

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA

5.1 Tujuan Pengukuran dan Pengujian

Pengukuran dan pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem deteksi kecepatan kendaraan berbasis sensor radar mmWave DFRobot C4001, mikrokontroler ESP32, dan Arduino Nano yang telah dirancang dapat bekerja sesuai dengan tujuan perancangan. Tahap ini menjadi sangat penting karena hasil pengujian akan menentukan tingkat keberhasilan sistem dalam mendeteksi, mengolah, dan menampilkan data kecepatan kendaraan baik secara lokal melalui LED Dot Matrix maupun secara online melalui platform IoT ThingSpeak dan aplikasi monitoring smartphone.

Secara lebih rinci, tujuan dari kegiatan pengukuran dan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Memverifikasi Kinerja Sensor mmWave C4001

Memastikan bahwa sensor radar mmWave C4001 mampu membaca kecepatan kendaraan pada berbagai kondisi, termasuk variasi jarak, sudut pemasangan, dan kecepatan kendaraan yang berbeda.

2. Menguji Kemampuan Pemrosesan Data pada ESP32

Mengukur kemampuan ESP32 dalam menerima data dari sensor, memprosesnya menggunakan algoritma median filter untuk mengurangi noise, mengonversi dari satuan meter per detik (m/s) ke kilometer per jam (km/h), serta mengirimkan data ke dua jalur keluaran yaitu Arduino Nano dan platform IoT.

3. Mengukur Kualitas Tampilan LED Dot Matrix

Memastikan bahwa data kecepatan yang dikirim dari ESP32 ke Arduino Nano dapat ditampilkan pada LED Dot Matrix P10 dengan angka yang besar, jelas, dan mudah dibaca pada jarak tertentu.

4. Menilai Kestabilan Pengiriman Data IoT

Menguji kestabilan koneksi Wi-Fi pada ESP32 dalam mengirimkan data ke ThingSpeak dan aplikasi monitoring smartphone, serta mengukur waktu tunda (delay) pengiriman data.

5. Mengukur Perbedaan antara Kecepatan Hasil Pengukuran dan Kecepatan Referensi

Membandingkan hasil pengukuran alat dengan kecepatan referensi dari speedometer kendaraan atau alat ukur kecepatan standar, untuk mengetahui tingkat akurasi sistem.

6. Menganalisis Performa Keseluruhan Sistem

Menilai kinerja sistem secara keseluruhan ketika semua komponen bekerja bersama dalam kondisi real-time dan berulang.

5.2 Hasil dan Analisa Uji Validasi Alat

5.2.1 Tujuan Validasi

Tujuan dari validasi ini adalah untuk mengukur sejauh mana alat pengukur kecepatan yang dikembangkan mampu memberikan hasil yang akurat dan dapat dipercaya ketika digunakan untuk mengukur kecepatan kendaraan. Validasi dilakukan dengan membandingkan antara kecepatan referensi yang diketahui dengan hasil pembacaan alat, guna mengetahui selisih, error, dan ketepatan sistem peringatan (lampu warning).

5.2.2 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menggunakan sumber kecepatan referensi yang telah diketahui nilainya. Setiap nilai referensi digunakan sebagai acuan untuk dibandingkan dengan pembacaan alat. Pengujian dilakukan pada sembilan variasi

kecepatan yang berbeda, dari kecepatan rendah hingga tinggi. Parameter yang diukur meliputi:

1. Kecepatan referensi (standar)
2. Kecepatan hasil alat
3. Selisih absolut antara keduanya
4. Persentase error
5. Jarak mulai terbacanya objek
6. Status lampu peringatan (warning)

5.2.3 Rumus Perhitungan

Untuk memperoleh data kuantitatif yang valid, digunakan beberapa rumus dasar pengukuran, antara lain:

Selisih Absolut ($|\Delta|$):

$$|\Delta| = |\text{Hasil Alat-Referensi}| \quad (5.1)$$

Error Relatif (%):

