



Original Articles

The Role of Building Automation System in Malaysia Office Buildings: Challenges and Opportunities for Energy Optimization

Peranan Sistem Automasi Bangunan di Bangunan Pejabat di Malaysia: Cabaran dan Peluang Pengoptimuman Tenaga



Nurul Huda Mohd Nahar¹, Ariza Sharikin Abu Bakar^{*,1} 

¹ School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia

* Correspondence email: ariza.bakar@usm.my

Abstract

Building Automation Systems (BAS) is crucial for integrating and controlling building systems such as heating, ventilating, and air conditioning (HVAC), lighting, and security to enhance energy efficiency, cost savings, and operational functionality in office buildings. This study examines the implementation of BAS in three high-rise office buildings in the central region of Malaysia using a mixed-methods approach, including interviews, literature review, and energy data analysis. The findings reveal that BAS significantly optimizes energy consumption while enabling real-time monitoring and predictive maintenance. However, challenges such as high costs, integration of legacy systems, and technical skill gaps hinder BAS adoption. A comparative analysis indicates varying levels of BAS sophistication, with modern systems achieving measurable energy and cost savings. This study highlights the potential of BAS in supporting Malaysia's sustainability goals and recommends open standards, stakeholder engagement, and government incentives to overcome adoption barriers and maximize BAS benefits.

Copyright © 2025 KARYA ILMU PUBLISHING - All rights reserved

Article Info

Received 11 November 2024

Received in revised form 18 March 2025

Accepted 14 April 2025

Available online 18 May 2025

Keywords

Building Automation System (BAS)

Energy Efficiency

High-Rise Office

IoT

Sustainable Development Goals (SDG)

Sistem Automasi Bangunan

Kecekapan Tenaga

Pejabat Bertingkat Tinggi

Internet Pelbagai Benda

Matlamat Pembangunan

Mampan

Abstrak

Sistem Automasi Bangunan (BAS) adalah penting dalam mengintegrasikan dan mengawal sistem bangunan seperti pemanasan, pengudaraan dan penyaman udara (HVAC), pencahayaan dan keselamatan bagi meningkatkan kecekapan tenaga, penjimatan kos dan fungsi operasi dalam bangunan pejabat. Kajian ini meneliti pelaksanaan

BAS di tiga bangunan pejabat bertingkat tinggi di wilayah tengah Malaysia melalui pendekatan penyelidikan kaedah campuran termasuk temu bual, tinjauan literatur, dan analisis data tenaga. Kajian ini mendapati bahawa BAS secara signifikan mengoptimumkan penggunaan tenaga serta membolehkan pemantauan masa nyata dan penyelenggaraan ramalan, namun cabaran seperti kos yang tinggi, integrasi sistem lama, dan jurang kemahiran teknikal menghalang penerimaan penggunaan BAS. Analisis perbandingan menunjukkan tahap kecanggihan BAS yang berbeza-beza, di mana sistem moden mencapai penjimatan tenaga dan kos yang boleh diukur. Kajian ini menekankan potensi BAS dalam menyokong matlamat kelestarian Malaysia dan mencadangkan piawaian terbuka, penglibatan pihak berkepentingan, serta insentif kerajaan untuk mengatasi halangan pelaksanaan dan memaksimumkan manfaat BAS.

Copyright © 2025 KARYA ILMU PUBLISHING - All rights reserved

1. Pengenalan

Sistem Automasi Bangunan (BAS) digunakan untuk mengintegrasikan dan mengawal pelbagai sistem bangunan seperti sistem pemanasan, pengudaraan, dan penyaman udara (HVAC), pencahayaan dan keselamatan bagi meningkatkan kecekapan, keselesaan dan keselamatan dalam bangunan pejabat [1]. Penggunaan BAS semakin mendapat perhatian di Malaysia disebabkan oleh peningkatan kos tenaga, matlamat kelestarian alam sekitar serta keperluan untuk pengurusan bangunan yang lebih cekap. Teknologi ini berpotensi mengurangkan penggunaan dan kos tenaga dengan ketara seterusnya membantu mengurangkan pelepasan karbon dan menyokong program pembinaan hijau negara seperti Indeks Bangunan Hijau (GBI) Malaysia. Pengintegrasian BAS dalam pembinaan turut digalakkan oleh dasar dan insentif kerajaan yang bertujuan mempromosikan amalan pembinaan cekap tenaga dan mampan [2].

Namun begitu, terdapat beberapa halangan yang perlu diatasi seperti kos permulaan yang tinggi serta keperluan peningkatan kesedaran dan kemahiran dalam kalangan pihak berkepentingan. Walaupun menghadapi cabaran tersebut, kemajuan dalam teknologi internet pelbagai benda (IoT) dan kecerdasan buatan (AI) telah mendorong perkembangan BAS, sekaligus membolehkan kawalan operasi bangunan yang lebih canggih dan efisien. Permintaan yang semakin meningkat terhadap bangunan pintar di Malaysia menyerlahkan kepentingan BAS dalam persekitaran pejabat moden, di mana sistem ini memainkan peranan penting dalam meningkatkan kepuasan penghuni, keberkesanan pengurusan dan kecekapan operasi bangunan secara keseluruhan.

