

DAFTAR ISI

Rancang bangun prototipe alat ukur konsentrasi CO, suhu, dan kelembapan udara berbasis Arduino dengan sensor MQ-7 dan DHT11 (David Halomoan Nababan, Hasanuddin*, Zulfian).....	1
Analisis pengaruh inhibitor alami (ekstrak ampas kopi dan ampas kopi) terhadap laju korosi pada permukaan besi S45C berbasis citra gambar (Muhammad Ilyas, Muhammad Nasir, Hari Mukti, M. Padli Sandi, B. Budiana*).....	7
Analisis pengaruh susunan panel sandwich komposit berbasis serat abaka dan papan gipsum terhadap <i>sound transmission loss</i> menggunakan simulasi INSUL 9.0 (Bilqia Mafaz*, Susilo Indrawati, Moch. Zainuri).....	14
Perbandingan CT simulator kontras dan non-kontras pada treatment planning radioterapi kanker <i>cervix</i> dan <i>head & neck</i> menggunakan Linac (Widya Rachma Wulan, Arum Sinda Santika*, Sayid Mubarak, Ghifari Muhammd).....	20
Pendugaan potensi cadangan volume akuifer air tanah di daerah Sragen bagian timur (Darsono*, Sorja Koesuma, Budi Legowo, Ahmad Marzuki, Nuryani, Gatot Yuliyanto).....	28
Rancang bangun prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dengan sensor load cell berbasis IoT (Damar Putri Rizqiya, Hartono, Abdullah Nur Aziz*).....	36
Analisis Parameter Kinetika Neutron Reaktor NuScale dengan Selongsong Ti3SiC2 Menggunakan Metode Monte Carlo (Fajar Arianto*, Wahyu Budi Utomo, Rahmania Serli Assifa, Indras Marhaendrajaya).....	44
Design of a smart automated switching multi-channel, multi configurations resistivity meter (Fuad Abdulloh, Hartono, R. Farzand Abdullatif*, Abdullah Nur Aziz).....	50
Analisis Indeks Kerentanan Seismik berdasarkan sebaran nilai Vs30 di Pemalang, Jawa Tengah (Urip Nurwijayanto Prabowo*, Zaroh Irayani dan Sehad).....	58

Rancang bangun prototipe alat ukur konsentrasi CO, suhu, dan kelembapan udara berbasis Arduino dengan sensor MQ-7 dan DHT11

David Halomoan Nababan, Hasanuddin*, Zulfian

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Tanjungpura
Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi, Pontianak, 78124, Kalimantan Barat

*email : hasanuddin@physics.untan.ac.id

Abstrak – Telah dilakukan perancangan prototipe alat ukur konsentrasi CO, suhu, dan kelembapan udara menggunakan sensor MQ-7 dan DHT11. Rancangan prototipe ini mengintegrasikan Arduino dengan sensor MQ-7 dan DHT11. Hasil pembacaan sensor ditampilkan pada layar LCD, termasuk waktu, kadar CO, suhu, dan kelembapan udara. Penelitian diawali dengan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Akurasi prototipe alat diuji dengan cara membandingkan hasil pengukuran prototipe alat ukur dengan alat standar. Pengambilan data pada prototipe alat ukur dilakukan setiap 1 menit selama 3 jam, selama 4 hari berturut-turut. Hasil pengukuran dianalisis untuk memperoleh nilai galat *Root Mean Square* (RMSE) antara prototipe alat ukur dan alat standar. Nilai RMSE yang didapat dari pengukuran parameter CO, suhu, dan kelembapan udara masing-masing adalah 5,32%, 0,61%, dan 5,23%. Berdasarkan persentase nilai RMSE yang diperoleh, prototipe alat ukur dapat mendeteksi kadar CO, suhu, dan kelembapan udara dengan baik.

Kata kunci: Arduino, CO, DHT-11 sensor, RMSE, MQ-7 sensor

Abstract – A prototype instrument for measuring CO concentration, air temperature, and humidity using the MQ-7 and DHT11 sensors has been successfully developed. The prototype integrates an Arduino microcontroller with the MQ-7 and DHT11 sensors. The sensor readings are displayed on an LCD screen, showing the time, CO concentration, temperature, and air humidity. The study began with the design and development of both the hardware and software components. The accuracy of the prototype instrument was evaluated by comparing its measurements with those from standard reference instruments. Data acquisition from the prototype was conducted at 1-minute intervals over 3 hours on 4 consecutive days. The measurement results were analyzed to determine the Root Mean Square Error (RMSE) values of the prototype relative to the standard instruments. The RMSE values for CO concentration, temperature, and air humidity were 5.32%, 0.61%, and 5.23%, respectively. Based on these RMSE percentages, the prototype instrument demonstrated good performance in detecting CO concentration, air temperature, and humidity.

Key words: Arduino, CO, DHT-11 sensor, RMSE, MQ-7 sensor

PENDAHULUAN

Udara merupakan campuran mekanis yang terdiri dari berbagai macam gas. Normalnya, komposisi udara terdiri dari kandungan gas nitrogen 78,1%, oksigen 20,94%, dan karbon dioksida 0,03% [1]. Udara memiliki peran besar dalam kehidupan manusia. Namun, sifat udara yang mudah tercemar menimbulkan masalah baru sehingga menyebabkan pencemaran udara [2]. Pencemaran udara biasanya terjadi di wilayah dengan mobilitas tinggi, seperti wilayah perkotaan. Meningkatnya mobilitas tersebut berakibat pada semakin banyaknya pabrik industri dan berbagai moda transportasi, khususnya kendaraan sepeda motor, yang menyumbang polusi udara setiap hari [3].

Sistem transportasi, khususnya di daerah perkotaan, cenderung lebih kompleks dan mengalami kemacetan pada jam-jam sibuk karena tingginya jumlah kendaraan bermotor di perkotaan. Pencemaran udara yang dihasilkan memberikan dampak pada kesehatan individu sekalipun polusi yang dihasilkan memiliki konsentrasi rendah. Dampak kesehatan yang ditimbulkan jika menghirup polusi udara yang tinggi, seperti infeksi saluran pernapasan atas (ISPA), bronkitis, radang tenggorokan, dan hidung berair [4]. Karbon monoksida adalah salah satu contoh polutan udara yang disebabkan oleh emisi gas buang. Karbon monoksida terjadi karena proses pembakaran yang tidak sempurna dari senyawa karbon, sedangkan hasil pembakaran sempurna adalah karbon dioksida [5][6].

Karbon monoksida merupakan gas yang tak berwarna, tak berbau, dan tak berasa. Namun, dampak yang ditimbulkan jika terpapar karbon monoksida berlebihan dapat mengganggu konsentrasi dan refleks tubuh, menyebabkan perubahan tekanan darah, serta mengganggu fungsi otot, khususnya pada penderita penyakit jantung [7]. Hal tersebut dapat terjadi karena hemoglobin lebih mudah mengikat karbon monoksida dibandingkan oksigen, sehingga mengganggu suplai oksigen ke jaringan tubuh [8].

Karbon monoksida bisa menjadi pembunuh karena keberadaannya tidak bisa dideteksi secara langsung dengan panca indera. Oleh karena itu, perlu dilakukan perancangan dan pembuatan alat yang dapat mengukur tingkat konsentrasi karbon monoksida secara *real time* dan akurat.

Penelitian yang dilakukan oleh Rachman (2016) mengembangkan prototipe sistem pemantauan menggunakan sensor gas CO [5]. Penelitian yang sama juga dilakukan oleh Iqbal (2017) dengan merancang sistem pemantauan pencemaran udara menggunakan teknologi nirkabel dan sensor MQ-7 [8]. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Ya'kut (2020) dengan penelitian mengenai rancang bangun sistem pengukur gas karbon monoksida menggunakan sensor MQ-7 dan mikrokontroler ATmega 16A [9]. Selain mengukur gas karbon monoksida, rancangan alat ini juga dapat digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan menggunakan sensor DHT11. Sensor ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan stabilitas yang baik, serta mampu mentransmisikan sinyal hingga jarak 20 meter [10].

Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun alat ukur menggunakan mikrokontroler Arduino ATmega 328p sebagai mikrokontroler, sensor MQ-7 sebagai pendeteksi gas karbon monoksida, serta DHT11 sebagai pendeteksi suhu dan kelembapan lingkungan secara *real time*. Sensor MQ-7 dapat mengukur konsentrasi polutan karbon monoksida pada kadar 10 hingga 10000 ppm. Modul ini dapat digunakan dengan daya sebesar 3,3 volt hingga 5 volt. Sensor DHT11 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara dengan kalibrasi sinyal digital.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini meliputi tiga tahap, yakni tahap perancangan, pembuatan, dan pengujian.

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi laptop, obeng, solder, gunting, dan lem tembak. Bahan yang digunakan meliputi Arduino ATmega 328p, sensor MQ-7, sensor DHT11, kabel jumper, *powerbank*, solder, kotak hitam, *Liquid Crystal Display* (LCD) 16 × 2, dan RTC DS1302.

Uji akurasi menggunakan alat pembanding standar, yaitu *air quality detector YT-1200H-S4* untuk mengukur polutan karbon monoksida dan *instrumen digital Lutron LM-8010* untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Akurasi *Air Quality Detector* yang digunakan sebesar ±3%, sedangkan akurasi dasar yang dimiliki *Digital Instrument Lutron LM-8010* sebesar ±3% dari pembacaan ±8 digit (pada suhu 25°C ±5°C).

Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur, persiapan alat dan bahan, serta perancangan sistem. Tahap studi literatur merupakan tahap pertama yang berguna sebagai dasar untuk mengetahui langkah-langkah rancangan yang perlu dilakukan. Kemudian dilakukan perancangan komponen dan sistem program. Setelah alat berhasil dibuat dan dikalibrasi, akurasinya diuji dengan membandingkannya dengan alat standar yang tersedia. Pengujian dilakukan dengan cara mengukur konsentrasi CO, suhu, dan kelembapan udara di luar ruangan (persimpangan jalan) pada tempat dan hari yang berbeda, sehingga diperoleh data sebanyak 4 kali fase pengukuran (tempat dan waktu yang berbeda). Setiap fase pengukuran dilakukan selama 3 jam, setiap menit, sehingga diperoleh data serangkaian waktu.

Analisis data

Untuk menentukan seberapa besar akurasi alat ukur yang dibuat, nilai galat alat perlu dihitung. Dalam penelitian ini, digunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebagai nilai galat alat. Adapun persamaan RMSE ditunjukkan pada persamaan (1):

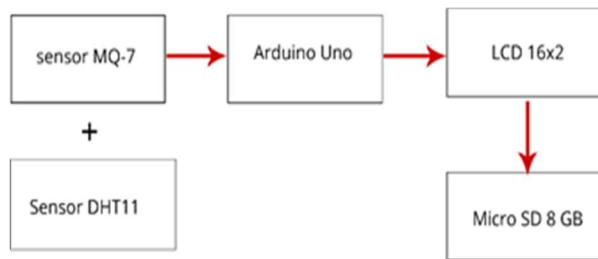
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{x_i - y_i}{x_i} \right)^2} \times 100\% \quad (1)$$

dengan x_i dan y_i masing-masing adalah nilai besaran yang diukur dengan prototipe alat ukur dan alat pembanding. Nilai n adalah banyaknya data yang diambil dalam pengukuran. Total data yang diambil oleh setiap alat ukur adalah 720 datum (= 4 hari × 3 jam × 60 menit).

HASIL DAN PEMBAHASAN

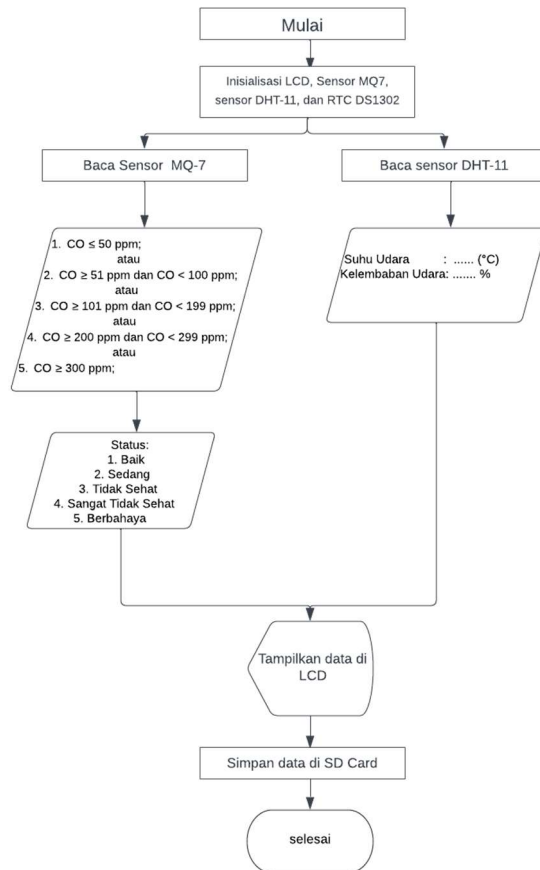
Perancangan Alat

Perancangan alat rancang bangun prototipe dibagi menjadi beberapa bagian, seperti perancangan diagram sistem yang terbagi menjadi perancangan sistem perangkat keras, perangkat lunak, dan diagram blok perancangan sistem secara keseluruhan. Komponen tersebut terdiri dari perancangan LCD 16×2.



Gambar 1. Diagram blok sistem

Pada Gambar 1, sensor MQ-7 berfungsi sebagai pendeteksi gas karbon monoksida, sedangkan sensor DHT11 berfungsi sebagai pendeteksi suhu dan kelembapan. Tampilan data yang dihasilkan dapat dilihat melalui LCD dan disimpan pada media penyimpanan data *Secure Digital (SD) Card*. Setelah itu, langkah selanjutnya adalah mendesain *flowchart* sistem. *Flowchart* sistem dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart sistem

Pada saat prototipe alat menyala, yang pertama kali diukur adalah gas karbon monoksida beserta status karbon monoksida yang terukur. Hasil pengukuran ditampilkan melalui LCD. Setelah pengukuran gas karbon monoksida, selanjutnya dilakukan pengukuran suhu dan kelembapan udara, dan hasilnya akan ditampilkan pada layar LCD. Setelah hasil pengukuran semua besaran tersebut ditampilkan, data akan disimpan ke dalam kartu SD.

Kalibrasi Sistem

Kalibrasi dilakukan pada sensor MQ-7 dan DHT11. Sebelum dilakukan pengambilan data, alat dikalibrasi dengan melakukan pengambilan data menggunakan alat pembanding, kemudian dihitung selisih nilai antara prototipe alat dan alat pembanding untuk mengoreksi hasil pengambilan data di lapangan. Hasil data yang didapat lebih akurat.

Pengujian untuk kalibrasi sensor MQ-7 dan DHT11 dilakukan dengan pengukuran dengan gas karbon monoksida yang dihasilkan sepeda motor kemudian sensor akan mengukur dan hasil pengukuran akan dikirim ke Arduino

ATMega 328p dan data disimpan. Fungsi *void loop* digunakan untuk memproses variabel *h* untuk kelembapan dan *t* untuk suhu, yang nantinya akan diproses dan dikirim secara bersamaan ke laptop sebagai *server*. Skrip di dalam *void loop* harus diperhatikan dengan baik karena nantinya data kelembapan (*h*) dan suhu (*t*) dari sensor DHT11 akan dikirimkan bersamaan ke laptop. *Void setup* berfungsi untuk mengatur jalannya program pada Arduino.

```

void loop() {
  // deklarasi variabel
  float tegangan_sensor;
  float RS;
  float RO;
  float nilaisensor;
  nilaisensor = nilaisensor/100.0;
  Serial.println(nilaisensor);
}

Void setup(); {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("DHT11 test!"));
  dht.begin();

  void loop(); {
    delay(2000);
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();
    float f = dht.readTemperature(true)

```

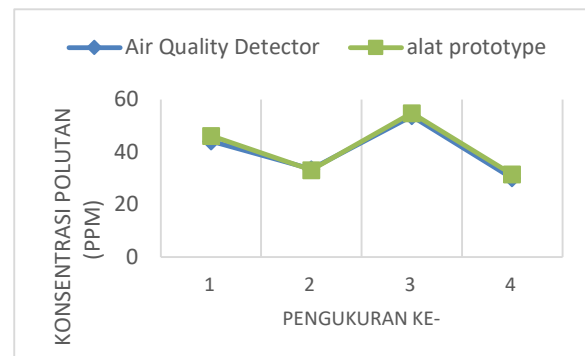
Pengujian sensor MQ-7

Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah sensor MQ-7 dapat berfungsi serta untuk mengetahui tingkat akurasi (nilai *error*) dalam pengukuran gas karbon monoksida. Pengujian sensor MQ-7 dilakukan dengan cara membandingkan nilai pengukuran konsentrasi karbon monoksida selama 3 jam, setiap menit, dari prototipe alat yang dibuat dan alat detektor kualitas udara di tempat terbuka (persimpangan jalan). Pengambilan data dilakukan di 4 lokasi pada hari-hari yang berbeda.

Gambar 1 menunjukkan perbandingan rata-rata hasil pengukuran konsentrasi polutan CO oleh sensor MQ-7 pada prototipe alat ukur dengan alat pembanding pada setiap lokasi dan hari tertentu. Hasil pengukuran kadar CO dengan sensor MQ-7 menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dari hasil pengukuran alat pembanding.

Berdasarkan Gambar 3, hasil pengukuran yang diperoleh mengalami fluktuasi dari hari pertama hingga hari keempat. Pada hari ke-4,

diperoleh pengukuran terendah, masing-masing sebesar 32 ppm untuk alat prototipe dan 30 ppm untuk alat pembanding.



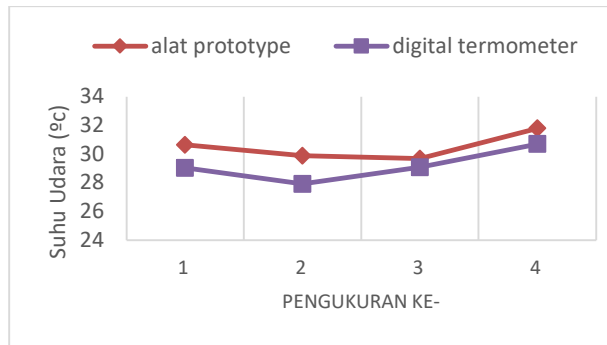
Gambar 3. Grafik perbandingan konsentrasi CO alat *prototype* dengan MQ-7 dan alat pembanding

Persentase *RMSE* yang didapat antara alat prototipe dan alat pembanding untuk pengukuran gas karbon monoksida sebesar 5,32%, yang artinya sensor MQ-7 efektif digunakan untuk mengukur kandungan gas karbon monoksida. Hal tersebut juga berkaitan dengan penelitian yang dilakukan Mugi (2021), yaitu uji coba pengukuran gas karbon monoksida menggunakan sensor MQ-7 dan CO meter. Hal itu juga menjadikan sensor MQ-7 banyak digunakan dalam pengukuran gas karbon monoksida [11].

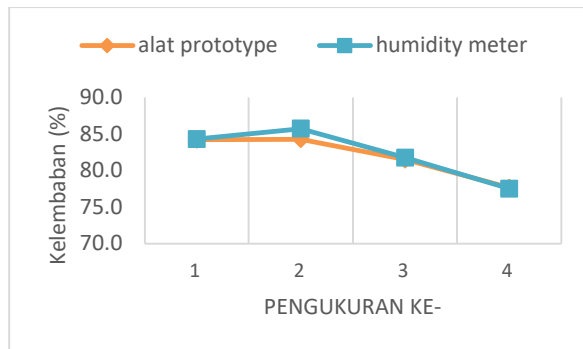
Meskipun nilai error yang dihasilkan masih tergolong rendah, tidak menutup kemungkinan adanya kondisi yang dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti sensor MQ-7 yang mengalami interferensi dari gas lain yang turut terdeteksi oleh sensor, serta karakteristik sensor yang bersifat nonlinier pada konsentrasi rendah. Selain itu, kondisi lingkungan seperti kelembapan yang tinggi juga dapat berkontribusi terhadap galat pengukuran.

Pengujian sensor DHT11

Pengujian sensor DHT11 dilakukan dengan mengukur suhu dan kelembapan dengan instrumen *digital* sebagai alat pembanding.



Gambar 4. Grafik perbandingan suhu pada alat *prototype* dengan sensor DHT11 dan alat pembandingan



Gambar 5. Grafik perbandingan kelembapan pada alat *prototype* dengan sensor DHT11 dan alat pembandingan

Gambar 4 dan 5 menunjukkan perbandingan hasil pengukuran sensor DHT11 pada prototipe alat ukur dengan alat pembandingan. Persentase *RMSE* yang didapat dari alat prototipe dan alat pembandingan untuk pengukuran suhu dan kelembapan sebesar 5,23% dan 0,61%, yang artinya sensor DHT11 efektif digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan. Sensor DHT11 memiliki rentang toleransi galat yang cukup lebar, sesuai spesifikasi pabriknya, dengan akurasi 3 °C untuk pengukuran suhu dan 5% untuk pengukuran kelembapan. Selain itu, galat yang muncul pada sensor DHT11 bisa saja disebabkan oleh faktor lingkungan seperti aliran udara yang tidak stabil.

KESIMPULAN

Komponen yang digunakan dalam pembuatan prototipe alat ukur konsentrasi CO, suhu, dan kelembapan, seperti Arduino Uno, sensor MQ-7, sensor DHT11, dan LCD 16x2, dapat berfungsi dengan baik. Hasil nilai *RMSE* yang didapat saat alat uji digunakan untuk pengambilan data menunjukkan bahwa nilai galat parameter suhu

udara sebesar 5,53%, kelembapan udara sebesar 0,61%, dan gas CO sebesar 5,53%. Hasil rancang bangun prototipe alat ukur ini dapat digunakan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Indrayani, "Pencemaran Udara Akibat Kinerja Lalu-Lintas Kendaraan Bermotor di Medan," *J. Permukim.*, vol. 13, no. 1, pp. 13–20, 2018.
- [2] A. Hasairin and R. Siregar, "Deteksi Kandungan Gas Karbon Monoksida (Co) Hubungan Dengan Kepadatan Lalu-Lintas Di Medan Sunggal, Kota Medan," *J. Biosains*, vol. 4, no. 1, p. 62-68, 2018.
- [3] J. Abidin and F. A. Hasibuan, "Pengaruh dampak pencemaran udara terhadap kesehatan untuk menambah pemahaman masyarakat awam tentang bahaya dari polusi udara," *Prosiding SNFUR-4*, vol 7, hal. 1–3, 2019.
- [4] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, and A. Stavropoulos, "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review," *Front. Public Health*, vol. 8, pp. 1–13, 2020.
- [5] R. Satra and A. Rachman, "Pengembangan Sistem Monitoring Pencemaran Udara Berbasis Protokol Zigbee dengan Sensor CO," *ILKOM Jurnal Ilmiah*, vol. 8, no. 1, pp. 17–22, 2016.
- [6] S. P. Dewi, R. Alsakinah, S. A. Sara, and D. H. Amrina, "Pajak Lingkungan Sebagai Upaya Pengendalian Pencemaran Udara dari Gas Buang Kendaraan Bermotor di Indonesia", *Jurnal Ilmiah Ekonomi dan Pajak*, vol. 2, no. 1, pp. 7–13, 2022.
- [7] A. Siregar, C. Siregar, and Affandi, "Pemanfaatan logam sisa permesinan pada knalpot guna mengurangi pencemaran udara," *Din. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 32–38, 2021.
- [8] Z. Iqbal and L. Hermanto, "Sistem Monitoring Tingkat Pencemaran Udara Berbasis Teknologi Jaringan Sensor Nirkabel," *Jurnal Poltekam*, vol. 22, no. 1, pp. 10–20, 2019.
- [9] H. A. Ya'kut, A. Y. P. Widoyo, and H. A. Dharmawan, "Rancang Bangun Sistem Pengukur Gas Karbon Monoksida (CO)

- Menggunakan Sensor MQ-7 Berbasis Mikrokontroler ATmega 16A,” *J. Fis. FMIPA Univ. Brawijaya*, vol. 57, no. 6, pp. 571–573, 2020.
- [10] P. Y. Ivan, P. S. Q. Al, and H. Hr, “Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembaban Ruang Secara Real-Time Berbasis Web Server,” *Journal of Technology and Informatics* vol. 1, no. 1, pp. 56–60, 2019.
- [11] M. Lestari, U. Nurbaiti, Fianti, “Efektivitas Penggunaan Sensor MQ-7 Terintegrasi Aplikasi Blynk Untuk Mendeteksi Keberadaan Gas CO di Udara,” *EnviroScientiae*, vol. 17, no. 8, pp. 76–82, 2021.
- [12] S. H. Maharani and N. Kholis, “Studi Literatur: Pengaruh Penggunaan Sensor Gas Terhadap Presentase Nilai Error Karbonmonoksida (CO) dan Hidrokarbon (HC) Pada Prototipe Vehicle Gas Detector (VGD),” *J. Tek. Elektro*, vol. 09, no. x, pp. 569–578, 2020B. Tjasyono, “Klimatologi,” 2004, Bandung: ITB.

Analisis pengaruh inhibitor alami (ekstrak ampas kopi dan ampas kopi) terhadap laju korosi pada permukaan besi S45C berbasis citra gambar

Muhammad Ilyas, Muhammad Nasir, Hari Mukti, M. Padli Sandi, B. Budiana*

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam

Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461

*email: budiana@polibatam.ac.id

Abstrak – Logam merupakan jenis material yang sering digunakan untuk bahan konstruksi bangunan, perkapalan dan komponen elektronika. Salah satu bahan logam yang banyak digunakan adalah besi S45C. Besi S45C memiliki kekuatan yang cukup baik (570 – 700 MPa) dan tahan lama. Namun, besi ini mudah mengalami korosi. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan zat yang dapat menghambat laju korosi yang biasa disebut dengan inhibitor. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan ampas kopi dan ekstrak ampas kopi terhadap laju korosi pada besi S45C dengan menggunakan teknologi citra. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi citra berhasil melakukan identifikasi luas korosi pada permukaan sampel besi S45C. Rata-rata laju korosi untuk sampel tanpa inhibitor bernilai 0,296 cm²/jam, rata-rata laju korosi untuk sampel ekstrak ampas kopi bernilai 0,086 cm²/jam dan rata-rata laju korosi untuk sampel ampas kopi bernilai 0,0795 cm²/jam. Dengan nilai rata-rata laju korosi tersebut terlihat bahwa penggunaan ampas kopi dan ekstrak ampas kopi dapat menurunkan laju korosi pada besi S45C.

Kata kunci: Besi S45C, inhibitor, kopi, teknologi citra.

Abstract – Metal is a material often used for building construction materials, shipping and electronic components. One of the widely used metal materials is S45C steel. S45C steel is durable and has good strength (570 - 700 MPa). However, this iron is prone to corrosion. Based on this, a substance that can inhibit the corrosion rate, commonly referred to as an inhibitor, is needed. This study aims to determine the effect of using coffee grounds and coffee grounds extract on the corrosion rate of S45C iron using image processing. The results showed that image technology successfully identified the corrosion area on the surface of S45C iron samples. The average corrosion rate for samples without inhibitor is 0.296 cm²/hour, the average corrosion rate for coffee grounds extract samples is 0.086 cm²/hour and the average corrosion rate for coffee grounds samples is 0.0795 cm²/hour. With the average value of the corrosion rate, it can be seen that using coffee grounds and coffee grounds extract can reduce the corrosion rate of S45C iron.

Keywords: Coffee, inhibitor, image processing, S45C steel.

PENDAHULUAN

Secara umum material di alam dapat digolongkan menjadi logam, semikonduktor, keramik, dan polimer. Logam merupakan material padat dan mampat dibandingkan semua jenis material lainnya sehingga memiliki struktur yang kuat dan kokoh. Dengan sifat tersebut, logam sering dipakai untuk konstruksi bangunan. Namun, logam cenderung mudah mengalami kerusakan akibat proses korosi [1].

Korosi merupakan proses perusakan logam akibat adanya interaksi dengan lingkungan. Ciri-ciri terjadinya proses korosi pada logam secara umum ditandai dengan adanya perubahan warna pada logam, terbentuknya material baru pada permukaan logam dan penurunan massa dari logam. Contoh-contoh kerusakan yang terjadi akibat korosi yang membahayakan manusia

seperti tumpahan minyak yang terjadi di Santa Barbara pada tahun 2015, Jatuhnya lampu lalu lintas kereta api di Newbury Inggris pada tahun 2014 dan pendaratan Jetsream yang jauh dari landasan pada tahun 2014 di Inggris [2].

Korosi merupakan peristiwa alam yang tidak dapat dicegah namun dapat dikendalikan dengan menggunakan rekayasa teknologi. Berbagai penelitian telah dilakukan oleh berbagai peneliti mulai dari pemilihan material yang digunakan, teknik pemasangan, pengontrolan lingkungan disekitar material yang digunakan, lapisan pelapisan permukaan logam yang digunakan sampai pada tahapan simulasi korosi berbasis pemrograman [3].

Salah satu contoh proses yang dapat dilakukan untuk mengendalikan korosi adalah penggunaan inhibitor [4], [5], [6]. Inhibitor merupakan zat yang dapat menurunkan laju

korosi pada logam. Berbagai peneliti telah melakukan penelitian terkait efektifitas penggunaan inhibitor pada material logam mulai dari inhibitor alami maupun inhibitor buatan. Berikut merupakan contoh-contoh inhibitor yang dikaji oleh berbagai peneliti yaitu Rabepazole sulfid, Acetyl coumarine, Bromo acetyl coumarine, Rosa canina fruit extract, Lagerstroemia speciosa leaf extract [7], molybdate dan vanadate, coffee, ekstrak coffee [8], [9]. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, inhibitor yang telah digunakan mampu melapisi permukaan logam sehingga peristiwa korosi dapat dihambat lajunya.

Hal yang menarik untuk dijadikan kajian selanjutnya adalah potensi penggunaan ampas kopi sebagai inhibitor alami. Kopi merupakan salah satu komoditas pertanian di Indonesia yang jumlahnya cukup besar [10]. Selain dari itu, konsumsi kopi di Indonesia yang cukup tinggi menjadikan potensi ampas kopi yang dihasilkan juga cukup tinggi. Potensi ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan inhibitor selanjutnya. Beberapa peneliti yang telah mengembangkan ampas kopi sebagai inhibitor yaitu penggunaan ekstrak kafein ampas kopi sebagai inhibitor besi [11], [12], [13]. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil bahwa laju korosi berkurang akibat penggunaan inhibitor yang digunakan.

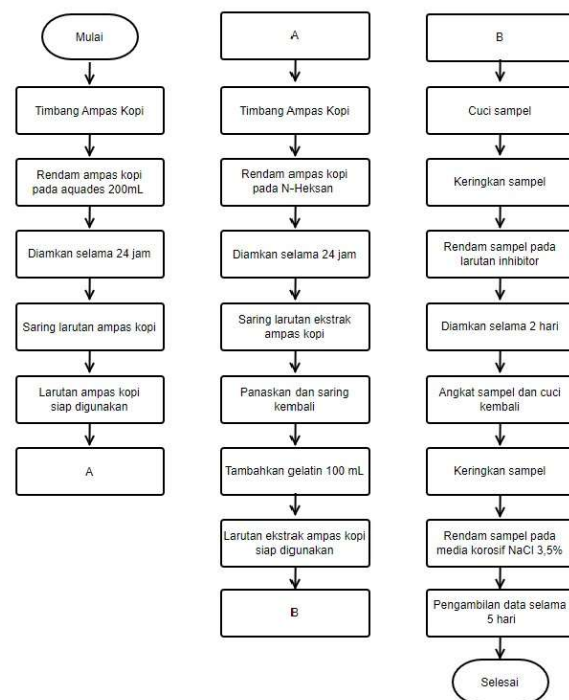
Teknik identifikasi proses korosi pada permukaan logam dapat dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning electron microscopy*). Dengan analisis SEM tersebut, peneliti dapat melihat lapisan pelindung permukaan logam akibat penggunaan inhibitor yang digunakan. Selain dengan menggunakan SEM, identifikasi korosi pada permukaan logam dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi citra [5], [14], [14], [15].

