

Studi Desain dan Implementasi Transistor Curve Tracer untuk Analisis Karakteristik Transistor

Sungkono¹, Leonardo Kamajaya², Fitri³, Arief Rahman Hidayat⁴, Achmad Arif Bryantono⁵
e-mail: sungkono@polinema.ac.id, leonardo42@polinema.ac.id, fitri@polinema.ac.id,
arhidayat27@gmail.com, arief372@gmail.com

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Soekarno Hatta No.9 Malang, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 14 Juni 2023

Direvisi 20 Juli 2023

Diterbitkan 31 Juli 2023

Kata kunci:

Karakterisasi transistor

Kurva V-I

Akusisi data

Keywords:

Transistor characterization

V-I Curve

Data acquisition

ABSTRAK

Grafik karakteristik transistor menunjukkan hubungan antara arus basis kolektor dan tegangan emitter kolektor. Informasi tersebut dimanfaatkan untuk menentukan penguatan transistor, titik saturasi, dan titik cutoff. Pengukuran manual di laboratorium untuk mendapatkan grafik karakteristik transistor membutuhkan waktu yang lama karena analisis diharuskan mengendalikan banyak instrumen pada saat yang sama. Akibatnya, alat khusus diperlukan untuk secara otomatis mengukur grafik dengan pengaturan tes yang dapat diubah dan memvisualisasikan hasil tes. Dalam studi ini, mereka penulis membahas bagaimana membangun/menjelaskan proses pembuatan pelacak kurva menggunakan Source Measure Unit (SMU) dan mikrokontroler arsitektur ARM untuk mengontrol output dan menangkap data dengan cepat. Interface pelacak kurva dikembangkan pada komputer menggunakan aplikasi LabVIEW untuk menentukan pengaturan tes dan menyajikan visualisasi grafis dari hasil tes. Ketepatan output tegangan dari SMU adalah 0.01% dan ketepatannya output saat ini adalah 0.35%. Akurasi karakteristik transistor pada pelacak kurva dibandingkan dengan osiloskop adalah 2.48%.

ABSTRACT

A transistor characteristic graph shows the relationship between the collector base current and the collector emitter voltage. This information is used to determine the transistor's gain, saturation point, and cutoff point. Manual measurements in the laboratory to obtain graphs of transistor characteristics require a long time because the analyst is required to control many instruments at the same time. As a result, special tools are needed to automatically measure graphs with changeable test settings and visualize test results. In this study, they discuss how to build a curve tracker using a Source Measure Unit (SMU) and an ARM architecture microcontroller to quickly control output and capture data. A curve tracker interface was developed on a computer using the LabVIEW application to define test settings and provide a graphical visualization of the test results. The voltage output accuracy of the SMU is 0.01% and the output current accuracy is 0.35%. The characteristic accuracy of the transistors on the curve tracer compared to the oscilloscope is 2.48%.

Penulis Korespondensi:

Leonardo Kamajaya,

Jurusan Teknik Elektro,

Politeknik Negeri Malang,

Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65141

Email: leonardo42@polinema.ac.id

Nomor HP/WA aktif: +62 82111064591



1. PENDAHULUAN

Transistor merupakan salah satu komponen elektronik yang penting dalam berbagai aplikasi elektronik. Untuk memahami dan menganalisis karakteristik transistor, dibutuhkan alat pengukur yang dapat menghasilkan data yang akurat dan dapat diandalkan. Contoh alat yang sering digunakan dalam menganalisis karakteristik transistor adalah Transistor Curve Tracer.

Transistor Curve Tracer adalah alat yang dirancang khusus untuk mengukur dan memvisualisasikan karakteristik tegangan dan arus transistor. Alat ini memungkinkan pengguna untuk mengamati dan mempelajari hubungan antara tegangan input dan arus output transistor pada berbagai kondisi operasional. Dengan menggunakan Transistor Curve Tracer, karakteristik dasar seperti karakteristik DC, karakteristik frekuensi tinggi, hingga karakteristik pulsa dapat diamati dan dianalisis dengan mudah [1]–[3].

Studi tentang desain dan implementasi Transistor Curve Tracer akan dibahas untuk analisis karakteristik transistor. Penelitian ini menjelaskan pengembangan alat yang efisien, akurat, dan mudah digunakan untuk menganalisis transistor dengan presisi. Kami akan mengevaluasi desain dan mengimplementasikan alat ini dengan mempertimbangkan parameter desain yang penting seperti rentang tegangan, rentang arus, resolusi, dan kestabilan sinyal [4], [5].

