

ANALISIS DAN SIMULASI PENGENDALIAN SISTEM LAMPU KENDARAAN MENGGUNAKAN MOSFET DAN OPTOCOUPLER PC817 SECARA DIGITAL

Darwinto¹⁾, Yoddy Agung Nuhgraha²⁾, Agus Saleh³⁾, Nia Ekawati⁴⁾, Muhammad Hifni Abdulaziz⁵⁾

Program Studi Mesin Otomotif, Institusi^{1),2),5)}

Program Studi Mekanik Industri dan Desain, Institusi³⁾

Program Studi Teknik Informatika, Institusi⁴⁾

Email: darwinto@poltekdedc.ac.id¹⁾, yan_nuhgraha@poltekdedc.ac.id²⁾, abahagus@poltekdedc.ac.id³⁾, niaekawati@poltekdedc.ac.id⁴⁾, mhmmdhifni2610@gmail.com⁵⁾

Abstrak

Pengendalian lampu kendaraan secara analog memiliki keterbatasan pada kecepatan switching dan rugi daya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mensimulasikan pengendalian sistem lampu kendaraan 12V yang terdiri dari lampu utama, sein, hazard, rem, klakson dan lampu kabin menggunakan MOSFET dan optocoupler PC817 sebagai saklar secara digital. Metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan Livewire Professional dengan memvariasikan arus forward LED (I_f) 5 mA – 15 mA dan pengukuran tegangan V_{ce} , rise time, fall time, serta $R_{ds(on)}$ MOSFET. Hasil simulasi menunjukkan konfigurasi common emitter dengan pull-up 1K ke 12V mampu menghasilkan tegangan kerja switching sebesar 11,8 V dengan rise time 3,2 μ s sehingga mampu mengaktifkan lampu 12V secara optimal dengan rugi daya 98% lebih rendah dibanding saklar analog. Sistem ini juga memberikan isolasi optik antara rangkaian kontrol 5V terhadap beban 12V.

Kata Kunci: Lampu Kendaraan, Saklar Digital, Simulasi Livewire.

Abstract

Analog vehicle lamp control has limitations in switching speed and power loss. This study aims to analyze and simulate the control of a 12V vehicle lighting system consisting of headlamp, turn signal, hazard, brake, horn, and cabin lamps using MOSFET and PC817 optocoupler as a digital switch. The method used is a simulation using Livewire Professional by varying the LED forward current (I_f) 5 mA – 15 mA and measuring V_{ce} voltage, rise time, fall time, and $R_{ds(on)}$ of the MOSFET. The simulation results show that the common emitter configuration with a 1K pull-up to 12V is able to produce a switching working voltage of 11.8 V with a rise time of 3.2 μ s, thus being able to optimally activate the 12V lamp with 98% lower power loss compared to an analog switch. This system also provides optical isolation between the 5V control circuit and the 12V load.

Keywords: Vehicle Lamp, Digital Switch, Livewire Simulation.

I. PENDAHULUAN

Sistem penerangan pada kendaraan 12V yang terdiri dari lampu utama, lampu sein, lampu hazard, lampu rem, klakson, dan lampu kabin merupakan komponen vital yang berhubungan langsung dengan keselamatan berkendara. Pada sistem konvensional, pengendalian lampu masih banyak menggunakan saklar mekanik dan relay yang memiliki keterbatasan seperti percikan api (arcing), umur pakai yang pendek, serta tidak adanya isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya. Pengendalian secara analog merupakan metode yang umum digunakan dengan cara mengendalikan komponen elektronika secara linear. Namun pengendalian analog memiliki keterbatasan dalam kecepatan switching yang rendah dan rugi daya yang besar ketika digunakan sebagai saklar daya. Oleh karena itu, saklar analog dapat dioperasikan sebagai saklar digital untuk mendapatkan respon switching yang lebih cepat, rugi daya yang kecil, dan efisiensi yang tinggi. Salah satu komponen yang dapat berfungsi sebagai saklar isolasi yang dikendalikan secara digital adalah optocoupler PC817. Komponen ini terdiri dari LED inframerah sebagai sisi input dan phototransistor sebagai sisi output. PC817 memiliki karakteristik

