

Penerapan Matriks OBE (Operasi Baris Elementer) pada Sistem Keteknikan Digital (Diskrit Bilangan Biner)

Siva Raj¹, Afdol Mendrofa², Fransiska Siagian³, Alfonsus Turnip⁴, Bora Intan Sitompul⁵, Abdul Muin Sibuea⁶, Selly Annisa Binti Zulkarnain⁷

^{1,2,3,4,5}Mahasiswa Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik

^{6,7}Dosen Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Negeri Medan

Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20221

E-mail: siva27ac@gmail.com¹, mendrofaafdol@gmail.com², erlinsiagian97@gmail.com³, alfonunutsiusturnip030523@gmail.com⁴, boraintansitompul@gmail.com⁵, abdulmuin@gmail.com⁶, sellyannina@gmail.com⁷

Article Info

Article history:

Received March 12, 2026

Revised March 13, 2026

Accepted March 15, 2026

Keywords:

Digital Engineering, Binary Numbers, ERO Matrix, Linear Algebra, GF(2)

ABSTRACT

This research explores the synergy between linear algebra and digital engineering through the application of Elementary Row Operations (ERO) on binary number systems. The main focus is on how matrix theory, as proposed by Arif Munandar, can be adapted to the discrete realm described by Malvino Leach. This transformation is crucial as modern digital systems require faster and more structured equation-solving methods than classic Boolean Algebra. The adaptation of ERO into the binary domain involves the use of the Galois Field GF(2), where arithmetic operations are restricted to elements 0 and 1. In this context, standard addition is replaced by XOR logic operations, which possess no-carry properties. This study aims to dissect these mechanisms both theoretically and practically. Through this approach, the massive complexity of linear equation systems in digital circuits can be managed more systematically. The methodology used is an analytical comparative study, comparing efficiency between conventional substitution methods and binary-based Gauss-Jordan elimination. Results show that ERO matrices minimize the risk of human error in multi-variable calculations. Furthermore, the matrix method is found to be more scalable for software implementation than manual solutions. This proves that linear algebra is a powerful instrument for the development of computer architecture.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received March 12, 2026

Revised March 13, 2026

Accepted March 15, 2026

ABSTRACT

Penelitian ini mengeksplorasi sinergi antara aljabar linear dan keteknikan digital melalui penerapan Operasi Baris Elementer (OBE) pada sistem bilangan biner. Fokus utama adalah bagaimana teori matriks yang dikemukakan oleh Arif Munandar dapat diadaptasi ke

Kata Kunci:

Keteknikan Digital, Bilangan Biner, Matriks OBE, Aljabar Linear, GF(2)

dalam ranah diskrit yang dijelaskan oleh Malvino Leach. Transformasi ini sangat krusial karena sistem digital modern memerlukan metode penyelesaian persamaan yang lebih cepat dan terstruktur dibandingkan Aljabar Boolean klasik. Adaptasi OBE ke dalam domain biner melibatkan penggunaan Field Galois GF(2), di mana operasi aritmatika dibatasi pada elemen 0 dan 1. Dalam konteks ini, penjumlahan standar digantikan oleh operasi logika XOR yang memiliki sifat tanpa simpanan (no carry). Penelitian ini bertujuan untuk membedah mekanisme tersebut secara teoretis dan praktis. Melalui pendekatan ini, kompleksitas sistem persamaan linear yang masif dalam sirkuit digital dapat dikelola dengan lebih sistematis. Metodologi yang digunakan adalah studi komparatif analitis, membandingkan efisiensi antara metode substitusi konvensional dengan eliminasi Gauss-Jordan berbasis biner. Hasil menunjukkan bahwa matriks OBE meminimalisir risiko kesalahan manusia (human error) dalam perhitungan variabel yang banyak. Selain itu, metode matriks ditemukan lebih skalabel untuk implementasi perangkat lunak dibandingkan penyelesaian manual. Hal ini membuktikan bahwa aljabar linear merupakan instrumen yang sangat bertenaga bagi perkembangan arsitektur komputer.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Siva Raj
Universitas Negeri Medan
E-mail: siva27ac@gmail.com

PENDAHULUAN

Keteknikan digital telah menjadi tulang punggung peradaban modern, menggerakkan segala sesuatu mulai dari mikrokontroler sederhana hingga superkomputer yang kompleks. Malvino Leach dalam referensi utamanya menekankan bahwa sistem ini bekerja berdasarkan sinyal diskrit yang hanya memiliki dua status stabil. Keberhasilan teknologi ini terletak pada kemampuannya memproses informasi dengan presisi tinggi melalui representasi biner yang efisien.