Penggunaan analisis gambar pada permukaan logam telah diteliti oleh beberapa peneliti seperti pendekatan *image processing* dan *computer vision* dalam mendeteksi korosi [16], penggunaan *automated image processing* sebagai deteksi pada struktur besi [17] dan pengolahan gambar untuk kuantifikasi korosi pada pelat beton menggunakan data GPR [18]. Penelitian-penelitian yang telah dilakukan telah berhasil mempelajari peristiwa-peristiwa korosi dan identifikasi proses yang terjadi. Namun, penggunaan teknologi citra gambar yang telah dilakukan belum dimanfaatkan secara maksimal dalam mempelajari penggunaan inhibitor.

Berdasarkan hal tersebut, peneliti pada artikel ini akan mengkaji pengaruh penggunaan kopi dan ekstrak ampas kopi terhadap laju korosi pada permukaan besi S45C. Identifikasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan teknologi citra.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di laboratorium kimia, jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam. Eksperimen dilakukan selama 4 bulan (Mei-Agustus) 2024. Secara garis besar penelitian dilakukan melalui tahapan sebagai berikut (**Gambar 1**).



Gambar 1. Metode penelitian

Secara detail, metode penelitian dapat dideskripsikan sebagai berikut:

Persiapan Baja S45C

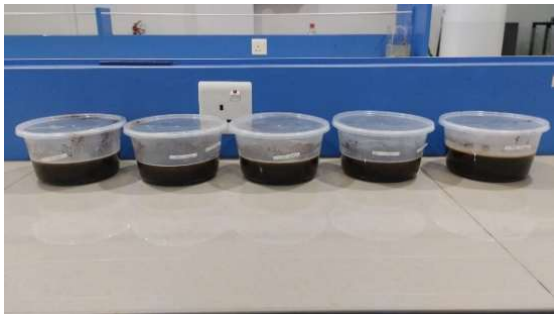
Besi S45C dipotong dengan bentuk lingkaran. Ukuran diameter besi sebesar 7 cm dan dipersiapkan sejumlah 14 buah. Sampel besi yang telah diukur kemudian sampel dipotong menggunakan mesin potong gerinda. Matriks penelitian untuk sampel disajikan pada **Tabel 1**. **Tabel 1** menunjukkan variasi inhibitor yang digunakan, jumlah gram ampas kopi yang digunakan, abrasive paper yang digunakan serta pemberian kode sampel untuk masing-masing perlakuan penelitian.

Tabel 1. Matriks penelitian

Inhibitor	Jumlah (gram)	Abrasif Paper	Kode Sampel
Ampas Kopi	100	120	AM10A
		320	AM10B
	150	120	AM15A
		320	AM15B
	200	120	AM20A
		320	AM20B
Ekstrak Ampas Kopi	100	120	EM10A
		320	EM10B
	150	120	EM15A
		320	EM15B
	200	120	EM20A
		320	EM20B
Tanpa Inhibitor	-	120	NAE12
		320	NAE32

Persiapan Ampas Kopi

Ampas kopi ditimbang sebanyak 100 gram, 150 gram dan 200 gram. Masing-masing ampas kopi dilarutkan dalam 200 ml aquades. Larutan yang terbentuk kemudian dituang kedalam wadah tertentu. Sampel besi S45C dimasukan kedalam wadah yang mengandung larutan ampas kopi sesuai dengan takaran yang telah ditentukan selama 24 Jam. Berikut merupakan persiapan larutan ampas kopi (**Gambar 2**).



Gambar 2. Sampel direndam pada larutan ampas kopi

Persiapan Ekstrak Ampas Kopi

Ampas kopi ditimbang sebanyak 100 gram, 150 gram dan 200 gram. Ampas kopi 100 gram dilarutkan pada 1000 ml N-Heksana, ampas kopi 150 gram dilarutkan pada 1500 ml N-Heksana dan ampas kopi 200 gram pada 2000 ml N-Heksana. Larutan yang terbentuk kemudian dituang kedalam wadah tertentu. Sampel besi S45C dimasukan kedalam wadah yang mengandung larutan ekstrak ampas kopi

sesuai dengan takaran yang telah ditentukan selama 24 Jam (**Gambar 3**).



Gambar 3. Sampel direndam pada larutan ekstrak ampas kopi

Pengolahan Citra Sampel

Tahapan pada metode pengolahan citra dimulai dengan *input image* (BGR). Kemudian mengubah *input image* (BGR) menjadi gambar skala abu-abu (*Greyscale*). Hal ini bertujuan untuk mengubah nilai dari input image (BGR) menjadi 8-bit (255). Setelah itu, dilakukan *adjust thresholding* untuk mengubah gambar skala abu-abu (*greyscale*) menjadi citra biner. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan objek yang tidak teridentifikasi korosi. Kemudian dilakukan operasi morfologi yang bertujuan untuk menghilangkan citra yang tidak diinginkan dan juga menebalkan citra yang terdeteksi korosi. Setelah itu, dilakukan perhitungan pixel yang teridentifikasi korosi. Langkah terakhir adalah mengubah jumlah pixel yang teridentifikasi korosi menjadi satuan cm.

Pengolahan Data dan Analisis yang digunakan

Metode analisis yang digunakan adalah metode pengolahan citra dengan membandingkan hasil dari citra menggunakan *filtering* untuk melihat tingkat korosi yang terdapat pada setiap permukaan sampel dan *thresholding* untuk mengklasifikasikan tingkat korosi. Penafsiran data diperoleh dari gambar permukaan sampel besi yang tertangkap oleh vision. Permukaan gambar besi tersebut kemudian diolah dengan menggunakan teknik citra gambar untuk ditentukan nilai laju korosinya dan dibandingkan dengan data laju korosi berdasarkan perhitungan berat/gravimetri.

HASIL DAN PEMBAHASAN

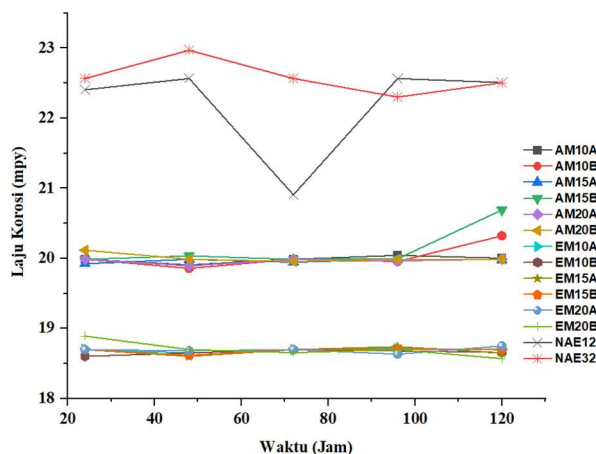
Perhitungan Laju Korosi dengan metode berat

Perhitungan berat untuk semua sampel dilakukan mulai dari tahapan perhitungan massa sampel sebelum direndam pada larutan 3.5% NaCl sampai perhitungan massa sampel setelah dilakukan perendaman pada larutan 3.5% NaCl selama 120 Jam. Perhitungan Laju korosi mengacu pada persamaan (1).

$$MPY = \frac{534 W}{D A T} \text{ (mill per year)} \quad (1)$$

dengan W kehilangan berat (mg), D berat jenis (gr/cm^3), A Luas benda uji (cm^2), dan T waktu (jam).

Hasil perhitungan laju korosi dengan menggunakan rumus 1 disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara laju korosi dengan waktu perendaman (metode pengukuran berat)

Berdasarkan Gambar 4, sampel NAE12 dan NAE32 memiliki laju korosi tertinggi dibandingkan dengan semua sampel. Ini menunjukkan bahwa ampas kopi dan ekstrak ampas kopi mengurangi laju korosi pada besi S45C. Selain dari itu, kurva yang terbentuk pada gambar 1 terbagi menjadi 3 pola yaitu pola bagian atas (non-inhibitor), pola tengah (kelompok inhibitor ampas kopi) dan pola bawah (kelompok inhibitor ekstrak ampas kopi). Tiga pola yang terbentuk menunjukkan nilai laju korosi yang berbeda ketika diberikan perlakuan yang berbeda. Laju korosi pada sampel yang diberi ekstrak ampas kopi terlihat memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan

sampel yang diberi ampas kopi dan sampel yang tidak diberi inhibitor.

Perhitungan laju korosi dengan menggunakan teknologi citra gambar

Langkah pertama yang dilakukan untuk mendapatkan laju korosi dari setiap sampel adalah perhitungan luas daerah terkorosi. Luas sampel yang terkorosi diperoleh dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut:

$$Area = \frac{(Area\ terdeteksi \times nilai\ kalibrasi)}{(nilai\ resolusi)} \quad (2)$$

Nilai kalibrasi diperoleh dari diameter sampel dibagi dengan jarak dalam pixel pada gambar. Sehingga nilai kalibrasi mempresentasikan nilai pixel dalam nilai cm tertentu. Nilai resolusi diperoleh dari jarak dalam pixel pada gambar dibagi dengan diameter sample. Sehingga nilai resolusi mempresentasikan nilai cm pada pixel tertentu. Sedangkan untuk perhitungan laju korosi untuk semua sampel menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

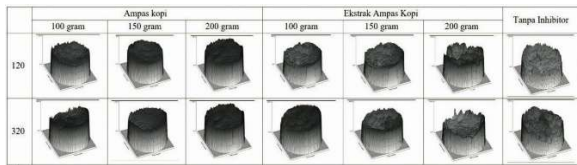
$$Laju\ korosi = \frac{luas\ daerah\ terkorosi}{waktu\ korosi} \quad (3)$$

Luas daerah terkorosi dapat diketahui dengan analisis gambar permukaan besi S45C. Berikut merupakan contoh perhitungan luas daerah terkorosi (**Gambar 5**).



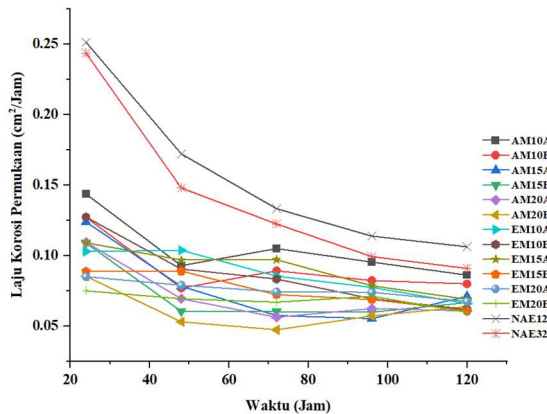
Gambar 5. Identifikasi luas daerah terkorosi

Surface plot ditunjukkan pada Gambar 6. Sampel *surface plot* terlihat memiliki gambar permukaan yang kasar terutama untuk sampel tanpa inhibitor.



Gambar 6. Surface plot permukaan besi S45C

Setelah diketahui luas permukaan sampel maka dilakukan perhitungan laju korosi. Adapun hasilnya disajikan pada (Gambar 6).

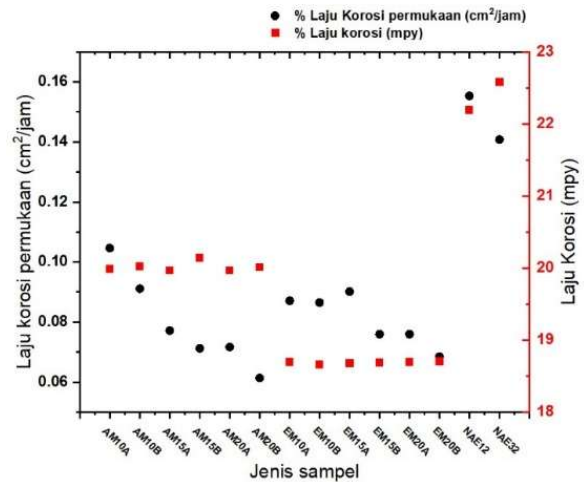


Gambar 6. Hubungan antara laju korosi dengan waktu perendaman (analisis citra permukaan)

Berdasarkan Gambar 6, laju korosi tertinggi dimiliki sampel NAE12 dan NAE32 (sama polanya seperti pada gambar 3). Semua sampel yang diberikan inhibitor terlihat memiliki laju korosi permukaan yang lebih rendah. Tidak seperti pada gambar 3 yang membentuk tiga pola atau tiga group. Semua sampel yang diberi inhibitor terlihat *over laping* satu sama lain. Namun secara umum, rata-rata laju korosi untuk sampel tanpa inhibitor bernilai 0,296 cm²/jam, rata-rata laju korosi untuk sampel ekstrak ampas kopi bernilai 0,086 cm²/jam dan rata-rata laju korosi untuk sampel ampas kopi bernilai 0,0795 cm²/jam.

Perbandingan laju korosi dengan menggunakan metode berat dan dengan menggunakan citra gambar

Berdasarkan Gambar 7 terlihat perbandingan nilai laju korosi permukaan yang diperoleh dengan menggunakan teknologi citra dengan laju korosi menggunakan perhitungan berat. Kurva yang terbentuk memiliki pola yang relative sama satu sama lain, misalnya dapat dilihat untuk sampel EM10A-EM20B. Kurva terlihat membentuk satu garis lurus. Namun kurva terlihat berbeda untuk sampel AM10A-AM20B.



Gambar 7. Perbandingan laju korosi permukaan (cm²/jam) dengan laju korosi (mpy)

Untuk laju korosi permukaan, terlihat nilainya linier negatif namun untuk laju korosi dengan perhitungan berat, pola yang terbentuk untuk sampel AM (Ampas Kopi) terlihat relatif konstan. Dengan kondisi tersebut, maka nilai rata-rata laju korosi untuk semua sampel diperlukan seperti yang telah dihitung sebelumnya pada nilai rata-rata laju korosi.

Hasil penelitian kami menguatkan teori-teori sebelumnya bahwa potensi inhibitor alami yang digunakan dapat menurunkan laju korosi pada logam [11], [12], [13]. Selain dari itu, Tim penelitian kami telah berhasil mengidentifikasi korosi dengan menggunakan teknologi citra gambar. Sebelumnya, penelitian-penelitian lain telah berhasil menggunakan metode Scanning Electron microscopy (SEM), Gravimetri dan Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) [19], [20] dan bahkan menggunakan citra gambar dengan ruang lingkup yang berbeda. Penggunaan metode yang dilakukan menunjukkan pola yang sama yaitu inhibitor alami dapat mengurangi laju korosi pada logam.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, teknologi citra gambar telah berhasil menganalisis korosi pada permukaan sampel besi S45C. Dengan teknologi citra gambar, luas daerah yang telah mengalami korosi dapat diketahui. Luas daerah korosi tersebut menjadi dasar perhitungan dalam penentuan laju korosi sampel baja S45C. Rata-rata laju korosi untuk sampel tanpa inhibitor bernilai 0,296 cm²/jam, rata-rata laju korosi untuk sampel ekstrak ampas kopi bernilai 0,086 cm²/jam dan rata-rata laju

korosi untuk sampel ampas kopi bernilai 0,0795 cm²/jam. Berdasarkan nilai rata-rata laju korosi tersebut, penggunaan inhibitor alami ampas kopi dan ekstrak ampas kopi dapat menurunkan laju korosi pada permukaan Besi S45C. Namun, kajian yang dilakukan memiliki limitasi penelitian seperti variabel temperatur, kelembapan dan intensitas cahaya. Sehingga, peneliti merekomendasikan untuk kajian selanjutnya untuk dapat melakukan kajian terhadap faktor-faktor yang tidak dikaji pada penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada institusi yang telah memberikan dukungan penuh dalam pelaksanaan kajian ini. Secara khusus, kami ingin menyampaikan apresiasi kepada Politeknik Negeri Batam atas bantuan yang berharga dalam menyediakan fasilitas yang diperlukan. Kami juga menyampaikan rasa terima kasih kepada DIT. APTV yang telah memberikan hibah penelitian yang sangat membantu dalam merealisasikan penelitian ini. Dukungan finansial dan material yang diberikan sangat berperan dalam keberhasilan penelitian ini. Ucapan terima kasih ini juga kami sampaikan kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung dalam pelaksanaan kajian ini. Terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Wu, W. Zhao, and L. Wang, "State of the art and current trends on the metal corrosion and protection strategies in deep sea," *J Mater Sci Technol*, vol. 215, pp. 192–213, Apr. 2025.
- [2] Z. Petrovic, "Catastrophes caused by corrosion," *Vojnotehnički Glasnik*, vol. 64, no. 4, pp. 1048–1064, 2016.
- [3] S. Harsimran, K. Santosh, and K. Rakesh, "Overview Of Corrosion And Its Control: A Critical Review," *Proceedings on Engineering Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 13–24, 2021.
- [4] R. Aslam, M. Mobin, S. Zehra, and J. Aslam, "A Comprehensive Review Of Corrosion Inhibitors Employed To Mitigate Stainless Steel Corrosion In Different Environments," *J Mol Liq*, vol. 364, p. 119992, Oct. 2022.
- [5] P. D. Desai, C. B. Pawar, M. S. Avhad, and A. P. More, "Corrosion inhibitors for carbon steel: A review," *Vietnam Journal of Chemistry*, vol. 61, no. 1, pp. 15–42, Feb. 2023.
- [6] I. A. W. Ma, S. Ammar, S. S. A. Kumar, K. Ramesh, and S. Ramesh, "A Concise Review On Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms And Electrochemical Evaluation Studies," *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 19, no. 1, pp. 241–268, Nov. 2021.
- [7] S. KM, B. M. Praveen, and B. K. Devendra, "A Review On Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms, Electrochemical Analysis, Corrosion Rate And Efficiency Of Corrosion Inhibitors On Mild Steel In An Acidic Environment," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 16, p. 100258, Aug. 2024.
- [8] E. Cesar, C. Assumpção De Souza, B. De Andrade Ripper, D. Perrone, and E. D'elia, "Roasted Coffee Extracts as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in HCL Solution," *Materials Research*, vol. 19, no. 6, pp. 1276–1285, Sep. 2016.
- [9] S. Elhady, E. G. Zaki, O. E. El-Azabawy, and I. S. Fahim, "Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields," *Results in Engineering*, vol. 21, p. 101880, Mar. 2024.
- [10] D. P. Ramadhani1 and P. Perdana, "Potensi Komoditas Kopi Indonesia Pada Pasar Asean Dengan Malaysia Sebagai Negara Tujuan Ekspor," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 9, no. 21, pp. 197–205, Nov. 2023.
- [11] Y. Maryanty, A. D. Ifvournamasari, K. Widjajanti, D. R. Wulan, and N. I. Azkiya, "Pengaruh ekstrak kafein sebagai inhibitor laju korosi dan efisiensi inhibisi pada baja dalam larutan asam sulfat dan biosolar," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 17, no. 1, pp. 66–70, Jun. 2023.
- [12] D. Afrilia, S. Bahri, J. Jalaluddin, M. Masrullita, and N. ZA, "Pengaruh Konsentrasi Ekstrak Kopi Sebagai Inhibitor

- Terhadap Laju Korosi Pada Baja,” *Chemical Engineering Journal Storage*, vol. 1, no. 4, pp. 111–120, Apr. 2022.
- [13] F. A. Zahra, B. Aliyah, and L. O. Nurhadi, “Ekstrak Kafein Ampas Kopi Sebagai Inhibitor Korosi Baja Murni Dalam Media H₂SO₄,” *Prosiding Semnastek*, vol. 0, no. 0, Nov. 2019.
- [14] S. Fonna, I. Bin M. Ibrahim, Gunawarman, S. Huzni, M. Ikhsan, and S. Thalib, “Investigation of corrosion products formed on the surface of carbon steel exposed in Banda Aceh’s atmosphere,” *Heliyon*, vol. 7, no. 4, p. e06608, Apr. 2021.
- [15] Y. Hoshi, Y. Otake, K. Kito, G. Pantazopoulos, and A. Vazdirvanidis, “Identification of corrosion and damage mechanisms by using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray microanalysis: contribution to failure analysis case histories,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 55, no. 1, p. 012015, Mar. 2014.
- [16] A. A. I. M. Ali et al., “Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection,” *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11, Page 1954, vol. 11, no. 10, p. 1954, Oct. 2023.
- [17] M. Khayatazad, L. De Pue, and W. De Waele, “Detection of corrosion on steel structures using automated image processing,” *Developments in the Built Environment*, vol. 3, p. 100022, Aug. 2020.
- [18] N. D. Hoang, “Image Processing-Based Pitting Corrosion Detection Using Metaheuristic Optimized Multilevel Image Thresholding and Machine-Learning Approaches,” *Math Probl Eng*, vol. 2020, 2020.
- [19] R. De Motte et al., “A study by electrochemical impedance spectroscopy and surface analysis of corrosion product layers formed during CO₂ corrosion of low alloy steel,” *Corros Sci*, vol. 172, p. 108666, Aug. 2020.
- [20] A. C. Lazanas and M. I. Prodromidis, “Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial,” *ACS Measurement Science Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162–193, Jun. 2023.

Analisis pengaruh susunan panel sandwich komposit berbasis serat abaka dan papan gipsium terhadap *sound transmission loss* menggunakan simulasi INSUL 9.0

Bilqia Mafaz*, Susilo Indrawati, Moch. Zainuri

Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

*email: bilqia08@gmail.com

Abstrak - Pengembangan panel sandwich menawarkan alternatif yang menjanjikan dalam struktur bangunan karena kemudahan instalasi serta peningkatan kemampuan isolasi suara. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh berbagai konfigurasi sandwich antara komposit serat pisang abaka dan papan gipsium terhadap nilai kehilangan transmisi bunyi (*Sound Transmission Loss/STL*), dengan menggunakan pendekatan simulasi INSUL 9.0. Material komposit yang digunakan terdiri atas resin epoksi sebagai matriks dan serat pisang abaka sebagai pengisi, dengan fraksi volume 70:30. Serat abaka diberi perlakuan alkali menggunakan larutan NaOH 5% dan perlakuan hidrolisis menggunakan larutan CH₃COOH 50% di bawah kondisi vakum, dengan panjang serat 5 mm. Panel sandwich yang diuji memiliki konfigurasi : GUG, GAG, GAGAG, GAGUG, GGAG, dan GGAGG, seluruhnya memiliki ketebalan total 10 cm (dengan G: papan gipsium, A: serat pisang abaka, dan U: udara). Nilai STL dari masing-masing konfigurasi dianalisis menggunakan simulasi INSUL 9.0. Di antara konfigurasi yang diuji, susunan GGAGG menunjukkan kinerja STL paling unggul, dengan rentang nilai antara 14 hingga 60 dB pada frekuensi 50 hingga 5000 Hz.

Kata Kunci: Konfigurasi Panel, Panel Sandwich, Penyerapan Transmisi Bunyi, Serat Pisang Abaka.

Abstract – The development of sandwich panels provides a promising alternative in building structures due to their ease of installation and enhanced sound insulation properties. This study aims to investigate the impact of various sandwich configurations between abaca banana fiber composites and gypsum board on sound transmission loss (STL) values, employing INSUL 9.0 simulations. The composite material consists of epoxy resin as the matrix and abaca banana fiber as the filler, with a 70:30 volume fraction ratio. The abaca fibers were treated with 5% NaOH solution for alkali treatment and 50% CH₃COOH solution for hydrolysis under vacuum conditions, with fiber lengths of 5 mm. The sandwich panels tested had a configuration : GUG, GAG, GAGAG, GAGUG, GGAG, and GGAGG, all with a total thickness of 10 cm (where G: gypsum board, A: abaca banana fiber, and U: air). The STL values of these arrangements were evaluated using INSUL 9.0. Among the tested configurations, the GGAGG arrangement demonstrated superior STL performance, achieving values between 14 and 60 dB across frequencies ranging from 50 to 5000 Hz.

Keywords: Abaca Banana Fiber, Panel Configuration, Sandwich Panel, Sound Transmission Loss

PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor konstruksi di Indonesia telah meningkatkan kebutuhan terhadap kenyamanan akustik bangunan, terutama di kawasan urban yang padat aktivitas dan kebisingan. Kebocoran suara yang terjadi karena dinding tidak mampu menghambat transmisi bunyi eksternal berdampak pada kenyamanan dan kesehatan penghuni [1]. Oleh karena itu, peningkatan insulasi suara menjadi penting, salah satunya melalui peningkatan *Sound Transmission Loss* (STL), yakni kemampuan material dalam menahan perambatan suara antar ruang [2].

Material konvensional seperti beton dan bata ringan memiliki keterbatasan, antara lain berat, mudah retak, serta daya pantul suara yang

tinggi sehingga kurang sesuai untuk kebutuhan akustik [3,4]. Alternatif seperti *rockwool* memang efektif, namun mahal dan berisiko bagi kesehatan [5]. Sebaliknya, papan gipsium lebih ekonomis, mudah dipasang, serta memiliki sifat peredam suara, tahan api, dan ringan [6].

Pendekatan sandwich panel, yaitu kombinasi beberapa lapisan material, telah digunakan dalam desain struktur bangunan untuk meningkatkan efisiensi termal dan akustik [7]. Inovasi lebih lanjut dilakukan dengan menambahkan serat alam sebagai inti panel, karena sifatnya yang ramah lingkungan, ringan, dan memiliki performa insulasi yang kompetitif [8]. Serat pisang abaka (*Musa textilis*) dikenal memiliki kekuatan mekanis tinggi dan fleksibilitas yang baik dibanding serat alam

lainnya [9] serta telah terbukti memiliki kemampuan menyerap suara, khususnya pada frekuensi di atas 1000 Hz [10].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kombinasi gypsum dan serat alam dalam struktur sandwich mampu menghasilkan STL yang signifikan [11,12]. Berdasarkan potensi ini, penelitian ini bertujuan menguji variasi susunan material sandwich dari serat abaka dan papan gypsum dengan total ketebalan 10 cm terhadap nilai STL menggunakan simulasi INSUL 9.0 dengan tampilan simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampilan Simulasi INSUL 9.0

INSUL telah terbukti akurat dengan deviasi hasil ± 6 dB dari eksperimen [13]. Berdasarkan tinjauan dari berbagai penelitian tersebut, penulis bermaksud melakukan analisis dari pengaruh susunan komposit sandwich serat abaka dengan papan gypsum menggunakan simulasi INSUL 9.0.

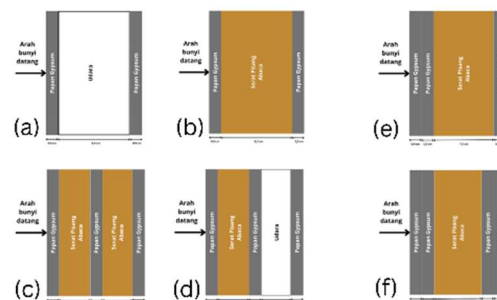
METODE PENELITIAN

Perlakuan awal terhadap serat pisang abaka melalui proses alkalinisasi. Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan kekasaran permukaan serat dengan cara mengurangi kandungan lignin. Serat abaka direndam dalam larutan natrium hidroksida (NaOH) 5% selama dua jam di bawah kondisi vakum. Setelah proses perendaman selesai, serat kemudian dibilas menggunakan air mengalir hingga bersih dan tidak terasa licin. Serat yang telah bersih dikeringkan menggunakan pemanas listrik pada suhu 120°C selama satu jam dalam kondisi vakum.

Setelah tahap alkalinisasi, serat abaka menjalani proses lanjutan berupa hidrolisis. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanik serat dengan menghilangkan sisa hemiselulosa dan lignin yang masih tertinggal. Serat direndam dalam larutan asam asetat (CH₃COOH) 50% selama dua jam dalam

kondisi vakum. Serat yang telah direndam kemudian dibilas kembali dengan air mengalir dan dikeringkan pada suhu 120°C selama satu jam. Setelah proses pengeringan, serat dipotong-potong menjadi bagian dengan panjang 5 mm agar mudah dicampurkan dalam pembuatan komposit.

Pembuatan komposit dilakukan dengan mencampurkan serat abaka yang telah dipotong dengan resin epoksi. Perbandingan volume antara serat dan matriks epoksi adalah 70:30. Campuran tersebut diaduk secara merata dalam wadah plastik hingga homogen, kemudian dituangkan ke dalam cetakan berbentuk silinder dengan diameter 3 cm. Sebelum digunakan, cetakan telah dilapisi lilin untuk mencegah campuran menempel pada permukaan cetakan. Setelah dituangkan, campuran diberi tekanan sebesar 26,5 kPa selama enam jam, dengan tujuan membentuk sampel dengan ketebalan akhir sebesar 6,4 cm. Setelah proses pencetakan, sampel dibiarkan mengering secara alami pada suhu ruang selama 24 jam untuk mencapai proses curing yang optimal. Konfigurasi susunan panel sandwich diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar. 2 Susunan panel sandwich dengan ketebalan 10 cm (a) GUG, (b) GAG, (c) GAGAG, (d) GAGUG, (e) GGAG, (f)GGAGG dengan G adalah Papan gypsum dengan ketebalan 3 cm dan A adalah serat abaka dengan ketebalan yang menyesuaikan

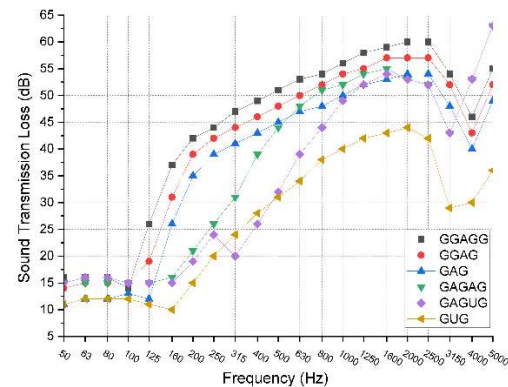
Pengujian terhadap komposit meliputi pengukuran ketebalan, densitas, porositas, dan resistivitas aliran udara (airflow resistivity). Ketebalan diukur menggunakan penggaris, sedangkan densitas ditentukan dengan alat densimeter. Nilai porositas dihitung berdasarkan data densitas yang diperoleh. Komposit yang telah dibuat kemudian dikombinasikan dengan papan gipsum untuk membentuk panel sandwich. Panel ini terdiri dari papan gipsum berdiameter 3 cm dan ketebalan 0,9 cm yang disusun bersama lapisan komposit serat abaka.

Konfigurasi panel yang diuji terdiri dari beberapa susunan, yaitu GUG, GAG, GAGAG, GAGUG, GGAG, dan GGAGG, dengan total ketebalan setiap panel sebesar 10 cm yang skema susunannya diberikan pada Gambar 2. Dalam konfigurasi tersebut, huruf G merujuk pada lapisan papan gipsium, A untuk lapisan komposit serat abaka, dan U untuk ruang udara. Evaluasi terhadap kemampuan panel dalam meredam suara dilakukan melalui simulasi nilai *Sound Transmission Loss* (STL) menggunakan perangkat lunak INSUL versi 9.0.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi yang diperoleh menggunakan perangkat lunak INSUL menunjukkan nilai *Sound Transmission Loss* (STL) untuk berbagai konfigurasi panel yang dirancang. Nilai STL ini dihitung berdasarkan parameter masukan berupa massa jenis material dan resistivitas aliran udara, dengan nilai masing-masing sebesar $0,842 \text{ g/cm}^3$ untuk komposit serat, $0,53 \text{ g/cm}^3$ untuk papan gypsum, dan $1.199.413 \text{ rayls/m}$ untuk resistivitas aliran udara. Nilai resistivitas aliran udara tersebut diperoleh melalui beberapa tahapan perhitungan material komposit, yaitu perhitungan densitas teoritis berdasarkan fraksi volume material, pengukuran diameter serat menggunakan mikrometer okuler, penentuan porositas serat abaka, dan selanjutnya dilakukan perhitungan *airflow resistivity* menggunakan pendekatan persamaan Kozeny–Carman.