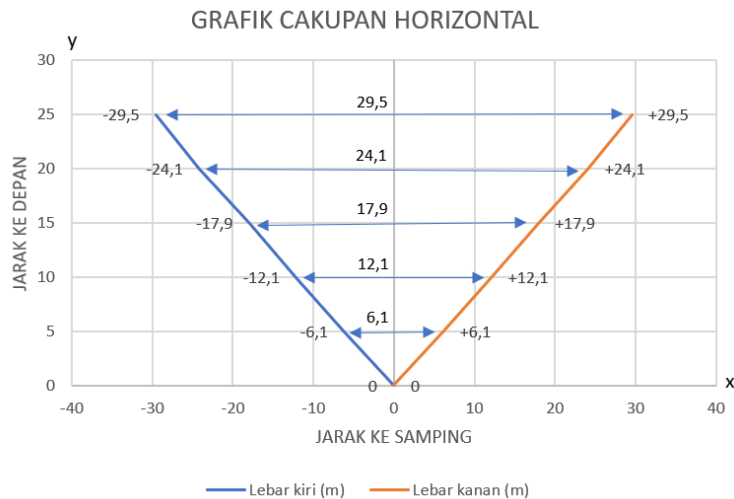
$$E\% = \frac{|Valat - Vacuan|}{Vacuan} \times 100\% \quad (5.2)$$

Rata-rata Error:

$$MAPE = \frac{\Sigma E\%}{Jumlah\ data} \quad (5.2)$$

5.2.4 Cakupan Deteksi Sensor

1. Cakupan Deteksi Horizontal



Gambar 5. 1 Cakupan Deteksi Horizontal

Grafik ini menunjukkan cakupan deteksi horizontal dari sensor yang dipasang pada ketinggian 0,6 meter dari permukaan tanah. Sumbu horizontal menunjukkan jarak ke samping (m), sementara sumbu vertikal menunjukkan jarak ke depan (m) dari posisi sensor, yang terletak di titik (0,0). Garis biru menunjukkan cakupan deteksi ke arah kiri, dan garis oranye menunjukkan cakupan ke arah kanan. Area yang dibatasi oleh kedua garis tersebut merupakan zona deteksi aktif sensor, sedangkan area di luar garis cakupan merupakan titik buta (blind spot) yang tidak dapat dideteksi oleh sensor. Dari grafik terlihat bahwa sensor memiliki jangkauan maksimal horizontal sekitar $\pm 29,5$ meter ke samping dan hingga 25 meter ke depan, dengan distribusi cakupan yang simetris pada kedua sisi.

Berikut merupakan data pengujian pengukuran grafik secara horizontal

Tabel 5. 1 Pengujian Cakupan Horizontal

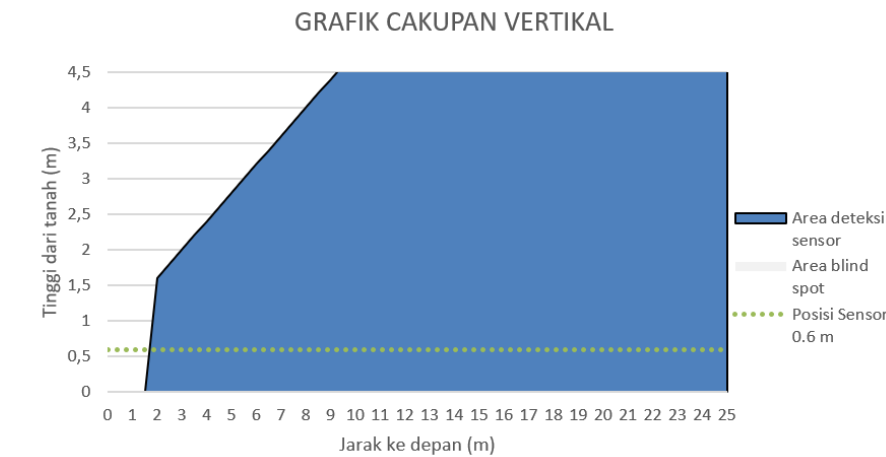
Jarak Terbaca	Kecepatan Referensi (km/h)	Kecepatan Terbaca (km/h)	Error (%)
6.1	25	25.59	2.36%

