

Rancang Bangun Helm Cerdas Deteksi Kecelakaan Menggunakan *Fuzzy Logic*

Paul Mark Lukas

¹Jurusan Teknik Elektro, Prodi Teknologi Rekayasa Elektronika, Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia

paulmarklukas@gmail.com

Received on dd-mm-yyyy | Revised on dd-mm-yyyy | Accepted on dd-mm-yyyy

Abstrak—Meningat tingginya angka kematian dan cedera akibat kecelakaan sepeda motor secara global, khususnya di kawasan Asia Tenggara, sistem ini bertujuan untuk meningkatkan keselamatan pengendara. Helm konvensional hanya memberikan perlindungan pasif, sedangkan helm pintar ini dilengkapi dengan sensor seperti MPU6050 untuk mendeteksi perubahan mendadak pada percepatan dan sudut kemiringan yang mengindikasikan terjadinya kecelakaan. Sistem ini memanfaatkan *fuzzy logic* untuk menganalisis data dari sensor, membedakan antara pergerakan normal dan situasi kecelakaan guna meminimalkan kesalahan deteksi. Setelah mendeteksi kecelakaan yang terkonfirmasi, helm secara otomatis mengirimkan notifikasi darurat yang disertai lokasi pengendara kepada pihak terkait, sehingga mempercepat penanganan medis dan meningkatkan peluang keselamatan. Penelitian ini mengintegrasikan berbagai teknologi yang telah terbukti, termasuk GPS untuk pelacakan lokasi dan *fuzzy logic* untuk interpretasi data yang akurat, guna menciptakan solusi keselamatan yang lebih cerdas dan responsif bagi pengguna sepeda motor.

Keywords: Deteksi Kecelakaan, *Fuzzy Logic*, Helm Cerdas.

I. PENDAHULUAN

Sepeda motor merupakan sarana transportasi yang penting dan praktis di sebagian besar negara, terutama untuk perjalanan jarak pendek. Menurut laporan dari *World Health Organization*, pengendara sepeda motor menyumbang sekitar 0,4 juta kematian secara global setiap tahunnya, yang mencakup 28% dari seluruh kasus fatalitas di jalan raya[1]. Asia Tenggara dan Pasifik Barat memiliki proporsi kematian akibat sepeda motor tertinggi, masing-masing sebesar 43% dan 36%[2]. Di Indonesia, dari total 196.457 kejadian kecelakaan lalu lintas, sekitar 73,49% melibatkan sepeda motor[3]. Angka ini menunjukkan bahwa pengendara roda dua merupakan kelompok yang paling rentan terhadap cedera serius maupun kehilangan nyawa di jalan raya.

Dengan meningkatnya jumlah kendaraan bermotor tiap tahunnya[4], kebutuhan akan keamanan dan keselamatan di jalan raya menjadi semakin penting. Risiko kecelakaan lalu lintas yang tinggi, terutama di wilayah perkotaan dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang signifikan, menjadikan upaya program keselamatan pengendara sebagai prioritas utama,

penggunaan helm dengan standar yang baik merupakan salah satu contoh[5]. Penggunaan helm berstandar nasional telah diwajibkan oleh Undang-Undang No. 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan. Helm ini berfungsi sebagai alat pelindung kepala dan mampu mengurangi risiko kematian dan cedera serius hingga 72%[6].

Namun demikian, helm konvensional hanya menawarkan perlindungan pasif, tanpa kemampuan untuk merespons kecelakaan atau mengirimkan informasi darurat secara otomatis. Kondisi ini menyebabkan keterlambatan dalam penanganan medis, terutama jika korban tidak segera ditemukan[7]. Keterbatasan inilah yang menjadi dasar pengembangan helm pintar sebagai solusi inovatif.

Dalam upaya mengatasi tantangan tersebut, pengembangan helm cerdas deteksi kecelakaan dengan sistem berbasis *fuzzy logic* menjadi pendekatan yang menjanjikan. Helm ini menggunakan sensor pintar seperti MPU6050 yang mampu mendeteksi perubahan akselerasi dan sudut[8], sehingga dapat memantau gerakan kepala pengendara. Ketika terjadi perubahan ekstrem yang mengindikasikan kecelakaan, sistem akan menganalisis data menggunakan *fuzzy logic*. Jika memenuhi kriteria kecelakaan, helm secara otomatis akan mengirimkan notifikasi darurat berisi lokasi pengendara kepada pihak yang relevan atau layanan darurat.

Pendekatan *fuzzy logic* dalam sistem ini dirancang untuk meningkatkan ketepatan dan keakuratan deteksi, sekaligus meminimalkan kemungkinan alarm palsu[9]. Dengan kemampuannya mengolah data yang bersifat ambigu dan tidak pasti, sistem dapat secara cerdas membedakan antara gerakan normal dan indikasi kecelakaan, sehingga memastikan hanya insiden yang valid yang memicu respons darurat. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya memberikan perlindungan fisik, tetapi juga mempercepat penanganan darurat, guna meningkatkan peluang keselamatan pengendara sepeda motor.

Salah satu penelitian dilakukan oleh Arman Maulana Soka[10], yang merancang helm pendeteksi kecelakaan dengan menggunakan sensor getar piezoelektrik untuk mendeteksi benturan pada helm, serta sensor FSR sebagai sensor pendukung untuk mendeteksi tekanan ketika kepala pengguna menekan bagian dalam helm akibat jatuh. Sistem ini dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno, dan hasil

deteksi dikirimkan kepada keluarga dalam bentuk pesan SMS berisi tingkat benturan dan lokasi kecelakaan.

Penelitian lain dilakukan oleh Muhammad Aditya Nugroho, Sony Sumaryo, dan Estanto[11]. Dalam penelitian tersebut, digunakan sensor flex sebagai indikator bahwa helm sedang dipakai, akselerometer sebagai detektor kecelakaan, serta modul GPS untuk mengirimkan koordinat lokasi kejadian ke *smartphone* pengguna.

Selain itu, P. Kanani dan M. Padole[12] juga mengembangkan sistem pelacak lokasi *real-time* untuk pasien kritis, menggunakan kombinasi Arduino, GPS Neo-6M, dan modul GSM SIM800L, yang mampu mengirimkan lokasi pasien ke pihak terkait secara otomatis. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi antara sensor, modul GPS, dan GSM dapat diterapkan secara efektif dalam konteks tanggap darurat berbasis lokasi.

Berdasarkan hasil kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini merupakan penggabungan dan pengembangan dari pendekatan sebelumnya. Dengan mengintegrasikan prinsip kerja dari berbagai sensor dan metode deteksi kecelakaan yang telah terbukti efektif, sistem ini memanfaatkan sensor MPU6050 untuk memantau gerakan ekstrem, modul GPS untuk pelacakan lokasi, serta *fuzzy logic* untuk meningkatkan akurasi dalam membedakan antara gerakan biasa dan indikasi kecelakaan. Sistem ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih cerdas, responsif, dan andal dalam meningkatkan keselamatan pengendara sepeda motor.

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu perancangan sistem, penerapan *fuzzy logic*, dan pengujian sistem. Pendekatan ini dirancang untuk menghasilkan sebuah sistem helm pintar yang mampu mendeteksi kecelakaan secara otomatis dan mengirimkan notifikasi darurat secara *real-time*.

