan bakar, telah merangsang para peneliti di bidang penyediaan tenaga listrik untuk terus mengembangkan sistem pembangkit listrik terbarukan yang ramah lingkungan [2]. Letak Indonesia yang berada di daerah khatulistiwa secara teoritis akan selalu disinari matahari selama 10 – 12 jam sehari dan hampir seluruh wilayah Indonesia mendapatkan intensitas penyinaran yang relatif merata [5]. Kondisi ini cukup layak untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi surya. PLT surya juga telah menjadi prioritas sumber energi terbarukan yang akan dikembangkan di Indonesia dan instalasi pembangkit ini terus meningkat di berbagai daerah dengan adanya kebijakan energi terbarukan.

Unjuk kerja dari panel surya sangat tergantung kepada sinar matahari yang diterimanya. Pada kondisi cerah panel surya dapat melayani beban-beban besar sekaligus mengisi baterai secara maksimal. Sedangkan pada kondisi cuaca mendung atau malam hari panel surya tidak mampu melayani beban dan mengisi baterai. Baterai akan meluahkan energi yang tersimpan sampai habis dan suplai ke beban akan terputus sebelum waktu yang diinginkan. Oleh karena itu diperlukan penelitian terkait teknik optimalisasi PLTS dan manajemen pembebanan sehingga kontinuitas suplai listrik tetap terjaga mengikuti ketersediaan sinar matahari.

Beberapa penelitian sebelumnya dalam mengoptimalkan kerja PLTS *off grid* telah dilakukan terutama sisi pembangkitan [6-10]. Kazem H telah

menyajikan metode untuk mendesain kapasitas optimal PLTS *off grid* untuk daerah terpencil di Sohar–Oman [7]. Model yang diusulkan dengan menemukan besar sudut kemiringan yang tepat pada pemasangan panel surya menggunakan simulasi Matlab. Hasil simulasi telah menunjukkan perbaikan kinerja sistem. Desain PLTS *off grid* untuk aplikasi rumah kaca di Kota Sabha, Libya telah dipresentasikan dalam referensi [8]. Hasil studi menunjukkan bahwa pemasangan PLTS *off grid* dapat berkompetisi dengan pembangkit diesel. Teknik optimasi lainnya untuk penghematan lahan dan pengurangan biaya investasi pembangunan PLTS [9] dan teknik menggunakan sistem pendingin pada panel surya dengan sistem *floating tracker* [10] telah dilakukan. Kedua sistem optimasi tersebut telah meningkatkan keandalan dan efisiensi pemakaian sumber energi surya.

Penelitian terkait dengan sistem mengoptimalkan pemanfaatan PLTS telah dilakukan baik pada sistem *off-grid* maupun *on-grid*. Teknik optimalisasi pemanfaatan PLTS tersebut lebih banyak dilakukan pada sisi suplai, sementara peluang konservasi energi surya dapat juga dilakukan pada sisi pemakaian. Oleh karena itu pada sisi pemakaian diperlukan sistem manajemen pembebanan PLTS untuk meningkatkan kontinuitas suplai mengikuti ketersediaan sinar matahari. Strategi manajemen pembebanan yang direncanakan mengikuti keadaan cuaca cerah, mendung, hujan atau malam hari. Instalasi beban akan diatur sedemikian sehingga ada opsi beban rendah, menengah, dan beban tinggi. Selanjutnya akan pembangunan sistem manajemen operasi pembebanan secara merata mengikuti waktu dan fungsinya secara otomatis menggunakan controller Arduino. Dengan demikian kapasitas PLTS yang tersedia dan kondisi charging panel surya tetap mampu melayani beban untuk setiap siklus tanpa ada pemutusan. Hasil rancangan sistem dan simulasi lama waktu pemakaian akan diberikan pada bagian berikutnya dari artikel ini.

III. METODE

Penelitian strategi manajemen pembebanan PLTS dilakukan pada model rancangan PLTS *off grid* skala rumah tangga 900 VA. Sistem PLTS *off grid* terdiri dari: 4 unit panel surya @ 250 Wp terpasang parallel, 1 unit inverter Luminous 1500 VA dan 2 unit baterai *deep cycle*. Spesifikasi dari Luminous Solar Inverter [11] adalah: tipe *pure sine wave*, dengan *rating* 1500 VA, waktu pengisian baterai sampai penuh: 10–12 jam dengan *rating charging*: 40 Amp/24V.

Tahapan penelitian dimulai dari uji karakteristik konversi energi pembangkit surya dan pembebanan. Dari hasil uji karakteristik konversi energi panel surya diperoleh kurva arus *charging*. Berdasarkan arus *charging* dilakukan pengembangan algoritma manajemen pembebanan. Selanjutnya dilakukan simulasi sistem manajemen pembebanan PLTS *off grid* untuk berbagai kondisi cuaca cerah, mendung, hujan dan malam hari sampai diperoleh hasil kinerja terbaik.

Model rancangan sistem otomatisasi manajemen pembebanan PLTS *off grid* skala rumah tangga seperti pada Gambar 1. Sistem manajemen operasi pembebanan mengikuti waktu dan fungsinya secara otomatis menggunakan kendali mikrokontroler Arduino. Modul sensor arus dan tegangan DC digunakan untuk memperoleh besar arus *charging* dan tegangan terminal baterai. Sisa kapasitas baterai (SKB) dapat diperoleh dari Persamaan (1) berikut:

$$V_{oc_Bat} = V_{t_Bat} + I_{beban} \times R_{in}, \quad (1)$$

dimana V_{oc_Bat} adalah tegangan *open circuit* baterai, V_{t_Bat} tegangan terminal baterai, I_{beban} adalah arus beban, dan R_{in} tahanan dalam sistem PLTS.

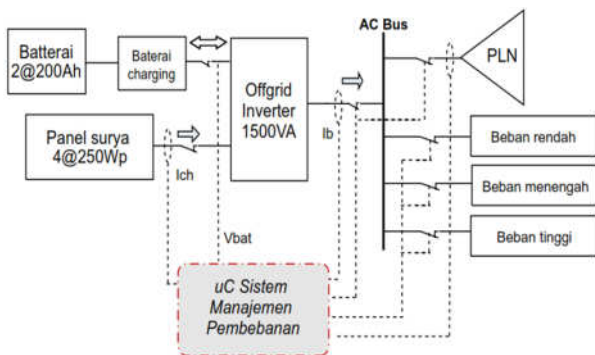
Arus beban AC (I_b) diperoleh dari pembacaan sensor PZem. Instalasi beban terdiri dari instalasi beban rendah, menengah dan tinggi seperti Gambar 1. Sebagai sakelar pemutus otomatis dapat digunakan relai 220 V yang digerakkan oleh relai 5 V berbasis kendali Arduino.

Simulasi kapasitas baterai yang tersedia mengikut kemampuan arus *charging* panel surya untuk melayani beban untuk setiap siklus tanpa ada pemutusan. Lama waktu pemakaian PLTS dihitung menggunakan Persamaan (2) berikut:

$$T_{Bat} = \frac{(C_{Bat} \times V) / 1000}{L / 1000}, \quad (2)$$

dimana C_{Bat} adalah kapasitas baterai (Ah), T_{Bat} menunjukkan lama waktu pemakaian sisa kapasitas baterai, L adalah beban (Watt), dan V tegangan baterai (Volt).

Pada makalah ini akan dipaparkan simulasi strategi pembebanan PLTS dengan kendali mikrokontroler (uC) Arduino untuk fungsi sebagai saklar pemindah otomatis PLTS dengan PLN dan fungsi manajemen pembebanan tinggi, sedang, dan rendah.



Gambar 1. Model rancangan sistem manajemen pembebanan PLTS

Tabel 1. Kapasitas Baterai *Luminous*

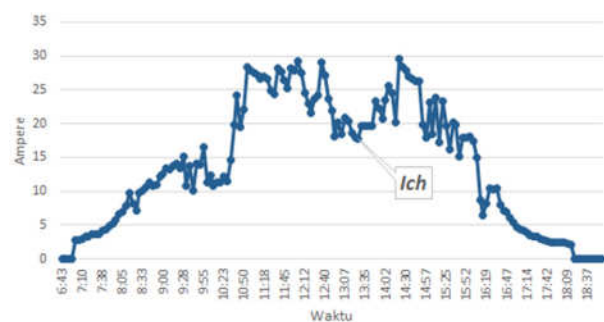
V_{Bat}	SOC (%)
22,2	0%
22,9	20%
23,6	40%
24,3	60%
25	80%
25,7	100%

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

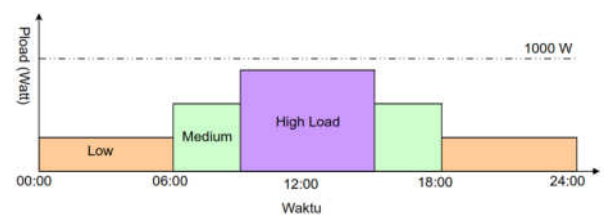
Hasil eksperimen pengukuran arus *charging* panel surya yang terpasang pada lantai 4 Gedung Jurusan Teknik Elektro untuk 4 unit panel surya 250 Wp per unit yang dipasang parallel adalah seperti Gambar 2. Kondisi cuaca pada saat pengambilan data relatif cerah. Dari kurva tersebut terlihat bahwa arus *charging* sudah mulai muncul sejak pagi setelah jam 6 dan meningkat pada tengah hari dan kembali turun menjelang sore hari sampai dengan jam 6 sore. Pada kondisi cerah sekitar jam 10.00 sampai dengan jam 14.00, arus *charging* panel surya cukup besar sehingga dapat melayani beban-beban besar sekaligus mengisi baterai secara maksimal. Namun demikian, besar arus *charging* dapat berubah dan sangat ditentukan dari keadaan cuaca. Fluktuasi arus *charging* juga terjadi karena sinar matahari terhalang oleh awan meskipun cuaca cerah.

Modul sensor tegangan DC digunakan untuk memperoleh besar tegangan terminal baterai. Resistansi internal rata-rata digunakan untuk memperkirakan status pengisian daya baterai. Sisa kapasitas baterai dapat diperoleh dari persamaan (1) seperti pada Tabel 1.

Berdasarkan kurva arus *charging* panel surya dan sisa kapasitas baterai dapat disusun pola pembebanan PLTS seperti Gambar 3. Pada saat rentang arus *charging* relatif besar di atas 20 Ampere sistem PLTS akan mampu melayani beban tinggi, Pada kondisi arus *charging* antara 10 A sampai dengan 20 A, PLTS diberi beban menengah. Sedangkan jika kurang dari 10 A maka opsi pembebanan rendah yang digunakan. Kondisi tersebut berlaku sepanjang hari seperti Gambar 3. Operasi beban tinggi dapat diperoleh pada rentang waktu jam 10:30 sampai dengan jam 13:30, beban menengah mulai jam 6:30 sampai dengan jam 10:30 dan mulai jam 13:30 sampai dengan 17:30. Sedangkan operasi beban rendah untuk kondisi malam hari sejak jam 17:30 sampai dengan jam



Gambar 2. Kurva arus *charging*



Gambar 3. Pola pembebanan harian

Tabel 2. Simulasi lama waktu pemakaian

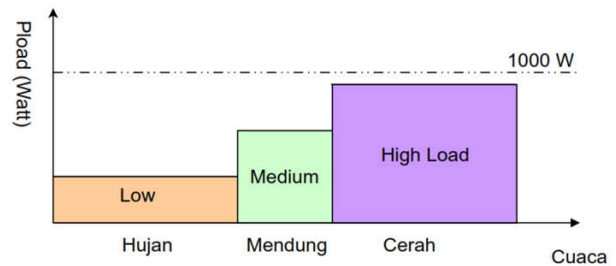
Kapasitas baterai	kWh	Beban (Watt)	Lama (Jam)
Kapasitas baterai 320 Ah			
120	2,88	750	3,84
100	2,4	500	4,8
100	2,4	250	9,6
Kapasitas baterai 260 Ah			
60	1,44	750	1,92
100	2,4	500	4,8
100	2,4	250	9,6
Kapasitas baterai 200 Ah			
NA	NA	750	0
100	2,4	500	4,8
100	2,4	250	9,6
Kapasitas baterai 150 Ah			
NA	NA	750	0
50	1,2	500	2,4
100	2,4	250	9,6
Kapasitas baterai 100 Ah			
NA	NA	750	0
NA	NA	500	0
100	2,4	250	9,6

6:30 dini hari.

Hasil simulasi lama waktu pemakaian untuk tiga jenis pembebanan rendah (250 Watt), sedang (500 Watt), dan tinggi (750 Watt) untuk beberapa kondisi kapasitas baterai seperti terlihat pada Tabel 2. Pada saat kapasitas baterai tinggal 100 Ah kondisi mendung atau menjelang malam hari, maka beban berada pada status beban rendah. Dengan pemakaian beban rendah lama waktu operasi PLTS sekitar 9,6 jam, masih kurang 1,4 jam tanpa ada pasokan listrik dari PLTS. Oleh karena itu sebagai *back up* daya listrik PLN tetap harus digunakan.

Strategi pembebanan PLTS mengikuti cuaca diperlihatkan pada Gambar 4. Pada saat kondisi cuaca mendung arus *charging* akan menurun dan semakin kecil ketika kondisi cuaca hujan. Pola pembebanan pada kondisi cuaca mendung hanya beroperasi untuk instalasi beban rendah dan menengah saja, sedangkan pada kondisi hujan instalasi beban menengah akan terputus dan yang tinggal hanya beban-beban penerangan dengan total kapasitas 250 Watt. Pada kondisi cerah arus *charging* baterai cukup besar dapat *men-charge* baterai sekaligus melayani beban-beban besar.

Rancangan sistem kendali pembebanan PLTS diharapkan dapat bekerja sesuai dengan pengaturan sisa kapasitas baterai. Sistem dirancang untuk bekerja memindahkan sakelar jika tegangan baterai PLTS kurang dari 60%, sakelar akan dialihkan ke beban menengah. Sedangkan ketika baterai PLTS lebih dari 65 %, sakelar akan kembali beralih lagi ke beban tinggi. Demikian juga ketiga kapasitas baterai kurang 30% sakelar akan dialihkan ke beban menengah. Sedangkan ketika baterai



Gambar 4. Pola pembebanan mengikuti cuaca pada siang hari

PLTS lebih dari 35 %, sakelar akan kembali beralih lagi ke beban tinggi. Pada saat sisa kapasitas baterai dan PLN tersedia, sakelar pasokan akan dialihkan ke PLN. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan keandalan selama arus *charging* baterai PLTS belum tersedia. Pada saat PLN padam, sisa 15% kapasitas baterai PLTS dapat digunakan untuk mempertahankan pasokan listrik ke beban rendah.

Durasi gangguan rata-rata sistem (SAIDI) PLN untuk 2017 adalah 14,61 jam/tahun dan indeks frekuensi gangguan rata-rata sistem (SAIFI) PLN adalah 9,69 waktu/tahun [12]. Rata-rata, durasi pemadaman PLN adalah sekitar dua jam/waktu interupsi, sehingga pengaturan 15% dari kapasitas baterai 2 @200Ah cukup untuk melayani beban rendah mengatasi pemadaman PLN. Oleh karena itu, sistem kendali pembebanan berbasis Arduino nantinya dapat meningkatkan pasokan listrik PLTS dan meningkatkan kontinuitas suplai energi listrik.

V. KESIMPULAN

Sistem manajemen pembebanan PLTS telah dirancang mengikuti kondisi cuaca cerah, mendung, hujan atau malam hari dengan mempertimbangkan sisa kapasitas baterai yang dapat digunakan. Arus *charging* baterai dan sisa kapasitas baterai menjadi parameter ukur berkerjanya sistem kendali untuk menggerakkan relai sebagai saklar pemutus beban atau sebaliknya. Pada waktu siang hari dan kondisi cuaca cerah, arus *charging* panel surya cukup besar sehingga dapat melayani beban tinggi sekaligus mengisi baterai secara maksimal. Pada waktu malam hari atau kondisi cuaca hujan tidak ada arus pengisian baterai, sisa kapasitas baterai menjadi acuan bekerjanya sakelar pemindah secara otomatis. Pada saat tegangan baterai PLTS kurang dari 60%, sakelar akan dialihkan ke beban menengah, dan pada saat kapasitas baterai kurang 30% sakelar akan dialihkan ke beban rendah. Dengan demikian kapasitas PLTS yang tersedia mengikuti kemampuan arus *charging* panel surya tetap mampu melayani beban untuk setiap siklus tanpa ada pemutusan. Suplai PLN hanya digunakan sebagai backup pada saat sisa kapasitas baterai kurang dari 15 % untuk mengantisipasi PLN padam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRPM Kemenristekdikti atas bantuan pendanaan penelitian yang diberikan melalui skema Penelitian Tesis Magister 2019

dengan No. Kontrak: T/30/UN.16.17/PT.01.0 3/PKR-EET/2019.

REFERENSI

- [1] Irawan R dan Ira F, Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Indonesia, Buku Publikasi Ilmiah BPPT, 2005, ISBN: 979-95999-5-4, Jakarta.
- [2] Chinmay K.N., Kumari K, Manas R.N., "Economical management of microgrid for optimal participation in electricity market", *Journal of Energy Storage*, vol. 21, 2019, pp: 657-664.
- [3] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014, Tetang: Kebijakan Energi Nasional, 2014 (<http://www.den.go.id/upload/ken/ppken.pdf>)
- [4] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, K. O. Akpeji, and O. O. Akinola, "Prioritized rule based load management technique for residential building powered by PV/battery system," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, 2017.
- [5] Syafii and R. Nazir, "Performance and energy saving analysis of grid connected photovoltaic in West Sumatera," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 7, no. 4, 2016.
- [6] Muammar Zainuddin dan Haditsah Annur, "Optimasi Penempatan dan Kapasitas PLTS on grid pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Metode Algoritma Genetika Multi Konstrain", *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no.1, April 2019.
- [7] Hussein A. Kazem, "Renewable and Sustainable Energy, Principles and Applications", 1st Edition, 978-3-659-46238-2, 2013, LAP LAMBERT Academic Publishing, German
- [8] Sopian K, Elbreki A.M , Ruslan M.H., Ali Najah Al-Shamani, Elhub B., Azher M. Abed, Husam Abdulrasool Hasan, Dezfouli M. M. S., "A stand-alone Photovoltaic System Design and Sizing: a Greenhouse Application in Sabha City: Case study in Libya", *Proceeding of The 3rd Engineering Science And Technology*, vol. 3, *International Conference (ESTIC)* 2016.
- [9] Campana P. E., Wästhage L., Nookuea W., Tan Y., and Yan J., "Optimization and assessment of floating and floating-tracking PV systems integrated in on- and off-grid hybrid energy systems," *Solar Energy*, vol. 177, pp. 782–795, 2019.
- [10] Miss. L. Raja Rajeswari, and Krishna Bhanu C. V., "Design of Stand-Alone Photovoltaic System – A Case Study", *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 3, no. 2, 2013, pp: 510-515.
- [11] Solar Hybrid, Inverter Luminous 1500VA, 2019 (<https://luminous.co.id/inverter/solar-hybrid/>)
- [12] Kepmen-ESDM-No.1567 K/21/MEM/2018, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2017," PT.PLN (Persero) Tahun 2018/2027, 2018.

Rekayasa Transmitter dan Receiver untuk Sistem Komunikasi Akustik Bawah Air

Henry M Manik¹, Susilohadi², dan Billi R. Kusumah³

¹Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan FPIK IPB University Kampus IPB Dramaga Bogor 16680

²Puslitbang Geologi Laut Balitbang ESDM, Jl. Dr. Djunjunan No. 236 Bandung 40174

³Fakultas Teknologi Kelautan dan Perikanan Universitas Nahdlatul Ulama, Jl. Sisingamangaraja No. 33 Cirebon 45111
e-mail: henrymanik@apps.ipb.ac.id

Abstrak—Sejak tahun 2016 telah dikembangkan teknologi deteksi sumber daya secara akustik yang relatif sederhana dan mutakhir, yaitu teknologi Penginderaan Jauh Pandu Gelombang Akustik Kelautan (*Ocean Acoustic Waveguide Remote Sensing*). Teknologi akustik dapat mendeteksi sumberdaya kelautan secara berkesinambungan tanpa merusak lingkungan. Teknologi akustik berguna untuk monitoring dan kuantifikasi target bawah air seperti sumber daya laut dan lingkungan yang dapat dilakukan secara terus menerus, berkelanjutan, *in-situ*, real time, berbiaya yang murah, dan tidak memerlukan jumlah tenaga kerja yang banyak. Penelitian ini merekayasa teknologi Penginderaan Jauh Akustik Kelautan untuk mendeteksi jarak propagasi sinyal. Langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah merekayasa sistem perangkat akustik seperti *transmitter* dan *receiver* berdasarkan sensor transduser pengirim TR-103 dan transduser penerima Benthos Aq-1. Berdasarkan hasil pengujian, rancangan *transmitter* dan *receiver* telah sesuai dengan spesifikasi besaran piezoelektrik yang terukur. Hasil pengujian pada laut terbuka di Kepulauan Seribu menunjukkan jarak deteksi propagasi sinyal *transmitter* sampai ke *receiver* mencapai 100 m.

Kata kunci: *akustik, transmitter, receiver, komunikasi, bawah air, penginderaan jauh*

Abstract—Since 2016 acoustic detection technology for marine resources had been developed which was relatively simple and sophisticated, namely Ocean Acoustic Waveguide Remote Sensing. The technology was useful for monitoring and quantifying underwater targets such as marine resources and the environment that can be conducted continuously, sustainable, *in situ*, real time, and low cost. This research had designed Ocean Acoustic Remote Sensing technology instrument to detect signal propagation range. The step taken in this research was to build an acoustic device system such as transmitter and receiver based on TR-103 transmitting transducer sensor and Benthos Aq-1 receiving transducer. Based on the experiment results, the transmitter and receiver designed was confirmed with the measured piezoelectric quantity specifications. The results at open ocean in the Thousand Islands showed the detection range of transmitter signal propagation to the receiver was 100 m.

Keywords: *acoustics, transmitter, receiver, communication, underwater, remote sensing*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan jumlah pulau sebanyak 17.504 buah dan garis pantai sepanjang 81.000 km². Disamping itu terdapat wilayah teritorial dan wilayah Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE). Dengan cakupan yang demikian besar dan luas, potensi sektor maritim diharapkan mampu memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan bagi Indonesia. Sumberdaya kelautan terdiri atas sumberdaya hayati dan non hayati laut. Untuk mengoptimalkan sumberdaya kelautan secara berkesinambungan tanpa merusak lingkungan untuk menunjang pembangunan nasional sejak tahun 2016 telah mulai dikembangkan teknologi deteksi sumber daya secara akustik yang relatif sederhana dan mutakhir, yaitu teknologi Penginderaan Jauh Akustik Kelautan (*Ocean Acoustic Waveguide Remote Sensing*) [1]. Teknologi tersebut berguna untuk monitoring dan

kuantifikasi target bawah air seperti sumber daya laut dan lingkungan yang bisa dilakukan secara terus menerus (berkelanjutan), *in situ*, *real time*, berbiaya yang murah, dan tidak memerlukan jumlah tenaga kerja yang banyak. Mengingat sumberdaya kelautan Indonesia yang besar dan perlunya pengembangan sistem pertahanan laut, maka pada penelitian ini dilakukan rancang bangun teknologi akustik bawah air berupa *transmitter*, *receiver*, dan sistem akuisisi akustik pada skala laboratorium/tangki uji dan pengujian di laut.

Penelitian ini menggunakan teknologi Penginderaan Jauh Akustik Kelautan. Beberapa kelebihan menggunakan teknologi tersebut dalam mendeteksi target adalah [2]: (1) jarak deteksi jauh (*long range detection*), (2) atenuasi kecil (*little attenuation*), (3) perolehan citra objek lebih luas dan cepat (*much larger image and fast*), (4) perolehan informasi spektral yang lebar (*broad spectral information*), (5) peningkatan deteksi target (*improved target detection*),

(6) peningkatan resolusi jarak (*improved range resolution*), dan (7) stabil dalam mengestimasi sinyal akustik (*stable estimate of acoustic signal*).

State of the art dari bidang yang diteliti adalah penggunaan teknologi *Penginderaan Jauh Akustik Kelautan* untuk deteksi suara mamalia paus sejauh 100 km dengan *hydrophone array* [3]. Hasil riset ini dikaitkan dengan pengelolaan ekosistem laut. Perkembangan sensor pada instrumen tersebut dapat digunakan untuk pemetaan jenis ikan yang mempunyai gelembung renang [4]. Pengamatan ekosistem laut dan populasi ikan secara instantaneous imaging di areal continental shelf merupakan aplikasi dari teknologi akustik [5]. Pada awal pengembangan metode akustik dilakukan untuk pengamatan populasi dan tingkah laku ikan secara jarak jauh [6]. Hal ini didasari perkembangan teknologi *Broadband* yang digunakan hanya mampu mendeteksi ikan pada arah vertikal ke arah dasar laut, sedangkan pada zona horizontal sensor tersebut tidak mampu untuk mendeteksi target. Dengan merekam energi gelombang yang kembali ini maka objek tersebut diketahui atau dideteksi [7]. Secara umum dapat dikatakan bahwa energi gelombang akustik yang diterima ini sebanding dengan tingkat kepadatan ikan yang ada dalam kolom air [8]. Semakin padat atau tinggi konsentrasi target seperti ikan dan dasar laut tersebut maka akan semakin kuat energi yang dikembalikannya [9].

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Transduser

Gambar 1 menunjukkan Transduser TR-09 dengan disertai dengan spesifikasi yang digunakan.

B. Sensor Benthos AQ-1 (Piezoelektrik silinder)

Piezoelektrik adalah bahan utama yang digunakan pada bagian ini. Piezoelektrik yang digunakan berupa silinder panjang yang terbuat dari kandungan pelat logam kuningan. Peneliti menggunakan piezoelektrik Benthos aq-1 (Gambar 2) berbentuk silinder dengan asumsi beam pattern dari sinyal tersebar secara omni-directional.

Transduser sebagai penerima signal adalah bahan piezoelektrik, menerima signal gelombang tekan yang



Gambar 1. Transduser TR-09



Gambar 2. Piezoelektrik jenis silinder (Elemen receiver Benthos AQ-1)

berasal dari *transmitter* atau yang telah terpantul oleh beberapa obyek. Transduser yang dipergunakan dalam disain ini adalah Benthos AQ-1 yang dimasukkan kedalam tabung pengedap untuk menghindarkan kontak langsung dengan air.

C. Pehitungan transmitter

Rangkaian *one shot* berfungsi menterjemahkan perintah dari Sistem Akuisisi menjadi satu bentuk pulsa positif dengan panjang pulsa yang dapat diatur. Adapun persamaan yang digunakan untuk mengatur nilai lebar pulsa adalah [10].

$$\text{Lebar pulsa (ms)} = \frac{1}{2} RC \quad (1)$$

Rangkaian *Signal Generator* berfungsi sebagai sumber sinyal yang akan digunakan. Dalam rancang bangun hanya akan dimanfaatkan untuk membangkitkan gelombang sinusoidal dengan besaran frekuensi tertentu. Adapun persamaan yang digunakan untuk mengatur nilai frekuensi generator adalah sebagai berikut [11]:

$$\text{Frekuensi (Hz)} = \frac{1}{RC} \quad (2)$$

D. Perhitungan receiver

Nilai penguatan *Pre-Amplifier* ditentukan oleh perbandingan resistor *feed back* dan resistor masukan. Adapun persamaan penguat yang diperlukan adalah sebagai berikut:

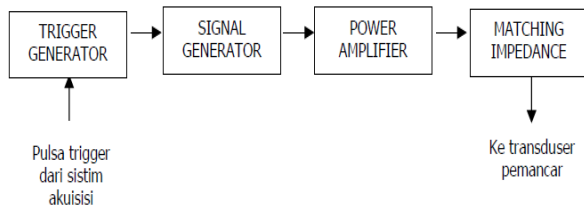
$$G = V_{in} \left(\frac{R_{in} + R_f}{R_{in}} \right) \quad (3)$$

IC LM1458 merupakan *dual operational amplifier* sehingga dapat dimanfaatkan sebagai perangkat BPF. Satu *operational* digunakan sebagai HPF dan lainnya sebagai LPF. Adapun persamaan filter yang digunakan seperti berikut:

$$f_c (\text{Hz}) = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

Tabel 1. Spesifikasi Benthos AQ-1

Spesifikasi	Deskripsi
Kapasitansi	14.5 nF
Respon frekuensi	1 Hz hingga 10 kHz
Kedalaman	1732 m
Dimensi	4.5 cm (Panjang) x 1.6 cm (diameter)
Berat	17.3 g



Gambar 3. Diagram alir sistem transmitter akustik

III. METODE

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain:

A. Pengembangan Sistem Transmitting dan Receiving

Perancangan sistem sensor transmitting dan receiving Penginderaan Jauh Akustik Kelautan dilakukan di Laboratorium Pemrosesan Sinyal Akustik Bawah Air Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan FPIK-IPB dan Laboratorium Instrumentasi Maritim Pusat Penelitian Geologi Laut, Balitbang ESDM.

a. Transmitter

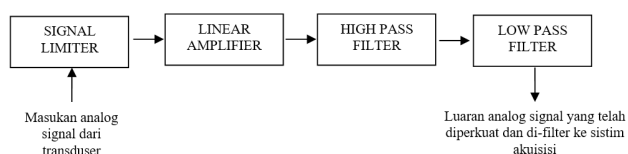
Pada bagian ini terdapat beberapa komponen penting yang tidak bisa dipisahkan satu sama lain. Bagian ini merupakan pengambil data analog berupa besaran fisik yang diindra oleh sensor. Sensor yang akan digunakan menggunakan *underwater transducer*. Pada kondisi ini besaran yang diterima oleh sensor masih bersifat analog, yakni berupa pulsa listrik (*ping*) dari hasil perubahan vibrasi sensor sonar pada bagian pengirim pulsa yang kemudian akan dikembalikan lagi oleh target dalam bentuk pulsa yang membawa informasi sesuai dengan karakteristik target. *Programmable transmit power* telah dirancang pada sistem kerja *transmitter* (Gambar 3).

b. Receiver

Data yang dikirimkan oleh *transmitter* kemudian diterima oleh *receiver*. Data yang diterima itu kemudian diidentifikasi oleh mikrokontroller dimana data tersebut harus mempresentasikan kondisi di lapangan, artinya dapat memberikan informasi target yang diamati oleh sistem *transmitter*. Data yang diterima tersebut kemudian diolah oleh *personal computer* (PC) dengan merancang terlebih dahulu *interface* atau antar muka antara PC dan sistem *receiver* (Gambar 4).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rancang Bangun Transmitter Akustik



Gambar 4. Diagram alir sistem receiver akustik



Gambar 5. Hasil rekayasa transmitter

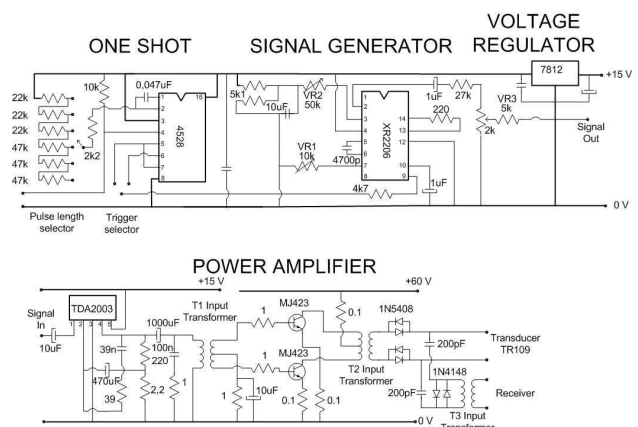
Transmitter Penginderaan Jauh Akustik Kelautan merupakan perangkat pemancar signal akustik bawah air sederhana, signal akustik dipancarkan melalui satu atau beberapa buah transduser akustik. Hasil rekayasa *transmitter* ditunjukkan pada Gambar 5.

