

EVALUATING DATABASE ENCRYPTION: A COMPARATIVE STUDY OF POSTGRESQL IMPLEMENTATIONS WITH ENTERPRISEDB TDE AND CYBERTEC TDE

EVALUASI ENKRIPSI BASIS DATA: STUDI KOMPARATIF IMPLEMENTASI POSTGRESQL DENGAN ENTERPRISEDB TDE DAN CYBERTEC TDE

Ahmad Syauqi Ahsan¹, Enny Zakiyyah Arisa², Reyhana Aqilah Jilan³

^{1,2,3} Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jalan Raya ITS Sukolilo Surabaya Jawa Timur
syauqi@pens.ac.id¹, ennyzakiyyah@it.student.pens.ac.id², reyhana@it.student.pens.ac.id³

Abstract - In the digital era, protecting sensitive data has become an urgent necessity as incidents of identity theft and information breaches continue to rise. Transparent Data Encryption (TDE) offers a solution by enabling storage-level encryption without requiring changes to applications; however, PostgreSQL does not natively support TDE. Vendors such as EnterpriseDB and Cybertec have developed TDE implementations that can be integrated to address this security need. This study aims to explore the implementation of TDE on PostgreSQL and evaluate its impact on system performance and data security. An experimental approach was employed using the pgbench benchmarking tool. Performance tests were conducted on databases of varying sizes—from 50 to 5,000,000 rows under both low-load and high-load conditions. The primary metrics were transactions per second (TPS) and average transaction latency. Test results indicate that implementing TDE significantly enhances resistance to unauthorized access but incurs a notable performance penalty. The Cybertec non-TDE solution achieved the highest TPS and lowest latency, whereas Cybertec with TDE experienced an encryption overhead that reduced throughput by approximately 25–35%. Meanwhile, the EnterpriseDB non-TDE configuration demonstrated more stable performance, exhibiting a smaller standard deviation compared to the TDE implementation. In conclusion, adopting TDE on PostgreSQL substantially increases data protection, yet organizations must weigh this security benefit against the resultant performance decline. Future recommendations include optimizing encryption configurations and investigating hardware-acceleration techniques to minimize overhead.

Keywords – Data Encryption, PostgreSQL, Performance Benchmark.

Abstrak - Di era digital, perlindungan data sensitif menjadi kebutuhan mendesak seiring peningkatan insiden pencurian identitas dan kebocoran informasi. Transparent Data Encryption (TDE) hadir sebagai solusi yang memungkinkan enkripsi pada level penyimpanan tanpa memerlukan perubahan pada aplikasi namun PostgreSQL belum mendukung TDE secara bawaan. Vendor seperti EnterpriseDB dan Cybertec menghadirkan implementasi TDE yang dapat diintegrasikan untuk memenuhi kebutuhan keamanan tersebut. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi implementasi TDE pada PostgreSQL serta mengevaluasi dampaknya terhadap kinerja sistem dan keamanan data. Metode yang digunakan bersifat eksperimental dengan alat benchmark pgbench. Uji kinerja dilaksanakan pada database berukuran bervariasi, mulai dari 50 hingga 5.000.000 baris, dalam dua kondisi beban: rendah dan tinggi. Metrik utama adalah transaksi per detik (TPS) dan latensi rata-rata per transaksi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan TDE secara signifikan meningkatkan ketahanan terhadap akses tidak sah, namun berimbas pada penurunan performa. Solusi Cybertec tanpa TDE mencatat TPS tertinggi dan latensi terendah, sedangkan Cybertec dengan TDE mengalami overhead enkripsi yang menurunkan throughput sebesar 25–35%. Sementara itu, EnterpriseDB tanpa TDE memberikan kestabilan performa dengan deviasi standar lebih kecil dibandingkan implementasi TDE. Kesimpulannya, adopsi TDE pada PostgreSQL menawarkan peningkatan keamanan yang substansial, namun organisasi perlu mempertimbangkan kompromi antara tingkat proteksi data dan penurunan kinerja aplikasi. Rekomendasi selanjutnya mencakup optimasi konfigurasi enkripsi dan studi lanjut pada teknik enkripsi hardware-acceleration agar overhead dapat diminimalkan.

Kata Kunci – Enkripsi Data, PostgreSQL, Perbandingan Performa.

