

Implementasi Server Virtualisasi Menggunakan Proxmox untuk Manajemen Infrastruktur Jaringan dan Layanan Internet pada Institusi Pendidikan

Rido¹, Mohammad Rezza Pahlevi², Imam Maliki³, Muhammad Iqbal⁴

^{1,2,4}Program Studi Informatika, Universitas Indonesia Membangun, Bandung, Indonesia

³Program Studi Sistem Informasi, Universitas Indonesia Membangun, Bandung, Indonesia

Lini Masa Artikel: Diterima 01 Januari 2026; Disetujui 26 Januari 2026

email: mohammadrezzapahlevi@inaba.ac.id

Abstrak: Institusi pendidikan modern menghadapi tantangan dalam mengelola infrastruktur teknologi informasi yang kompleks dengan keterbatasan sumber daya. Penelitian ini mengkaji implementasi teknologi virtualisasi menggunakan *Proxmox Virtual Environment* untuk mengoptimalkan manajemen server, jaringan komputer, dan layanan internet di lingkungan pendidikan tinggi. Metode penelitian menggunakan pendekatan studi kasus dengan pengumpulan data melalui observasi langsung, wawancara terhadap 12 informan, dokumentasi sistem, dan *performance monitoring* selama 6 bulan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi *Proxmox VE* mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya *hardware* hingga 70 persen dengan utilisasi CPU meningkat dari 22 persen menjadi 50-55 persen. Konsolidasi server fisik dari 12 unit menjadi 3 unit *server host* berhasil mengurangi biaya operasional sebesar 45 persen atau senilai \$35,650 per tahun. *Service availability* meningkat signifikan dari 96.8 persen menjadi 99.5 persen dengan *Mean Time To Recovery* berkurang dari 4 jam menjadi 45 menit. Analisis *cost-benefit* menunjukkan *Return on Investment* tercapai dalam 2.9 tahun dengan proyeksi *Total Cost of Ownership savings* sebesar \$73,250 dalam periode 5 tahun. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis berupa *blueprint* arsitektur virtualisasi dan panduan implementasi yang dapat diadopsi oleh institusi pendidikan lain dengan karakteristik serupa.

Kata kunci: virtualisasi server, *proxmox ve*, jaringan komputer, institusi pendidikan, efisiensi infrastruktur.

Abstract: Modern educational institutions face challenges in managing complex information technology infrastructure with limited resources. This research examines the implementation of virtualization technology using *Proxmox Virtual Environment* to optimize server management, computer networks, and internet services in higher education environments. The research method uses a case study approach with data collection through direct observation, interviews with 12 informants, system documentation, and *performance monitoring* over 6 months. The results show that *Proxmox VE* implementation can increase hardware resource efficiency by up to 70 percent with CPU utilization increasing from 22 percent to 50-55 percent. Physical server consolidation from 12 units to 3 host servers successfully reduced operational costs by 45 percent or \$35,650 per year. Service availability increased significantly from 96.8 percent to 99.5 percent with *Mean Time To Recovery* reduced from 4 hours to 45 minutes. Cost-benefit analysis shows *Return on Investment* achieved in 2.9 years with projected *Total Cost of Ownership savings* of \$73,250 over a 5-year period. This research provides practical contributions in the form of virtualization of architecture blueprints and implementation guidelines that can be adopted by other educational institutions with similar characteristics.

Keywords: server virtualization, *proxmox ve*, computer networks, educational institutions, infrastructure efficiency