Seiring dengan kemajuan teknologi Very Large Scale Integration (VLSI), jumlah komponen dalam satu sirkuit terintegrasi meningkat secara eksponensial. Hal ini menyebabkan sistem persamaan yang harus diselesaikan untuk menganalisis jalur data menjadi sangat rumit. Insinyur digital sering kali terjebak dalam kompleksitas Aljabar Boolean yang melelahkan ketika menghadapi sistem variabel besar, sehingga memerlukan alternatif matematis yang lebih tangguh.

Aljabar Linear muncul sebagai solusi atas tantangan tersebut melalui penggunaan matriks. Matriks bukan sekadar kumpulan angka, melainkan representasi hubungan linear antar variabel dalam suatu sistem. Arif Munandar menjelaskan bahwa matriks memungkinkan kita untuk melihat struktur masalah secara holistik, memberikan kemudahan dalam manipulasi data melalui operasi-operasi yang terdefinisi dengan baik.

Salah satu teknik fundamental dalam manipulasi matriks adalah Operasi Baris Elementer (OBE). OBE memungkinkan transformasi matriks augmentasi menjadi bentuk eselon baris tanpa mengubah solusi dari sistem persamaan tersebut. Dalam konteks bilangan riil, OBE telah lama menjadi standar industri, namun aplikasinya dalam domain biner memerlukan pemahaman mendalam tentang aritmatika modulo.

Pentingnya adaptasi OBE ke dalam sistem biner terletak pada efisiensi operasional. Dalam sirkuit digital, setiap variabel adalah bit, dan setiap operasi adalah gerbang logika. Dengan memetakan langkah-langkah OBE ke dalam gerbang XOR dan AND, kita dapat menciptakan algoritma yang secara inheren kompatibel dengan arsitektur perangkat keras komputer, memungkinkan penyelesaian masalah secara paralel.

Motivasi penulisan artikel ini adalah untuk menjembatani kesenjangan antara matematika murni dan aplikasi teknik. Sering kali, mahasiswa teknik melihat aljabar linear sebagai subjek yang terpisah dari desain digital. Melalui paparan ini, diharapkan pembaca dapat melihat bahwa kedua disiplin ilmu tersebut merupakan dua sisi dari koin yang sama dalam upaya mencapai optimasi sistem informasi.

Artikel ini akan menyajikan urutan poin mulai dari pengertian dasar hingga perbandingan teknis metode penyelesaian. Melalui referensi dari Arif Munandar dan Malvino Leach, dasardasar teoretis akan diperkuat dengan contoh praktis. Tujuan akhirnya adalah memberikan pemahaman bahwa matriks OBE biner adalah alat yang lebih unggul dalam menyelesaikan problematik keteknikan digital masa kini.

METODE PENELITIAN

Metode yang diterapkan (metodologi) dalam penelitian ini adalah eksperimen analitis yang didasarkan pada studi literatur dan simulasi matematis. Langkah pertama adalah mengidentifikasi karakteristik dasar sistem biner sebagai lapangan berhingga $GF(2)$. Pemahaman ini krusial karena aturan aritmatika dalam $GF(2)$ sangat berbeda dengan sistem bilangan riil yang biasanya digunakan dalam mata kuliah aljabar linear standar.

Tahap kedua melibatkan penyusunan sistem persamaan linear (SPL) yang merepresentasikan sirkuit logika kombinasional. Peneliti memilih kasus-kasus sirkuit yang memiliki minimal tiga hingga empat variabel input untuk menunjukkan perbedaan signifikan antara metode manual dan matriks. Data input ini disusun dalam bentuk matriks augmentasi $[A|B]$, di mana A adalah koefisien input dan B adalah hasil output.

Langkah ketiga adalah mendefinisikan aturan OBE khusus biner. Berdasarkan prinsip Arif Munandar, terdapat tiga operasi baris, namun dalam domain biner, operasi “perkalian baris dengan skalar” menjadi terbatas karena skalar non-nol hanya angka 1. Fokus utama diarahkan pada operasi “penjumlahan baris” yang dilakukan melalui operasi bitwise XOR pada setiap entri matriks.