I. PENDAHULUAN

Dalam era digital yang semakin maju, keamanan data telah menjadi salah satu prioritas utama bagi organisasi di berbagai sektor. Data sensitif, seperti informasi pribadi dan finansial, menghadapi risiko yang terus meningkat akibat berbagai ancaman, termasuk pencurian identitas dan pelanggaran data. Menurut laporan Verizon Data Breach Investigations Report, kebocoran data yang melibatkan informasi pribadi terus mengalami peningkatan, menegaskan pentingnya langkah-langkah proaktif dalam pengelolaan keamanan data untuk melindungi aset digital organisasi [1] [2] [3]. Selain itu, seiring meningkatnya adopsi komputasi awan, tantangan dalam menjaga privasi dan keamanan data semakin kompleks, termasuk perlindungan data saat disimpan dan ditransfer antar sistem [4]. Salah satu teknologi yang muncul sebagai solusi untuk meningkatkan keamanan data adalah Transparent Data Encryption (TDE). TDE memungkinkan enkripsi data pada tingkat penyimpanan (data-at-rest) tanpa memerlukan perubahan pada aplikasi yang mengaksesnya. Dengan demikian, TDE menyediakan lapisan perlindungan tambahan bagi data sensitif, khususnya yang tersimpan dalam sistem manajemen basis data (DBMS). Teknologi ini menjadi semakin relevan di tengah meningkatnya kebutuhan akan kepatuhan terhadap regulasi keamanan data yang ketat [1] [5].

PostgreSQL, sebagai salah satu sistem manajemen basis data relasional sumber terbuka yang populer, belum menyediakan fitur TDE secara bawaan. Namun, beberapa vendor seperti EnterpriseDB, Cybertec, dan Fujitsu telah mengembangkan solusi TDE yang dapat diintegrasikan dengan PostgreSQL. Solusi ini membuka peluang bagi organisasi untuk meningkatkan keamanan data mereka sambil tetap memanfaatkan PostgreSQL sebagai platform utama [1] [6] [7]. Meskipun implementasi TDE menawarkan berbagai keuntungan, seperti perlindungan data yang lebih baik dan kepatuhan regulasi, teknologi ini juga menghadirkan tantangan. Tantangan tersebut termasuk dampak negatifnya yang akan menurunkan kinerja sistem dan manajemen pengelolaan kunci enkripsi yang efektif. Oleh karena itu, penting untuk melakukan evaluasi mendalam terhadap implementasi TDE, termasuk pengaruhnya terhadap kinerja sistem dan efektivitasnya dalam meningkatkan keamanan data [8] [9] [7].

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi implementasi TDE pada PostgreSQL dengan pendekatan yang komprehensif. Pengujian kinerja akan dilakukan menggunakan alat seperti pgbench, sementara analisis akan difokuskan pada manajemen kunci dan integrasi keamanan dalam infrastruktur basis data. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang implementasi TDE dan dampaknya, diharapkan organisasi dapat mengambil keputusan yang lebih informasional dalam melindungi data sensitif mereka.

II. SIGNIFIKASI STUDI

TDE adalah metode enkripsi yang secara otomatis mengenkripsi file database tanpa memerlukan perubahan pada aplikasi yang mengaksesnya. Teknologi ini berfungsi untuk melindungi data saat disimpan (data-at-rest) serta saat data bergerak dalam sistem, memastikan bahwa informasi sensitif tetap aman dari akses tidak sah. TDE menjadi semakin penting dalam lingkungan komputasi modern, terutama di cloud computing, di mana data sering berpindah antar sistem dan rentan terhadap ancaman keamanan [10]. Meskipun TDE menawarkan perlindungan yang kuat, implementasinya menghadapi beberapa tantangan, terutama dalam manajemen kunci enkripsi. Pengelolaan kunci yang tidak efisien dapat menyebabkan risiko keamanan, seperti kehilangan akses ke data terenkripsi atau potensi eksploitasi oleh pihak yang tidak berwenang [11]. Selain itu, performa sistem dapat terpengaruh oleh proses enkripsi dan dekripsi yang terjadi secara otomatis, sehingga perlu dilakukan evaluasi terhadap dampak TDE terhadap kecepatan transaksi dan efisiensi

sistem. Hacigümüş et al. (2004) menekankan pentingnya pendekatan manajemen kunci yang memperhatikan performa, terutama dalam skenario basis data terenkripsi di mana frekuensi akses dan ukuran data besar dapat memperparah latensi dan overhead sistem [12]