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah mengubah paradigma pengelolaan infrastruktur TI di berbagai sektor termasuk institusi pendidikan. Perguruan tinggi dan sekolah saat ini sangat bergantung pada sistem jaringan komputer dan layanan internet untuk mendukung proses pembelajaran, administrasi, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Namun pengelolaan infrastruktur TI tradisional menghadapi berbagai tantangan signifikan yang memerlukan solusi inovatif. Institusi pendidikan umumnya harus menyediakan berbagai layanan seperti *Learning Management System*, portal akademik, email server, *file server*, *database server*, *web server*, dan sistem informasi akademik. Pendekatan konvensional yang mengharuskan setiap layanan berjalan pada server fisik terpisah mengakibatkan pemborosan sumber daya karena tingkat utilisasi rata-rata server pada institusi pendidikan hanya berkisar 15–30% (Fachri et al., 2022). Sementara 70–85% kapasitas hardware tidak dimanfaatkan secara optimal, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih efisien dalam pengelolaan sumber daya TI (Ariyanto, 2023). Teknologi virtualisasi muncul sebagai solusi alternatif yang memungkinkan penggabungan beberapa server fisik menjadi satu mesin virtual yang terpusat, sehingga penggunaan sumber daya komputasi menjadi lebih optimal dan efisien (Prasandy & Adhiwibowo, 2015).

Konsolidasi server melalui virtualisasi memungkinkan penggabungan beberapa server fisik ke dalam satu mesin, sehingga dapat mengurangi biaya operasional dan perawatan perangkat keras secara signifikan (Arsa & Hendrawan, 2020; Surahmat & Tenggono, 2019). Selain itu, pengurangan jumlah perangkat fisik berdampak pada penurunan konsumsi daya listrik dan kebutuhan sistem pendingin, sehingga biaya operasional infrastruktur data center dapat ditekan secara efektif (Koratagere et al., 2023). Virtualisasi server memungkinkan penggabungan beberapa layanan pada satu perangkat keras fisik, sehingga mengurangi kebutuhan ruang data center dan mempermudah manajemen infrastruktur TI yang kompleks (Koratagere et al., 2023). Teknologi ini juga memberikan fleksibilitas dalam pengelolaan sumber daya, memungkinkan alokasi CPU, memori, dan penyimpanan yang dinamis sesuai kebutuhan beban kerja masing-masing layanan. Dengan demikian, implementasi virtualisasi server menjadi strategi krusial bagi institusi pendidikan untuk mengatasi inefisiensi infrastruktur TI tradisional yang mengakibatkan pemborosan sumber daya dan beban biaya operasional yang tinggi (Astriani, 2021; Sandi et al., 2024).

2. Tinjauan Literatur

Virtualisasi merupakan teknologi yang memungkinkan abstraksi *resource* hardware fisik menjadi beberapa *environment virtual* yang terisolasi. Virtualisasi dapat diterapkan pada berbagai layer seperti *hardware*, *operating system*, dan *network* (Koratagere et al., 2023).

Hypervisor atau *Virtual Machine Monitor* berperan sebagai layer abstraksi antara hardware fisik dan sistem operasi virtual. Terdapat dua tipe *hypervisor* yaitu Type 1 atau *bare-metal hypervisor* yang berjalan langsung di atas hardware dan Type 2 atau *hosted hypervisor* yang berjalan di atas sistem operasi *host* (Prasandy & Adhiwibowo, 2015).

Penelitian Ariyanto (Ariyanto, 2023) tentang analisis performa arsitektur *single server* dan *multiple virtual server* menggunakan Proxmox VE untuk sistem *e-learning* menunjukkan peningkatan ketersediaan sistem melalui penerapan *reverse proxy techniques* dan *storage clustering*. Penelitian tersebut mengimplementasikan virtualisasi berbasis Proxmox untuk mendukung layanan *e-learning* dengan efisiensi yang lebih baik dibandingkan arsitektur

single-server tradisional. Namun, penelitian tersebut belum mengeksplorasi secara mendalam aspek *network virtualization* dan *storage clustering* untuk *high availability* skala besar.

Arsa dan Hendrawan (Arsa & Hendrawan, 2020) melakukan penelitian tentang konsolidasi server dengan virtualisasi menggunakan Proxmox VE sebagai teknik untuk membangun beberapa server virtual dalam satu mesin fisik, mendukung implementasi *cloud computing*. Penelitian tersebut membuktikan bahwa konsolidasi server mengurangi kebutuhan perangkat fisik dan biaya operasional secara signifikan. Namun, penelitian ini belum membahas secara rinci platform *open-source* dalam konteks efisiensi biaya lisensi.