Pemahaman yang mendalam tentang karakteristik transistor sangat penting dalam pengembangan dan perbaikan rangkaian elektronik. Dengan menggunakan Transistor Curve Tracer yang efisien dan handal, para insinyur dan peneliti akan dapat dengan mudah menganalisis transistor, memvalidasi desain rangkaian, mengidentifikasi masalah, dan mengoptimalkan kinerja sistem elektronik.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Source Measure Unit (SMU)

SMU merupakan komponen penting yang digunakan dalam Transistor Curve Tracer. SMU adalah perangkat elektronik yang menggabungkan fungsi sumber dan pengukur dalam satu unit. Dalam konteks Transistor Curve Tracer, SMU berfungsi sebagai sumber tegangan atau arus yang dapat dikendalikan dengan presisi tinggi, serta mampu mengukur tegangan dan arus transistor dengan akurasi yang tinggi [6].

Pada saat melakukan pengukuran karakteristik transistor dengan Transistor Curve Tracer, SMU menyediakan sumber tegangan atau arus yang diperlukan untuk menggerakkan transistor dan mencatat tegangan dan arus yang muncul di terminal transistor. SMU dapat menghasilkan sinyal yang presisi, stabil, dan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan pengukuran.

Keuntungan utama dari penggunaan SMU pada Transistor Curve Tracer adalah kemampuannya untuk mengatur dan mengukur tegangan dan arus dalam rentang yang luas. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengamati karakteristik transistor pada berbagai tingkat tegangan atau arus, serta menganalisis respons transistor terhadap perubahan kondisi operasional [7].

Selain itu, SMU juga dapat memberikan pengukuran yang akurat dan terukur. Dengan resolusi tinggi, SMU dapat mengukur tegangan dan arus dengan tingkat presisi yang tinggi, memungkinkan pengguna untuk mendapatkan data yang akurat dan dapat diandalkan untuk analisis karakteristik transistor.

2.2 Bipolar Junction Transistor (BJT)

BJT merupakan transistor yang mempunyai tiga kontak, di mana arus rendah yang mengalir ke terminal basis akan mengendalikan arus yang lebih tinggi di antara kumparan dan pemancar. Jenis tipe transistor BJT, yakni NPN dan PNP. Polarisasi dari transistor tipe NPN berbeda dengan transistor tipe PNP [8], [9].

$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (1)$$

Faktor utama dari BJT adalah penguatan β atau hFE untuk DC, yang dapat dihitung menggunakan rumus (1). Ini menunjukkan bahwa arus yang melalui pada collector I_C akan lebih tinggi daripada arus yang diberikan pada base I_B , karena adanya factor penguatan. Sifat ini memudahkan perancang rangkaian dalam memilih transistor yang tepat dan memberikan informasi tentang kinerja transistor.

2.3 Field Effect Transistor (FET)



FET merupakan salah satu jenis transistor yang sering digunakan dalam Transistor Curve Tracer. FET adalah perangkat semikonduktor yang mengandalkan medan listrik untuk mengendalikan konduktivitas channel yang terbentuk di dalamnya. Dalam Transistor Curve Tracer, FET digunakan sebagai objek pengukuran untuk menganalisis karakteristiknya.

FET terdiri dari tiga kontak: gate (G), source (S), dan drain (D). Pada saat melakukan pengukuran karakteristik FET dengan Transistor Curve Tracer, terminal gate FET dihubungkan ke SMU sebagai sumber tegangan kontrol, sementara terminal source dan drain dihubungkan ke SMU sebagai pengukur tegangan dan arus [10], [11]. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol dan mengukur tegangan dan arus FET dengan presisi tinggi.

Dalam pengukuran karakteristik FET, Transistor Curve Tracer menggunakan SMU untuk memvariasikan tegangan gate dan mengamati respons FET terhadap perubahan tegangan. Dengan mengubah tegangan gate, pengguna dapat menghasilkan kurva karakteristik FET yang menunjukkan hubungan antara arus drain dan tegangan drain-source pada berbagai tingkat tegangan gate.