Signal akustik *sinusoidal* dibangkitkan oleh sebuah *signal generator* yang dapat dirancang untuk memberikan luaran pada beberapa frekuensi tertentu. Pembangkitan sinyal ini dikontrol oleh *Trigger Generator* yang mendapatkan perintah dari Sistem Akuisisi. Oleh karena daya dari *Signal Generator* masih cukup rendah untuk menggerakkan *Piezoelectric Transducer* sehingga diperlukan sebuah *Power Amplifier* dan *Matching Impedance* agar transfer daya dapat terjadi dengan baik.

Detail disain *transmitter* hasil perancangan terlihat pada Gambar 6. *Transmitter* secara umum hanya membutuhkan 4 buah *Integrated Circuit* (IC), yang masing-masing berfungsi sebagai *Trigger Generator*, *Signal Generator*, dan *Amplifier* berikut *Matching Impedance Transformer* [12].

One Shot generator berfungsi menerjemahkan perintah dari Sistem Akuisisi menjadi satu bentuk pulsa positif dengan panjang pulsa yang dapat diatur. Tugas ini dilakukan oleh IC CMOS 4528 dan rangkaian RC sebagai penentu lebar pulsa. Dengan nilai kapasitor $C = 0,047 \mu\text{F}$ dan nilai resistor tetap agar dapat memberikan panjang pulsa tetap pada 0,5 ms, 1 ms, 2 ms, 3 ms, 4 ms, dan 5 ms (*Pulse length selector*). Nilai lebar pulsa tersebut sesuai dengan persamaan $\frac{1}{2} RC$. Pulsa dikeluarkan pada pin 6 atau 7, dan dipergunakan untuk mengaktifkan IC XR2206 *Signal Generator* pada pin 9.

Signal Generator menggunakan IC XR2206 yang merupakan *monolithic function generator* yang mampu menghasilkan bentuk gelombang *sinusoidal*, persegi,



Gambar 6. Skematik rangkaian transmitter

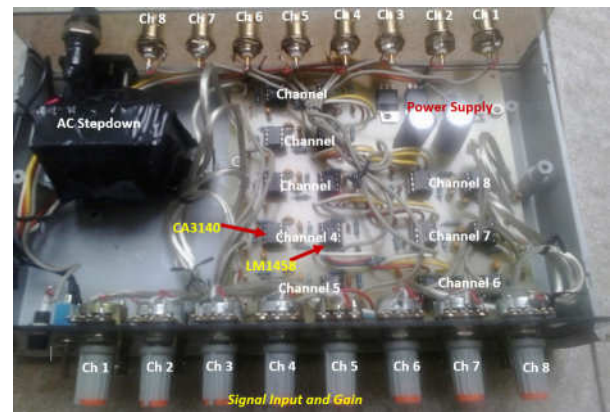
segitiga dan gigi gergaji. Namun dalam rancang bangun ini hanya dimanfaatkan kemampuannya untuk membangkitkan gelombang *sinusoidal*. Frekuensi dari gelombang ditentukan oleh kapasitor yang dihubungkan ke pin-pin 5 dan 6, dan resistor (VR2) yang dihubungkan antara 7 atau 8 dengan *massa/ground* atau catu daya negatif, dengan persamaan $F = 1/(RC)$. Dalam disain ini nilai kapasitor dibuat tetap pada $0,0047 \mu\text{F}$, sedangkan nilai resistor dibuat variabel sesuai dengan kebutuhan frekuensi antara 500 Hz hingga 20 kHz melalui sebuah variabel potensiometer. Luaran XR2206 pada pin 2, setelah melalui rangkaian pembagi tegangan dan potensio meter 5 kohm dialirkan kepada rangkaian Power Amplifier yang didasarkan pada 2 buah *power transistor* MJ423 atau MJ15015 dengan konfigurasi *push-pull*. Rangkaian tersebut didisain untuk dapat mendorong signal pada transduser TR109 yang mempunyai impedansi 125 ohm.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 8, rangkaian Power Amplifier memerlukan Input Transformer (T1) untuk menyalurkan daya dari amplifier IC TDA2003 yang dimanfaatkan sebagai pendorong (driver amplifier) bagi 2 buah power transistor MJ 423 atau MJ15015. Power Amplifier juga memerlukan Output Transformer (T2) untuk menyalurkan daya dari kedua transistor ke transduser TP109. Adapun tegangan DC yang diperlukan oleh kedua transistor untuk menghasilkan daya >100 watt adalah antara 60-70 volt DC, dengan arus >2 ampere.

Dalam disain ini digunakan power transistor MJ15015 yang banyak terdapat dipasaran Indonesia dengan kemampuan daya luaran maksimum 180 watt pada tegangan maksimum 120 volt DC dengan tegangan antara basis dan emiter transistor tidak melebihi 7 volt. Dengan demikian jumlah lilitan sekunder transformator input (T1) adalah tidak jauh berbeda dengan jumlah lilitan primer. Oleh karena daya output yang diharapkan adalah >100 watt (300 watt maksimum) dengan tegangan emiter-kolektor MJ15015 sebesar 70 volt, maka arus yang mengalir melalui transistor dapat mencapai 4,3 ampere, atau impedansi output sekitar 16 ohm.

Jumlah lilitan primer yang diperlukan adalah 2×15 gulung, sedangkan jumlah lilitan sekunder sesuai dengan perbandingan akar kuadrat impedansi transduser TR109 (125 ohm) dan impedansi output transistor (16 ohm), yaitu sebanyak 84 gulung. Pada saat daya maksimum, hasil pengukuran tegangan jatuh pada resistor 0,1 ohm yang tersambung antara tegangan positif 60/70 volt DC dengan titik tengah output transformer (CT) diperoleh nilai 0,6 volt. Hal ini berarti bahwa arus yang mengalir melalui kedua transistor MJ 15015 adalah 6 ampere, sehingga daya output transistor mencapai 420 watt.

Dari hasil-hasil pengujian Sistem komunikasi akustik bawah air terjadi reverberasi yang berlebihan. Hal ini kemungkinan disebabkan bahwa panjang pulsa yang dibangkitkan terlalu panjang pada lingkungan yang terbatas (tangki uji berbentuk lingkaran dengan diameter 4 meter). Reverberasi yang terjadi kemungkinan merupakan interaksi antara signal-signal terpantul dan yang dibangkitkan.



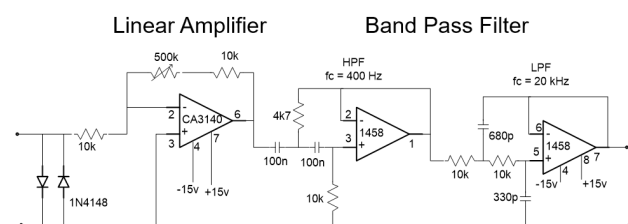
Gambar 7. Hasil rekayasa receiver

B. Perancangan receiver sinyal akustik bawah air

Seluruh komponen elektronika dirakit pada sebuah *single sided* PCB ukuran $12 \times 12,5$ cm, kecuali potensiometer pengatur gain, konektor dan transformator penurun tegangan untuk catu daya rangkaian. Untuk mengurangi *noise* (derau) shielded cable digunakan sebagai penyambung antara konektor *input/output* BNC dengan PCB, dan antara PCB dengan potensiometer. Gambar 7 memperlihatkan modul *receiver*.

Detail skematik rangkaian *receiver* hasil perancangan terlihat pada Gambar 8. Rangkaian *receiver* tersusun oleh 3 komponen aktif.

Signal dari transduser penerima dimasukkan ke Linear Amplifier melalui rangkaian pembatas tegangan yang berupa *diode ring* dan resistor 10 kohm. Dioda tersebut berfungsi membatasi tegangan signal agar tidak lebih dari 0,7 volt. IC CA3140 dikonfigurasi sebagai linear amplifier melalui resistor *feed back* 10 kohm dan potensiometer 500 kohm. Nilai penguatan ditentukan oleh perbandingan resistor *feed back* dan resistor masukan, dalam disain ini penguatan dapat diatur antara 1 hingga 500 kali. IC LM1458 merupakan dual operational amplifier (opamp) sehingga dapat dimanfaatkan sebagai BPF orde kedua, satu opamp sebagai HPF dan lainnya sebagai LPF. Rangkaian High dan Low pass filter didisain untuk memberikan lolos frekuensi antara 400 Hz hingga 20 kHz (sesuai dengan disain *transmitter*) dengan penguatan datar satu, disamping itu filter juga dimaksudkan untuk menekan derau akibat frekuensi 50 Hz yang berasal dari jala-jala listrik. Untuk itu rangkaian menggunakan konfigurasi Butterworth dengan nilai lolos frekuensi HPF ditentukan oleh nilai-nilai kapasitor 100 nF dan resistor 4,7 kohm dan 10 kohm. Nilai lolos frekuensi LPF ditentukan oleh nilai-



Gambar 8. Skematik rangkaian receiver

nilai kapasitor 680 pF dan 330 pF, dan resistor 10 kohm.

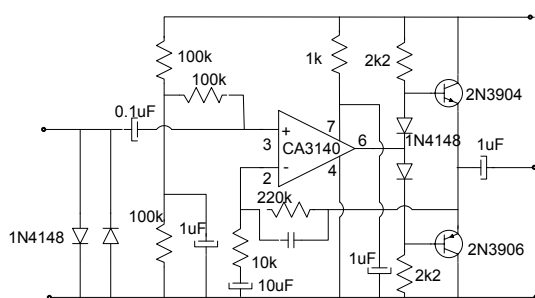
Pengujian *receiver* ditujukan untuk mengetahui unjuk kerja dan kemungkinan perlunya modifikasi rangkaian maupun disain PCB agar *receiver* dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Pengujian bersifat statis dengan fokus pengujian pada: 1) Pengujian tegangan masukan yang diperlukan oleh IC CA3140 dan LM1458 pada semua saluran, yaitu: 0, +12, dan -12 volt. 2) Pengujian besaran gain dari IC CA3140 dengan menginjeksikan signal sinusoidal dari signal generator. 3) Pengujian tanggap frekuensi HPF dan LPF dengan menginjeksikan signal sinusoidal dari signal generator pada frekuensi < 400 Hz hingga > 20 kHz. Pengujian tank test dilakukan secara terintegrasi lengkap dengan Sistim Akuisisi, *Transmitter* dan *Receiver*.

C. Modifikasi Receiver (Pre-amplifier Ekstensi)

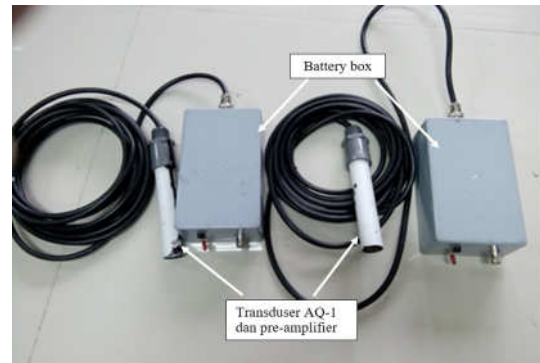
Perancangan ini dilakukan setelah diketahui kurangnya sensitifitas transduser akustik yang digunakan. Transduser yang berupa bahan piezoelektrik, menerima signal gelombang tekan yang berasal dari *transmitter* atau yang telah terpantul oleh beberapa obyek. Dalam rancangan ini transduser yang dipergunakan adalah Benthos AQ-1.

Sebuah rangkaian preamplifier kemudian ditambahkan memperkuat signal akustik dibawah 20 mVolt, sesuai dengan sensitifitas transduser piezoelektrik. Preamplifier dibuat dengan menggunakan sebuah operational amplifier yang mempunyai unjuk kerja bagus dan menghasilkan derau (noise) yang rendah. Dalam hal ini IC CA3140 digunakan mengingat impedansi masukan yang cukup tinggi sehingga tidak membebani transduser [13]. Preamplifier juga dimaksudkan untuk bisa mendorong signal yang telah diperkuat untuk mengatasi resistansi dan impedansi dari kabel transmisi yang cukup panjang. Untuk itu diperlukan penguat diskrit berupa 2 buah transistor yang saling berpasangan, 2N3904 dan 2N3906. Adapun disain preamplifier adalah seperti terlihat pada Gambar 9.

Receiver diletakkan dibawah air sehingga diperlukan *housing* agar dapat bekerja dan terhindar dari kontak langsung dengan air atau ait laut. Housing berupa pipa PVC yang dapat memuat transduser dan rangkaian preamplifier sekaligus. Rangkaian preamplifier memerlukan catu daya 9-12 volt DC yang berasal dari rangkaian beberapa buah baterai kering ukuran AA. Rangkaian baterai diletakkan di atas air dengan menggunakan sebuah *Battery Box* plastik.



Gambar 9. Rangkaian preamplifier ekstensi



Gambar 10. Hasil rekayasa preamplifier ekstensi

Hasil perakitan dapat dilihat pada Gambar 10.

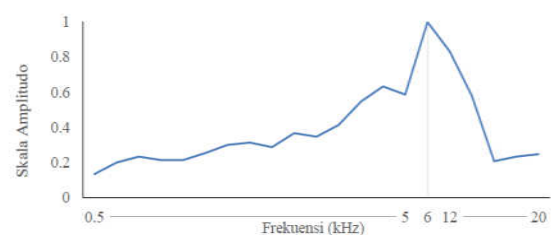
D. Hasil uji efektifitas alat

Pengujian ini dilakukan melalui pengaturan variabel resistor pada rangkaian signal generator *transmitter*. Resistor variabel pada rangkaian generator signal *transmitter* digunakan untuk mengubah nilai frekuensi. Hasil pengujian yang dilakukan pada frekuensi 500 Hz sampai dengan 20 kHz dengan jumlah pulsa tetap, menunjukkan bahwa transduser memiliki daerah kerja efektif pada kisaran frekuensi 6 kHz (Gambar 11). Merujuk pada informasi lembar data piezoelektrik Benthos Aq-1 mengenai respon frekuensi, nilai 6 kHz masuk pada kisaran rentang respon sensor. Hal ini menjelaskan bahwa rekayasa perangkat *transmitter* dan *receiver* telah sesuai dengan spesifikasi transduser [13-14].

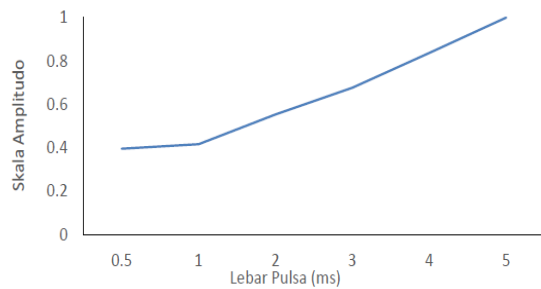
Pengujian efektifitas lebar pulsa dilakukan untuk mengetahui jumlah pulsa paling efektif, ditandai dengan amplitudo tertinggi. Pada penelitian ini dilakukan variasi lebar pulsa pada frekuensi optimal yang telah diuji sebelumnya, untuk mengetahui pulsa paling efektif (Gambar 12).

E. Uji tank test

Pengujian ini dilakukan melalui pengaturan variabel resistor pada rangkaian *one shot transmitter*. Variabel resistor digunakan untuk mengubah variasi lebar pulsa. Hasil menunjukkan bahwa lebar pulsa yang memiliki efektifitas tertinggi adalah 5 ms. Saat rancangan lebar pulsa diperbesar, ada kemungkinan akan memberikan amplitudo lebih tinggi. Namun, hal ini akan menyebabkan model reverberasi signal pada area percobaan kolam terbatas (Gambar 13).



Gambar 11. Uji respon hidrofons terhadap frekuensi



Gambar 12. Pengujian lebar pulsa efektif

Pengujian propagasi sinyal transduser bertujuan untuk melihat jangkauan jarak transmisi. Pengujian ini dilakukan pada skala laboratorium (*acoustic tank test*) dan skala tak terbatas (laut kepulauan seribu). Pengujian dilakukan pada kolam diameter 6 m, dan kedalaman air 2.8 m. Transduser (Tx) dan hidrofon (Rx) diletakan pada kedalaman yang sama (1.5 m). Instalasi antara jarak transduser (*transmitter*) dengan hidrofon (*receiver*) pada pengujian skala *tank test* sejauh 5 m. Lebar pulsa yang digunakan pada skala *tank test* hanya menggunakan lebar pulsa sebesar 1 ms. Pengaturan tersebut ditentukan dari dimensi *tank test* yang sangat terbatas, sehingga diasumsikan jika menggunakan lebar pulsa yang terlalu besar maka dampak reverberasi sinyal akan semakin besar (Gambar 13)

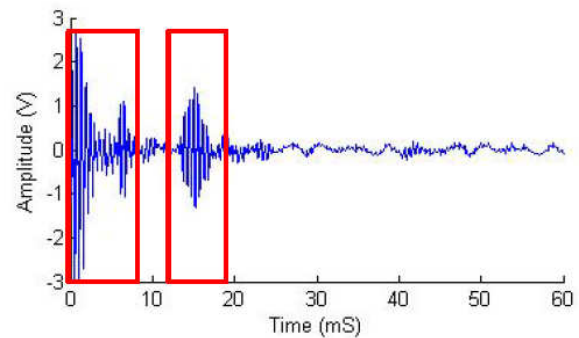
Hasil penerimaan sinyal akustik. Sinyal yang ditandai dengan kotak merah adalah hasil penerimaan sinyal suara yang dikirim oleh transduser dengan pengaturan lebar pulsa 1 ms. Lebar sinyal suara yang diterima oleh hidrofon tercatat lebih dari 1 ms, hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar sinyal yang diterima oleh hidrofon adalah sinyal dari proses reverberasi *tank test* yang terbatas (Gambar 14). Fenomena reverberasi terjadi pada ujicoba ruang terbatas. Sinyal akustik yang diterima oleh *receiver* adalah sinyal dari hasil pantulan-pantulan dinding ruang terbatas[7]. Sehingga lebar sinyal akustik yang diterima lebih panjang dari pulsa akustik yang dikirim.

F. Pengujian Propagasi Akustik di Kepulauan Seribu

Pengujian lapang dilakukan di laut terbuka di mana Transduser (Tx) dan hidrofon (Rx) diletakan pada kedalaman yang sama (2 m). Pengujian yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 15. Instalasi antara jarak



Gambar 13. Pengujian transmitter (kiri) dan receiver (kanan) di acoustic test tank Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan IPB

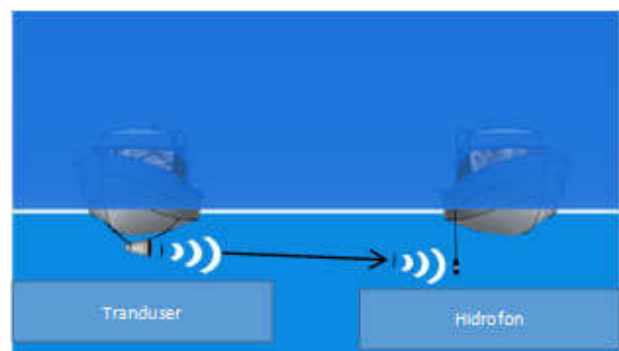
Gambar 14. Sinyal penerimaan akustik pada percobaan perairan tertutup (*tank test*)

transduser (*transmitter*) dengan hidrofon (*receiver*) pada pengujian di perairan terbuka (Laut Kepulauan Seribu) sejauh 3 m dan 75 m. Lebar pulsa yang digunakan pada skala area terbuka menggunakan lebar pulsa optimum. Pengaturan tersebut ditentukan dari dimensi area uji yang tidak terbatas, sehingga diasumsikan proses reverberasi tidak akan terjadi saat menggunakan lebar pulsa optimum.

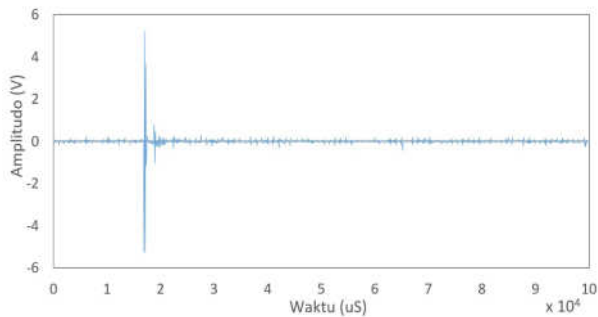
Hasil penerimaan sinyal akustik pada jarak 3 m ditunjukkan pada Gambar 15. Sinyal yang ditandai dengan kotak merah adalah hasil penerimaan sinyal suara yang dikirim oleh transduser dengan pengaturan lebar pulsa optimum (Gambar 16). Hasil penerimaan sinyal akustik pada jarak 75 m. Sinyal yang ditandai dengan kotak merah adalah hasil penerimaan sinyal suara pada ping pertama dan sinyal yang ditandai dengan kotak hijau adalah hasil penerimaan sinyal suara pada ping kedua (Gambar 17). Sinyal akustik yang dipancarkan transduser (*transmitter*) masih dapat dideteksi oleh hidrofon (*receiver*) hingga jarak 100 m. Saat jarak lebih besar dari 100 m, sinyal transduser yang diterima hidrofon akan sama bahkan lebih kecil dari sinyal lingkungan (Gambar 18).

V. KESIMPULAN

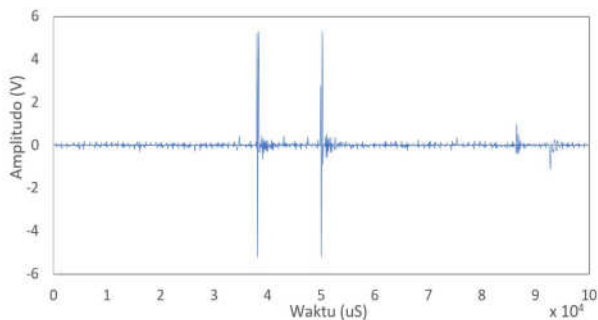
Rancang bangun sistem *transmitter*, akusisi data, dan sistem *receiver* telah berhasil dilakukan dengan baik. Rancangan *transmitter* dan *receiver* telah sesuai dengan spesifikasi besaran piezoelektrik yang terukur. Hasil pengujian di *acoustic test tank* dan di Kepulauan Seribu menunjukkan jarak deteksi propagasi sinyal *transmitter*



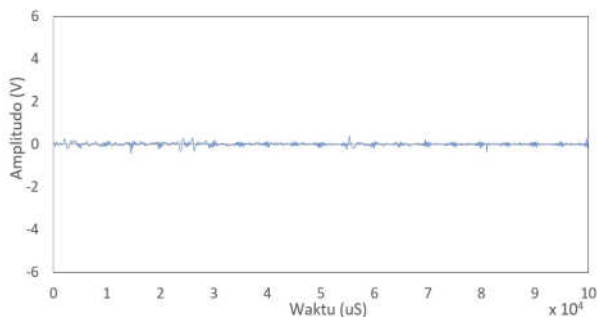
Gambar 15. Pengujian transmitter (kiri) dan receiver (kanan) di perairan terbuka



Gambar 16. Sinyal penerimaan akustik pada perairan terbuka jarak 3 m



Gambar 17. Sinyal penerimaan akustik pada perairan terbuka jarak 75 m



Gambar 18. Sinyal penerimaan akustik pada perairan terbuka jarak 100 m

sampai ke *receiver* mencapai 100 m. Untuk mendapatkan jarak yang lebih jauh diperlukan power *transmitter* yang lebih besar. Penguatan sinyal *gain*) diperlukan dalam memperkuat sinyal yang dikirim. Respon optimum berada pada resonansi frekuensi 6 kHz dan pulsa efektif berada pada 5 ms.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Ristek Dikti yang telah membiayai kegiatan penelitian. Laboratorium Pemrosesan Sinyal Akustik Bawah Air Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan FPIK IPB dan Tim Reviewer yang memberikan komentar/saran terhadap paper tersebut.

REFERENSI

- [1] H.M. Manik, Susilohadi, B.R. Kusumah, A.Dwinovantyo, S.Solikin, "Designing ocean acoustic waveguide remote sensing for target detecting and tracking". *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 1075 pp. 012058, 2018.
- [2] H.M. Manik, "Acoustical measurement and Biot model for coral reef detection and quantification." *Advances in Acoustics and Vibration*, 2016.
- [3] Z. Gong, A.D. Jain, D. Tran, D. H. Yi, F. Wu, A. Zorn, P Ratilal, and N. Makris, "Ecosystem Scale Acoustic Sensing Reveals Humpback Whale Behavior Synchronous with Herring Spawning Processes and Re-Evaluation Finds No Effect of Sonar on Humpback Song Occurrence in the Gulf of Maine." 2006. *PLoS ONE* 9, no.10, pp. e104733.
- [4] H.M. Manik, "Seabed identification and characterization using sonar". *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.
- [5] I.Jagannathan, D. Bertsatos, T. Symonds, H.T. Chen, A. Nia, M. Jain, Z. Andrews, R. Gong, L. Nero, M. Ngor, M., Jech, O. R., Godo, S., Lee, P. Ratilal, & N. Makris, "Ocean Acoustics Waveguide Remote Sensing (OAWRS) of Marine Ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 2009. (395), pp. 137-160.
- [6] N. Makris, P., Ratilal, D., Symonds, S., Jagannathan, S., Lee, & Nero, R. W. "Fish Population and Behavior Revealed by Instantaneous Continental-Shelf-Scale Imaging". *Science*, 2006. 311, pp. 660-663.
- [7] W.S. Burdic. *Underwater Acoustic System Analysis*. 1991. New York: Springer-Verlag.
- [8] H.M. Manik, "Underwater acoustic detection and signal processing near the seabed". *Sonar System*, 2011, pp. 255-274.
- [9] Exar, XR-2206. (1997). Monolithic Function Generator. Exar Corporation, Fremont.
- [10] Fink D. *Electronics Engineers' Handbook*. McGraw Hill. 1975.
- [11] Exar. *Monolithic Function Generator*. Exar Corporation: Fremont. 1997.
- [12] B.R. Kusumah, I. Jaya, H.M. Manik, Susilohadi, "Engineering of acoustic technology for underwater positioning object". *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, vol. 10, hal. 629 – 637, Desember 2018.
- [13] Stage, MOSFET Input, et al., "4.5 MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/Bipolar Output", 1998.

Evaluasi Penerapan Metode Cell Splitting Terhadap Peningkatan Kapasitas dan Kualitas Jaringan LTE

Hasanah Putri, Febryyanti Nawang Wulan, Fiqhi Anugerah, Ainur Rizqi Aulia, dan Dhea Anjar Sari
Fakultas Ilmu Terapan, Telkom University
Jalan Telekomunikasi No.1, Terusan Buah Batu, Bandung 40257
e-mail: hasanahputri@tass.telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Berdasarkan hasil *survey* dan *drivetest* di Jalan Karawitan Bandung - Indonesia diperoleh nilai parameter radio yang termasuk buruk bila mengacu pada standar *Key Performance Indicator* (KPI) Operator. Parameter yang diamati yaitu *Reference Signal Received Power* (RSRP) < -90 dBm, *Signal to Interference Noise Ratio* (SINR) < 5 dB, dan *throughput* < 800 Mbps. Wilayah ini merupakan wilayah *potential market* dimana terdapat tempat wisata, perniagaan, perkantoran, dan perumahan. Selain itu berdasarkan data *Operating Support Systems* (OSS) menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara trafik user dan kapasitas sel yang berpengaruh pada kualitas jaringan. Selain itu pula terdapat *customer complaint* untuk kualitas jaringan *Long Term Evolution* (LTE) di area perkantoran. Pada artikel ini dilakukan perencanaan *cell splitting* untuk meningkatkan kapasitas dan kualitas jaringan LTE menggunakan *software Atoll 3.3*. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa terjadi peningkatan performansi jaringan yaitu nilai RSRP meningkat sebesar 13,32%, SINR meningkat sebesar 52,75%, dan *throughput* meningkat sebesar 236%.

Kata kunci: *cell splitting, jaringan LTE, Atoll 3.3, Bandung, kapasitas dan kualitas*

Abstract—Based on the results of the survey and *drivetest* on Jalan Karawitan Bandung - Indonesia, the value of radio parameters is considered poorly accepted by the Standard Operator Performance Indicator (KPI) standards. The parameters observed were *Reference Received Power* (RSRP) < -90 dBm, *Signal to Interference Noise Ratio* (SINR) < 5 dB, and *throughput* < 800 Mbps. This region is a *potential market region* including tourist attractions, businesses, offices, and housing. In addition, based on data from the *Operating Support System* (OSS), there is an imbalance between traffic users and cell capacity that supports network quality. In addition, there are customer complaints about the quality of the *Long Term Evolution* (LTE) network in the office area. In this article cell separation planning is carried out to increase the capacity and quality of LTE networks using *Atoll 3.3* software. The results of planning show that an increase in network performance is the value of RSRP increased by 13.32%, SINR increased by 52.75%, and *throughput* increased by 236%.