Dalam era ini, bangunan pejabat moden semakin kompleks dan memerlukan penyelesaian inovatif untuk pengurusan yang efisien. BAS menerajui transformasi ini dengan menyediakan pendekatan menyeluruh dalam pengurusan bangunan melalui penggabungan pelbagai subsistem seperti HVAC, pencahayaan dan keselamatan ke dalam satu rangka kerja yang bersepadu, membolehkan kawalan dan pemantauan secara berpusat. Kesedaran yang semakin meningkat terhadap kelestarian alam sekitar serta keperluan untuk kecekapan operasi yang lebih baik telah mendorong penggunaan bangunan pintar secara meluas di Malaysia. Pasaran BAS di Malaysia turut dipengaruhi oleh tren global, terutamanya dalam penekanan terhadap analitik data dan sistem berasaskan awan yang menawarkan keupayaan cerapan masa nyata dan ramalan awal. Perkembangan ini bukan sahaja meningkatkan kecekapan sistem, tetapi juga memudahkan penyelenggaraan pencegahan, mengurangkan masa henti sistem, dan memanjangkan jangka hayat aset bangunan.

Tambahan pula, penggabungan BAS dengan sumber tenaga lestari seperti panel solar selari dengan matlamat Malaysia untuk mengurangkan pelepasan karbon dan kebergantungan terhadap tenaga tidak boleh diperbaharui. BAS meningkatkan kecekapan operasi bangunan dengan mengautomatiskan sistem seperti pencahayaan, keselamatan dan HVAC serta menganalisis data secara masa nyata. Ini membawa kepada penjimatan tenaga yang ketara, pengurangan kos operasi dan peningkatan keselesaan penghuni.

Antara manfaat utama ialah kecekapan tenaga, terutamanya dalam sistem HVAC yang menyumbang kepada sebahagian besar penggunaan tenaga bangunan [3]. BAS mengoptimumkan tetapan keselesaan terma terutama suhu dalaman yang secara langsung mempengaruhi permintaan tenaga dan keselesaan penghuni [4-6]. Dengan menambah baik sistem HVAC dan mengautomasi penggunaan tenaga, BAS secara signifikan menyumbang kepada matlamat kelestarian [7].

Selain itu, BAS meningkatkan keselesaan dan produktiviti penghuni dengan mengekalkan suhu optimum sepanjang hari, mengurangkan gangguan sistem dan aduan berkaitan ketidakselesaan [7]. Dari sudut kelestarian, BAS membantu mengurangkan jejak karbon bangunan dengan mengoptimumkan penggunaan tenaga, sekali gus merendahkan pelepasan gas rumah hijau. Piawaian seperti pensijilan LEED dan peraturan bangunan tempatan menggalakkan penggunaan BAS dalam reka bentuk lestari. Dalam konteks Malaysia, pelaksanaan BAS dalam bangunan pejabat terutamanya di kawasan bandar besar menyokong usaha mitigasi perubahan iklim dan menggalakkan persekitaran kerja yang lebih hijau [8].

1.1. Teknologi dan Komponen BAS

Perkhidmatan bangunan yang merangkumi sistem HVAC, elektrik, perpaipan, perlindungan kebakaran dan keselamatan adalah penting bagi fungsi dan keselesaan bangunan pejabat. Sistem Automasi Bangunan (BAS) memainkan peranan penting dalam mengoptimumkan perkhidmatan ini melalui integrasi dan automasi operasinya. BAS meningkatkan kecekapan HVAC dengan menggunakan penderia dan algoritma kawalan untuk melaraskan keadaan berdasarkan kehadiran dan persekitaran, sekali gus mengurangkan penggunaan tenaga. Dalam perkhidmatan elektrik, BAS menguruskan pencahayaan dan pengagihan kuasa yang turut menyumbang kepada penjimatan tenaga. Ia juga berintegrasi dengan sistem perlindungan kebakaran bagi memastikan tindak balas dan pemindahan yang pantas serta meningkatkan keselamatan melalui kawalan berpusat sistem pengawasan dan akses.

1.1.1. Sistem Kawalan HVAC

Sistem ini menggabungkan penderia, penggerak, dan algoritma canggih untuk mengautomasi dan mengoptimumkan operasi sistem HVAC bagi menjamin persekitaran dalaman yang selesa dan cekap tenaga. Tujuan utama sistem automasi bangunan ialah untuk mengurangkan pembaziran tenaga dengan memfokuskan operasi HVAC kepada keperluan sebenar bangunan dan penggunanya [7].

Bangunan pejabat lazimnya mengoperasikan sistem HVAC mereka menggunakan suhu tetap dan suhu set semula semasa waktu berpenghuni dan tidak berpenghuni. Ini melibatkan pengawalan suhu mengikut selang masa yang telah ditetapkan, contohnya dari jam 8 pagi hingga 8 malam. Jadual kehadiran penghuni boleh berbeza-beza dengan ketara bergantung kepada corak kerja pengguna dan mungkin berbeza antara zon tertentu dalam pejabat yang dikongsi. Pengendalian sistem HVAC mengikut jadual yang telah ditentukan boleh menyebabkan peningkatan penggunaan tenaga dan ketidakpuasan dalam kalangan penghuni.