Transistor Curve Tracer membantu pengguna untuk memahami karakteristik FET, seperti karakteristik transfer (*transconductance*), karakteristik output, dan karakteristik cut-off [12], [13]. Dengan memvisualisasikan kurva karakteristik FET, pengguna dapat menganalisis respons FET terhadap tegangan dan arus, mengidentifikasi titik operasi yang optimal, dan memvalidasi performa FET dalam aplikasi tertentu.

2.4 Standard Commands for Programmable Interface (SCPI)

SCPI merupakan standar komunikasi yang diperuntukkan dalam instrumen pengukuran dan pengujian yang dapat diprogram [14]. SCPI menyediakan serangkaian perintah standar yang digunakan untuk mengontrol dan berkomunikasi dengan instrumen melalui antarmuka seperti GPIB (General Purpose Interface Bus) atau USB. Pada Transistor Curve Tracer, SCPI digunakan untuk mengontrol operasi instrumen dan mengambil data pengukuran dengan mudah.

Dalam penggunaan Transistor Curve Tracer, SCPI menyediakan perintah-perintah standar yang dapat digunakan untuk mengatur sumber tegangan atau arus pada SMU, mengontrol pengukuran, mengatur parameter pengukuran, dan mengambil data karakteristik transistor. Dengan menggunakan perintah SCPI, pengguna dapat mengatur kondisi pengukuran, mengonfigurasi instrumen, dan mengambil data pengukuran dengan mudah dan konsisten.

SCPI juga mendefinisikan format dan sintaks perintah yang digunakan untuk berkomunikasi dengan instrumen. Ini memungkinkan instrumen yang kompatibel dengan SCPI untuk berinteraksi dengan perangkat lunak pengontrol melalui antarmuka yang seragam, bahkan jika instrumen tersebut berasal dari produsen yang berbeda. Dengan demikian, SCPI memfasilitasi integrasi dan interoperabilitas yang lebih baik antara instrumen dan sistem pengujian yang kompleks.

Keuntungan utama dari penggunaan SCPI pada Transistor Curve Tracer adalah kemudahan penggunaan dan fleksibilitas dalam mengontrol instrumen. Dengan menggunakan perintah standar yang terdefinisi dengan baik, pengguna dapat dengan cepat mengatur instrumen sesuai dengan kebutuhan pengujian, melakukan pengukuran yang konsisten, dan mengambil data dengan format yang dapat diproses dengan mudah.

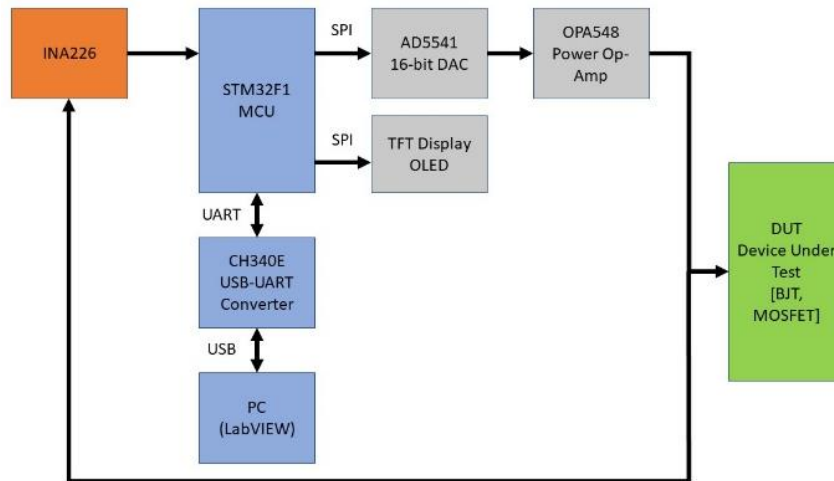
3. METODE PENELITIAN

3.1 Perancangan Sistem

Gambar 1 menguraikan tentang skema sistem pelacakan kurva transistor. Bagian input memanfaatkan ADC INA226 untuk menghitung arus dan tegangan keluaran, yang kemudian dipakai sebagai respons balik pada sistem pengawasan dan pengumpulan data pada sistem kontrol menggunakan protokol I2C. Pada bagian proses, STM32F1 digunakan untuk memonitoring pengaturan arus dan tegangan keluaran dan juga mengumpulkan data pengukuran arus dan tegangan dari INA226. Konverter USB-TTL CH340E digunakan untuk transmisi data ke PC menggunakan UART, agar bisa dihubungkan dengan PC lewat port USB (*Universal Serial Bus*). Bagian keluaran meliputi DAC AD5541 yang digunakan untuk mengendalikan arus keluaran yang telah dikuatkan oleh power op-amp OPA548 [15] sebelum diteruskan ke komponen yang akan diuji, dan bagian tersebut dikontrol oleh data digital dari STM32.