12.1	25	26.3	5.20%
17.9	25	27.1	8.40%
24.1	25	27.91	11.64%
29.5	25	28.74	14.96%
Rata-rata Error (%)		8.51%	

Berdasarkan data yang diberikan, terlihat bahwa error pembacaan kecepatan cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak pengukuran. Pada jarak yang lebih pendek, seperti 5 meter, error yang terukur relatif kecil (2,36%), namun meningkat menjadi 14,96% pada jarak 25 meter. Hal ini menunjukkan bahwa akurasi sensor menurun pada jarak yang lebih jauh.

Peningkatan error ini bisa jadi disebabkan oleh keterbatasan sensor dalam mengukur dengan presisi pada jarak yang lebih panjang. Kemungkinan lainnya adalah faktor lingkungan yang mempengaruhi kinerja sensor pada jarak jauh. Rata-rata error sebesar 8,51% menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup konsisten antara kecepatan yang seharusnya dan kecepatan yang terbaca oleh sensor.

2. Cakupan Deteksi Vertikal



Gambar 5. 2 Cakupan Deteksi Vertikal

Grafik ini menunjukkan cakupan deteksi vertikal dari sensor yang dipasang pada ketinggian 0,6 meter dari permukaan tanah. Sumbu horizontal menunjukkan jarak ke depan (m), dan sumbu vertikal menunjukkan tinggi dari permukaan tanah (m). Area berwarna biru merepresentasikan zona yang terdeteksi oleh sensor, sedangkan area di luar zona tersebut merupakan titik buta (blind spot) vertikal yang tidak terjangkau oleh sensor.

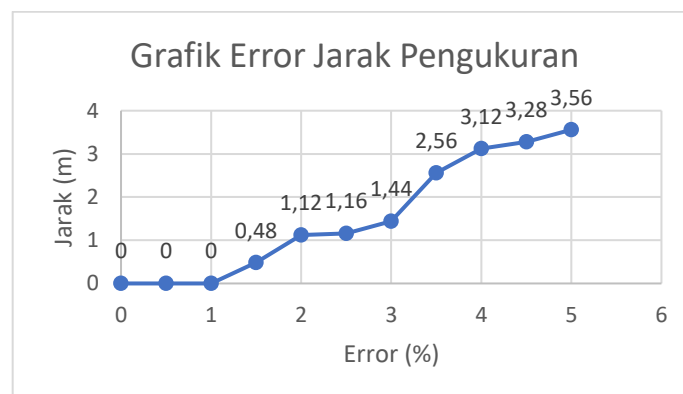
Dari grafik terlihat bahwa terdapat titik buta di bagian bawah cakupan sensor, yaitu pada area dengan tinggi kurang dari $\pm 1,65$ meter dan jarak ke depan kurang dari $\pm 1,5$ meter. Artinya, objek yang berada terlalu dekat dengan sensor dan terlalu rendah (misalnya di bawah tinggi 1,65 meter) tidak akan terdeteksi. Dari grafik juga terlihat bahwa cakupan vertikal meningkat seiring dengan bertambahnya jarak ke depan hingga mencapai 25 meter dari sensor.

5.2.5 Tabel dan Analisa Validasi Jarak Pengukuran

Untuk mengetahui seberapa error pembacaan kecepatan berdasarkan jarak antara sensor dan objek yang dibaca, maka dilakukan pengujian seperti dibawah ini:

Tabel 5. 2 Validasi Jarak Pengukuran

Jarak (d)	Kecepatan Referensi (km/h)	Kecepatan Terbaca (km/h)	Error (%)	Status
0.0	25	-	-	Blind spot
0.5	25	-	-	Blind spot
1.0	25	-	-	Blind spot
1.5	25	25.12	0.48	Valid
2.0	25	25.28	1.12	Valid
2.5	25	25.36	1.16	Valid
3.0	25	25.29	1.44	Valid
3.5	25	25.64	2.56	Valid
4.0	25	25.78	3.12	Valid
4.5	25	25.82	3.28	Valid
5.0	25	25.89	3.56	Valid
Rata-rata Error (%)		2.09		