Parameter *airflow resistivity* ini sangat memengaruhi hasil simulasi karena berkaitan langsung dengan kemampuan material dalam meredam gelombang suara, khususnya pada frekuensi rendah hingga menengah. Oleh karena itu, perubahan parameter material seperti panjang serat maupun fraksi volume komposit diperkirakan akan memengaruhi nilai *airflow resistivity* dan performa STL yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, panjang serat abaka sebesar 5 mm dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Diva (2022), yang menunjukkan bahwa dimensi serat tersebut memberikan karakteristik akustik yang baik pada material komposit berbasis serat alam [10]. Pola STL hasil simulasi dari berbagai konfigurasi menunjukkan karakteristik yang serupa dengan kurva STL teoritis dari sistem dua panel ideal seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Karakterisasi Nilai STL untuk Variasi Panel Sandwich Menggunakan Simulasi INSUL 9.0

Penurunan STL yang signifikan terjadi pada frekuensi rendah akibat resonansi udara. Frekuensi resonansi udara yang teridentifikasi dalam struktur sandwich panel (SSP) adalah: 133 Hz (GUG), 115 Hz (GAG), 105 Hz (GGAG), 92 Hz (GGAGG), 144 Hz (GAGAG), dan 275 Hz (GAGUG). Pada frekuensi tersebut, nilai STL menurun secara signifikan—misalnya, GUG hanya mencatatkan nilai 10 dB pada 133 Hz, sedangkan GAGUG mencatatkan 21 dB pada 275 Hz.

Secara umum, struktur yang mengandung material penyerap menunjukkan peningkatan nilai STL dibandingkan dengan struktur tanpa penyerap. Konfigurasi panel ganda seperti GAG dan GGAG menunjukkan kinerja STL yang lebih baik dibandingkan dengan panel tiga lapis seperti GAGAG dan GAGUG, meskipun memiliki ketebalan total yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa massa total panel serta penempatan strategis material penyerap suara memiliki pengaruh besar dalam mengurangi transmisi gelombang suara.

Hasil simulasi INSUL yang ditunjukkan pada Gambar 3 mengonfirmasi bahwa perilaku akustik dari konfigurasi panel sejalan dengan teori massa-pegas-massa, terutama dalam penurunan STL yang diamati pada frekuensi resonansi udara. Penurunan ini disebabkan oleh osilasi udara yang terperangkap di antara dua panel, yang memicu getaran struktural dan memungkinkan gelombang suara menembus lapisan panel, sehingga menurunkan performa insulasi suara [14]. Fenomena ini konsisten dengan temuan sebelumnya oleh Sharp (1978), yang menekankan bahwa struktur sandwich tanpa material penyerap sangat rentan terhadap resonansi rongga udara [15].

Kehadiran material penyerap (komposit serat) dalam rongga udara secara signifikan

mengurangi efek resonansi dengan cara mendisipasikan energi getaran dan meredam amplitudo gelombang diam. Hal ini terlihat dari perbandingan antara struktur GAG dan GUG, di mana GAG secara konsisten menunjukkan nilai STL yang lebih tinggi—tidak hanya pada frekuensi resonansi, tetapi juga pada rentang frekuensi menengah dan tinggi. Ini menunjukkan bahwa material penyerap berkontribusi tidak hanya dalam peredaman frekuensi rendah, tetapi juga dalam peningkatan performa akustik secara keseluruhan [16].

Perbandingan antara struktur dua lapis dan tiga lapis menunjukkan bahwa penambahan jumlah lapisan tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja STL. Meskipun secara teoritis, panel tiga lapis dapat menunjukkan peningkatan STL hingga 30 dB/oktaf sebelum resonansi dan 18 dB/oktaf setelahnya [17]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi dua lapis seperti GGAG dan GGAGG mengungguli struktur tiga lapis seperti GAGAG dan GAGUG dengan ketebalan total yang sama. Hal ini disebabkan oleh dua faktor: pertama, konfigurasi dua lapis menempatkan lebih banyak massa papan gypsum pada satu sisi (misalnya GG), sehingga meningkatkan massa total. Kedua, struktur tiga lapis memperkenalkan dua rongga udara, yang—meskipun diisi dengan penyerap—menambah kompleksitas perilaku resonansi dan meningkatkan kemungkinan transmisi gelombang suara [18].

Secara kritis, temuan ini menunjukkan bahwa efisiensi struktur akustik tidak hanya bergantung pada jumlah lapisan atau volume penyerap, tetapi juga pada konfigurasi massa yang optimal serta penempatan strategis material penyerap. Panel dua lapis dengan massa terkonsentrasi dan satu rongga udara yang dimanfaatkan secara efektif menunjukkan performa STL yang lebih unggul dibandingkan dengan sistem multilapis kompleks yang dapat menimbulkan lebih banyak titik resonansi. Oleh karena itu, dalam merancang konfigurasi peredam suara, strategi yang berfokus pada distribusi massa dan penempatan penyerap secara presisi akan memberikan peningkatan STL yang lebih efektif daripada sekadar menambah jumlah lapisan.

Selain menunjukkan kesesuaian terhadap teori massa-pegas-massa, hasil simulasi ini juga memperlihatkan bahwa pendekatan numerik menggunakan perangkat lunak INSUL cukup representatif untuk memprediksi perilaku insulasi bunyi pada struktur sandwich panel.

INSUL 9.0 menggunakan model pendekatan yang dikembangkan oleh B. H. Sharp dalam menghitung Sound Transmission Loss (STL) pada panel tunggal, ganda, maupun multilapis, dengan mempertimbangkan parameter utama seperti massa per satuan luas, densitas panel, dan ketebalan material. Berdasarkan evaluasi yang dilakukan oleh J. E. Cambridge, INSUL menunjukkan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan beberapa perangkat lunak prediksi lainnya seperti Reduct, ENC, dan WinFLAG, dengan deviasi terhadap hasil eksperimen berkisar ± 6 dB. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi INSUL dapat digunakan sebagai pendekatan awal yang cukup andal dalam mengevaluasi performa akustik struktur panel sebelum dilakukan pengujian eksperimental secara langsung [13]. Meskipun demikian, hasil simulasi ini tetap memiliki keterbatasan karena seluruh analisis dilakukan secara numerik tanpa validasi eksperimental langsung. Oleh sebab itu, penelitian lanjutan direncanakan untuk melakukan pengujian eksperimen menggunakan konfigurasi panel sederhana, seperti kombinasi satu papan gypsum dan satu panel komposit serat abaka. Pengujian tersebut diharapkan dapat dilakukan menggunakan metode tabung impedansi maupun ruang dengung untuk memverifikasi kesesuaian nilai STL hasil simulasi terhadap kondisi fisik sebenarnya. Validasi eksperimental ini penting untuk memastikan bahwa model simulasi tidak hanya mampu merepresentasikan perilaku teoritis, tetapi juga karakteristik akustik aktual material komposit serat abaka.

Hasil ini memperkuat validitas INSUL sebagai alat simulasi. Meskipun INSUL menggunakan model pendekatan matematis dengan estimasi deviasi terhadap data eksperimen, perangkat lunak ini telah menunjukkan pola STL yang konsisten dan sesuai dengan ekspektasi teoretis maupun eksperimen sebelumnya. Oleh karena itu, INSUL dapat dianggap sebagai alat prediktif yang andal untuk tahap awal perancangan SSP sebelum dilakukan pengujian eksperimental. Munculnya frekuensi kritis STL pada 3560 Hz untuk semua struktur menunjukkan bahwa frekuensi kritis ini lebih dipengaruhi oleh sifat bawaan papan gypsum daripada oleh konfigurasi lapisan. Seperti yang dikemukakan oleh Davy, STL cenderung meningkat kembali setelah melewati frekuensi kritis, meskipun pada laju yang lebih rendah [18]. Oleh karena itu, pemilihan material panel dan desain struktur

SSP harus mempertimbangkan ambang batas ini untuk memastikan performa akustik yang optimal di seluruh rentang frekuensi yang relevan secara praktis.

KESIMPULAN

Simulasi INSUL menunjukkan bahwa material penyerap berperan penting dalam mengatasi resonansi rongga udara pada frekuensi rendah (50–250 Hz). Konfigurasi panel sandwich GGAGG dengan ketebalan 100 mm menghasilkan kinerja Sound Transmission Loss (STL) paling efektif, mencapai nilai 16–60 dB di spektrum frekuensi luas. Komposit serat efektif meredam getaran struktural dan menekan gelombang berdiri, menghasilkan peningkatan STL signifikan pada frekuensi menengah dan tinggi, dengan frekuensi resonansi udara berkisar 92–275 Hz. Sebaliknya, struktur panel tanpa material penyerap (GUG) menunjukkan performa STL jauh lebih rendah pada frekuensi resonansi. Struktur panel ganda dengan material penyerap terbukti superior dibanding konfigurasi tiga lapis, menjadikannya solusi akustik yang menjanjikan dan layak untuk aplikasi isolasi suara pada berbagai spektrum frekuensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. A. Nugraha, “Peningkatan insulasi akustik dinding luar kamar hotel studi kasus di dalam bandar udara,” *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 2, no. 2, pp. 1–6, 2013
- [2] A. Nugroho, “Peningkatan kinerja ruang sumber terisolasi dengan metode pelapisan gypsum board sebagai alat uji rugi transmisi (TL) berdasarkan standar ASTM E-413,” Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2015.
- [3] K. Tjokrodimuljo, *Teknologi Beton*, Biro Penerbit KMTS FT, 2007.
- [4] Doelle, *Akustik Lingkungan*, 1986.
- [5] L. Lipworth, “Occupational exposure to rock wool and glass wool and risk of cancers of the lung and the head and neck: A systematic review and meta-analysis,” *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2009.
- [6] A. Granzotto, D. Scrosati, and E. Scamoni, “Sound reduction index prediction of double-layer gypsum panels through the transfer matrix method,” *Building Acoustics*, 2021.
- [7] W. Callister, *Fundamentals of Material Science and Engineering*, John Wiley and Sons, 2001.
- [8] S. Habibie, N. Suhendra, and S. Roseno, “Serat alam sebagai bahan komposit ramah lingkungan,” *Jurnal Inovasi dan Teknologi Material*, vol. 5, no. 1, pp. 55, 2021. doi: 10.30595/civeng.v5i1.17879.
- [9] G. Cook, *Handbook of Textile Fibres*, Woodhead Publishing, 1984.
- [10] D. Abidah, “Analisis pengaruh panjang serat abaka pada komposit sebagai absorber dengan pendekatan teori semi empiris Delany-Bazley dan Miki,” Skripsi, Departemen Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, 2022.
- [11] V. I. Erofeev and D. V. Monich, “Sound insulation properties of sandwich panels,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 896, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/896/1/012005.
- [12] R. Dragonetti, M. Napolitano, L. Boccarusso, and M. Durante, “A study on the sound transmission loss of a new lightweight hemp/bio-epoxy sandwich structure,” *Applied Acoustics*, vol. 167, p. 107379, 2020. doi: 10.1016/j.apacoust.2020.107379.
- [13] J. E. Cambridge, *Prediction Tools for Airborne Sound Insulation – Evaluation and Application*, *Vibroacoustics*, 2006.
- [14] K. O. Ballagh, “Accuracy of prediction methods for sound transmission loss,” in *Inter-Noise 2004*, Prague, Czech Republic, 2004.
- [15] B. H. Sharp, “Prediction methods for the sound transmission of building elements,” *Noise Control Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 53–63, 1978.
- [16] T. T. Wu, “Sound transmission through composite panels with absorbing materials,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 3, pp. 1493–1500, 1998.

- [17] J. Davy, “Advanced sound transmission loss theories for sandwich panels,” *Applied Acoustics*, vol. 145, pp. 1–10, 2019.
- [18] Marshall Day Acoustics, *INSUL Technical Manual and Validation Studies*, 2006.

Perbandingan CT simulator kontras dan non-kontras pada treatment planning radioterapi kanker cervix dan head & neck menggunakan Linac

Widya Rachma Wulan¹, Arum Sinda Santika^{1*}, Sayid Mubarak², Ghifari Muhammd²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran"
Jawa Timur, Indonesia, 60294

²Instalasi Cancer Center Radioterapi, Rumah Sakit Fatmawati
Jakarta Selatan, Indonesia, 12430

*email: arum.sinda.ft@upnjatim.ac.id.

Abstrak – Radioterapi terkini membutuhkan perencanaan dosis yang tepat dengan menggunakan Treatment Planning System (TPS) untuk menciptakan distribusi dosis yang ideal pada target tumor serta mengurangi paparan pada Organ At Risk (OAR). Peran Simulator CT (CT Sim) sangat krusial dalam tahapan delineasi target, akan tetapi pemakaian agen kontras dapat memengaruhi nilai Hounsfield Unit (HU) dan densitas elektron yang bisa berdampak pada perhitungan dosis. Penelitian ini bertujuan untuk menilai perbandingan hasil perencanaan dosis radioterapi antara CT Sim dengan kontras dan tanpa kontras dalam kasus kanker serviks serta kepala dan leher menggunakan TPS Monaco. Penelitian ini dilakukan secara retrospektif dengan mengevaluasi distribusi dosis maksimum, cakupan Planning Target Volume (PTV), dan dosis OAR. Temuan penelitian menunjukkan rata-rata deviasi dosis di kasus serviks sebesar 0,45% dan untuk kepala dan leher sebesar 0,78%. Perbedaan ini tidak menunjukkan signifikansi statistik mengenai dosis maksimum, cakupan PTV, maupun dosis OAR. Namun, pemakaian kontras memberikan gambaran anatomi yang lebih tajam sehingga mendukung delineasi target serta organ di sekitarnya dengan lebih tepat. Dengan demikian, penggunaan agen kontras lebih memberikan dampak terhadap peningkatan kualitas visualisasi anatomi ketimbang perubahan pada distribusi dosis radioterapi.

Kata Kunci: CT Simulator, Head & Neck, Kanker Cervix, Organ At Risk, Treatment Planning System.

Abstract – Modern radiotherapy requires accurate dose planning using a Treatment Planning System (TPS) to achieve optimal dose distribution to the tumor target while minimizing exposure to Organs at Risk (OAR). CT Simulator (CT Sim) plays an important role in target delineation; however, the use of contrast agents may affect Hounsfield Unit (HU) values and electron density, potentially influencing dose calculation. This study aimed to analyze the comparison of radiotherapy dose planning results between contrast-enhanced and non-contrast CT Sim in cervical cancer and Head & Neck cases using the Monaco TPS. This retrospective study evaluated maximum dose distribution, Planning Target Volume (PTV) coverage, and OAR dose. The results showed an average dose deviation of 0.45% in cervical cancer cases and 0.78% in Head & Neck cases. These differences were not statistically significant for maximum dose, PTV coverage, or OAR dose. However, the use of contrast agents provided clearer anatomical visualization, which improved target and surrounding organ delineation accuracy. Therefore, contrast agents had a greater impact on anatomical visualization quality than on radiotherapy dose distribution changes.

Key words: Cancer Cervix, CT Simulator, Head & Neck, Organ At Risk, Treatment Planning System.

PENDAHULUAN

Radioterapi adalah salah satu jenis terapi pengobatan untuk penyakit tumor dan kanker, pengobatan kanker dilakukan dengan menggunakan radiasi [1]. Keberhasilan radioterapi yang canggih sangat bergantung pada akurasi dalam merencanakan terapi menggunakan *Treatment Planning System* (TPS). Dalam praktik klinis yang ada saat ini, TPS berfungsi untuk menciptakan distribusi dosis radiasi yang paling efektif untuk sasaran

tumor, sekaligus mengurangi paparan dosis ke jaringan sehat atau *Organ At Risk* (OAR). Perencanaan radioterapi yang optimal harus memberikan cakupan dosis yang merata pada *Planning Target Volume* (PTV), mempertahankan nilai dosis maksimum dalam batas toleransi yang ditetapkan, serta memastikan dosis pada OAR tetap di bawah batas klinis yang disarankan [2]. dalam menilai perencanaan dosis, indikator seperti *Dose Volume Histogram* (DVH), *Conformity Index* (CI) dan *Homogeneity Index* (HI) dimanfaatkan

untuk mengevaluasi kualitas distribusi dosis yang dihasilkan oleh TPS [3].

Berbagai teknik terapi radiasi, seperti *3D Conformal Radiation Therapy (3D-CRT)*, *Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT)*, *Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)*, memungkinkan pemberian dosis radiasi yang lebih tepat dan efektif [4]. Namun, keberhasilan dalam optimasi dosis tidak hanya ditentukan oleh metode penyinaran yang diterapkan, tetapi juga oleh kualitas pencitraan yang digunakan selama proses simulasi. Dalam proses radioterapi CT Simulator (CT Sim) memainkan peran penting karena menjadi dasar untuk menggambar batas target tumor, menentukan OAR, serta berfungsi sebagai input utama dalam perhitungan dosis pada TPS [5]. Ketepatan dalam menggambar anatomi sangat mempengaruhi kualitas distribusi dosis yang tercipta. Kesalahan dalam menentukan batas tumor dapat mengakibatkan dosis yang kurang pada sasaran atau dosis berlebih pada jaringan sehat di sekitarnya.

Penggunaan CT Sim dalam perencanaan untuk radioterapi memiliki tujuan menciptakan gambaran anatomi yang tepat agar distribusi dosis dapat diberikan dengan efisien pada area terapi. Salah satu cara yang diterapkan untuk meningkatkan kualitas tampilan anatomi adalah dengan menggunakan kontras. CT Sim yang menggunakan kontras dapat memperjelas batas jaringan lunak, pembuluh darah, dan struktur anatomi tertentu, sehingga penentuan target volume bisa dilakukan dengan lebih tepat dibandingkan dengan CT Sim tanpa kontras [6]. Penerapan kontras sangat berguna terutama pada kanker *cervix* dan *Head & Neck* yang memiliki kompleksitas anatomi yang tinggi dan berdekatan dengan organ-organ vital lainnya.

Di sisi lain, penggunaan kontras juga dapat berpotensi mengubah nilai *Hounsfield Unit* (HU) dalam gambar CT yang dipakai sebagai dasar perhitungan dosis dalam TPS. Perubahan dalam nilai HU bisa memengaruhi proses konversi densitas elektron, sehingga ada risiko tentang bagaimana hal itu bisa berdampak pada keakuratan distribusi dosis radioterapi. Sebaliknya, CT Sim tanpa kontras masih banyak diterapkan dalam praktik klinis karena prosesnya lebih sederhana, lebih cepat, dan menghindari risiko reaksi alergi akibat penggunaan bahan kontras. Namun, kekurangan dalam visualisasi jaringan lunak pada CT tanpa kontras dapat menyebabkan penentuan target menjadi kurang optimal dalam beberapa kasus

tertentu. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi tentang sejauh mana penggunaan kontras benar-benar memberikan dampak terhadap hasil perencanaan dosis radioterapi.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa perbedaan dalam penggunaan CT Sim dengan kontras dan tanpa kontras dapat mengakibatkan variasi dalam pemetaan sasaran serta OAR, yang pada kemudia berdampak pada distribusi dosis dalam TPS. Dalam praktik radioterapi, akurasi distribusi dosis menjadi faktor utama untuk memastikan bahwa target memperoleh dosis terapi secara maksimal tanpa meningkatkan risiko kerusakan pada jaringan sehat di sekelilingnya [3]. Selain itu, penentuan margin yang tepat untuk *Planning Target Volume* (PTV) juga sangat vital untuk meminimalkan kesalahan geometris dan mempertahankan konsistensi distribusi dosis sepanjang sesi terapi [7].

Studi sebelumnya lebih menekankan pada peningkatan kualitas visualisasi anatomi berkat penggunaan kontras, sedangkan analisis mengenai dampaknya terhadap hasil perencanaan dosis radioterapi masih menunjukkan variasi yang signifikan. Beberapa penelitian menginformasikan adanya perubahan dalam pemetaan sasaran dan OAR yang dapat berpengaruh pada distribusi dosis, sedangkan penelitian lain menunjukkan bahwa sistem TPS mutakhir mampu menyesuaikan dengan perubahan kepadatan akibat agen kontras, sehingga perbedaan dosis yang terukur tidak memiliki signifikansi klinis. Keadaan ini menandakan bahwa pemakaian CT Sim dengan kontras masih memerlukan penyelidikan lebih lanjut, terutama mengenai efektivitasnya dalam mengoptimalkan perencanaan radioterapi.

Berdasarkan kondisi ini, penelitian ini dilaksanakan untuk menganalisis perbandingan hasil perencanaan dosis radioterapi antara CT Simulator dengan kontras dan tanpa kontras melalui TPS Monaco dalam kasus kanker *cervix* dan *Head & Neck*. Analisis dilakukan pada parameter distribusi dosis di PTV dan OAR untuk mengetahui apakah penggunaan agen kontras memberikan dampak signifikan terhadap hasil perencanaan radioterapi. Hasil dari kajian ini diharapkan dapat menjadi acuan klinis dalam mempertimbangkan penggunaan CT Sim kontras serta non-kontras untuk mendukung optimasi terapi radiasi yang lebih akurat, aman, dan efisien

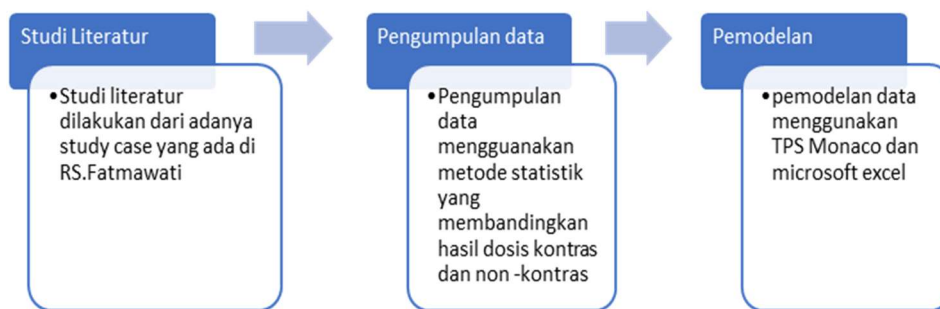
METODE PENELITIAN

Pemindaian CT Simulator dilakukan pada pasien kanker cervix dan Head & Neck (H&N) menggunakan CT kontras dan CT non-kontras sebagai dasar perencanaan radioterapi pada TPS Monaco. Pada kasus cervix, penggunaan media kontras bertujuan untuk memperjelas batas jaringan lunak di area pelvis, terutama delineasi target volume serta organ di sekitar seperti bladder dan rektum. Sedangkan pada kasus Head & Neck, CT kontras digunakan untuk meningkatkan visualisasi jaringan lunak, pembuluh darah, serta batas tumor yang berdekatan dengan organ penting seperti brainstem dan medula spinalis.

Meskipun prosedur CT Sim pada kedua kasus menggunakan prinsip yang sama, yaitu menghasilkan citra anatomi untuk proses delineasi target dan OAR, terdapat perbedaan

pada area anatomi, tujuan visualisasi, serta struktur organ yang dievaluasi. CT non-kontras tetap digunakan sebagai pembanding karena masih mampu memberikan informasi anatomi dasar yang dibutuhkan dalam proses perencanaan dosis radioterapi.

Data CT Sim kontras dan non-kontras diperoleh secara retrospektif dari sistem radiologi rumah sakit. Selanjutnya, seluruh citra dimasukkan ke dalam Treatment Planning System (TPS) Monaco untuk dilakukan delineasi target, perhitungan distribusi dosis, dan evaluasi parameter dosimetri seperti dosis maksimum, cakupan Planning Target Volume (PTV), dan dosis pada Organ At Risk (OAR). Analisis dilakukan secara statistik untuk membandingkan hasil perencanaan dosis antara CT Sim kontras dan non-kontras pada kasus cervix maupun Head & Neck.



Gambar 1. Alur Proses Metodologi

Berdasarkan study case yang diangkat pendalaman materi dari peneliti terdahulu, maka laporan diperoleh melalui sistem informasi radiologi. Hal tersebut dapat diagnosis akhir sebagaimana dinyatakan dalam rekam medis. Analisis Statistik menggunakan TPS Monaco, sebagai analisis utama, CT non kontras dengan CT kontras. Untuk signifikasi dosis yang diberikan pada analisis penyakit cervix yaitu 25 x 2 Gray atau 5000 Gy, sedangkan pada analisis penyakit H&N yaitu 35 x 2 Gray atau 7000 Gy. Pada dosis tersebut nantinya menghasilkan nilai dosis pada CT kontras serta CT non kontras.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis secara menyeluruh perbandingan dosis radiasi yang diterima oleh pasien yang menjalani perencanaan radioterapi dengan menggunakan CT Sim Kontras dengan CT Sim Non-Kontras. Tujuan dari penelitian ini

adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh zat kontras dalam pencitraan CT Simulator pada distribusi dosis radioterapi.

Ketepatan distribusi dosis adalah salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan terapi radiasi. Oleh karena itu, untuk mengetahui apakah ada dampak yang signifikan pada hasil perhitungan dosis, perbedaan antara pencitraan dengan zat kontras dan tanpa kontras perlu dianalisis untuk mengetahui apakah ada dampak yang signifikan terhadap hasil perhitungan dosis. Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini mencakup dosis maksimum (Max Dose), persentase volume target yang menerima dosis lebih dari 107% dari dosis yang direncanakan ($PTV > 2\%$), serta persentase volume target yang menerima dosis kurang dari 95% dari dosis yang direncanakan ($PTV < 95\%$), dengan batas toleransi deviasi tidak lebih dari 2%, dan dosis yang diterima oleh organ sekitar target terapi,

seperti rektum dan ginjal (organ at risk/OAR) untuk kasus kanker serviks serta dosis pada otak

untuk kasus kanker kepala dan leher.

Tabel 1. Kasus Pasien Non Kontras Pada Cervix

Nama Pasien	Max Dose	Prescribe 107% (PTV < 2 %)	Prescribe 95% (PTV > 95 %)	Rektum	Bladder
Pasien 1	5602,0 cGy	0,16 %	97,14 %	28,49 %	23,55%
Pasien 2	5249,2 cGy	0,00 %	99,4%	25,68%	23,90%
Pasien 3	5286,8 cGy	0,00 %	98,20%	32,55%	11,50%
Pasien 4	5236,2 cGy	0,00 %	98,89 %	13,02 %	7,03 %
Pasien 5	5182,7 cGy	0,00 %	98,96 %	2,43 %	12,48 %

Tabel 2. Kasus pasien Kontras Pada Cervix

Nama Pasien	Max Dose	Prescribe 107% (PTV < 2 %)	Prescribe 95% (PTV > 95 %)	Rektum	Bladder
Pasien 1	5493,4 cGy	0,15 %	97,93 %	24,07 %	31,17 %
Pasien 2	5256,8 cGy	0,00 %	99,38 %	25,68 %	23,90 %
Pasien 3	5249,8 cGy	0,00 %	98,13 %	30,49 %	11,00 %
Pasien 4	5240,7 cGy	0,00 %	6,51 %	13,53 %	6,51 %
Pasien 5	5198,5 cGy	0,00 %	99,03 %	2,04 %	10,33 %

Hasil penelitian Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan bahwa penggunaan zat kontras pada saat merencanakan radioterapi untuk kanker serviks tidak mengubah dosis yang diberikan. Dosis maksimum rata-rata 5311,18 cGy pada pasien tanpa kontras dan 5287,04 cGy pada pasien dengan kontras. Perbedaannya tidak signifikan secara statistik, dengan nilai p-value 0,803 untuk dosis maksimum. Dengan nilai p-value sebesar 0,965, hasil pada kedua kelompok hampir sama dengan persentase volume target yang menerima dosis kurang dari 2%. Kelompok tanpa kontras memiliki rata-rata 96,69% dan kelompok kontras memiliki 96,13%, menurut PTV lebih dari 95%. Perbedaan persentase volume target yang menerima dosis ideal ini tidak cukup besar untuk dianggap signifikan. Kelompok tanpa kontras memiliki dosis rektum 20,97%,

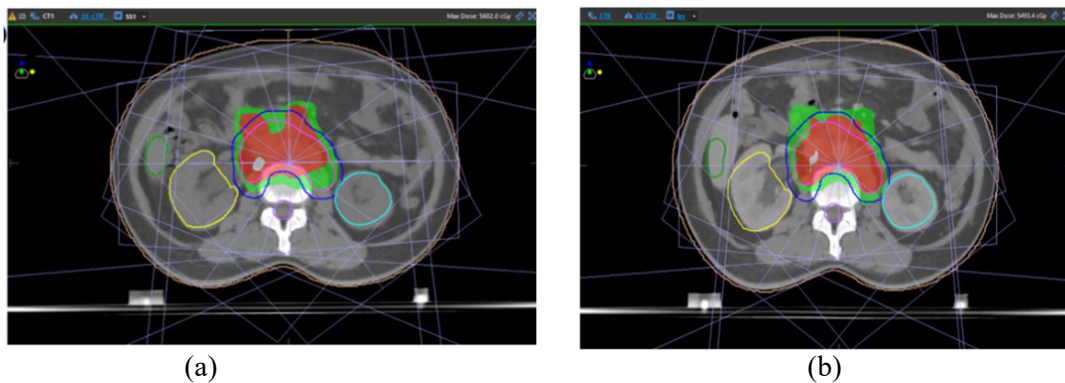
sedangkan kelompok dengan kontras memiliki dosis 19,79%. Hasil ini menunjukkan bahwa paparan radiasi rektum tidak berbeda secara signifikan juga. Dosis Bladder rata-rata 15.44% pada kelompok tanpa kontras dan 14.97% pada kelompok dengan kontras. Dengan nilai p-value sebesar 0,882, perbedaan ini tidak signifikan. Hasil ini disebabkan oleh kemampuan sistem perencanaan dosis untuk mengkompensasi perubahan dalam pencitraan CT Simulator. Dalam beberapa kasus, zat kontras dapat membantu membedakan tumor, tetapi ini tidak selalu berdampak pada beberapa dosis yang diberikan.

Secara teori, agen kontras berbasis iodin mampu meningkatkan atenuasi sinar-X dan menaikkan nilai HU pada citra CT. Peningkatan nilai HU ini akan memengaruhi proses konversi densitas elektron pada *Treatment Planning*

System (TPS) yang digunakan dalam perhitungan distribusi dosis radioterapi [8]. Penggunaan media kontras pada CT Simulator dapat menyebabkan perubahan perhitungan dosis sekitar 0,5–1,5% pada area pelvis, tergantung konsentrasi kontras, waktu akuisisi citra, dan teknik radioterapi yang digunakan [9]. Peningkatan densitas elektron akibat kontras dapat memengaruhi akurasi kalkulasi dosis terutama pada teknik IMRT dan VMAT yang sensitif terhadap perubahan densitas jaringan [10].

Hal ini menunjukkan bahwa TPS Monaco masih dapat menyesuaikan diri terhadap variasi

densitas elektron yang terjadi karena penggunaan agen kontras dengan cukup efektif, sehingga penyebaran dosis yang dihasilkan tetap berada dalam ambang batas yang dapat diterima secara klinis. Selain itu, tidak ditemukan perbedaan yang signifikan pada area PTV maupun dosis yang diterima oleh OAR seperti rektum dan kandung kemih. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan kontras lebih berpengaruh pada peningkatan kualitas visualisasi anatomi dibandingkan dengan perubahan distribusi dosis secara signifikan.