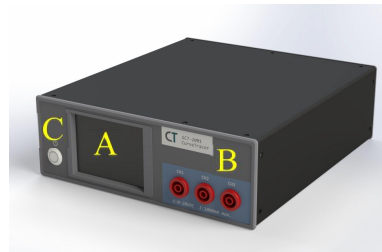
Kemudian, perangkat ini memanfaatkan layar TFT-OLED sebagai tampilan arus dan tegangan pada setiap keluaran dan juga grafik dari hasil pengujian.



Gambar 1: Diagram Blok Sistem Transistor Curve Tracer

3.2 Perancangan Mekanik

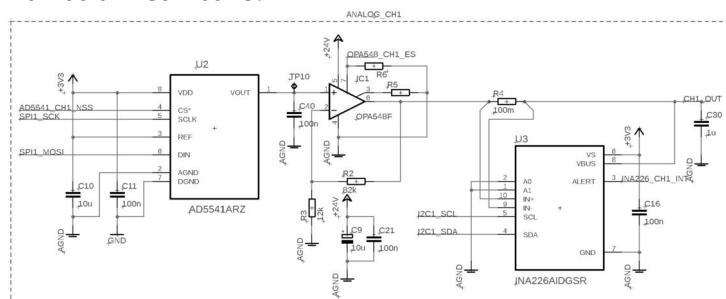
Bagian teknis yang diperlukan untuk perangkat ini adalah wadah berdimensi 180 x 60 x 203 yang berfungsi menjadi tempat meletakkan PCB power supply dan inti sirkuit. Gambar 2 menunjukkan panel tampilan (A), port keluaran (B), dan tombol power (C).



Gambar 2: Desain Mekanik Transistor Curve Tracer

3.3 Perancangan Elektronik

SMU tersusun atas konverter data digital ke data analog (DAC) tipe AD5541, yang dimanfaatkan sebagai pengendali tegangan output dan arus. Dengan fakta bahwa besarnya keluaran antara DAC GND (0V) hingga VREF (3,3V), rangkaian penguat dibutuhkan untuk menaikkan kisaran tegangan keluaran menjadi 24V. Bagian pengukuran dari alat ini memanfaatkan konverter analog ke digital (ADC) dan sinyal terintegrasi sehingga pengukur arus dan tegangan dapat dilakukan hanya dengan menggunakan sirkuit terintegrasi (IC) dan resistor sensor arus; protokol komunikasi yang digunakan pada ADC ini adalah I2C [16], membuatnya mudah untuk menggabungkan beberapa blok. Sistem SMU digambarkan dalam Gambar 3.

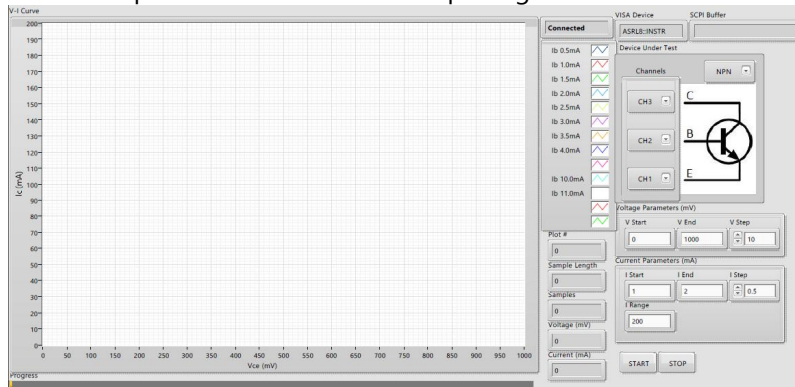


Gambar 3: Desain tampilan antarmuka program LabView – TCT



3.4 Perancangan Interface

Pemanfaatan komputer untuk mengakuisisi data bertujuan untuk mempermudah pengolahan dan analisis data yang dihasilkan dari pengujian. LabVIEW digunakan sebagai interface dan bagian pemrosesan data. Gambar 4 menunjukkan desain interface dan pemrosesan data berbasis perangkat lunak LabVIEW.