Gambar 5. 3 Error Jarak Pengukuran

Berdasarkan data yang diperoleh, sensor radar mmWave DFRobot C4001 menunjukkan kinerja yang baik dalam mendeteksi kecepatan kendaraan mulai dari jarak 1.5 meter hingga 5 meter. Pada jarak 0 hingga 1 meter, sensor tidak dapat mendeteksi kendaraan, yang menunjukkan adanya titik buta pada jarak tersebut. Setelah 1.5 meter, sensor mulai memberikan pembacaan kecepatan yang akurat dengan error yang kecil, berkisar antara 0.48% hingga 3.56%, meskipun error sedikit meningkat pada jarak lebih jauh. Secara keseluruhan, sensor ini dapat diandalkan untuk pengukuran kecepatan kendaraan dalam kisaran jarak yang lebih besar dari 2 meter, dengan akurasi yang cukup baik untuk aplikasi deteksi kecepatan di lingkungan yang lebih luas.

5.2.6 Tabel dan Analisa Uji Validasi Pengukuran

Untuk menguji seberapa akurat alat sistem deteksi kecepatan kendaraan ini dalam beroperasi dilakukan pengujian sebagai berikut:

Tabel 5. 3 Uji Validasi Pengukuran

No	Kecepatan Referensi (km/h)	Kecepatan Hasil Alat (km/h)	Selisih Absolut (km/h)	Error (%)	Jarak (d)	Lampu Warning
1	15	15.55	0.55	3.67	8.5	OFF
2	24	24.38	0.38	1.58	4.5	OFF
3	31	31.94	0.94	3.03	7.2	ON
4	19	19.66	0.66	3.47	6.0	OFF
5	28	28.43	0.43	1.54	3.8	OFF
6	35	35.45	0.45	1.29	3.0	ON
7	18	18.45	0.45	2.50	5.2	OFF
8	28	28.19	0.19	0.68	3.5	OFF

9	33	33.28	0.28	0.85	3.7	ON
Rata Rata Error (%)			2.07			

Perhitungan menggunakan rumus:

Selisih Absolut = $|\Delta| = |\text{Hasil Alat-Referensi}|$

$$= |15.55 - 15|$$

$$= 0,55$$

$$\text{Error} = E\% = \frac{|\text{Valat} - \text{Vreferensi}|}{\text{Vreferensi}} \times 100\%$$

$$= \frac{0.55}{15} \times 100\%$$

$$= 3,67\%$$

Rata-rata Error =

$$\text{MAPE} = \frac{\Sigma E\%}{\text{Jumlah data}}$$

$$= \frac{3.67+1.58+3.03+3.47+1.54+1.29+2.50+0.68+0.85}{9}$$

$$= 2.07\%$$

5.2.7 Analisa Hasil Uji Validasi

Hasil validasi menunjukkan bahwa alat bekerja dengan akurasi yang baik. Rata-rata error sebesar 2,07% menandakan bahwa deviasi antara kecepatan hasil alat dengan kecepatan referensi sangat kecil, sehingga sistem pengukuran ini memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Variasi jarak deteksi sensor yang berkisar antara 3,0 hingga 8,5 meter masih berada dalam batas efektif kerja sensor radar mmWave yang digunakan, meskipun jarak deteksi yang lebih jauh cenderung

memiliki error yang sedikit lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa alat dapat mendeteksi kendaraan dengan baik pada berbagai jarak.

Sistem lampu peringatan (warning light) juga berfungsi dengan baik, di mana lampu menyala secara otomatis saat kecepatan kendaraan melewati batas tertentu. Dengan demikian, alat ini tidak hanya mampu mengukur kecepatan secara akurat tetapi juga memberikan peringatan visual yang efektif untuk meningkatkan keselamatan

Kategori kecepatan juga sesuai dengan batasan yang telah ditentukan, yaitu:

- Rendah: < 20 km/h
- Normal: 20–30 km/h
- Tinggi: > 30 km/h

Semua klasifikasi ini konsisten dengan data aktual yang diperoleh.