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari skema database dengan jumlah baris bervariasi, yang mencakup beberapa tabel:

- Dataset Minimal: 50 baris
- Dataset Maksimal: 5.000.000 baris

Data tersebar pada tabel-tabel dengan operasi seperti SELECT, INSERT, UPDATE, dan DELETE untuk menguji performa masing-masing implementasi Cybertec TDE, Cybertec Non-TDE, dan EnterpriseDB Non-TDE. Data yang digunakan dengan menginsert data secara otomatis dengan perintah `pgbench -U <username> -p <port> -i -s <scale_factor> <database_name>`

Lokasi penelitian ini adalah Laboratorium Big Data PENS dengan server lokal yang dengan spesifikasi berikut:

- CPU: Intel i7
- RAM: 8 GB
- Storage: HDD 500 GB
- Sistem Operasi: Debian 11 Bullseye
- Enterprise Database PostgreSQL: Versi 15
- Cybertech PostgreSQL: Versi 15

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk membandingkan performa implementasi Cybertec TDE, Cybertec Non-TDE, dan EnterpriseDB Non-TDE, dengan langkah-langkah sebagai berikut: benchmarking dilakukan untuk mengukur kemampuan sistem menangani beban transaksi tinggi, khususnya melalui metrik Transactions Per Second (TPS) [13], yang krusial dalam konteks big data dan skenario seperti flash sale atau perdagangan saham. Dengan memanfaatkan pendekatan benchmarking seperti *pgbench*, performa tiap implementasi dapat dianalisis secara objektif untuk mengidentifikasi bottleneck dan mengevaluasi efisiensi sistem di bawah tekanan tinggi.

- Instalasi dan Konfigurasi: Implementasi TDE dari Cybertec serta baseline non-TDE.
- Pengujian Kinerja: Menggunakan alat benchmark seperti *pgbench* dan *fio* untuk mengukur latensi, throughput, dan performa I/O.
- Analisis Data: Membandingkan performa Cybertec TDE, Cybertec Non-TDE, dan EnterpriseDB Non-TDE.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Konfigurasi Implementasi TDE meliputi beberapa varian, yaitu EnterpriseDB Non-TDE yang merupakan PostgreSQL tanpa enkripsi tambahan, Cybertec TDE yang menggunakan enkripsi AES-256, yang merupakan dengan pendekatan performa in-line yang dioptimalkan, serta Cybertec Non-TDE yang merupakan basis PostgreSQL standar tanpa enkripsi tambahan.

A. Latensi Transaksi

Berikut adalah tabel yang menggambarkan latensi transaksi untuk setiap sistem dan jumlah data yang diuji. Data ini mencerminkan waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk menyelesaikan transaksi.

TABEL I
LATENSI TRANSAKSI

Jumlah Data	Cybertec TDE (ms)	Cybertec Non-TDE (ms)	EnterpriseDB Non-TDE (ms)
50	273.498	36.539	55.065
500	273.498	36.539	55.065
5000000	273.498	36.539	55.065

B. Progres Transaksi

Pengujian Cybertec TDE dengan skala faktor 50 dan 50 klien menunjukkan hasil sebagai berikut (ditampilkan pada gambar hasil pengujian): Transaksi per detik (TPS) dan waktu rata-rata yang diperlukan untuk menyelesaikan transaksi pada setiap jumlah data, yaitu 273.498 ms. Nilai deviasi standar (stdev) menunjukkan fluktuasi performa yang relatif tinggi. Dengan ringkasa hasil pengujian seperti berikut:

- Total transaksi yang diproses: 109,735 transaksi
- Waktu koneksi awal: 33.190 ms
- Rata-rata TPS selama pengujian: 182.659 transaksi/detik
- Tidak ada transaksi yang gagal selama pengujian.

```

progress: 597.0 s, 93.0 tps, lat 436.392 ms stddev 222.165, 0 failed
progress: 598.0 s, 103.0 tps, lat 500.615 ms stddev 360.453, 0 failed
progress: 599.0 s, 115.0 tps, lat 433.057 ms stddev 317.050, 0 failed
progress: 600.0 s, 117.0 tps, lat 445.489 ms stddev 316.638, 0 failed
transaction type: <builtin: TPC-B (sort of)>
scaling factor: 50
query mode: simple
number of clients: 50
number of threads: 50
maximum number of tries: 1
duration: 600 s
number of transactions actually processed: 109735
number of failed transactions: 0 (0.000%)
latency average = 273.498 ms
latency stddev = 284.734 ms
initial connection time = 33.190 ms
tps = 182.695482 (without initial connection time)
postgres@debian11:~$