Gambar 2. (A) Cervix Non Kontras, (B) Cervix Kontras

Gambar 2. (A) merupakan hasil CT Sim Non Kontras pada Cervix. Gambar non kontras biasanya memiliki kontras biasanya memiliki kontras alami yang lebih rendah, yang membuat detail anatomi lebih sulit dibedakan terutama batas antara jaringan sehat dan tumor. Namun, dalam beberapa situasi penggunaan non kontras cukup, terutama jika perbedaan densitas jaringan jelas tanpa bantuan.

Pada Gambar 3. (B) merupakan hasil CT Sim Kontras. Batas anatomi dipertegas dengan kontras ini, yang memperjelas delineasi target volume (PTV), dan membedakan *Organ At Risk* (OAR). Keberadaan Kontras dalam tubuh dan distorsi yang dihasilkan jelas dalam perencanaan gambar CT. Walaupun tampak lebih jelas secara visual, perbedaan dosis antara pemindaian kontras dan non kontras tidak signifikan secara statistik, menurut hasil analisis dosis yang dilakukan menggunakan TPS Monaco. Ini menunjukkan bahwa meskipun agen kontras meningkatkan kualitas visualisasi, sistem

perencanaan dosis sudah mampu mengompensasi perbedaan tersebut tanpa memengaruhi hasil akhir dosis.

Akibatnya, temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan zat kontras lebih mempengaruhi aspek visualisasi daripada efektivitas terapi dosis. Meskipun tidak mempengaruhi dosis yang diberikan, kejelasan delineasi tumor dapat membantu memastikan cakupan target volume yang lebih akurat. Faktor lain, seperti margin keselamatan dan toleransi organ sehat, harus dipertimbangkan saat merencanakan terapi radiasi. Jika ada kesulitan untuk menentukan batasan tumor, penggunaan zat kontras tetap dapat dipertimbangkan berdasarkan kebutuhan klinis. Untuk memberikan dosis yang lebih tepat dalam beberapa kasus, mungkin lebih mudah untuk menghitung margin keselamatan dan menentukan tumor dengan lebih jelas. Hasil ini memberikan wawasan penting bagi praktisi radioterapi dalam menentukan strategi terbaik dalam perencanaan pengobatan kanker serviks.

Tabel 3. Kasus Pasien Non Kontras Pada Head & Neck

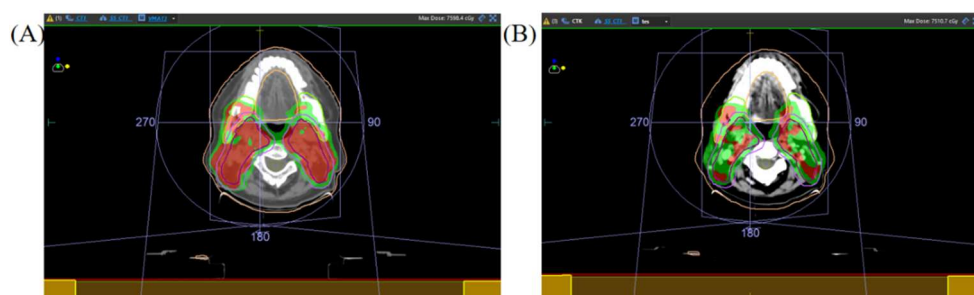
Nama Pasien	Max Dose	PTV < 2 %	PTV > 95 %	Brainstem < 5400 cGy
Pasien 1	7598,4 cGy	0,12 %	95,29 %	4198,1 cGy
Pasien 2	7586,7 cGy	0,00 %	95,74 %	4942,7 cGy
Pasien 3	7684,7 cGy	0,02 %	96,01 %	5323,5 cGy
Pasien 4	7800,5 cGy	0,07 %	94,68 %	5284,0 cGy
Pasien 5	7597,9 cGy	0,00 %	95,98 %	3823,5 cGy

Tabel 4. Kasus pasien Kontras Pada Head & Neck

Nama Pasien	Max Dose	PTV < 2 %	PTV > 95 %	Brainstem < 5400 cGy
Pasien 1	7510,7 cGy	0,00 %	92,77 %	3869,4 cGy
Pasien 2	7488,8 cGy	0,00 %	96,73 %	4898,1 cGy
Pasien 3	7641,1 cGy	0,12 %	94,62 %	5359,2 cGy
Pasien 4	7702,2 cGy	0,04 %	92,97 %	5293,0 cGy
Pasien 5	7628,0 cGy	0,10 %	93,25 %	4186,7 cGy

Pada Tabel 3 dan Tabel 4 penggunaan zat kontras dalam perencanaan radioterapi untuk kanker kepala dan leher tidak menunjukkan perbedaan dosis yang signifikan. Dosis maksimum rata-rata 7653,84 cGy pada pasien tanpa kontras dan 7594,16 cGy pada pasien dengan kontras. Perbedaan ini tidak memiliki signifikan statistik, dengan nilai p-value sebesar 0.612. Dengan p-value 0.734 peresntase volume terget (PTV) yang menerima dosis kurang dari

2% hampir sama. Kelompok tanpa kontras memiliki rata-rata 95.54 dan kelompok kontras memiliki 94.82% menurut PTV lebih dari 95%. Selain itu, perbedaan presentase volume target yang menerima dosis ideal ini tidak terlalu besar untuk dianggap signifikan. Dalam kelompok tanpa kontras, dosis pada Brainstem adalah 4782.36 cGy, dan dalam kelompok kontra dosisnya adalah 4698.24 cGy.



Gambar 3. (A) Merupakan Gambar *Head & Neck* non-kontras, (B) Merupakan gambar *Head & Neck* kontras

Gambar 3 (A) merupakan hasil CT Sim Non Kontras pada *Head & Neck* yang umumnya digunakan untuk melihat struktur jaringan dengan densitas yang sudah cukup berbeda,

seperti tulang atau jaringan keras lainnya. Namun, untuk jaringan keras lainnya, ditunjukkan di gambar ini. Namun, untuk jaringan lunak di area *Head & Neck* batas

anatomi dan target terapi seringkali tidak jelas tanpa kontras, yang membuatnya lebih sulit untuk membedakan target volume (PTV) dan *Organ At Risk* (OAR).

Gambar 3 (B) merupakan hasil CT Sim Kontras pada *Head & Neck* yang digunakan untuk memperjelas pembuluh darah, jaringan lunak, dan struktur penting lainnya di area *Head & Neck*. Kontras membantu membedakan antara jaringan tumor, otot, dan organ penting seperti otak atau batang otak, sehingga tim perencanaan dapat menggambar kontur target dengan lebih akurat.

Oleh karena itu, keputusan untuk menggunakan zat kontras harus lebih berfokus pada masalah diagnostik daripada meningkatkan dosis. Dalam beberapa kasus, penggunaan kontras tetap dapat membantu mencegah kesalahan delineasi yang dapat mempengaruhi efektivitas terapi. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan zat kontras hanya memberikan perubahan dosis yang relatif kecil terhadap hasil perencanaan radioterapi. Pada kasus *cervix*, deviasi dosis yang diperoleh sekitar 0,45%, sedangkan pada kasus *Head & Neck* sekitar 0,78%. Nilai tersebut masih berada dalam rentang perubahan dosis yang dilaporkan pada beberapa penelitian sebelumnya, yaitu sekitar 0,5–1,5% untuk kasus *cervix* dan 1–3% pada kasus *Head & Neck*. Perbedaan ini terjadi karena agen kontras dapat meningkatkan nilai Hounsfield Unit (HU) dan densitas elektron pada citra CT, sehingga memengaruhi proses kalkulasi dosis pada TPS. Namun, TPS Monaco masih mampu mengompensasi perubahan densitas tersebut dengan baik sehingga pengaruhnya terhadap distribusi dosis akhir tetap relatif kecil dan tidak signifikan secara klinis. Hasil klinis dari data ini adalah bahwa zat kontras dapat digunakan untuk meningkatkan kejelasan gambar jika diperlukan, tetapi tidak perlu optimalisasi dosis. Oleh karena itu, ketika merencanakan radioterapi untuk kanker kepala dan leher dengan penggunaan zat kontras, dokter dan fisikawan medis harus mempertimbangkan baik keuntungan maupun kekurangan penggunaan zat kontras.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa, dalam perencanaan radioterapi untuk kanker serviks dan kepala-leher, penggunaan zat kontras pada simulator CT tidak menghasilkan perubahan yang signifikan secara statistik pada distribusi dosis maksimum, cakupan target volume (PTV),

dan dosis yang diterima organ at risk (OAR). Meskipun demikian, telah terbukti bahwa zat kontras meningkatkan kualitas visualisasi anatomi, memungkinkan delineasi struktur penting dan target dengan lebih akurat. Oleh karena itu, untuk memastikan perencanaan yang tepat tanpa mengurangi efektivitas dosis, pemakaian kontras sebaiknya didasarkan pada kebutuhan klinis, terutama dalam kasus yang memerlukan pemetaan anatomi yang lebih rinci. Diharapkan temuan ini akan membantu praktisi radioterapi menentukan metode terbaik untuk perencanaan pengobatan yang aman dan optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan Instalasi Cancer Center Radioterapi RS Fatmawati yang telah memberikan izin serta memberikan pendampingan selama pelaksanaan penelitian. Terima kasih juga disampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan banyak bantuan hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. A. Sinaga, "Penerapan fisika radiasi dalam ilmu medis pada radioterapi kanker: literature review," vol. 5, no. 1, 2024.
- [2] M. R. Fadila, R. Subroto, I. W. A. Makmur, R. Wirawan, and D. Wijaya, "Analisis Nilai CI dan HI Planning Target Volume (PTV) pada Perencanaan Radioterapi Teknik IMRT untuk Treatment Kanker Nasofaring," 2023.
- [3] Y. E. Daniartie, P. S. Wardani, D. R. P. S. Putri, R. J. Stevenly, and S. Suryaningsih, "Analisis Treatment Planning System dengan Menggunakan Teknik Box dan Teknik Antero Posterior-Postero Anterior pada Kasus Kanker Serviks," *Progress. Phys. J.*, vol. 3, no. 1, p. 118, Jun. 2022, doi: 10.30872/ppj.v3i1.873.
- [4] C. W. Williamson, H. C. Liu, J. Mayadev, and L. K. Mell, "Advances in External Beam Radiation Therapy and Brachytherapy for Cervical Cancer," *Clin. Oncol.*, vol. 33, no. 9, pp. 567–578, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.clon.2021.06.012.
- [5] M. Iffah and R. L. Faraningrum, "teknik terapi radiasi 3dcrT pada kanker endometrium di unit radioterapi rsud abdul

- wahab sjahranie samarinda,” vol. 2, no. 3, 2023.
- [6] M. S. D’Souza and A. B. Sarkar, “Chapter 46 - Radiological Contrast Agents and Radiopharmaceuticals,” *Side Effects of Drugs Annual*, vol. 40,
- [7] S. D. Ray, Ed., in *A Worldwide Yearly Survey of New Data in Adverse Drug Reactions*, vol. 40. , Elsevier, 2018, pp. 579–594. doi:10.1016/bs.seda.2018.07.007.
- [8] S. F. Jannah, S. Dewang, and S. Male, “292-Article Text-563-1-10-20241215 (1).” 2024.
- [9] C. Scherf et al., “Effects of iodinated contrast agent on HU-based dose calculation and dose delivered in iridium-192 high-dose-rate brachytherapy,” *J. Contemp. Brachytherapy*, vol. 14, no. 1, pp. 80–86, 2022, doi:10.5114/jcb.2022.113551.
- [10] A. Nurkamal, N. L. K. Sari, D. Ryangga, and S. Mubarak, “Evaluasi dosis CT Simulator pada Radioterapi Head and Neck dan Pelvis,” *J. Ilm. Giga*, vol. 27, no. 1, pp. 49–60, Jun. 2024, doi: 10.47313/jig.v27i1.3755.
- [11] M. Izmirli *et al.*, “Impact of contrast agents on dose algorithms of planning systems,” *International J. Radiat. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 25–30, Jan. 2016, doi: 10.18869/acadpub.ijrr.14.1.25.
- [12] S. S. Suroshe, P. G. Student & Dharpal S. V., (2022). “Prediction of Air Quality Index Using Regression Models, *GIS SCIENCE JOURNAL*, vol. 9, no. 8, p. 576, 2022

Pendugaan potensi cadangan volume akuifer air tanah di daerah Sragen bagian timur

Darsono^{1*}, Sorja Koesuma¹, Budi Legowo¹, Ahmad Marzuki¹, Nuryani¹, Gatot Yuliyanto²

¹Departemen fisika FMIPA Universitas Sebelas Maret, Surakarta

²Departemen Fisika, FMS, Universitas Diponegoro, Semarang

*email: darsono70@staff.uns.ac.id

Abstrak – Kebutuhan air tanah di wilayah timur Kabupaten Sragen meningkat seiring perkembangan pertanian dan permukiman, sehingga diperlukan kajian potensi cadangan air tanah yang akurat. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik akuifer dan mengestimasi volume cadangan airtanah secara kuantitatif. Metode yang digunakan adalah geolistrik tahanan jenis konfigurasi Schlumberger yang dikombinasikan dengan pendekatan hidrogeologi. Data resistivitas diinterpretasikan untuk menentukan kedalaman, ketebalan, dan distribusi akuifer, kemudian dimodelkan secara tiga dimensi untuk estimasi volume. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan bawah permukaan terdiri atas topsoil, lempung, lempung pasir, pasir kerikilan, dan breksi, dengan zona akuifer utama berada pada lapisan pasir dan pasir kerikilan. Akuifer bebas teridentifikasi pada kedalaman 0,59–47,8 m dengan ketebalan 4,42–31,36 m, sedangkan akuifer tertekan berada pada kedalaman 20–133 m dengan ketebalan 33–93,7 m. Pemodelan tiga dimensi menunjukkan bahwa potensi airtanah terbesar terdapat pada lapisan pasir dan pasir kerikilan dengan volume masing-masing sebesar $8,735 \times 10^6 \text{ m}^3$ dan $5,435 \times 10^6 \text{ m}^3$. Hasil estimasi menunjukkan bahwa cadangan airtanah di wilayah penelitian tergolong sedang hingga tinggi. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi metode geofisika dengan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan tiga dimensi dalam estimasi volume akuifer sebagai dasar pengelolaan airtanah berkelanjutan..

Kata Kunci: Airtanah, geolistrik resistivitas, Schlumberger, akuifer, pemodelan 3D.

Abstract – The increasing demand for groundwater in the eastern region of Sragen Regency, driven by agricultural and residential development, necessitates an accurate assessment of groundwater reserves. This study aims to identify aquifer characteristics and estimate groundwater reserve volumes quantitatively. The method employed is electrical resistivity surveying using the Schlumberger configuration, combined with a hydrogeological approach. Resistivity data were interpreted to determine aquifer depth, thickness, and spatial distribution, followed by three-dimensional modeling for volume estimation. The results indicate that subsurface layers consist of topsoil, clay, sandy clay, sand, gravelly sand, and breccia, with the main aquifer zones associated with sand and gravelly sand layers. Unconfined aquifers were identified at depths of 0.59–47.8 m with thicknesses ranging from 4.42 to 31.36 m, while confined aquifers occur at depths of 20–133 m with thicknesses of 33–93.7 m. The 3D modeling results show that the largest groundwater potential is found in sand and gravelly sand layers, with estimated volumes of $8.735 \times 10^6 \text{ m}^3$ and $5.435 \times 10^6 \text{ m}^3$, respectively. The estimated groundwater reserves are classified as moderate to high. The novelty of this study lies in the integration of geophysical methods and quantitative approaches based on 3D modeling for aquifer volume estimation, providing a basis for sustainable groundwater management.

Key words: Groundwater, resistivity method, Schlumberger configuration, aquifer, 3D modeling.

PENDAHULUAN

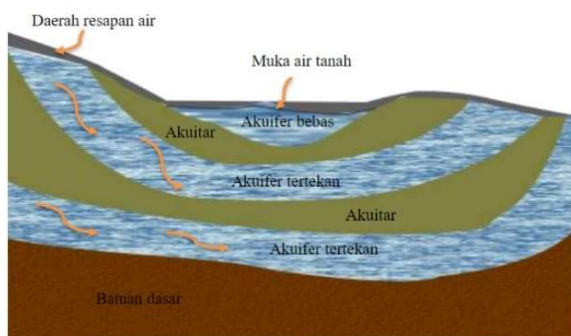
Air tanah merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting dalam memenuhi kebutuhan domestik, pertanian, industri, serta mendukung pembangunan berkelanjutan. Seiring dengan pertumbuhan penduduk dan meningkatnya aktivitas ekonomi, ketergantungan terhadap airtanah semakin tinggi, terutama pada wilayah yang memiliki keterbatasan sumber air permukaan atau distribusi curah hujan yang tidak merata [1], [2]. Pemanfaatan airtanah yang tidak terkelola

dengan baik dapat menimbulkan berbagai permasalahan, seperti penurunan muka airtanah, intrusi air laut, serta degradasi kualitas air [3]. Oleh karena itu, identifikasi dan karakterisasi sistem akuifer menjadi aspek penting dalam pengelolaan sumber daya airtanah secara berkelanjutan.

Kabupaten Sragen yang terletak di Provinsi Jawa Tengah merupakan salah satu wilayah yang rentan terhadap bencana kekeringan, khususnya di bagian timur seperti Kecamatan Sambirejo dan sekitarnya. Berdasarkan Indeks Risiko Bencana Indonesia, wilayah ini secara

periodik mengalami kekeringan pada musim kemarau yang berdampak pada ketersediaan air bersih dan kegiatan pertanian [4]. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya upaya eksplorasi sumber airtanah sebagai alternatif untuk memenuhi kebutuhan air masyarakat.

Akuifer merupakan lapisan geologi yang mampu menyimpan dan mengalirkan airtanah dalam jumlah signifikan. Berdasarkan kondisi hidrauliknya, akuifer dibedakan menjadi akuifer bebas (*unconfined aquifer*) dan akuifer tertekan (*confined aquifer*) [5]. Akuifer tertekan umumnya berada pada kedalaman lebih besar dan diapit oleh lapisan kedap air seperti Gambar 1, sehingga memiliki kualitas air yang relatif lebih baik serta lebih terlindungi dari kontaminasi permukaan [6]. Secara litologi, akuifer umumnya tersusun oleh material permeabel seperti pasir, kerikil, batupasir, atau batuan retak yang memungkinkan pergerakan dan penyimpanan airtanah [7], [8].



Gambar 1. Siklus hidrologi air tanah dan jenis akuifer[9]

Salah satu metode yang efektif untuk mengidentifikasi keberadaan dan karakteristik akuifer adalah metode geofisika, khususnya metode geolistrik resistivitas. Metode ini memanfaatkan perbedaan nilai tahanan jenis batuan untuk menginterpretasikan kondisi bawah permukaan. Lapisan dengan resistivitas rendah umumnya mengindikasikan material jenuh air, sedangkan resistivitas tinggi menunjukkan lapisan kompak atau kering [10]. Konfigurasi Schlumberger banyak digunakan karena mampu memberikan informasi kedalaman dan ketebalan lapisan secara vertikal dengan tingkat akurasi yang baik serta efisien dalam pelaksanaan survei [11], [12].

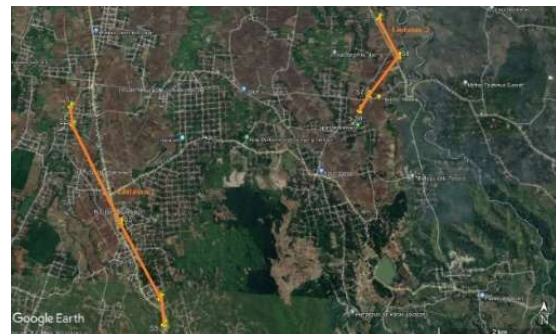
Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada identifikasi akuifer dangkal atau potensi airtanah secara umum, sedangkan kajian mengenai karakteristik akuifer dalam, termasuk distribusi, ketebalan, dan kedalamannya, masih terbatas [9],[13]. Padahal, informasi tersebut

sangat penting dalam mendukung upaya mitigasi kekeringan dan pengelolaan airtanah jangka panjang, khususnya di wilayah rawan kekeringan seperti Sragen bagian timur.

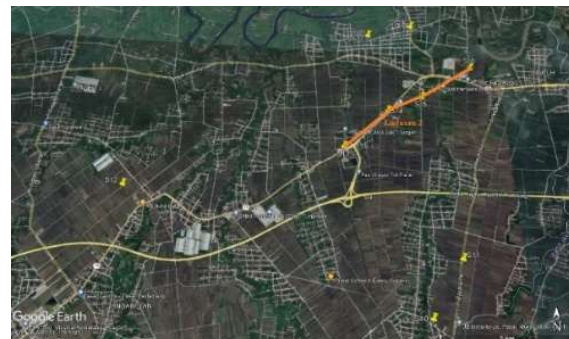
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik dan sebaran akuifer serta mengestimasi potensi cadangan volume airtanah melalui integrasi metode geolistrik konfigurasi Schlumberger, analisis geologi regional, dan pemodelan tiga dimensi (3D). Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai sistem akuifer serta menjadi dasar dalam pengelolaan airtanah yang berkelanjutan di wilayah penelitian.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di daerah Sragen wilayah timur (Kec. Sambirejo, Gondang, dan Sambung macan). Gambar 2 merupakan pengambilan titik geolistrik di kecamatan Sambirejo dan Kecamatan Gondang. Gambar 3 merupakan lokasi pengambilan data di kecamatan Sambungmacan.



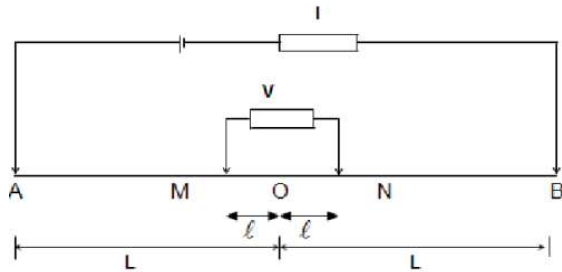
Gambar 2. Lokasi Pengambilan Data di Wilayah Sambirejo dan Gondang



Gambar 3. Lokasi Pengambilan Data di Wilayah Sambung Macan

Penelitian ini pengambilan menggunakan dengan metode geolistrik tahanan jenis konfigurasi Schlumberger, dimana bentangan

AB/2 mulai 1,5 m sampai 300 meter dan MN/2 dari 0,5 meter sampai 25 meter. Pengambilan data dilakukan dengan cara menginjeksikan arus melalui 2 elektroda arus, selanjutnya diukur beda potensial melalui 2 elektroda potensial seperti Gambar 4.



Gambar 4. Konfigurasi Schlumberger [10]

Data yang diperoleh di lapangan berupa arus listrik dan beda potensial (tegangan). Kemudian dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai resistansi dan resistivitas. Namun resistivitas yang diperoleh dari pengukuran adalah resistivitas semu (*apparent resistivity*), karena bawah permukaan bumi umumnya bersifat berlapis. Resistivitas semu ρ_a (Ωm) pada konfigurasi Schlumberger dapat dirumuskan dengan persamaan berikut

$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I} K \tag{1}$$

Nilai resistivitas yang didapat dari konfigurasi Schlumberger sangat dipengaruhi oleh faktor geometri. Faktor geometri ditentukan oleh jarak AB dan MN. Faktor geometri pada konfigurasi Schlumberger sebagai berikut:

$$K = \pi \left[\frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{2\left(\frac{MN}{2}\right)} \right] \tag{2}$$

Kemudian dilakukan proses pengolahan hasil perhitungan dengan menggunakan software sehingga diperoleh kurva matching. Kurva ini

dapat dijadikan acuan dalam menentukan jumlah lapisan dan sebaran nilai resistivitas semu terhadap kedalaman. Proses inversi dilakukan untuk memperoleh sebaran resistivitas yang sebenarnya (*true resistivity*) terhadap kedalaman pada setiap lapisan. Hasil yang diperoleh berupa nilai resistivitas, ketebalan lapisan dan kedalaman lapisan. Selanjutnya dibuat penampang 2 dimensi (2D) yang menghubungkan titik sounding dan Untuk mendapatkan pendugaan volume akuifer dibuatkan 3 dimensi (3D). dengan *software*. Selanjutnya dibuat penampang 2 dimensi dan 3 dimensi untuk melihat lapisan litologi dan arah persebaran akuifer dengan software.

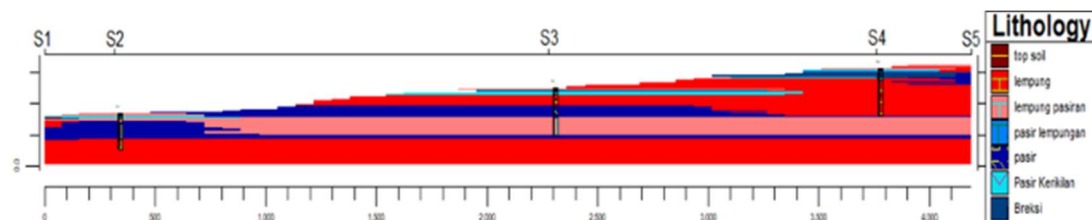
HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah Sragen wilayah timur (Kec. Sambirejo, Gondang, dan Sambung macan) berada pada formasi endapan lawu. Formasi endapan lawu tersusun atas batu pasir gunung berapi, batu lempung lanau gunung berapi, breksi gunung berapi dan lava. Litologi pada formasi ini terdiri dari lempung, lempung pasiran, pasir, pasir lempungan, pasir kerikilan, dan breksi. Litologi yang merupakan akuifer adalah pasir, pasir lempungan, pasir kerikilan, dan breksi.

Tabel 1. Range resistivitas litologi di daerah penelitian

No	Litologi	Resistivitas (Ωm)
1	Top Soil	3,4 – 34,23
2	Lempung	0,63- 7,6
3	Lempung Pasiran	7,73 – 13,51
4	Pasir Lempungan	14,6 – 24,18
5	Pasir	28,14 – 54,77
6	Pasir Kerikilan	64,91 – 87,24
7	Breksi	151,21 – 533,91

Hasil dari olahan software dibuat menjadi penampang 2 dimensi dan 3 dimensi agar dapat dilihat persebaran litologi dan akuifernya.



Gambar 5. Penampang 2 dimensi lintasan 1

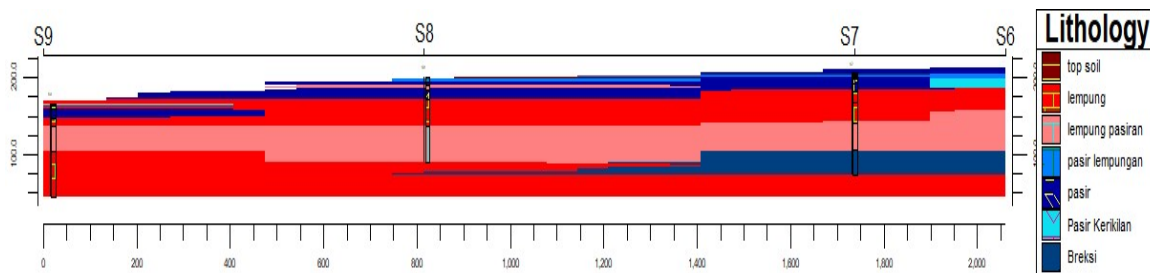
Penampang 1 terletak di kecamatan sambirejo yang menghubungkan antara titik sounding 1, 2, 3, 4, dan 5 berurutan dari arah

barat laut ke tenggara seperti yang ditunjukkan Gambar 5. Akuifer ditunjukkan dengan warna biru. Lapisan berwarna merah menunjukkan

lapisan lempung yang *impermeable* sebagai pembatas antar akuifer.

Dari titik *sounding* 1 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir kerikilan sampai dengan titik *sounding* 2 dengan ditandai dengan warna biru muda. Akuifer tertekan ditandai dengan warna biru dengan litologi pasir terdeteksi dari titik *sounding* 1 sampai titik *sounding* 2 dengan ketebalan yang berbeda. Pada titik 1 akuifer tertekan dibatasi dengan lapisan *impermeable* berupa lempung di atas dan di bawahnya, sedangkan pada titik 2 akuifer

tertekan dibatasi dengan lapisan *impermeable* berupa lempung pasiran di atasnya dan lapisan lempung di bawahnya. Pada titik *sounding* 3 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir kerikilan dan akuifer tertekan dengan litologi pasir yang dibatasi lapisan *impermeable* berupa lempung di atasnya dan lempung pasiran di bawahnya. Pada titik *sounding* 4 terdeteksi beberapa lapisan akuifer bebas dengan litologi pasir kerikilan dan breksi. Pada titik *sounding* 5 terdeteksi lapisan akuifer bebas dengan litologi breksi dan akuifer tertekan dengan litologi pasir.

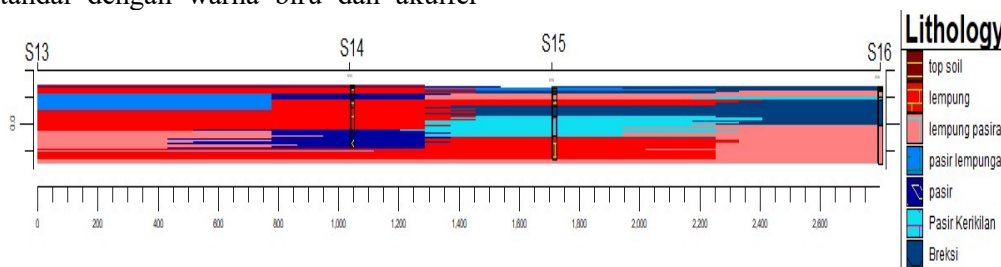


Gambar 6. Penampang 2 dimensi lintasan 2

Penampang 2 terletak di perbatasan kecamatan sambirejo sampai kecamatan gondang yang menghubungkan titik *sounding* 6, 7, 8, dan 9 berurutan dari arah barat daya ke timur laut seperti yang ditunjukkan Gambar 6. Akuifer ditunjukkan dengan warna biru. Lapisan berwarna merah menunjukkan lapisan lempung yang *impermeable* sebagai pembatas antar akuifer.

tertekan dengan litologi breksi, akuifer tertekan pada titik *sounding* 7 dibatasi dengan lapisan *impermeable* berupa lempung dan lempung pasiran. Pada titik *sounding* 8 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir lempungan yang ditandai dengan warna biru muda dan pasir yang ditandai dengan warna biru tua. Pada titik *sounding* 9 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir yang ditandai dengan warna biru tua. Pada penampang ini terlihat akuifer bebas dengan litologi pasir dari titik *sounding* 6 ke titik *sounding* 7 semakin tebal dan menyambung ke titik *sounding* 8 dengan ketebalan yang mirip, dan menipis ke arah titik *sounding* 9.