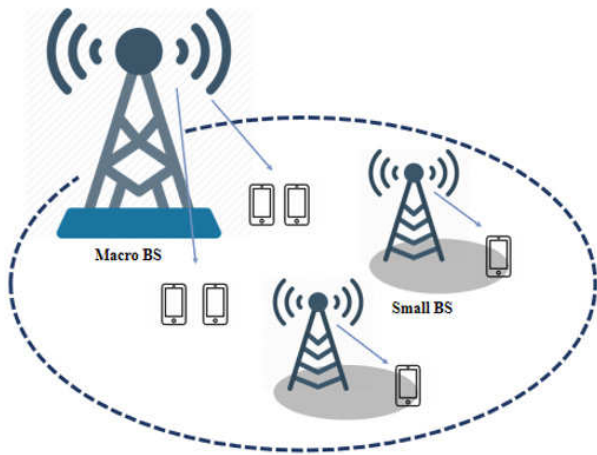
Keywords: *cell splitting, LTE network, Atoll 3.3, Bandung, capacity and quality*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa ElektriKa. All right reserved

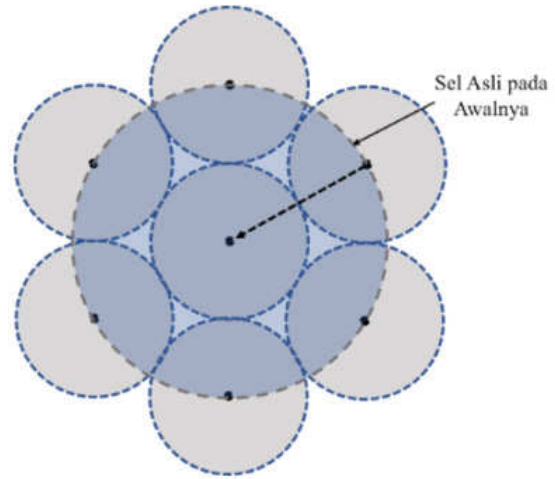
I. PENDAHULUAN

Studi kasus penelitian dilakukan di Jalan Karawitan dan Jalan Kebon Kopi, Bandung, Indonesia. Kedua wilayah ini termasuk area yang besar di kota Bandung. Di sekitar area terdapat tempat wisata, perniagaan, perkantoran, dan perumahan. Hal ini menjadikan wilayah tersebut termasuk *potential market area*. Dari hasil *drive test*, diperoleh nilai parameter *radio frequency* (RF) yang buruk. Selain itu, berdasarkan hasil identifikasi data *Operating Support System* (OSS) yang berawal dari adanya *customer complain* menunjukkan adanya ketidakseimbangan antara trafik user dan kapasitas sel yang berpengaruh pada kualitas dan *throughput* jaringan. Akan tetapi, di wilayah tersebut tidak memungkinkan untuk dibangun *tower macrocell* karena membutuhkan lahan yang cukup luas dan biaya

yang tidak murah, serta Izin Mendirikan Bangunan (IMB) sulit diperoleh. Ada tiga langkah dalam meningkatkan kapasitas jaringan seluler. Langkah pertama, yaitu dengan menerapkan ukuran sel yang lebih kecil dengan membangun *base station* baru dan memperkecil ukuran tiap selnya yang sudah ada. Langkah kedua, yaitu dengan meningkatkan *bandwidth*. Langkah terakhir, yaitu dengan meningkatkan ataupun memperbarui teknologi komunikasi yang sedang digunakan [1]. Namun, langkah kedua dan ketiga tidak mungkin dilakukan karena keterbatasan *spektrum frekuensi* yang dimiliki oleh operator dan pembaharuan teknologi yang memakan waktu yang cukup lama dalam segi proses dan pengimplementasiannya. Melihat kondisi tersebut, langkah paling efektif yang dapat dilakukan adalah dengan menerapkan ukuran sel yang lebih kecil yaitu membangun *microcell*. Adapun prinsip



Gambar 1. Perbandingan macrocell dan microcell



Gambar 2. Skema microcell

kerja dari *cell splitting* sendiri adalah dengan memecah sel makro menjadi beberapa sel kecil dan menempatkannya di antara sel yang sudah ada. Setiap pecahan ini memiliki *site* sendiri dengan tinggi antenna dan daya pancar yang lebih rendah [2]. Semakin banyak pecahan sel, semakin banyak pula *site* yang dihasilkan sehingga akan menambah jumlah kanal yang berdampak pada semakin besar pula kapasitas trafiknya. Pada [3] dilakukan peningkatan kapasitas sistem selular dengan cara memperkecil dimensi sel dengan tujuan untuk memperbaiki nilai SNR. Sedangkan pada [4] dilakukan *cell splitting* menjadi *micro cell*, *pico cell*, dan *femto cell* dengan mengamati parameter SNR. Parameter-parameter yang dianalisis pada penelitian ini diantaranya yaitu RSRP, SINR, dan *throughput*

II. STUDI PUSTAKA

A. Microcell

Perencanaan *microcell* merupakan salah satu teknik dalam optimasi jaringan RF dengan cakupan yang lebih kecil yaitu berkisar antara 500 m – 1000 m dengan daya pancar lebih rendah dibandingkan *macrocell*, yaitu tidak lebih dari 38 dBm atau 5 Watt. Salah satu faktor penentu radius dari *microcell* sendiri adalah ketinggian antenanya yang tidak lebih dari 30 m. Hal ini disebabkan karena dalam perencanaannya antenna *microcell* dibangun di atas gedung atau hanya dipasang pada sebuah tiang atau *pole* [5]. Gambar 1 merupakan ilustrasi perbandingan antara cakupan *macrocell* dan *microcell*.

Dalam permasalahan *capacity overload*, *small cell* atau *microcell* dapat meningkatkan ketersediaan kanal pada suatu wilayah [6]. Gambar 2 merupakan ilustrasi peningkatan ketersediaan kapasitas pada suatu wilayah dengan ukuran sel yang lebih kecil.

Jika setiap sel diperkecil dengan jangkauan radius setengah dari radius sel awal maka untuk mencakup keseluruhan wilayah yang sama, dengan sel-sel yang lebih kecil ini membutuhkan sekitar empat kali dari jumlah sel semula. Hal ini dapat digambarkan dengan Persamaan (1), (2), dan (3).

$$\text{Radius sel baru} = \frac{\text{Radius sel lama}}{2}, \quad (1)$$

$$\text{Area sel baru} = \frac{\text{Area sel lama}}{4}, \quad (2)$$

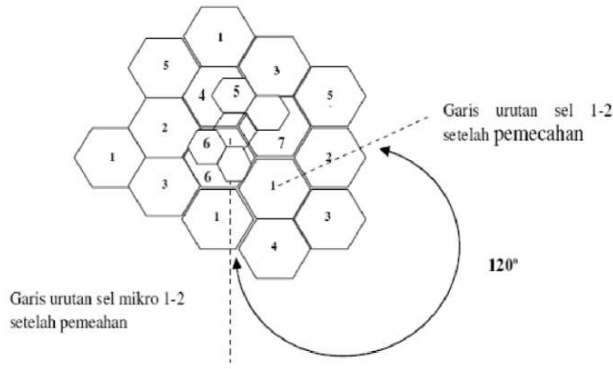
$$(\text{Bebantrafik baru}) / \text{area} = 4 \times \text{Bebantrafik lama} / \text{area}. \quad (3)$$

Jika suatu wilayah dengan luas tertentu dapat dicakup oleh sebuah *macrocell*, maka dengan luas wilayah yang sama, *microcell* dapat dibangun untuk membantu menambah kapasitas jaringan. Ukuran sel yang lebih kecil juga dikhususkan untuk titik-titik wilayah yang memiliki trafik yang tinggi. Sehingga untuk mengatasi permasalahan kapasitas, operator menggunakan *small cell* atau *microcell* sebagai pengganti dari *macrocell* [7]. Jumlah sel yang semakin banyak membuat kapasitas trafik sistem juga semakin bertambah. Ukuran sel yang semakin kecil akan meningkatkan kapasitas trafik karena dengan semakin kecil cakupan sel maka akan menambah jumlah *site* kemudian akan menambah jumlah *cluster*. Meningkatnya jumlah *cluster* akan meningkatkan jumlah kanal yang berarti meningkatkan kapasitas trafik [8]. Sehingga *microcell* dalam perencanaannya bertujuan untuk meningkatkan kapasitas serta mengatasi *bad spot* maupun *blank spot* [9].

B. Cell Splitting

Cell splitting merupakan metode pemecahan sebuah sel besar dengan intensitas komunikasi yang padat menjadi sel-sel yang lebih kecil dan menempatkannya diantara sel-sel yang sudah ada. Setiap sel pecahan ini masing-masing memiliki *Base Station* (BS) sendiri dengan daya pancar dan ketinggian antenna yang lebih rendah. Dengan menggunakan metode ini, kapasitas sistem selular dapat ditingkatkan dengan bertambahnya jumlah kanal per satuan wilayah karena metode ini akan membentuk sel baru dengan pola perulangan yang mengikuti pola aslinya [10].

Dalam penerapan metode ini, tidak semua sel dipecah menjadi sel yang lebih kecil karena sangat tidak mungkin



Gambar 3. Metode cell splitting

mencari kondisi ideal untuk melakukan pemecahan sel. Pemecahan sel yang semakin banyak dapat membuat sistem menjadi lebih kompleks, seperti pengaturan jarak minimum untuk memperoleh *Carrier to Interference* (C/I) yang optimal serta faktor *handover*. Semakin kecil jarak antar sel maka semakin kompleks proses *handover* untuk pengguna yang bergerak dengan kecepatan tinggi [11].

Gambar 3 mengilustrasikan contoh model pemecahan sel. Perbatasan antara sel nomor 4, nomor 6, dan nomor 7 akan dipecah menjadi sel kecil, karena di sekitar lokasi tersebut trafiknya sudah terlalu padat. Dengan model kluster tujuh ($K=7$), dan mempertimbangkan jarak pisah yang relatif seimbang terhadap sel-sel tetangganya, maka sel pecahan ini diberi nomor 1. Sudut yang dibentuk oleh garis lurus yang ditarik antara sel nomor 1 dan sel nomor 2 pada sel semula dan pada garis lurus yang ditarik antara *microcell* nomor 1 dan *microcell* nomor 2 (sel baru hasil pecahannya) tetap membentuk sudut 120° . Arah putar urutan sel nomor 1 sampai dengan 7 tetap sama, yakni searah jarum jam [12]–[13].

Apabila P_{t0} merupakan daya yang dipancarkan oleh BS pada *macro cell* (sel yang belum dipecah), sedangkan P_{t1} merupakan daya yang ditransmisikan oleh BS pada sel-sel pecahannya dan γ menyatakan eksponen redaman lintasan yang berada pada rentang 2 sampai 5, apabila kurang dari 2 termasuk kondisi *free space*. Maka, daya yang diterima (P_r) di batas-batas tepi sel dinyatakan dengan persamaan (4) dan (5) berikut (dimana α konstanta),

$$P_r(\text{batas tepi sel lama}) = \alpha P_{t0} R_0^{-\gamma}, \quad (4)$$

$$P_r(\text{batas tepi sel baru}) = \alpha P_{t1} \left(\frac{R_0}{2}\right)^{-\gamma}. \quad (5)$$

Untuk tipe *mobile radio environment*, $\gamma = 4$ daya yang diterima diatur sehingga besarnya sama antar satu dengan lainnya. Selanjutnya dari Persamaan (4) dan (5) tersebut didapatkan Persamaan (6) berikut,

$$P_r = \frac{P_{t0}}{16}. \quad (6)$$

Dengan kata lain, daya yang dipancarkan oleh sel baru harus diperkecil 12 dB (nilai ini diperoleh dari) untuk mengisi cakupan wilayah asli dengan *microcell*. Saat *cell splitting* dilakukan, nilai jarak dari faktor *frequency reuse*

selalu konstan. *Traffic load* dapat meningkat sebanyak empat kali di area yang sama setelah sel asli dipecah menjadi empat sel baru. Kemudian sel baru ini dipecah kembali menjadi sel lebih kecil yang mengakibatkan *traffic load* meningkat sebanyak 16 kali. Ketika pemecahan ini terus berlanjut maka Persamaan (7) adalah persamaan umum yang digunakan untuk menghitung *traffic load*.

$$TL_{acs} = (4)^n \times TL_{scs}, \quad (7)$$

dimana,

TL_{acs} = *Traffic Load* setelah cell splitting

TL_{scs} = *Traffic Load* sebelum cell splitting.

Nilai n adalah berapa kali pemecahan sel tersebut dilakukan. Jika $n = 4$, artinya sel asli terpecah menjadi 4 sel, dari sel baru ini akan terpecah lagi hingga 4 kali pemecahan. Sehingga *traffic load* menjadi 256 kali lebih besar dari *traffic load* sel asli.

III. METODE

Penelitian ini dikerjakan secara sistematis sesuai dengan pedoman perencanaan provider seluler. Beberapa data pendukung, seperti *engineer parameter site existing*, data OSS, dan standar *KPI* operator, serta data penduduk wilayah perencanaan dijadikan sebagai acuan dalam membangun *microcell* dengan penerapan *cell splitting* dan disimulasikan dengan *software* Atoll 3.3. Hasil akhir dari penelitian ini adalah menganalisis dan membandingkan kondisi jaringan di wilayah perencanaan sebelum dan sesudah merancang *microcell* menggunakan metode *cell splitting*. Adapun parameter-parameter yang dianalisis antara lain RSRP, SINR, dan *throughput* yang didapat setiap *user* saat mengakses jaringan.

A. Identifikasi Spesifikasi Microcell

Sebelum melakukan perencanaan, terlebih dahulu menentukan wilayah objek yang memiliki permasalahan jaringan. Hal ini berawal dari adanya laporan keluhan *user* sehingga selanjutnya dapat diidentifikasi apakah benar jaringan di wilayah terkait dalam kondisi buruk. Berdasarkan hasil survey wilayah ini digolongkan sebagai wilayah *urban* karena bangunan tinggi dan hambatan yang mempengaruhi kualitas sinyal terima yang cukup banyak. Dari data kependudukan, sekitar area studi kasus, dapat dispesifikasikan pengguna operator 3 melalui piramida *forecasting number of user* untuk periode akhir Maret 2019 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Setelah diperoleh jumlah pengguna LTE tahun 2019, selanjutnya dilakukan estimasi kembali untuk lima tahun ke depan, yakni tahun 2024 (diperlihatkan pada Tabel 2) dari jumlah pengguna tahun 2019 untuk melihat peningkatan pengguna yaitu menggunakan Persamaan (8).

$$a(hm)(urban) = (1,1 \log(f) - 0,7)hm - (1,56 \log(f) - 0,8). \quad (8)$$

Setelah diperoleh persentase kenaikan jumlah pengguna

Tabel 1. Estimasi pengguna operator pada bulan maret 2019

Estimasi Pengguna LTE Operator 3 Bulan Maret		
Parameter	Persentase (%)	Jumlah (Jiwa)
Total Populasi Penduduk	100	5.249
Populasi Produktif (15-65 tahun)	80	4.195
Pengguna Telepon Seluler	100	4.195
Pengguna Operator 3	7	295
Pengguna LTE	52	151

Tabel 2. Estimasi peningkatan pengguna operator pada 2024

Persentase Kenaikan Pengguna Operator 3		
Parameter	Variabel	Nilai
Pengguna LTE (2019)	P0	151 jiwa
Laju Pertumbuhan Penduduk	r	1,34 %
Rentang Tahun	t	5 tahun
Pengguna LTE (2024)	Pn	161 jiwa
Persentase Kenaikan (2019 -2024)	-	7 %

pada tahun 2024, selanjutnya mendapatkan *existing site*. Data ini didapat dari data *engineering parameter* operator jaringan seluler yang merupakan kumpulan informasi mengenai identitas *site*, mencakup *longitude*, *latitude*, *antenna height*, *azimuth*, *tilting*, dan lain-lain. Dalam perencanaan *cell splitting* ini, melibatkan beberapa *existing site*. Letak *existing site* area perencanaan ditunjukkan pada Tabel 3 dan kondisi *existing site* ditunjukkan pada Tabel 4.

Setelah mengetahui letak dan kondisi *existing site* dari data *engineering parameter*, kemudian dilakukan impor data-data tersebut pada *software Atoll 3.3*.

Sebelum mensimulasikan *site existing*, terlebih dahulu dilakukan pembatasan wilayah perencanaan. Pada Gambar 4 terdapat area yang dibatasi dengan garis merah dan garis hijau. Garis merah disebut dengan *computation zone* yang berarti area yang akan dikalkulasikan dalam simulasi prediksi, sedangkan garis hijau disebut dengan *focus zone* yang berarti area yang akan difokuskan dalam simulasi.

Hasil simulasi tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 7.

Dari hasil simulasi untuk parameter RSRP (Gambar 5) pada *focus zone* diperoleh 2,81 % cakupan pada rentang > -90 s.d. -80 dBm, 90,97 % cakupan berada pada rentang nilai > -100 s.d. -110 dBm, dan 6,23 % cakupan berada pada rentang nilai > -110 s.d. -100 dBm. Nilai rata-rata simulasi yang diperoleh pada *focus zone* sekitar -94,71 dBm dan pada *computation zone* 88,28 dBm.

Dari hasil simulasi SINR (Gambar 6) pada *focus zone* diperoleh 6,35 % cakupan berada pada rentang nilai > 12 dB, 38,78 % cakupan berada pada rentang nilai > 8 s.d. 12 dB, 37,86 % cakupan berada pada rentang nilai > 5 s.d. 8 dB, dan 17,01 % cakupan berada pada rentang nilai > 0

Tabel 3. Letak *existing site*

Site ID	Site Name	Longitude	Latitude
100501	MaskumambangTurangga	107.626553	-6.934611
103185	XL-Buahbatu	107.630742	-6.942614
600970	Regol-Cigereleng	107.62486	-6.93944
106629	Jatimulya-Gumuruh	107.63663	-6.94285

Gambar 4. Letak *existing site* by Atoll 3.3Gambar 5. Hasil simulasi *existing site* parameter RSRP

s.d.. 5 dB. Nilai rata-rata simulasi yang diperoleh pada *focus zone* sekitar 7,81 dB dan pada *computation zone* diperoleh 10,53 dB.

Dari hasil simulasi *throughput* (Gambar 7) pada *focus zone* diperoleh 43,57 % cakupan berada pada rentang nilai > 800 s.d. 1.000 kbps dan 56,43 % cakupan berada pada rentang nilai > 100 s.d. 800 kbps. Nilai rata-rata simulasi *throughput* yang diperoleh pada *focus zone* sekitar 664,54 kbps dan *computation zone* diperoleh 664,49 kbps.

Setelah diperoleh nilai RSRP, SINR, dan *throughput*, selanjutnya dilakukan *initial drive test* untuk mengetahui performansi jaringan secara *real time* di suatu wilayah. Hasil pengukuran diperlihatkan pada Gambar 8. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa di area ini kualitas sinyal terima *user* termasuk kategori buruk.

Setelah dilakukan *initial drive test* dilakukan identifikasi OSS. Identifikasi OSS ini dilakukan dengan menganalisis kepadatan trafik sebuah *site* secara *real time* sehingga dapat diketahui *site* maupun sektor yang sedang bermasalah. Gambar 9 memperlihatkan *existing transmitter* di sekitar area perencanaan.

Berdasarkan grafik pada Gambar 10 diperoleh

Tabel 4. Kondisi *existing site*

Cell Name	Height Antenna (m)	Azimuth	Mechanical Tilt	Electrical Tilt
100501_MaskumambangTurangga-4G-1	30	45	6	2
100501_MaskumambangTurangga-4G-2	30	195	4	2
100501_MaskumambangTurangga-4G-3	30	260	4	2
103185_XL-Buahbatu-4G-1	28	30	3	3
103185_XL-Buahbatu-4G-2	28	150	3	4
103185_XL-Buahbatu-4G-3	28	240	3	4
600970_Regol-Cigereleng-4G-1	24	80	5	3
600970_Regol-Cigereleng-4G-2	24	260	1	2
600970_Regol-Cigereleng-4G-3	24	330	3	4
106629_Jatimulya-Gumuruh-4G-1	26	60	2	4
106629_Jatimulya-Gumuruh-4G-2	26	160	3	7
106629_Jatimulya-Gumuruh-4G-3	26	300	2	5



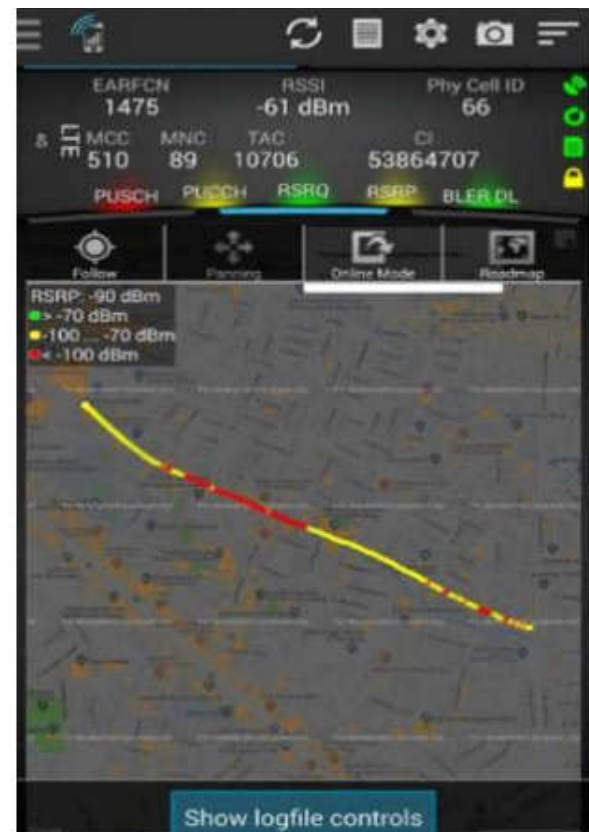
Gambar 6. Hasil simulasi *existing site* parameter SINR

nilai rata-rata *throughput* sektor 1 Regol-Cigereleng (6009701), yaitu sebesar 136,49 kbps dari sisi *downlink* dan 168,19 kbps dari sisi *uplink*. Nilai tersebut tentunya sangat jauh dari standar Operator. Dari data tersebut terlihat bahwa sektor tersebut mengalami *user overload* yang berdampak pada penerimaan *throughput* yang rendah. Dari proses ini dapat disimpulkan bahwa sektor 1 Regol-Cigereleng (6009701) perlu dilakukan pemecahan kapasitas agar dapat meningkatkan *throughput* di daerah cakupan sektor tersebut. Selain itu, identifikasi ini juga sebagai acuan penentuan batasan wilayah perencanaan, khususnya *focus zone*.

Dalam penentuan peletakan *microcell*, identifikasi *Timing Advance* (TA) sangat berperan untuk mendapatkan titik yang tepat dalam meletakkan *microcell* dari jumlah akses terbanyak pada jarak tertentu. Dengan peletakan



Gambar 7. Hasil simulasi *existing site* parameter *Throughput*



Gambar 8. Hasil *initial drive test*

microcell yang tepat dapat meningkatkan performansi jaringan, baik dari sisi kualitas maupun kecepatan. Berdasarkan identifikasi TA, diperoleh hasil bahwa jumlah akses terbanyak atau pengguna tertinggi dari sektor 1 Regol-Cigereleng (6009701) berada pada rentang jarak 234 m sampai 546 m, yaitu sekitar 10.212 sampai 10.736 pengakses. Informasi mengenai *measurement sample* pada TA ini dapat ditunjukkan pada Tabel 5. Dari proses ini, dapat disimpulkan bahwa posisi tepat *microcell* dapat diletakkan pada jarak antara 234 m sampai 546 m dari sektor 1 Regol-Cigereleng (6009701).

B. Perhitungan Coverage dan Capacity Planning

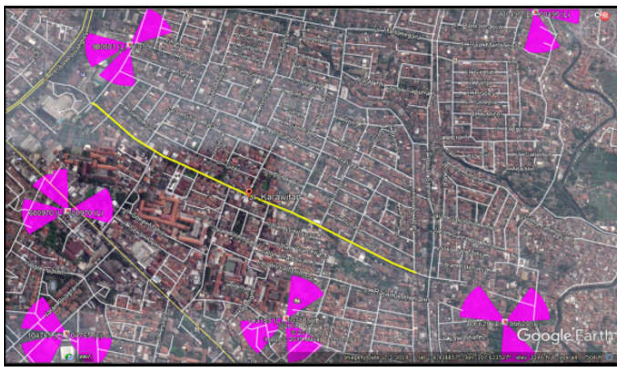
Sebelum melakukan perencanaan *microcell* diperlukan jumlah sel hasil pemecahan dari sel makro. Terdapat dua pendekatan untuk memperoleh jumlah sel ini, yaitu

Tabel 5. *Measurement sample* dari TA

Transmitter Name	Measurement Sample In Timing Advance					
	Distance (m)					
	0	78	234	546	1014	1950
Regol-Cigareng-1	671	5.487	10.736	10.212	211	31

Tabel 6. Spesifikasi Sektor 1 Regol-Cigareng

Spesifikasi Sektor 1 Regol-Cigareng		
Parameter	Unit	Spesifikasi
Klasifikasi Wilayah Perencanaan	MHz	1800
Luas Wilayah Perencanaan	MHz	10
Frekuensi Kerja	°	107.629669
Bandwidth	°	-6.939221
Tinggi Antena	m	17
Jumlah Antena	Buah	3
Daya	dBm	38



Gambar 9. Existing transmitter di sekitar area perencanaan

coverage planning dan *capacity planning* menggunakan spesifikasi dari sel makro yang mengalami permasalahan jaringan, yaitu Sektor 1 Regol-Cigareng. Spesifikasi tersebut dapat ditunjukkan pada Tabel 6 berikut ini.

Berdasarkan perhitungan *link budget* pada sisi *downlink* dan *uplink* didapatkan nilai *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL) *uplink* sebesar 139,566 dB dan *downlink* sebesar 144,648 dB. Hasil perhitungan berdasarkan *coverage planning* ditunjukkan pada Tabel 7.

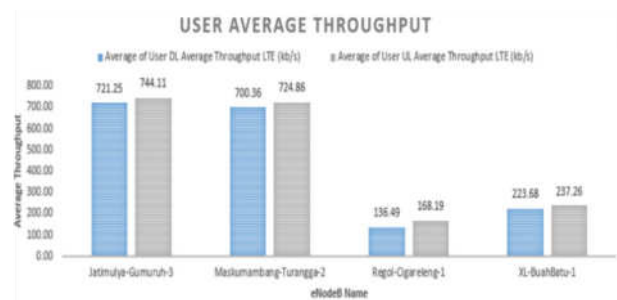
Berdasarkan hasil perhitungan tersebut diperoleh jumlah sel pada sisi *uplink* sebanyak 0,091 dan sisi *downlink* sebanyak 0,047 yang kemudian keduanya dibulatkan menjadi 1 (satu). Sedangkan berdasarkan pendekatan *capacity planning* dilakukan untuk memperoleh jumlah *site* berdasarkan jumlah pengguna yang berada di wilayah perencanaan. Perhitungan ini juga melalui beberapa tahapan diantaranya mengestimasi jumlah pengguna yang akan dilayani, mempersiapkan standar layanan dan trafik untuk kebutuhan perhitungan, memperhitungkan *throughput* untuk setiap layanan, memperhitungkan *throughput* yang akan diperoleh setiap pengguna dan keseluruhan pengguna, serta memperhitungkan kebutuhan

Tabel 7. Hasil perhitungan berdasarkan *coverage planning*

Perhitungan <i>Coverage Planning</i>				
Parameter	Variabel	Unit	Nilai (UL)	Nilai (DL)
Luas Wilayah	L	km ²	0,23	0,23
Frekuensi Kerja	f	MHz	1800	1800
Tinggi Antena BS	hb	m	17	17
Tinggi Antena MS	hm	m	1,5	1,5
MAPL	PL	dB	128.136	126.108
Faktor Koreksi Daya	cm	dB	0	0
Parameter	Variabel	Unit	Nilai (UL)	Nilai (DL)
Faktor Koreksi Antena MS	a(hm)	-	0,043	0,043
Radius Sel	d	km	0,488	0,43

Tabel 8. Hasil perhitungan *capacity planning*

Perhitungan <i>Capacity Planning</i>				
Parameter	Variabel	Unit	Nilai (UL)	Nilai (DL)
Throughput Pengguna	SUT	Kbps	9,509	36,377
Throughput Jaringan	NT	Mbps	7,436	28,447
Kapasitas Site	Site Capacity	Mbps	29,416	24,514
Jumlah site	Number of site	-	0,253	1,160



Gambar 10. User average throughput

site berdasarkan persamaan yang telah ditentukan. Adapun estimasi jumlah pengguna pada sektor 1 Regol-Cigareng diambil dari data OSS, yaitu sebesar 781 pengguna rata-rata selama satu minggu. Tabel 8 berikut merupakan hasil perhitungan *capacity planning*.

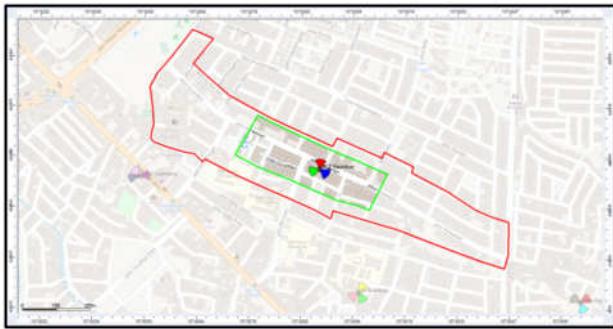
Dari hasil perhitungan ini, diperoleh jumlah *site* pada sisi *uplink* sebanyak 0,253 dan sisi *downlink* sebanyak 1.160 *site*. Jika dibulatkan pada sisi *downlink* menjadi 2 (dua) *site*. Dengan kata lain, dari sisi kapasitas memerlukan *site* tambahan diluar dari *site existing* berupa *microcell*.