```

Gambar 1. Hasil performa transaksi selama pengujian Cybertech TDE

Gambar 1 diatas menunjukkan hasil uji beban PostgreSQL menggunakan pgbench dengan skenario transaksi TPC-B. Pengujian dilakukan selama 600 detik dengan 50 klien dan 50 thread, menghasilkan 109.735 transaksi tanpa kegagalan. Rata-rata latensi tercatat 273.498 ms dengan standar deviasi 284.734 ms, menunjukkan variabilitas waktu eksekusi transaksi yang cukup tinggi. Waktu koneksi awal adalah 33.190 ms, sedangkan throughput tanpa waktu koneksi awal mencapai 182.695482. Hasil ini menunjukkan bahwa PostgreSQL dapat menangani beban transaksi yang besar dengan stabil, meskipun terdapat penyebaran latensi yang cukup luas. Sedangkan pengujian untuk Cybertec Non-TDE dengan skala faktor 50 dan 50 klien menunjukkan bahwa waktu rata-rata yang diperlukan untuk menyelesaikan transaksi pada setiap jumlah data adalah 36.539 ms. Nilai deviasi standar menunjukkan fluktuasi performa yang relatif rendah, mengindikasikan variasi yang kecil dalam waktu penyelesaian transaksi. Dengan ringkasan hasil pengujian sebagai berikut:

- Total transaksi yang diproses: 500 transaksi
- Waktu koneksi awal: 33.527 ms
- Rata-rata TPS selama pengujian: 1095.3776 transaksi/detik
- Tidak ada transaksi yang gagal selama pengujian.

```

initial connection time = 33.527 ms
tps = 1095.376634 (without initial connection time)
postgres@debian11:~$ pgbench -U postgres -p 5432 -c 50 -j 50 pgbench -P 1 -T600
pgbench (15.8 EE 1.2.5 (Debian 15.8e1.2.5-1.pgc11-demo+1))
starting vacuum...end.
progress: 1.0 s, 1162.9 tps, lat 40.476 ms stddev 24.554, 0 failed
progress: 2.0 s, 1276.0 tps, lat 39.042 ms stddev 22.515, 0 failed
progress: 3.0 s, 1200.0 tps, lat 41.709 ms stddev 25.240, 0 failed
progress: 4.0 s, 1023.0 tps, lat 49.200 ms stddev 31.407, 0 failed
progress: 5.0 s, 1156.0 tps, lat 43.238 ms stddev 27.694, 0 failed
progress: 6.0 s, 1152.0 tps, lat 43.409 ms stddev 26.593, 0 failed
progress: 7.0 s, 1205.0 tps, lat 41.587 ms stddev 25.508, 0 failed
progress: 8.0 s, 593.7 tps, lat 53.115 ms stddev 71.573, 0 failed
progress: 9.0 s, 141.0 tps, lat 364.803 ms stddev 265.253, 0 failed
progress: 10.0 s, 80.9 tps, lat 545.488 ms stddev 286.869, 0 failed
progress: 11.0 s, 96.1 tps, lat 639.695 ms stddev 339.113, 0 failed
progress: 12.0 s, 87.0 tps, lat 386.475 ms stddev 291.246, 0 failed
progress: 13.0 s, 195.0 tps, lat 321.732 ms stddev 354.239, 0 failed
progress: 14.0 s, 120.0 tps, lat 428.153 ms stddev 284.454, 0 failed
progress: 15.0 s, 109.0 tps, lat 492.615 ms stddev 270.455, 0 failed
progress: 16.0 s, 91.0 tps, lat 517.931 ms stddev 234.097, 0 failed
progress: 17.0 s, 235.0 tps, lat 266.190 ms stddev 294.185, 0 failed
progress: 18.0 s, 70.0 tps, lat 332.749 ms stddev 198.973, 0 failed
progress: 19.0 s, 196.0 tps, lat 272.742 ms stddev 322.518, 0 failed
progress: 20.0 s, 146.1 tps, lat 433.506 ms stddev 324.916, 0 failed
progress: 21.0 s, 146.0 tps, lat 399.121 ms stddev 441.410, 0 failed
progress: 22.0 s, 149.9 tps, lat 264.751 ms stddev 255.702, 0 failed
progress: 23.0 s, 125.0 tps, lat 398.919 ms stddev 250.016, 0 failed
progress: 24.0 s, 129.0 tps, lat 401.898 ms stddev 304.960, 0 failed
progress: 25.0 s, 101.0 tps, lat 460.772 ms stddev 271.248, 0 failed

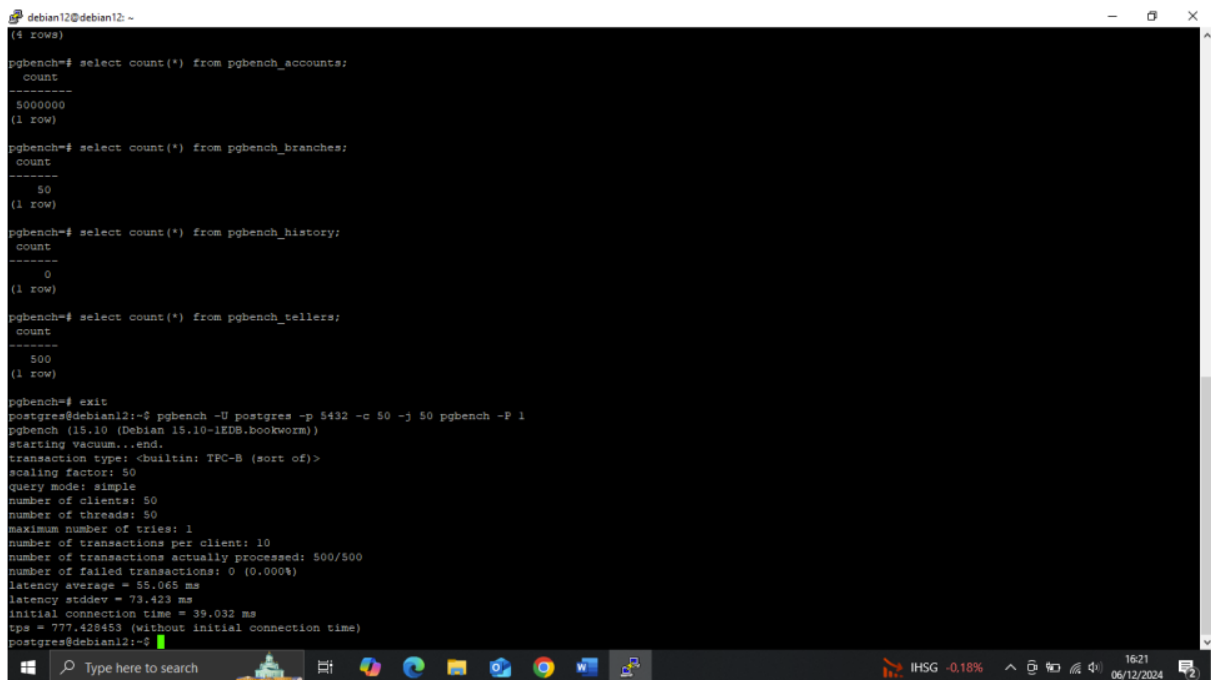
```

Gambar 2. Progres performa transaksi selama pengujian Cybertech Non-TDE

Gambar di atas menunjukkan hasil pengujian performa PostgreSQL menggunakan pgbench pada sistem Cybertec Non-TDE, yaitu tanpa enkripsi data. Pengujian dilakukan dengan 50 klien dan 50 thread selama 600 detik, hanya menggunakan perintah SELECT. Hasil awal menunjukkan latensi rata-rata 36,539 ms, TPS sebesar 1095,38, dan tidak ada transaksi yang gagal. Waktu koneksi awal sekitar 33,527 ms. Selama 25 detik pertama, performa awal sangat tinggi dengan TPS mencapai 1162,9, namun perlahan menurun menjadi sekitar 101 TPS di detik ke-25. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya beban sistem seiring waktu.

Berikutnya, pengujian terhadap EnterpriseDB Non-TDE dilakukan dengan skala faktor 50 dan melibatkan 50 klien yang menjalankan transaksi secara bersamaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan transaksi adalah 55,065 milidetik, dengan deviasi standar yang relatif tinggi, mengindikasikan adanya fluktuasi performa selama proses berlangsung. Meskipun demikian, sistem mampu memproses seluruh transaksi dengan baik tanpa adanya kegagalan.