A. MPU6050

MPU6050 adalah sensor gerak beresolusi tinggi (16-bit ADC) yang mengintegrasikan giroskop 3-sumbu (pengatur keseimbangan) dan akselerometer 3-sumbu (sensor percepatan). MPU6050 sudah memiliki *Digital Motion Processor (DMP)* yang digunakan untuk mengolah data mentah dari masing-masing sensor dan sejumlah data tersebut dapat diolah menjadi data dalam bentuk *quaternions* (4 Dimensi). DMP juga dapat berfungsi untuk mengurangi eror yang dihasilkan. Akselerometer berfungsi untuk mendeteksi percepatan, baik akibat gerakan maupun gravitasi. Alat ini umum digunakan untuk mengukur sudut kemiringan, namun pengukuran yang akurat hanya dapat diperoleh saat kondisi diam (statis). Untuk mendapatkan nilai sudut kemiringan yang lebih presisi, akselerometer biasanya dikombinasikan dengan satu atau lebih giroskop. Gabungan data dari sensor-sensor ini dimanfaatkan untuk menghitung sudut orientasi. Giroskop sendiri merupakan alat yang digunakan untuk mengukur atau mempertahankan orientasi suatu objek, dengan memanfaatkan prinsip momentum sudut. Sensor MPU6050 sendiri dapat

dilihat pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Sensor MPU6050

B. FSR

FSR (*Force-Sensing Resistor*) adalah sensor resistansi perangkat film polimer tebal (PTF) berbasis efek piezoresistif yang menyebabkan turunnya resistansi dengan adanya tekanan yang diberikan pada lingkaran titik elemen aktif yang memiliki diameter sebesar 14.7mm. Semakin besar tekanan yang diberikan, maka resistansi sensor tersebut semakin menurun. Sensor FSR dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Sensor FSR

C. GPSNeo-6M

GPS merupakan singkatan dari *Global Positioning System*. GPS adalah sistem navigasi satelit global yang menyediakan informasi geolokasi dan waktu kepada penerima GPS di mana pun di permukaan bumi. Salah satu modul GPS yang banyak digunakan adalah seri NEO-6 yang dikembangkan oleh *u-blox*. GPS Neo 6M dilengkapi dengan *u-blox 6 positioning engine*. Modul ini menawarkan berbagai opsi konektivitas dalam bentuk paket berukuran kecil, yaitu 16 x 12,2 x 2,4 mm. Karena biaya dan konsumsi dayanya yang rendah serta ukurannya yang ringkas, GPS Neo 6M banyak digunakan dalam perangkat yang memiliki ruang dan daya yang terbatas.

Spesifikasi teknis GPS Neo 6M adalah sebagai berikut:

- GPS Neo-6M merupakan penerima GPS yang beroperasi dengan daya 2,7–3,6 V.
- Modul ini memiliki empat antarmuka, yaitu UART, USB, SPI, dan DDC, serta mendukung suplai dan pengawasan antena jika dilengkapi dengan komponen eksternal yang sesuai dan diintegrasikan ke dalam prosesor aplikasi.
- Fitur lainnya meliputi kristal RTC dan pulsa waktu (*time pulse*), tiga pin konfigurasi, serta teknologi *anti-jamming*.
- Modul ini memiliki sistem pemosisian 50 kanal dari *u-blox 6* dengan lebih dari 2 juta *effective correlators*.
- Salah satu fitur utamanya adalah keberadaan memori EEPROM untuk menyimpan pengaturan, serta antena keramik berukuran 25x25 mm.

GPS Neo 6M memerlukan waktu 27 detik untuk melakukan *cold start* maupun *warm start*, dan hanya memerlukan 1 detik untuk *hot start*. *Aided start* hanya membutuhkan waktu kurang dari 3 detik. Rentang suhu operasional modul ini berkisar antara

-40°C hingga 85°C. Modul ini dilengkapi dengan antena pasif maupun aktif, serta osilator kristal. Modul GPS Neo-6M kompatibel dengan Arduino, serta dapat digunakan dengan mikrokontroler lainnya. Modul GPS Neo-6M dapat dilihat pada gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. GPS Neo-6M

D. GSM SIM800L

GSM merupakan singkatan dari *Global System for Mobile Communication*. Teknologi ini dikembangkan oleh *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). Salah satu modul GSM yang banyak digunakan adalah SIM800L, yaitu modul seluler berukuran kecil yang memungkinkan pengguna untuk mengirim dan menerima SMS. Keunggulan utama dari SIM800L adalah ukurannya yang kecil serta biaya produksi yang rendah. Setelah modul diberikan daya, sistem akan melakukan proses inialisasi dan secara otomatis mencari jaringan seluler yang tersedia serta melakukan login ke jaringan. Modul ini dilengkapi dengan indikator LED *onboard* untuk menunjukkan status koneksi yang mana kedipan cepat menandakan tidak ada jaringan, dan kedipan lambat menunjukkan bahwa modul telah terhubung ke jaringan.

Spesifikasi teknis SIM800L adalah sebagai berikut:

- Tegangan suplai: 5V
- Konsumsi daya: Sleep mode < 2,0 mA, Idle mode < 7,0 mA
- Transmisi GSM rata-rata: 350 mA, puncak: 2000 mA
- Ukuran modul: 4 cm x 2.8 cm
- Rentang suhu kerja: -40°C hingga +85°C
- Jenis kartu SIM: microSIM (dipasang di bagian bawah modul)
- Antarmuka komunikasi: UART (tegangan maksimum 2,8V)
- Mendukung perintah komunikasi *AT-Command*
- Indikator status: LED
- Konektor antena: IPX
- Frekuensi yang didukung: *Quad Band* (850/950/1800 /1900 MHz)

Modul SIM800L dapat dilihat pada gambar 4 di bawah ini.

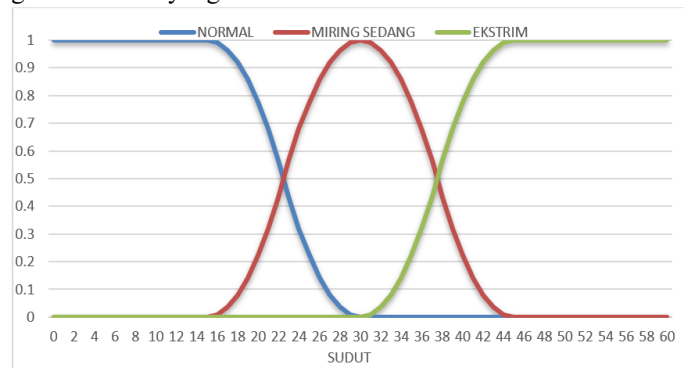


Gambar 4. SIM800LV2

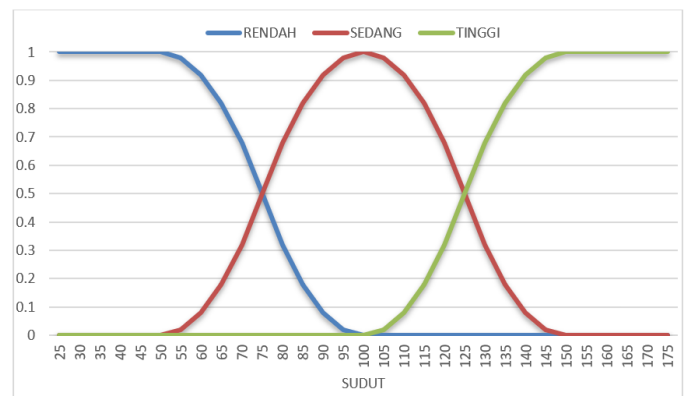
E. Fuzzy Logic

Fuzzy logic adalah metode pengambilan keputusan yang meniru cara manusia berpikir dalam menghadapi ketidakpastian atau ambiguitas[13]. Dalam penelitian ini, *fuzzy logic* digunakan sebagai inti dari sistem untuk mengklasifikasikan kondisi pengemudi berdasarkan data sensor MPU6050. Data yang diproses meliputi kemiringan dan perubahan kecepatan sudut. *Fuzzy logic* dipilih karena lebih unggul dalam menangani data yang tidak pasti[14], dan mampu memberikan keputusan yang lebih fleksibel dalam mendeteksi kondisi kecelakaan secara *real-time*.