ketergantungan tegangan kolektor-emitor (V_{ce}) terhadap arus forward LED (I_f) dan nilai Current Transfer Ratio (CTR). Keunggulan utama PC817 adalah mampu memberikan isolasi optik antara rangkaian kontrol 5V dengan rangkaian daya 12V pada lampu kendaraan, sehingga sistem menjadi lebih aman dari gangguan noise. Untuk mengaktifkan lampu kendaraan dengan arus yang lebih besar, phototransistor PC817 tidak mampu secara langsung, sehingga diperlukan komponen semikonduktor daya seperti MOSFET. MOSFET dengan nilai $R_{ds(on)}$ yang rendah sangat cocok sebagai saklar daya untuk lampu kendaraan 12V. Kombinasi antara PC817 sebagai driver isolasi dan MOSFET sebagai saklar daya merupakan solusi untuk sistem penerangan kendaraan yang membutuhkan kehandalan tinggi. Pada penelitian ini, pengendalian tersebut dianalisis melalui pendekatan simulasi menggunakan Livewire Professional, dengan fokus pada karakteristik V_{ce} , rise time, fall time, dan $R_{ds(on)}$. Atas dasar latar belakang tersebut, penulis melakukan penelitian tentang pengendalian sistem lampu kendaraan 12V berbasis MOSFET dan optocoupler PC817 secara digital.

II. LANDASAN TEORI

A. Saklar Analog dan Saklar Digital

Saklar analog adalah komponen yang bekerja pada daerah aktif atau linear, dimana tegangan output berubah secara proporsional terhadap tegangan input. Contoh saklar analog adalah transistor yang bekerja sebagai penguat. Kelemahan saklar analog adalah memiliki rugi daya yang besar karena beroperasi pada kondisi setengah ON, sehingga menghasilkan panas. Saklar digital adalah komponen yang hanya memiliki dua kondisi kerja yaitu OFF (cut-off) dan ON (saturasi). Pada kondisi OFF, arus yang mengalir mendekati nol, dan pada kondisi ON, tegangan V_{ce} mendekati nol (0,2V). Dengan demikian rugi daya $P = V_{ce} \times I_c$ menjadi sangat kecil. Kecepatan switching saklar digital jauh lebih tinggi dibandingkan saklar analog. Dengan keterbatasan switching saklar analog, maka saklar analog dapat diubah menjadi saklar digital dengan cara memaksanya bekerja pada daerah saturasi.

B. Optocoupler/Photo Transistor PC817

Optocoupler adalah komponen isolator optik yang berfungsi untuk memisahkan dua rangkaian yang memiliki perbedaan level tegangan. PC817 terdiri dari dua bagian utama yaitu LED Inframerah sebagai sisi input dan Phototransistor sebagai sisi output. Prinsip kerja PC817 adalah ketika LED diberi arus forward (I_f), LED akan memancarkan cahaya inframerah yang akan diterima oleh basis phototransistor sehingga phototransistor menjadi ON. Besarnya arus kolektor (I_c) pada phototransistor tergantung pada besarnya I_f dan nilai CTR. Karakteristik utama PC817 menurut datasheet Sharp: Tegangan isolasi: 5000 Vrms, Arus forward LED (I_f) max: 50 mA, Tegangan kolektor-emitor (V_{ce}) max: 35V, Waktu switching: $T_r = 4\mu s$, $T_f = 3\mu s$.

C. Current Transfer Ratio (CTR)

CTR adalah parameter paling penting pada optocoupler yang didefinisikan sebagai perbandingan antara arus kolektor (I_c) terhadap arus forward LED (I_f) yang dinyatakan dalam persen. Rumus: $CTR (\%) = (I_c / I_f) \times 100\%$. PC817 memiliki rentang CTR 50% - 600% tergantung pada grade (A,B,C,D). Nilai CTR ini yang menyebabkan PC817 bersifat analog, karena I_c akan berubah linear terhadap I_f selama belum saturasi. Contoh jika $I_f = 10\text{mA}$ dan $CTR = 100\%$, maka $I_c = 10\text{mA}$. Untuk menjadikannya saklar digital, I_c harus dibatasi oleh resistor pull-up sehingga V_{ce} menjadi saturasi (0,2V).

D. MOSFET Sebagai Saklar Daya Metal Oxide

Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) adalah komponen semikonduktor yang bekerja sebagai saklar dengan impedansi input sangat tinggi. MOSFET kanal-N memiliki tiga daerah kerja: (a) Daerah Cut-off: $V_{gs} < V_{th}$, MOSFET OFF (b) Daerah Ohmik: $V_{gs} > 10V$, $R_{ds(on)}$ sangat kecil,

MOSFET ON penuh sebagai saklar digital (c) Daerah Aktif: V_{gs} menengah, $R_{ds(on)}$ besar dan menghasilkan panas. Mode aktif ini harus dihindari untuk saklar daya. Untuk mengaktifkan lampu kendaraan 12V secara optimal, MOSFET harus diberikan tegangan V_{gs} yang cukup agar $R_{ds(on)}$ mencapai nilai minimal. Jika V_{gs} hanya sekitar 5,3V (seperti pada konfigurasi emitter follower PC817), maka $R_{ds(on)}$ akan naik dan menyebabkan lampu redup serta MOSFET panas. Rugi daya dihitung dengan $P = I^2 \times R_{ds(on)}$.