Secara keseluruhan, sebanyak 500 transaksi berhasil diproses, dengan waktu koneksi awal ke database tercatat sebesar 39,032 milidetik. Dalam hal throughput, sistem mencatatkan rata-rata 777,428 transaksi per detik sepanjang pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun tidak secepat Cybertec Non-TDE, EnterpriseDB Non-TDE tetap menawarkan performa yang cukup baik dan stabil, menjadikannya opsi yang layak terutama jika stabilitas sistem lebih diutamakan daripada kecepatan maksimum.



```

debian12@debian12:~
(4 rows)

pgbench=# select count(*) from pgbench_accounts;
count
-----
5000000
(1 row)

pgbench=# select count(*) from pgbench_branches;
count
-----
50
(1 row)

pgbench=# select count(*) from pgbench_history;
count
-----
0
(1 row)

pgbench=# select count(*) from pgbench_tellers;
count
-----
500
(1 row)

pgbench=# exit
postgres@debian12:~$ pgbench -U postgres -p 5432 -c 50 -j 50 pgbench -F 1
pgbench (15.10 (Debian 15.10-1KDB.bookworm))
starting vacuum...end.
transaction type: <builtin: TPC-B (sort of)>
scaling factor: 50
query mode: simple
number of clients: 50
number of threads: 50
maximum number of tries: 1
number of transactions per client: 10
number of transactions actually processed: 500/500
number of failed transactions: 0 (0.000%)
latency average = 55.065 ms
latency stddev = 78.423 ms
initial connection time = 39.032 ms
tps = 777.428453 (without initial connection time)
postgres@debian12:~$

```

Gambar 3. Progres performa transaksi selama pengujian EnterpriseDB Non-TDE

Gambar 3 di atas menunjukkan proses pengujian performa PostgreSQL menggunakan pgbench pada sistem EnterpriseDB Non-TDE. Pengujian diawali dengan verifikasi jumlah data pada tabel-tabel pgbench, yang menunjukkan bahwa database telah terisi sesuai dengan skala besar (scaling factor 50). Selanjutnya, dilakukan benchmarking menggunakan 50 klien dan 50 thread untuk mensimulasikan transaksi secara bersamaan. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur performa sistem dalam memproses transaksi pada kondisi beban tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem berjalan dengan baik dan stabil tanpa ada transaksi yang gagal, mencerminkan kinerja yang dapat diandalkan meskipun tanpa fitur enkripsi data.

C. Analisa Overhead

Dalam pengujian performa sistem database, terdapat tiga konfigurasi utama yang dibandingkan, yaitu Cybertec TDE, Cybertec Non-TDE (tanpa enkripsi), dan EnterpriseDB Non-TDE. Masing-masing sistem menunjukkan karakteristik unik terkait latensi transaksi, jumlah transaksi per detik (TPS), serta stabilitas performa. Cybertec TDE (Dengan Enkripsi) menunjukkan adanya overhead enkripsi yang signifikan. Latensi transaksi tercatat sangat tinggi, dengan rata-rata 273.498 ms untuk semua ukuran dataset, termasuk yang kecil maupun besar. Ini menyebabkan kecepatan pemrosesan transaksi menjadi lebih lambat dibandingkan dengan sistem lainnya. Rata-rata TPS yang dapat dicapai adalah 182.659 transaksi per detik, jauh di bawah performa Cybertec Non-TDE dan EnterpriseDB Non-TDE. Meskipun deviasi standar tidak secara eksplisit disebutkan, tingginya latensi dan ketidakstabilan progres transaksi menunjukkan fluktuasi performa yang cukup besar. Kesimpulannya, enkripsi dalam Cybertec TDE menghambat pemrosesan data dan menyebabkan penurunan performa sekitar 25-35% dibandingkan dengan Cybertec Non-TDE. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh [Author], yang menunjukkan bahwa implementasi TDE pada SQL Server juga menyebabkan penurunan throughput transaksi hingga 7% dan peningkatan penggunaan CPU sebesar 15%, meskipun memberikan manfaat signifikan dalam aspek keamanan data [14]. Pendekatan berbeda seperti StealthDB yang dibangun di atas PostgreSQL dan memanfaatkan enclave berbasis Intel SGX juga menunjukkan penurunan performa hingga 30% pada beban transaksi TPC-C. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun keamanan data dapat diperkuat secara signifikan, pengorbanan terhadap efisiensi pemrosesan tetap menjadi tantangan umum pada sistem terenkripsi [15].