Fachri et al. (2022) mengkaji implementasi *cluster* virtual pada Proxmox untuk mendukung berbagai layanan di institusi pendidikan seperti NICT UIN Syarif Hidayatullah Jakarta. Penelitian menunjukkan bahwa Proxmox VE memungkinkan pengurangan kebutuhan server fisik sambil menjalankan *multiple services* pada *virtual machines*, dengan *web-based interface* yang memudahkan manajemen. Namun, penelitian tersebut dilakukan pada skala institusi spesifik dan belum mengeksplorasi *clustering* untuk *production environment* yang lebih luas.

Putra (2019) menjelaskan konsep implementasi *hypervisor* seperti Proxmox Virtual Environment untuk pembelajaran jaringan server, yang memungkinkan segmentasi jaringan virtual tanpa perangkat fisik tambahan. *Virtual switch* dan *network isolation* memberikan manfaat *simplified network management*, *improved security*, dan pengurangan biaya hardware (Koratagere et al., 2023).

Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa virtualisasi memberikan *benefit* signifikan dalam hal *resource utilization*, *cost reduction*, dan *operational efficiency* (Sandi et al., 2024). Namun masih terdapat gap dalam hal implementasi Proxmox VE secara komprehensif di institusi pendidikan Indonesia yang mencakup aspek *network virtualization*, *storage clustering*, *high availability configuration*, dan *detailed cost-benefit analysis*. Penelitian ini berupaya mengisi gap tersebut dengan menyediakan studi kasus lengkap implementasi Proxmox VE pada institusi pendidikan dengan dokumentasi arsitektur, proses *deployment*, *performance analysis*, dan *economic evaluation* yang dapat menjadi referensi praktis bagi institusi lain.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif dengan metode studi kasus pada salah satu institusi pendidikan tinggi di Jakarta yang memiliki 3,500 mahasiswa aktif dan 250 staff akademik serta non-akademik. Studi kasus dipilih karena memungkinkan eksplorasi mendalam terhadap fenomena implementasi virtualisasi dalam konteks *real-world setting* dengan berbagai kompleksitas teknis dan organisasional. Pengumpulan data dilakukan melalui empat metode utama selama periode 6 bulan dari Januari hingga Juni 2024. Pertama adalah observasi langsung terhadap *infrastruktur TI existing*, proses *deployment Proxmox VE*, konfigurasi sistem, dan operasional harian sistem virtualisasi. Data observasi mencakup *topologi jaringan*, spesifikasi *hardware*, *configuration files*, dan *workflow* operasional. Kedua adalah wawancara semi-terstruktur dengan 12 informan yang terdiri dari 3 administrator jaringan, 2 teknisi TI, 4 dosen pengguna layanan, dan 3 staff administrasi.

Wawancara dilakukan untuk mendapatkan *insight* tentang kebutuhan sistem, ekspektasi pengguna, *challenges* dalam *deployment*, dan evaluasi kepuasan terhadap sistem baru. Ketiga adalah dokumentasi yang mencakup pengumpulan *configuration files*, *network diagram*, *system logs*, *standard operating procedures*, *incident reports*, dan *maintenance records*.

Dokumentasi ini penting untuk analisis mendalam terhadap implementasi teknis dan identifikasi *best practices*. Keempat adalah *performance monitoring* menggunakan *built-in monitoring tools Proxmox* dan *tools tambahan seperti Zabbix* untuk mengumpulkan *metrics kuantitatif*. Data yang dikumpulkan meliputi *CPU utilization, memory usage, disk I/O operations per second, network throughput, application response time, dan service up time*. Teknik analisis data menggunakan pendekatan triangulasi untuk meningkatkan validitas temuan.