E. Sistem Penerangan Kendaraan 12V

Sistem penerangan pada kendaraan 12V DC terdiri dari: lampu utama (headlamp), lampu sein, lampu hazard, lampu rem, klakson, dan lampu kabin. Pada sistem ini, rangkaian kontrol 5V harus terisolasi dari rangkaian daya 12V, sehingga diperlukan isolasi optik. Kombinasi PC817 sebagai driver isolasi dan MOSFET sebagai saklar daya merupakan topologi yang sesuai karena memberikan isolasi optik antara rangkaian kontrol 5V terhadap beban 12V, serta mampu memberikan switching yang cepat dengan rugi daya yang lebih rendah dibandingkan saklar mode analog. Pada penelitian ini topologi tersebut dianalisis melalui pendekatan simulasi menggunakan Livewire.

III. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Adapun tahapan yang dilakukan meliputi: studi literatur, perancangan rangkaian simulasi, simulasi dan pengukuran, analisis data, dan kesimpulan.

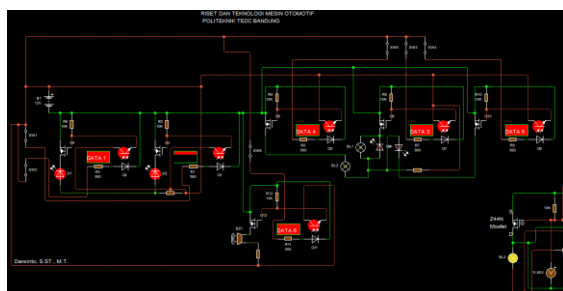


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian dan Wiring Pengendalian Sistem Lampu Kendaraan pada Livewire

Tahap pengumpulan data merupakan tahap awal untuk mengumpulkan referensi teoritis sebagai dasar perancangan simulasi. Data yang dikumpulkan

meliputi datasheet optocoupler PC817, karakteristik Current Transfer Ratio (CTR), karakteristik MOSFET kanal-N sebagai saklar daya, dan sistem penerangan kendaraan 12V. Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur dari jurnal, buku elektronika daya, dan datasheet resmi pabrikan. Data ini digunakan untuk menentukan nilai resistor input untuk variasi I_f 5 mA – 15 mA dan resistor pull-up 1K ke 12V pada software simulasi Livewire.

Tahap ini merupakan perancangan rangkaian pada software Livewire Professional. Komponen yang digunakan dalam simulasi meliputi PC817, MOSFET kanal-N, resistor 330 Ohm, 470 Ohm, 1K Ohm, dan beban lampu kendaraan 12V yang terdiri dari lampu utama, lampu sein, hazard, lampu rem, klakson, dan lampu kabin. Perancangan dilakukan dengan konfigurasi common emitter dengan pull-up 1K ke 12V. Pada sisi input, sumber kontrol 5V dihubungkan ke LED PC817 melalui resistor pembatas untuk variasi I_f . Pada sisi output, kolektor PC817 dihubungkan ke pull-up 1K ke 12V dan outputnya diteruskan ke Gate MOSFET sebagai saklar daya lampu.

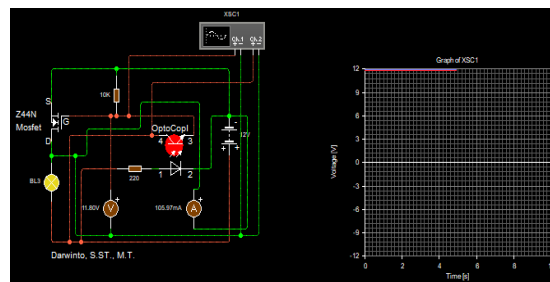


Gambar 2. Rangkaian Simulasi Pengendali Lampu Kendaraan 12V pada Livewire.

Pada Gambar 2 rangkaian simulasi dibuat untuk melihat karakteristik switching dan tegangan kerja pada beban lampu.