C. Perencanaan *Microcell*

Perhitungan daya dari sel pecahan setelah dilakukan *cell splitting* dapat dilakukan menggunakan persamaan (6) dimana daya sel asli (*macrocell*) yang diperoleh dari *engineer parameter*, yaitu sebesar 2,5 Watt atau 34 dBm. Hasil perhitungannya dapat ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 9. Perbandingan daya setelah cell splitting berdasarkan nilai γ

Hasil Perhitungan Daya Setelah Cell Splitting Berdasarkan Nilai γ		
Eksponen Redaman Lintasan (γ)	Daya	
	Watt	dBm
2	10	40
3	5	37
4	2,5	34
5	1,25	31

Gambar 11. Letak *microcell* by software Atoll 3.3

$$P_{t1} = \frac{P_{t2}}{16}$$

$$P_{t1} = \frac{40W}{16}$$

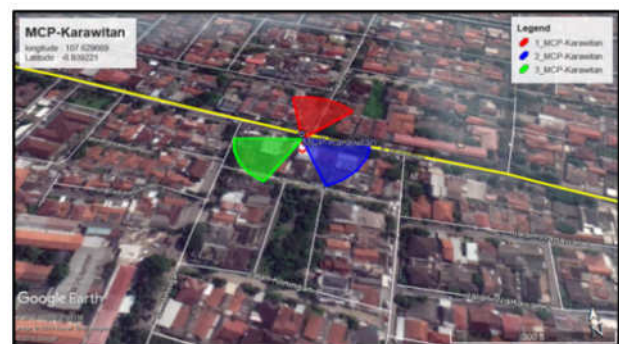
$$P_{t1} = 2,5W = 34 \text{ dBm}$$

Berdasarkan teori perhitungan daya sel baru (*microcell*) setelah dilakukan pemecahan, didapat dayanya sebesar 34 dBm atau sebesar 2,5 Watt, sedangkan apa yang diimplementasikan di lapangan berada pada rentang 37 dBm - 38 dBm atau setara dengan 5 Watt atau lebih besar dua kali lipat dari daya yang diperoleh secara teori. Hal itu dapat terjadi karena secara teori tidak memperhatikan kondisi *real* lapangan. Seperti pada persamaan (6) bahwa perhitungan daya secara teori dipengaruhi oleh eksponen redaman lintasan (γ) yang memiliki rentang 2 - 5, dimana <2 menunjukkan kondisi lingkungan yang hampa udara. Umumnya γ bernilai 4 untuk tipe *mobile radio environment* [14]. Tabel 9 berikut merupakan hasil perhitungan daya berdasarkan nilai eksponen redaman lintasan. Setelah mendapatkan nilai daya, selanjutnya dilakukan simulasi peletakan *microcell*. Tabel 10 merupakan Informasi mengenai spesifikasi dari peletakan *microcell*.

Perencanaan *microcell* ini bekerja pada band 3 pita frekuensi 1800 MHz dengan *bandwidth* sebesar 10 MHz. Hal tersebut mendasari penggunaan model propagasi Cost-231. Perencanaan ini juga menggunakan tiga sektor antenna setinggi 17 meter. Walaupun berdasarkan hasil perhitungan dari sisi kapasitas seperti pada Tabel 10 hanya membutuhkan satu sel, tetapi dalam simulasi dan pengimplementasian akan kurang menguntungkan bagi operator jika hanya mengaktifkan satu sektor saja yang sudah menyewa lahan peletakan *microcell* secara penuh. Untuk menyeimbangkan biaya operasional, maka digunakan tiga sektor. Selain itu, meninjau dari

Tabel 10. Spesifikasi peletakan *microcell*

Spesifikasi Perencanaan Microcell		
Parameter	Unit	Spesifikasi
Frekuensi Kerja	MHz	1800
Bandwidth	MHz	10
Longitude	°	107.629669
Latitude	°	-6.939221
Altitude	m	681
Tinggi Antena	m	17
Jumlah Antena	Buah	3
Daya	dBm	38
Mechanical Azimuth	°	Tx1: 30 ; Tx2: 140 ; Tx3: 250
Mechanical Downtilt	°	Tx1: 0 ; Tx2: 0 ; Tx3: 0

Gambar 12. Letak *microcell* by Software Google Earth

wilayah perencanaan yang merupakan *potential market* akan sangat memungkinkan di masa yang akan datang *overload capacity* akan terjadi. Perencanaan *microcell* dengan memaksimalkan tiga sektor ini diharapkan dapat menanggulangi hal tersebut. Masing-masing sektor antenna tersebut memiliki *mechanical downtilt* sebesar 0° serta memiliki *azimuth* berurutan sebesar 30°, 140°, dan 250°. Kemudian, untuk daya yang digunakan, yaitu sebesar 5 Watt (38 dBm) berdasarkan standar BS konvensional untuk *microcell*. Adapun hasil dari peletakan *microcell* ini dapat ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan memperhatikan parameter RSRP, SINR, dan *throughput* diperoleh hasil yang berbeda-beda, namun masih dalam rentang standar KPI. Perbandingan hasil simulasi *existing site*, skenario 1: hasil pemecahan *cell splitting* berupa *microcell* tanpa dilakukan *physical tuning*, dan skenario 2: setelah diterapkan *physical tuning* berupa *mechanical tilting*. Perbandingan hasil simulasi dari kedua skenario tersebut ditunjukkan pada Tabel 11.

Berdasarkan simulasi, skenario 1 dapat meningkatkan nilai rata-rata parameter RSRP sebesar 12,8 %, SINR sebesar 39,05 %, dan *throughput* sebesar 221,37 % untuk tiap penggunaannya. Berdasarkan simulasi skenario 2 yang telah dilakukan dapat meningkatkan nilai rata-rata

Tabel 11. Perbandingan hasil perencanaan

Perbandingan Hasil Perencanaan			
Kondisi	RSRP (dBm)	SINR (dB)	Throughput (Kbps)
Existing Site	-94,71	7,81	664,54
Skenario 1	-82,58	10,86	2.135,62
Skenario 2	-82,09	11,93	2.233,62
Persentase	Skenario 1	12,8 %	39,05 %
	Skenario 2	13,32 %	52,75 %

parameter RSRP sebesar 13,32 %, SINR sebesar 52,75 %, dan *throughput* sebesar 236 % untuk tiap penggunaanya. Hal ini sudah memenuhi standar KPI operator, bahwa pembangunan *microcell* dari hasil *cell splitting macrocell* dengan radius lebih rendah dapat meningkatkan performansi jaringan di wilayah Jalan Karawitan, khususnya di sekitar area *focus zone*.

V. KESIMPULAN

Dari simulasi yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa perencanaan *microcell* dengan metode *cell splitting* yang disertai *physical tuning* yang tepat dapat meningkatkan performansi jaringan. Di area studi kasus ini, nilai RSRP mencapai -82,09 dBm dengan persentase kenaikan sebesar 13,32%, SINR mencapai 11,93 dB dengan persentase kenaikan sebesar 52,75%, dan *throughput* mencapai 2.233,62 kbps untuk setiap pengguna dengan persentase kenaikan sebesar 236%. Nilai ini telah memenuhi standar KPI operator 3.

Untuk parameter SINR terjadi kenaikan yang cukup signifikan. Hasil simulasi dengan menerapkan *physical tuning* menunjukkan peningkatan jika dibandingkan dengan skenario tanpa *physical tuning*. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil *cell splitting* berupa *microcell* dengan *physical tuning* dapat mencegah atau meminimalisir interferensi akibat sinyal yang saling tumpang tindih. Parameter *throughput* meningkat signifikan yaitu sebesar 236 %. Bahwa pada skenario perencanaan *cell splitting* dengan *physical tuning* berupa *mechanical tilt* yang tepat dapat mencegah interferensi yang akan berdampak langsung

pada parameter RF, khususnya SINR yang kemudian berdampak pada parameter *throughput*.

REFERENSI

- [1] C. Cox, *An Introduction to LTE*. 2012.
- [2] Sukiswo, "Perencanaan Ulang Site Jaringan GSM 900 dan 1800 di Kota Semarang," *J. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 37–46, 2009.
- [3] R. S. Fath, Nifty, Eka Purwa Laksana, "Implementasi Bat Algorithm dalam Optimasi Penempatan Femtocell," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 14, no. 3, hal. 145–220, 2018.
- [4] S. Alam, A. Mittal, M. G. Siddiqui, T. Qamar, and ., "Capacity Improvement by Cell Splitting Technique in CDMA System over Telecommunication Network," *Int. Ref. J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 7, pp. 1–8, 2013.
- [5] T. Ali Yahya, *Understanding LTE and its Performance*. New York: Springer, 2011.
- [6] MenKominfo, "Kebijakan Penataan Pita Frekuensi Radio 1800 MHz," *MenKominfo*, 2015. [Online]. Available: https://www.kominfo.go.id/content/detail/4455/siaran-persno7pihkominfo22015-tentang-penerbitan-surat-edaran-menteri-perihalkebijakan-penataan-pita-frekuensi-radio-1800-mhz/0/siaran_pers.
- [7] D. Y. B. Q, *Small Cells Big Opportunities*. Deepak Rao, 2014.
- [8] D. Kuncoro Adri Saputro, "Analisis Perencanaan Jaringan LTE di Pita Frekuensi 3500 MHz dengan Mode TDD dan FDD," *J. Telekomun. dan Komput.*, vol. 7, no. 1, hal. 35–60, 2016.
- [9] W. G. U. K. U, *Konsep Teknologi Seluler*. Informatika, 2008.
- [10] P. N. K. A. Katiyar, Sumit Prof. R. K. Jain, "An Intelligent Approach for Dense Urban Area in existing 2G / 2.5G," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 5, no. 12, pp. 1–6, 2011.
- [11] L. M. Hidayat, Fauzi, Hafidudin, "Analisis Optimasi Akses Radio Frekuensi Pada Jaringan Long Term Evolution (LTE) Di Daerah Bandung," *e-Proceeding Eng.*, vol. 3, no. 2, 2012.
- [12] W. C. . Lee, *Wireless & Cellular Telecommunications*, Third Edit. New York: Mc Graw Hill, 2005.
- [13] A. G. Ikim.D, P. Ryan, *4G LTE Advanced for Beginner Consultant*. Depok: Prandia Self Publishing, 2017.
- [14] R. F. Melvi, Ardian Ulvan, "Analisa Unjuk Kerja Mobile Based Tranceiver Station untuk Kestabilan Infrastruktur Sistem Komunikasi Seluler," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 11, no. 1, hal. 1–7, 2014.

Perancangan Struktur Kontrol Penggilingan Batubara pada Sistem Pembakaran Batubara

Stefanus Yudi Irwan, Awang N.I. Wardana*, dan Ester Wijayanti
Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281
e-mail: awang.wardana@ugm.ac.id

Abstrak—Ketidakmampuan struktur kontrol penggilingan batubara dalam memonitor dan mengontrol aliran batubara halus menimbulkan kerugian operasional dan lingkungan. Penelitian dilakukan untuk merancang struktur kontrol baru untuk proses penggilingan batubara pada sistem pembakaran batubara sehingga diperoleh peningkatan kinerja pengendalian dari struktur kontrol yang sudah ada sebelumnya. *Cascade control*, *blend station*, dan *feedback control* digunakan untuk mengendalikan aliran massa batubara, aliran primary air, dan suhu batubara halus. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi seluruh tujuan kontrol yang ditetapkan. Aplikasi struktur kontrol hasil perancangan mampu membuat respon *step* proses penggilingan batubara memiliki waktu penetapan rata-rata sebesar 161,75 detik dengan lonjakan maksimum sebesar 0%. Struktur kontrol hasil perancangan juga mampu membuat batubara hasil penggilingan memiliki kehalusan pada rentang nilai 70% hingga 75% dan rentang *moisture content* bernilai 2,18% hingga 2,28%. Hasil evaluasi ini membuat kinerja pengendalian struktur kontrol hasil perancangan lebih baik dibandingkan struktur kontrol yang sudah diterapkan.

Kata kunci: *batubara halus, penggilingan batubara, struktur kontrol, tujuan kontrol, kinerja pengendalian*

Abstract—The inability of the coal mill control structure to monitor and control pulverized coal flow causes operational and environmental problems. The research was done to design the new control structure for coal mill in coal firing system to achieve an improvement on control system performance compared to the existing control structure. Cascade control, blend station, and feedback control was used to control the flow of coal, the flow of primary air, and temperature of the pulverized coal. The result of the evaluation shows that the new control structure capable of fulfilling all the control objective applied to it. Implementation of the new control structure capable to make the step response of the coal mill to have an average settling time at 161.75 seconds with 0% overshoot. The new control structure also capable to make the pulverized coal fineness at the range of 70% to 75% and moisture content at the range of 2.18% to 2.28%. The result of the evaluation makes the control performance of the new control structure is better than the previous coal mill control structure.

Keywords: *pulverized coal, coal mill, control structure, control objective, control performance*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

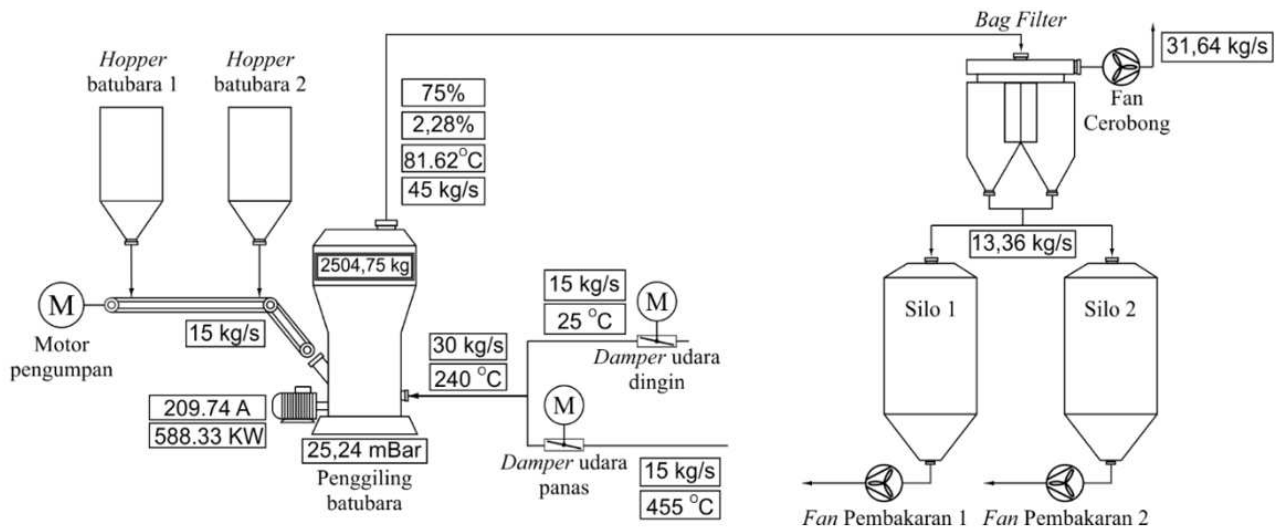
I. PENDAHULUAN

Sistem pembakaran batubara banyak digunakan oleh industri semen dan pembangkit listrik sebagai penyuplai bahan bakar. Penggiling batubara merupakan alat yang digunakan untuk menggerus batubara kasar menjadi batubara berukuran kecil (112,5 μm) untuk meningkatkan efisiensi pembakaran. Kinerja dan kehandalan dari sistem pembakaran batubara sangat dipengaruhi oleh pengoperasian penggiling batubara. Kegagalan pada pengoperasian penggiling batubara dapat menimbulkan kerugian finansial dan lingkungan yang cukup besar. Permasalahan yang terjadi pada penggiling batubara salah satunya disebabkan karena struktur kontrol tidak mampu mengendalikan aliran batubara halus hasil penggilingan dengan baik. Sulitnya pengendalian disebabkan karena penggiling batubara merupakan sistem yang sangat *non-*

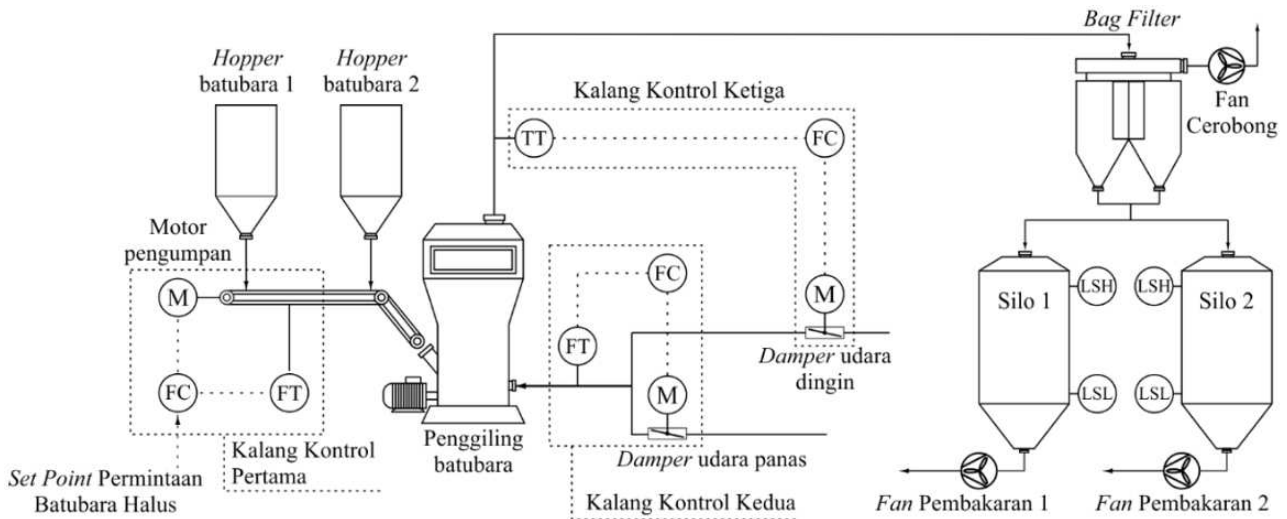
linear, memiliki variabel proses yang saling berhubungan, dan pengukuran variabel penting untuk sistem kontrol, seperti aliran batubara halus dan beban penggilingan, sulit dilakukan [1].

Irwan dan Wardana mengembangkan perangkat lunak *distributed coal mill simulator* [2] untuk menguji struktur kontrol penggilingan batubara. *Distributed coal mill simulator* tersusun atas alat-alat proses pada sistem pembakaran batubara halus tidak langsung (Gambar 1). Kondisi dasar di dalam *distributed coal mill simulator* menyatakan nilai-nilai aliran, suhu, kualitas produk, dan penggunaan energi dari pengoperasian penggiling batubara di dalam pengoperasian manual.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang struktur kontrol baru untuk proses penggilingan batubara yang mampu meningkatkan kinerja penggiling batubara, serta mengevaluasi kinerja struktur kontrol hasil



Gambar 1. Skema alat proses pada sistem pembakaran batubara dan kondisi dasar proses penggilingan



Gambar 2. Struktur kontrol non load line [1]

perancangan menggunakan perangkat lunak *distributed coal mill simulator*. Perancangan struktur kontrol proses yang dilakukan pada penelitian ini terbatas pada algoritma kontrol proporsional, integral, dan derivatif saja karena algoritma kontrol ini banyak diaplikasikan di industri.

II. STRUKTUR KONTROL PENGGILINGAN BATUBARA

Secara umum pengendalian penggiling batubara dilakukan untuk mengatur aliran batubara dan udara primer sebagai bahan di dalam proses penggilingan. Terdapat tiga struktur kontrol yang sudah diterapkan untuk mengendalikan penggiling batubara dengan strateginya masing-masing.

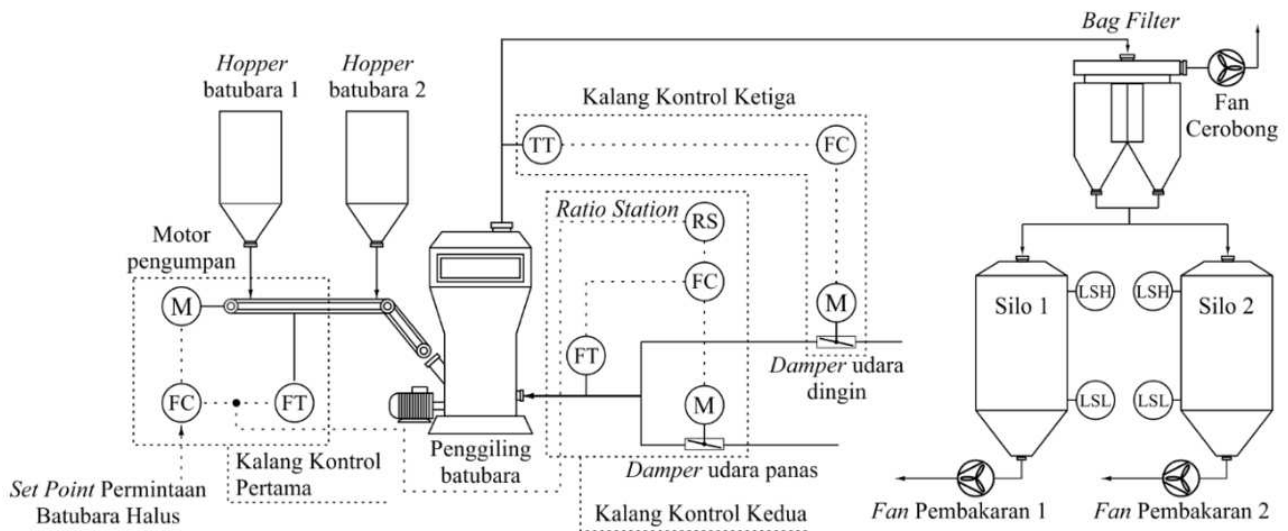
A. Struktur Kontrol Non Load Line

Agrawal [1] membuat struktur kontrol *non load line* yang tersusun dari tiga kalang kontrol (Gambar 2). Kalang kontrol pertama digunakan untuk mengendalikan aliran batubara halus. Pengukuran batubara umpan dan

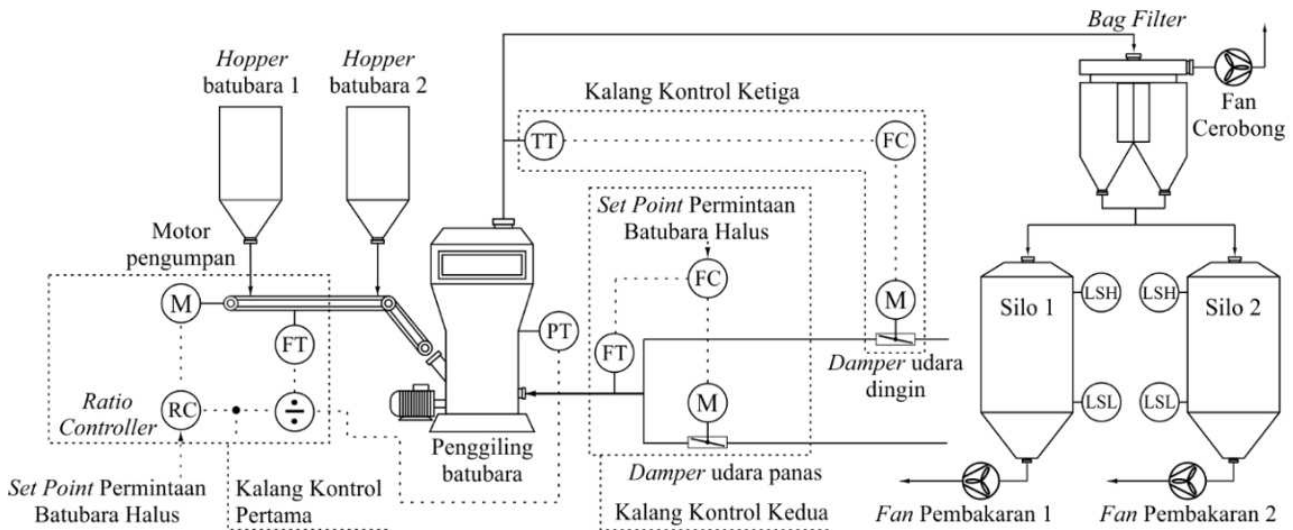
set point dengan kompensator *moisture* dijadikan sebagai masukan *controller*. Motor pengumpan sebagai variabel termanipulasi kalang kontrol pertama, digunakan untuk mengatur aliran batubara umpan. Kalang kontrol kedua digunakan untuk mengendalikan aliran udara primer. Pengukuran aliran udara primer dan *set point* yang dibuat tetap sebesar 30 kg/s dijadikan sebagai masukan *controller*. *Damper* udara panas digunakan untuk mengatur jumlah aliran udara primer yang masuk ke dalam proses penggilingan. Kalang kontrol ketiga digunakan untuk mengendalikan suhu batubara halus. Pengukuran suhu batubara halus dan *set point* yang dibuat tetap sebesar 82 dijadikan masukan *controller*. *Damper* udara dingin kemudian digunakan untuk mengatur suhu batubara halus.

B. Struktur Kontrol Air Following

Rees dan Fan [3] membuat struktur kontrol *air following* (Gambar 3). Kalang kontrol pada struktur kontrol *air following* mirip seperti kalang kontrol pada struktur kontrol *non load line*. Perbedaannya terhadap struktur



Gambar 3. Struktur kontrol air following [3]



Gambar 4. Struktur kontrol coal following [3]

kontrol *non load line* terletak pada penggunaan *ratio control* pada kalang kontrol kedua untuk mengendalikan aliran udara primer. *Ratio control* diimplementasikan menggunakan *ratio station* dengan menerapkan konsep *load line*. *Load line* menyatakan komposisi yang sesuai antara aliran batubara umpan dengan aliran udara primer untuk proses penggilingan. *Ratio station* mendapatkan masukan dari pengukuran aliran batubara umpan. Hasil perhitungan *ratio station* ini menjadi masukan *set point* aliran udara primer.

C. Struktur Kontrol Coal Following

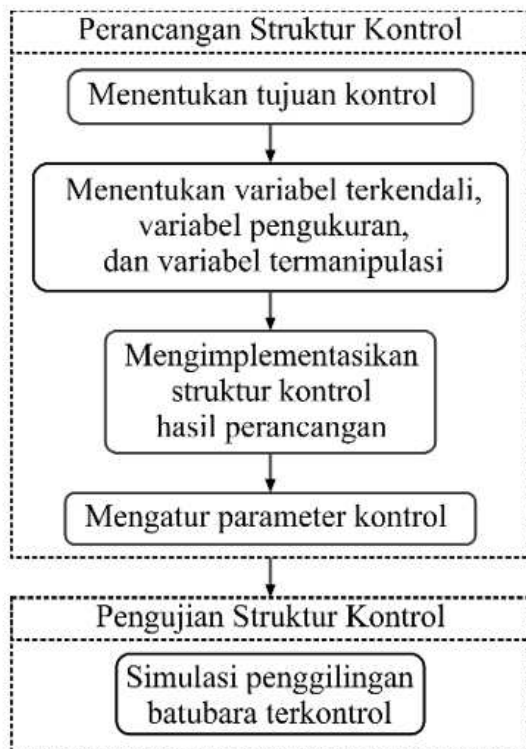
Struktur kontrol *coal following* buatan Rees dan Fan [3] terdiri atas tiga kalang kontrol (Gambar 4). Kalang kontrol pertama digunakan untuk mengatur akumulasi massa batubara di dalam penggiling. Rasio antara pengukuran perbedaan tekanan di dalam penggiling dengan pengukuran aliran udara primer dijadikan sebagai variabel pengukuran untuk *ratio controller*. *Ratio controller* digunakan untuk mengatur motor pengumpan sehingga akumulasi massa

batubara di dalam penggiling dapat dikendalikan. Kalang kontrol kedua digunakan untuk mengatur aliran batubara halus. Pengukuran aliran udara primer dan pengaturan *set point* yang dikompensasi menggunakan *load line* dijadikan sebagai masukan *controller*. Kompensasi menggunakan *load line* diperlukan sehingga kalang kontrol dapat mengatur aliran batubara halus secara tidak langsung melalui udara primer. Kalang kontrol ketiga sama seperti kalang kontrol ketiga pada struktur kontrol *non load line* maupun *air following*. Kalang ini digunakan untuk mengatur suhu batubara halus hasil penggilingan menggunakan pengukuran suhu batubara halus dengan *set point* yang tetap.

III. METODE PENELITIAN

A. Perangkat Lunak dan Keras

Penelitian dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak dan keras. Perangkat lunak yaitu *distributed coal mill simulator* [2] digunakan untuk menguji kinerja dari



Gambar 5. Langkah kerja penelitian

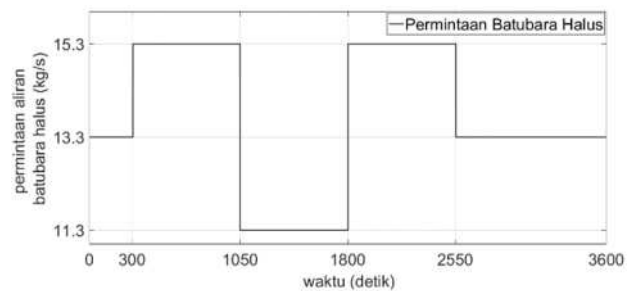
struktur kontrol hasil perancangan, dan perangkat keras yaitu komputer digunakan untuk menjalankan perangkat lunak tersebut. Kriteria minimal yang harus dimiliki oleh komputer yang digunakan adalah terpasangnya perangkat lunak Java 1.8 sebagai sistem operasi untuk mengoperasikan perangkat lunak *distributed coal mill simulator*.

Distributed coal mill simulator merupakan perangkat lunak yang dikembangkan untuk merancang struktur kontrol. Model yang digunakan pada perangkat lunak ini adalah model penggilingan batubara yang diciptakan oleh Agrawal [4]. Proses penggilingan batubara pada perangkat lunak *distributed coal mill simulator* ini merupakan penggilingan batubara untuk sistem pembakaran batubara halus tidak langsung (Gambar 1) dengan jenis penggiling batubara *vertical spindle mill*.

B. Prosedur Perancangan Struktur Kontrol

Perancangan struktur kontrol dilakukan melalui empat tahap (Gambar 5). Tahap pertama yaitu menentukan tujuan kontrol. Tujuan kontrol ditentukan agar struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi tuntutan pengoperasian proses penggilingan batubara. Tahap kedua yaitu menentukan variabel terkendali, variabel pengukuran, dan variabel termanipulasi yang akan digunakan pada struktur kontrol. Tahap kedua ini dilakukan untuk membangun kalang kontrol yang menyusun struktur kontrol.