Sistem *fuzzy* memiliki dua input utama yang berasal dari sensor MPU6050 yaitu kemiringan, yang dihitung dari data akselerometer pada sumbu X, Y, dan Z untuk menentukan derajat kemiringan helm dan perubahan kecepatan sudut, yang diambil dari data *gyroscope* untuk mengukur perubahan gerakan rotasi yang tiba-tiba.



Gambar 5 Membership function kemiringan



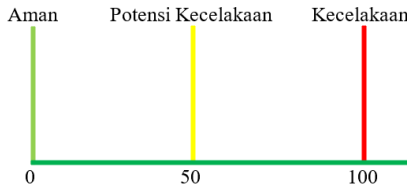
Gambar 6. Membership function perubahan kecepatan sudut

Setiap variabel input dikategorikan ke dalam tiga himpunan *fuzzy*. Kurva pada gambar 5 menjelaskan bahwa *membership function* kemiringan dibagi menjadi 3 kategori, yaitu Normal (0° - 30°), Miring Sedang (15° - 45°) dan Ekstrem (>30°). Sedangkan pada gambar 6 menjelaskan kurva perubahan kecepatan sudut yang terbagi menjadi Rendah (<50°/s - 100°/s), Sedang (50°/s - 150°/s) dan Tinggi (100°/s - 150°/s >). Masing-masing kategori ini diwakili oleh fungsi keanggotaan yang memungkinkan transisi nilai yang halus antar kategori.

Sistem menggunakan aturan untuk mengevaluasi kondisi input dan menentukan klasifikasi kecelakaan. Berikut adalah contoh tabel aturan *fuzzy* yang digunakan:

TABEL 1
FUZZY RULE SET

Kemiringan	Perubahan Kecepatan Sudut	Output
Normal	Rendah	Aman
Normal	Sedang	Aman
Normal	Tinggi	Potensi Kecelakaan
Miring Sedang	Rendah	Aman
Miring Sedang	Sedang	Potensi Kecelakaan
Miring Sedang	Tinggi	Kecelakaan
Ekstrem	Rendah	Potensi Kecelakaan
Ekstrem	Sedang	Kecelakaan
Ekstrem	Tinggi	Kecelakaan



Gambar 7. Output membership singleton

Tabel I memberikan aturan *fuzzy* untuk output yang akan dihasilkan oleh sistem. Aturan-aturan ini dirancang untuk mengidentifikasi pola gerakan yang tidak wajar dan mengklasifikasikan apakah kondisi tersebut tergolong aman, berpotensi kecelakaan, atau sudah merupakan kecelakaan. Gambar 7 menjelaskan bahwa nilai output *membership* terbagi menjadi tiga, yaitu aman dengan nilai 0, potensi kecelakaan dengan nilai 50 dan kecelakaan dengan nilai 100. Nilai output ini yang akan digunakan untuk perhitungan defuzzifikasi yang akan digunakan oleh sistem untuk menentukan apakah sistem mendeteksi kecelakaan atau tidak.

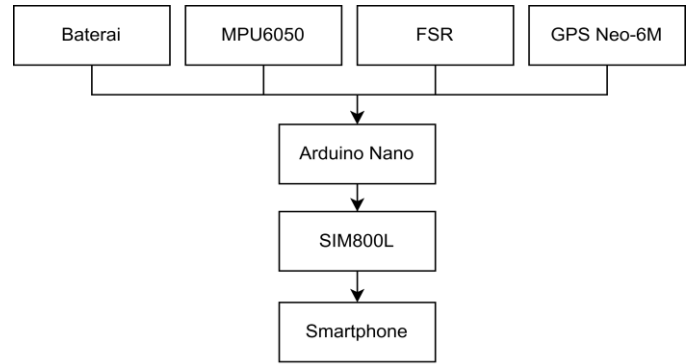
Defuzzifikasi adalah pengubahan nilai output *fuzzy* menjadi nilai tegas berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan[15]. Proses defuzzifikasi digunakan untuk mengubah hasil evaluasi *fuzzy* menjadi keputusan diskrit. Proses pengubahan besaran *fuzzy* yang disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan *fuzzy* keluaran dengan fungsi keanggotaannya untuk mendapatkan kembali bentuk tegasnya. Rumus defuzzifikasi dapat dilihat sebagai berikut:

$$Z_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{predikat_i} \times Z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_{predikat_i}} \tag{1}$$

Dengan $\alpha_{predikat_i}$ merupakan nilai predikat dari tiap *rule*, Z_i merupakan nilai output dari tiap *rule* dan Z_{total} merupakan nilai output (rata-rata) dari semua *rule*.

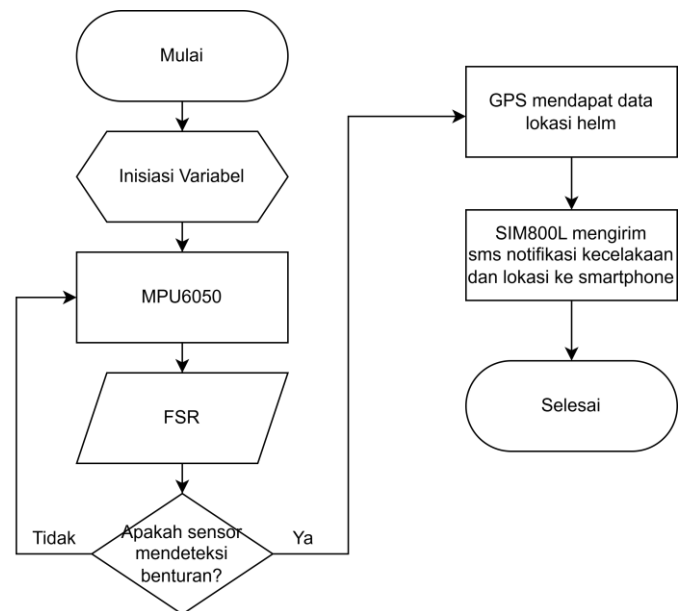
Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen bekerja secara terintegrasi dan fungsi utama sistem—yakni deteksi kecelakaan dan pengiriman notifikasi darurat—berjalan dengan baik. Pengujian ini mencakup alur penuh dari sensor, pemrosesan logika *fuzzy*, hingga pengiriman pesan melalui modul komunikasi.

F. Blok Diagram Sistem



Gambar 8. Blok diagram alat

Gambar 8 di atas menunjukkan blok diagram alat yang akan digunakan sistem. Sistem ini menggunakan sensor MPU6050 untuk mendeteksi kemiringan dan perubahan kecepatan sudut kepala pengendara, serta sensor FSR untuk mendeteksi tekanan saat terjadi benturan di dalam helm. Data dari kedua sensor dikirim ke mikrokontroler Arduino Nano, yang kemudian memprosesnya menggunakan metode *fuzzy logic* untuk mengevaluasi apakah kondisi tersebut mengindikasikan kecelakaan. Apabila terdeteksi kecelakaan, modul GPS Neo-6M akan mengirimkan data koordinat lokasi secara *real-time*. Informasi ini kemudian dikirim oleh modul SIM800L dalam bentuk pesan SMS ke *smartphone* tujuan. Sistem ini memungkinkan pendeteksian kecelakaan secara otomatis dan pengiriman notifikasi darurat secara cepat. Seluruh rangkaian didukung oleh baterai sebagai sumber daya utama.



Gambar 9. Flowchart Alat

Gambar 9 mengenai *flowchart* di atas menjelaskan bahwa sistem akan mulai membaca data dari sensor MPU6050 untuk mendeteksi kemiringan dan perubahan gerakan, serta dari sensor FSR untuk mendeteksi tekanan akibat benturan pada bagian dalam helm. Data dari kedua sensor ini digunakan untuk

menentukan apakah terdapat indikasi kecelakaan.

Sistem kemudian melakukan evaluasi apakah sensor mendeteksi benturan. Jika tidak, sistem akan terus memantau kondisi secara berulang. Namun jika ya, maka sistem akan mengambil data lokasi helm dari modul GPS Neo-6M, lalu modul SIM800L akan secara otomatis mengirimkan SMS notifikasi kecelakaan beserta koordinat lokasi ke *smartphone* penerima. Setelah pesan dikirim, proses masuk ke tahap selesai, dan sistem kembali ke pemantauan ulang jika dibutuhkan.