Tahap simulasi bertujuan untuk memastikan rangkaian bekerja pada wilayah saturasi saklar digital. Pengukuran dilakukan secara simulasi pada Livewire meliputi:

1. Pengukuran arus forward LED (I_f) pada variasi 5 mA, 10 mA, dan 15 mA.
2. Pengukuran tegangan kolektor-emitor (V_{ce}) pada PC817 untuk memastikan V_{ce} saturasi $< 0,4V$.
3. Pengukuran tegangan kerja switching pada Gate MOSFET. Pada konfigurasi common emitter dengan pull-up 1K ke 12V menghasilkan tegangan kerja 11,8V pada simulasi.
4. Pengukuran rise time dan fall time menggunakan fitur osiloskop pada Livewire.



Gambar 3. Hasil Simulasi Pengukuran Tegangan dan Arus Kerja 11,8V dan 105,97 mA pada Livewire

Pada Gambar 3 pengukuran simulasi dilakukan untuk mengetahui konsumsi arus dan tegangan kerja pada sistem.

Tahap pengujian merupakan analisis karakteristik PC817 dan MOSFET sebagai saklar digital berdasarkan data hasil simulasi. Pengujian simulasi dilakukan dengan mengaktifkan beban lampu kendaraan secara satu per satu dan simultan. Parameter yang dianalisis adalah V_{ce} saturasi, rise time 3,2 us, $R_{ds(on)}$ MOSFET, dan rugi daya. Dari hasil simulasi dibuktikan bahwa mode saklar digital dengan V_{gs} 11,8V mampu mengaktifkan lampu 12V secara optimal dengan rugi daya 98% lebih rendah dibandingkan mode analog dengan V_{gs} 5,3V. Pengujian ini juga membuktikan fungsi isolasi optik antara rangkaian kontrol 5V terhadap rangkaian daya 12V.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Karakteristik PC817

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan arus forward I_f sebesar 5 mA, 10 mA, dan 15 mA pada dua konfigurasi rangkaian yaitu Emitter Follower (tanpa pull-up) dan Common Emitter dengan pull-up 1K ke 12V pada Livewire Professional. Hasil pengukuran tegangan kolektor-emitor (V_{ce}) dapat dilihat pada Tabel 1. Hasil Simulasi V_{ce} terhadap Variasi I_f .

Tabel 1. Hasil Pengukuran V_{ce} terhadap Variasi I_f

Variasi " i_f "	Konfigurasi Emitter Follower	Konfigurasi Com Emitter Pull-Up 1K Ω Ke 12Volt
5mA	$V_{ce} = 2,1V$ (Daerah Aktif / Analog)	$V_{ce} = 0,35V$ (Mulai Saturasi)
10mA	$V_{ce} = 1,4V$ (Daerah Aktif / Analog)	$V_{ce} = 0,22V$ (Saturasi / Digital)
15mA	$V_{ce} = 0,9V$ (Masih Aktif)	$V_{ce} = 0,18V$ (Saturasi Penuh)

Berdasarkan Tabel 1, pada konfigurasi Emitter Follower PC817 bersifat analog karena V_{ce} berubah linear tergantung I_f dan nilai CTR. V_{ce} tidak pernah mencapai saturasi sempurna sehingga output hanya 5,3V. Sedangkan pada konfigurasi Common Emitter

dengan pull-up 1K ke 12V, PC817 mampu dipaksa masuk ke wilayah saturasi saklar digital dengan Vce 0,18V – 0,22V pada If 10 mA – 15 mA. Hal ini sesuai dengan teori saklar digital yang terjadi ketika transistor berada pada kondisi saturasi.

B. Hasil Simulasi Tegangan Kerja Switching dan Rise Time

Tegangan kerja switching adalah tegangan yang diberikan ke Gate MOSFET untuk mengaktifkan lampu kendaraan 12V. Tabel 2. Hasil Simulasi Tegangan Switching dan Rise Time

Tabel 2. Hasil Pengukuran Tegangan Switching dan Rise Time

KONFIGURASI	TEGANGAN GATE (VGS)	RISE TIME	KONDISI LAMPU
EMITTER FOLLOWER	5,3V	12,5 us	REDUP, MOSFET PANAS
COMMON EMITTER PULL-UP 1K KE 12V	11,8V	3,2 us	TERANG OPTIMAL

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi common emitter dengan pull-up 1K ke 12V mampu menghasilkan tegangan kerja switching sebesar 11,8V dengan rise time 3,2 us. Tegangan 11,8V ini mampu membuat MOSFET mencapai Rds(on) terendah. Rise time yang cepat 3,2 us menunjukkan karakteristik saklar digital yang ideal, 75% lebih cepat dibandingkan mode analog yang 12,5 us

C. Hasil Pengukuran

Rds(on) dan Rugi Daya Pengukuran dilakukan pada beban lampu utama 12V 55W dengan arus beban Id = 4,5A.