5.2.8 Kesimpulan Analisis Uji Validasi

Secara keseluruhan, hasil validasi membuktikan bahwa alat layak digunakan dalam pengukuran kecepatan kendaraan. Tingkat akurasi sudah berada dalam standar yang dapat diterima secara umum ($< 5\%$ error). Fungsi logika dan sistem peringatan juga bekerja secara optimal.

5.3 Hasil dan Analisa Uji Lapangan Alat

Setelah proses perancangan dan validasi alat selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengujian di lapangan (field testing). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui performa alat dalam kondisi nyata, serta menilai akurasi dan keandalan sistem dalam membaca kecepatan kendaraan dan memberikan peringatan sesuai dengan klasifikasi kecepatan yang telah ditentukan.

Pengujian dilakukan selama tujuh hari berturut-turut, yakni dari tanggal 30 Agustus 2025 sampai 5 September 2025 dengan total data 724 kecepatan kendaraan yang berhasil direkam. Lokasi pengujian adalah di sebuah lingkungan perumahan yang tidak terlalu ramai, dengan karakteristik lalu lintas yang tenang dan mayoritas

pengguna jalan adalah warga lokal menggunakan kendaraan pribadi seperti sepeda motor dan mobil.

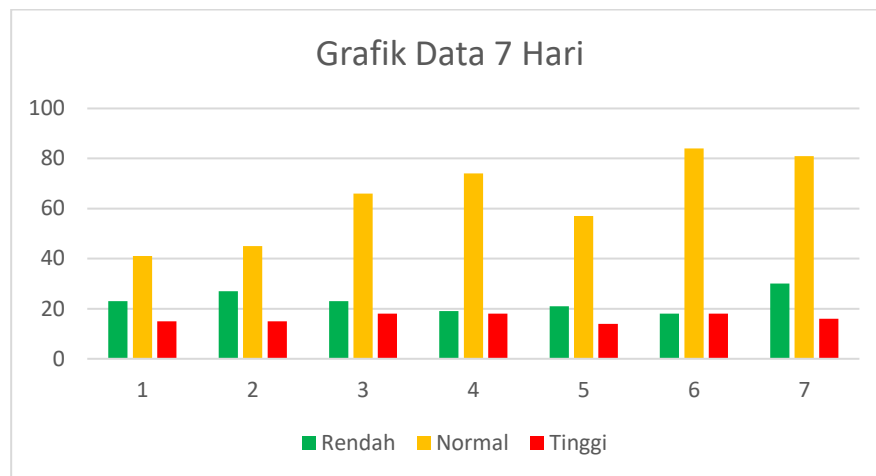
Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk mensimulasikan penggunaan alat dalam kondisi realistis dan relevan, karena alat ini memang dirancang untuk digunakan di jalan-jalan dengan lalu lintas ringan.

5.3.1 Hasil Data Pengujian Selama 7 Hari

Pengujian ini dilakukan selama tujuh hari berturut-turut dan sebanyak 723 kecepatan yang berhasil direkam oleh alat tersebut. Pengujian dimulai pada pukul 08.00 hingga 21.00 WIB dengan kategori yang mengelompokkan hasil ke dalam tiga tingkatan yaitu rendah, normal, dan tinggi.

Tabel 5. 4 Data Pengujian 7 Hari

Hari	Kategori		
	Rendah	Normal	Tinggi
1	23	41	15
2	27	45	15
3	23	66	18
4	19	74	18
5	21	57	14
6	18	84	18
7	30	81	16
Total	723		



Gambar 5. 4 Data Pengujian 7 hari

Berdasarkan hasil pengujian selama tujuh hari, sebagian besar kendaraan melaju dengan kecepatan normal, terlihat dari dominannya kategori Normal pada setiap hari. Namun, masih ada kendaraan yang melaju dengan kecepatan tinggi meskipun jumlahnya lebih sedikit. Kategori Rendah menunjukkan variasi yang lebih besar, terutama pada hari pertama dan kedua, yang mungkin dipengaruhi oleh kondisi lalu lintas atau faktor eksternal lainnya. Secara keseluruhan, pengujian ini menunjukkan perlunya peningkatan pengawasan terhadap kendaraan yang melaju dengan kecepatan tinggi guna meningkatkan keselamatan lalu lintas, dengan penggunaan sistem peringatan yang lebih intensif.