Tahap keempat adalah implementasi algoritma eliminasi Gauss-Jordan. Proses dimulai dengan mencari elemen pivot (angka 1) pada kolom pertama, kemudian melakukan eliminasi baris di bawah dan di atasnya. Peneliti mendokumentasikan setiap langkah transformasi untuk memastikan integritas data tetap terjaga selama proses reduksi matriks menjadi bentuk eselon baris tereduksi.

Secara paralel, sistem persamaan yang sama diselesaikan menggunakan metode “Operasi Biasa” atau substitusi Boolean. Peneliti mengikuti langkahlangkah manual yang biasanya dilakukan oleh praktisi teknik, seperti mengeliminasi variabel satu per satu dengan hukum-hukum Aljabar Boolean. Langkah ini bertujuan untuk mencatat waktu, jumlah langkah, dan potensi kebingungan logis yang mungkin muncul.

Tahap kelima adalah analisis komparasi. Kriteria penilaian meliputi jumlah operasi baris yang diperlukan, skalabilitas metode saat variabel ditambah, dan kejelasan visual dari proses penyelesaian. Peneliti juga mengevaluasi kemudahan implementasi masing-masing metode ke dalam algoritma komputer, mengingat otomasi adalah tujuan akhir dalam desain keteknikan digital modern.

Tahap terakhir adalah validasi hasil. Solusi yang diperoleh dari metode OBE dan metode substitusi dibandingkan satu sama lain. Keberhasilan metode matriks diukur dari konsistensinya dalam menghasilkan nilai bit variabel ($x_1, x_2, \dots, x_n$) yang tepat sesuai dengan tabel kebenaran sirkuit yang diuji. Seluruh proses ini memastikan bahwa kesimpulan ditarik didasarkan pada data empiris yang telah teruji validitasnya.

Sebagai langkah penguatan metode, peneliti menerapkan proses normalisasi matriks sebelum eksekusi OBE dilakukan. Hal ini bertujuan untuk memastikan tidak ada baris yang redundan atau baris kosong di tengahnya proses eliminasi yang dapat mengganggu pencarian pivot. Dalam kacamata keteknikan digital, normalisasi ini merepresentasikan pembersihan jalur input sirkuit dari sinyal-sinyal yang tidak memberikan kontribusi terhadap hasil akhir atau sinyal yang bersifat konstan.

Peneliti juga menyertakan submetode untuk menangani Kasus Dependensi Linear yang sering terjadi pada sistem digital yang memiliki redundansi gerbang logika. Jika dalam proses OBE ditemukan baris nol (allzero row), peneliti akan mengkategorikan sistem tersebut sebagai sistem yang tidak memiliki solusi unik (solusi banyak).

Hal ini sangat penting untuk mengidentifikasi apakah desain sirkuit digital yang sedang dianalisis memiliki kesalahan logika yang menyebabkan ketidakstabilan status pada flip-flop atau gerbang output.

Dalam aspek komputasi, metode ini diperluas dengan penyusunan Pseudocode Algoritma XOR-Gauss. Pseudocode ini dirancang untuk menunjukkan bagaimana operasi matriks diubah menjadi instruksi mesin tingkat rendah (low-level instructions). Peneliti menganalisis bagaimana penggunaan operator bitwise (XOR) dalam pemrograman dapat mempercepat proses eliminasi baris hingga berkali-kali lipat dibandingkan kalkulasi aritmatika desimal biasa, mempertegas efisiensi yang ditawarkan oleh metode ini.

Metode penelitian mencakup Uji Ketahanan Data melalui simulasi input yang mengandung gangguan atau kesalahan bit tunggal. Hal ini dilakukan untuk melihat bagaimana matriks paritas, yang diselesaikan melalui teknik OBE, mampu mendeteksi letak kesalahan tersebut. Dengan mengintegrasikan metode deteksi kesalahan ini, penelitian tidak hanya berhenti pada penyelesaian persamaan, tetapi juga menyentuh aspek fungsionalitas sistem transmisi data digital yang menjadi fokus utama dalam buku Malvino Leach.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan matriks OBE dalam domain biner memberikan alur kerja yang jauh lebih deterministik. Pada sistem dengan tiga variabel, metode OBE mampu mencapai solusi hanya dalam tiga hingga empat langkah eliminasi baris yang jelas. Hal ini sangat kontras dengan metode substitusi yang sering kali memerlukan pengulangan penulisan persamaan yang memakan ruang dan waktu.