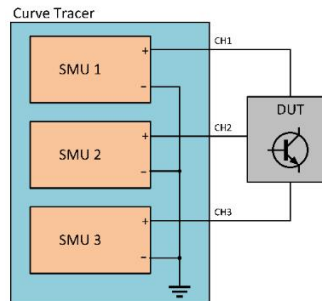
Gambar 4: Desain tampilan antarmuka program LabView - TCT

3.5 Perencanaan Pengujian Komponen

Berikut ini adalah prosedur yang perlu dilakukan pada setiap terminal agar dapat memperoleh kurva V-I pada transistor BJT:

1. Basis: I konstan (step).
2. Kolektor: V bebas (sweep).
3. Emitor: Nilai Ref 0 volt.

Parameter awal yang mengatur arus pada base adalah uji I_B . Grafik sumbu Y menunjukkan arus I_C yang terukur, sedangkan grafik sumbu X menunjukkan tegangan V_{CE} yang dikontrol sesuai dengan tegangan sweep yang diinginkan. Pengujian menghasilkan grafik I_C terhadap V_{CE} yang menunjukkan beberapa step I_B yang berbeda. Gambar 5 menunjukkan diagram pengujian komponen.



Gambar 5: Diagram pengujian komponen pada TCT

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji unjuk kerja sistem terdiri dari tiga macam uji, yakni uji tegangan sumber, uji unit pengukur sumber (SMU), dan uji keseluruhan sistem dibandingkan dengan pengukuran melalui osiloskop. Hasil dari uji unit pengukur sumber (SMU) menunjukkan data analisis ketepatan berikut ini.

TABEL 1. PENGUJIAN AKURASI TEGANGAN

No.	Set (mV)	Terukur (mV)			Std. Dev.	% Error
		1	2	3		
1	1000	1000	999	1000	0.58	0.03
2	2000	1999	1999	1999	0.00	0.05



3	3000	3000	2999	3001	1.00	0.02
4	4000	4000	3999	4000	0.58	0.01
5	5000	4999	5000	5000	0.58	0.01
6	6000	5999	5999	6000	0.58	0.01
7	7000	7000	6999	7001	1.00	0.01
8	8000	8000	8000	8001	0.58	0.00
9	9000	9001	9000	9001	0.58	0.01
10	10000	10001	10000	10000	0.58	0.00
11	11000	11001	11003	11002	1.00	0.02
12	12000	12001	12002	12000	1.00	0.01
13	13000	13001	13001	13001	0.00	0.01
14	14000	14000	14003	14001	1.53	0.01
15	15000	15001	15002	15000	1.00	0.01
16	16000	15999	16002	16000	1.53	0.01
17	17000	17000	17003	17002	1.53	0.01
18	18000	18000	18002	18001	1.00	0.01
19	19000	19001	19002	19001	0.58	0.01
20	20000	20001	20002	20001	0.58	0.01
\bar{X}					0.79	0.01

Tabel 1 dan 2 merupakan hasil uji yang dilakukan terhadap keakuratan tegangan dan arus pada keluaran terkalibrasi dengan setpoint yang diinginkan. Persentase kesalahan maksimum pada tegangan keluaran sebesar 0.05% dengan rata-rata kesalahan 0.01% tampak pada tabels 1. Untuk standar deviasi tertinggi yang tercatat mencapai 1.53mV. Tingkat keakuratan yang memadai pada alat ini dapat dijelaskan karena adanya ADC INA226 yang telah ditambahkan pengondisi sinyal terintegrasi.