G. Metode Pengujian

Metode pengujian yang dilaksanakan dalam penelitian ini bertujuan sebagai klasifikasi benturan pada sensor FSR, serta evaluasi implementasi *fuzzy logic* pada sensor MPU6050.

Evaluasi *fuzzy logic* digunakan untuk membandingkan kondisi real pengendara, apakah posisi pengendara masih tergolong aman, berpotensi mengalami kecelakaan atau sudah terjadi kecelakaan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat berapa banyak deteksi benar (*true positives*) dan kesalahan deteksi (*false positives/false negatives*) yang dapat digunakan untuk menghitung nilai akurasi untuk mengukur seberapa sering sistem membuat prediksi yang benar, presisi untuk mengukur ketepatan sistem saat mendeteksi kecelakaan dan *recall* untuk mengukur kemampuan sistem dalam menangkap semua kecelakaan yang terjadi.

$$Akurasi = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} 100\% \quad (2)$$

$$Presisi = \frac{TP}{TP+FP} 100\% \quad (3)$$

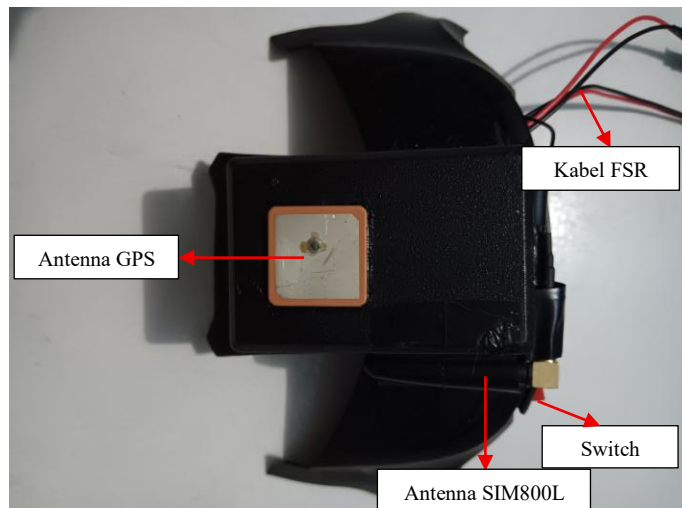
$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} 100\% \quad (4)$$

H. Desain Perangkat Keras

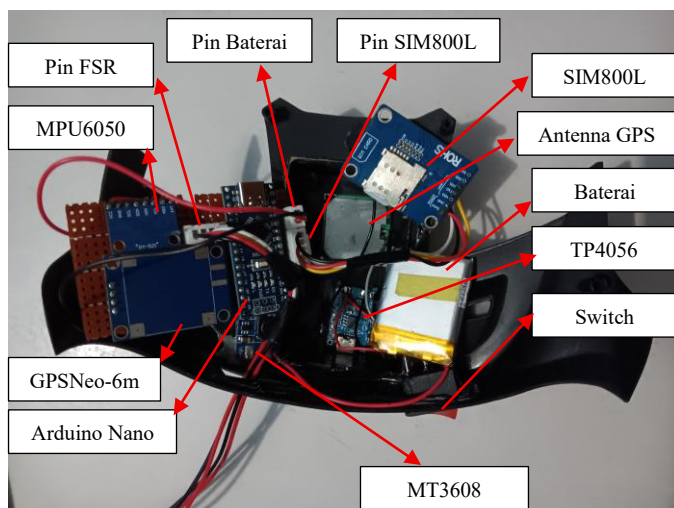
Desain dari sistem yang akan dibuat meliputi kotak yang menyimpan Arduino, MPU6050, Modul GPS, dan Modul SIM800L. Kotak ini akan diintegrasikan dengan *spoiler* helm. Kotak juga akan menyimpan baterai sebagai sumber daya serta boost converter. Peletakan komponen dan *spoiler* helm dapat dilihat pada gambar 10, 11 dan 12 di bawah ini.



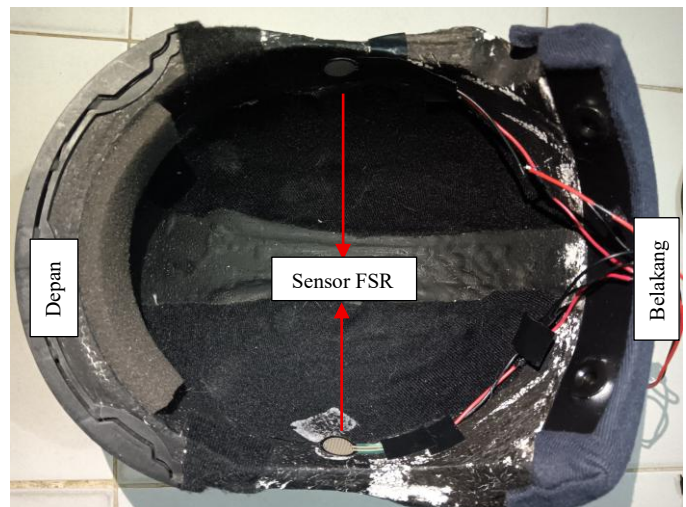
Gambar 11. Tampilan bagian dalam spoiler helm



Gambar 12. Tampilan luar spoiler helm



Gambar 10. Komponen pada bagian dalam spoiler helm



Gambar 13 Peletakan sensor FSR

Gambar 13 menunjukkan peletakan sensor FSR pada bagian dalam busa sebelah kiri dan kanan helm dan akan bersentuhan secara langsung dengan kepala pengguna helm.



Gambar 14. Desain helm

Gambar 14 di atas merupakan bentuk keseluruhan dari helm yang telah di rancang dan akan digunakan oleh pengendara motor.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil pengujian sistem secara menyeluruh, termasuk akuisisi data dari sensor MPU6050 dan FSR, pemrosesan data menggunakan metode *fuzzy logic*, serta pengujian modul komunikasi untuk pengiriman notifikasi kecelakaan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mendeteksi kejadian kecelakaan secara akurat dan *real-time*. Hasil yang diperoleh dianalisis menggunakan metrik evaluasi seperti akurasi, presisi, dan *recall* guna menilai efektivitas sistem dalam mengklasifikasikan kondisi pengendara. Selain itu, pembahasan dilakukan terhadap respons sistem dalam berbagai skenario uji untuk memastikan integrasi dan keandalan seluruh komponen yang digunakan.

A. Pengujian MPU6050

Pengujian awal terhadap sensor MPU6050 dilakukan dengan pembacaan data mentah dari sensor yang berfungsi untuk mendeteksi gerakan dan orientasi berdasarkan akselerasi serta kecepatan sudut. Setelah data mentah berhasil diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan kalibrasi sensor untuk mengurangi kesalahan pengukuran akibat *offset* yang mungkin muncul saat sensor dalam kondisi diam. Kalibrasi dilakukan untuk mengurangi *offset* atau bias bawaan pada sensor MPU6050, yang dapat menyebabkan kesalahan pembacaan meskipun sensor dalam keadaan diam. *Offset* ini dihitung dengan mengambil rata-rata pembacaan akselerometer dan giroskop dalam kondisi statis dan mendarat. Nilai rata-rata tersebut kemudian dikurangkan dari pembacaan aktual untuk mendapatkan data yang telah dikalibrasi.

Setelah kalibrasi *offset* pada sensor MPU6050 telah dilakukan, data mentah akan diubah menjadi sudut kemiringan. Uji coba validasi sudut akan dilakukan dengan cara membandingkan sudut *Roll* (rotasi terhadap sumbu X) yang dihasilkan oleh MPU6050 dengan busur derajat dengan besaran sudut.