Dalam pembahasan mengenai diskrit bilangan biner, ditemukan bahwa sifat XOR sangat mempermudah proses OBE.

Dalam aljabar bilangan riil, kita sering berurusan dengan pecahan saat melakukan eliminasi, yang sering memicu kesalahan perhitungan. Namun, dalam biner, setiap elemen adalah integer (0 atau 1), sehingga proses eliminasi baris menjadi sangat bersih dan bebas dari kesalahan pembulatan (rounding error).

Konsep pivot dalam matriks biner memberikan kejelasan mengenai “variabel bebas” dan “variabel terikat” dalam sebuah sirkuit digital. Melalui bentuk eselon baris tereduksi, seorang insinyur dapat langsung mengidentifikasi redundansi dalam desain sirkuit. Jika sebuah baris dalam matriks menjadi nol sepenuhnya, ini mengindikasikan adanya persamaan yang bergantung linear, yang secara teknis berarti ada gerbang logika yang tidak perlu.

Perbandingan efisiensi menunjukkan keunggulan mutlak matriks OBE pada sistem berskala besar. Saat variabel ditingkatkan menjadi sepuluh, metode substitusi manual menjadi hampir mustahil untuk dilakukan tanpa kesalahan, sementara matriks OBE tetap mempertahankan kompleksitas algoritma $O(n^3)$. Ini membuktikan bahwa pendekatan Arif Munandar memiliki relevansi tinggi dalam mengoptimalkan performa komputasi.

Implementasi teknik digital menggunakan matriks OBE juga memberikan wawasan baru tentang keamanan data. Dalam kriptografi biner, sering kali kita harus menyelesaikan sistem persamaan linear raksasa untuk memecahkan kode atau memverifikasi tanda tangan digital. Penguasaan atas OBE biner menjadi syarat mutlak bagi pengembangan protokol keamanan informasi yang lebih tangguh di masa depan.

Diskusi mengenai referensi Malvino Leach memperkuat argumen bahwa matematika matriks adalah bahasa alami bagi sirkuit digital. Setiap baris matriks dapat dipandang sebagai sebuah bus data, dan operasi XOR baris dapat diimplementasikan dalam perangkat keras menggunakan array gerbang XOR yang bekerja secara paralel. Hal ini memungkinkan penyelesaian sistem persamaan dilakukan dalam satu siklus clock pada perangkat FPGA.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa metode matriks OBE bukan sekadar teori tambahan, melainkan alat operasional yang superior. Integrasi antara logika biner dan aljabar linear memberikan kerangka kerja yang solid bagi perancangan sistem yang lebih kompleks. Pembahasan ini mengonfirmasi bahwa sinergi antara kedua bidang ini adalah kunci utama dalam efisiensi desain keteknikan digital kontemporer.

Analisis lebih lanjut mengungkap bahwa proses eliminasi Gauss-Jordan pada matriks biner secara inheren meminimalkan penggunaan sumber daya logika dalam sistem tertanam (embedded systems). Dalam arsitektur komputer, operasi XOR adalah salah satu instruksi yang paling murah secara komputasi dibandingkan perkalian atau pembagian aritmatika riil. Dengan mentransformasikan masalah teknik ke dalam bentuk matriks OBE, kita secara efektif

“menerjemahkan” masalah matematika tingkat tinggi menjadi instruksi bahasa mesin yang optimal dan cepat.

Dalam konteks sistem transmisi data, pembahasan ini menyentuh peran vital matriks biner dalam Error Correcting Codes (ECC). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa matriks generator dan matriks paritas yang disederhanakan melalui OBE dapat mempercepat proses deteksi kesalahan pada payload data. Hal ini sejalan dengan prinsip-prinsip komunikasi digital yang menuntut latency rendah; di mana kecepatan eliminasi biner menentukan seberapa cepat sebuah sistem dapat pulih dari gangguan sinyal.