Tahap ketiga yaitu mengimplementasikan struktur kontrol hasil perancangan ke dalam perangkat lunak *distributed coal mill simulator*. Tahap keempat yaitu



Gambar 6. Perubahan permintaan batubara halus

mengatur parameter PID struktur kontrol hasil perancangan. Parameter kontrol yang akan ditentukan untuk masing-masing struktur kontrol terdiri dari parameter K_p , T_n , dan T_v seperti pada persamaan (1) dengan $e(t)$ merupakan selisih antara *set point* dengan nilai pengukuran aktual.

$$PID = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^{\infty} e(t) dt + T_v \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

K_p merupakan parameter untuk mengatur kendali proporsional, T_n merupakan parameter untuk mengatur kendali integral, dan T_v merupakan parameter untuk mengatur kendali derivatif. Pengaturan parameter kontrol diperlukan untuk mengoperasikan struktur kontrol hasil perancangan secara otomatis.

C. Pengujian Struktur Kontrol

Pengujian dilakukan dengan menjalankan proses penggilingan batubara pada perangkat lunak *distributed coal mill simulator* menggunakan struktur kontrol hasil perancangan. Pengujian dilakukan selama kurang lebih satu jam dengan merubah *set point* permintaan batubara halus pada rentang nilai 11,3 kg/s hingga 15,3 kg/s (Gambar 6). Perubahan permintaan batubara halus dilakukan untuk mensimulasikan beban sistem pembakaran yang berubah-ubah setiap waktunya.

Hasil pengujian struktur kontrol hasil perancangan kemudian dievaluasi menggunakan perbandingan terhadap tujuan kontrol dan hasil pengujian struktur kontrol lain yang sudah diterapkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Struktur Kontrol

1. Tujuan Kontrol

Tujuan kontrol dibedakan menjadi tujuan dalam variabel proses dan tujuan dalam variabel kontrol. Tujuan pada variabel proses ditetapkan untuk membuat produk yang dihasilkan, yaitu batubara halus, memiliki spesifikasi produk yang baik sebagai bahan bakar. Selain dari aspek kualitas, penentuan variabel proses juga dibuat untuk mengamankan proses penggilingan batubara.

Tujuan pada variabel kontrol ditetapkan untuk mengatur respon pengendalian proses penggilingan batubara terhadap perubahan permintaan batubara halus.

Tabel 1. Tujuan rancangan struktur kontrol

Jenis Variabel	Variabel	Nilai
Variabel Proses	Kehalusan batubara halus (%)	70 s/d 75
	Moisture content batubara halus (%)	1 s/d 3
	Akumulasi massa batubara di dalam penggiling (kg)	1900 s/d 3460
	Suhu keluar batubara halus (OC)	80 s/d 100
	Waktu penetapan (detik)	< 250
Variabel Kontrol (Permintaan batubara halus)	Lonjakan maksimum (%)	< 20
	Kesalahan keadaan tunak (kg/s)	$\pm 2\%$ Nilai keadaan tunak
	Decay ratio (%)	< 10

Respon pengendalian dari proses penggilingan batubara perlu diatur sehingga proses penggilingan batubara memiliki respon yang baik terhadap perubahan permintaan batubara halus yang tidak menentu.

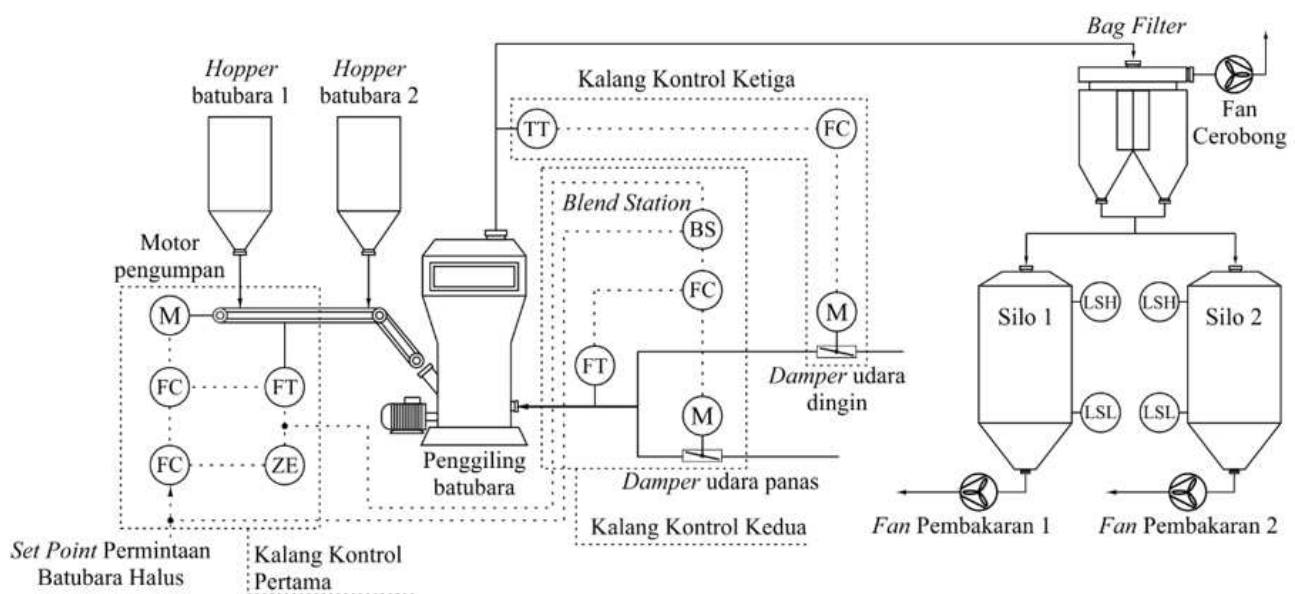
2. Perancangan Kalang Kontrol

Struktur kontrol yang baru (Gambar 7) dirancang berdasarkan tujuan kontrol (Tabel 1). Jumlah aktuator pada model proses menentukan jumlah kalang kontrol pada struktur kontrol baru. Terdapat tiga jenis aktuator yaitu motor pengumpan, *damper* udara panas, dan *damper* udara dingin. Ketiga macam aktuator ini membuat struktur kontrol yang baru terdiri dari tiga kalang kontrol.

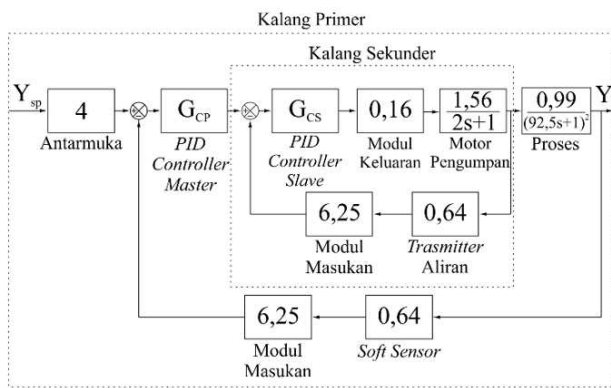
Kalang kontrol pertama digunakan untuk mengendalikan aliran massa batubara halus. Variabel terkendali kalang kontrol pertama adalah aliran batubara umpan dan aliran batubara halus. Aliran batubara umpan dipilih agar akumulasi massa batubara di dalam penggiling

tidak terlalu besar, sedangkan aliran batubara halus dipilih karena variabel ini berkaitan langsung dengan permintaan produk penggilingan batubara. Kedua variabel ini dipilih karena massa batubara yang dikendalikan berpengaruh besar terhadap respon perubahan permintaan batubara halus. Pengukuran terhadap aliran batubara umpan dan aliran batubara halus diperlukan sehingga kalang kontrol mampu mengetahui keadaan aktual dari variabel yang dikendalikan. Aliran batubara umpan merupakan variabel yang dapat diukur, sedangkan aliran batubara halus merupakan variabel yang tidak dapat diukur. Pengukuran aliran batubara halus kemudian disubstitusi dengan estimasi menggunakan teknik *soft sensor* [5]. Pengukuran aliran batubara umpan dan estimasi aliran batubara halus oleh *soft sensor* kemudian dijadikan sebagai variabel pengukuran bagi kalang kontrol pertama. Variabel termanipulasi yang digunakan pada kalang kontrol pertama adalah motor pengumpan. Motor pengumpan dipilih karena piranti ini langsung mengatur laju aliran batubara umpan. *Cascade control* digunakan sebagai kalang kontrol pertama karena terdapat dua variabel pengukuran dan satu variabel termanipulasi.

Kalang kontrol kedua digunakan untuk mengendalikan laju aliran udara primer yang masuk ke dalam penggiling batubara. Pemilihan aliran udara primer sebagai variabel terkendali didasarkan karena variabel ini berpengaruh besar terhadap kehalusan batubara halus, akumulasi massa batubara di dalam penggiling dan respon *step* permintaan batubara halus. Aliran udara primer merupakan variabel yang dapat diukur, sehingga variabel ini juga menjadi variabel pengukuran untuk kalang kontrol kedua. Aktuator yang dipilih untuk mengendalikan aliran udara primer adalah *damper* udara panas. Pemilihan *damper* udara panas sebagai aktuator didasarkan karena *damper* udara dingin lebih cocok digunakan pada pengendalian suhu batubara halus. Struktur kontrol rasio dengan algoritma *blend station* [6] diterapkan pada kalang kontrol kedua untuk



Gambar 7. Struktur kontrol hasil rancangan



Gambar 8. Diagram blok kalang kontrol pertama

Tabel 2. Parameter struktur kontrol hasil perancangan

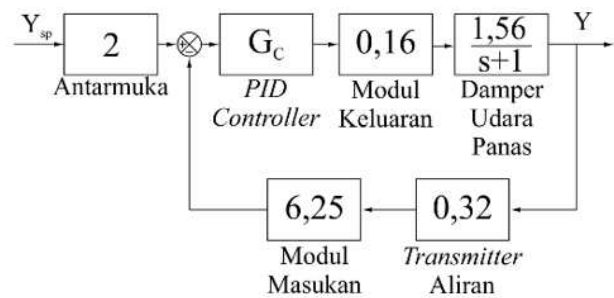
Kalang Kontrol	Parameter Kontrol		
	Kp	Tn	Tv
Pertama : Master	4,07	185,05	47,00
Pertama : Slave	2,00	2,00	0,00
Kedua	-96,25	195,00	0,00
Ketiga	1,00	1,00	0,00

mempercepat respon pengendalian proses penggilingan batubara terhadap permintaan batubara halus. Aliran udara primer ditetapkan pada rentang nilai 30 kg/s hingga 30,87 kg/s untuk menjaga kehalusan batubara halus hasil penggilingan berada pada rentang nilai yang optimum yaitu 70% hingga 75% [4].

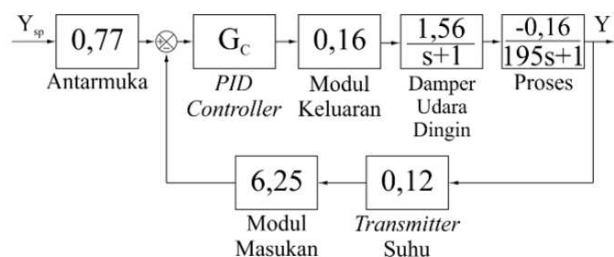
Kalang kontrol ketiga digunakan untuk mengendalikan suhu batubara halus. Pemilihan suhu batubara halus sebagai variabel terkendali didasarkan karena variabel ini berpengaruh terhadap *moisture content* batubara halus. Suhu batubara halus juga dikendalikan agar tidak merusak *bag filter* dan meminimalisir terjadinya suhu yang terlalu tinggi pada penyimpanan di dalam silo. Suhu batubara halus merupakan variabel yang dapat diukur sehingga variabel ini juga menjadi variabel pengukuran untuk kalang kontrol ketiga. Variabel termanipulasi yang dipilih untuk mengendalikan suhu keluar batubara halus adalah *dampers* udara dingin. Pemilihan *dampers* udara dingin sebagai variabel termanipulasi pada kalang kontrol ketiga didasarkan karena suhu udara dingin yang masuk ke dalam penggiling mampu menurunkan suhu keluar batubara halus dengan lebih cepat dibandingkan dengan mengurangi aliran udara panas yang masuk ke dalam penggiling. *Feedback control* digunakan pada kalang kontrol ketiga karena terdapat satu variabel pengukuran dan satu variabel termanipulasi. Suhu batubara halus ditetapkan untuk dijaga pada nilai 82 sehingga *moisture content* batubara halus hasil penggilingan juga diharapkan berada pada nilai 2%, sesuai dengan nilai median tujuan kontrol *moisture content*.

3. Penalaan Parameter Kontrol

Parameter kontrol untuk masing-masing kalang kontrol perlu diatur sehingga struktur kontrol dapat



Gambar 9. Diagram blok kalang kontrol kedua



Gambar 10. Diagram blok kalang kontrol ketiga

mengendalikan proses penggilingan batubara secara otomatis. Metode penalaan parameter kontrol dilakukan dengan menggunakan metode *cascade internal model control* dan *direct synthesis*. Dua metode penalaan ini dipilih karena dilakukan secara analitik menggunakan susunan diagram blok dari masing-masing kalang kontrol.

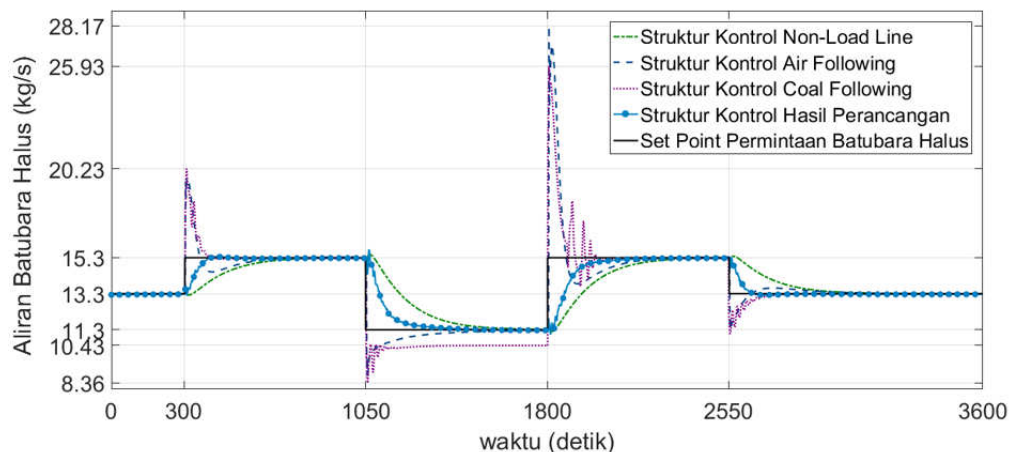
Penalaan parameter kontrol pada kalang kontrol pertama dilakukan menggunakan metode *cascade internal model control* [7] karena kalang kontrol pertama menggunakan cascade control. Kalkulasi metode cascade internal model control dilakukan terhadap diagram blok kalang kontrol pertama (Gambar 8) untuk mendapatkan parameter kontrol yang dikehendaki.

Penalaan parameter kontrol pada kalang kontrol kedua dan ketiga dilakukan menggunakan metode *direct synthesis* [8]. Kalkulasi metode *direct synthesis* dilakukan terhadap susunan diagram blok dari kalang kontrol kedua dan ketiga (Gambar 9-10). Diagram blok kalang kontrol kedua, yang menggunakan algoritma *blend station*, disederhanakan menjadi susunan diagram blok kontrol feedback untuk menyederhanakan proses penalaan tanpa menghilangkan bagian penting di dalam kalkulasi parameter kontrol.

Hasil penalaan parameter kontrol (Tabel 2) dijadikan sebagai parameter kontrol pada proses pengujian struktur kontrol.

B. Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja struktur kontrol hasil perancangan. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kinerja dari proses penggilingan batubara yang dikendalikan oleh struktur kontrol hasil perancangan terhadap tujuan kontrol (Tabel 1) dan terhadap kinerja proses penggilingan batubara yang dikendalikan oleh struktur kontrol lain.

Gambar 11. Grafik perbandingan respon *step*

Tabel 3. Perbandingan kinerja struktur kontrol hasil perancangan

Parameter	Struktur Kontrol			Hasil Perancangan	
	<i>Non-Load Line</i>	<i>Air Following</i>	<i>Coal following</i>	Nilai	Pemenuhan Tujuan Kontrol
Waktu Penetapan (detik)	431±0	356,25±66,60	135±54,25	161,75±80,60	Terpenuhi
Kesalahan Keadaan Tunak (kg/s)	0,01±0,01	0,01±0,05	-0,25±0,41	0,03±0	Terpenuhi
Lonjakan Maksimum (%)	0±0	176,41±118,70	174,21±96,13	1,88±2,59	Terpenuhi
Decay ratio (%)	0±0	0,15±0,03	0,64±0,25	0±0	Terpenuhi

1. Hasil Evaluasi Respon Step

Evaluasi respon *step* dilakukan untuk mengetahui respon struktur kontrol hasil perancangan terhadap perubahan permintaan batubara halus. Hasil perbandingan dengan tujuan kontrol (Tabel 3) menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi seluruh tujuan pada variabel kontrol.

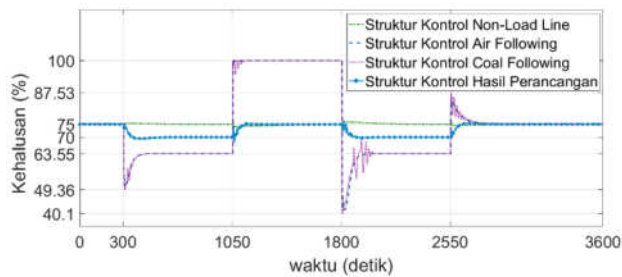
Grafik perbandingan respon *step* (Gambar 11) memperlihatkan bahwa waktu untuk mencapai kondisi permintaan batubara halus yang baru dari struktur kontrol hasil perancangan lebih cepat dibandingkan dengan struktur kontrol *non load line* ataupun *air following*, namun tidak lebih cepat dibanding struktur kontrol *coal following*. Berdasarkan tabel perbandingan kinerja (Tabel 3), struktur kontrol hasil perancangan memiliki rata-rata waktu penetapan bernilai 161,75 detik. Waktu penetapan tercepat kedua ini merupakan hasil dari penggunaan teknik *soft sensor* dan variasi aliran udara primer dalam rentang 30 kg/s hingga 30,87 kg/s. Estimasi *soft sensor* membuat respon yang diberikan kalang kontrol pertama mampu mempercepat aliran batubara halus. Perubahan aliran udara primer juga menimbulkan perubahan gaya angkat terhadap batubara yang sudah digiling, sehingga mampu mempercepat waktu penetapan.

Struktur kontrol hasil perancangan memiliki kesalahan keadaan tunak rata-rata 0,03 kg/s. Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan kesalahan keadaan tunak dari struktur kontrol *non load line* dan *air following* yaitu 0,01 kg/s dan lebih kecil dibandingkan dengan struktur kontrol *coal following* yaitu 0,25 kg/s. Standar deviasi kesalahan

keadaan tunak dari struktur kontrol hasil perancangan bernilai paling kecil dibandingkan struktur kontrol lainnya. Hal ini disebabkan karena variasi aliran udara primer berada pada rentang yang kecil, yaitu 30 kg/s hingga 30,87 kg/s, sedangkan variasi aliran udara primer pada struktur kontrol *air following* dan *coal following* berada pada rentang yang lebih besar.

Struktur kontrol hasil perancangan memiliki rata-rata lonjakan maksimum bernilai 1,88%. Grafik perbandingan respon *step* (Gambar 11) memperlihatkan dengan jelas perbedaan lonjakan yang terjadi antara struktur kontrol hasil perancangan terhadap struktur kontrol *air following* dan *coal following*. Perbandingan lonjakan sekitar 100 kali lebih kecil disebabkan karena variasi perubahan aliran udara primer pada struktur kontrol hasil perancangan dibatasi pada rentang yang sempit. Lonjakan maksimum pada struktur kontrol hasil perancangan masih lebih tinggi dibandingkan lonjakan maksimum pada struktur kontrol *non load line* yang bernilai 0%. Tidak terjadinya lonjakan pada struktur kontrol *non load line* disebabkan karena aliran udara primer yang dijaga konstan pada nilai 30 kg/s.

Struktur kontrol hasil perancangan memiliki *decay ratio* bernilai 0%. Nilai *decay ratio* ini menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan tidak mengalami osilasi apabila terdapat perubahan permintaan batubara halus. Hasil evaluasi respon *step* menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu mengendalikan proses penggilingan batubara dengan sangat baik dibandingkan dengan struktur kontrol yang lain.



Gambar 12. Grafik perbandingan kehalusan

Tabel 4. Perbandingan kehalusan

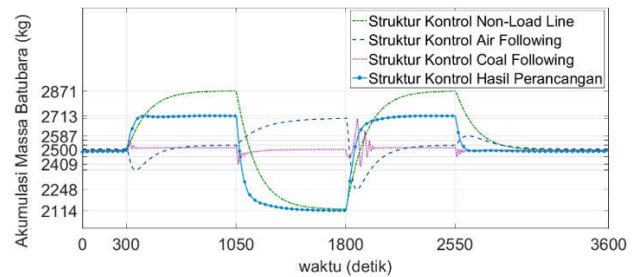
Struktur Kontrol	Rentang Kehalusan (%)	Lonjakan Tertinggi (%)
<i>Non-Load Line</i>	75	1,00
<i>Air Following</i>	63,55 s/d 100	23,45
<i>Coal following</i>	63,55 s/d 100	23,15
Hasil Perancangan	Nilai 70 s/d 75	0,71
Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi	

2. Hasil Evaluasi Kehalusan Batubara Halus

Perbandingan kehalusan batubara terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol kehalusan yang ditetapkan sebesar 70% hingga 75% (Tabel 1). Grafik perbandingan kehalusan (Gambar 12) memperlihatkan bahwa kehalusan batubara halus yang dihasilkan oleh struktur kontrol hasil perancangan memiliki rentang nilai yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan struktur kontrol *air following* dan *coal following*. Berdasarkan tabel perbandingan kehalusan (Tabel 4), struktur kontrol hasil perancangan mampu menghasilkan batubara halus dengan kehalusan 70% hingga 75%. Nilai kehalusan ini merupakan nilai standar untuk bahan bakar batubara. Kemampuan struktur kontrol hasil perancangan untuk menjaga nilai kehalusan disebabkan karena aliran udara primer ditetapkan pada rentang 30 kg/s hingga 30,87 kg/s. Penetapan aliran udara primer tersebut membuat batubara halus yang terangkat keluar penggiling didominasi oleh batubara yang berukuran kecil, sehingga kehalusan batubara halus dapat dijaga pada rentang 70% hingga 75%.

3. Hasil Evaluasi Akumulasi Batubara

Perbandingan akumulasi batubara didalam penggiling terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol akumulasi batubara yang ditetapkan pada nilai 1900 kg hingga 3600 kg (Tabel 1). Akumulasi massa batubara yang dihasilkan oleh struktur kontrol baru bernilai 2114 kg hingga 2713 kg (Tabel 5). Nilai akumulasi massa ini mendekati nilai akumulasi massa yang dimiliki oleh struktur kontrol *non load line*, namun berbeda secara signifikan terhadap akumulasi massa dari struktur kontrol *air following* dan *coal following* (Gambar 13). Kemiripan nilai akumulasi massa terhadap struktur kontrol *non load line* disebabkan karena variasi aliran udara primer pada struktur kontrol



Gambar 13. Grafik perbandingan akumulasi massa batubara

Tabel 5. Perbandingan akumulasi massa batubara

Struktur Kontrol	Akumulasi Massa (kg)	Lonjakan Tertinggi (kg)
<i>Non-Load Line</i>	2123 s/d 2871	0
<i>Air Following</i>	2503 s/d 2698	280
<i>Coal following</i>	2497 s/d 2512	182
Hasil Perancangan	Nilai 2114 s/d 2713	0
Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi	

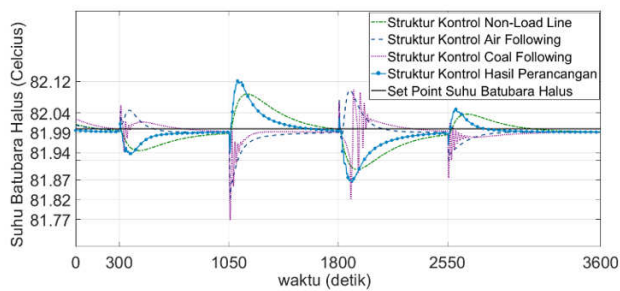
hasil perancangan memiliki rentang yang kecil, hal ini menyebabkan variasi gaya angkat yang dihasilkan struktur kontrol hasil perancangan mirip seperti struktur kontrol *non load line*. Perbedaan yang signifikan terhadap struktur kontrol *air following* dan *coal following* disebabkan karena variasi gaya angkat udara primer pada struktur kontrol *air following* dan *coal following* memiliki rentang yang lebih besar dibanding struktur kontrol hasil perancangan.

C. Hasil Evaluasi Suhu Batubara Halus

Perbandingan suhu batubara halus terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol untuk menjaga suhu pada nilai 80°C hingga 100°C (Tabel 1). Grafik perbandingan suhu batubara halus (Gambar 14) menunjukkan bahwa kinerja struktur kontrol hasil perancangan dalam menjaga suhu batubara halus mendekati kinerja dari struktur kontrol *non load line*. Berdasarkan tabel perbandingan suhu batubara halus (Tabel 6), struktur kontrol hasil perancangan mampu menjaga suhu batubara halus pada nilai 81,99 sama seperti struktur kontrol yang lain. Kemampuan yang sama dari struktur kontrol hasil perancangan dalam menjaga suhu dikarenakan kalang kontrol ketiga, untuk menjaga suhu batubara halus, pada struktur kontrol hasil perancangan menggunakan skema yang sama seperti kalang kontrol ketiga pada struktur kontrol lainnya.

D. Hasil Evaluasi Moisture Content Batubara Halus

Perbandingan *moisture content* batubara halus terhadap tujuan kontrol menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi tujuan kontrol *moisture content* (Tabel 1). Grafik perbandingan *moisture content* batubara halus (Gambar 15) menunjukkan kinerja



Gambar 14. Grafik perbandingan suhu batubara halus

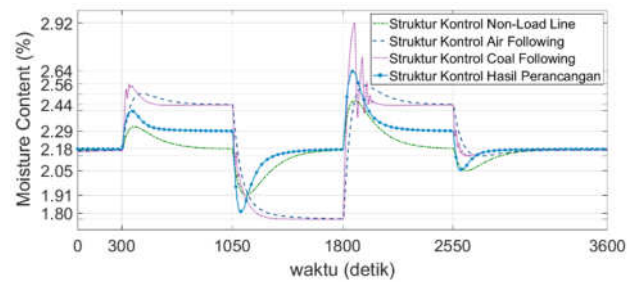
Tabel 6. Perbandingan suhu batubara halus

Struktur Kontrol		Rentang Suhu Batubara Halus (OC)	Lonjakan Tertinggi (OC)
<i>Non-Load Line</i>		81,98 – 82	0,09
<i>Air Following</i>		81,99	0,17
<i>Coal following</i>		81,99	0,22
Nilai		81,99	0,13
Hasil Perancangan	Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi	

struktur kontrol dalam menjaga nilai *moisture content*. *Moisture content* yang dihasilkan oleh struktur kontrol hasil perancangan, yaitu 2,18% hingga 2,28% (Tabel 7), mendekati *moisture content* yang dihasilkan oleh struktur kontrol *non load line*, namun berbeda secara signifikan terhadap rentang *moisture content* dari struktur kontrol *air following* dan *coal following*. Kemiripan nilai rentang *moisture content* terhadap struktur kontrol *non load line* dikarenakan rentang akumulasi massa struktur kontrol hasil perancangan mendekati rentang akumulasi massa struktur kontrol *non load line*. Perbedaan yang signifikan terhadap akumulasi massa struktur kontrol *air following* dan *coal following* disebabkan karena rentang akumulasi massa yang sangat berbeda.

V. KESIMPULAN

Proses perancangan mampu menghasilkan struktur kontrol baru untuk mengendalikan proses penggilingan batubara pada sistem pembakaran batubara. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur kontrol hasil perancangan mampu memenuhi seluruh tujuan kontrol yang sudah ditetapkan. Keunggulan struktur kontrol hasil perancangan dibandingkan dengan struktur kontrol lain yaitu mampu menghasilkan kehalusan batubara halus pada rentang

Gambar 15. Grafik perbandingan *moisture content* batubara halus

Tabel 7. Perbandingan suhu batubara halus

Struktur Kontrol		Rentang Moisture Content (%)	Lonjakan Tertinggi (%)
<i>Non Load Line</i>		2,17 s/d 2,18	0,29
<i>Air Following</i>		1,77 s/d 2,44	0,11
<i>Coal following</i>		1,76 s/d 2,44	0,48
Nilai		2,18 s/d 2,28	0,36
Hasil Perancangan	Pemenuhan Tujuan Kontrol	Terpenuhi	

nilai 70% hingga 75% dengan nilai *moisture content* pada rentang nilai 2,18% hingga 2,28% dimana nilai ini merupakan nilai optimum batubara halus sebagai bahan bakar.

REFERENSI

- [1] V. Agrawal, B. K. Panigrahi, dan P. M. V. Subbarao, "Review of control and fault diagnosis methods applied to coal mills," *J. Process Control*, vol. 32, pp. 138–153, 2015.
- [2] S. Y. Irwan dan A. N. I. Wardana, "Distributed Coal Mill Simulator based on IEC 61499," in *The 5th UGM International Conference of Science and Technology*, 2019.
- [3] N. Rees dan G. Fan, "Modelling and control of pulverised fuel coal mills," *Therm. Power Plant Simul. Control*, pp. 63–100, 2011.
- [4] V. Agrawal, B. K. Panigrahi, dan P. M. V. Subbarao, "A unified thermo-mechanical model for coal mill operation," *Control Eng. Pract.*, vol. 44, pp. 157–171, 2015.
- [5] Zadiraka, "Pulverizer Control System," 1985.
- [6] H. Tore, "The Blend station-a new ratio control structure," *Control Eng. Pract.*, vol. 9, pp. 1215–1220, 2001.
- [7] Y. Lee, S. Park, dan M. Lee, "PID controller tuning to obtain desired closed loop responses for cascade control systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 1859–1865, 1998.
- [8] D. E. Seborg, T. F. Edgar, dan D. A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, 4th ed. Wiley, 2017.