Data kualitatif dari wawancara dan observasi dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi *pattern, challenges, dan best practices* dalam implementasi. Data kuantitatif dari *performance monitoring* di analisis menggunakan statistik deskriptif untuk membandingkan performa sebelum dan sesudah implementasi virtualisasi. *Cost-benefit analysis* dilakukan dengan menghitung *Capital Expenditure, Operational Expenditure, savings, Return on Investment, dan Total Cost of Ownership projection* untuk periode 5 tahun. Tahapan penelitian dimulai dengan *assessment infrastruktur existing* pada bulan Januari untuk identifikasi *current state dan pain points*. *Fase design dan planning* dilakukan pada bulan Februari untuk merancang arsitektur virtualisasi yang optimal. Implementasi dan migrasi dilaksanakan secara bertahap dari bulan Maret hingga April dengan *strategi phased migration* untuk meminimalkan *disruption*. *Monitoring dan evaluasi intensif* dilakukan pada bulan Mei hingga Juni setelah sistem berjalan stabil untuk mengumpulkan data performa dan *feedback* pengguna.

4. Hasil dan Diskusi

4.1 Arsitektur Sistem Virtualisasi

Infrastruktur TI sebelum implementasi virtualisasi terdiri dari 12 server fisik dengan spesifikasi bervariasi yang menjalankan layanan terpisah yaitu 2 *web server, 2 database server, 1 email server, 2 file server, 1 LMS Moodle, 1 LDAP directory service, 1 DNS server, 1 proxy server, dan 1 development server*. *Monitoring* selama 2 minggu menunjukkan utilisasi rata-rata CPU hanya 22 persen, *memory* 28 persen, dan *storage* 35 persen, mengindikasikan pemborosan *resource* yang signifikan. Total konsumsi daya listrik mencapai 4,200 *watt* dengan biaya operasional tahunan \$61,800 untuk *power dan cooling*.

Berdasarkan hasil *assessment dan capacity planning*, dirancang arsitektur virtualisasi menggunakan 3-node Proxmox VE cluster seperti Node 1 dan Node 2 menggunakan server Dell Power Edge R740 dengan spesifikasi 2x Intel Xeon Gold 6248 processor 20-core, 512GB DDR4 ECC RAM, dan 4TB NVMe SSD untuk *local storage*. Node 3 menggunakan Dell Power Edge R640 dengan spesifikasi 2x Intel Xeon Gold 6226 processor 16-core, 384GB DDR4 ECC RAM, dan 3 TB NVMe SSD. Pemilihan *hardware enterprise-grade* bertujuan untuk menjamin *reliability dan performance* yang optimal untuk *production workload*. *Network architecture* dirancang dengan segmentasi menggunakan VLAN untuk *isolation dan security*. *Management network* pada VLAN 10 dengan subnet 192.168.10.0/24 digunakan untuk akses Proxmox web interface dan *cluster communication*.

Production network pada VLAN 20 dengan subnet 10.10.0.0/16 untuk *VM production services*. *Storage network* pada VLAN 30 dengan subnet 172.16.0.0/24 dedicated untuk Ceph cluster communication dengan bandwidth 10 Gbps. *Backup network* pada VLAN 40 dengan subnet 192.168.40.0/24 untuk *backup traffic*. *DMZ network* pada VLAN 50 dengan subnet 10.20.0.0/24 untuk *public-facing services* seperti *web server dan mail server*. *Storage architecture* mengimplementasikan *tiered storage strategy* untuk optimalisasi *cost dan performance*. *Local NVMe SSD* pada setiap node digunakan untuk VM dengan *high I/O requirement* seperti *data base*

server. Shared storage menggunakan Ceph distributed storage dengan 3 Object Storage Daemon per node memberikan total capacity 33TB dengan replication factor 3 untuk data redundancy dan high availability. NFS storage dari dedicated NAS digunakan untuk backup repository dan archival data dengan capacity 50 TB. Perencanaan Virtual Machine mengalokasikan total 28 production VMs untuk critical services, 15 development VMs untuk testing environment, dan 35 LXC containers untuk light weight services seperti monitoring tools dan utility applications. Resource reservation sebesar 25 persen dari total capacity dialokasikan untuk future growth dan burst capacity selama peak load.