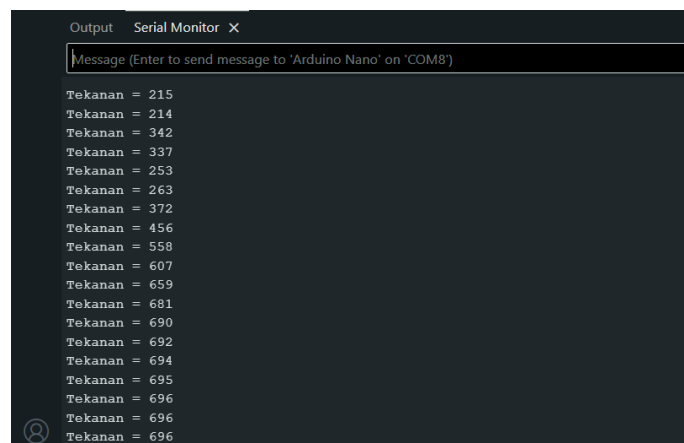
TABEL II
UJI COBA VALIDASI SUDUT MPU6050

No.	Miring	Busur (°)	MPU6050 (°)	Selisih (°)
1		0	0.56	2.29
2		10	11.10	2.38
3		20	20.44	2.19
4		30	32.92	1.8
5		40	38.56	2.67
6	Kiri	50	50.84	1.98
7		60	60.63	2.12
8		70	68.34	2.17
9		80	79.46	2.64
10		90	88.96	3.99
11		0	0.07	0.83
12		10	10.82	2.76
13		20	20.02	1.8
14		30	28.41	2.7
15		40	41.11	2.37
16	Kanan	50	50.17	0.89
17		60	61.23	2.14
18		70	69.71	2.28
19		80	79.03	2.38
20		90	89.51	1.75

Tabel II di atas memberikan hasil uji coba perbandingan sudut MPU6050 dengan busur derajat. Dari hasil pengujian yang dilaksanakan, sensor MPU6050 berhasil memberikan nilai sudut sesuai dengan busur derajat dengan perbedaan rata-rata sebesar 2.28°. Pengujian ini berhasil membuktikan bahwa pengukuran sudut sensor MPU6050 merupakan valid dan dapat mengukur sudut mengikuti busur derajat.

B. Pengujian FSR

Untuk memastikan sensor FSR (Force Sensitive Resistor) berfungsi dengan baik dalam mendeteksi benturan pada helm, dilakukan pengujian awal dengan mengakuisisi nilai raw sensor. Pengujian ini bertujuan memperoleh data tekanan awal dari berbagai kondisi benturan sehingga dapat menjadi dasar pengklasifikasian tingkat benturan yang akan digunakan sistem dalam mendeteksi kecelakaan. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan tekanan pada titik elemen aktif sensor FSR menggunakan jari tangan.



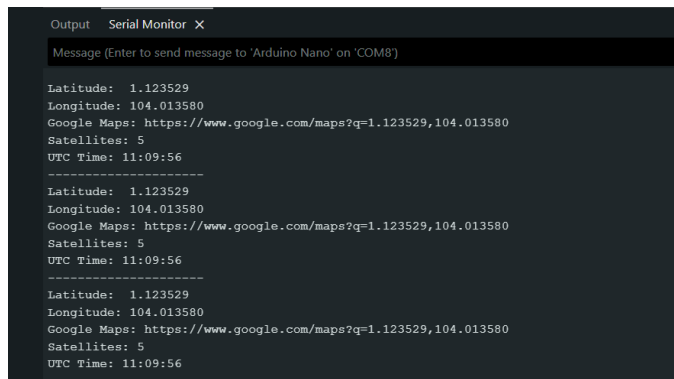
Gambar 15. Tampilan data raw tekanan hasil pengujian sensor FSR

Gambar 15 di atas merupakan hasil yang ditampilkan pada serial monitor menunjukkan bahwa semakin besar tekanan yang diberikan, maka semakin besar pula nilai yang didapat. Hasil pengujian ini bertujuan sebagai klasifikasi benturan yang

diterima oleh kepala pengendara pada saat terjadinya kecelakaan.

C. Pengujian GPS Neo-6M

Pengujian deteksi lokasi GPS dilakukan dalam rangka memastikan keakuratan sistem deteksi kecelakaan yang dikembangkan, pengujian perbandingan lokasi dilakukan antara modul GPS Neo-6M dengan GPS bawaan *smartphone*. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi jarak antara titik koordinat yang dihasilkan oleh GPS Neo-6M dengan lokasi yang terdeteksi oleh perangkat *smartphone*[16]. Pengujian dilaksanakan di 5 lokasi yang berbeda. Pengujian juga dilakukan di luar ruangan dan dalam kondisi cuaca cerah tidak berawan.



Gambar 16. Tampilan lokasi GPS Neo-6M pada output serial monitor

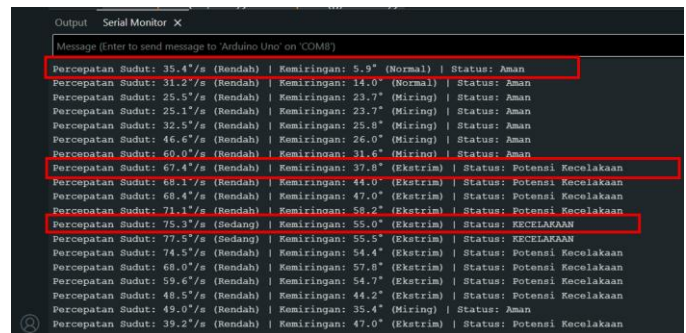
TABEL III
UJI COBA DETEKSI LOKASI GPS NEO-6M

No.	Smartphone	GPS Neo-6M	Selisih Jarak
1	1.047629, 103.985275	1.047678, 103.985317	7.2 meter
2	1.058304, 103.977081	1.058279, 103.977040	5.3 meter
3	1.118332, 104.047945	1.118292, 104.047893	7.3 meter
4	1.123842, 104.049481	1.123874, 104.049533	6.8 meter
5	1.123611, 104.013528	1.123174, 104.013714	9.8 meter

Gambar 16 di atas menunjukkan tampilan lokasi GPS yang di dapat setelah GPS berhasil mendapatkan titik lokasi. Berdasarkan hasil uji coba komparasi titik lokasi *smartphone* dengan GPS Neo-6M pada tabel III di atas, di dapat perbedaan rata-rata jarak sebesar 7.28 meter, dan bisa disimpulkan bahwa modul GPS Neo-6M cukup akurat untuk mendeteksi lokasi apabila terjadinya sebuah kecelakaan pada pengendara.

D. Hasil Uji Coba Klasifikasi Evaluasi *Fuzzy*

Pada uji coba klasifikasi evaluasi *fuzzy*, dilakukan uji coba pengambilan data derajat kemiringan serta perubahan kecepatan sudut aturan untuk mengevaluasi kondisi input dan menentukan klasifikasi kecelakaan. Gambar 17 di bawah menunjukkan beberapa sampel pengambilan data untuk menentukan klasifikasi kecelakaan dan contoh sampel yang akan di ambil sebagai perbandingan perhitungan.



Gambar 17. Tampilan hasil deteksi *fuzzy* pada output serial monitor

TABEL IV
PENGAMBILAN SAMPEL DATA KLASIFIKASI KECELAKAAN

Sampel No.	Sudut Kemiringan	Perubahan Kecepatan Sudut	Hasil Deteksi Sistem	Hasil Perhitungan Manual
1	5.9° (Normal)	35.4°/s (Rendah)	Aman	0 (Aman)
2	37.8° (Ekstrem)	67.4°/s (Rendah)	Potensi	30 (Potensi)
3	55° (Ekstrem)	75.3°/s (Sedang)	Kecelakaan	76 (Kecelakaan)

Dari sampel data yang diperoleh pada tabel IV di atas, akan dihitung nilai defuzzifikasinya secara menggunakan rumus (1) sebagai perbandingan output untuk menentukan keputusan apakah sistem dapat mendeteksi hasil dengan benar atau tidak.