Evaluasi Inverse Kinematics untuk Robot Quadruped Menggunakan Sensor Accelerometer

Ahmad Iqbal Nasrudin¹, Khairul Anam², dan M. Agung Prawira N²

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

²Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Jl. Kalimantan 37, Jember 68121

e-mail: khairul@unej.ac.id

Abstrak—Robot *Quadruped* merupakan salah satu jenis robot yang bergerak dengan menggunakan empat kaki yang disusun oleh beberapa motor servo sebagai penggerakannya di masing-masing kaki tergantung DOF yang digunakan. Namun permasalahan muncul ketika robot ini dihadapkan pada bidang miring, dikarenakan beban yang dipikul setiap motor servo pada kaki berbeda, sehingga dapat membuat motor servo cepat mengalami kerusakan. Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem robot *quadruped* untuk kestabilan pada bidang miring menggunakan sensor accelerometer dan penerapan metode *inverse kinematics* dengan kontrol PID Ziegler-Nichols. Dari hasil pengujian robot pada bidang miring dengan berbagai macam sudut kemiringan *pitch* dan *roll* didapatkan respon dalam menyeimbangkan *body* robot. Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian robot *quadruped*, yaitu pengujian statis dan pengujian dinamis. Pengujian pertama, yaitu pengujian statis robot terhadap sudut *pitch* dan *roll* dalam keadaan *standby* hasilnya diperoleh respon rata-rata dalam menyeimbangkan *body* robot masing-masing sebesar 245 ms dan 280 ms, sedangkan pengujian statis robot terhadap sudut *roll* dalam keadaan berjalan diperoleh osilasi terbesar yaitu 10°. Pengujian kedua yaitu pengujian dinamis robot terhadap *roll* dan *pitch* dalam keadaan *standby* diperoleh respon rata-rata dalam menyeimbangkan *body* sebesar 8 s, sedangkan pengujian dinamis dalam keadaan berjalan terhadap sudut *roll* diperoleh respon rata-rata dalam menyeimbangkan *body* robot sebesar 490 ms.

Kata kunci: *inverse kinematics, PID ziegler-nichols, robot quadruped*

Abstract—Quadruped robot is one of the types of robots that move using legs 4 compiled by some of the servo motor as a driving force on each foot fit the DOF is used. However, problems arise when this robot is confronted on the inclined plane, because the burden is borne out every servo motor on the feet will be different, so can make a fast servo motor damaged. This research was conducted on the design of the quadruped robot system for stability on the inclined plane using the accelerometer sensor and the application of inverse kinematics method with PID control of Ziegler-Nichols. The results of tests obtained response robot in stabilizing the body when faced with the inclined plane with some degree of slope of the pitch and roll. In this research was conducted some test for quadruped robot: static Testing robot against the angel of the pitch in the standby retrieved response average robot in stabilizing the body is 245 ms, static Testing robot against the angle of roll in standby retrieved response average robot in stabilizing the body is 280 ms, dynamic Testing robot against the roll and pitch in standby retrieved response average robot in stabilizing the body is 8 seconds, Static Testing robot to stabilizing the body against the angel of roll in running the largest robot oscillations obtained 10 degrees, dynamic Testing robot to stabilizing the body against the angle of roll in run retrieved response average robot in stabilizing the body is 490 ms.

Keywords: *inverse kinematics, PID control of ziegler-nichols, quadruped robot*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Revolusi industri telah memasuki era 4.0 yang ditandai dengan adanya beberapa lembaga penelitian yang melakukan pengembangan di bidang robotika, salah satunya adalah pengembangan robot berkaki. Pengembangan robot berkaki biasanya digunakan untuk misi pencarian dan penyelamatan [1] pada wilayah yang tidak terjangkau atau berbahaya bagi manusia [2]. Menggunakan robot beroda sangat efisien, namun hanya terbatas pada medan yang halus, sementara itu lingkungan

sekitar kita tidak cocok untuk robot beroda [3]–[5]. Mobilitas dan kemampuan yang dimiliki robot berkaki untuk berjalan di medan yang kasar dan tidak terstruktur lebih baik dibandingkan dengan robot beroda [6], [7].

Robot berkaki yang sering digunakan adalah *biped* (2 kaki), *quadruped* (4 kaki), dan *hexapod* (6 kaki) [8]. Robot *Quadruped* merupakan salah satu jenis robot berkaki yang memiliki empat kaki untuk menyeimbangkan diri saat bergerak [6]. Robot *quadruped* memiliki beberapa keuntungan, yaitu konsumsi energi yang lebih sedikit, stabilitas yang baik, dan dapat bergerak di medan yang

tidak terstruktur dan kasar [9].

Secara umum robot berkaki *humanoid* memiliki tiga sendi tanpa mempertimbangkan struktur kaki yang digunakan untuk berjalan. Kaki robot menggunakan 3 DoF (memiliki *Degree of Freedom*) karena memiliki pergerakan yang lebih kompleks dibandingkan 2 DoF, yaitu dapat bergerak maju-mundur, kiri-kanan, dan naik-turun. Struktur kaki robot *quadruped* memiliki DoF mencapai 12 menyerupai struktur kaki mamalia [10]. Semakin banyak aktuator yang digunakan maka semakin banyak *Degree of Freedom* (DoF), sehingga robot berkaki lebih mudah beradaptasi dengan lingkungan [5]. Motor servo sering digunakan sebagai aktuator karena memiliki kelebihan, yaitu memiliki kekuatan yang tinggi, inersia rendah dan kecepatan yang tinggi [11].

Kinematika merupakan cara untuk menggerakkan tiap-tiap servo pada kaki robot. Kinematika pada robot *quadruped* membutuhkan analisa stabilitas dan sistem perencanaan medan atau lintasan dengan menggunakan metode *forward kinematics* dan *inverse kinematics* [9]. Untuk mengetahui posisi atau keadaan robot *quadruped* dapat menggunakan *accelerometer* pada sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) dengan mengambil data *roll* dan *pitch* dari *body* robot terhadap medan yang dilalui [12]. Sistem kendali keseimbangan robot berkaki pada berbagai kondisi medan adalah bidang riset yang masih menantang. Oleh karena itu, artikel ini membahas tentang bagaimana implementasi metode *inverse kinematics* terhadap robot *quadruped* menggunakan *accelerometer* dalam kondisi statis dan dinamik terhadap *roll* dan *pitch* yang diberikan terhadap bidang horizontal dengan sudut kemiringan tertentu.

II. STUDI PUSTAKA DAN METODE

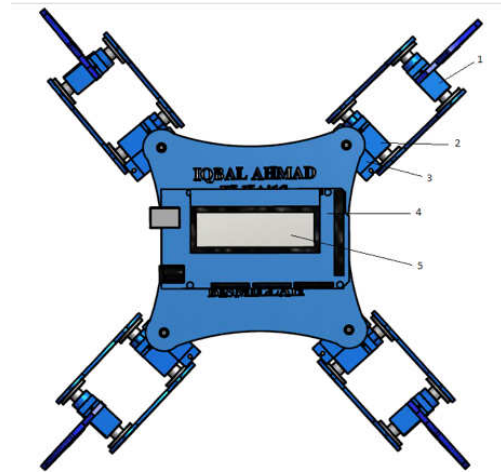
A. Sensor Accelerometer

Penelitian ini menggunakan sensor IMU MPU-6050 yang berisikan sebuah sensor accelerometer dan sebuah sensor Gyroscope yang masing-masing adalah 3 axis dan saling terintegrasi. Dengan fasilitas hardware internal 16 bit ADC untuk setiap kanalnya membuat sensor ini sangat akurat dalam pembacaannya. Sensor menangkap nilai kanal axis X, Y, dan Z secara bersamaan dalam satu waktu.

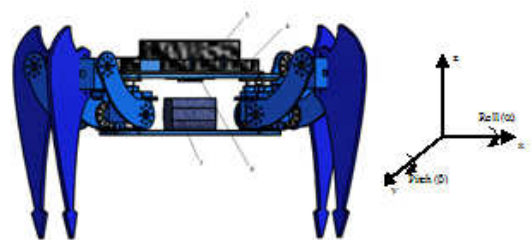
Sensor accelerometer berfungsi sebagai pendeteksi kemiringan dari robot dari arah *roll* (terhadap sumbu x) dan *pitch* (terhadap sumbu y). Data pembacaannya dibandingkan dengan nilai referensi kemiringan yang kemudian nilai selisihnya digunakan sebagai input dari sistem kontrol PID. Penjelasan lebih lanjut terkait peran penting dari *accelerometer* akan dijelaskan pada sub bagian sistem kontrol.

B. Desain Mekanik Robot

Penelitian ini merupakan implementasi *inverse kinematics* robot *quadruped* dengan menggunakan *accelerometer* yang dilakukan di Laboratorium Sistem



Gambar 1. Desain robot quadruped tampak atas



Gambar 2. Desain robot quadruped tampak depan

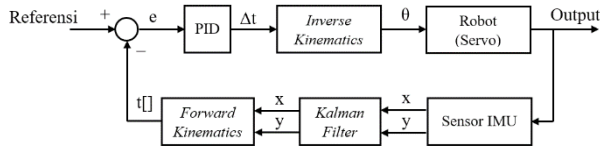
Kendali Universitas Jember. Gambar 2, merupakan desain robot *quadruped* yang memiliki spesifikasi ukuran *body* = 20 cm (*l*) x 20 cm (*w*) x 15,5 cm (*h*), lengan *coxa* (l_c) = 2 cm, lengan *femur* (l_f) = 8 cm, dan lengan *tibia* (l_t) = 10,2 cm.

Adapun keterangan dari Gambar 1 dan Gambar 2 sesuai dengan nomor-nomor yang ada adalah sebagai berikut:

1. Servo 1, Aktuator yang fungsinya adalah untuk menggerakkan kaki robot quadruped bagian Tibia.
2. Servo 2, Aktuator yang fungsinya adalah untuk menggerakkan kaki robot quadruped bagian Femur.
3. Servo 3, Aktuator yang fungsinya adalah untuk menggerakkan kaki robot quadruped bagian Coxa.
4. Arduino Mega 2560, Mikrokontroler yang digunakan robot quadruped sebagai kontrolernya.
5. LCD, fitur robot quadruped untuk menampilkan data sensor juga hasil sudut-sudut yang diperoleh dari proses inverse kinematics.
6. Sensor MPU-6050, sensor accelerometer yang digunakan untuk setpoint robot quadruped untuk memperoleh keseimbangan.
7. Battery LiPo 12V, sebagai catu daya robot quadruped.

C. Sistem Kontrol Robot

Pada Gambar 3 dan Gambar 4, diperlihatkan bahwa *input* dari kontrol robot *quadruped* berupa *roll* dan *pitch* pada kemiringan bidang horizontal. Nilai *roll* (α) dan *pitch* (β) diukur dengan menggunakan *accelerometer* dalam sensor IMU untuk menunjukkan posisi robot (α_r , β_r) terhadap bidang horizontal. *Kalman filter* digunakan



Gambar 3. Diagram blok kontroler

pada sistem dinamis, seperti pembacaan data pada sensor yang terganggu oleh *noise* [13]. Data yang didapatkan dari *accelerometer* diproses dengan menggunakan metode *kalman filter* didalam mikrokontroler untuk menghilangkan *noise* sehingga mendapatkan nilai sudut (α_2, β_2) yang stabil. Nilai β_2 digunakan sebagai *input* pada metode *forward kinematics* untuk mengetahui tinggi ujung *body* robot atau *end effector* (h_1).

Kontrol PID *ziegler-nichols* digunakan untuk mendapatkan gerakan yang halus pada aktuator kaki robot. Nilai *error* (e) digunakan sebagai *input* dengan nilai referensi (ref_h) sebesar 0° , lihat persamaan 3. *Output* dari PID adalah perubahan tinggi ujung *body* robot (Δh) terhadap bidang horizontal. Nilai Δh digunakan sebagai *input* metode *inverse kinematics* merupakan konversi Δh menjadi besaran sudut (θ_n) untuk mengatur sistem penggerak aktuator di setiap sendi secara otomatis dan keseimbangan robot terhadap medan yang dilalui.

D. Kalman Filter

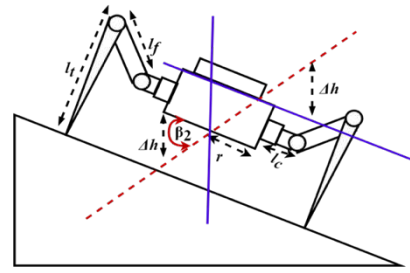
Accelerometer digunakan untuk mendeteksi kemiringan suatu bidang. Secara umum, sinyal *output accelerometer* terdapat *noise* [14]. Maka, diperlukan metode *kalman filter* untuk mendapatkan posisi sudut robot (α_2, β_2) yang presisi, menggunakan persamaan (1).

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k - b.dt + u_{\alpha k}.dt \quad (1)$$

$$\beta_{k+1} = \beta_k - b.dt + u_{\beta k}.dt \quad (2)$$

$$b_{k+1} = b_k \quad (3)$$

dimana ($u_{\alpha}u_{\beta}$)=(α_1,β_1), merupakan hasil pembacaan sensor *accelerometer* yang dipilih secara acak. Parameter α_k dan β_k merupakan estimasi sudut, b merupakan *gyro rate* pada



Gambar 5. Representasi posisi tubuh robot pada bidang miring

sensor IMU, dan dt merupakan estimasi waktu.

E. Forward Kinematics

Inverse Kinematics merupakan kebalikan dari *Forward Kinematics*. *Forward Kinematics* adalah metode untuk menentukan orientasi dan posisi *end-effector* dari besarnya sudut sendi dan panjang *link* lengan yang diberikan. Sebaliknya, *invers kinematik* adalah metode untuk menentukan sudut-sudut sendi dari orientasi dan posisi *end-effector* yang diinginkan. Persamaan *forward kinematics* didapatkan berdasarkan jumlah DOF dan jenis *kinematics chain* dari kaki-kaki robot berkaki.

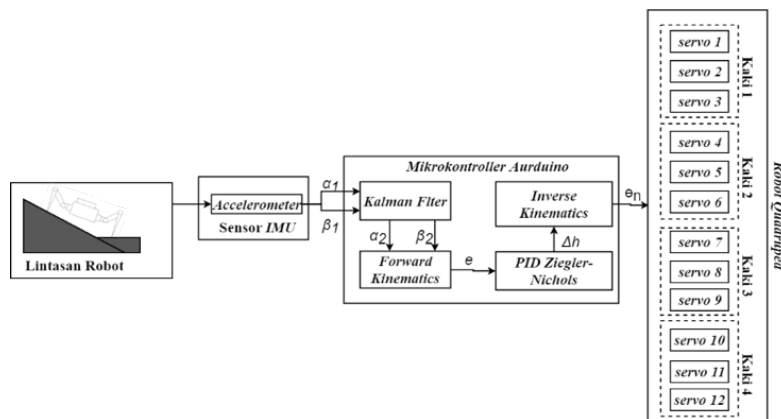
Metode *forward kinematics* merupakan metode perhitungan posisi (x,y,z) *end effector* robot dari sudut sendi robot (α,β,γ) [15], [16]. Sebagaimana tampak pada Gambar 5, metode *forward kinematics* digunakan untuk mengetahui ketinggian robot (Δh) terhadap bidang horizontal, menggunakan persamaan (4).

$$\Delta h = r \times \sin \beta_2 \quad (4)$$

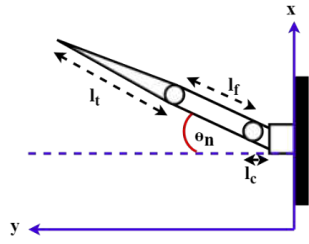
dimana r adalah setengah dari panjang *body* robot ($\frac{1}{2} l$).

F. PID Ziegler-Nichols

PID (*Proportional, Integral, Derivative*) merupakan salah satu kontroler yang sering digunakan untuk sistem kontrol industri [17]. Untuk mendapatkan hasil yang diinginkan menggunakan proses *tunning* [11]. *Tunning* PID digunakan untuk memperoleh konstanta *proportional* (K_p), *integral* (K_i), dan *derivative* (K_d), salah satunya dengan menggunakan metode *ziegler-nichols*.



Gambar 4. Diagram blok sistem elektronik implementasi inverse kinematics pada robot quadruped menggunakan accelerometer



Gambar 6. Grafik representasi sudut

$$K_p = 0.6 \times K_c \quad (5)$$

$$K_i = 2 \times (K_p / P_c) \quad (6)$$

$$K_c = (K_p \times P_c) / 8 \quad (7)$$

$$PID = K_p + K_i + K_c \quad (8)$$

Persamaan 8, merupakan persamaan PID *ziegle-nichols* dimana K_c merupakan *gain* untuk *propotional control*, P_c merupakan periodik atau waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik kritis.

G. Inverse Kinematics

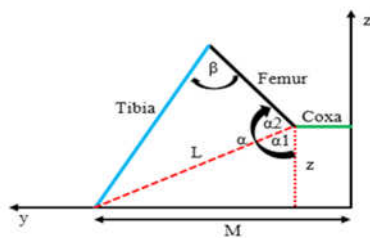
Inverse kinematics pada robot berkaki adalah sebagai sistem penggerak motor servo di tiap-tiap sendi secara otomatis sehingga tidak perlu mengatur secara manual. Pada artikel ini, robot didesain menggunakan 2 *inverse kinematics* yaitu *inverse kinematics* untuk robot berjalan dan *inverse kinematics* untuk keseimbangan robot. Untuk keperluan keseimbangan, ada penambahan sensor IMU sebagai umpan baliknya. Keseimbangan robot sangat diperlukan untuk mempertahankan posisinya terhadap bidang yang dilaluinya.

1. Inverse kinematics untuk jalan

Metode *inverse kinematics* merupakan salah satu cara untuk tetap stabil dengan berorientasi pada gerakan kinematika robot berdasarkan posisi robot (x, y, z) dalam sudut ($\theta_n = [\alpha, \beta, \gamma]$) [18], [16]. Sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 5, untuk keperluan jalan, semua lengan robot diasumsikan lurus sehingga hanya membentuk satu sudut saja yaitu θ_n . Dengan demikian persamaan sudutnya adalah:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (9)$$

Gambar 6 merupakan representasi metode *inverse*



Gambar 7. Grafik representasi sudut keseimbangan robot

kinematics yang digunakan untuk mengontrol jalan robot menggunakan persamaan 9 dimana θ adalah sudut *joint* robot, x dan y adalah posisi robot dalam *cartesian*.

2. Inverse kinematics untuk keseimbangan

Berbeda dengan invers kinematik untuk jalan, invers kinematik untuk keseimbangan melibatkan persamaan yang lebih detail dan lengkap, sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 7.

Tujuan dari inverse kinematik adalah mencari sudut-sudut α dan β . Untuk memudahkan, sudut α dibagi menjadi dua yaitu sudut α_1 dan α_2 . Sudut dapat diperoleh dengan persamaan berikut ini.

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{z}{L} \quad (10)$$

Dengan z adalah tinggi dari robot. Pada persamaan (10), nilai L dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$L = \sqrt{z^2 + (M - coxa)^2} \quad (11)$$

Dengan mendapatkan L , nilai α_2 juga dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \frac{tibia^2 - femur^2 - L^2}{-2(femur)(L)} \quad (12)$$

Dengan menjumlahkan persamaan 10 dan 12, maka didapatkan persamaan 13 berikut ini:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (13)$$

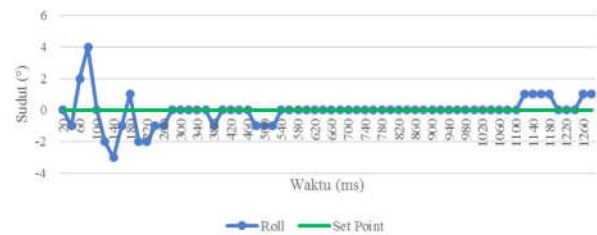
Pada akhirnya, sudut beta dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 11, persamaan untuk β juga didapatkan yaitu:

$$\beta = \cos^{-1} \frac{L^2 - tibia^2 - femur^2}{-2(tibia)(femur)} \quad (14)$$

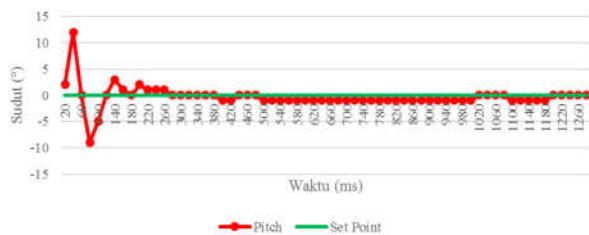
Untuk memudahkan, berikut ini keterangan untuk persamaan-persamaan:

- z = tinggi body robot
- L = Jarak titik tumpu robot terhadap lengan *coxa*
- M = Jarak titik tumpu sampai *body* robot
- Coxa* = Panjang lengan *coxa*
- Femur* = Panjang lengan *femur*
- Tibia* = Panjang lengan *tibia*
- α = Sudut total lengan *femur*
- β = Sudut lengan *tibia*

H. Tuning PID Ziegler-Nichols



Gambar 8. Grafik respon quarter-decay sudut roll



Gambar 9. Grafik respon quarter-decay sudut pitch

Pada robot *quadruped* ini digunakan kontrol PID dimana untuk memperoleh konstanta K_p , T_i , dan T_d digunakan teori *ziegler-nichols*, teori ini memiliki 2 cara untuk memperoleh konstanta yaitu yang pertama dengan menggunakan kontrol *open loop* dan yang kedua dengan menggunakan kontrol *close loop*. Pada penelitian ini digunakan kontrol *close loop* untuk memperoleh konstanta yaitu *Quarter-decay* dengan langkah awal robot diberikan nilai K_p secara bertahap sampai diperoleh grafik sehingga amplitudo pertama memiliki besar 4 kali dari amplitudo yang kedua, sebagaimana tampak pada Gambar 8 dan Gambar 9.

$$\begin{aligned} K_p &= 0,6 \times K_p & T_i &= 0,5 \times T_p & T_d &= 0,125 \times T_p \\ &= 0,6 \times 3 & &= 0,5 \times 0,1 & &= 0,125 \times 0,1 \\ &= 1,8 & &= 0,05 & &= 0,0125 \end{aligned}$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

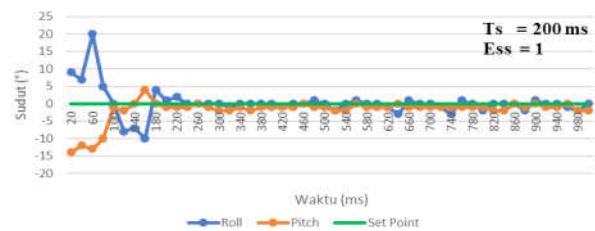
Hasil mekanik robot *quadruped* dengan menerapkan perumusan invers kinematics dengan kontrol PID *ziegler-nichols*, dapat dilihat pada Gambar 10.

Selanjutnya dilakukan pengambilan data dan analisis data sesuai dengan metode penelitian. Pengujian robot berkaki disesuaikan dengan tujuan desain pengendalian. Jika tujuannya adalah untuk keperluan navigasi, pada pengujian berfokus pada kemampuan navigasi dan manuver robot pada lingkungan uji maupun lingkungan sebenarnya. Pada artikel ini, fokus dari pengendalian robot adalah kemampuan robot dalam melakukan keseimbangan dari bidang datar dan miring pada saat diam ataupun pada saat berjalan baik pengujian statis atau dinamis. Pada beberapa sub bagian berikut, dihadirkan hasil dan analisa pengujian kestabilan robot dalam keadaan statis dan dinamis.

Pengujian dilakukan dalam keadaan yaitu keadaan *standby* berdiri dan keadaan berjalan. Pada keadaan



Gambar 10. Hasil mekanik robot quadruped



Gambar 11. Grafik respon kestabilan robot pada sudut pitch 15°

standby, dilakukan dua pengujian yaitu statis dan dinamis. Pada keadaan statis, kemiringan bidang robot tetap, sedangkan pada keadaan dinamis, sudut kemiringan bidang diubah-ubah secara *real-time*. Demikian pula pada keadaan berjalan, dilakukan dua pengujian yaitu statis dan dinamis. Pengujian dilakukan di dalam ruangan dengan bidang berupa papan yang kemiringannya dapat diubah-ubah secara manual. Pengujian dilakukan rata-rata selama 2,5 menit.

A. Pengujian statis terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby

Pada pengujian ini, dilakukan pengujian terhadap sudut *pitch* dari robot yaitu alas yang digunakan sebagai pijakan robot yang diberikan gangguan berupa *pitch* dengan sudut yang telah ditentukan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 11.

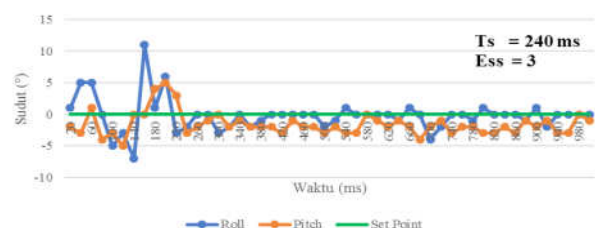
Dapat dilihat grafik pada Gambar 11 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *pitch* sebesar 15°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* (T_s) 200 ms dan *error steady state* (Ess) atau kesalahan keadaan tunak sebesar 1°.

Dapat dilihat grafik pada Gambar 12 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *pitch* sebesar 5°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* 240 ms dan Ess sebesar 3°.

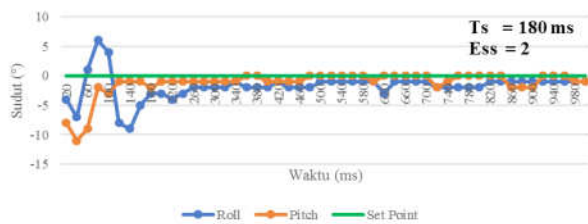
Dapat dilihat grafik pada Gambar 13 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *roll* sebesar 15°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* 180 ms dan Ess sebesar 2°.

Dapat dilihat grafik pada Gambar 14 ketika robot diuji dengan sudut kemiringan *roll* sebesar 5°, respon robot dalam menstabilkan *body* diperoleh *settling time* 320 ms dan Ess sebesar 2°.

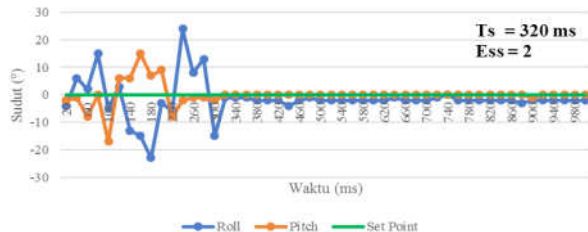
B. Pengujian dinamis terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby



Gambar 12. Grafik respon kestabilan robot pada sudut pitch 5°



Gambar 13. Grafik respon kestabilan robot pada sudut roll 15°

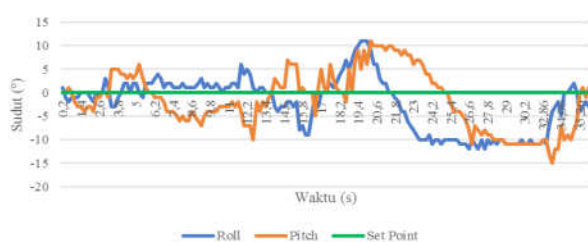


Gambar 14. Grafik respon kestabilan robot pada sudut roll 5°

Pada pengujian ini robot *quadruped* diuji dinamis terhadap sudut *roll* dan sudut *pitch* dimana dalam keadaan *standby*, alas atau bidang pijakan robot dibuat miring beberapa kali dengan sudut tertentu.

Dapat dilihat Gambar 15 pada grafik terdapat 4 kali lonjakan data di detik ke-11 robot diberikan kemiringan *roll* 7°, di detik ke-14 robot diberikan kemiringan *pitch* -10°, di detik ke-18 robot diberikan kemiringan *pitch* 15°, dan di detik ke-26 robot diberikan kemiringan *roll* *pitch* 15°.

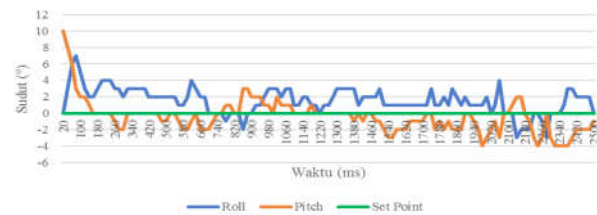
Dapat dilihat Gambar 16 pada grafik juga terdapat 4 kali lonjakan data di detik ke-7 robot diberikan kemiringan *pitch* -10°, di detik ke-9 robot diberikan kemiringan *roll* *pitch* -10°, di detik ke-11 robot diberikan kemiringan *roll* -15°, dan di detik ke-17 robot diberikan kemiringan *roll* 15°.



Gambar 15. Grafik pengujian dinamis 1 robot terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby



Gambar 16. Grafik pengujian dinamis 2 robot terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan standby



Gambar 17. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll -15°



Gambar 18. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll -7°

C. Pengujian statis robot menstabilkan body terhadap sudut roll dan pitch dalam keadaan berjalan

Pada pengujian ini robot *quadruped* dilakukan pengujian dimana robot dalam keadaan berjalan pada bidang miring yaitu berupa sudut *roll* dengan sudut yang telah ditentukan.

Dari Gambar 17 dapat dilihat bahwa pada pengujian statis sudut *roll* -15° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar 4°.

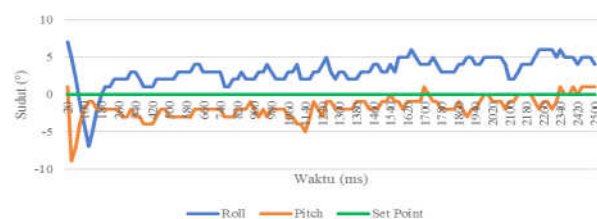
Grafik pada Gambar 18 tampak bahwa pada pengujian statis sudut *roll* -7° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar 5°.

Pada Gambar 19 dapat dilihat bahwa pada pengujian statis sudut *roll* 7° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar 6°.

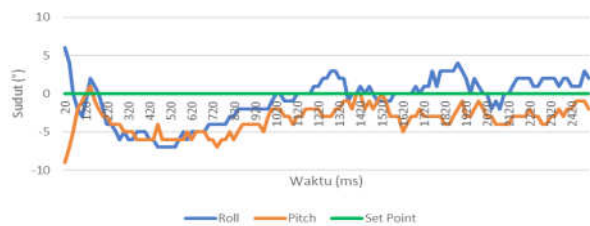
Dari grafik pada Gambar 20 dapat dilihat bahwa pada pengujian statis sudut *roll* 15° dengan *data sampling* 20 ms dan dalam waktu 2,5 detik robot mampu menjaga kestabilan *body*, namun terdapat osilasi atau *error* terbesar 6°.