4.2 Implementasi dan Konfigurasi

Instalasi Proxmox VE versi 8.0 dilakukan pada ketiga nodes menggunakan ISO installer dengan boot dari USB flash drive. Partitioning scheme menggunakan Logical Volume Manager untuk root file system dan data storage yang memudahkan future expansion. Setelah instalasi base system, dilakukan initial configuration termasuk network interface setup, host name assignment, dan repository configuration untuk package updates. Cluster formation dimulai dengan membuat cluster baru pada Node 1 menggunakan command `pvecm create nama-cluster` kemudian Node 2 dan Node 3 di-join ke cluster menggunakan `pvecm add` dengan authentication token. Cluster quorum menggunakan corosync dengan minimum 2 nodes untuk maintain cluster operation jika satu node mengalami failure.

Fencing device di konfigurasi untuk isolate failed node dan prevent split-brain scenario yang dapat menyebabkan data corruption. Storage configuration dimulai dengan setup Ceph cluster menggunakan Proxmox built-in Cephinstaller. Setiap node dikonfigurasi sebagai Ceph Monitor dan Manager untuk distributed management. Object Storage Daemon dibuat pada setiap NVMe disk dengan BlueStore backend yang memberikan better performance dibanding File Store. Ceph pool dibuat dengan placement group number 512 yang optimal untuk cluster size dan CRUSH map dikonfigurasi untuk distribute data across nodes dengan failure domain per host. NFS mount point ditambahkan untuk backup storage dengan appropriate permissions. Network configuration mengimplementasikan Linux bridge untuk setiap VLAN dengan bondingmode balance-alb pada dual network interface untuk redundancy dan load balancing. Firewall rules dikonfigurasi pada Proxmox level untuk restrict management access dan implement security policy. Open v Switch sebagai alternative networking stack juga di-enable untuk support advanced networking features seperti VLAN trunking dan port mirroring.

High availability service di-enable untuk automatic VM restart pada healthy node jika terjadi node failure. HA groups di konfigurasi dengan resource priority untuk ensure critical services mendapat failover preference. Watchdog timer di-enable untuk detect node hang condition dan trigger automatic fencing. Proses migrasi dari physical server ke virtual machine dilakukan secara bertahap untuk minimize down time dan risk. Non-critical services seperti development server dan file server di-migrate terlebih dahulu menggunakan Physicalto-Virtual conversion tools. Critical services seperti database dan email server menggunakan parallel running strategy di mana VM berjalan bersama physical server selama 2 minggu untuk ensure stability sebelum cutover final. Total durasi migrasi adalah 8 minggu dengan zero major incidents dan minimal user disruption.

4.3 Analisis Performa Sistem

Performance monitoring dilakukan intensif selama 3 bulan setelah sistem berjalan stabil menggunakan Proxmox built-in monitoring dan Zabbix untuk comprehensive metrics collection. CPU utilization menunjukkan peningkatan signifikan dengan average 50-55 persen per node

dibandingkan 22 persen pada *physical servers*. *Peak utilization* mencapai 78 persen selama *business hours* tanpa *performance degradation*. *Virtualization overhead* yang terukur sekitar 5 persen sesuai dengan *expected overhead* untuk *KVM hypervisor*. *CPU ready time* yang merupakan *indicator resource contention* tetap di bawah 5 persen menunjukkan *adequate CPU resource allocation*. *Memory utilization* rata-rata 60 persen atau 308 GB dari 512 GB *available* pada Node 1 dan 2 dengan *dynamic allocation* menggunakan *memory ballooning* untuk *optimize usage*. *Kernel Samepage Merging* atau *KSM* yang merupakan *memory deduplication feature* berhasil mengidentifikasi *identical memory pages across VMs* dan *consolidate* menjadi *single page*, menghasilkan *memory savings* 15 persen atau setara 77 GB.