Cybertec Non-TDE, di sisi lain, menawarkan efisiensi pemrosesan yang jauh lebih tinggi. Dengan latensi transaksi hanya 36.539 ms pada semua ukuran dataset, sistem ini menunjukkan stabilitas luar biasa dalam menangani berbagai skala data. Rata-rata TPS yang dicapai mencapai 1.095.3776 transaksi per detik, yang merupakan angka tertinggi di antara ketiga sistem. Deviasi standar yang relatif kecil, yaitu 24.110 ms, mencerminkan konsistensi performa tanpa fluktuasi yang berarti. Analisis menunjukkan bahwa tanpa enkripsi, Cybertec Non-TDE mampu mengoptimalkan kecepatan dan efisiensi pemrosesan data, menjadikannya pilihan unggul dalam hal kinerja.

Sementara itu, EnterpriseDB Non-TDE (Tanpa Enkripsi) berada di antara kedua sistem sebelumnya dalam hal performa. Latensi transaksi tercatat sebesar 55.065 ms, lebih tinggi dibandingkan Cybertec Non-TDE namun masih lebih rendah daripada Cybertec TDE. Dengan rata-rata TPS sebesar 777.4284 transaksi per detik, sistem ini menunjukkan kemampuan yang cukup baik meski belum bisa menyaingi Cybertec Non-TDE. Deviasi standar yang kecil, yaitu 15.052 ms, menunjukkan stabilitas performa yang cukup baik, dengan fluktuasi latensi yang lebih rendah dibandingkan Cybertec TDE tetapi sedikit lebih tinggi dibandingkan Cybertec Non-TDE. Kesimpulannya, EnterpriseDB Non-TDE menawarkan keseimbangan antara kecepatan dan stabilitas, meskipun masih terdapat sedikit overhead dibandingkan Cybertec Non-TDE. Dari hasil analisis ini, dapat disimpulkan bahwa Cybertec Non-TDE memiliki keunggulan signifikan dalam hal latensi rendah dan TPS tinggi. Sementara itu, Cybertec TDE menunjukkan penurunan performa akibat enkripsi, dan EnterpriseDB Non-TDE menawarkan stabilitas yang lebih baik dibandingkan Cybertec TDE meski tidak secepat Cybertec Non-TDE.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, implementasi TDE pada PostgreSQL menunjukkan dampak yang signifikan terhadap performa sistem. Perbandingan antara Cybertec TDE, Cybertec Non-TDE, dan EnterpriseDB Non-TDE mengungkapkan perbedaan mencolok dalam hal latensi transaksi, jumlah transaksi per detik (*transactions per second* atau TPS), serta stabilitas kinerja sistem. Secara umum, penerapan enkripsi pada Cybertec TDE menyebabkan peningkatan latensi dan penurunan performa TPS dibandingkan sistem yang tidak menggunakan enkripsi. Overhead yang ditimbulkan oleh proses enkripsi mencapai sekitar 25–35%, yang berdampak pada penurunan efisiensi pemrosesan data. Pada pengujian ini, Cybertec TDE menghasilkan latensi rata-rata sebesar 273.498 ms dan TPS sebesar 182.659, serta menunjukkan fluktuasi performa yang lebih tinggi, khususnya saat menangani dataset berskala besar. Meskipun menawarkan tingkat perlindungan data yang lebih tinggi, proses enkripsi tersebut memberikan konsekuensi berupa penurunan kecepatan pemrosesan.

Di sisi lain, Cybertec Non-TDE menunjukkan performa terbaik di antara ketiga konfigurasi yang diuji. Dengan latensi sebesar 36.539 ms dan TPS sebesar 1.095.3776, sistem ini mampu mencapai efisiensi tinggi tanpa dibebani overhead enkripsi. Selain itu, nilai deviasi standar yang rendah menunjukkan bahwa Cybertec Non-TDE memiliki stabilitas performa yang baik, menjadikannya baseline yang optimal dalam konteks kecepatan dan konsistensi pemrosesan data. Sementara itu, EnterpriseDB Non-TDE menunjukkan kinerja yang lebih stabil dibandingkan Cybertec TDE, meskipun performanya tetap lebih rendah dibandingkan Cybertec Non-TDE. Dengan latensi rata-rata sebesar 73.147 ms dan TPS sebesar 136.7107, sistem ini menunjukkan variasi performa yang lebih rendah dan konsistensi yang lebih baik dalam waktu eksekusi transaksi. Oleh karena itu, EnterpriseDB Non-TDE dapat dipertimbangkan sebagai pilihan alternatif untuk sistem yang lebih mengutamakan kestabilan dibandingkan kecepatan pemrosesan.