TABEL 2. PENGUJIAN AKURASI ARUS

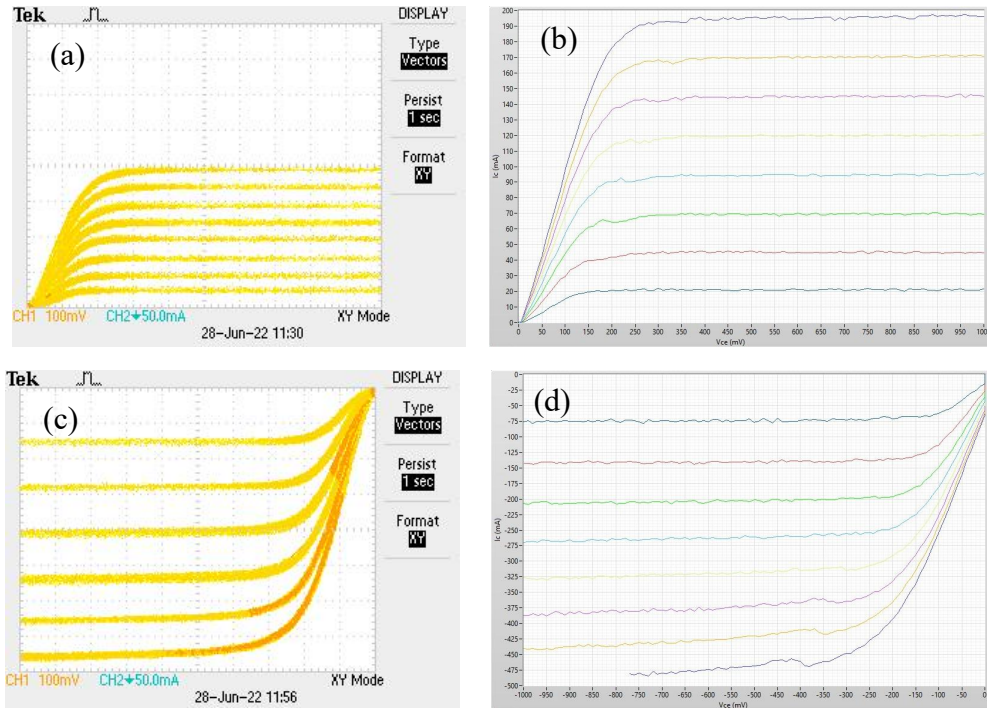
No.	Set (mA)	Arus terbaca (mA)			Deviasi	% Error
		1	2	3		
1	100.0	99.7	99.7	99.6	0.06	0.33
2	200.0	199.7	199.3	199.1	0.31	0.32
3	300.0	299.4	299.1	298.7	0.35	0.31
4	400.0	399.0	398.5	397.9	0.55	0.38
5	500.0	499.3	498.2	497.7	0.82	0.32
6	600.0	599.0	597.4	597.0	1.06	0.37
7	700.0	701.7	696.8	695.9	3.12	0.43
8	800.0	797.2	794.5	795.7	1.35	0.52
9	900.0	901.9	896.4	896.9	3.04	0.32
10	1000.0	997.2	998.7	999.2	1.04	0.16
\bar{X}					1.17	0.35

Untuk uji keakuratan arus yang tercatat pada tabel 2 menjelaskan nilai kesalahan tertinggi mencapai 0.52% dengan \bar{X} sebesar 0.35%. Sedangkan nilai standar deviasi tertinggi mencapai 3.13 mA. Untuk persentase kesalahan yang tinggi disebabkan perubahan nilai R_{shunt} , sehingga keakuratan pengukuran arus berkurang. Penyebab nilai resistansi kurang stabil adalah daya yang terbuang pada komponen sekitar.



4.1 Pengujian BJT (NPN dan PNP)

Pada evaluasi keseluruhan sistem, dilakukan perbandingan pengukuran menggunakan 4 contoh transistor yaitu BJT jenis NPN (TIP41), PNP (TIP42), MOSFET kanal-N (IRF530) dan MOSFET kanal-P (IRF9530) dengan menggunakan osiloskop. Grafik karakteristik dari TIP41 yang dihasilkan dari pengukuran dengan osiloskop dan pelacak kurva transistor dapat dilihat pada gambar 6.a dan 6.b. Nilai arus puncak pada tegangan 1V tampak pada Tabel 3, dengan persentase kesalahan pengukuran sebesar 1.49%.



Gambar 6: (a) Pengukuran Osiloskop TIP41, (b) Pengukuran dengan pelacak kurva TIP41, (c) Pengukuran Osiloskop TIP42 dan (d) Pengukuran dengan pelacak kurva transistor TIP42

Grafik fungsi transistor BJT NPN TIP42 yang dihasilkan dari pengujian menggunakan alat osiloskop dan alat pelacak grafik transistor dapat dilihat pada gambar 6.c dan 6.d. Nilai arus puncak pada tegangan -1V tersaji dalam Tabel 3, dengan ketelitian pengukuran yang memiliki tingkat kesalahan sebesar 0.98%.