Tabel 3. Perbandingan Rugi Daya Mode Analog vs Digital

Parameter	Mode Analog (Vgs 5,3V)	Mode Digital (Vgs 11,8V)
Rds(on) MOSFET	0,42 Ohm	0,008 Ohm (8 mOhm)
Rugi Daya P = I ² x Rds(on)	8,50 Watt	0,16 Watt

Pada mode analog dengan Vgs 5,3V, MOSFET bekerja di daerah linear/ohmik sehingga Rds(on) sangat besar yaitu 0,42 Ohm. Hal ini menyebabkan rugi daya 8,50 Watt dan MOSFET menjadi sangat panas. Sedangkan pada mode digital dengan Vgs 11,8V, MOSFET bekerja di daerah saturasi penuh dengan Rds(on) 8 mOhm, rugi daya hanya 0,16 Watt. Penurunan rugi daya sebesar 98% ini membuktikan bahwa pengoperasian sebagai saklar digital sangat efisien untuk sistem lampu kendaraan 12V. Sesuai dengan teori Rashid (2017) tentang power electronics, saklar daya harus bekerja pada kondisi saturasi penuh.

D. Hasil Simulasi Beban Lampu Kendaraan

Sistem dengan konfigurasi optimal (pull-up 1K ke 12V) disimulasikan untuk mengaktifkan seluruh beban lampu kendaraan yang terdiri dari: lampu utama, lampu sein, hazard, lampu rem, klakson, dan lampu kabin. Hasil simulasi menunjukkan semua beban lampu dapat aktif secara optimal dan stabil. Sistem ini juga memberikan isolasi optik antara rangkaian kontrol 5V terhadap rangkaian daya 12V.

E. Validasi Implementasi Fisik Terhadap Hasil Simulasi

Untuk memvalidasi hasil simulasi, dilakukan implementasi fisik seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Implementasi Fisik Sistem Lampu Kendaraan 12V sebagai Validasi Hasil Simulasi

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi pengendalian sistem lampu kendaraan 12V menggunakan MOSFET dan optocoupler PC817 secara digital pada Livewire Professional, dapat disimpulkan: Karakteristik Vce PC817 dipengaruhi oleh If. Pada konfigurasi Common Emitter dengan pull-up 1K ke 12V, If optimal 10 mA - 15 mA menghasilkan Vce saturasi 0,22V - 0,18V, sehingga PC817 yang bersifat analog dapat difungsikan sebagai saklar digital. Tegangan

kerja switching pada Gate MOSFET sebesar 11,8V dengan rise time 3,2 us pada konfigurasi Common Emitter pull-up 1K ke 12V mampu mengaktifkan lampu 12V secara optimal, 75% lebih cepat dibandingkan konfigurasi Emitter Follower 5,3V dengan rise time 12,5 us. Pada mode digital dengan V_{gs} 11,8V, nilai $R_{ds(on)}$ MOSFET 0,008 Ohm menghasilkan rugi daya 0,16 Watt, 98% lebih rendah dibandingkan mode analog dengan V_{gs} 5,3V yang $R_{ds(on)}$ 0,42 Ohm dan rugi daya 8,50 Watt. Sistem memberikan isolasi optik antara rangkaian kontrol 5V terhadap rangkaian daya 12V dan mampu mengaktifkan seluruh beban lampu kendaraan 12V secara stabil.

B. Saran

Gunakan I_f minimal 10 mA untuk memastikan PC817 berada pada kondisi saturasi penuh sebagai saklar digital. Gunakan konfigurasi Common Emitter dengan pull-up 1K ke 12V untuk mendapatkan tegangan switching 11,8V yang optimal untuk MOSFET kanal-N. Untuk pengembangan selanjutnya, dapat ditambahkan rangkaian driver untuk mempercepat rise time dan sistem proteksi hubung singkat pada beban 12V.

DAFTAR PUSTAKA

- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2013). *Electronic Devices and Circuit Theory* (11th ed.). Pearson.
- Hart, D. W. (2011). *Power Electronics*. McGraw-Hill Education.
- Malvino, A. P., & Bates, D. J. (2015). *Electronic Principles* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Rashid, M. H. (2017). *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications* (4th ed.). Pearson.
- Sharp Corporation. (2020). Datasheet PC817 - High Density Mounting Type Photocoupler. Sharp Microelectronics.
- Texas Instruments. (2021). Application Report: How to Use Optocouplers as Digital Switches - Saturation and CTR Analysis.
- Vishay Semiconductors. (2021). Application Note: Understanding CTR and Switching Characteristics of Optocoupler PC817.