Pembahasan juga menyoroti aspek efisiensi memori yang dihasilkan dari representasi matriks biner. Karena setiap elemen hanya membutuhkan 1 bit (bukan 32-bit atau 64-bit seperti pada bilangan floating point), matriks biner berukuran besar dapat disimpan dalam ruang penyimpanan yang sangat minimal. Hal ini memungkinkan perangkat dengan kapasitas RAM terbatas, seperti sensor IoT, untuk menjalankan algoritma diagnostik berbasis matriks yang sebelumnya dianggap terlalu berat.

Relevansi metode ini terhadap teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) pada perangkat biner juga didiskusikan. Binarized Neural Networks (BNN) menggunakan prinsip-prinsip yang mirip dengan aritmatika GF(2) untuk melakukan inferensi data. Hasil analisis dalam penelitian ini memberikan kerangka kerja tambahan bagi para pengembang BNN dalam mengoptimalkan bobot jaringan menggunakan teknik eliminasi linear yang sistematis, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi energi pada perangkat mobile.

Pembahasan ini menggarisbawahi pentingnya sinkronisasi antara teori matematika linear dan praktek teknik elektro. Integrasi metode OBE Arif Munandar ke dalam sistem diskrit membuktikan bahwa batasan antara ilmu murni dan terapan sebenarnya bersifat artifisial. Melalui pemahaman yang komprehensif tentang bagaimana matriks biner beroperasi, para insinyur digital dapat merancang sistem yang tidak hanya berfungsi secara logis, tetapi juga elegan secara matematis dan efisien secara operasional.

KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang telah dipaparkan, dapat disimpulkan bahwa penerapan matriks OBE pada sistem keteknikan digital merupakan metode yang sangat efektif dan sistematis. Penggunaan landasan aljabar linear memungkinkan penyelesaian sistem persamaan biner dilakukan dengan presisi tinggi. Hal ini membuktikan bahwa teori matematika murni dapat diadaptasi secara sempurna untuk kebutuhan rekayasa praktis.

Adaptasi aturan OBE ke dalam aritmatika biner melalui operasi XOR memberikan kemudahan yang tidak ditemukan dalam aljabar bilangan riil. Tidak adanya nilai negatif dan pecahan dalam GF(2) membuat proses eliminasi menjadi lebih sederhana dan cepat. Karakteristik ini menjadikan matriks biner sebagai media pembelajaran yang sangat baik untuk memahami dasardasar eliminasi Gauss-Jordan bagi mahasiswa teknik.

Metode matriks OBE terbukti lebih unggul dibandingkan metode substitusi biasa dalam hal skalabilitas dan otomasi. Kemudahan implementasi algoritma ini ke dalam bahasa pemrograman membuat matriks OBE menjadi pilihan standar dalam perangkat lunak desain elektronik (Electronic Design Automation). Efisiensi ini secara langsung berkontribusi pada percepatan proses perancangan dan validasi sirkuit digital.

Melalui artikel ini, terlihat jelas bahwa referensi dari Arif Munandar dan Malvino Leach saling melengkapi dalam membangun pemahaman tentang sistem diskrit. Pengetahuan tentang aljabar linear memberikan alat analisis, sementara prinsip digital memberikan objek aplikasi. Sinergi ini memperkaya khazanah ilmu pengetahuan di bidang teknik elektro dan informatika.

Implementasi OBE biner juga membuka wawasan mengenai optimasi sirkuit. Dengan mengidentifikasi ketergantungan linear melalui reduksi matriks, insinyur dapat mengurangi jumlah gerbang logika yang digunakan, yang pada akhirnya menurunkan konsumsi daya dan biaya produksi perangkat keras. Ini adalah aplikasi nyata dari efisiensi matematika dalam dunia industri.

Di masa depan, penguasaan atas matriks OBE biner akan semakin krusial seiring berkembangnya teknologi Quantum Computing dan Artificial Intelligence yang berbasis sistem diskrit. Pemahaman yang kokoh tentang bagaimana mengelola sistem persamaan linear biner akan menjadi aset berharga bagi para peneliti dalam menghadapi tantangan teknologi yang lebih ekstrem.

Sebagai penutup, artikel ini merekomendasikan integrasi yang lebih erat antara kurikulum aljabar linear dan teknik digital di tingkat perguruan tinggi. Dengan melihat keterkaitan fungsional antara kedua subjek ini, mahasiswa akan lebih termotivasi untuk mendalami matematika sebagai alat bantu utama dalam menyelesaikan masalah teknik yang nyata dan kompleks.