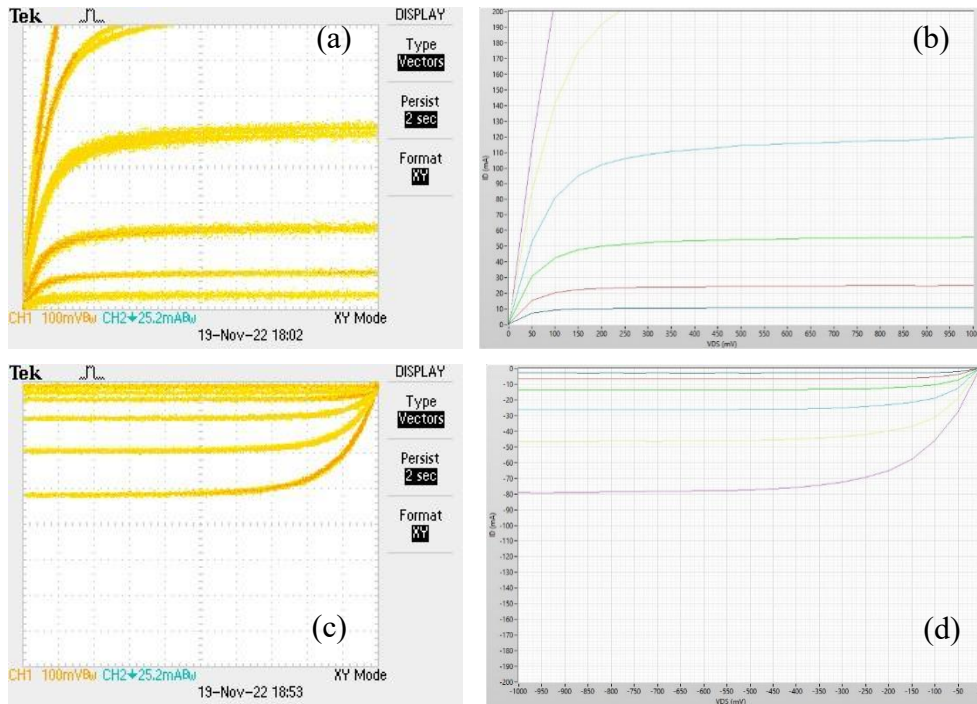
TABEL 3. PERBANDINGAN PENGUKURAN KURVA BJT TIP41 DAN BJT TIP42

No.	BJT TIP41			BJT TIP42		
	Osiloskop	TCT	% Error	Osiloskop	TCT	% Error
1	23	22	4.35	-75	-75	0.00
2	45	45	0.00	-140	-145	3.57
3	70	69	1.43	-205	-205	0.00
4	97	95	2.06	-270	-271	0.37
5	120	121	0.83	-327	-325	0.61
6	142	145	2.11	-380	-385	1.32
7	170	171	0.59	-	-440	-
8	195	196	0.51	-	-480	-
	\bar{X}		1.49	\bar{X}		0.98



4.1 Pengujian MOSFET (Kanal-N dan Kanal-P)

Dalam pengujian keseluruhan sistem, 2 transistor MOSFET yang diuji yaitu IRF530 (jenis kanal-N) dan IRF9530 (jenis kanal-P) dibandingkan dengan pengukuran menggunakan osiloskop. Kurva karakteristik transistor MOSFET jenis kanal-N (IRF530) terlihat pada gambar 7.a dan 7.b. Nilai arus puncak pada tegangan 1V dapat dilihat pada Tabel 4, dengan kesalahan pengukuran sebesar 3,55%.



Gambar 7: (a) Pengukuran Osiloskop MOSFET IRF530, (b) Pengukuran dengan pelacak kurva transistor MOSFET IRF530, (c) Pengukuran Osiloskop MOSFET IRF9530 dan (d) Pengukuran dengan pelacak kurva transistor MOSFET IRF9530

Grafik karakteristik transistor MOSFET kanal-P (IRF9530) yang telah diukur memakai perangkat pelacak kurva transistor dan osiloskop dapat dilihat pada gambar 7.c dan 7.d. Nilai arus puncak pada tegangan -1V tampak pada Tabel 4, dengan tingkat kesalahan sebesar 3.89%.