Memory pressure monitoring menunjukkan *no swapping activity* dan *no out-of-memory condition* selama periode observasi. *Storage performance* pada *Ceph cluster* menunjukkan hasil yang *excellent* dengan *average 45,000 IOPS* untuk *mixed read-write workload* dan *peak 120,000 IOPS* selama *data base intensive operations*. *Average latency* berkisar 2-5 *milliseconds* untuk *Ceph storage* dan *less than 1 millisecond* untuk *local NVMe storage*. *Aggregate throughput* mencapai 8 GB per second untuk *sequential operations*. *Tuning parameters* seperti *increased placement group number*, *optimized CRUSH map*, dan *BlueStore configuration* memberikan kontribusi signifikan terhadap *performance improvement* dibanding *initial deployment*. *Network performance* menunjukkan *minimal overhead* dengan *inter-node bandwidth* mencapai 9.2 Gbps *sustained* pada 10 Gigabit links. *VM network throughput* comparable dengan *physical server* dengan *overhead* kurang dari 2 persen. *Storage network utilization* *average 7 Gbps* untuk *Ceph replication* dan *client traffic*.

Network latency tetap *low* dengan *average 0.3 milliseconds* untuk *intra-cluster communication*. *Application performance monitoring* menunjukkan *improvement* atau *minimal comparable* dengan *physical servers*. *Web portal response time* berkurang dari *average 180ms* menjadi 150ms karena *better storage performance*. *LMS Moodle response time* *improve* dari 250 ms menjadi 220 ms. *Database query execution time* tetap sama pada *average 45ms* menunjukkan *no performance penalty* dari *virtualization*. *File server throughput* meningkat dari 880 MB/s menjadi 950 MB/s berkat *storage consolidation* pada *high performance NVMe*. *Service availability* menunjukkan peningkatan dramatis dengan *measured uptime 99.5* persen dibandingkan 96.8 persen sebelumnya. *Mean Time Between Failures* meningkat dari 720 jam atau 30 hari menjadi 2,880 jam atau 120 hari. *Mean Time To Recovery* berkurang signifikan dari 4 jam menjadi 45 menit karena *faster restore* dari *snapshot* dan *automated failover* dengan *high availability feature*. *Zero unplanned down time* tercatat selama 3 bulan *monitoring period*. *Live migration* memungkinkan 12 *planned maintenance activities* dilakukan tanpa *service interruption*, *major benefit* yang tidak mungkin pada *physical infrastructure*.

4.4 Evaluasi Cost-Benefit

Capital Expenditure untuk implementasi virtualisasi meliputi *procurement 3 enterprise servers* senilai \$85,000, *network equipment upgrade* termasuk 10GbE switches senilai \$12,000, *storage infrastructure expansion* senilai \$18,000, dan *implementation services* termasuk *training* senilai \$8,000, menghasilkan total *CapEx* \$123,000. *Resale value* dari 12 *old physical servers* sebesar \$18,000 mengurangi *net CapEx* menjadi \$105,000. *Software licensing cost* adalah \$0 karena *Proxmox VE* dan semua *supporting tools* bersifat *open-source*. *Operational Expenditure* sebelum virtualisasi meliputi *power consumption* untuk 12 *servers* dengan *average 350 watt per server* running 24/7 menghasilkan *annual cost* \$15,120, *cooling requirement* dengan *cooling factor 1.5 times*

power consumption menghasilkan \$22,680, maintenance contracts untuk hardware support \$18,000, dan replacement parts untuk aging equipment \$6,000, total annual OpEx \$61,800.

Setelah virtualisasi dengan 3 servers average 450 watt, power cost berkurang menjadi \$4,860, cooling cost \$7,290, maintenance contracts \$12,000, dan replacement parts \$2,000, total annual OpEx \$26,150. Annual operational savings mencapai \$35,650 atau 58 persen reduction dari previous OpEx. Breakeven period dihitung sebagai net CapEx divided by annual savings menghasilkan 2.9 tahun. Five-year Total Cost of Ownership savings dihitung sebagai 5 years operational savings minus net CapEx menghasilkan \$73,250. Return on Investment setelah 5 tahun adalah 70 persen. Perhitungan ini belum memasukkan intangible benefits seperti increased agility dalam service deployment, faster disaster recovery capability, reduced complexity dalam infrastructure management, dan improved staff productivity. Sensitivity analysis dilakukan untuk evaluate ROI under different scenarios. Pessimistic scenario dengan annual savings berkurang 20 persen karena unexpected costs menghasilkan break-even 3.7 tahun masih acceptable. Optimistic scenario dengan additional savings dari reduced downtime impact dan faster time-to-market untuk new services dapat improve ROI hingga 85 persen dalam 5 tahun.