Pada titik *sounding* 6 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir, pasir lempungan, dan pasir kerikilan yang ditandai dengan warna biru muda dan biru tua. Pada titik *sounding* 7 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir yang ditandai dengan warna biru dan akuifer



Gambar 7. Penampang 2 dimensi lintasan 3

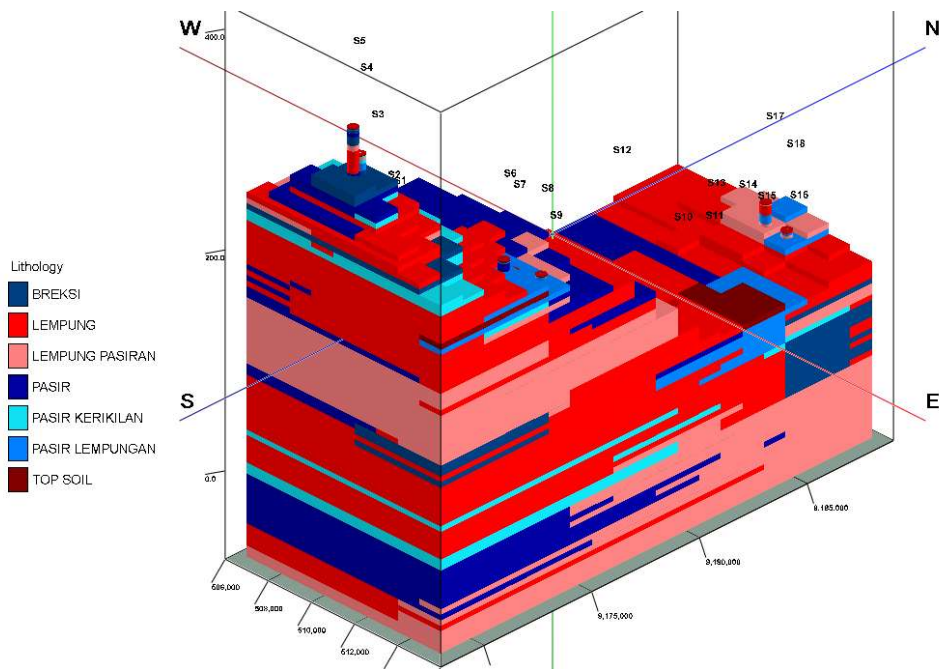
Penampang 3 terletak di kecamatan sambung macan yang menghubungkan titik *sounding* 13, 14, 15, dan 16 berurutan dari arah barat daya ke timur laut seperti yang ditunjukkan Gambar 7. Akuifer ditunjukkan dengan warna biru. Lapisan berwarna merah

menunjukkan lapisan lempung yang *impermeable* sebagai pembatas antar akuifer.

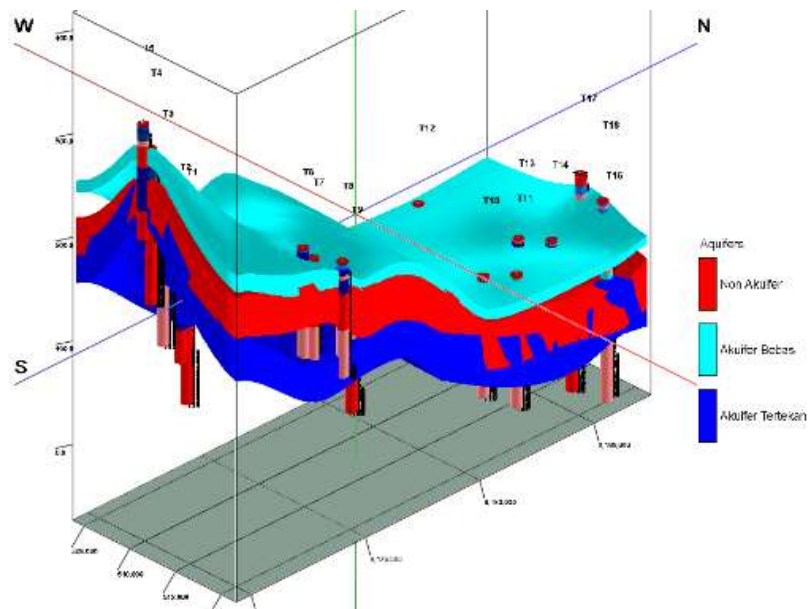
Pada titik *sounding* 13 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir lempungan yang ditandai dengan warna biru muda. Pada titik *sounding* 14 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir dan akuifer tertekan dengan

litologi pasir yang ditandai dengan warna biru tua, akuifer tertekan pada titik 14 dibatasi dengan lapisan impermeable berupa lempung. Pada titik *sounding* 15 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi pasir lempungan dan breksi yang ditandai dengan warna biru muda dan biru tua, dan terdeteksi akuifer tertekan dengan litologi breksi dan pasir kerikilan yang ditandai dengan warna biru tua dan biru muda. Akuifer tertekan

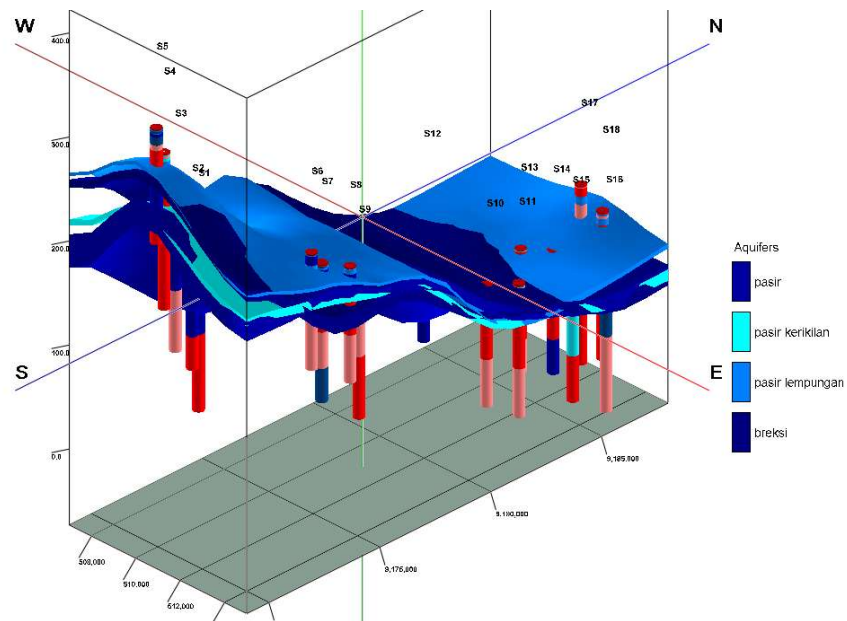
pada titik 15 dibatasi lapisan impermeable berupa lempung. Pada titik *sounding* 16 terdeteksi akuifer bebas dengan litologi breksi dan pasir kerikilan, dan terdeteksi akuifer tertekan dengan litologi sedikit pasir kerikilan dan lapisan breksi yang cukup tebal yang ditandai dengan warna biru muda dan biru tua. Akuifer tertekan pada titik 16 dibatasi lapisan impermeable berupa lempung pasir.



Gambar 8. Penampang 3 dimensi litologi geolistrik



Gambar 9. Penampang 3 dimensi jenis akuifer



Gambar 10. Model litologi akuifer 3 dimensi

Berdasarkan gambar 8 informasi volume litologi dari setiap lapisan dapat diketahui menggunakan *Software* untuk nilainya dapat dilihat pada tabel 2. Sedangkan pada gambar 10 memperlihatkan persebaran lapisan akuifer.

Tabel 2. Volume litologi

Litologi	Volume (m ³)
Top Soil	60.000×10 ³
Lempung	13.670.000×10 ³
Lempung Pasiran	10.720.000×10 ³
Pasir	8.735.000×10 ³
Pasir Lempungan	600.000 × 10 ³
Pasir Kerikilan	5.435.000 × 10 ³
Breksi	1.430.000 × 10 ³

Hasil dari penampang 3 dimensi litologi menunjukkan bahwa lapisan batuan di daerah pengukuran terdiri dari top soil, lempung, lempung pasiran, pasir, pasir lempungan, pasir kerikilan, dan breksi. Keberadaan akuifer ditunjukkan oleh litologi pasir, pasir lempungan, pasir kerikilan, dan breksi. Dimana volume dari lapisan pasir sebesar 8.735.000×10³ m³, volume dari lapisan pasir lempungan sebesar 600.000×10³ m³, volume dari lapisan pasir kerikilan sebesar 5.435.000×10³ m³, dan volume dari lapisan breksi sebesar 1.430.000×10³ m³. Gambar 9 menggambar persebaran lapisan akuifer dangkal dan akuifer dalam, untuk lapisan akuifer dangkal tergambar dengan warna biru muda, lapisan bukan akuifer tergambar yang berwarna merah dan warna biru tua merupakan lapisan akuifer dalam. Sedangkan pada Gambar 10 merupakan gambar perlapisan akuifer yang berupa lapisan pasir lempungan, lapisan pasir, pasir kerikilan dan lapisan breksi. Persebaran litologi akuifer dapat dilihat hamper disetiap wilayah penelitian.

KESIMPULAN

Pada titik-titik *sounding* dideteksi akuifer bebas dan akuifer tertekan. Pada kecamatan Sambirejo terdeteksi akuifer bebas pada kedalaman antara 1,17-35,7 m dengan ketebalan antara 9,56-31,36 m sedangkan akuifer tertekan pada kedalaman 26,4-90,8 m dengan ketebalan antara 35,8-56,3 m. Pada kecamatan Gondang terdeteksi akuifer bebas pada kedalaman antara 0,8-29,7 m dengan ketebalan antara 12,51-23,59 m sedangkan akuifer tertekan pada kedalaman 100-133 m dengan ketebalan antara 33 m. Pada kecamatan

Sambung macan terdeteksi akuifer bebas pada ketertekanan antara 0,59-47,8 m dengan ketebalan antara 4,42-29,04 m sedangkan akuifer tertekan pada kedalaman 20-121 m dengan ketebalan antara 33,4-93,7 m. Berdasarkan hasil pemodelan 3D, potensi airtanah terbesar terdapat pada lapisan pasir dan pasir kerikilan dengan volume masing-masing sebesar 8,735×10⁶ m³ dan 5,435×10⁶ m³.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Sebelas Maret yang sudah memberikan penugasan penelitian Mandiri Tahun 2025 dengan no kontrak 1297/UN27.22/PT.01.03/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. K. Todd & L. W. Mays, *Groundwater Hydrology*. 3rd Ed. Wiley, 2005.
- [2] C. W. Fetter, *Applied Hydrogeology*. 4th Ed. Pearson Education, 2014.
- [3] E. Custodio & M. R. Llamas, *Hydrogeology of Spain*, Geological Society of America, 1996.
- [4] Badan nasional Penanggulangan Bencana Provinsi Jawa Tengah *Data Bencana Indonesia 2017*, Pusat Data, Informasi dan Humas Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2017.
- [5] R. A. Freeze & J. A. Cherry, *Groundwater*. Prentice-Hall, 1979.
- [6] J. Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, 1972.
- [7] A. Suyono, et al., Identification of groundwater aquifer potential using resistivity methods in volcanic terrain, Indonesia. *Journal of Applied Geophysics*, 190, 104387, 2021.
- [8] Sukardi dan T. Budhitrisona, *Peta Geologi Lembar Salatiga, Jawa. Skala 1 : 100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi:Bandung, 1992.
- [9] D. Wijaya & A. Kusmiran, “Siklus hidrologi dan sistem akuifer”, *Jurnal Geologi Indonesia*, 16(2), 75–84, 2021.

- [10] W. M. Telford, L. P. Geldart, & R. E. Sheriff, *Applied Geophysics*. 2nd Ed. Cambridge University Press, 1990.
- [11] M. H. Loke, *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*. Geotomo Software, 2004.
- [12] D. Rolia & E. Sudjiningsih, "Identifikasi lapisan pembawa air menggunakan metode geolistrik resistivitas", *Jurnal Geofisika Indonesia*, 2018.
- [13] A.Lembayu, dkk., Analisis potensi air tanah berdasarkan data geolistrik di Kabupaten Sragen. *Jurnal Geosains Indonesia*, 2020.

Rancang bangun prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dengan sensor load cell berbasis IoT

Damar Putri Rizqiya, Hartono, Abdullah Nur Aziz*

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. DR. Soeparno No.61, Karangwangkal, Purwokerto Utara, Banyuwangi 53122

*email: abd.nur.aziz@unsoed.ac.id

Abstrak – Jalan sebagai sarana mobilitas masyarakat dan distribusi barang harus dilindungi dari kerusakan akibat muatan berlebih. Salah satu solusinya adalah jembatan timbang. Sistem jembatan timbang yang ada dinilai kurang efektif dan berisiko, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih sederhana dan efisien. Penelitian ini bertujuan merancang dan membuat purwarupa jembatan timbang yang memanfaatkan Load Cell sebagai sensor berat dan Internet of Things (IoT) bersama aplikasi Blynk sebagai sistem otomatisasi. Sistem mampu mendeteksi kelebihan muatan dan memberi peringatan melalui notifikasi aplikasi dan indikator LED, sekaligus mencatat data pengukuran secara real-time ke Google Spreadsheet. Proses penelitian berlangsung dalam enam tahap yaitu: persiapan, pengujian sensor, perancangan program dan perangkat keras, perakitan prototipe, pengujian sistem, dan analisis hasil. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe berfungsi baik dengan akurasi 97%, waktu respons 0,87 detik, serta efektif memberikan peringatan otomatis dan pencatatan data tanpa intervensi petugas.

Kata Kunci: Jembatan Timbang, Sensor Load Cell, Internet of Things (IoT), Blynk.

Abstract – Roads, as vital infrastructure for community mobility and goods distribution, must be protected from damage caused by excessive loads. One preventive effort is the use of weighbridges. However, existing systems are considered less effective and still pose several risks, thereby requiring a more practical and efficient solution. This research aims to address such limitations by developing a prototype weighbridge equipped with Load Cell sensors and an Internet of Things (IoT) based automation system using the Blynk application. The system is designed to issue overload warnings through mobile notifications and LED indicators, while also recording measurement data in real-time via Google Spreadsheet. The research was carried out in six stages: preparation, sensor testing, program and hardware design, prototype assembly, system testing, and result analysis. Findings indicate that the prototype operates reliably, achieving 97% accuracy with a response time of 0.87 seconds, and successfully enables automatic alerts and data logging without operator intervention.

Key words: Weighbridges, Load Cell Sensor, Internet of Things (IoT), Blynk.

PENDAHULUAN

Jembatan timbang merupakan salah satu upaya untuk menjaga jalan dari kerusakan akibat beban berlebih. Hal ini didasari oleh aturan Muatan Sumbu Terberat (MST) yang merupakan besarnya beban maksimum sumbu kendaraan bermotor yang diizinkan dan harus didukung oleh jalan [1], [2]. Adapun jembatan timbang merupakan seperangkat alat yang digunakan untuk menimbang kendaraan barang atau truk yang dipasang secara tetap atau dapat berpindah-pindah (portabel) [3]. Secara umum, sebuah jembatan timbang terdiri dari satu atau lebih sel beban yang mendukung platform, kotak persimpangan, dan pengontrol berat [4]. Prinsip kerja dari jembatan timbang ialah ketika kendaraan bermuatan melewati jembatan, operator akan mencatat massa kendaraan. Kemudian, apabila massanya melebihi batas,

pengendara akan dikenakan sanksi berupa denda.

Sebagian besar jembatan timbang yang sudah beroperasi dinilai kurang efisien, dikarenakan masih menggunakan sistem manual yang membutuhkan petugas untuk melakukan pencatatan dan penarikan denda. Selain kurang efisien, sistem manual memiliki tingkat kesalahan dan risiko kargo yang tinggi [5]. Berdasarkan uraian tersebut melakukan otomatisasi sistem penimbangan merupakan salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi sistem. Terdapat beberapa literatur berupa penelitian terdahulu yang menggunakan beragam sensor untuk melakukan otomatisasi sistem penimbangan, seperti jembatan timbang dengan sensor berat dan arduino berbasis web yang terhubung pada palang pintu otomatis berdasarkan status pembayaran denda [6]. Penelitian berikutnya berupa sistem

penimbangan yang dioperasikan berdasarkan data pada kartu RFID di truk [5]. Penelitian lain mengenai otomatisasi sistem penimbangan ialah sistem penimbangan dengan sensor berat dan NodeMCU ESP8266 yang mengirim data ke *server* dan notifikasi Telegram setelah input data oleh operator via web [7].

Kemajuan teknologi *Internet of Things (IoT)* membuka peluang untuk meningkatkan efektivitas sistem penimbangan dari penelitian-penelitian sebelumnya. Meskipun studi terdahulu dapat berkontribusi secara signifikan, masih ada beberapa keterbatasan dalam otomatisasi proses dan responsivitas sistem. Guna mengatasi keterbatasan tersebut, peneliti merancang dan membangun prototipe jembatan timbang yang dapat merekam data serta melakukan perhitungan denda secara otomatis, dilengkapi dengan notifikasi pada aplikasi dan indikator LED sebagai respons *real-time* ketika terjadi kelebihan muatan. Perekaman data menggunakan Blynk dan Google Spreadsheet sehingga memungkinkan integrasi data secara otomatis, penyimpanan berbasis *cloud*, dan kemudahan akses untuk monitoring jangka panjang [8].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri atas empat tahapan yaitu kajian studi dan pengujian respons sensor, perencanaan dan perancangan sistem, perangkaian prototipe, serta pengujian prototipe.

Tahap Kajian Studi dan Pengujian Respon Sensor *Load Cell*

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur mengenai sistem jembatan timbang serta spesifikasi alat dan bahan yang digunakan. Hasil studi literatur tersebut menjadi landasan tahapan selanjutnya. Kemudian, dilakukan pengujian respons sensor guna menghilangkan kesalahan struktural dengan cara membandingkan nilai hasil pengukuran sensor yang dihubungkan dengan Wemos D1 R1 yang telah diprogram dengan nilai hasil pengukuran kalibrator, dalam penelitian ini ialah, timbangan digital.

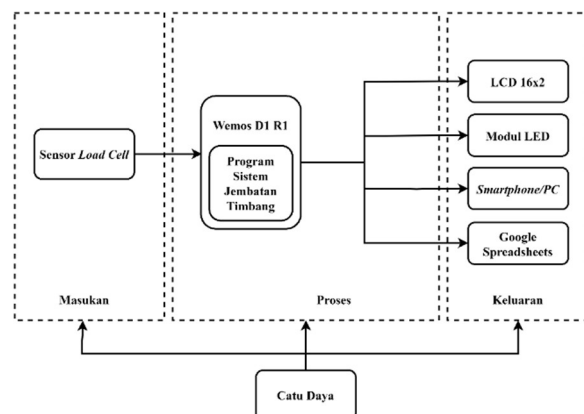
Tahap uji respons dilakukan dengan menimbang beban mulai dari massa 0 Kg sampai 2,5 Kg dengan variasi 250 g setiap penimbangan. Data yang didapatkan kemudian dicatat ke dalam tabel dan selanjutnya diplot menjadi sebuah grafik guna menentukan

persamaan garis linear yang digunakan sebagai fungsi kalibrasi untuk dimasukkan ke dalam program.

Tahap Perancangan Prototipe Sistem Otomatisasi Jembatan Timbang

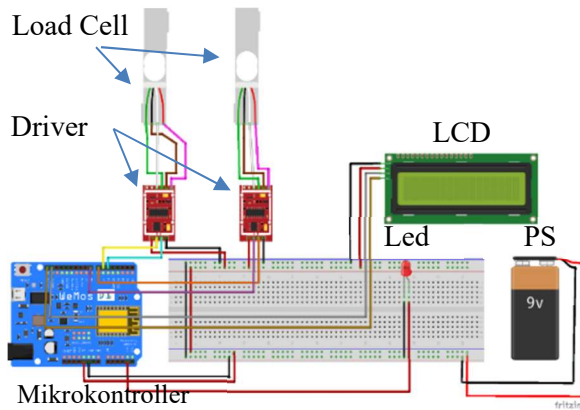
Perancangan prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang terbagi menjadi dua bagian, yaitu perancangan program sistem dan perancangan perangkat keras sistem. Perancangan program sistem dilakukan dengan menggunakan *software* Arduino IDE. Selain itu digunakan juga *software* Blynk yang menjadi antarmuka sistem, serta *software* Google Spreadsheet yang akan merekam data sistem secara *real-time*. Selanjutnya, perancangan perangkat keras sistem terbagi lagi menjadi beberapa bagian, yaitu diagram blok, diagram pengkabelan, serta desain 3D prototipe menggunakan *software* TinkerCAD.

Diagram blok pada penelitian ini digunakan sebagai gambaran rangkaian minimum. Berdasarkan **Gambar 1** diagram blok terbagi menjadi 3 bagian, yaitu bagian masukan berupa sensor *Load Cell* yang akan mengirimkan sinyal untuk kemudian diproses oleh mikrokontroler Wemos D1 R1. Hasil proses sinyal selanjutnya ditransmisikan ke empat macam keluaran, yaitu LCD 16x2 sebagai penampil nilai massa dan denda secara *real-time*, Modul LED sebagai indikator kelebihan muatan, smartphone/PC sebagai antar muka sekaligus menerima notifikasi jika terdapat kelebihan muatan, serta Google spreadsheet yang akan merekam data keluaran secara otomatis. Modul LED akan menyala sebagai bentuk respons *real-time* dari sistem. Adapun, ketiga bagian tersebut terhubung dengan sebuah catu daya.



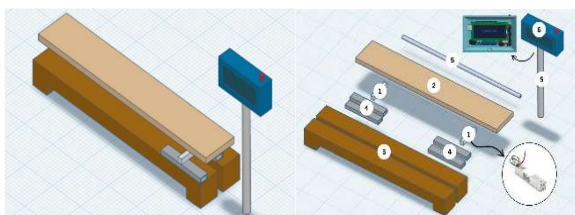
Gambar 1. Diagram blok sistem otomatisasi jembatan timbang

Selain diagram blok, diagram pengkabelan juga dirancang guna mempermudah melakukan perangkaian, perawatan, dan perbaikan suatu rangkaian kelistrikan. Diagram ini menunjukkan koneksi kelistrikan sistem secara detail dan sistematis. Diagram pengkabelan dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Diagram pengkabelan sistem otomatisasi jembatan timbang

Desain 3D prototipe sistem pada penelitian ini diperlukan untuk membantu perancangan mekanik dari sistem. Desain 3D prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang terdiri atas bagian utama jembatan timbang serta bagian penampil data dengan skala 1:36. Bagian utama jembatan timbang terdiri atas fondasi jembatan, dua buah sensor *Load Cell* yang terletak di tiap ujung fondasi, sebuah papan kayu penampang timbangan, serta balok besi yang menjadi penyangga sensor. Kemudian, pada penampil data terdiri atas pipa penyangga LCD, pelindung kabel, sebuah kotak berisi mikrokontroler dan LCD, serta modul LED. Desain prototipe jembatan timbang dapat dilihat lebih detail pada **Gambar 3**, sedangkan dimensi dari prototipe sistem jembatan timbang dapat dilihat pada **Tabel 1**.



Gambar 3. Desain 3D prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang

Tabel 1. Dimensi prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang sebagaimana tampak pada **Gambar 3**

No	Nama Bagian	Dimensi
1	Sensor <i>Load Cell</i>	75×15×14,2 mm
2	Papan kayu	60×10×0,9 cm
3	Fondasi jembatan	60×6×6 cm
4	Balok besi	14×2,5×1 cm
5	Pipa penyangga dan pelindung	Diameter 22 mm dan 10 mm Panjang 30 cm dan 50 cm
6	Kotak penampil	10×3,5×7,5 cm

Tahap Perangkaian Prototipe Sistem Otomatisasi Jembatan Timbang

Tahap perangkaian dimulai dengan menggabungkan tiap-tiap bagian perangkat keras menjadi sebuah kesatuan prototipe jembatan timbang. Kemudian, dilakukan penyusunan kode program pada *software* Arduino IDE serta dilakukan pula pengaturan tampilan antarmuka pada *dashboard website* dan aplikasi *mobile* dari Blynk. Selanjutnya, dilakukan pula pengaturan pada Google Spreadsheet agar tampilan perekaman data tampak rapi. Setelah, semua sistem berhasil dibuat, dilakukan penggabungan antara program dengan perangkat keras sistem hingga terbentuk sistem akhir berupa prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dengan sensor *Load Cell* berbasis IoT.

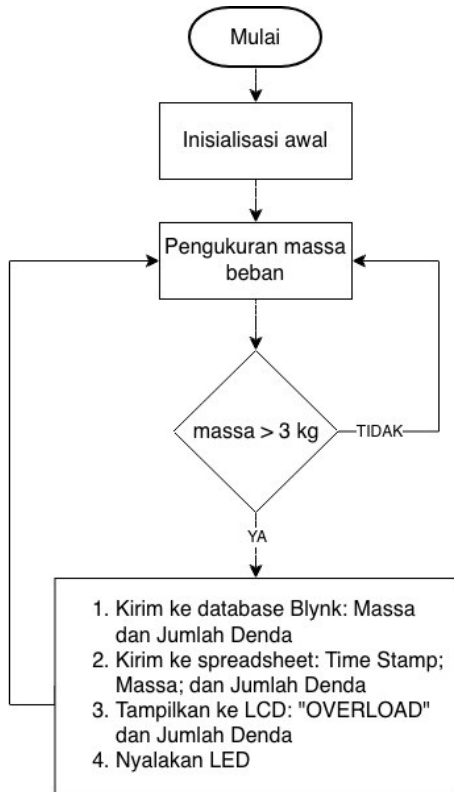
Tahap Pengujian Prototipe Sistem Otomatisasi Jembatan Timbang

Pengujian prototipe pada penelitian ini dilakukan guna mengetahui kinerja sistem yang telah dirangkai. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil penimbangan oleh sistem dengan hasil penimbangan oleh kalibrator. Pada penelitian ini dilakukan variasi sampel berupa variasi massa mulai dari 0 Kg hingga 2,5 Kg dengan interval 250 gram pada setiap penimbangan. Selain mencatat nilai massa, tahap pengujian juga mencatat lama waktu sistem merespons perubahan massa dengan menggunakan *stopwatch*.

Hasil pengujian yang telah dicatat kemudian diolah dan dialisis guna mencari karakteristik dari sistem. Adapun karakteristik yang dicari ialah berupa nilai ralat, akurasi, serta waktu respons. Besar nilai karakteristik pada sistem akan menjadi parameter untuk

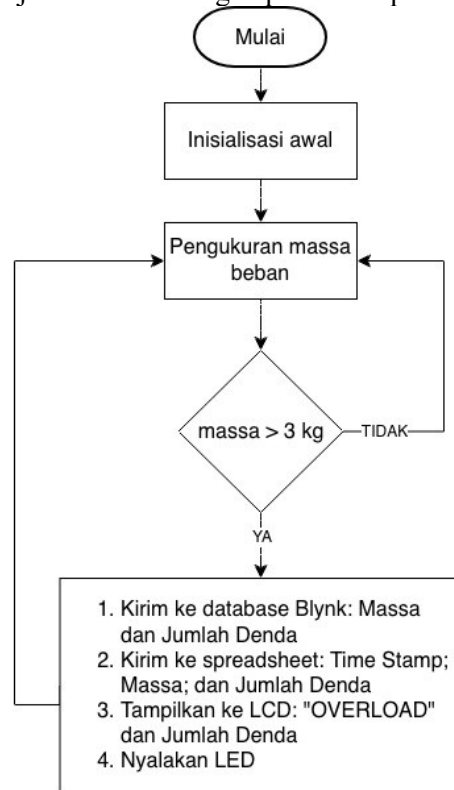
menyatakan apakah prototipe yang dirangkai telah berfungsi sesuai dengan rancangan.

Diagram Alir Sistem Otomatisasi Jembatan Timbang



Gambar 4. Diagram alir sistem otomatisasi jembatan timbang

Skema kerja dari sistem otomatisasi jembatan timbang dapat dilihat pada



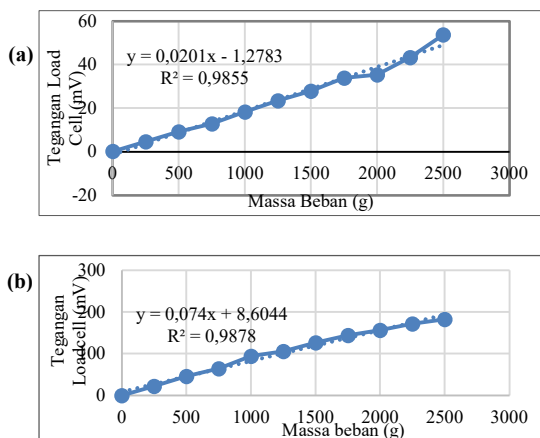
Gambar 4. Pengukuran pada sistem otomatisasi jembatan timbang akan terjadi ketika beban mengenai kedu sensor *Load Cell* yang kemudian menghasilkan perubahan tegangan (ΔV). Sinyal tersebut dikonversi oleh mikrokontroler menjadi data digital massa beban yang selanjutnya diproses untuk menentukan status beban. Apabila massa melebihi 3 Kg, sistem akan mengaktifkan LED sebagai indikator peringatan, menampilkan pesan "OVERLOAD!" beserta jumlah denda pada LCD, mengirimkan notifikasi kepada Blynk dan mentransmisikan data ke Google Spreadsheet. Sementara itu, jika massa yang terukur masih dalam rentang batas aman, LCD akan menampilkan status "Aman" beserta nilai massa dan mengirimkan data pada Blynk dan Google Spreadsheet.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Respon Sensor *Load Cell*

Uji respon sensor telah dilakukan menggunakan timbangan digital sebagai kalibrator. Hasil pengujian berupa nilai tegangan dari sensor yang dibandingkan dengan nilai massa dari timbangan digital. Hasil dari pengujian dari kedua sensor *Load Cell* dapat dilihat pada **Tabel 2**. Selanjutnya data tersebut

akan dipetakan ke dalam grafik seperti pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Grafik hasil uji respons sensor *Load Cell* (a) Sensor 1, (b) Sensor 2

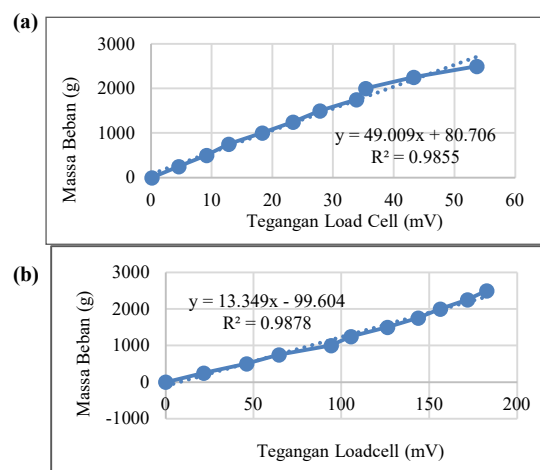
Tabel 2. Hasil uji respons sensor *Load Cell*

Sensor 1		Sensor 2	
Massa (g)	Tegangan (mV)	Massa (g)	Tegangan (mV)
0	0,13	0	0,00
250	4,55	250	21,57
500	9,13	500	46,04
750	12,82	750	64,38
1000	18,35	1000	94,22
1249	23,41	1250	105,44
1498	27,82	1500	126,20
1750	33,84	1750	143,63
2000	35,34	2000	156,24
2249	43,28	2250	171,81
2498	53,66	2500	182,59

Gambar 5 merupakan grafik regresi linier antara massa beban dan tegangan keluaran sensor. Berdasarkan pada grafik diperoleh persamaan $y = 0,0201x - 1,2783$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9855 untuk sensor pertama. Kemudian didapatkan juga persamaan $y = 0,074x + 8,6044$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9878 untuk sensor kedua.

Adapun nilai $0,0201x$ dan $0,074x$ dalam persamaan menunjukkan masing-masing sensor memiliki sensitivitas sebesar $0,0201 \text{ mV/g}$ dan $0,074 \text{ mV/g}$. Hal tersebut berarti terjadi peningkatan tegangan sebesar $0,0201 \text{ mV}$ pada sensor pertama dan $0,074 \text{ mV}$ pada sensor kedua setiap penambahan massa 1 gram. Sementara nilai $-1,2783$ dan $8,6044$ merupakan nilai bias *offset* inheren dari karakteristik sensor. Kemudian, Nilai koefisien dari kedua sensor

mengindikasikan hubungan antara massa dan keluaran tegangan sangat kuat dan dapat diprediksi dengan baik. Berdasarkan nilai sensitivitas dan nilai koefisien determinasi, kedua sensor dapat dikategorikan layak untuk digunakan. Selanjutnya agar dapat diimplementasikan ke dalam sistem diperlukan fungsi kalibrasi untuk menerjemahkan nilai tegangan dari sensor menjadi nilai massa. Maka, dilakukan pembalikan sumbu pada model regresi di **Gambar 5**, sehingga diperoleh grafik pada **Gambar 6**.