TABEL 4. PERBANDINGAN PENGUKURAN KURVA MOSFET IRF530 DAN MOSFET IRF9530

No.	MOSFET IRF530			MOSFET IRF9530		
	Osiloskop	Pelacak kurva Transistor	% Error	Osiloskop	Pelacak kurva Transistor	% Error
1	10	11	10	-3	-3	0
2	25	25	0	-7	-6	14.29
3	57	56	1.75	-13	-13	0
4	123	120	2.44	-27	-26	3.7
5	-	-	-	-49	-47	4.08
6	-	-	-	-80	-79	1.25
	\bar{X}		3.55	\bar{X}		3.89



Berdasarkan analisis yang tampak pada Tabel 5, rata-rata persentase kesalahan keseluruhan dari perbandingan data di antara perangkat pelacak kurva transistor dan referensi osiloskop adalah 2.48%.

TABEL 5. RATA-RATA ERROR PENGUKURAN ANTARA TCT DAN OSILOSKOP

No	Sampel Transistor	% Error
1	TIP41	1.49
2	TIP42	0.98
3	IRF530	3.55
4	IRF9530	3.89
	\bar{X}	2.48

5. KESIMPULAN

Dari hasil uji unjuk kerja dan analisis, dapat ditarik kesimpulan bahwa alat pelacak kurva transistor dapat memperoleh dan mengukur data sesuai nilai arus-tegangan yang didesain dengan tingkat keakuratan yang baik (ketepatan tegangan 0.01% dan keakuratan pengukuran arus 0.35%). Dengan membandingkan TCT dengan osiloskop pada pengukuran 4 jenis transistor, didapatkan rata-rata kesalahan sebesar 2.48%. Pemeliharaan sistem membutuhkan penyertaan power op-amps dan heatsinks. Selain itu, perlu untuk memasukkan fungsi agar sistem dapat melakukan pendeteksian komponen jenis lainnya atau transistor yang diukur secara otomatis.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Malang atas bantuan pendanaan yang telah diberikan pada penelitian skema DIPA Reguler ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Moreno-Garcia, "Curve tracer with a personal computer and LabView," in *14th International Conference on Electronics, Communications and Computers, 2004. CONIELECOMP 2004.*, 2004, pp. 202–207.
- [2] G. T. Nikolov, "High current source-measure unit based on low cost DAQ," *Proc. Electron.*, 2008.
- [3] A. Seyhoozadeh, H. Chang, and K. E. Lonngren, "Inexpensive transistor curve tracer," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 58, no. 5, pp. 849–852, 1987.
- [4] J. M. Patterson, "Developing an approach to semiconductor failure analysis and curve tracer interpretation," in *16th International Reliability Physics Symposium*, 1978, pp. 93–100.
- [5] E. J. Hill, "A Simple Transistor Characteristic Curve Tracer," in *Proceedings of the Iowa Academy of Science*, 1962, vol. 69, no. 1, pp. 455–458.
- [6] A. Das, "An easy-to-fabricate source measure unit for real-time DC and time-varying characterization of multi-terminal semiconductor devices," *Eng. Res. Express*, vol. 3, no. 1, p. 15003, 2021.
- [7] R. Ortega, "New source measure unit architecture for control loop configurability," in *2012 IEEE AUTOTESTCON Proceedings*, 2012, pp. 157–160.
- [8] P. Horowitz and W. Hill, "The Art of Electronics. Third." Cambridge University Press, 2015.
- [9] M. J. Deen and F. Pascal, "Electrical characterization of semiconductor materials and devices," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 17, no. 8, pp. 549–575, 2006.
- [10] A. I. Khan, A. Keshavarzi, and S. Datta, "The future of ferroelectric field-effect transistor technology," *Nat. Electron.*, vol. 3, no. 10, pp. 588–597, 2020.
- [11] P. Chuang *et al.*, "All-electric all-semiconductor spin field-effect transistors," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 1, pp. 35–39, 2015.
- [12] S. Saurabh and M. J. Kumar, *Fundamentals of tunnel field-effect transistors*. CRC press, 2016.
- [13] D. Tekleab, "Device performance of silicon nanotube field effect transistor," *IEEE electron device Lett.*, vol. 35, no. 5, pp. 506–508, 2014.
- [14] L. Guili and K. Quancun, "Design of virtual oscilloscope based on GPIB interface and SCPI," in *2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2013, vol. 1, pp. 294–298.
- [15] T. Instruments, "High-voltage, high-current operational amplifier." 2005.
- [16] T. Instruments, "Ina226 high-side or low-side measurement, bi-directional current and power monitor with i2c compatible interface," *INA226*, pp. 1–39, 2015.