Pada sampel data pertama, sistem mendeteksi bahwa sudut kemiringan 5.9 adalah Normal dan perubahan kecepatan sudut 35.4°/s adalah Rendah. Hasil ini sesuai dengan *range membership function* yang telah ditentukan. Sistem kemudian mendeteksi kondisi ini sebagai Aman tanpa indikasi kecelakaan dan sesuai dengan hasil perhitungan secara manual, yaitu 0 dan masuk ke dalam status aman. Untuk sudut kemiringan 37.8° (Ekstrem) dan 67.4°/s (Rendah). Output menunjukkan bahwa sistem mendeteksi kondisi sebagai Potensi Kecelakaan, sesuai dengan hasil perhitungan manual yaitu 30 dan masuk ke dalam status potensi kecelakaan. Sementara untuk sudut 55° (Ekstrem) dan 75.3°/s (Sedang), sistem mendeteksi kondisi ini sebagai Kecelakaan, dan sesuai dengan hasil perhitungan secara manual yaitu 76 dan masuk ke dalam status kecelakaan. Dari hasil perhitungan defuzzifikasi tersebut, sistem berhasil mengikuti *Fuzzy Rule Set* yang telah ditentukan.

Untuk menguji performa sistem dalam mengklasifikasikan kondisi pengendara, dilakukan pengujian terhadap 90 sampel data yang terdiri dari tiga kategori kondisi: Aman, Potensi Kecelakaan, dan Kecelakaan. Prediksi yang dihasilkan oleh sistem berbasis *fuzzy logic* kemudian dibandingkan dengan kondisi aktual untuk membentuk *confusion matrix*.

Confusion matrix merupakan suatu metode yang digunakan untuk menyajikan informasi mengenai hasil klasifikasi yang dilakukan oleh sistem. Pada kasus *confusion matrix* dengan dua kelas, kategori umumnya dibedakan menjadi kelas positif dan kelas negatif. *True positive* merujuk pada jumlah data kelas positif yang berhasil diidentifikasi dengan benar oleh *classifier*, sedangkan *true negative* mengacu pada jumlah data kelas negatif yang berhasil diklasifikasikan secara tepat. *False positive* terjadi apabila data kelas negatif secara keliru

diklasifikasikan sebagai positif, sementara *false negative* terjadi ketika data kelas positif salah diklasifikasikan sebagai negatif. Dalam kasus klasifikasi multikelas, metrik yang didefinisikan untuk klasifikasi biner tidak dapat diterapkan sepenuhnya. *Confusion matrix* multikelas memiliki dimensi $N \times N$, di mana N adalah jumlah label kelas yang berbeda. Oleh karena itu, karakteristik *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP), dan *False Negative* (FN) tidak dapat diterapkan secara langsung pada kasus ini. Sebagai gantinya, analisis dapat dilakukan dengan berfokus pada satu kelas tertentu. Berdasarkan pendekatan ini, serangkaian metrik untuk setiap kelas dapat ditentukan. Selanjutnya, melalui kombinasi yang tepat dari metrik-metrik tersebut, dimungkinkan untuk memperoleh metrik yang merepresentasikan keseluruhan *confusion matrix*[17]. Sebuah tabel akan digunakan untuk mengevaluasi kinerja model klasifikasi. Tabel ini membandingkan hasil prediksi model dengan nilai sebenarnya (aktual). Dalam konteks jurnal ini, *Confusion Matrix* digunakan untuk mengevaluasi seberapa akurat sistem *fuzzy logic* dalam mengklasifikasikan kondisi pengendara menjadi "Aman", "Potensi Kecelakaan", atau "Kecelakaan" sebagaimana ditampilkan pada Tabel V berikut.

TABEL V
PENGUJIAN KLASIFIKASI UNTUK EVALUASI FUZZY

		Prediksi Fuzzy		
		Aman	Potensi Kecelakaan	Kecelakaan
Kondisi Pengendara	Aman	28	2	0
	Potensi Kecelakaan	4	25	1
	Kecelakaan	0	3	27
Jumlah Total		30	30	30

Tabel V terdiri dari baris yang mewakili kondisi aktual pengendara dan kolom yang mewakili prediksi yang dihasilkan oleh perhitungan *fuzzy*. Data dari tabel akan menentukan TP, TN, FP dan FN dan setelah itu akan digunakan rumus (2), (3) dan (4) untuk menentukan nilai akurasi, presisi dan *recall* tiap kelasnya. Untuk kelas kecelakaan, *True Positives* (TP) merupakan jumlah kasus di mana sistem dengan benar memprediksi kelas "Kecelakaan" ketika kondisi aktual pengendara memang "Kecelakaan". Dengan kata lain, sistem mendeteksi kecelakaan dengan tepat. *True Negatives* (TN) merupakan jumlah kasus di mana sistem dengan benar memprediksi bahwa tidak ada "Kecelakaan" ketika kondisi aktualnya bukan "Kecelakaan" (yaitu Aman, atau Potensi Kecelakaan). *False Positives* (FP) merupakan jumlah kasus di mana sistem salah memprediksi kelas "Kecelakaan" yang mana kondisi aktualnya bukan "Kecelakaan" (Aman atau Potensi Kecelakaan). Kasus ini sering disebut sebagai alarm palsu. *False Negatives* (FN) merupakan jumlah kasus yang mana sistem gagal mendeteksi "Kecelakaan" padahal kondisi aktualnya adalah "Kecelakaan".

Dari tabel berikut kita dapat mengambil kesimpulan untuk

kelas Kecelakaan, prediksi *Fuzzy* yang berhasil mendeteksi Kecelakaan (TP) sebanyak 27, sistem berhasil mendeteksi 27 Kecelakaan yang sesuai dengan kondisi aktual pengendara. Untuk prediksi yang mana sistem mendeteksi kecelakaan padahal kondisi pengendara tidak kecelakaan (FP) adalah 1. Dan untuk prediksi yang mana sistem gagal mendeteksi kecelakaan padahal kondisi pengendara adalah kecelakaan (FN) adalah 3.

Untuk kelas Aman, prediksi *Fuzzy* yang berhasil mendeteksi Aman (TP) sebanyak 28. Untuk prediksi yang mana sistem mendeteksi Aman padahal kondisi pengendara bukan Aman (FP) adalah 4. Dan untuk prediksi yang mana sistem gagal mendeteksi Aman padahal kondisi pengendara adalah bukan Aman (FN) adalah 2. Dan untuk kelas Potensi Kecelakaan, prediksi *Fuzzy* yang berhasil mendeteksi Potensi Kecelakaan (TP) sebanyak 25. Untuk prediksi yang mana sistem mendeteksi Potensi Kecelakaan padahal kondisi pengendara bukan (FP) adalah 5. Dan untuk prediksi yang mana sistem gagal mendeteksi Potensi Kecelakaan padahal kondisi pengendara adalah Potensi Kecelakaan (FN) adalah 5.

Dari hasil pengujian tersebut, didapatkan nilai sistem menunjukkan berbagai kombinasi prediksi dan kondisi aktual, yang akan dijadikan dasar untuk menghitung nilai akurasi, presisi, dan *recall*. Ada pula nilai akurasi yang diperoleh sebesar 88,89%. Nilai presisi kelas Aman sebesar 87,5% dan nilai *recall* sebesar 93,33%. Sedangkan nilai kelas presisi dan *recall* kelas Potensi Kecelakaan sama-sama sebesar 83,33%. Presisi dan *recall* tertinggi terdapat pada kelas Kecelakaan, didapat nilai presisi sebesar 96,43% dan *recall* 90%.