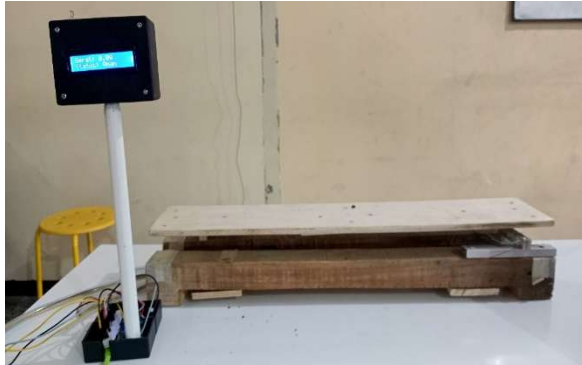
Gambar 6. Grafik fungsi kalibrasi sensor *Load Cell* (a) Sensor 1, (b) Sensor 2

Berdasarkan **Gambar 6**, diperoleh fungsi kalibrasi $y = 49,009x + 80,706$ untuk sensor pertama. Kemudian, untuk sensor kedua didapatkan fungsi kalibrasi $y = 13,349x - 99,604$, dengan y merupakan nilai massa dari timbangan digital dalam satuan gram dan x adalah hasil pengukuran sensor *Load Cell* dalam satuan milivolt. Kedua persamaan tersebut selanjutnya akan dimasukkan ke dalam program guna menerjemahkan hasil pembacaan sensor menjadi nilai massa dalam satuan gram.

A. Hasil Fisik Prototipe Sistem Otomatisasi Jembatan Timbang

Prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang telah berhasil dibuat dalam dua bagian. Bagian pertama merupakan bagian jembatan yang terdiri atas dua balok yang disusun sejajar dengan dua sensor di setiap ujung balok dengan lima buah balok besi penyangga sensor serta sebuah papan kayu sebagai penampang timbangannya. Bagian jembatan memiliki dimensi $60 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Bagian kedua adalah bagian penampil yang terdiri atas kotak penampil berdimensi $10 \text{ cm} \times 3,5 \text{ cm} \times 7,55 \text{ cm}$.

Terdapat juga pipa penyangga dengan diameter 22 mm dan panjang 30 cm, serta pipa pelindung kabel berdiameter 10 mm dengan panjang 50 cm. Hasil fisik prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Hasil fisik prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang

Hasil Uji Prototipe Sistem Otomatisasi Jembatan Timbang

Pengujian prototipe dilakukan dengan simulasi penimbangan beban yang telah dikemas dalam ukuran 250 gram kemudian diletakkan pada kendaraan uji, dalam penelitian ini kendaraan uji ialah sebuah kotak yang dimodifikasi menyerupai truk mainan. Selanjutnya kendaraan uji dilewatkan pada jembatan dan juga kalibrator secara bertahap hingga mulai dari 0 Kg hingga melebihi 3 Kg serta dilakukan pengulangan sebanyak 8 kali. Hasil dari pengujian dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil uji prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang

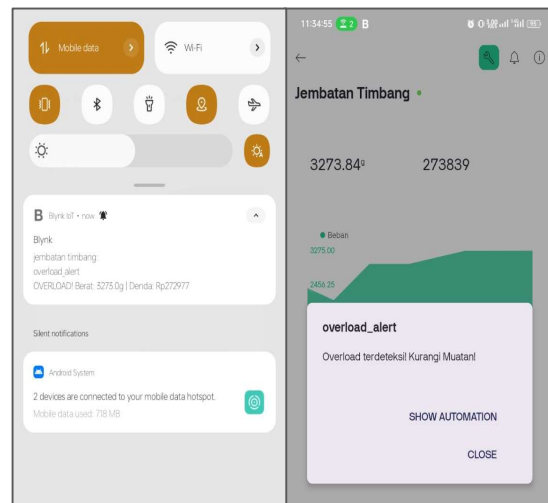
Rata-rata Timbangan Digital (gram)	Rata-rata Pembacaan Sistem (gram)	Persentase Error
0,00	0,00	0%
250,38	261,61	4%
500,75	522,76	4%
750,63	775,34	3%
999,75	1051,10	5%
1249,00	1284,45	3%
1500,25	1522,86	2%
1750,50	1796,10	3%
2000,13	2000,13	0%
2249,63	2343,31	4%
2500,75	2581,56	3%
2749,50	2776,10	1%

Selain terdapat nilai pengukuran massa dari pototipe dan kalibrator, **Tabel 3** juga memuat informasi mengenai presentase *error* untuk

setiap variasi beban yang bertujuan untuk mengevaluasi penyimpangan hasil pengukuran prototipe dengan kalibrator. Berdasarkan presentase *error* yang ditampilkan, dapat diketahui bahwa niali *error* berada dalam kisaran 0% hingga 5% dengan rata-rata sebesar 3%. Hal tersebut menandakan bahwa selisih pengukuran antara prototipe dengan kalibrator memiliki nilai *error* yang rendah, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem cukup akurat. Evaluasi kinerja sistem juga dilakukan terhadap waktu respons.

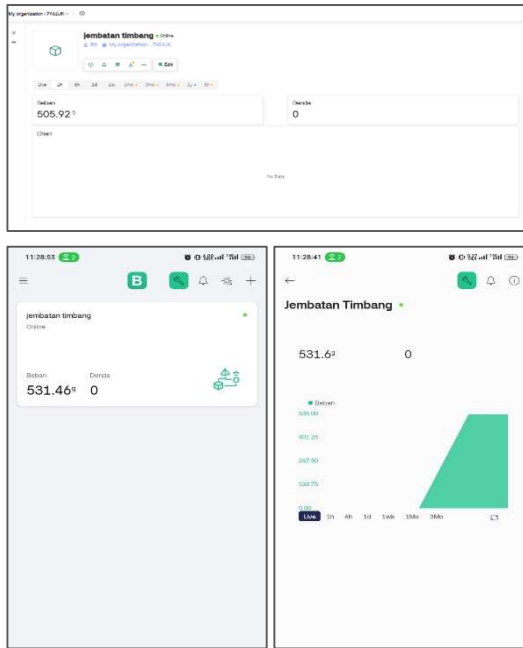
Berdasarkan perhitungan, diperoleh waktu respons sistem sebesar 0,87 sekon. Hal ini mengindikasikan bahwa prototipe jembatan yang dirancang memiliki waktu respons yang relatif cepat terhadap perubahan beban.

Pengujian juga menunjukkan keberhasilan implementasi fitur pendukung pada prototipe sistem otomatisasi. Hal ini ditandai dengan kemampuan sistem untuk terhubung secara nirkabel serta menampilkan hasil pengukuran oleh prototipe secara *real-time* melalui *dashboard website* dan aplikasi *mobile* Blynk seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Tampilan *dashboard website* dan aplikasi *mobile* Blynk IoT

Keberhasilan implementasi fitur pendukung juga ditunjukkan oleh kemampuan sistem dalam mengirimkan notifikasi secara otomatis melalui aplikasi *mobile* Blynk IoT ketika prototipe mendeteksi adanya kelebihan muatan. Notifikasi yang diterima memuat beberapa informasi, antara lain ialah, peringatan *overload*, besarnya massa beban, nominal denda yang harus dibayarkan, serta peringatan untuk melakukan pengurangan muatan. Hal tersebut ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Tampilan notifikasi pada aplikasi *mobile* Blynk IoT

Lebih lanjut, sistem juga telah berhasil melakukan perekaman data secara *real-time* pada Google Spreadsheet. Hal ini memungkinkan pemantauan data tanpa adanya intervensi dari operator. Adapun, data yang terekam pada Google Spreadsheet antara lain yaitu, hasil pengukuran dari prototipe jembatan, nominal denda apabila terjadi kelebihan muatan, serta catatan waktu. Tampilan dari Google Spreadsheet ditunjukkan pada

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		WEIGHT	FINE					
352	5/1/2025 12:24:36	0	0					
353	5/1/2025 12:24:42	0	0					
354	5/1/2025 12:24:47	0	0					
355	5/1/2025 12:24:54	0	0					
356	5/1/2025 12:25:04	6,8	0					
357	5/1/2025 12:25:11	2690,25	0					
358	5/1/2025 12:25:17	3940,73	948726					
359	5/1/2025 12:25:55	0	0					
360	5/1/2025 12:26:01	0	0					
361	5/1/2025 12:26:11	2292,87	0					
362	5/1/2025 12:26:23	2761,6	0					
363	5/1/2025 12:26:29	646,54	0					
364	5/1/2025 12:26:36	3084,93	0					
365	5/1/2025 12:26:43	3436,12	436124					
366	5/1/2025 12:26:50	2995,82	0					
367	5/1/2025 12:26:58	0	0					
368	5/1/2025 12:27:07	0	0					
369	5/1/2025 12:27:17	0	0					
370	5/1/2025 12:27:25	5,17	0					
371	5/1/2025 12:27:32	0	0					
372	5/1/2025 12:27:38	0	0					
373	5/1/2025 12:27:44	0	0					

Gambar 10. Tampilan lembar perekaman data pada Google Spreadsheet

Disamping fitur *monitoring* berbasis *cloud*, sistem juga dilengkapi dengan antarmuka lokal untuk memudahkan pengawasan di lapangan. Hasil pengukuran berhasil ditampilkan secara lokal pada modul LCD, sehingga petugas tetap dapat melakukan pemantauan nilai beban serta pelanggaran secara langsung di tempat. Indikator LED juga telah berhasil menyala secara otomatis ketika sistem mendeteksi kelebihan muatan. Hal tersebut dapat dilihat pada

Gambar 11.



(a) (b)
Gambar 11. Tampilan antarmuka lokal (a) Ketika kondisi normal, (b) Ketika terjadi kelebihan muatan

Secara keseluruhan, prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang telah berfungsi dengan baik dalam mengidentifikasi massa beban, merekam data secara otomatis, serta mengirimkan peringatan baik melalui notifikasi pada aplikasi *mobile* Blynk IoT dan indikator LED. Hasil kalibrasi menunjukkan sistem memiliki rata-rata *error* sebesar 3%, dapat dikatakan juga bahwa sistem memiliki akurasi sebesar 97% dengan waktu respons sebesar 0,87 sekon, yang mengindikasikan prototipe memiliki kinerja yang baik dan cukup akurat dibandingkan dengan penelitian sejenis [9], [10].

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian rancang bangun prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dengan sensor *Load Cell* berbasis IoT, rancang bangun prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dengan sensor *Load Cell* berbasis IoT telah berhasil dirancang dan dapat berfungsi dengan baik. Hal ini ditunjukkan oleh hasil perhitungan akurasi yang masuk ke dalam kategori baik. Prototipe sistem otomatisasi jembatan timbang dengan sensor *Load Cell* berbasis IoT memiliki akurasi sebesar 97% didasarkan oleh nilai rata-rata *error* sebesar 3%, dengan waktu respons sistem sebesar 0,87 sekon.

DAFTAR PUSTAKA

[1] T. Mulyono, *Sarana dan Prasarana Transportasi*. Sleman, Yogyakarta: Deepublish Digital, 2023.
[2] Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, *Peraturan*

- Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 05 Tahun 2018 tentang Penetapan Kelas Jalan Berdasarkan Fungsi dan Intensitas Lalu Lintas serta Daya Dukung Menerima Muatan Sumbu Terberat dan Dimensi Kendaraan Bermotor*, vol. 328, 2018. 2018, p. 12.
- [3] S. Bahri, "Identifikasi jenis dan berat kendaraan melalui jembatan timbang," *Jurnal Inersia*, vol. 2, no. 2, pp. 1–5, 2011.
- [4] A. F. Kheiralla, M. M. Abbas Eltigani, A. O. Elzaki, and M. Hamed, "Design and Development and Calibration of an On-board Weighing System for an Industrial Wheel Loader," *International Conference on Trends in Industrial and Mechanical Engineering (ICTIME'2012)*, no. July, 2012.
- [5] W. Lin and L. Huang, "Design of Port Unattended Weighbridge System Based on Internet of Things," vol. 166, no. Amcce, pp. 194–198, 2018, doi: 10.2991/amcce-18.2018.34.
- [6] P. Mandarani and A. Putra Arlis, "Perancangan Prototype Pengontrolan Jembatan Timbangan Oto Menggunakan Arduino Berbasis Web (Studi Kasus: Unit Pelaksana Penimbangan Kendaraan Bermotor (UPPKB) Lubuak Buayo Kota Padang)," pp. 152–160, 2017, doi: 10.21063/pimimd4.2017.152-xx.
- [7] M. A. Fauzi, E. U. Armin, and Nasrulloh, "Sistem Tilang Otomatis Jembatan Timbang Menggunakan Node MCU ESP8266," *Journal of Electronic and Electrical Power Application*, pp. 9–14, 2021.
- [8] H. Ananda Putra and A. Rosano, "Implementasi IOT Dalam Sistem Monitoring Kualitas Air Menggunakan Platform Blynk Dan Googlesheet," *INSANtek*, vol. 5, no. 1, pp. 15–21, May 2024, doi: 10.31294/insantek.v5i1.3209.
- [9] M. Satya Permana, T. Supriyono, and Sugiharto, "Manufacture IoT-based truck weighbridge development with real-time wireless monitoring," *Seminar Nasional Tahunan - Teknik Mesin*, vol. 23, no. 1, pp. 67–72, Mar. 2026, doi: 10.71452/rdv18x61.
- [10] M. A. Fauzi, N. Nasrulloh, and E. U. Armin, "WEIGHBRIDGE AUTOMATED SYSTEM USING ESP 8266 MCU NODE: Array," *Journal of Electronic and Electrical Power Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 8–14, Oct. 2021.

Analisis parameter kinetika neutron reaktor NuScale dengan selongsong Ti₃SiC₂ menggunakan metode Monte Carlo

Fajar Arianto*, Wahyu Budi Utomo, Rahmania Serli Assifa, Indras Marhaendrajaya

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia, 50239

*email: fajararianto@fisika.fsm.undip.ac.id

Abstrak – Selongsong bahan bakar merupakan komponen kritis dalam keselamatan reaktor nuklir. Accident Tolerant Fuel (ATF) dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan bahan bakar, salah satunya menggunakan material MAX phase Ti₃SiC₂. Penelitian ini bertujuan menganalisis parameter kinetika neutron berupa fraksi neutron tertunda efektif (β_{eff}) dan waktu pembangkitan neutron rerata (Λ) pada reaktor NuScale menggunakan Monte Carlo N-Particle 6.2 (MCNP6.2). Hasil simulasi menunjukkan bahwa Ti₃SiC₂ memiliki kekurangan pada laju penurunan β_{eff} yang lebih tajam dibandingkan M5, meskipun nilai awalnya (0,0073) sedikit lebih tinggi dari M5 (0,0069). Selain itu, Ti₃SiC₂ kurang unggul karena menghasilkan nilai Λ yang lebih kecil, sehingga membuat respons daya reaktor lebih cepat. Meski demikian, kedua material tetap memenuhi batas keselamatan reaktor termal selama 5 tahun masa operasi.

Kata Kunci: ATF, NuScale, Ti₃SiC₂, neutron tertunda, waktu pembangkitan.

Abstract – Fuel cladding is a critical component in nuclear reactor safety. Accident Tolerant Fuel (ATF) is developed to enhance fuel resilience, including the use of Ti₃SiC₂ MAX phase material. This study analyzes neutron kinetic parameters, specifically the effective delayed neutron fraction (β_{eff}) and mean neutron generation time (Λ), in the NuScale reactor using Monte Carlo N-Particle 6.2 (MCNP6.2). Simulation results indicate that Ti₃SiC₂ exhibits a disadvantage with a sharper decline in β_{eff} compared to M5, despite a slightly higher initial value (0.0073) than M5 (0.0069). Furthermore, Ti₃SiC₂ is less superior due to its smaller Λ leading to faster power responses. Nevertheless, both materials remain within thermal reactor safety limits throughout the 5-year operational period.

Key words: ATF, NuScale, Ti₃SiC₂, delayed neutron, generation time.

PENDAHULUAN

Keselamatan operasional reaktor nuklir sangat bergantung pada integritas penghalang pertama terhadap pelepasan produk fisi, yaitu selongsong bahan bakar [1]. Tragedi Fukushima Daiichi memberikan pelajaran krusial mengenai kerentanan paduan zirkonium konvensional pada reaktor jenis *Pressurized Water Reactor* (PWR) yang mengalami reaksi oksidasi eksotermik dengan uap air pada suhu ekstrem, sehingga memicu ledakan gas hidrogen [2], [3]. Sebagai langkah mitigasi, konsep *Accident Tolerant Fuel* (ATF) dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan material dan memberikan waktu koping (*coping time*) yang lebih lama bagi reaktor saat kondisi darurat [3], [4]. Salah satu inovasi mutakhir dalam implementasi ATF adalah penerapannya pada desain reaktor modular *Small Modular Reactor* (SMR) NuScale, yang merupakan reaktor berbasis PWR dengan fitur desain teras yang kompak [5], [6].

Material Ti₃SiC₂ dari kelompok *MAX phase* menjadi kandidat selongsong ATF yang unggul karena memiliki karakteristik mekanik-fisik yang andal serta ketahanan terhadap lingkungan uap suhu tinggi [2]. Selain aspek ketahanan material, pemahaman mengenai parameter kinetika neutron sangat krusial untuk menjamin stabilitas pengendalian reaktor [7]. Dalam dinamika reaktor, parameter fraksi neutron tertunda efektif (β_{eff}) menjadi faktor penentu margin keselamatan dalam pengendalian reaktivitas karena neutron tersebut memberikan waktu jeda yang memungkinkan sistem kendali mekanis bekerja [7], [8]. Selain itu, waktu pembangkitan neutron rerata (Λ) memengaruhi seberapa cepat daya reaktor merespons perubahan kondisi teras, sehingga analisis kedua parameter tersebut sangat penting dalam evaluasi karakteristik transien daya reaktor [9]. Analisis terhadap parameter kompleks tersebut memerlukan pemodelan presisi menggunakan Metode Komputasi Monte Carlo, yang merupakan algoritma statistik untuk mensimulasikan transportasi partikel

berdasarkan probabilitas interaksi nuklirnya [10], [11]. Implementasi metode tersebut dalam penelitian dilakukan melalui penggunaan kode Monte Carlo N-Particle (MCNP) versi 6.2, sebuah perangkat lunak standar yang mampu memodelkan geometri teras reaktor secara mendetail dan menghitung parameter kinetika neutron menggunakan data nuklir kontinyu [12], [13].

Meskipun berbagai studi telah mengevaluasi performa neutronik material ATF pada reaktor tipe PWR [3], [6], kajian yang secara khusus membandingkan parameter kinetika neutron terutama β_{eff} dan Λ pada desain NuScale dengan penggunaan selongsong Ti_3SiC_2 masih relatif terbatas. Selain itu, analisis perubahan parameter kinetika dalam rentang operasi jangka menengah belum banyak dibahas secara komprehensif pada model NuScale berbasis pendekatan Monte Carlo. Kondisi tersebut menunjukkan adanya celah penelitian terkait evaluasi dampak material selongsong ATF terhadap karakteristik dinamika reaktor SMR modern.

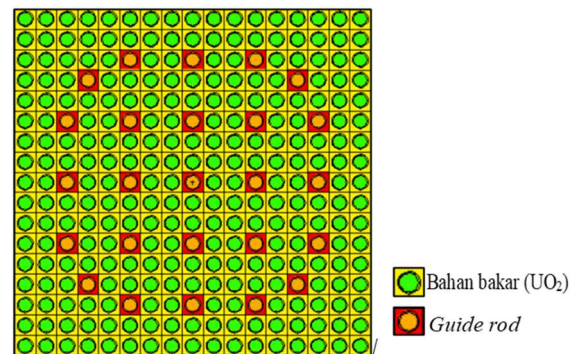
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan parameter kinetika neutron berupa fraksi neutron tertunda efektif (β_{eff}) dan waktu pembangkitan neutron rerata (Λ) antara selongsong standar M5 dan material ATF Ti_3SiC_2 pada desain reaktor NuScale menggunakan MCNP6.2. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman kuantitatif mengenai pengaruh material selongsong terhadap stabilitas kinetika reaktor serta menjadi referensi awal dalam evaluasi performa ATF pada sistem SMR di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

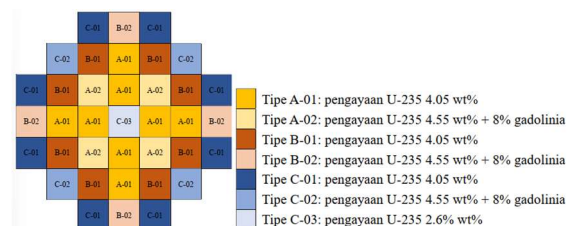
Penelitian ini dilaksanakan melalui simulasi komputasi menggunakan kode Monte Carlo N-Particle versi 6.2 (MCNP6.2) berlisensi, yang merupakan perangkat lunak standar untuk pemodelan transportasi partikel nuklir berbasis metode stokastik [12]. Simulasi dilakukan menggunakan library data nuklir kontinyu ENDF/B yang terintegrasi dalam MCNP6.2 dengan temperatur material disesuaikan terhadap kondisi operasi reaktor termal.

Tahapan penelitian diawali dengan pemodelan geometri *fuel assembly* (FA) reaktor NuScale konfigurasi 17×17 yang terdiri atas 264 pin bahan bakar dan 25 *guide tube*. Model ini

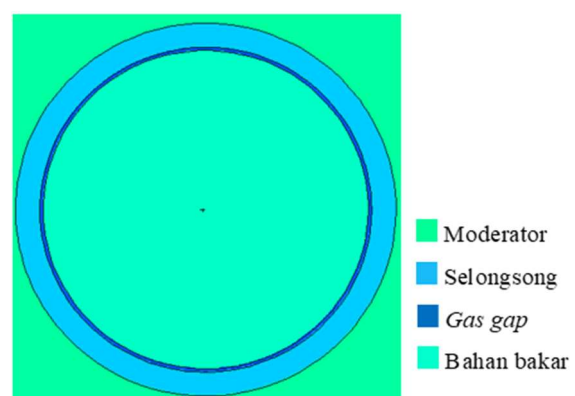
direpresentasikan sebagai satu *fuel assembly* dengan pendekatan kisi tak hingga (*infinite lattice*) menggunakan batas reflektif (*reflective boundary condition*) untuk meminimalkan efek kebocoran neutron. Validasi visual geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak VISED24E. Visualisasi pemodelan FA, konfigurasi FA dalam inti reaktor, desain bahan bakar, serta spesifikasi material ditunjukkan pada **Gambar 1**, **Gambar 2**, **Gambar 3**, dan **Tabel 1**.



Gambar 1. Model geometri *fuel assembly* reaktor NuScale 17×17 pada MCNP.



Gambar 2. Konfigurasi FA dalam inti reaktor NuScale



Gambar 3. Desain bahan bakar

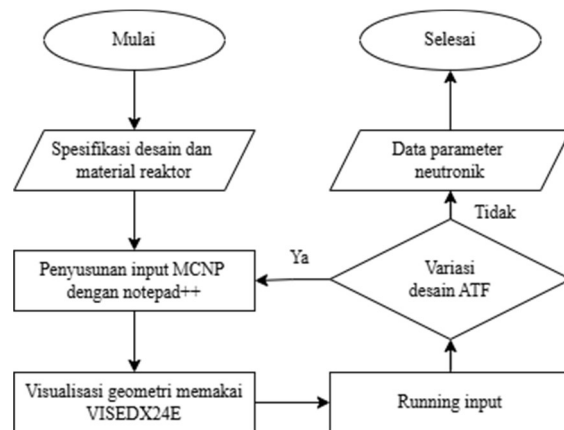
Tabel 1. Spesifikasi material

Komponen	Model 1	Model 2
Pendingin	H ₂ O	H ₂ O
Bahan bakar	UO ₂	UO ₂
<i>Burnable poison</i>	Gd ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃

Selongsong	M5	Ti ₃ SiC ₂
Gas gap	He	He
Baffle	304L SS	304L SS
Bejana	304L SS	304L SS

Spesifikasi material terdiri atas pendingin H₂O, bahan bakar UO₂ dengan *burnable poison* Gd₂O₃, gas celah helium (He), serta struktur pendukung berupa 304L stainless steel. Dua varian selongsong dianalisis, yaitu paduan zirkonium M5 sebagai model referensi dan material ATF Ti₃SiC₂ sebagai kandidat alternatif. Representasi geometri *fuel assembly* konfigurasi 17×17 pada MCNP ditunjukkan pada **Gambar 1**, yang memperlihatkan susunan 264 pin bahan bakar dan 25 *guide tube* dalam kisi persegi yang merepresentasikan satu unit FA NuScale. Distribusi tipe elemen bahan bakar di dalam inti reaktor ditampilkan pada **Gambar 2**, yang menggambarkan variasi pengayaan dan distribusi *burnable poison* dalam konfigurasi teras untuk menjaga distribusi fluks neutron tetap seragam. Sementara itu, **Gambar 3** menunjukkan penampang radial satu pin bahan bakar yang terdiri atas bahan bakar UO₂ di bagian pusat, gas celah helium, selongsong, dan moderator di bagian luar, sehingga struktur multilapis interaksi neutron dalam satu pin dapat dimodelkan secara detail dalam simulasi.

Simulasi neutronik dijalankan menggunakan kartu *kcode* dengan 25.000 partikel neutron per siklus selama 250 siklus. Dari total siklus tersebut, sejumlah siklus awal ditetapkan sebagai *inactive cycles* untuk mencapai kondisi konvergen sumber neutron, sedangkan sisanya digunakan sebagai *active cycles* untuk pengambilan data statistik. Kriteria konvergensi ditentukan berdasarkan kestabilan nilai *K_{eff}* dan penurunan deviasi standar hingga berada dalam batas ketelitian statistik yang dapat diterima [14]. Alur kerja sistematis dalam simulasi ini, mulai dari input data hingga ekstraksi hasil, ditunjukkan secara mendalam pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Diagram alir prosedur penelitian simulasi neutronik menggunakan MCNP6.2.

Gambar 4 menunjukkan diagram alir prosedur simulasi neutronik menggunakan MCNP6.2. Penelitian diawali dengan penentuan spesifikasi desain dan material reaktor, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan berkas input MCNP yang mencakup definisi geometri, material, dan parameter perhitungan *kcode*. Model yang telah dibuat diverifikasi secara visual menggunakan VISED X24E untuk memastikan konsistensi geometri sebelum simulasi dijalankan. Proses *running* menghasilkan keluaran parameter neutronik yang selanjutnya dianalisis untuk membandingkan respons sistem terhadap variasi material selongsong. Parameter utama yang diekstraksi dari hasil simulasi adalah besaran kinetika neutron yang merepresentasikan karakteristik dinamika reaktor.

Data yang menjadi fokus utama dalam analisis ini adalah parameter kinetika neutron yang meliputi fraksi neutron tertunda efektif (*β_{eff}*) dan waktu pembangkitan neutron rerata (*Λ*). Dalam simulasi MCNP, nilai *β_{eff}* ditentukan berdasarkan perbandingan antara populasi neutron tertunda dengan total neutron yang berkontribusi pada reaksi fisi berikutnya, yang secara matematis dinyatakan pada Persamaan berikut:

$$\beta_{eff} = \beta \frac{K_d}{K} \tag{1}$$

Persamaan tersebut dikenal sebagai metode Spriggs, yaitu salah satu pendekatan dalam perhitungan fraksi neutron tertunda efektif menggunakan metode Monte Carlo. Pada pendekatan ini, nilai fraksi neutron tertunda efektif diperoleh melalui perbandingan antara faktor multiplikasi neutron yang hanya mempertimbangkan neutron tertunda (*K_d*) dan faktor multiplikasi neutron (*K*) [8]. Sementara

itu, waktu pembangkitan neutron rerata (Λ) didefinisikan sebagai waktu rata-rata yang diperlukan neutron sejak dilahirkan hingga menghasilkan neutron generasi berikutnya melalui reaksi fisi [16]. Secara umum, parameter ini dapat dinyatakan sebagai:

$$\Lambda = \frac{l}{K_{eff}} \quad (2)$$

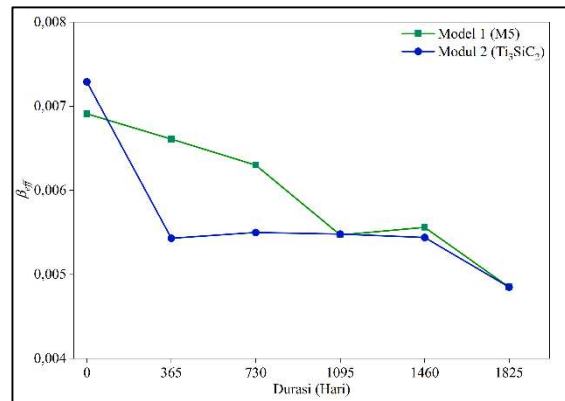
dengan l adalah *neutron lifetime* dan K_{eff} adalah faktor multiplikasi efektif sistem [17]. Nilai neutron lifetime diperoleh dari estimasi parameter kinetika yang tersedia pada output MCNP, yang merepresentasikan waktu rata-rata perjalanan neutron sebelum terjadinya interaksi yang menghasilkan fisi baru.

Evaluasi parameter kinetika dilakukan dalam interval tahunan hingga lima tahun masa operasi untuk mengamati perubahan karakteristik dinamika neutronik sistem. Setiap interval dianalisis secara terpisah dengan konfigurasi model yang konsisten untuk membandingkan tren perubahan parameter β_{eff} dan Λ antara selongsong M5 dan Ti_3SiC_2 . Seluruh data keluaran simulasi kemudian diolah menggunakan perangkat lunak OriginLab untuk menghasilkan grafik perbandingan yang representatif. Analisis difokuskan pada evaluasi pengaruh material selongsong terhadap karakteristik kinetika reaktor, karena parameter β_{eff} dan Λ berperan penting dalam menentukan respons daya terhadap gangguan reaktivitas dan margin kendali sistem [9], [15].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Fraksi Neutron Tertunda Efektif (β_{eff})

Fraksi neutron tertunda efektif (β_{eff}) menggambarkan proporsi neutron tertunda terhadap total populasi neutron di dalam teras reaktor. Neutron tertunda memiliki waktu hidup yang jauh lebih panjang dibandingkan neutron prompt, sehingga keberadaannya berperan penting dalam memperlambat laju perubahan populasi neutron akibat gangguan reaktivitas dan menjaga kestabilan kendali daya reaktor. Dalam penelitian ini, perhitungan nilai β_{eff} dilakukan selama lima tahun masa operasi reaktor dengan interval satu tahun untuk mengevaluasi perubahan karakteristik kinetika seiring perubahan kondisi neutronik sistem, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Grafik fraksi neutron tertunda reaktor NuScale dengan selongsong M5 dan Ti_3SiC_2 selama 5 tahun masa operasi.