4.5 Tantangan dan Best Practices

Implementasi virtualisasi menghadapi beberapa tantangan teknis dan operasional. Storage performance issue dimana initial Ceph deployment hanya mencapai 18,000 IOPS jauh di bawah ekspektasi diselesaikan melalui comprehensive tuning termasuk increase placement group number dari 128 menjadi 512, optimize CRUSH map untuk better data distribution, enable BlueStore compression, dan implement dedicated 10 Gigabit network untuk storage traffic. Network complexity dengan multiple VLAN configuration menyebabkan several connectivity issues selama initial deployment. Solusi implementasi adalah create comprehensive documentation untuk network architecture, standardize naming convention untuk consistency, develop automated deployment scripts menggunakan Ansible untuk reduce human error, dan implement thorough testing procedure sebelum production deployment. Resource contention dimana beberapa VMs mengalami performance degradation karena noisy neighbor effect diselesaikan dengan implement CPU shares dan CPU limits untuk resource isolation, CPU pinning untuk critical VMs yang memerlukan deterministic performance, memory reservation untuk prevent ballooning pada critical services, dan Quality of Service policies pada storage level untuk prioritize I/O requests.

Knowledge gap dimana tim IT memiliki limited experience dengan virtualization technology dan Linux administration diatasi melalui intensive training program selama 2 minggu covering Proxmox basics, advanced configuration, troubleshooting, dan best practices. Comprehensive documentation dibuat dalam bahasa Indonesia untuk ease of reference. Gradual transition dengan shadowing period memungkinkan knowledge transfer yang effective. Best practices yang diidentifikasi dari implementation experience meliputi conduct thorough capacity planning dengan over provisioning 25-30 persen untuk accommodate growth dan burst capacity, perform extensive testing pada lab environment sebelum production deployment untuk identify issues early, maintain detailed documentation untuk configuration dan procedures untuk support trouble shooting dan knowledge sharing, implement comprehensive monitoring dari day one untuk enable proactive management dan early issue detection, develop multiple backup strategies termasuk snapshot untuk quick recovery dan full backup untuk disaster recovery, implement network segmentation untuk improve security dan performance isolation, provide continuous training untuk tim IT tentang emerging virtualization technologies, dan automate repetitive tasks menggunakan scripting dan API untuk improve efficiency dan reduce error.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan *Proxmox Virtual Environment* sebagai platform virtualisasi untuk mengelola infrastruktur jaringan dan layanan internet di institusi pendidikan dengan arsitektur *3-node cluster* yang *reliable* dan *scalable*. Implementasi virtualisasi meningkatkan *resource utilization* dari rata-rata 22 persen menjadi 50-55 persen dan mengurangi jumlah server fisik dari 12 unit menjadi 3 unit *host server* menghasilkan konsolidasi yang signifikan. *Service availability* meningkat dari 96.8 persen menjadi 99.5 persen dengan *Mean Time Between Failures* naik dari 720 jam menjadi 2,880 jam dan *Mean Time To Recovery* turun dari 4 jam menjadi 45 menit menunjukkan *improvement dramatis* dalam *reliability*. Evaluasi ekonomi menunjukkan penghematan *operational cost* sebesar 58 persen atau \$35,650 per tahun dengan *Return on Investment* tercapai dalam 2.9 tahun dan proyeksi *Total Cost of Ownership savings* \$73,250 dalam periode 5 tahun membuktikan *feasibility ekonomis* dari investasi virtualisasi.