Grafik menunjukkan mayoritas kendaraan melaju dengan kecepatan Normal (kuning) setiap harinya. Kategori Tinggi (merah) stabil namun sedikit meningkat pada hari ketiga dan keempat. Kategori Rendah (hijau) menunjukkan variasi besar, terutama pada hari pertama dan kedua. Secara keseluruhan, meskipun banyak kendaraan dengan kecepatan normal, perhatian lebih diperlukan untuk kendaraan yang melaju terlalu cepat guna menjaga keselamatan lalu lintas.

5.3.2 Kesimpulan Analisa Uji Lapangan

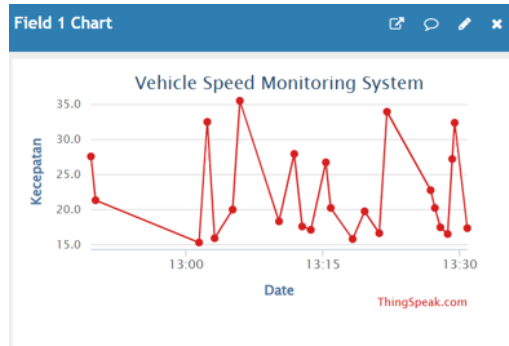
Hasil pengujian yang dilakukan selama tujuh hari menunjukkan peningkatan yang konsisten dalam mendeteksi kendaraan yang melampaui batas kecepatan yang ditetapkan, dengan alat memberikan peringatan yang semakin

efektif. Pada awal pengujian, kategori Normal mendominasi, namun kategori Tinggi juga tercatat cukup sering, menunjukkan bahwa beberapa kendaraan melebihi batas kecepatan yang diharapkan. Pada hari pertama dan kedua, peringatan pada kategori Tinggi sering muncul, menandakan bahwa alat sudah mulai berfungsi dengan baik, meskipun ada variasi dalam kondisi lalu lintas.

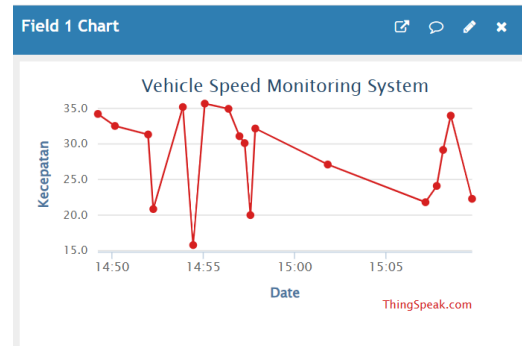
Seiring berjalannya waktu, kategori Normal semakin mendominasi, dan jumlah kendaraan yang tercatat dalam kategori Tinggi menurun secara signifikan, yang mengindikasikan bahwa sistem menjadi lebih efisien dalam mendeteksi kendaraan yang melampaui batas kecepatan. Pada hari ketiga hingga hari ketujuh, variasi dalam kategori Rendah dan Tinggi semakin berkurang, dan sistem menunjukkan stabilitas yang lebih baik dalam memberikan peringatan. Pada hari ketujuh, meskipun kategori Normal tetap mendominasi, kategori Tinggi masih ada, tetapi peringatan yang diberikan sudah lebih jarang, menandakan bahwa sistem semakin akurat dalam mendeteksi dan memberikan peringatan kepada kendaraan yang berkecepatan tinggi.