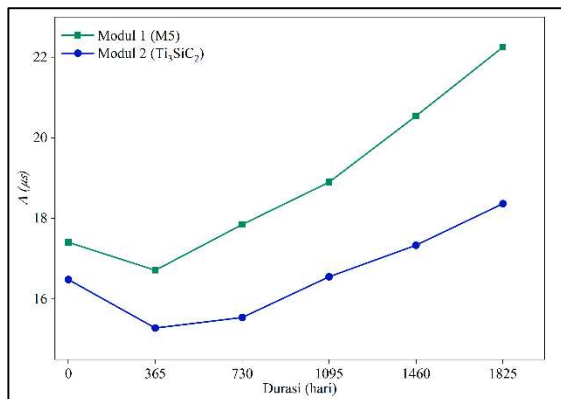
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada awal operasi (*Beginning of Cycle*), kedua model selongsong memiliki nilai β_{eff} yang relatif tinggi. Selongsong M5 menunjukkan nilai β_{eff} sekitar 0,0069, sedangkan selongsong Ti_3SiC_2 memiliki nilai yang sedikit lebih tinggi, yaitu sekitar 0,0073. Nilai tersebut masih berada dalam kisaran tipikal reaktor termal pada fase awal operasi (0,0065-0,0075)[15], sehingga sistem kendali reaktor masih mampu mempertahankan stabilitas reaktivitas secara efektif. Nilai β_{eff} awal yang sedikit lebih tinggi pada Ti_3SiC_2 dipengaruhi oleh karakteristik neutronik unsur penyusunnya, khususnya karbon (C) dan silikon (Si), yang memiliki tampang lintang serapan neutron termal relatif rendah dibandingkan unsur penyusun paduan zirkonium tertentu [2]. Kondisi tersebut menyebabkan probabilitas absorpsi neutron non-fisi menjadi lebih kecil, sehingga lebih banyak neutron tertunda tetap berkontribusi pada proses fisi berikutnya [2].

Seiring bertambahnya waktu operasi, nilai β_{eff} pada kedua model cenderung menurun hingga mendekati 0,0048 pada akhir tahun kelima. Penurunan ini berkaitan dengan perubahan karakteristik spektrum neutron di dalam teras, di mana meningkatnya keberadaan nuklida penyerap neutron menyebabkan sebagian neutron termasuk neutron tertunda lebih banyak terserap tanpa berkontribusi pada reaksi fisi berikutnya. Dari sisi material, perbedaan komposisi unsur antara M5 yang didominasi zirkonium dan Ti_3SiC_2 yang mengandung titanium serta silikon memengaruhi penampang serap neutron dan distribusi spektrum termal. Kontribusi absorpsi tambahan pada Ti_3SiC_2 berpotensi memodifikasi keseimbangan neutron sehingga laju penurunan β_{eff} pada model ini terlihat lebih tajam

dibandingkan M5. Meskipun demikian, nilai kedua model tetap berada pada rentang karakteristik reaktor termal dan tidak menunjukkan kecenderungan menuju kondisi *prompt critical*, sehingga secara kinetika sistem masih berada dalam batas operasi yang dapat dikendalikan.

Analisis Waktu Pembangkitan Neutron Rerata (Λ)

Waktu pembangkitan neutron rerata (Λ) adalah rata-rata waktu yang diperlukan satu generasi neutron untuk menghasilkan generasi berikutnya melalui proses fisi. Parameter Λ merepresentasikan rata-rata waktu yang dibutuhkan sejak neutron dilahirkan hingga menghasilkan neutron baru. Hasil perhitungan nilai Λ selama lima tahun masa operasi disajikan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Grafik waktu pembangkitan neutron rerata reaktor NuScale dengan selongsong M5 dan Ti_3SiC_2 selama 5 tahun masa operasi.

Berdasarkan **Gambar 6**, terlihat bahwa pada tahap awal operasi terjadi penurunan nilai Λ pada kedua model selongsong. Kondisi ini berkaitan dengan efektivitas moderator yang masih tinggi pada fase *startup*, sehingga proses termalisasi neutron berlangsung optimal dan mempercepat pembentukan generasi neutron berikutnya. Namun, seiring bertambahnya waktu operasi, nilai Λ pada kedua model menunjukkan kecenderungan meningkat. Peningkatan ini disebabkan oleh akumulasi produk fisi yang bersifat penyerap neutron, sehingga peluang neutron untuk berinteraksi dengan material fisil berkurang dan memperlambat proses pembentukan generasi neutron berikutnya.

Secara umum, reaktor termal memiliki nilai Λ dalam kisaran 10^{-5} hingga 10^{-4} detik [17]. Hasil simulasi menunjukkan kedua model selongsong masih berada dalam rentang tersebut

selama lima tahun operasi. Namun demikian, selongsong Ti_3SiC_2 menghasilkan nilai Λ yang lebih rendah, yang mengindikasikan respons daya reaktor yang lebih cepat dan sensitif dibandingkan selongsong M5. Karakteristik ini dinilai kurang unggul dari sisi stabilitas pengendalian reaktivitas.

KESIMPULAN

Berdasarkan parameter kinetika, selongsong Ti_3SiC_2 memiliki kekurangan berupa laju penurunan fraksi neutron tertunda efektif (β_{eff}) yang lebih tajam seiring bertambahnya *burnup*, meskipun nilai awalnya (0,0073) sedikit lebih tinggi dibanding M5 (0,0069). Selain itu, Ti_3SiC_2 juga kurang unggul karena menghasilkan waktu pembangkitan neutron rerata (Λ) yang secara konsisten lebih kecil dibandingkan M5, sehingga membuat respons daya reaktor menjadi lebih cepat dan kurang konservatif. Meski demikian, kedua material tetap dinyatakan aman digunakan pada reaktor NuScale karena seluruh parameter kinetika yang dihasilkan masih berada dalam rentang standar keselamatan reaktor termal selama lima tahun masa operasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Laboratorium Fisika Komputasi Universitas Diponegoro atas dukungan fasilitas komputasi yang diberikan selama penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada berbagai pihak yang telah memberikan bantuan dan kontribusi sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. S. Assifa, "Analisis Neutronik Accident Tolerant Fuel (ATF) dengan Selongsong Al_2O_3 terlapis SiC di Pressurized Water Reactor (PWR) menggunakan Metode Monte Carlo," Skripsi, Departemen Fisika, Universitas Diponegoro, Semarang, 2024.
- [2] B. Qiu, J. Wang, Y. Deng, M. Wang, dan S. Qiu, "A review on thermohydraulic and mechanical-physical properties of SiC , $FeCrAl$ and Ti_3SiC_2 for ATF cladding," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 1, hlm. 1–13, 2020.
- [3] S. Ramezani dan M. Aghaie, "Neutronic

- and Thermal hydraulic evaluation of accident tolerant cladding materials in a WWER1000,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 161, 2023.
- [4] T. Cheng, J. Keiser, M. Brady, K. Terrani, dan B. Pint, “Oxidation of fuel cladding candidate materials in steam environments at high temperature and pressure,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 427, no. 1–3, hlm. 396–400, 2012.
- [5] E. Fridman, Y. Bilodid, dan V. Valtavirta, “Definition of the neutronics benchmark of the NuScale-like core,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 55, no. 10, hlm. 3639–3647, 2023.
- [6] S. Pino-Medina dan J. L. François, “Neutronic analysis of the NuScale core using accident tolerant fuels with different coating materials,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 377, 2021.
- [7] P. Mohanakrishnan, O. P. Singh, dan K. Umasankari, *Physics of Nuclear Reactor*, Ed. ke-1. London: Academic Press, 2021.
- [8] Zuhair, Suwoto, T. Setiadipura, dan J. C. Kujiper, “Study on the Characteristics of Effective Delayed Neutron Fraction (β_{eff}) for Pebble-Bed Reactor with Plutonium Fuel,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, vol. 43, no. 6, hlm. 3037–3045, 2019.
- [9] T. W. Kerlin dan B. R. Upadhyaya, *Dynamics and Control of Nuclear Reactors*, Ed. ke-1. London: Academic Press, 2019.
- [10] F. Arianto, Z. Su’Ud, dan Zuhair, “Study on neutronic of very small Pb - Bi cooled no-on-site refueling nuclear power reactor (VSPINNOR),” dalam *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., hlm. 75–79, 2014.
- [11] N. Alanazi, R. Aljeraiwi, M. Almutairi, dan A. N. Alodhayb, “A survey on recent progress on Monte Carlo simulation methods in radiation detection,” *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 19, 102146, 2026.
- [12] J. S. Hendricks, M. T. Swinhoe, dan A. Favalli, *Monte Carlo N-Particle Simulations for Nuclear Detection and Safeguards An Examples-Based Guide for Students and Practitioners*, 2022.
- [13] S. Panizo dan F. Álvarez-Velarde, “Evaluation of the impact of the nuclear data library cinder.dat in MCNP burn-up calculations,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 155, 2023.
- [14] S. Shet, K. D. Singh, S. Anand, dan K. V. Subbaiah, “MCKeff: An Indigenous Monte Carlo Code for estimation of Neutron Multiplication factor of Fissile Systems,” *Journal of Information and Computational Science*, vol. 12, no. 4, hlm. 931–939, 2022.
- [15] W. Zwermann, N. Berner, A. Aures, dan K. Velkov, “Sensitivities of delayed neutron fractions in the framework of SCALE 6.2,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 153, 2021.
- [16] L. Taghizadeh, A. Zolfaghari, M. Zangian, J. Mokhtari, dan Y. Sardjono, “Comparison of probabilistic and deterministic methods for calculation of kinetic parameters of HWZPR,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 165, 2022.
- [17] G. Wakabayashi, T. Yamada, T. Endo, dan C. H. Pyeon, *Introduction to Nuclear Reactor Experiments*. Springer Nature Singapore, 2023.

Design of a smart automated switching multi-channel, multi configurations resistivity meter

Fuad Abdulloh, Hartono, R. Farzand Abdullatif*, Abdullah Nur Aziz

Physics Study Program, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Jenderal Soedirman University

61 Dr. Soeparno Utara Street, Purwokerto

*email: farzand@unsoed.ac.id

Abstract – The resistivity method uses a resistivity meter to measure subsurface resistivity by measuring voltage and current. Conventional data acquisition involves manual electrode movement, which is time-consuming and error-prone. This research developed a multi-channel smart resistivity meter based on Internet of Things (IoT) technology with automatic electrode switching and automated measurements for Schlumberger, Wenner, and Dipole-dipole configurations. The automatic switching system uses relays controlled by an ESP32 master controller. The measurement system employs shunt resistor-based current sensors and voltage divider-based voltage sensors, integrated with Arduino Uno microcontrollers and ESP32 master. Data is automatically stored in cloud storage and controlled via mobile application. Testing results show 3% voltage and 2% current reading errors, with 92% voltage and 96% current precision within 0-100V and 0-100mA ranges. The system successfully performs automatic switching and uploads real-time data every 5 seconds, significantly improving geoelectrical data acquisition efficiency.

Keywords: Smart resistivity meter, IoT, electrode switching, cloud storage, geoelectric.

INTRODUCTION

The geoelectric observation method in geophysics utilizes instruments such as resistivity meters to measure the resistivity value of an area. The resistivity data is then processed through inversion to produce one- to three-dimensional cross-sections of the surveyed subsurface area. The results of the inversion in the form of these models can be utilized for various geophysical exploration purposes [1].

Resistivity meters generally work using four main electrodes with different functions. Two electrodes function to form a current path at a certain distance, while the other two electrodes act as electrical potential meters. The data acquisition process is carried out by moving the electrodes according to the configuration used for each measurement. The operator records the data obtained manually from the beginning to the end of the survey. Commonly used electrode configurations include Schlumberger, Wenner, *Dipole-dipole*, or a combination of several of these configurations [2].

Several studies have been conducted to improve the efficiency of the geoelectric data acquisition process, such as integrating a resistivity meter with an Arduino MEGA microcontroller and a simple GUI, and

designing a multi-channel resistivity meter with 16 electrodes specifically for Schlumberger configuration [3][4]. With the development of technologies such as the Internet of Things (IoT) and cloud computing, opportunities for developing existing geophysical tools have opened up. This technology can bridge the gap to overcome various shortcomings and improve the functionality of geophysical instruments. Automation and the use of cloud storage systems can significantly improve the efficiency of the data acquisition process. The integration of this modern technology enables the development of more sophisticated and user-friendly instruments [5][6].

This study aims to develop a multi-channel smart resistivity meter system and conduct limited testing of the developed system. The resulting system design is expected to be implemented as an IoT-based resistivity meter capable of operating in Schlumberger, Wenner, and Dipole-Dipole configurations. The design selection and limited testing were conducted to reduce costs without compromising the research objectives. The optimization and implementation of new features are expected to make the data acquisition process more efficient.

RESEARCH METHODOLOGY

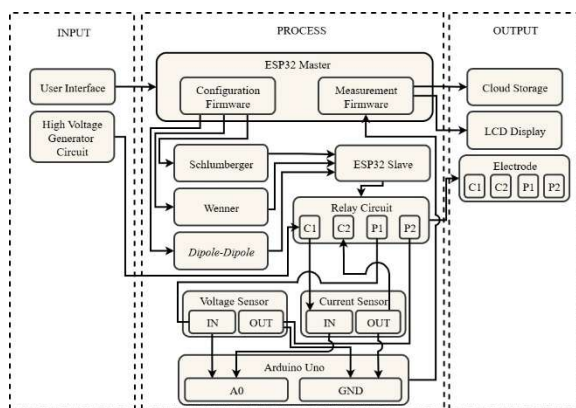
This work utilizes research and development approach implemented through system hardware design, system firmware design, system prototype development, and limited testing of a multi-channel smart resistivity meter system with eight electrodes.

Multi-Channel Smart Resistivity Meter System Design Stage

The design of this system began with the integration of several microcontroller modules to perform different functions. **Figure 1** is a block diagram visualization of the system to be created. This diagram shows a distributed control structure that divides the system into three main parts: input, process, and output. Each part illustrates the workflow and communication between components within the system.

In the input section, the system receives commands from the user interface (mobile application) and high voltage supply from the generator circuit. The commands are then processed by the ESP32 master and forwarded to control the electrode function in the relay circuit via the ESP32 slave. High voltage from the generator circuit input is supplied to the relay circuit as the system's high voltage source. Measurement is performed by Arduino uno by receiving signals from voltage and current sensors system. The data generated by Arduino uno is then forwarded to the ESP32 master. The results of this processing are then channeled to the output section, namely to the LCD screen for local display and to cloud storage for real-time data storage.

The ESP32 Master is the main microcontroller that functions as the brain of the system and is responsible for the main communication with the user interface application, data processing, and data transmission to Google Sheets-based cloud storage. Arduino Uno is the main microcontroller in the multi-channel smart resistivity meter measurement system. The Arduino Uno communicates serially with the ESP32 Master to send data acquired through communication with current and voltage sensors. The ESP32 Slave receives command from the ESP32 Master to control the relay circuit. The output of the relay circuit is set to follow the predetermined digital output of the microcontroller so that it can automatically switch electrodes according to the configuration selected by the user (Schlumberger, Wenner, or Dipole-Dipole).



Gambar 1. Block diagram of a multi-channel smart resistivity meter system

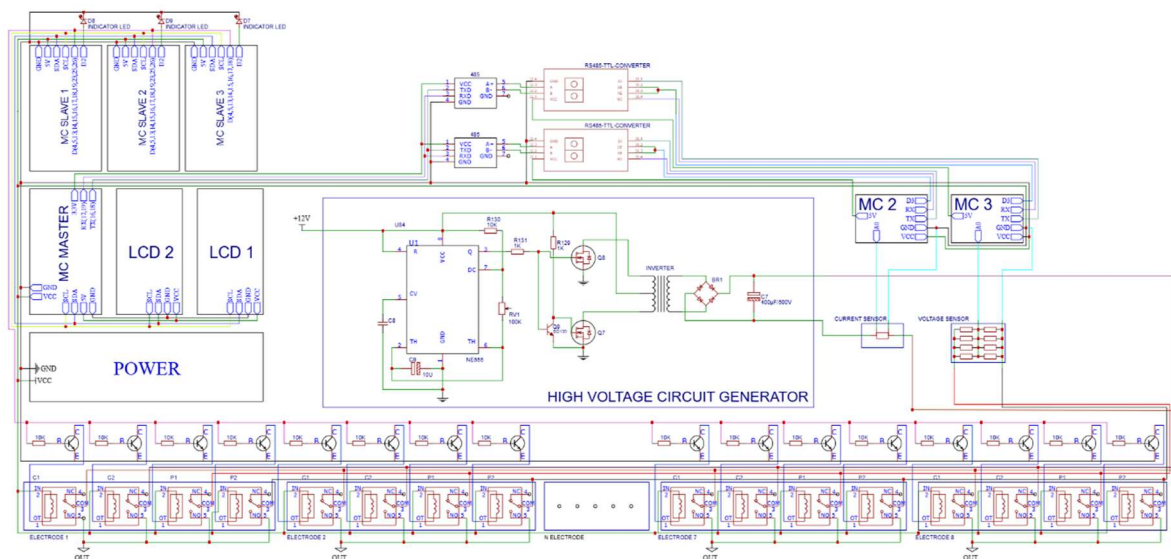


Figure 2. Schematic of a multi-channel smart resistivity meter system

Figure 2 shows the wiring diagram that implements microcontroller-based electrode control for the smart resistivity meter system. The system consists of three slave microcontroller units (MC SLAVE 1, 2, and 3) equipped with LED indicators for monitoring operational status, as well as one main microcontroller unit (MC MASTER) that functions as the system controller. The power supply circuit uses an inverter with a step-up transformer and rectifier bridge to generate the high voltage required by the electrodes, while communication between modules is carried out via an RS485-TTL converter to ensure stable data transmission. The physical monitoring system consists of an LCD display for the user interface, a separate power unit, and integrated current and voltage sensors for real-time monitoring of operational parameters. Each electrode has 4 main functions (C1, C2, P1, P2) with each PIN on the electrode equipped with a transistor driver and protection system, allowing independent control of each electrode to work optimally.

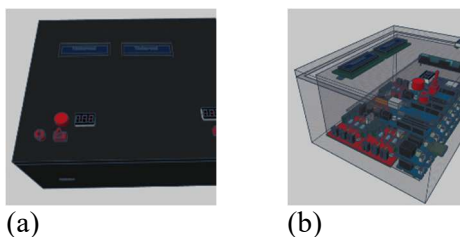
**Figure 3.** 3D design of multi-channel smart resistivity meter

Figure 3 shows a 3D design of a smart resistivity meter that displays the physical implementation of the electrode control system that has been designed. The external part consists of black housing equipped with two LCD displays on the top panel for real-time monitoring of operational parameters. Meanwhile, the front panel contains communication ports for connectivity with electrode cables. The internal visualization shows the layout of the components, where the main PCB contains a microcontroller circuit and electrode drivers arranged in a layered configuration to optimize space usage.

Software Design Stage (Firmware) for Multi-Channel Smart Resistivity Meter System

The firmware embedded in the microcontroller has three main functions, namely control logic,

data acquisition, and data communication. The control logic program contains the implementation of algorithms to switch the function of each electrode according to the Schlumberger, Wenner, and *Dipole-Dipole* configuration schemes. The data acquisition program contains programs for reading data from sensors, processing it, and performing calibrations to address any detected discrepancies. The data communication program manages data transmission from each microcontroller used locally and transmission to the associated cloud system via an internet connection. The data sent includes current and voltage values, as well as time and measurement configuration information.

Prototype Development Stage of the Multi-Channel Smart Resistivity Meter System

This stage focuses on assembling electronic and mechanical components. The main components used include Microcontroller Module: Consisting of ESP32 Master, ESP32 Slave, and Arduino Uno. A Current Sensor designed based on a shunt resistor to measure the current injected into the test medium. A Voltage Sensor designed based on a voltage divider circuit to measure the potential between the potential electrodes. An Electrode Switching System using a Relay Module controlled by the ESP32 Slave for electrode configuration automation. A User Interface built using a mobile application based on MIT App Inventor. This application connects to the ESP32 Master via a wireless (Wi-Fi) connection to send commands and display the device status. Local Display Using two 16x2 LCDs to display real-time current and voltage measurement results to users in the field.

Multi-Channel Smart Resistivity Meter System Testing Stage

A series of limited tests were conducted to validate the system's performance. First, a sensor test was conducted to test the accuracy of the current and voltage sensors to ensure accurate readings. Then, a functional test was conducted to test whether the system was able to switch electrodes correctly according to the selected configuration. Next, a Connection Test was conducted to ensure smooth communication between the mobile application, microcontroller, and cloud storage. Then, an Analysis of the

Results from the limited testing was conducted to determine the error and precision values of the device.

Multi-Channel Smart Resistivity Meter System Flowchart

The system begins with an initialization process that includes setting up WiFi connections and serial communication between microcontrollers. After successful initialization, the system waits for configuration input from the user via a mobile application. When the user selects a measurement configuration (Schlumberger, Wenner, or *Dipole-Dipole*), the ESP32 Master sends a command to the ESP32 Slave. The ESP32 Slave then executes the program to switch the electrodes according to the selected configuration pattern.

RESULTS AND DISCUSSION

The prototype multi-channel smart resistivity meter was successfully assembled and integrated into a single system, as shown in **Figure 4**. The system consists of several main modules, including ESP32 Master and Slave, Arduino Uno, a relay circuit for electrode switching, current and voltage sensors, and communication modules that are interconnected to form a distributed architecture. After assembly was complete, a series of limited tests were conducted to determine the performance of each component and the overall functionality of the system.

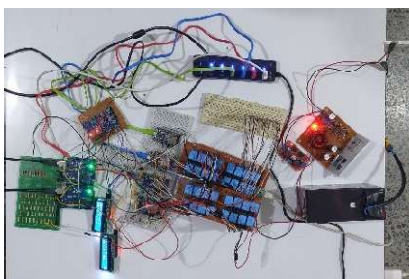


Figure 4. Results of assembling a prototype multi-channel smart resistivity meter system

The output voltage of the smart resistivity meter system is 100 V with an error of ± 0.2 V, as shown in the measurement results in **Figure 5**. Measurements were taken with a multimeter to verify that the voltage produced was in accordance with the design specifications. The test results confirmed that the system could produce a relatively stable output voltage at the desired level with a good level of accuracy.



Figure 5. Smart resistivity meter system voltage output testing

Current Sensor And Voltage Sensor Testing

The current sensor has a total resistance of approximately 1.1Ω with a combined power rating of 5 watts. The microcontroller ADC uses a 1.1 volt voltage reference (V_{ref}) to increase the resolution of the sensor readings. The current sensor was tested by varying the current input randomly at intervals of 0-100 mA and recording the resulting voltage response. The calibration function obtained was $y = 1.0004x + 0.0194$ with an average relative error of 0% and an average absolute error of -0.00018. Sensor testing data was obtained using several random samples in the range of 0-100 mA measured using the MMD Sanwa CD800a. The test results graph is shown in **Figure 6** below.

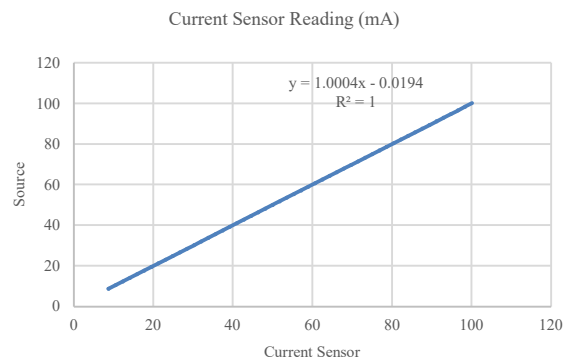


Figure 6. Current sensor test chart

Then, the voltage sensor was designed using a voltage divider circuit with a ratio of 20:1. The resistance values used were R_1 of 190.9 k Ω and R_2 of 9.99 k Ω , resulting in a mathematical ratio of 20.10910911:1. The microcontroller ADC was tested with a voltage reference (V_{ref}) of 5 V to maximize the reading range. From several samples of reading data compared with the Sanwa CD800a MMD at intervals of 0-100V, a calibration function of $y = 1.0003x + 0.0122$ was obtained. **Figure 7** is a graph of the final sensor test results showing an

average absolute error of -0.001166667 and an average relative error of 0%.

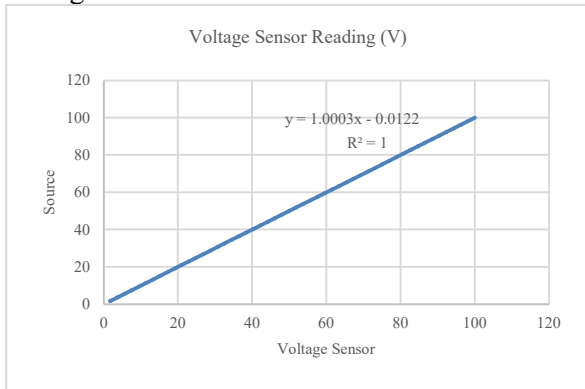


Figure 7. Voltage sensor test chart

After separate testing of each sensor, the sensors were assembled into the smart resistivity meter system and tested again. The results of observations of the response of the multi-channel smart resistivity meter measurement system are shown in **Figure 8(a)** for current readings and **Figure 8(b)** for voltage readings. The comparison graph between the smart resistivity meter readings and the MMD Sanwa CD800a readings shows a regression coefficient value close to one.

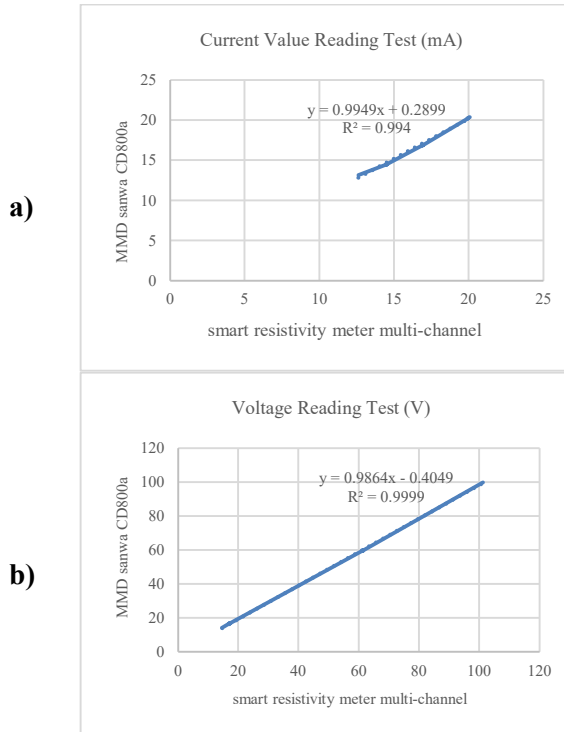


Figure 8. Results of testing the smart resistivity meter measurement system

The results obtained were an average relative error of 3% for current measurements

and 2% for voltage measurements from the multi-channel smart resistivity meter reading system. Based on the observation data, the average absolute error value for the current sensor was 0.2 mA, while for the voltage sensor it was 0.99 V. The precision level of the voltage measurement system was obtained at 92%, based on sample data at a voltage value of around 14.6 V. Meanwhile, the precision of the current measurement system was obtained at 96% based on sample data at a current value of around 14.5 mA.

Electrode Switching Relay Firmware Testing

The program for electrode switching configuration was tested by observing the LED lights arranged in such a way as to represent each electrode in the switching process. The color of each LED was differentiated to visually indicate the working condition of the electrode. The green color on the left side of the electrode segment indicates the function as C1, while the green color on the right side indicates the function as C2. The red color is used to indicate the electrode that functions as P1, and the yellow color for the electrode that functions as P2. The LED circuit used to test the electrode configuration program logic is shown in **Figure 9**.

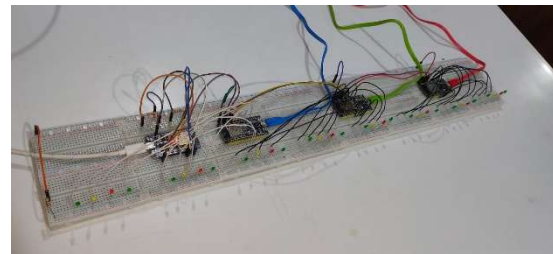


Figure 9. Smart resistivity meter logic test board

The system's operational logic was tested by connecting the microcontroller circuit to a test board, then uploading the logic program for each electrode configuration to the microcontroller to be executed according to the designed sequence. In the Schlumberger configuration, the test produced three observation data points indicating that the program ran as expected, where the electrode working logic sequence was displayed visually through LED indicators as shown in **Figure 10(a)**. Next, the Wenner configuration test was carried out by changing the program running on the microcontroller in accordance with the

Wenner configuration logic, which produced seven observation data and showed that the system functioned properly in accordance with the sequence shown in **Figure 10(b)**. Meanwhile, the Dipole-Dipole configuration test

successfully produced five observation data confirming that the program ran as expected, with the electrode working logic sequence observable through the LED light pattern as shown in **Figure 10(c)**.

Stage n	Electrode 1	Electrode 2	Electrode 3	Electrode 4	Electrode 5	Electrode 6	Electrode 7	Electrode 8
1	not lit	not lit	C1	P1	P2	C2	not lit	not lit
2	not lit	C1	not lit	P1	P2	not lit	C2	not lit
3	C1	not lit	not lit	P1	P2	not lit	not lit	C2

Stage n	Electrode 1	Electrode 2	Electrode 3	Electrode 4	Electrode 5	Electrode 6	Electrode 7	Electrode 8
1	C1	P1	P2	C2	not lit	not lit	not lit	Mati
2	not lit	C1	P1	P2	C2	not lit	not lit	not lit
3	not lit	not lit	C1	P1	P2	C2	not lit	not lit
4	not lit	not lit	not lit	C1	P1	P2	C2	not lit
5	not lit	not lit	not lit	not lit	C1	P1	P2	C2
6	C1	not lit	P1	not lit	P2	not lit	C2	not lit
7	not lit	C1	not lit	P1	not lit	P2	not lit	C2

Stage n	Electrode 1	Electrode 2	Electrode 3	Electrode 4	Electrode 5	Electrode 6	Electrode 7	Electrode 8
1	C1	C2	P1	P2	not lit	not lit	not lit	not lit
2	C1	C2	not lit	P1	P2	not lit	not lit	not lit
3	C1	C2	not lit	not lit	P1	P2	not lit	not lit
4	C1	C2	not lit	not lit	not lit	P1	P2	not lit
5	C1	C2	not lit	not lit	not lit	not lit	P1	P2

Figure 4. Results of testing the working logic of the smart resistivity meter

Testing the Connectivity of the Mobile Interface and Cloud System with the Multi-Channel Smart Resistivity Meter System

Figure 11 shows the mobile application interface that functions as a control system for multi-channel smart resistivity meter devices. This application is designed to connect mobile devices to physical instruments through the Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) connection feature based on MIT APP Inventor in client-server mode. The main function of this application is to provide various options for configuring the main geophysical measurements, namely Wenner, Schlumberger, and *Dipole-Dipole*, as well as system status checking and testing of all configurations.

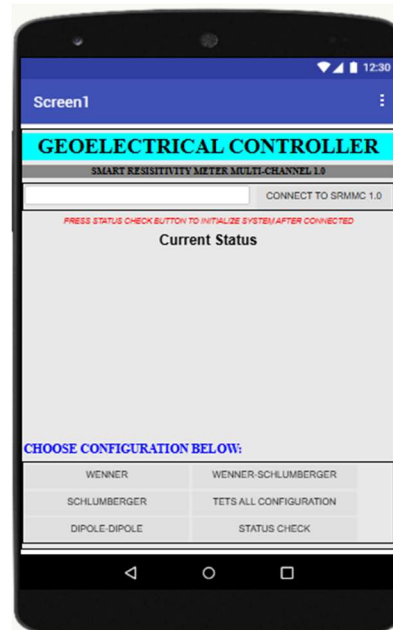


Figure 5. Mobile-interface smart resistivity meter

Testing the selection of each configuration using the buttons available on the interface application shows that the application works well. When the Schlumberger configuration button is selected, the system will run the Schlumberger configuration until the measurement process is complete. The same

applies to the Wenner, *Dipole-Dipole* configuration buttons, as well as the Status Check and test all configuration features. **Figure 12** below shows one of the testing processes in a series of interface application function tests on a multi-channel smart resistivity meter system.