E. Hasil Uji Coba Klasifikasi Benturan Pada FSR

Pengujian yang disajikan dalam Tabel II bertujuan untuk mengklasifikasikan nilai benturan dalam bentuk data mentah (*raw value*) sensor FSR berdasarkan tekanan yang dihasilkan dari berbagai ketinggian jatuh. Total sebanyak 20 percobaan yang dilakukan dengan variasi ketinggian tertentu secara bertahap.

Berdasarkan hasil pengujian yang dilaksanakan, dari total 20 percobaan benturan diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yakni Ringan, apabila nilai tekanan berada di bawah 300, Sedang apabila nilai tekanan berada dalam rentang 300 sampai 600, dan Kuat, apabila nilai tekanan melebihi angka 600. Pengelompokan ini berdasarkan pada nilai hail tekanan yang diamati dari hasil uji coba.

Dari data uji coba yang diperoleh, hasil menunjukkan bahwa benturan dengan klasifikasi ringan terjadi pada ketinggian jatuh antara 10 sampai 30 cm. Sementara benturan dengan klasifikasi sedang terjadi pada ketinggian dengan rentang 40 sampai 80 cm. Dan benturan dengan klasifikasi kuat mulai muncul pada ketinggian jatuh 90 cm ke atas. Uji coba ini berhasil menunjukkan bahwa peningkatan ketinggian jatuh secara konsisten menghasilkan tekanan yang lebih tinggi dan klasifikasi benturan yang lebih berat.

Dengan demikian, hasil uji coba klasifikasi benturan berdasarkan nilai tekanan pada sensor ini dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan tingkat keparahan benturan berdasarkan nilai tekanan yang diberikan. Hal ini penting

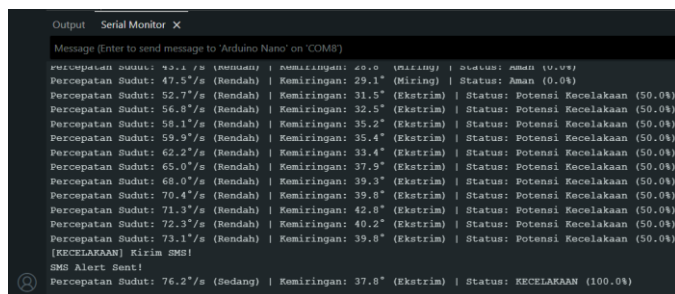
sebagai dasar dalam mendeteksi kecelakaan sebagai evaluasi apabila sistem mendeteksi adanya terjadi kecelakaan atau tidak. Hasil uji coba klasifikasi benturan menggunakan sensor FSR dapat dilihat pada tabel VI di bawah ini.

TABEL VI
PENGUJIAN KLASIFIKASI BENTURAN

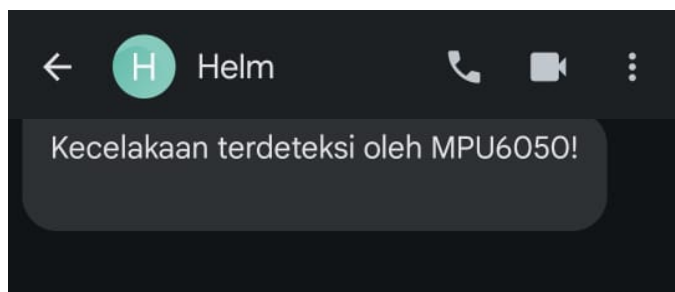
Percobaan No	Posisi Jatuh	Ketinggian	Nilai Tekanan (Raw)	Klasifikasi Benturan
1	Miring Kanan	10 cm	162	Ringan
2	Miring Kiri	10 cm	158	Ringan
3	Miring Kanan	20 cm	228	Ringan
4	Miring Kiri	20 cm	223	Ringan
5	Miring Kanan	30 cm	298	Ringan
6	Miring Kiri	30 cm	294	Ringan
7	Miring Kanan	40 cm	357	Sedang
8	Miring Kiri	40 cm	351	Sedang
9	Miring Kanan	50 cm	412	Sedang
10	Miring Kiri	50 cm	405	Sedang
11	Miring Kanan	60 cm	473	Sedang
12	Miring Kiri	60 cm	465	Sedang
13	Miring Kanan	70 cm	517	Sedang
14	Miring Kiri	70 cm	508	Sedang
15	Miring Kanan	80 cm	592	Sedang
16	Miring Kiri	80 cm	583	Sedang
17	Miring Kanan	90 cm	625	Kuat
18	Miring Kiri	90 cm	615	Kuat
19	Miring Kanan	100 cm	658	Kuat
20	Miring Kiri	100 cm	648	Kuat

F. Pengujian SIM800L

Pengujian pengiriman notifikasi via sms menggunakan modul SIM800L juga dilakukan guna memastikan keandalan sistem dalam mengirimkan notifikasi SMS secara otomatis ke *smartphone* tujuan. Uji coba ini dilakukan dengan cara mensimulasikan terjadinya kecelakaan yang terdeteksi oleh sensor MPU6050 untuk mengetahui apakah proses pengiriman pesan beserta informasi lokasi dari helm ke perangkat penerima dapat berjalan lancar tanpa kendala.



Gambar 18. Tampilan pengiriman SMS setelah deteksi kecelakaan

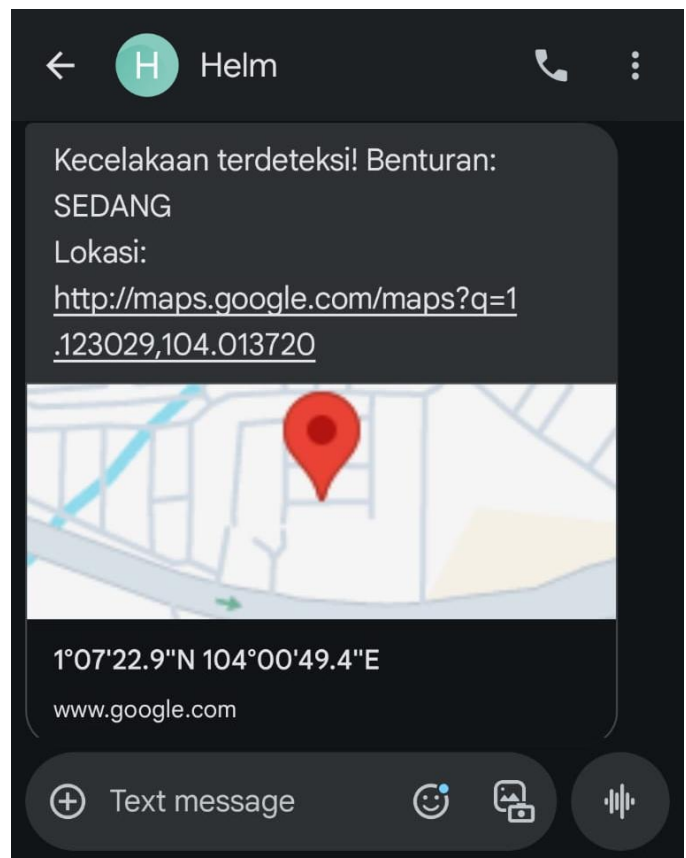


Gambar 19. Tampilan notifikasi SMS

Gambar 18 di atas memperlihatkan tampilan output pada serial monitor pengiriman SMS pada saat sistem mendeteksi adanya kecelakaan. Pada gambar 19 menunjukkan tampilan notifikasi SMS yang diterima oleh nomor yang dituju oleh sistem.