Alat ini efektif dalam mendeteksi dan memberikan peringatan kepada pengendara yang melebihi batas kecepatan yang ditetapkan. Dengan memantau kecepatan kendaraan dalam tiga kategori rendah, normal, dan tinggi. Alat ini fokus pada kendaraan yang melaju di atas batas kecepatan (kategori Tinggi) dan memberikan peringatan melalui lampu LED dan buzzer. Alat ini semakin efisien seiring waktu, dengan peningkatan akurasi dan konsistensi dalam memberikan peringatan, serta semakin sedikitnya kendaraan yang melampaui batas kecepatan.

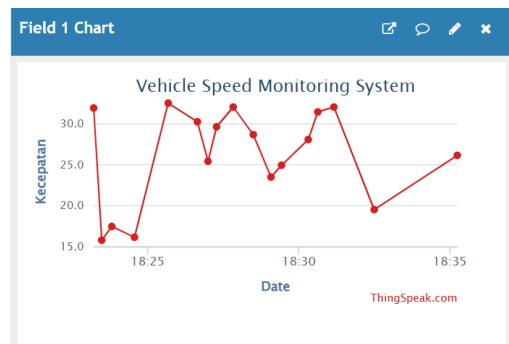
5.3.3 Pengambilan Data ThingSpeak



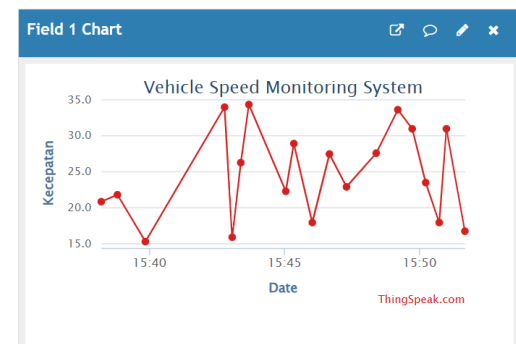
Gambar 5. 5 Hari Ke-1



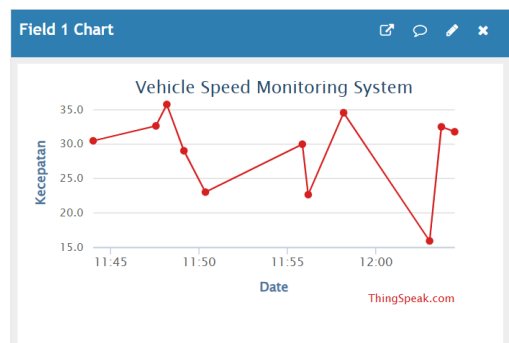
Gambar 5. 6 Hari Ke-2



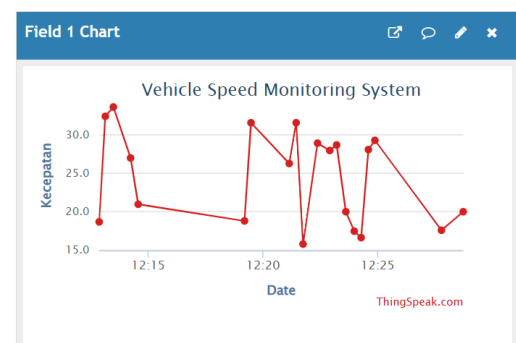
Gambar 5. 7 Hari Ke-3



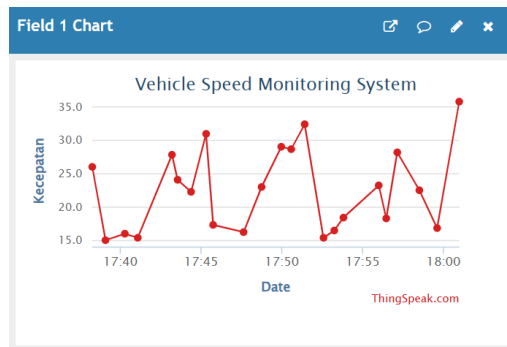
Gambar 5. 8 Hari Ke-4



Gambar 5. 9 Hari Ke-5



Gambar 5. 10 Hari Ke-6



Gambar 5.11 Hari Ke-7