D. Pengujian Dinamis Robot Menstabilkan Body terhadap Sudut Roll dan Pitch dalam Keadaan Berjalan

Pada pengujian ini robot *quadruped* diuji dinamis



Gambar 19. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll 7°



Gambar 20. Grafik kestabilan robot saat berjalan statis pada sudut roll 15°

ketika berjalan yaitu dengan gangguan sudut *roll* 7° dan sudut *roll* -7°, berjalan dalam waktu 2200 ms dengan *data sampling* 20 ms. Dapat dilihat respon robot *quadruped* dalam menjaga kestabilan *body* pada Gambar 21 dan Gambar 22.

Dari grafik pada Gambar 21 dapat dilihat respon robot *quadruped* ketika berjalan diberi gangguan *roll* sebesar 7° pada detik ke-1540 ms, dengan waktu kurang lebih 580 ms robot mampu menstabilkan *body* yaitu pada detik ke-2120 ms.

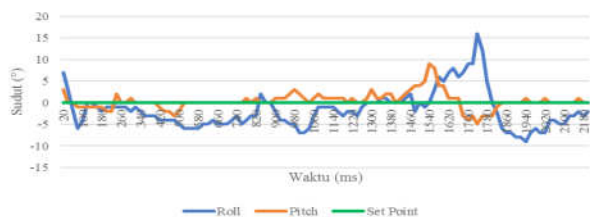
Dari grafik pada Gambar 22 dapat dilihat respon robot *quadruped* ketika berjalan diberi gangguan *roll* sebesar -7° pada detik ke-1740 ms, dengan waktu kurang lebih 400 ms robot mampu menstabilkan *body* yaitu pada detik ke-2140 ms.

E. Perbandingan Kinerja Robot Quadruped Menggunakan Kalman Filter dan Tanpa Menggunakan Kalman Filter

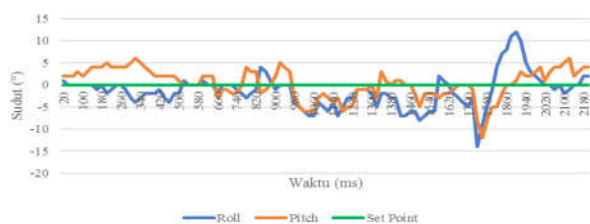
Pada pengujian ini dilakukan perbandingan kinerja robot *quadruped* yang telah menggunakan *kalman filter* dengan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter* dalam keadaan berjalan, terdapat 2 pengujian yaitu:

a. Pengujian statis

Pada pengujian ini robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dan robot *quadruped* yang



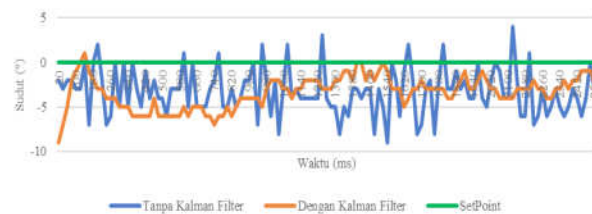
Gambar 21. Grafik kestabilan robot saat berjalan dengan gangguan sudut roll 7°



Gambar 22. Grafik kestabilan robot saat berjalan dengan gangguan sudut roll -7°



(a)



(b)

Gambar 23. Pengujian statis 15° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch

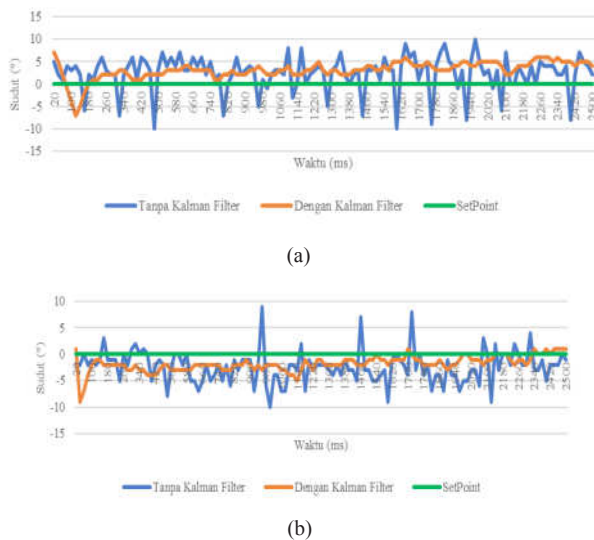
tanpa menggunakan *kalman filter* diuji dengan keadaan berjalan pada bidang yang memiliki kemiringan *roll* 15°, 7°, -7°, dan -15°. Dari pengujian ini diperoleh respon robot *quadruped* dalam mempertahankan *body* untuk tetap stabil.

Pada Gambar 23 pengujian statis 15° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut *roll* dan (b) adalah perbandingan sudut *pitch*, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga, Pada garis biru masih terdapat banyak *noise* atau osilasi yang cukup besar pada pembacaan sensor sehingga memberikan efek pergerakan goyang pada robot *quadruped* sampai -12°. Pada garis jingga grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal -7°.

Pada Gambar 24 pengujian statis 7° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut *roll* dan (b) adalah perbandingan sudut *pitch*, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga, Pada garis biru masih terdapat banyak *noise* atau osilasi yang cukup besar pada pembacaan sensor sehingga memberikan efek pergerakan goyang pada robot *quadruped* sampai -10°. Pada garis jingga grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal 6°.

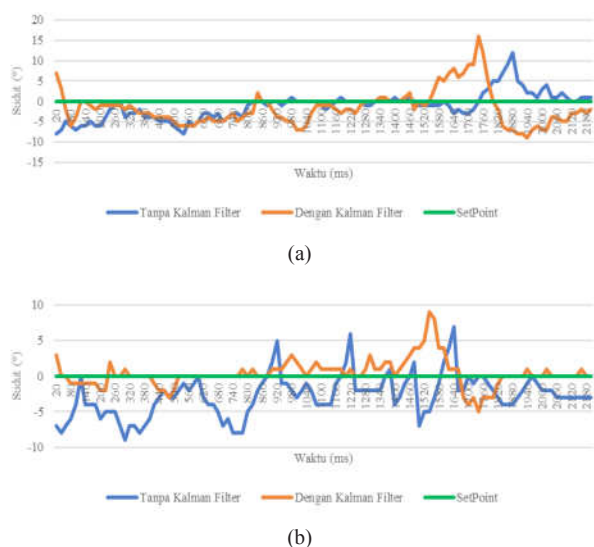
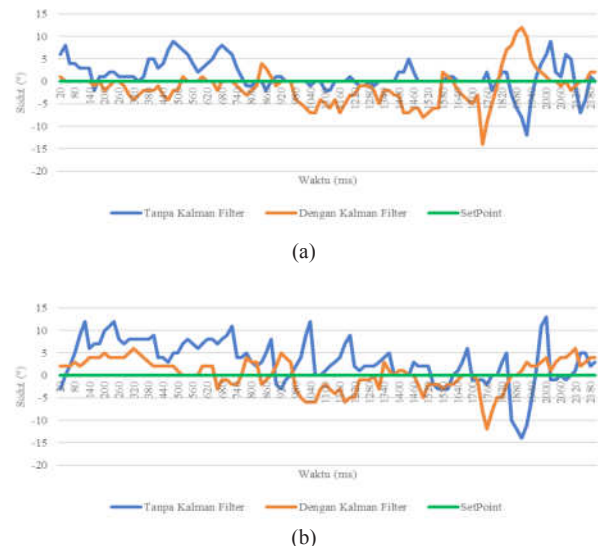
b. Pengujian dinamis

Pada pengujian ini robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter* diuji dengan keadaan berjalan pada bidang

Gambar 24. Pengujian Statis 7° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch

data yang kemudian diberikan gangguan kemiringan sudut roll 7° , dan -7° . Dari pengujian ini diperoleh respon robot *quadruped* dalam mempertahankan *body* untuk tetap stabil dengan pemberian gangguan sudut roll ketika berjalan.

Pada Gambar 25 pengujian dinamis 7° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut roll dan (b) adalah perbandingan sudut pitch, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga seperti pada pengujian statis, hal ini terjadi karena pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang datar tidak terdapat *noise* yang besar, sedangkan pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang miring memiliki *noise* yang cukup besar. Pada garis biru masih terdapat sedikit *noise* pada pembacaan sensor sehingga pergerakan pada robot *quadruped* tidak terlalu goyang dengan osilasi maksimal yaitu -8° . Pada garis jingga

Gambar 25. Pengujian dinamis 7° (a) Sudut roll (b) Sudut pitchGambar 26. Pengujian dinamis -7° (a) Sudut roll (b) Sudut pitch

grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal -7° . Sehingga pada pengujian ini tidak memiliki perbedaan grafik yang signifikan antara robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dengan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter*.

Pada Gambar 26 pengujian dinamis -7° dapat dilihat bahwa (a) adalah perbandingan sudut roll dan (b) adalah perbandingan sudut pitch, garis biru adalah data sudut robot tanpa menggunakan *kalman filter* sedangkan garis jingga adalah data sudut robot dengan menggunakan *kalman filter*. Disini tidak terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara garis biru dengan garis jingga seperti pada pengujian statis, hal ini terjadi karena pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang datar tidak terdapat *noise* yang besar, sedangkan pada pembacaan sensor ketika robot *quadruped* berjalan pada bidang miring memiliki *noise* yang cukup besar. Pada garis biru masih terdapat sedikit *noise* pada pembacaan sensor sehingga pergerakan pada robot *quadruped* tidak terlalu goyang dengan osilasi maksimal yaitu 12° . Pada garis jingga grafik terlihat pergerakan per waktunya adalah *linear* dengan penggunaan *kalman filter* sehingga berkurangnya *noise* dari pembacaan sensor dan pergerakan goyang robot *quadruped* menjadi berkurang walaupun masih terdapat osilasi maksimal -8° . Sehingga pada pengujian ini tidak memiliki perbedaan grafik yang signifikan antara robot *quadruped* yang menggunakan *kalman filter* dengan robot *quadruped* yang tanpa menggunakan *kalman filter*.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan pada robot *quadruped*, kepresisian dari *design* atau ukuran robot *quadruped* sangat berpengaruh terhadap masukan pada metode *inverse kinematics*, semakin pendek desain kaki maka jarak langkah yang

dapat ditempuh juga akan semakin dekat. Pengujian respon robot dalam menstabilkan *body* terhadap sudut *roll* dan *pitch* dalam keadaan *standby* diperoleh *settling time* rata-rata yaitu 235 ms dengan Ess sebesar 2. Pada pengujian statis terhadap sudut *roll* dalam keadaan berjalan di sudut *roll* -15° terdapat osilasi terbesar yaitu 4°, di sudut *roll* -7° terdapat osilasi terbesar yaitu -5°, di sudut *roll* 7° terdapat osilasi terbesar yaitu 6°, dan di sudut 15° terdapat osilasi terbesar yaitu -6°. Pada pengujian dinamis terhadap sudut *roll* dalam keadaan berjalan diberikan gangguan sudut *roll* 7° diperoleh respon dalam menstabilkan *body* dalam waktu 580 ms dan saat diberikan gangguan sudut *roll* -7° diperoleh respon dalam menstabilkan *body* dalam waktu 400 ms.

REFERENSI

- [1] D. Belter, "Adaptive Foothold Selection for a Hexapod Robot Walking on Rough Terrain," in *7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis*, January 2009.
- [2] E. Burkus and P. Odry, "Autonomous Hexapod Walker Robot Szabad (ka)," *2007 5th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, vol. 5, pp. 103–106, September 2007.
- [3] C. Runbin, C. Yangzheng, L. Lin, W. Jian, and M. H. Xu, "Inverse kinematics of a new quadruped robot control method," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, pp. 46, 2013.
- [4] W. H. Chen, G. J. Ren, J. H. Wang, and D. Liu, "An adaptive locomotion controller for a hexapod robot: CPG, kinematics and force feedback," *Science China Information Sciences*, vol. 57, no. 11, pp. 1–18, 2014.
- [5] P. S. Pa and C. M. Wu, "Design of a hexapod robot with a servo control and a man-machine interface," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 3, pp. 351–358, 2012.
- [6] A. A. Bapat, "DESIGN, PROTOTYPING AND TESTING OF AN AUTONOMOUS HEXAPOD ROBOT WITH C SHAPED COMPLIANT LEGS : AbhisHex," The University Of Texas At San Antonio, 2016.
- [7] M. Bloesch *et al.*, "State Estimation for Legged Robots - Consistent Fusion of Leg Kinematics and," in *Robotics: Science and Systems VIII*, 2012.
- [8] E. Burkus and P. Odry, "Autonomous Hexapod Walker Robot Szabad (ka) Autonomous Hexapod Walker Robot," September, 2007.
- [9] M. A. Sen, V. Bakircioglu, and M. Kalyoncu, "Inverse Kinematic Analysis of a Quadruped Robot," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 6, no. 09, pp. 285–289, 2017.
- [10] S. Yeole, "Design of a Quadruped Robot and ITS Inverse Kinematics," 2017.
- [11] B. Jaganathan, R. Sharanya, S. K. Devi, and S. K. Sah, "Ziegler-Nichol's method of online tuning of PMSM for improved transient response," in *ICPCES 2010 - International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, 2010, pp. 1–5.
- [12] N. Rotella, M. Bloesch, L. Righetti, and S. Schaal, "State estimation for a humanoid robot," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, pp. 952–958.
- [13] S. Praesomboon, S. Athaphaisal, S. Yimman, R. Boontawan, and K. Dejhan, "Sensorless speed control of DC servo motor using Kalman filter," *ICICS 2009 - Conference Proceedings of the 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, 2009.
- [14] H. Ferdinando, H. Khoswanto, and U. K. Petra, "Embedded Kalman Filter For Inertial Measurement Unit (IMU) on the Atmega8535," *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, pp. 1–5, 2012.
- [15] A. Dasari and N. . Reddy, "Forward and Inverse Kinematics of a Robotic Frog," *2012 4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction (IHCI)*, 2012.
- [16] H. F. Abdulsada, "Proposed Algorithm to Solve Inverse Kinematics Problem of the Robot," *European Journal of Scientific Research*, vol. 149, no. July, pp. 376–384, 2018.
- [17] P. Meshram and R. G. Kanojiya, "Tuning of PID Controller using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor," *British Journal of Dermatology*, vol. 106, no. 4, pp. 455–460, 2012.
- [18] R. C. Prayogo, A. Triwiyanto, and Sumardi, "Quadruped Robot with Stabilization Algorithm on Uneven Floor using 6 DOF IMU based Inverse Kinematic," *2018 5th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, pp. 39–44, 2018.

Sistem Multi-Sensor Nirkabel Berbasis RFID untuk Pemantauan Keaktifan Siswa

Zakiah, Yuwaldi Away, Fitri Arnia, dan Andri Novandri
Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdulrauf No. 7, Banda Aceh 23111
e-mail: zakiah@mhs.unsyiah.ac.id

Abstrak—Penelitian ini bertujuan merancang suatu sistem pengamatan multisensor, mengembangkan prototipe berbasis mikrokontroler dengan ESP8266 dan modul RFID, serta menganalisis kinerja prototipe. Pengujian dilakukan dengan cara men-tag setiap kali siswa melakukan aktifitas, data *tag client* akan dikirim ke *server*, dan hasilnya ditampilkan PLX-DAQ. Dari 50 kartu tag yang telah terdaftar ID masing-masing siswa, menunjukkan bahwa untuk yang hadir sesuai jadwal diberi logika “1” (sebaliknya logika “0”), dan akan didapatkan data kehadiran dengan menghitung jumlah kehadiran siswa terhadap empat jenis kegiatan di empat lokasi. Data tersebut ditransmisikan ke data-logger melalui dua konfigurasi yaitu *data-logger* sebagai *client* (*indirect*), dan *data-logger* sebagai *server* (*direct*). Dari dua konfigurasi tersebut didapatkan bahwa konfigurasi *data-logger* sebagai *server* mempunyai kinerja 19,08% lebih baik dari *data-logger* sebagai *client*. Berdasarkan pengolahan data, didapatkan bahwa keaktifan siswa tertinggi adalah minat pada kegiatan lembaga bahasa (95,92 %), selanjutnya minat pada kegiatan agama (95,83%), kegiatan belajar mengajar (93,88 %), dan minat baca (79,59 %).

Kata kunci: *RFID, multisensor, keaktifan, sekolah asrama*

Abstract—This study aims to design a multisensor observation system, develop a microcontroller-based prototype with ESP8266 and RFID modules, and analyze the performance of the prototype. From the testing carried out by tagging each time students do activities, the client tag data will be sent to the server, and the results are displayed PLX-DAQ. With the 50 tag cards that have registered the IDs of each student, it shows that those who attend the schedule will be given the logic "1" (otherwise logic "0"), and attendance data will be obtained by calculating the number of attendance of students in four types of activities in four locations. The data is transmitted to Data-loggers through two configurations, namely Data-logger as client (*indirect*), and Data-logger as server (*direct*). From the two configurations it was found that the configuration of Data-logger as a server had a performance of 19.08% better than Data-logger as a client. From the data processing, it was found that the highest activity of students was the interest in the activities of language institutions (95.92%), followed by religious activities (95.83%), teaching and learning activities (93.88%), and reading (79.59 %).

Keywords: *RFID, multisensor, activity, boarding school*

Copyright © 2019 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

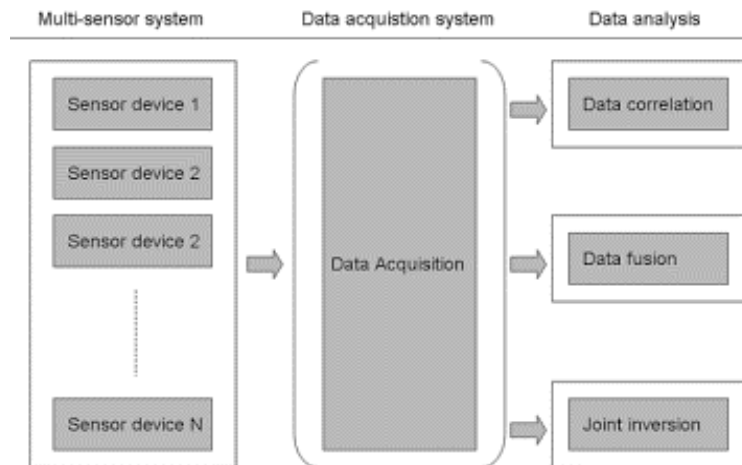
I. PENDAHULUAN

Informasi keaktifan siswa pada *boarding school* [1] diperlukan oleh orang tua siswa untuk memastikan siswa tersebut mengikuti kegiatan yang telah diprogram oleh sekolah. Dengan perkembangan teknologi *Radio Frequency Identification* (RFID) dan sensor nirkabel, memungkinkan dirancang suatu sistem yang dapat mencatat kehadiran siswa di beberapa tempat. Sistem pengamatan yang dikembangkan ini memiliki fungsi untuk melihat rekap data dan status kehadiran dengan lebih efektif dan efisien. Data absensi yang setiap hari semakin bertambah, memungkinkan memilih suatu aplikasi yang terintegrasi dengan perangkat *smart media*. Pada sekolah *boarding*, siswa akan berada di sekolah selama 24 jam, orang tua siswa perlu mengetahui keaktifan siswa, disamping itu pihak sekolah juga membutuhkan sistem

berbasis Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK).

Kajian terkait dengan penelitian sistem berbasis teknologi RFID di lingkungan sekolah/kampus [2,3], bertujuan untuk mencatat kehadiran/presensi siswa (*attendance*) [4]. Kehadiran siswa/mahasiswa telah menjadi elemen penting yang mencerminkan prestasi akademik dan berkontribusi juga terhadap kinerja sekolah/universitas. Berbagai teknologi identifikasi otomatis pernah dilakukan, diantaranya oleh Panggabean [5], untuk proses absensi konvensional suatu perkuliahan [6,7], yang dapat mengganggu fokus mahasiswa saat mendengarkan penjelasan dosen ketika proses absensi dilaksanakan.

Penelitian lain oleh A. Jadid, mendeskripsikan teknologi RFID yang terintegrasi dengan sistem informasi *web* untuk memudahkan proses rekapitulasi data absensi sehingga menghemat waktu [8]. Kajian lain yang terkait juga dilakukan oleh Yoo, dimana telah dikembangkan



Gambar 1. Konsep sistem multisensor

metode “Simple Wi-Fi Direct Connection” untuk meningkatkan kecepatan transmisi data [11].

Permasalahan utama adalah pihak orangtua dan pengurus sekolah *boarding* perlu memastikan data yang teridentifikasi secara otomatis. Berdasarkan fenomena yang tersebut, didapatkan peluang penelitian ini untuk mengetahui prestasi bagi siswa yang selalu aktif tepat waktu dalam berbagai kegiatan, sekaligus dapat menjadi catatan atau acuan meminimalisasi siswa-siswa yang kurang aktif. Oleh karena itu, muncul sebuah ide untuk mendesain suatu sistem untuk memudahkan pengamatan dan pengawasan keaktifan siswa.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain sistem yang sesuai untuk pemantauan keaktifan siswa berbasis teknologi RFID di beberapa lokasi dengan menghasilkan prototipe sistem menggunakan multisensor teknologi RFID, mikrokontroler dan teknologi *wi-fi* untuk pencatatan otomatis dan akhirnya menentukan kinerja dengan merekap status kehadiran dan menghitung presentase keaktifan. Pada penelitian ini penggunaan kartu RFID dipertimbangkan sebagai kartu siswa dan juga sebagai kartu identitas siswa dengan *photo-ID* untuk memastikan wajah siswa sebagai pemilik kartu identitas.

II. STUDI PUSTAKA

Sistem multisensor [9] merupakan sistem yang menggunakan lebih dari satu perangkat sensor dalam interaksinya, jenis perangkat sensor yang digunakan adalah modul yang sama. Konsep sistem multisensor ditunjukkan pada Gambar 1.

Komunikasi data antara sensor dilakukan secara nirkabel [10]. Komunikasi data nirkabel menghubungkan dua atau lebih piranti untuk melakukan pertukaran data seperti jaringan sensor nirkabel (*wireless sensor network*). Pada sistem akuisisi data dalam penelitian ini yang mengendalikan proses adalah mikrokontroler. Salah satu yang populer saat ini adalah WeMos D1 R2 berbasis

ESP8266 yang merupakan gabungan mikrokontroler dengan modul *wi-fi*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan periferal utama yang digunakan adalah RFID dan *Real Time Clock* (RTC). RFID adalah perangkat berbasis elektromagnetik yang dapat mengidentifikasi dan melacak RFID-tag yang mendekat pada RFID-reader. Informasi pengguna disimpan secara elektronik dalam RFID-tag. Terdapat dua jenis RFID yakni pasif dan aktif. Keuntungan menggunakan RFID pasif karena tidak memerlukan catu daya eksternal. Di sini RFID-tag mengumpulkan energi dari gelombang radio dengan pembaca berupa RFID-reader terdekat [3]. Sedangkan RTC merupakan pencatat yang berbentuk *integrated circuit* (IC) yang berfungsi untuk menyimpan data waktu.

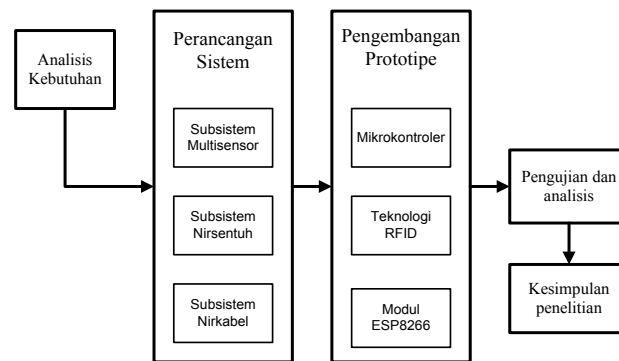
III. METODE

Penelitian ini dilaksanakan dengan merancang dan menguji purwarupa (*prototype*) dengan melakukan eksperimen skala laboratorium. Perancangan dan pengujian disertai analisis respon yang dihasilkan, dilakukan baik per bagian dari sistem maupun secara keseluruhan sistem.

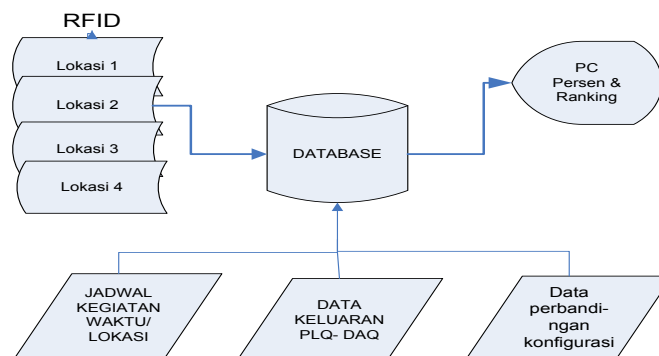
Tahapan perancangan sistem pemantauan dalam penelitian ini dilakukan dengan metode *waterfall* yang telah dimodifikasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa ada empat tahapan yaitu



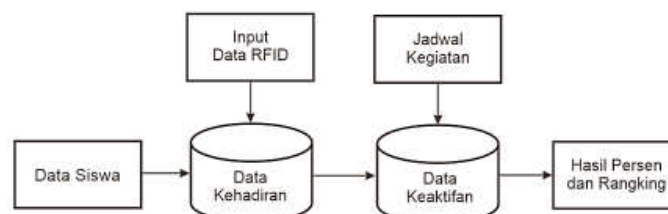
Gambar 2. WeMos D1 R2 ESP8266



Gambar 3. Tahapan merancang sistem pemantauan



Gambar 4. Konsep pengembangan prototipe



Gambar 5. Skema database sistem

analisis kebutuhan, perancangan sistem, pengembangan prototipe, pengujian, dan analisis serta kesimpulan penelitian.

Pengembangan purwarupa (*prototype*) dilakukan dengan metode *modular*, hal ini bertujuan agar mudah untuk perawatan dan pengembangan selanjutnya. Dari hasil pengembangan purwarupa ini dihasilkan konsep purwarupa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Purwarupa terdiri dari empat unit sensor berbasis RFID untuk ruang yang terpisah, terhubung secara nirkabel ke *data-logger*, pemrosesan data dilakukan dengan aplikasi *spreadsheet* (MS Excel) yang telah di *add-on* PLX-DAQ.

Mekanisme kerja sistem RFID multisensor, diawali dengan memasang *data-logger* ke PC, pada RFID, ketika *power supply* diaktifkan, maka *Light Emiting Diode* (LED) merah menyala. Hal tersebut menandakan komunikasi *data-logger* ke RFID belum siap. Beberapa saat kemudian LED hijau menyala yang berarti RFID telah siap menerima RFID-tag. Ketika didekatkan RFID-tag, maka LED hijau padam, dan kemudian LED merah menyala, menandakan data sedang ditransmisikan dari RFID ke *data-logger*. Setelah data diterima oleh *data-logger*, maka LED hijau

kembali menyala.

Skema *database* sistem terdiri dari data siswa, data kehadiran dan data keaktifan. Data kehadiran untuk merekam data *input* dari RFID ditunjukkan pada Gambar 5. Untuk data keaktifan diperlukan suatu *input* jadwal kegiatan sesuai dengan kurikulum sekolah, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar kegiatan harian

No	Waktu Kegiatan	Jenis Kegiatan	Lokasi Kegiatan
1.	00.07- 12. 30	Kegiatan Belajar Mengajar (KBM)	Gedung Sekolah
2.	10. 00- 10. 30	Mengunjungi Perpustakaan (minat baca)	Ruangan Pustaka
3.	06.00- 06. 30	Lembaga Bahasa (English/ Arabic)	Mesjid/ Mushalla
4.	13. 00- 13. 30	Lembaga Bahasa (English/ Arabic)	Mesjid/ Mushalla
5.	19. 30- 21.30	Dayah salafi/keagamaan	Gedung Sekolah



Gambar 6. Rangkaian keseluruhan

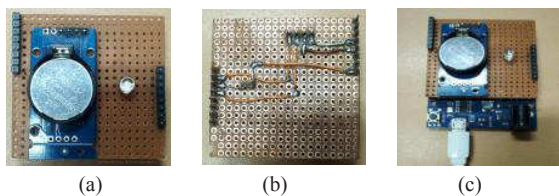
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain sistem pemantauan keaktifan siswa terdiri dari tiga sub-sistem utama, yaitu sub-sistem RFID, sub-sistem *data-logger*, dan sub-sistem *database*. Sistem ini bekerja dengan merekam data dari RFID, kemudian data ditransmisikan ke *data-logger* secara nirkabel, selanjutnya data diakuisisi ke *Personal Computer* (PC) dengan direkam melalui PLX-DAQ secara *realtime*.

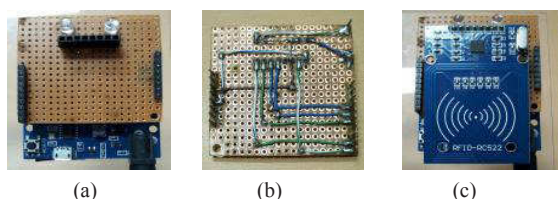
Pengembangan prototipe, menghasilkan sistem yang terdiri dari lima modul mikrokontroler WeMos D1 R2 berbasis ESP8266 sebanyak empat unit pada *client* dan satu unit Wemos untuk *data-logger*. Masing-masing WeMos *client* dipasang pada ruang kelas, perpustakaan, lembaga bahasa dan dayah salafi. Pada Gambar 6 ditunjukkan rangkaian sistem multisensor berbasis RFID untuk pemantauan keaktifan siswa. Pada sistem ini terdapat tiga buah modul dengan spesifikasi, yakni WeMos D1 R2 ESP8266, RC522 RFID Reader Writer Module 13.56 Mhz, dan DS1302 Real Time Clock.

Komunikasi data sistem diawali dari modul RFID sebagai sensor nirsentuh, modul ESP8266 untuk komunikasi nirkabel. Kemudian *data-logger* berbasis ESP8266 mengakuisisi data dan menggabungkan data secara paralel, dan bagian akhir data diterima oleh PC untuk proses analisis data.