G. Hasil Uji Keseluruhan Alat

Pada bagian ini, dilakukan pengujian terhadap sistem kerja keseluruhan helm. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen, mulai dari akuisisi data sensor MPU6050 dan sensor FSR, pengolahan data oleh sistem *fuzzy logic*, serta mekanisme pengiriman lokasi dan pesan notifikasi SMS melalui modul SIM800L. Penilaian terhadap kinerja sistem dilakukan dengan memperhatikan tingkat akurasi deteksi kecelakaan dan kemampuan respons dalam mendeteksi kejadian kecelakaan. Diagram alir yang ditampilkan pada Gambar 2 memberikan gambaran visual alur operasional sistem deteksi kecelakaan yang dirancang. Proses dimulai dengan pembacaan data dari sensor MPU6050 yang berfungsi untuk mendeteksi sudut kemiringan kepala serta perubahan kecepatan sudut gerakan mendadak, serta data mentah hasil deteksi dari sensor FSR untuk mendeteksi benturan yang dihasilkan oleh kepala pada sensor yang terletak pada bagian kiri dan kanan dalam helm. Jika sensor mendeteksi adanya benturan, sistem akan mengambil data lokasi helm dari modul GPS. Selanjutnya, modul SIM800L secara otomatis mengirimkan notifikasi SMS yang berisi detail kecelakaan dan koordinat lokasi kepada penerima yang telah ditentukan pada *smartphone*. Setelah pesan terkirim, sistem akan kembali ke mode pemantauan.



Gambar 20. Tampilan notifikasi SMS

Gambar 20 di atas menunjukkan SMS notifikasi kecelakaan pada *smartphone* berisi informasi deteksi kecelakaan, klasifikasi benturan yang diterima oleh helm, serta titik lokasi dan *link google maps* yang menunjukkan di mana sistem mendeteksi terjadinya kecelakaan.

IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa helm pintar untuk deteksi kecelakaan berhasil dikembangkan. Sistem ini mengintegrasikan sensor MPU6050 untuk memantau gerakan ekstrem dan sensor FSR untuk mendeteksi gaya benturan. *Fuzzy logic* digunakan untuk meningkatkan akurasi dalam membedakan antara gerakan normal dan indikasi kecelakaan, sehingga dapat meminimalkan alarm palsu dan meningkatkan ketepatan deteksi. Ketika kecelakaan terdeteksi, modul GPS mendapatkan lokasi terjadinya kecelakaan, dan modul SIM800L mengirimkan informasi tersebut dalam bentuk SMS kepada pihak terkait. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan akurasi yang baik sebesar 88,89% dalam mengklasifikasikan kondisi pengendara, dengan metrik khusus untuk kelas "Aman" menunjukkan presisi sebesar 87,5% dan *recall* sebesar 93,33%, sedangkan kelas "Potensi Kecelakaan" mencapai 83,33% baik untuk presisi maupun *recall*. Kelas "Kecelakaan" menunjukkan presisi tertinggi sebesar 96,43% dan *recall* sebesar 90%. Integrasi sensor, GPS, dan *fuzzy logic* ini memberikan solusi yang lebih responsif, untuk mendeteksi kecelakaan pada pengendara sepeda motor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Jiang, K. K. R. Yuen, and E. W. M. Lee, "Analysis of motorcycle accidents using association rule mining-based framework with parameter optimization and GIS technology," *J Safety Res*, vol. 75, pp. 292–309, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.09.004>.
- [2] G. Yannis, D. Nikolaou, A. Laiou, Y. A. Stürmer, I. Buttler, and D. Jankowska-Karpa, "Vulnerable road users: Cross-cultural perspectives on performance and attitudes," *IATSS Research*, vol. 44, no. 3, pp. 220–229, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2020.08.006>.
- [3] A. Afif Mauludi, Z. Djunaidi, and L. Saiful Arif, "Perilaku Berisiko Sebagai Faktor Penyebab Kecelakaan Pada Pengemudi Sepeda Motor Komersial: Systematic Review," *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan (Indonesian Journal of Road Safety)*, vol. 8, no. 1, pp. 12–25, Jun. 2021, doi: 10.46447/kjtj.v8i1.307.
- [4] A. Darmawan Sidik, A. Ansawarman, K. Kunci, J. Kendaraan Bermotor, M. Regresi, and F. Jalan, "Prediksi Jumlah Kendaraan Bermotor Menggunakan Machine Learning," *Formosa Journal of Multidisciplinary Research (FJMR)*, vol. 1, no. 3, pp. 559–568, 2022, doi: 10.55927.
- [5] K. Adelya, S. Jaksa, and I. Hasanah, "Analisis Pengaruh Pengetahuan dan Kesadaran Pengemudi Terhadap Kepatuhan Perilaku Safety Riding Pada Pengemudi Ojek Online," *Galen: Jurnal Riset Ilmu Farmasi dan Kesehatan*, vol. 1, no. 2, pp. 87–100, 2025.
- [6] L. Tana, D. Delima, N. Kusumawardani, and L. Indrawati, "Helmet use behavior and its relation to head injury of road traffic accident in Indonesia (Basic Health Research, 2018)," *Health Science Journal of Indonesia*, vol. 12, no. 1, pp. 56–65, Jun. 2021, doi: 10.22435/hsji.v12i1.4655.
- [7] T. Nur Alifah and I. Puspari, "Rancang Bangun Alat Deteksi Kecelakaan Sepeda Motor Berbasis Exponential Smoothing," *Journal of Technology and Informatic (JoTI)*, vol. 1, no. 2.
- [8] P. A. Putro, K. Pinaridi, A. Ramadhan, A. S. R. Zein, and Y. Nurfalah, "Calibration and Signal Processing of MPU6050 Sensor to Improve Navigation Stability of Autonomous Underwater Vehicle (AUV)," *TIME in Physics*, vol. 3, no. 1, pp. 31–44, Mar. 2025, doi: 10.11594/timeinphys.2025.v3i1p31-44.
- [9] D. RACHMADINA, "IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY DALAM SISTEM IOT UNTUK DETEKSI DINI ASAP DAN KEBAKARAN DALAM RUANGAN," Universitas Nasional, 2025.
- [10] A. M. Soka, "TA: Rancang Bangun Helm Pendeteksi Kecelakaan Lalu Lintas Serta Informasi Lokasi dan Tingkat Benturan Menggunakan Arduino Uno," Institut Bisnis dan Informatika Stikom Surabaya, 2019.
- [11] M. A. Nugroho and S. Sumaryo, "DESAIN DAN IMPLEMENTASI HELM PINTAR DENGAN FITUR BLUETOOTH DESIGN AND IMPLEMENTATION SMART HELMET WITH BLUETOOTH."
- [12] P. Kanani and M. Padole, "Real-time Location Tracker for Critical Health Patient using Arduino, GPS Neo6m and GSM Sim800L in Health Care," in *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, ICICCS 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2020, pp. 242–249. doi: 10.1109/ICICCS48265.2020.9121128.
- [13] J. M. Belman-Flores, D. A. Rodríguez-Valderrama, S. Ledesma, J. J. García-Pabón, D. Hernández, and D. M. Pardo-Cely, "A Review on Applications of Fuzzy Logic Control for Refrigeration Systems," Feb. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/app12031302.
- [14] A. Bressane, A. J. da S. Garcia, M. V. de Castro, S. D. Xerfan, G. Ruas, and R. G. Negri, "Fuzzy Machine Learning Applications in Environmental Engineering: Does the Ability to Deal with Uncertainty Really Matter?," Jun. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su16114525.
- [15] D. Anjani, D. Novianti, and Y. Bachtiar, "Prediksi Efisien Waktu Tempuh Mobil Pengangkut CPO Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani," *Journal of Informatics Management and Information Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 164–175, 2024, doi: 10.47065/jimat.v4i4.402.
- [16] J. Andreas, M. Fathurahman, and D. B. Utami, "Analisis Tingkat Akurasi NEO-6M dengan Google Maps".

- [17] I. Markoulidakis, I. Rallis, I. Georgoulas, G. Kopsiaftis, A. Doulamis, and N. Doulamis, "Multiclass Confusion Matrix Reduction Method and Its Application on Net Promoter Score Classification Problem," *Technologies (Basel)*, vol. 9, no. 4, Dec. 2021, doi: 10.3390/technologies9040081.