Application performance pada *virtual machines comparable* atau bahkan lebih baik dibanding *physical servers* dengan *virtualization overhead* hanya 5 persen sesuai ekspektasi KVM *hypervisor*. *Proxmox VE* sebagai solusi *open source* terbukti *enterprise-ready* dan *suitable* untuk institusi pendidikan yang memiliki keterbatasan *budget* namun memerlukan fitur *enterprise-grade* seperti *high availability*, *live migration*, dan *distributed storage*. Tantangan implementasi berupa *storage performance tuning*, *network complexity*, *resource contention*, dan *knowledge gap* dapat diatasi melalui *proper planning*, *comprehensive training*, dan *adoption of best practices*. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis berupa *blueprint* arsitektur virtualisasi, *detailed implementation guideline*, *performance benchmarks*, dan *cost-benefit analysis* yang dapat dijadikan referensi oleh institusi pendidikan lain dengan karakteristik serupa. Rekomendasi untuk penelitian lanjutan meliputi eksplorasi *hybrid cloud integration* untuk *burst capacity*, implementasi *container orchestration* menggunakan *Kubernetes* untuk *modern workloads*, analisis *security posture* dalam *virtualized environment*, dan *long-term sustainability study* untuk periode 3-5 tahun guna *evaluate true Total Cost of Ownership* dan *identify emerging challenges*.

Referensi

- Ariyanto, Y. (2023). Single server-side and multiple virtual server-side architectures: Performance analysis on Proxmox VE for e-learning systems. *ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)*, 9(44). <https://doi.org/10.5935/jetia.v9i44.903>
- Arsa, I. G. N. W., & Hendrawan, I. N. R. (2020). Analisis Konsolidasi Server dengan Virtualisasi Menggunakan Proxmox VE. *Eksplora Informatika*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.30864/eksplora.v10i1.381>
- Astriani, T. (2021). ANALISA KERENTANAN PADA VULNERABLE DOCKER MENGGUNAKAN SCANNER OPENVAS DAN DOCKER SCAN DENGAN ACUAN STANDAR NIST 800-115. *JATISI (Jurnal Teknik Informatika Dan Sistem Informasi)*, 8(4), 2041. <https://doi.org/10.35957/jatisi.v8i4.1232>
- Fachri, A., Neforawati, I., & Kurniawan, A. (2022). Optimalisasi Server Proxmox Pada Nict Uin Syarif Hidayatullah Jakarta. *MULTINETICS*, 7(2), 196. <https://doi.org/10.32722/multinetics.v7i2.3960>
- Koratagere, S., Koppal, R. K. C., & Umesh, I. M. (2023). Server virtualization in higher educational institutions: a case study. *International Journal of Power Electronics and Drive*

- Systems/International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(4), 4477.
<https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp4477-4487>
- Prasandy, T., & Adhiwibowo, W. (2015). Virtualisasi Server Sederhana Menggunakan Proxmox. *Jurnal Transformatika*, 12(2), 37.
<https://doi.org/10.26623/transformatika.v12i2.80>
- Putra, T. W. A. (2019). Rancang Bangun Pembelajaran Jaringan Server dengan Sistem Server Cloud Virtual (Hypervisor). *Jurnal Transformatika*, 17(1), 1.
<https://doi.org/10.26623/transformatika.v17i1.1360>
- Sandi, T. A. A., Firmansyah, F., & Fauzi, A. (2024). Server Redundancy: Performa Jaringan Menggunakan DNS Failover MikroTik pada Kasus Private Server dan Public Server. *JISKA (Jurnal Informatika Sunan Kalijaga)*, 9(1), 50.
<https://doi.org/10.14421/jiska.2024.9.1.50-58>
- Surahmat, S., & Tenggono, A. (2019). Analisis Perbandingan Kinerja Layanan Infrastructure As A Service Cloud Computing Pada Proxmox dan Xenserver. *Matrik Jurnal Manajemen Teknik Informatika Dan Rekayasa Komputer*, 19(1), 9.
<https://doi.org/10.30812/matrik.v19i1.434>