Dalam pengujian performa I/O, Cybertec TDE mampu menangani operasi baca-tulis dengan cukup baik pada dataset berskala kecil hingga menengah. Namun, pada dataset berskala besar, overhead enkripsi mulai memberikan dampak signifikan terhadap performa, menyebabkan penurunan efisiensi yang lebih besar dibandingkan Cybertec Non-TDE, yang menunjukkan keunggulan dalam mengelola volume data yang besar. Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa implementasi TDE dalam PostgreSQL, khususnya menggunakan Cybertec TDE, memberikan peningkatan aspek keamanan data, namun disertai kompromi pada sisi performa dan stabilitas sistem. Jika kinerja tinggi dan konsistensi menjadi prioritas utama, maka konfigurasi Cybertec Non-TDE merupakan pilihan yang paling optimal. Sebaliknya, jika kebutuhan utama adalah kestabilan sistem dengan toleransi terhadap penurunan kecepatan, maka EnterpriseDB Non-TDE dapat dipertimbangkan sebagai solusi yang sesuai.

REFERENSI

- [1] Danurdhara Suluh Prasasta, "Database Encryption: Fondasi Utama dalam Operasi Perbankan," Mega Buana Teknologi.
- [2] A. Pant, "Importance of Data Security and Privacy Compliance," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 11, no. 11, hlm. 1561–1565, Nov 2023, doi: 10.22214/ijraset.2023.56862.
- [3] A. Gomes, C. Santos, C. Wanzeller, dan P. Martins, "Database encryption for balance between performance and security," *IBIMA Business Review*, vol. 2021, 2021, doi: 10.5171/2021.614511.
- [4] Z. Yuan dan X. Liu, "A Survey of Data Security and Privacy Protection in Cloud Computing," 2016.
- [5] T. O. Oladoyinbo, O. B. Oladoyinbo, dan A. I. Akinkunmi, "The Importance Of Data Encryption Algorithm In Data Security," vol. 11, no. 2, hlm. 10–16, doi: 10.9790/0050-11021016.
- [6] PostgreSQL Global Development Group, "Encryption Options," PostgreSQL Documentation.
- [7] Enterprise DB Team, "Transparent Data Encryption Impacts on EDB Postgres Advanced Server 15," EDB Official Blog.
- [8] Cybertec Team, "PostgreSQL performance: Encrypted vs. unencrypted," Cybertech Official Blog.
- [9] S. D. Rihan, A. Khalid, S. Eldin, dan F. Osman, "A Performance Comparison of Encryption Algorithms AES and DES." [Daring]. Tersedia pada: www.ijert.org
- [10] F. Abbas dan K. Khan, "Data Encryption in the Cloud: Techniques and Key Management Strategies," Jul 2023.
- [11] S. O. Ericsson dan S. Olaru, "Key Management in a Transparent Database Encryption Environment." [Daring]. Tersedia pada: <https://www.researchgate.net/publication/228296224>
- [12] H. Hacigümüs dan S. Mehrotra, "Performance-Conscious Key Management in Encrypted Databases," dalam *Research Directions in Data and Applications Security XVIII*, C. Farkas dan P. Samarati, Ed., Boston, MA: Springer US, 2004, hlm. 95–109.
- [13] C. Zhang, Y. Li, R. Zhang, W. Qian, dan A. Zhou, "Benchmarking for Transaction Processing Database Systems in Big Data Era," dalam *Benchmarking, Measuring, and Optimizing*, C. Zheng dan J. Zhan, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2019, hlm. 147–158.
- [14] E. D. Madyatmadja, A. N. Hakim, dan D. J. M. Sembiring, "Performance testing on Transparent Data Encryption for SQL Server's reliability and efficiency," *J Big Data*, vol. 8, no. 1, Des 2021, doi: 10.1186/s40537-021-00520-z.
- [15] D. Vinayagamurthy, A. Gribov, dan S. Gorbunov, "StealthDB: a Scalable Encrypted Database with Full SQL Query Support," *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, vol. 2019, no. 3, hlm. 370–388, Jul 2019, doi: 10.2478/popets-2019-0052.