Lebih lanjut, kesimpulan ini menegaskan bahwa teknik eliminasi biner adalah fondasi bagi ketahanan data modern. Melalui analisis matriks OBE, kita dapat memastikan bahwa setiap bit informasi yang dikirimkan melalui jaringan komunikasi memiliki verifikasi matematis yang kuat. Hal ini menunjukkan bahwa keamanan siber di masa depan akan sangat bergantung pada seberapa efisien kita mengelola operasi matriks biner berskala besar.

Penemuan dalam penelitian ini juga menyiratkan bahwa pemahaman atas matriks biner dapat menyederhanakan proses debugging pada sistem perangkat keras yang kompleks. Insinyur tidak perlu lagi melakukan pelacakan fisik yang melelahkan, melainkan cukup melakukan pemodelan matriks untuk menemukan anomali logika. Kesimpulan ini mendorong pergeseran paradigma dari metode trial-and-error menuju metode mathematical-assurance dalam desain sistem digital.

Dalam konteks efisiensi energi, penggunaan OBE biner berkontribusi pada penciptaan perangkat elektronik yang lebih ramah lingkungan. Operasi matriks yang optimal berarti siklus prosesor yang lebih sedikit, yang secara langsung berimplikasi pada penghematan daya baterai pada perangkat mobile dan pengurangan panas pada pusat data (data center). Hal ini memposisikan aljabar linear sebagai kontributor tidak langsung dalam gerakan teknologi hijau (Green Technology).

Kesimpulan ini juga menyoroti pentingnya kolaborasi multidisiplin antara pakar matematika dan insinyur komputer. Tantangan digital masa depan, seperti pemrosesan data besar (Big Data), memerlukan algoritma yang tidak hanya cepat tetapi juga memiliki basis teoretis yang kuat. Integrasi OBE ke dalam sistem diskrit adalah langkah awal menuju standarisasi algoritma digital yang lebih universal dan tangguh.

Dari sisi edukasi, naskah ini menyimpulkan bahwa pengajaran teknik digital harus mulai memasukkan aspek metode formal aljabar linear sejak dini. Pendekatan visual melalui

matriks membantu mahasiswa memahami abstraksi logika dengan lebih baik daripada sekadar menghafal tabel kebenaran. Ini akan menciptakan generasi inovator yang mampu berpikir secara sistemik dan mampu melakukan pemecahan masalah (problem solving) secara algoritmis.

Seluruh analisis ini bermuara pada satu poin fundamental: bahwa angka 0 dan 1 (sistem biner) adalah bahasa alam semesta digital yang paling murni, dan aljabar linear adalah tata bahasanya. Dengan menguasai tata bahasa ini melalui teknik Operasi Baris Elementer, kita tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi menjadi arsitek yang mampu mengendalikan masa depan informasi dengan presisi dan harmoni.

DAFTAR PUSTAKA

- Munandar, Arif. (2012). Aljabar Linear Elementer. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Malvino, Albert Paul, & Leach, Donald P. (2011). Prinsip-prinsip dan Penerapan Digital. Jakarta: Erlangga.
- Anton, Howard, & Rorres, Chris. (2014). Elementary Linear Algebra: Applications Version. 11th Edition. John Wiley & Sons.
- Strang, Gilbert. (2016). Introduction to Linear Algebra. 5th Edition. WellesleyCambridge Press.
- Roth, Charles H., & Kinney, Larry L. (2013). Fundamentals of Logic Design. 7th Edition. Cengage Learning.
- Stallings, William. (2017). Cryptography and Network Security: Principles and Practice. 7th Edition. Pearson.
- Lay, David C., Lay, Steven R., & McDonald, Judi J. (2015). Linear Algebra and Its Applications. 5th Edition. Pearson.
- Mano, M. Morris, & Ciletti, Michael D. (2017). Digital Design: With an Introduction to the Verilog HDL, VHDL, and SystemVerilog. 6th Edition. Pearson.
- Lidl, Rudolf, & Niederreiter, Harald. (1994). Introduction to Finite Fields and Their Applications. Cambridge University Press.
- Shannon, Claude E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal.
- Leon, Steven J. (2014). Linear Algebra with Applications. 9th Edition. Pearson.
- Floyd, Thomas L. (2015). Digital Fundamentals. 11th Edition. Pearson Education. (Visualisasi komprehensif mengenai operasi biner dalam perangkat keras).