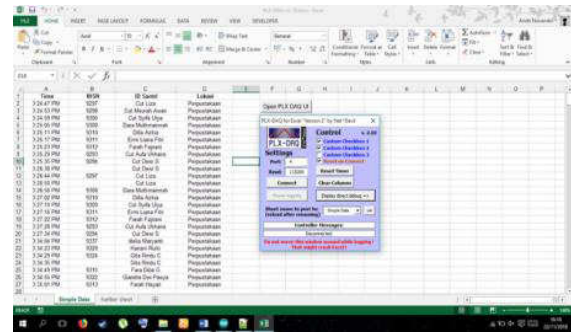
Pada proses pembacaan data dari RFID, perlu



Gambar 7. Data-logger, (a) depan, (b) belakang, (c) terpasang



Gambar 8. Modul RFID, (a) depan, (b) belakang, (c) terpasang



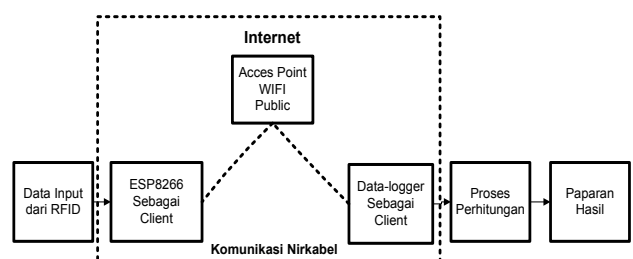
Gambar 9. Sketch tag pada server RFID (PLX-DAQ)

diketahui jarak baca sensor RFID-reader terhadap RFID-tag, dan waktu yang dibutuhkan RFID-reader untuk menginisialisasi kartu RFID-tag apakah terbaca atau tidak. Pendeteksian RFID-tag oleh sensor ditandai dengan nyala lampu indikator LED. LED hijau menandakan data RFID-tag sedang dalam proses pengiriman ke *server*. LED merah menandakan koneksi antara *client* dengan *server*. Pada Gambar 7 diperlihatkan prototipe bagian *data-logger* secara rinci, sedangkan pada Gambar 8 ditunjukkan bagian RFID secara rinci.

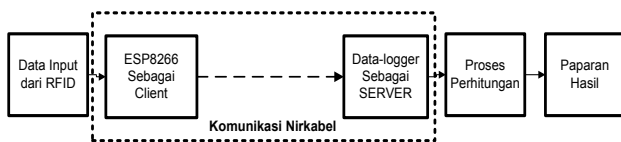
RFID diletakkan pada empat lokasi, dan dihubungkan dengan modul ESP8266 sebagai alat komunikasi. Data yang diakuisisi adalah lokasi dan kode unik RFID-tag akan disimpan dalam *database*. RFID-tag mempunyai kode unik yang dikirim ke *data-logger* melalui komunikasi nirkabel (*wireless*), kemudian diproses kesesuaian data dengan yang ada dalam *database*, sistem menandakan apakah siswa untuk hadir pada lokasi kegiatan pada ruang tertentu, jika data siswa sesuai lokasi dan jadwal, maka akan diberikan logika “1” di PLX-DAQ, jika tidak sesuai maka diberikan logika “0”.

Pada penelitian ini *data-logger* berfungsi untuk mencatat dan merekam data kehadiran siswa melalui sensor, yang berfungsi untuk pengarsipan dan bahan analisis, serta untuk mendapatkan gambaran secara menyeluruh tentang keaktifan siswa yang dipantau. Pada Gambar 9 ditunjukkan data hasil tag berdasarkan jadwal dan tempat yang telah diprogram dan ditampilkan oleh *database* PLX-DAQ.

Komunikasi data nirkabel memerlukan gelombang elektromagnetik sebagai media transmisi data. Komunikasi sensor berbasis RFID sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10. Namun kekuatan sinyal sangat tergantung pada faktor-faktor penghalang, seperti dinding, cuaca dan lainnya. Pada situasi tertentu, kecepatan transfer data secara nirkabel biasanya akan lebih lambat dibandingkan



Gambar 10. Data-logger sebagai client dari jaringan wi-fi



Gambar 11. Data-logger sebagai server

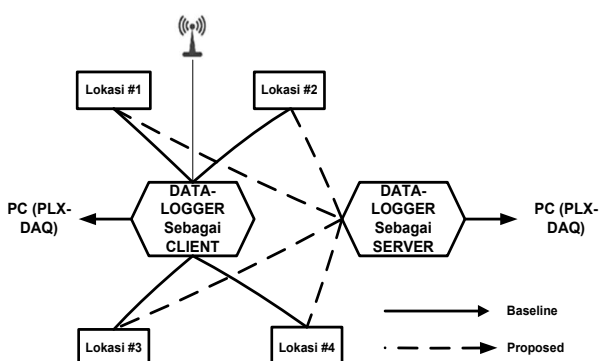
dengan jaringan berkabel.

Proses transmisi data *tag* melalui jaringan umum (*network public*) dengan menggunakan teknologi komunikasi jaringan nirkabel *wi-fi* yang mengumpulkan data sensor dari sensor yang berbeda. *Tag* RFID pada WeMos yang berfungsi sebagai *client*. Kemudian ditransfer menuju *access point public* untuk selanjutnya diteruskan ke WeMos dengan fungsi *data-logger* sebagai *client*. *Server AP* akan menerima data yang dikirimkan oleh ESP8266 (*input*) melalui halaman *localhost* atau jaringan umum, kemudian pada halaman tersebut data yang diterima akan disimpan ke dalam tabel di *database* (*output*).

Pada penelitian ini, dengan mengidentifikasi situasi *layout* bangunan dan mempertimbangkan penggunaan jaringan publik, serta aspek keamanan jaringan (*network security*), maka diusulkan konfigurasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Komunikasi data langsung (*direct communication*) dari RFID & ESP8266 sebagai *client*, disisi lain data diterima secara langsung oleh *data-logger* sebagai *server*. *Data-logger* memeriksa kode unik RFID-*tag* dan lokasi ruang kegiatan, *data-logger* & RTC untuk dilakukan perhitungan.

Berdasarkan Gambar 12, pengujian dilakukan dengan dua metode transmisi data, yaitu menganalisa perbandingan proses kirim data kedua konfigurasi *data-logger* sebagai *client* dan *data-logger* sebagai *server*. Proses transmisi data dengan menggunakan *wi-fi* sebagai jaringan *wireless* umum, dan proses transmisi data dengan menjadikan WeMos sebagai *Access Point*.

Proses transmisi data dengan menggunakan *wi-fi* sebagai jaringan *wireless* umum disebut juga dengan *indirect*, atau *data-logger client*. Pada proses ini WeMos akan dibuat sebagai *client* (*station*), dan *client* tersebut sudah terhubung dengan *hotspot* atau *wireless public*. Sementara pada proses transmisi *data-logger* sebagai *server* (*direct*) adalah proses komunikasi dua perangkat modul ESP8266 dimana salah satu perangkat akan dibuat sebagai *client*, dan satunya lagi akan dibuat sebagai *server*,



Gambar 12. Proses transmisi data

Tabel 2. Perbandingan kecepatan sistem *direct* dan *indirect*

No	Jumlah data tag	Indirect (detik)	Direct (detik)	Perbedaan (detik)	% Selisih
1	5	25	23	2	92
2	10	52	48	4	92,3
3	15	81	74	7	91,3
4	20	115	102	13	88,6
5	25	145	122	23	84,1
6	30	174	147	27	84,4
7	35	200	168	32	84
8	40	239	186	53	77,8
9	45	278	211	67	75,8
10	50	315	233	82	73,9
Rata-rata		162,4	131,4		
Total Selisih		$ y-x /x \times 100\%$		$ 131,4-162,4 /162,4 \times 100\% = 19,08\%$	

client tersebut akan terhubung dengan *hotspot* yang sudah dibuat oleh *server* (AP), yakni WeMos itu sendiri.

Pengujian dilakukan dengan memastikan agar sebelum melakukan peng-*tag*-an, LED hijau menyala menandakan RFID-*reader* dalam keadaan siap. Ketika kartu RFID-*tag* didekatkan ke RFID-*reader*, maka LED hijau akan padam, menandakan data *tag* sedang dikirim, kemudian *data-logger* mencatat waktu menggunakan RTC, selanjutnya dikirim ke PC untuk ditampilkan melalui PLX-DAQ. Pengujian kinerja sistem keseluruhan dilakukan dengan mengukur kinerja sistem RFID sebagai *client* dari jaringan *wi-fi* (*hotspot*) atau *indirect*, kemudian dibandingkan dengan kinerja sistem RFID sebagai *Access Point* (AP) secara langsung dari RFID (*direct*).

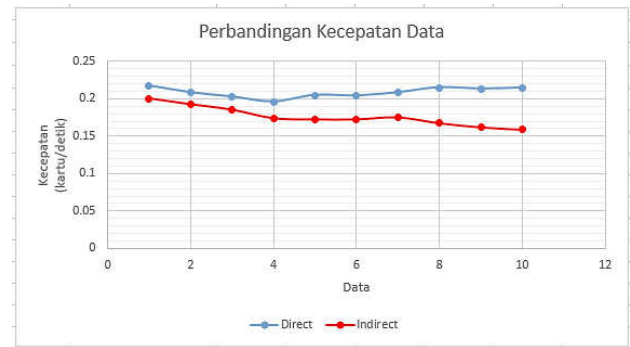
Komunikasi *indirect* adalah *data-logger client* yang terkoneksi ke *wireless*, sementara komunikasi *direct* adalah *data-logger* sedangkan *server* yang sekaligus sebagai *Access Point* (AP), *data-logger* dilengkapi dengan modul RTC sehingga dapat ditampilkan waktu untuk memastikan bahwa setiap data kehadiran dicatat dengan akurat. Terdapat perbedaan kecepatan dalam proses *tag* antara *indirect* dan *direct* (dalam satuan detik). Waktu menunjukkan perbedaan untuk setiap jumlah *tag* (n). Perbandingan kinerja ditunjukkan pada Tabel 3. Pada

Tabel 3. Perbandingan waktu transfer

Jumlah Data Tag (n)	Indirect	Direct
5	25	23
10	52	48
15	81	74
20	115	102
25	145	122
30	174	147
35	200	168
40	239	186
45	278	211
50	315	233



Gambar 13. Perbandingan waktu transmisi



Gambar 14. Perbandingan kecepatan data

Tabel 3 diperlihatkan data perbandingan durasi transfer dari perangkat *tag* ke *data-logger*. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur jeda waktu saat data dibaca, dikirim, hingga diterima. Pengujian dengan dua konfigurasi yaitu konfigurasi *data-logger* sebagai *client* (*indirect*), dan konfigurasi *data-logger* sebagai *server* (*direct*). Dalam pengujian ini dilakukan 10 kali pengujian dengan kelipatan 5 *tag*. Pada *tag* pertama sebanyak 5 *tag*, kedua sebanyak 10 *tag*, ketiga sebanyak 15 *tag*, demikian seterusnya hingga berjumlah 50 *tag*.

Berdasarkan data pengujian tersebut, maka diperoleh grafik perbandingan durasi transmisi seperti pada Gambar 13. Berdasarkan Gambar 13, dapat dilihat dua buah garis *linear* yaitu garis berwarna merah dan garis berwarna biru. Garis merah merupakan data konfigurasi *data-logger client* (*indirect*), sedangkan garis biru merupakan data konfigurasi *data-logger* sebagai *server* (*direct*). Pada grafik tersebut terlihat bahwa grafik konfigurasi *data-logger* sebagai *server* mengalami peningkatan lebih rendah dibandingkan konfigurasi *data-logger* sebagai *client*. Sebagai sampel, pada data jumlah *tag* 50, diperoleh durasi waktu sebesar 233 detik untuk konfigurasi *data-logger* sebagai *server* dan 315 detik untuk konfigurasi *data-logger* sebagai *client*. Berdasarkan data hasil tersebut, dapat terlihat bahwa waktu transmisi data dengan konfigurasi *data-logger* sebagai *server* lebih singkat dari pada konfigurasi *data-logger* sebagai *client*.

Tabel 4 merupakan data perhitungan kecepatan

Tabel 4. Perbandingan kecepatan data

Data	Kecepatan (kartu/detik)		Penambahan Kecepatan	
	Indirect	Direct	Selisih kecepatan	Persen
1	0,2	0,22	0,02	0,09
2	0,19	0,21	0,02	0,08
3	0,19	0,2	0,02	0,09
4	0,17	0,2	0,02	0,13
5	0,17	0,2	0,03	0,19
6	0,17	0,2	0,03	0,18
7	0,18	0,21	0,03	0,19
8	0,17	0,22	0,05	0,28
9	0,16	0,21	0,05	0,32
10	0,16	0,21	0,06	0,35

transmisi data antara konfigurasi *data-logger* sebagai *client* dan konfigurasi *data-logger* sebagai *server*. Kecepatan adalah besaran yang menunjukkan seberapa cepat benda berpindah (m/s). Jarak adalah angka yang menunjukkan seberapa jauh sebuah benda berubah posisi (m), dan waktu adalah interval antara dua buah keadaan/kejadian, atau merupakan lama berlangsungnya sebuah kejadian. Untuk menghitung kecepatan tersebut, dilakukan dengan membagi jumlah kartu dengan waktu. Secara matematis dapat ditulis pada Persamaan (1).

$$V = \frac{s}{t} \quad (1)$$

Keterangan:

V = kecepatan (m/s)

s = jarak (m)

t = waktu (s)

Data kecepatan transfer sebanyak 10 data, dimana kecepatan yang terjadi tidak konstan dan selalu berubah-ubah. Dari hasil perhitungan tersebut, maka diperoleh grafik perbandingan seperti pada Gambar 14.

Pada Gambar 14, dapat dilihat perbandingan kecepatan dari kedua konfigurasi. Garis merah merupakan konfigurasi *data-logger* sebagai *client*, sedangkan garis biru merupakan konfigurasi *data-logger* sebagai *server*. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa konfigurasi *data-logger* sebagai *server* lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi *data-logger* sebagai *client*. Hal tersebut membuktikan bahwa komunikasi pada konfigurasi *data-logger* sebagai *server* itu lebih cepat dibandingkan dari konfigurasi *data-logger* sebagai *client*. Kecepatan tertinggi pada konfigurasi *data-logger* sebagai *server* terjadi pada data ke-1 yaitu sebesar 0,23 kartu/detik. Sedangkan kecepatan tertinggi pada konfigurasi *data-logger* sebagai *client* terjadi pada data ke-1 yaitu sebesar 0,2 kartu/detik.

Dari hasil pengujian dengan dua konfigurasi yaitu konfigurasi *data-logger* sebagai *client* melalui *wireless* umum dan konfigurasi *data-logger* sebagai *server* melalui WeMos sebagai *Access Point*, maka dihasilkan bahwa konfigurasi *data-logger* sebagai *server* menunjukkan kinerja yang lebih cepat 19,08% dibandingkan dengan konfigurasi *data-logger* sebagai *client* melalui *wireless* umum. Pengujian waktu transmisi data dengan variasi jarak antara RFID dan *data-logger* (*server*), didapatkan bahwa



Gambar 15. Grafik waktu transfer berdasarkan jarak

penambahan waktu secara *linier* terhadap penambahan rentang jarak.

Proses transmisi data pada sistem ini juga diuji dengan mengukur jarak antara *client-server* pada saat sinyal *wireless* terputus (ditandai dengan menyala LED merah), sedangkan waktu diukur pada keadaan sebelum sinyal terputus. Pengujian hanya dilakukan untuk konfigurasi *data-logger* sebagai *server*.

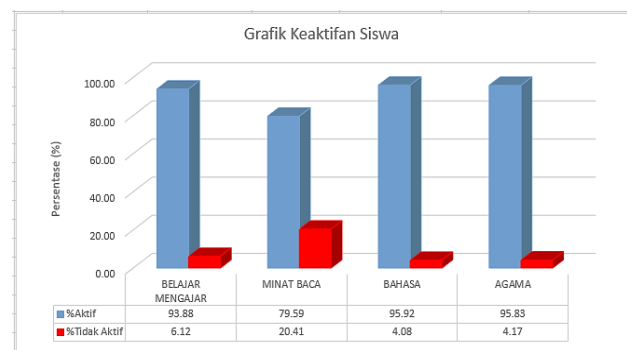
Berdasarkan Gambar 15, didapatkan bahwa penambahan waktu secara *linear* terhadap penambahan rentang jarak, waktu yang dibutuhkan setiap kali *tagger* pada jarak tertentu meningkat secara garis lurus (garis merah).

Tabel 5 menunjukkan pada *data-logger* sebagai *server* memiliki rentang jarak yaitu 24 meter. Pada pengujian pembacaan RFID *tag* didapatkan hasil bahwa RFID *reader* dengan frekuensi 13,56 Mhz tidak bisa membaca jika posisi *tag* tidak tepat di depan *reader*, jika terhalang atau jarak tertentu sinyal tidak bisa mengirim ke *data-logger* dan koneksi terputus.

Bagian akhir penelitian ini dihasilkan informasi keaktifan siswa. Keaktifan siswa pada masing-masing kegiatan ditunjukkan pada Gambar 16. Bar biru merupakan persentase siswa yang aktif sedangkan bar merah merupakan persentase siswa yang tidak aktif. Hasil tersebut diambil dari empat jenis kegiatan yang dilakukan pada jadwal dan ruangan yang berbeda, yaitu kegiatan belajar mengajar, kegiatan minat baca, kegiatan bahasa dan kegiatan agama. Pada Gambar 16 terlihat total siswa yang mengikuti masing-masing kegiatan yaitu sebanyak 50 siswa. Berdasarkan grafik tersebut, persentase siswa aktif terbanyak terjadi pada kegiatan bahasa yaitu sebesar 95,92%. Persentase siswa tidak aktif terbanyak terjadi pada kegiatan minat baca yaitu sebesar 20,41%.

Tabel 5. Perbandingan jarak

Jarak (m)	Waktu (s)
4	5
8	7
12	9
16	11
24	13



Gambar 16. Grafik keaktifan siswa

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan suatu sistem multisensor nirkabel berbasis teknologi RFID dan *wi-fi*, yang dapat mengelola data kehadiran siswa dan tersimpan dalam *database* PLX-DAQ. Sistem ini dapat menyajikan informasi dan mengurangi *human error*, dapat melihat laporan kehadiran siswa secara *real-time*, mudah mengelola data absen di *client* maupun *server*, memiliki basis data terpusat. Dari pengujian dua konfigurasi maka dihasilkan bahwa konfigurasi *data-logger* sebagai *server* menunjukkan kinerja yang lebih cepat 19,08 % daripada *data-logger* sebagai *client*.

Teknik multisensor dan nirkabel yang dikembangkan dari hasil penelitian ini dapat juga digunakan untuk tujuan yang berbeda dengan sensor-sensor yang lain untuk mendukung teknologi *Wireless Network Sensor* (WSN).

REFERENSI

- [1] M. Irwan Hidayat, "Aplikasi Monitoring Aktivitas Santri Berbasis Android" (Studi Kasus : Pesantren Modern Ulul Al-Bab Makassar), Skripsi Jurusan Sistem Informasi Fakultas Sains Dan Teknologi UIN Alauddin Makassar, 2016.
- [2] B. M. Sedghy, "Evolution of Radio Frequency Identification (RFID) in Agricultural Cold Chain Monitoring: A Literature Review", *Journal of Agricultural Science* (jas.ccsenet.org), vol. 11, no. 3, pp. 43-58, 2019.
- [3] Y. Away, Aiyub, Muhammad., "Penerapan Teknologi *Radio Frequency Identification* (RFID) untuk Pengendalian Kinerja Karyawan", Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro 2012, ISSN: 2088-9984, Medan, 14 November 2012.
- [4] H. Alsharqi, H. D., B. Al-Sadawi, N. Salih, and A. Al, "Attendance and Information System using RFID and Web-Based Application for Academic Sector," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 9, no. 1, pp. 266-274, 2018.
- [5] V. O. Panggabean and F. Pandi, "Sistem Absensi Berbasis Radio Frequency Identification (RFID) pada Mikroskil," *JSM STMIK Mikroskil*, vol. 14, no. 2, hal. 129-138, 2013.
- [6] Aditya, Bima, U. Penelitian, "Aplikasi RFID untuk Sistem Presensi Mahasiswa di Universitas Brawijaya Berbasis Protokol Internet," 2014.
- [7] T. Fahrudin, "Pencatatan dan Pemantauan Kehadiran Perkuliahan di Lingkungan Politeknik Telkom Berbasis RFID dan Aplikasi Web," *Konf. Nas. ICT-M Politek. Telkom*, no. 1, hal. 155-159, 2012.

- [8] Jadid, Zulhelmi, dan Ardiansyah, "Rancang Bangun Sistem Absensi Perkuliahan Auto ID Berbasis RFID yang Terintegrasi dengan Database Berbasis Web," *J. Online Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, hal. 59–69, 2017.
- [9] Y. Su, A. Wickramasinghe, and D. C. Ranasinghe, "Investigating Sensor Data Retrieval Schemes for Multi-Sensor Passive RFID Tags," *2015 IEEE Int. Conf. RFID, RFID 2015*, pp. 158–165, 2015.
- [10] C. Jin, J. W. Choi, W. S. Kang, And S. Yun, "Wi-Fi Direct Data Transmission for Wireless Medical Devices," *Proc. Int. Symp. Consum. Electron. ISCE*, pp. 2–3, 2014.
- [11] S. U. Yoon, S. Joshi, And S. S. Shim, "A New Simple Wi-Fi Direct Connection Method using NFC on Remote Control and DTV," *2014 11th Int. Jt. Conf. Comput. Sci. Softw. Eng. Human Factors Comput. Sci. Softw. Eng. - E-Science High Perform. Comput. Ehpc, JCSSE 2014*, pp. 170–175 2014.

INDEKS PENULIS

A

Aditya Putra Perdana Prasetyo, 18
Agus Indra Gunawan, 7, 85, 145
Ahmad Iqbal Nasrudin, 186
Ainur Rizqi Aulia, 169
Amalia, 40
Andri Novandri, 195
Arief Goeritno, 75
Aries Jehan Tamamy, 40
Arif Indra Irawan, 139
Arizal Mujibtamala Nanda Imron, 56
Awang N.I. Wardana, 177

B

Bagus Mulyo Tyoso, 25
Bayu Erfianto, 125
Billi R. Kusumah, 162
Bima Sena Bayu Dewantara, 7, 145
Budi Rahmadya, 103

C

Chandra Edy Prianto, 85

D

Dhea Anjar Sari, 169
Dian Widi Astuti, 1
Doan Perdana, 139

E

Elin Yusibani, 34
Erwin Susanto, 68, 139
Ester Wijayanti, 177

F

Febryyanti Nawang Wulan, 169
Fiqhi Anugerah, 169
Fitri Arnia, 61, 195

G

Gentha Wijaya, 103

H

Haditsah Annur, 47
Hasanah Putri, 169
Henry M Manik, 162
Hidayat Nur Isnianto, 25

I

Intan Nurul Fajri, 110
Ira Devi Sara, 117
Irwandi, 34

K

Kemahyanto Exaudi, 18
Khairul Anam, 186
Khairul Munadi, 61
Khusnul Azima, 61

L

Layna Miska, 34
Leonardus Heru Pratomo, 95
Lusiana, 145

M

M. Agung Prawira N, 186
Mansur Gapy, 110
Maulisa Oktiana, 61
Mauludi Manfaluthy, 134
Mohammad Hafiz Hersyah, 103
Muammar Zainuddin, 47
Muhammad Arrofiq, 25
Muhammad Yusuf Afandi, 75
Muhardika, 157
Muslim, 1

N

Ni'am Tamami, 85

O

Oskar Natan, 7

P

Parman Sukarno, 125
Porman Pangaribuan, 68

R

R Rendyansyah, 18
Rahmat Yasirandi, 139
Rijeqi Rahmawati, 25
Rinaldi Aditya Pratama, 68
Rini Safitri, 34
Rizal Munadi, 110
Rizka Reza Pahlevi, 125

S

Saddam Azmi, 117
Sinka Wilyanti, 134
Stefanus Yudi Irwan, 177
Sumardi, 56
Suriadi, 110
Susilohadi, 162
Syafii, 157

T

Trya Agung Pahlevi, 1

W

Wahyu Muldayani, 56

Y

Yona Mayura, 157
Yuwaldi Away, 117, 195

Z

Zaenal Arifin, 40
Zakiah, 195

INDEKS KATA KUNCI

A

accelerometer sensor 186
acoustic impedance 94, 145, 155, 156
akuakultur 7-10
akustik 145-55, 162-68
algoritma 7-17, 19, 20, 47-55, 62-64, 75-78, 95-101, 103, 108, 110-12, 114, 117, 118, 120, 123, 137, 141, 145, 148-50, 158, 161, 178, 181, 182
algoritma genetika 47-55, 161
arduino 25-31, 33, 40-43, 45, 46, 57, 70, 87, 104, 118, 120, 124, 129, 131, 134, 136, 158-60, 187
atoll 3.3 169, 171, 172, 175

B

bandpass filter 1-6
Bandung 68, 125, 139, 141, 143, 144, 162, 169, 176
barcode 139
batubara halus 177-85
bawah air 162-65, 167, 168
berbasis kejadian 125
B-mode 85-89, 91, 93, 94
boost converter 110, 116

C

cell splitting 169-76
color moment 61-67
complementary split ring resonator 1-3, 5

D

data logger 40-43, 45, 46
dinamis 125, 139, 141, 143, 186, 188, 190-94
DWD 61-67

E

echo 85-90, 92-94, 145-55
elektromiograf 56, 57, 59
energi terbarukan 40, 45, 48, 54, 68, 157, 158
engine immobilizer 75-77, 79-81, 83
esp 8266 27, 29-33

F

fantom ORNL-MIRD 34-39
filter mikrostrip 1
fuzzy logic 18, 19, 21-24, 45, 67, 74, 103, 106, 108, 112, 116, 133, 144

G

grid search 7-9, 11, 13-15, 17, 145, 149

I

impedansi akustik 145-55
inverse kinematics 186-89, 191, 193, 194
inverter 5-tingkat 95-97, 99, 101
IoT 33, 45, 108, 125-27, 132, 133, 136, 138, 144

J

jaringan 25-27, 34-36, 38, 40, 47, 48, 51, 62, 86-88, 134-37, 140, 143, 157, 158, 169-76, 196, 198, 199
jaringan LTE 169, 171, 173, 175, 176
jatuh tegangan 47, 48

K

kadar gula 103-9
kanker payudara 34, 35, 37-39, 108
kapasitas dan kualitas 169, 171, 173, 175
kapasitas daya aktif 47, 51, 52, 54
keaktifan 195-99, 201
kecepatan 19-21, 23, 26, 40-45, 57, 59, 60, 87, 90-93, 95, 117-21, 123, 124, 140, 145-47, 154, 171, 173, 187, 196, 198-200
kematangan 61-67
ketepatan 44, 117-23
kinerja pengendalian 177
KNN 7, 11, 13, 16, 61, 63-66
komunikasi 19, 24, 26, 41-43, 120, 125, 137, 139, 140, 142, 143, 162, 163, 165, 167, 169, 170, 176, 195-200
kualitas daya 47, 48
kualitas jaringan 169, 171, 173, 175
kualitas layanan 1, 139, 140, 142-44
kursi roda elektrik 56-60
kwh meter 25-27, 29-33, 45

L

LED 76, 134-38, 197-99, 201
logika fuzzy tsukamoto 103, 104, 107

M

machine learning 7-17, 24
manajemen pembebanan 157-60
manipulator mobile robot 18, 19, 21, 23
MCNPX 34-37, 39
mikrokontroler 46, 68, 70, 75-84, 125, 187, 188, 195-98
minyak kelapa sawit 61

INDEKS KATA KUNCI

monte carlo 34-39
motor servo 68, 70, 74, 118, 121, 122, 186, 187, 189
motor stepper 87, 117, 118, 120, 121
MPPT 41, 42, 45, 74, 110-16, 124
mqtt 125-33
multi konstrain 47, 49, 51-55, 161
multisensor 195-98, 201

O

otentikasi 125
otomatis 26, 32, 41, 87, 96, 108, 111, 117, 136, 137, 139, 158-60, 180, 182, 188, 189, 195, 196

P

panel surya 40, 41, 45, 46, 49, 68-74, 110-17, 120, 123, 157-60
panjang gelombang 95, 96, 99, 101
patah tulang 85, 86
pen 85-89, 91, 93
penggilingan batubara 177-83, 185
penginderaan jauh 162, 164
peningkatan kontinuitas suplai 157-59, 161
PID 117, 118, 120-24, 129, 180, 185-90, 194
pid ziegler-nichols 186, 188, 189
PLTS 47-55, 95, 124, 157-61
plts off grid 157-59, 161
plts on grid 47-55, 158, 161
PNO 110-16
Poe 134-38
presensi 139-44, 195, 201

Q

Q code 139-44

R

radioterapi 34-39
raspberry 26, 33, 103, 104, 106-8, 140-44
raspberry pi 33, 103, 104, 106-8, 140-44
real time 25-27, 32, 33, 43, 46, 78, 162, 172, 196, 198
receiver 7, 12, 75, 76, 81, 145-47, 162-68

RFID 140, 195-202
robot quadruped 186-93
rugi daya 51
rugi daya aktif 51
rugi-rugi daya 47-54

S

sekolah asrama 195
sensor 9, 18-30, 32, 33, 40-45, 56-59, 67, 70, 73-84, 103-9, 117-21, 123, 124, 132, 134-39, 144-48, 155, 156, 159, 162-64, 166, 181, 183, 186-89, 191-93, 195-99, 201, 202
sensor accelerometer 139, 144, 186, 187
sensor arus 25-30, 33, 40-45, 70, 159
sensor cahaya 40, 42-45, 70, 74, 117, 118, 120, 134, 135
sensor fingerprint 76, 79, 81-83
sensor fusion 83
sensor gas 18, 19, 21, 23, 24
sensor gyroscope 187
sensor inframerah 76, 136
sensor passive infrared receiver 75, 81
sensor tetrahedron 117
sensor warna tcs3200 103, 104, 107, 108
sistem pengaman 75, 77-83
sistem pengaman pada mobil 75, 77, 80-83
struktur kontrol 177-85
substrate integrated waveguide 1-3, 5
sun tracker 117-24
SVM 8, 9, 11, 13-17, 102

T

telemonitoring 25-27, 29, 31, 33
tenaga angin 40-45
tenaga listrik 41, 48, 49, 158, 161
tenaga matahari 40-43, 45
trajectory 18-21, 23, 24
transmitter 145-47, 162-68, 172, 174
tujuan kontrol 177, 180-85

U

ultrasonic 85, 87, 89, 91, 93, 94, 145-47, 155
ultrasonik 85-89, 94, 145-49, 151, 153-55

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