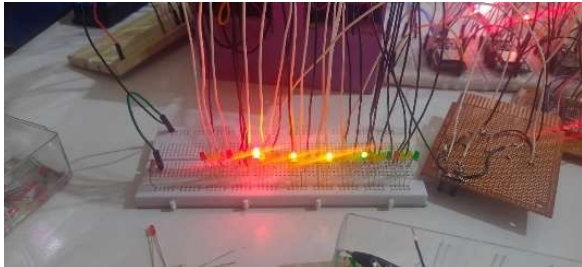


Figure 6. Documentation of mobile interface connectivity testing with the smart resistivity meter system

Then, cloud connectivity testing was carried out by reviewing whether the measurement data could be sent and displayed automatically in Google Sheets. Based on the observations, the data was successfully uploaded in real time without any delays or loss of information, indicating that the cloud storage system was functioning properly and was optimally integrated with the multi-channel smart resistivity meter system. The final results of the cloud system that received data from the device are shown in Figure 13.

TimeStamp	Method	Stage	Config	C1-Electrode	P1-Electrode	C2-Electrode	Current_I(A)	Voltage_V	Resistance_Ohm	Success	
2025-08-12 11:20:20	WENNER	1	1	1	2	3	4	7.92024	0	TRUE	
2025-08-12 11:20:26	WENNER	1	2	2	3	4	5	7.677423	0	TRUE	
2025-08-12 11:20:30	WENNER	1	3	3	4	5	6	10.5066	38.2096	3247.543	TRUE
2025-08-12 11:20:35	WENNER	1	4	4	5	6	7	14.4976	101.281	6985.953	TRUE
2025-08-12 11:20:39	WENNER	1	5	5	6	7	8	14.43	101.281	6979.475	TRUE
2025-08-12 11:20:33	WENNER	2	1	1	3	5	7	14.3628	101.281	7051.618	TRUE
2025-08-12 11:20:36	WENNER	2	2	2	4	6	8	14.4993	101.281	6986.523	TRUE
2025-08-12 11:20:28	SCHLUMBERGER	1	1	3	4	5	6	14.4854	101.281	6991.878	TRUE
2025-08-12 11:20:44	SCHLUMBERGER	1	2	4	5	7	8	14.4888	101.281	6990.489	TRUE
2025-08-12 11:20:59	SCHLUMBERGER	1	3	7	4	9	8	14.4834	101.281	6990.519	TRUE
2025-08-12 11:21:44	DIPOLE-DIPOLE	1	1	1	3	4	2	14.471	101.281	6990.894	TRUE
2025-08-12 11:21:55	DIPOLE-DIPOLE	1	2	1	4	5	2	14.4261	101.281	6973.356	TRUE
2025-08-12 11:22:12	DIPOLE-DIPOLE	1	3	1	5	6	2	14.4893	101.281	6990.751	TRUE
2025-08-12 11:22:32	DIPOLE-DIPOLE	1	4	1	6	7	2	14.4775	101.281	6990.754	TRUE
2025-08-12 11:22:47	DIPOLE-DIPOLE	1	5	1	7	8	2	14.51	101.281	6990.881	TRUE

Figure 7. Display of measurement data from the smart resistivity meter

CONCLUSION

Based on the results of the design and testing of the multi-channel smart resistivity meter that has been carried out, a multi-channel smart resistivity meter was successfully designed and implemented using a combination of an ESP32 microcontroller as the master and three other ESP32s as slaves that communicate with each other via the I2C protocol. This system is

capable of automatically controlling 8 electrodes with Schlumberger, Wenner, and *Dipole-Dipole* measurement configurations.

The current and voltage measurement system was successfully developed with an average relative error of 3% for voltage measurements and 2% for current measurements, with a system precision of 92% for voltage and 96% for current in the working range of 0-100 V and 0-100 mA. The measurement data was successfully stored on the Google Sheets-based cloud system in real time.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to express our deepest gratitude to all lecturers and staff of the Physics Department at Jenderal Soedirman University for their guidance, facilities, and assistance provided during this research.

REFERENCES

- [1] M. Irfan, O. Ivansyah, & M. Muhardi, “Perbandingan Data Geolistrik Dan Data Sondir Dalam Identifikasi Lapisan Bawah Permukaan Di Kota Pontianak”. *Dinamika Rekayasa*, 20(1), 59–63, 2024. <https://doi.org/10.20884/1.dinarek.2024.20.1.4>
- [2] R. Lihayati, N. L. Septania, & F. Haroky, “Identifikasi struktur bawah permukaan tanah menggunakan metode geolistrik konfigurasi Wenner-Schlumberger di Kabupaten Rokan Hulu”. *Jurnal Pendidikan dan Sains*, 3(2), 83–88, 2024.
- [3] D. Fatahillah, Darsono, & N. Nuryani, “Low-cost multi electrode resistivity meter based on microcontroller for electric resistivity tomography purpose”. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1), 2019. <https://doi.org/10.1088/17426596/1153/1/012022>
- [4] E.F. Huda, “Pengembangan Prototype Digital Resistivity meter Multielektroda Otomatis Untuk Konfigurasi Schlumberger” *Pillar of Physics*, 13(April), 74–81, 2020.
- [5] H. Dhika, T. Akhirina, D. Mustari, & F. Destiwati. “Pemanfaatan Teknologi Cloud Computing sebagai Media Penyimpanan Data”, *Jurnal PkM Pengabdian Kepada*

Masyarakat, 2(03), 221, 2019
<https://doi.org/10.30998/jurnalpkm.v2i03.3144>

- [6] F. Nahdi & H. Dhika, “Analisis Dampak Internet of Things (IoT) Pada Perkembangan Teknologi di Masa Yang Akan Datang” *INTEGER: Journal of Information Technology*, 6(1), 33–40, (2021).
<https://doi.org/10.31284/j.integer.2021.v6i1.1>

Analisis indeks kerentanan seismik berdasarkan sebaran nilai Vs30 di Pemalang, Jawa Tengah

Urip Nurwijayanto Prabowo*, Zaroh Irayani dan Sebah

Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Jenderal Soedirman
Jalan Dr. Suparno No.61 Karangwangkal Purwokerto Jawa Tengah

*email: urip.np@unsoed.ac.id

Abstrak – Pemalang merupakan salah satu kabupaten di Jawa Tengah yang terletak pada jalur sesar aktif yaitu Sesar Baribis – Kendeng di utara Jawa yang memanjang dari barat ke timur. Sesar tersebut masih aktif dan berpotensi menimbulkan kerusakan jika terjadi gempa bumi. Pada penelitian ini dilakukan analisis indeks kerentanan seismik sebagai salah satu upaya awal dalam mitigasi bencana gempa bumi. Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah mengalami deformasi akibat gempa bumi. Indeks kerentanan seismik pada penelitian ini dihitung berdasarkan nilai amplifikasi dan frekuensi yang diperoleh secara empiris dari nilai kecepatan gelombang geser di kedalaman 0-30 (Vs30). Nilai Vs30 di daerah pemalang berkisar antara 183,511 – 779,974 m/s yang termasuk dalam klasifikasi SC (tanah keras) dan SB (batuan). Hasil analisis mendapatkan nilai amplifikasi berkisar antara 0,780-2,742; nilai frekuensi berkisar antara 1,529 – 6,499 Hz; dan nilai indeks kerentanan seismik berkisar 0,068 – 4,912. Daerah paling rawan dengan nilai indeks kerentanan seismik tertinggi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh sehingga diperlukan kajian lebih lanjut mengenai potensi kerusakan akibat gempa bumi.

Kata Kunci: Vs30, indeks kerentanan seismik, Pemalang

Abstract – Pemalang is a regency in Central Java, Indonesia, located along an active fault system known as the Baribis–Kendeng Fault, which extends west–east across northern Java. This fault remains active and poses a potential seismic hazard that may cause significant damage during earthquakes. This study presents an analysis of the seismic vulnerability index as an initial step toward earthquake disaster mitigation. The seismic vulnerability index represents the susceptibility of near-surface soil layers to deformation induced by seismic activity. In this study, the index is estimated based on amplification and dominant frequency values derived empirically from shear-wave velocity in the upper 30 meters (Vs30). The Vs30 values in the Pemalang area range from 183,511 – 779,974 m/s corresponding to the SC and SB classification. The results indicate that amplification values range from 0,780-2,742; dominant frequency ranges from 1,529 – 6,499 Hz, and the seismic vulnerability index ranges from 0,068 – 4,912. Areas with the highest seismic vulnerability index, indicating the greatest potential risk, are located in Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman and parts of Pemalang and Bodeh Sub-Districts., highlighting the need for further detailed assessment of earthquake-induced damage potential.

Key words: Vs30, seismic vulnerability index, Pemalang

PENDAHULUAN

Pemalang merupakan salah satu Kabupaten di Utara Jawa tengah yang termasuk ke dalam jalur Pantura (Pantai Utara Jawa). Di daerah Pemalang terdapat beberapa sesar lokal seperti sesar Logeni-Kali Rambut, sesar Kali Wuluh dan sesar sekunder Kali wuluh yang diperkirakan dapat menyebabkan gempa bumi [1]. Selain itu, Pemalang juga dilewati Sesar Baribis Kendeng yang diperkirakan masih aktif. Sesar Baribis-Kendeng merupakan sesar yang berada di utara Jawa dan membentang dari barat hingga timur dengan pergerakan 2,3

– 5 mm/tahun [2]. Hal ini membuat upaya mitigasi bencana gempa bumi penting di lakukan di daerah Pemalang. [3] memetakan nilai peak ground acceleration (PGA) di permukaan dan intensitas gempa bumi di Kec. Watukumpul, Kab. Pemalang dan memberikan hasil nilai PGA dalam kategori Medium I dan intensitas gempa bumi berkisar III-IV dengan kategori gempa bumi terasa. [4] melakukan pemetaan PGA di batuan dasar menggunakan persamaan Fukushima Tanaka dan menyimpulkan bahwa Pemalang termasuk dalam kategori nilai PGA rendah.

Selain dengan pemetaan PGA, pemetaan daerah rawan gempa bumi juga dapat didasarkan pada nilai indeks kerentanan seismik. Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah mengalami deformasi akibat gempa bumi. Indeks kerentanan seismik berkaitan dengan kondisi geologi lokal (*local site effect*) dimana lapisan permukaan yang lunak akan memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi dan potensi yang tinggi mengalami deformasi akibat getaran gempa bumi. Beberapa penelitian mengemukakan bahwa sebaran nilai indeks kerentanan seismik berkorelasi dengan peta kerusakan bangunan akibat gempa bumi (Gurler et al., 1990; Nakamura, Sato and Nishinaga, 2000; Daryono et al., 2009). Tiap wilayah memiliki nilai batas indeks kerentanan seismik tertentu yang menjadi batas terjadinya kerusakan jika gempa bumi terjadi [7].

Nilai indeks kerentanan seismik dihitung dari nilai amplifikasi dan frekuensi hasil pengukuran mikrotremor [8], [9]. Namun beberapa peneliti menyatakan bahwa amplifikasi hasil pengukuran mikrotremor tidak relevan dengan amplifikasi akibat getaran gempa bumi [10], [11]. Hasil pengukuran 5 titik mikrotremor di daerah utara Pemalang (pantai) menunjukkan nilai amplifikasi tinggi yang tidak sejalan dengan potensi deformasi lapisan tanah (*ground shear strain*), nilai PGA serta intensitas gempa bumi [12].

Indeks kerentanan seismik hasil pengukuran mikrotremor merupakan respon dari lapisan lunak permukaan sampai *engineering bedrock* dengan ketebalannya bervariasi di tiap lokasi pengukuran. Hasil pengukuran mikrotremor di utara Pemalang menunjukkan lapisan sedimen permukaan memiliki variasi nilai frekuensi antara 1,56 –

11,56 Hz dan ketebalan lapisan sedimen berkisar 4,49 – 33,70 m [13]. Pada penelitian ini dilakukan pemetaan indeks kerentanan seismik secara empiris sebagai respon dari lapisan tanah pada kedalaman 0-30 m pada seluruh titik lokasi perhitungan [14]. Respon lapisan tanah dari 0-30 m di dapatkan dari data kecepatan gelombang geser rata rata pada rentang kedalaman 30 m (V_{s30}). beberapa peneliti menggunakan persamaan empiris untuk memetakan indeks kerentanan seismik di wilayah Klaten [15], Cianjur [16].

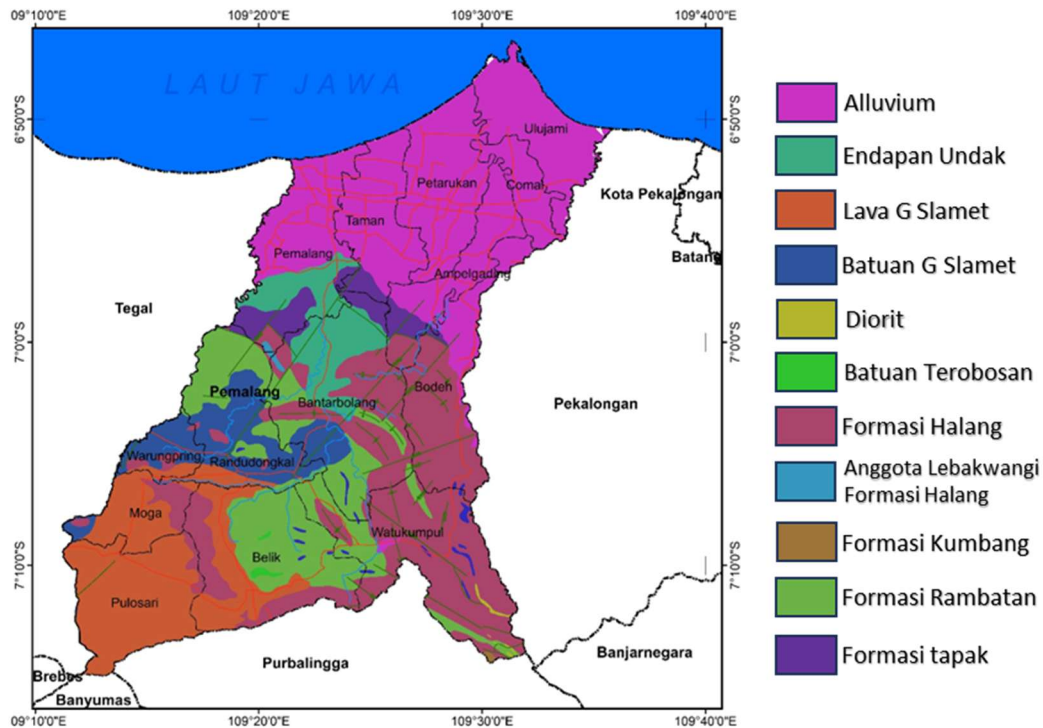
GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Peta geologi Pemalang (Gambar 1) menunjukkan bagian utara sampai ke tengah Pemalang termasuk dalam Formasi Alluvium meliputi Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh [17]. Bagian tengah ke selatan Pemalang geologinya tersusun atas batuan Gunung slamet dan Formasi berumur tersier antara lain Formasi Halang, Formasi Kumbang, Formasi Rambatan dan Formasi Tapak [17].

METODE PENELITIAN

Data VS 30

V_{s30} merupakan nilai kecepatan gelombang geser rata-rata lapisan tanah dari kedalaman 0-30 m. Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai V_{s30} dapat digunakan untuk mendeskripsikan litologi batuan/klasifikasi jenis tanah. Data V_{s30} Wilayah Pemalang didapatkan dari *United States Geological Survey* (USGS). Pada penelitian ini, data V_{s30} digunakan untuk perhitungan amplifikasi serta frekuensi dominan.



Gambar 1. Peta Geologi Kabupaten Pemalang [17][18]

Tabel 1 Klasifikasi Kelas Situs berdasarkan nilai Vs30 sesuai SNI 1726:2019 [19]

Kelas Situs	Vs30(m/s)	\bar{N}	\bar{S}_u (Kpa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 – 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat dan batuan lunak)	– 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 – 350	5 – 50	50 - 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut		
	Indeks plastisitas, $PI > 20$		
	Kadar air, $w \geq 40\%$		
	Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis situs yang mengikuti)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempabumi seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3$ m)		

Analisis data

Tahapan analisis data dapat dilihat pada Gambar 2.

Tahap awal dilakukan perhitungan nilai amplifikasi berdasarkan data Vs30 menggunakan persamaan dari Fujimoto and Midorikawa (2006) [14] sebagai berikut

$$\log(A_0) = 2,367 - 0,852\log(Vs30) \quad (1)$$

dengan A_0 adalah nilai amplifikasi. Amplifikasi menggambarkan faktor perbesaran getaran gempabumi disebabkan oleh lapisan sedimen lunak di permukaan [8], [9]. Daerah dengan faktor amplifikasi yang lebih tinggi memiliki potensi getaran gempabumi yang semakin besar dan potensi kerusakan yang lebih tinggi.

Tahapan kedua adalah perhitungan nilai frekuensi dominan. Frekuensi dominan merupakan frekuensi natural dari tanah sehingga jika getaran gempabumi memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi dominan maka akan terjadi resonansi yang menyebabkan pembesaran (amplifikasi) getaran gempabumi. Perhitungan amplitude didasarkan pada nilai Vs30, sehingga asumsi yang digunakan pada perhitungan frekuensi dominan juga pada lapisan tanah permukaan ketebalan 0-30 m. Frekuensi dominan dihitung berdasarkan persamaan yang dikemukakan oleh [20] berikut

$$H = Vs/4f_0 \quad (2)$$

dengan H Adalah ketebalan lapisan sedimen permukaan (m), Vs adalah kecepatan gelombang geser (m/s) dan f_0 adalah frekuensi dominan (Hz).

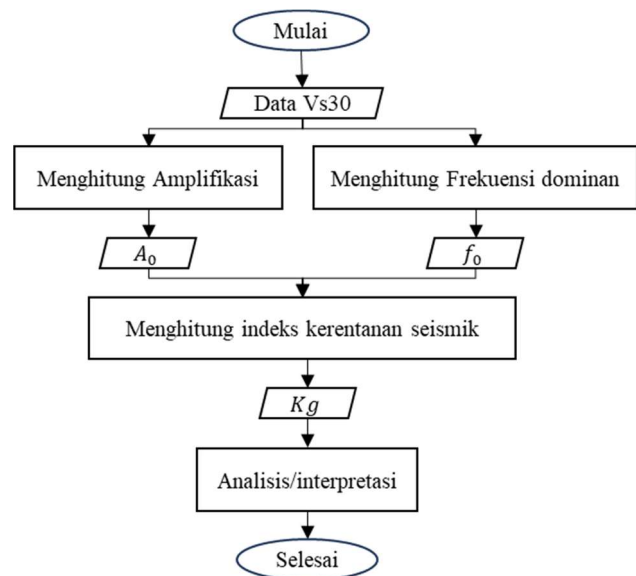
Pada penelitian ini, asumsi yang dipakai Adalah menggunakan Vs30 dan kedalaman 0-30 m, maka frekuensi dominan dihitung berdasarkan persamaan

$$f_0 = Vs30/120 \quad (3)$$

Tahap ketiga adalah perhitungan indeks kerentanan seismik. Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah mengalami deformasi akibat gempabumi. Indeks kerentanan seismik dihitung berdasarkan persamaan berikut [5], [6]

$$Kg = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (4)$$

dengan Kg Adalah nilai indeks kerentanan seismik, A_0 adalah nilai amplifikasi dan f_0 adalah frekuensi dominan (Hz).



Gambar 2. Tahapan Analisis Data

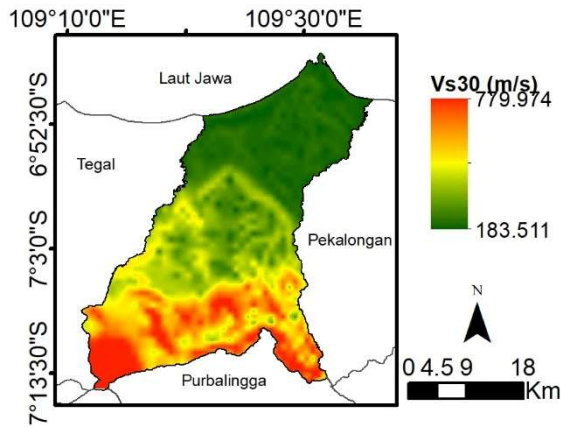
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebaran nilai Vs30

Vs30 merupakan salah satu parameter penting dalam studi efek geologi local terhadap getaran gempabumi. Nilai Vs30 digunakan untuk melakukan klasifikasi jenis tanah dan digunakan dalam studi perencanaan bangunan tahan gempa [16], [21]. Nilai Vs30 berkisar antara 183,511 – 779,974 m/s (Gambar 3).

Nilai Vs30 yang rendah bersesuaian dengan lokasi dataran rendah dekat pantai. Lokasi ini berada di Formasi Alluvium meliputi Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh. Formasi alluvium di dominasi oleh kerakal, kerikil, lanau dan lumpur. Nilai Vs30 tinggi tersebar pada daerah perbukitan yang tersusun atas batuan Gunung slamet dan Formasi berumur tersier yang lebih padat di Kecamatan Pulosari, Moga, Belik dan Watukumpul.

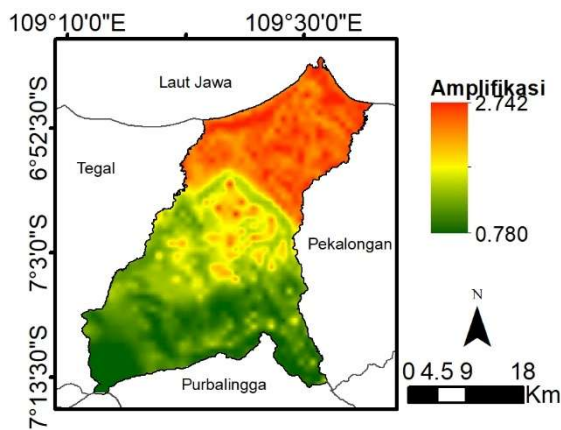
Klasifikasi jenis tanah berdasarkan nilai Vs30 dan SNI 726: 2019 di Pemalang (Gambar 2) menunjukkan hamper seluruh wilayah pemalang termasuk dalam klasifikasi SC (tanah keras) hanya sedikit dibagian perbukitan selatan Kecamatan Pulosari, Belik dan Watukumpul yang termasuk dan SB (batuan). Hal ini menunjukkan hampir diseluruh wilayah Pemalang memiliki sedimen permukaan sampai kedalaman 30 m berupa tanah.



Gambar 3. Sebaran Nilai Vs30

Amplifikasi dan frekuensi dominan

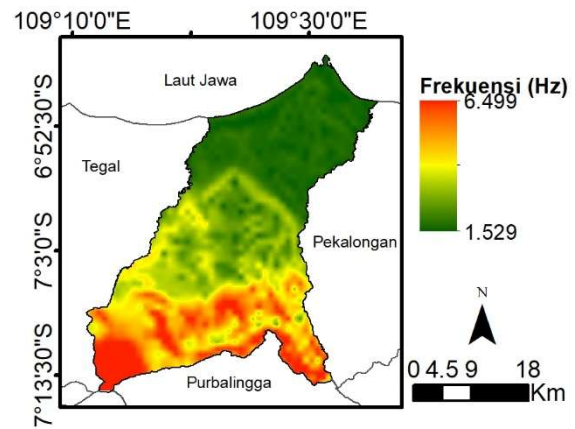
Gambar 4 menunjukkan sebaran nilai amplifikasi dari hasil perhitungan menggunakan persamaan dari Fujimoto and Midorikawa [14]. Nilai amplifikasi berkisar antara 0,780-2,742 dengan nilai tinggi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh. Nilai amplifikasi menunjukkan kesesuaian dengan kondisi geologi dimana daerah dengan lapisan sedimen lunak berasosiasi dengan Formasi Alluvium berumur kuartar memiliki nilai amplifikasi yang tinggi.



Gambar 4. Sebaran Nilai Amplifikasi

Gambar 5 menunjukkan sebaran nilai frekuensi dominan dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (3). Nilai frekuensi dominan diukur dengan ketebalan yang sama di seluruh daerah penelitian yaitu 0-30 m sehingga nilai frekuensi dominan hasil perhitungan menggambarkan kondisi geologi lokal. Nilai frekuensi yang rendah menggambarkan kondisi geologi lokal merupakan tanah yang lebih keras/ batuan lebih padat. Nilai frekuensi dominan hasil perhitungan

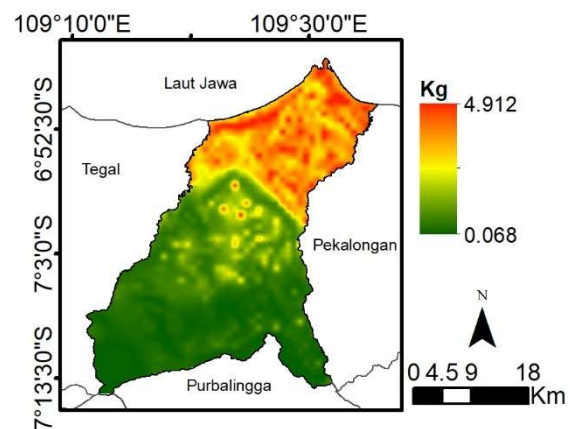
berkisar antara 1,529 – 6,499 Hz dengan nilai rendah berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh.



Gambar 5. Sebaran Nilai Frekuensi Dominan

Indeks kerentanan seismik

Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi menunjukkan potensi deformasi pada lapisan sedimen permukaan saat terjadi gempa bumi. Sehingga daerah dengan nilai indeks kerentanan seismik tinggi merupakan daerah paling rawan mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Gambar 6 menunjukkan sebaran nilai indeks kerentanan seismik dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (4). Nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0,068 – 4,912 dengan nilai tinggi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh sehingga merupakan daerah yang paling rawan mengalami kerusakan saat terjadinya gempa bumi.



Gambar 6. Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik

KESIMPULAN

Nilai V_{s30} di wilayah pemalang berkisar antara 183,511 – 779,974 m/s dengan klasifikasi jenis tanah termasuk klasifikasi SC (tanah keras) dan SB (batuan). Nilai amplifikasi di Pemalang berkisar antara 0,780-2,742; nilai frekuensi dominan berkisar antara 1,529 – 6,499 Hz; dan nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0,068 – 4,912.

Berdasarkan sebaran nilai K_g yang tinggi, wilayah dengan karakteristik lapisan tanah permukaan sampai kedalaman 30 m paling lunak dan rawan mengalami kerusakan akibat gempa bumi berada di Kecamatan Ulujami, Comal, Petarukan, Ampelgading, Taman dan sebagian Kecamatan Pemalang, dan sebagian Bodeh.

Pada daerah dengan nilai K_g yang tinggi dan rawan mengalami kerusakan saat terjadi gempa bumi maka perencanaan wilayah dan pengembangan bangunan perlu memperhatikan standar bangunan tahan gempa sesuai SNI 1726: 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan-Geologi, 'Laporan Badan Geologi Tahun 2009', Bandung, 2009.
- [2] A. Koulali *et al.*, 'The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning', *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 458, pp. 69–79, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.epsl.2016.10.039.
- [3] U. N. Prabowo, A. F. Amalia, and W. Budhi, 'Peak Ground Acceleration and Earthquake Intensity Microzonation in Watukumpul, Pemalang Regency', *Indonesian Journal of Science and Education*, vol. 3, no. 2, pp. 60–65, 2019, doi: 10.31002/ijose.v3i2.1169.
- [4] U. N. Prabowo and A. F. Amalia, 'Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum Untuk Memetakan Resiko Bencana Gempa Bumi Di Kab Pemalang, Jawa Tengah', *Science Tech*, vol. 4, no. 12, pp. 80–84, 2018.
- [5] E. D. Gurler, Y. Nakamura, J. Saita, and T. Sato, 'Local site effect of Mexico City based on microtremor measurement', in *Proceeding of 6th International Conference of Seismic Zonation*, 1990.
- [6] Y. Nakamura, T. Sato, and M. Nishinaga, 'Local Site Effect Of Kobe Based On Microtremor', in *Proceeding of the Sixth International Conference on Seismic Zonation EERI, Palm Springs California*, 2000, pp. 3–8.
- [7] Daryono, Sutikno, J. Sartohadi, Dulbahri, and K. S. Brotopuspito, 'Efek Tapak Lokal (Local Site effect) di Graben Bantul Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor', in *International Conference Earth Science and Technology*, 2009, pp. 4–9.
- [8] Y. Nakamura, 'Seismic Vulnerability Indices For Ground And Structures Using Microtremor', in *World Congress on Railway Research, Florence, Florence*, 1997, pp. 1–7.
- [9] Y. Nakamura, 'Clear Identification of Fundamental Idea Of Nakamura'S', in *Proc XII World Conf. Earthquake Engineering, New Zealand*, 2000.
- [10] B. Hassani, H. Zafarani, J. Farjoodi, and A. Ansari, 'Estimation of site amplification , attenuation and source spectra of S-waves in the East-Central Iran', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, no. 10, pp. 1397–1413, 2011, doi: 10.1016/j.soildyn.2011.05.017.
- [11] R. Xu and L. Wang, 'The horizontal-to-vertical spectral ratio and its applications', *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2021, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s13634-021-00765-z.
- [12] U. N. Prabowo, S. Sehad, A. Ferdiyan, and S. Sismanto, 'Quaternary Deposit Response to Earthquakes in Pemalang City Based on Peak Ground Acceleration, Earthquake Intensity, and Microtremor Method', *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 10, no. 3, pp. 407–417, Nov. 2023, doi: 10.17014/ijog.10.3.407-417.
- [13] U. N. Prabowo, S. Sehad, and A. Ferdiyan, 'Estimasi ketebalan lapisan sedimen permukaan menggunakan pengukuran mikrotremor di Pemalang, Jawa Tengah', *Jurnal Teras Fisika*, vol. 4, no. 1, p. 187, Jul. 2021, doi: 10.20884/1.jtf.2021.4.1.3436.
- [14] K. Fujimoto and S. Midorikawa, 'Relationship between Average Shear-Wave Velocity and Site Amplification

- Inferred from Strong Motion Records at Nearby Station Pairs', *Journal of JAEE*, vol. 6, no. 1, pp. 11–22, 2006, doi: 10.5610/jaee.6.11.
- [15] F. Fajarningrum and N. B. Wibowo, 'Comparison of Seismic Vulnerability Index Microzonation Using Usgs Vs30 Data and Microtremor Signal Measurements in Prambanan and Gantiwarno Sub-Districts, Klaten Regency', *Sunan Kalijaga Journal of Physics*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, May 2023, doi: 10.14421/physics.v6i1.5138.
- [16] D. Mutiara Jannah *et al.*, "Analisis Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Nilai Vs30 pada Zona Terdampak Gempa Bumi (Studi Kasus: Gempa Cianjur 21 November 2022)", *KURVATEK*, vol. 9, no. 2, pp. 107–116, Nov. 2024, doi: 10.33579/krvtek.v9i2.4972.
- [17] P. J. T. Dinas ESDM, 'Peta Geologi Kabupaten Pemalang', 2022, diakses 10 April 2026.
- [18] M. Djuhri, H. Samodra, T. C. Amin, and S. Gafoer, 'Peta Geologi Lembar Purwokerto dan Tegal, Jawa', Bandung, 1996.
- [19] BSN, *SNI 1726:2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [20] M. I. Seht and J. Wohlenberg, 'Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments', *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, no. 1, pp. 250–259, 1999.
- [21] M. Muzli *et al.*, "Pengukuran VS30 Menggunakan Metode MASW untuk Wilayah Yogyakarta", *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 17, no. 1, pp. 25–32, 2016, [Online]. Available: <http://www.masw.com>