Namun begitu, melebihi tempoh masa yang telah ditetapkan dalam jadual tetap dan bekerja di ruang yang dikondisikan berdasarkan suhu set semula boleh menjejaskan produktiviti penghuni. Oleh itu, pengurangan gangguan kepada penghuni melalui BAS adalah penting untuk memastikan tahap keselesaan mereka. Konsep ini tidak menekankan pelarasan suhu secara kerap oleh BAS, tetapi lebih kepada pembelajaran sistem daripada maklum balas penghuni mengenai tingkah laku BAS yang paling sesuai untuk pelbagai situasi pada masa akan datang [9].

Walaupun secara umum diakui bahawa penghuni mempunyai pengaruh besar terhadap penggunaan tenaga, bangunan pejabat masih menggunakan sistem HVAC berdasarkan jadual kehadiran tetap yang selalunya tidak sejajar dengan corak kehadiran sebenar [10].

1.1.2. Sistem Perlindungan Kebakaran dan Keselamatan

Sistem perlindungan kebakaran pintar dan teknologi integrasi BAS digabungkan untuk membentuk satu sistem amaran kebakaran pencawang yang berkesan bagi pencegahan dan kawalan kebakaran di pencawang bersepadu bandar. Apabila perlindungan kebakaran pintar digabungkan dengan BAS, kedua-duanya boleh berkongsi sumber data dan sumber sistem perlindungan kebakaran dalam sistem pintar dan menyimpannya mengikut bahagian. Ini meningkatkan kecekapan sistem perlindungan kebakaran.

Sebagai sebahagian daripada proses integrasi, sistem perlindungan kebakaran pintar dan BAS perlu mempunyai antara muka data yang sama. Ini membolehkan sambungan dan komunikasi jarak jauh sepenuhnya, serta penghantaran maklumat situasi kebakaran pencawang kepada jabatan penyelaras dan arahan bomba serta kawalan penuh secara jarak jauh ke atas sistem perlindungan kebakaran. Dengan cara ini, kakitangan boleh melihat dengan pantas situasi dalam pencawang dan mengurangkan kerosakan akibat kebakaran.

Sistem keselamatan kebakaran pintar ini dilengkapi dengan pengesan kebakaran, unit input dan output data, dan pelbagai jenis kemudahan kawalan pautan kebakaran yang mematuhi piawaian reka bentuk sistem penggera kebakaran kebangsaan. Arahan kawalan BAS dihantar menggunakan mod input analog dan input digital nadi berdasarkan lapisan tepi BAS dalam rangkaian tulang belakang. Strategi kawalan bas digunakan untuk menyambungkan talian.

Dengan menggunakan sistem BAS LonWorks, peranti perkhidmatan akses pengguna dihubungkan bersama untuk membentuk satu sistem penggera kebakaran pintar yang tersebar. Pelbagai jenis alat kawalan dalam sistem boleh berkomunikasi antara satu sama lain tanpa hubungan induk-hamba (master-slave). Mod penghantaran maklumat yang asalnya tetap telah ditukar kepada mod pelepasan bebas. Ini mengurangkan bilangan interaksi dalam sistem dan meningkatkan keupayaan toleransi kesilapan.

1.1.3. Sistem Kawalan Lif

Penggunaan sensor dan alat penyelenggaraan ramalan dalam Sistem Automasi Bangunan (BAS) membolehkan diagnosis awal terhadap kehausan dan kerosakan, sekali gus mengurangkan masa henti dan meningkatkan kebolehpercayaan. Di bangunan tinggi, penggunaan tenaga oleh sistem lif menyumbang kira-kira 5–15% daripada jumlah keseluruhan penggunaan tenaga bangunan [11-12]. Sistem lif direka untuk berfungsi selaras dengan subsistem BAS yang lain seperti HVAC dan keselamatan bagi memastikan operasi bangunan yang terkoordinasi. Dalam situasi kecemasan, penggera kebakaran mungkin akan mengarahkan lif kembali ke aras keselamatan yang telah ditetapkan atau menukar kepada mod tidak beroperasi untuk meningkatkan keselamatan penghuni.

Penggunaan tenaga lif boleh dikurangkan melalui penggunaan teknologi penjimatan tenaga yang sesuai. Contohnya, meminimumkan penggunaan tenaga semasa masa statik bagi lif kediaman yang mempunyai frekuensi penggunaan rendah, manakala meningkatkan kecekapan tenaga semasa masa operasi bagi lif komersial yang mempunyai frekuensi penggunaan tinggi adalah penting. Bagi bangunan tinggi, di mana lif menjadi kaedah pengangkutan menegak utama, pendekatan untuk menjimatkan tenaga lif amat penting untuk dikaji. Tambahan pula bagi memastikan operasi lif berjalan dengan lancar dalam bangunan, penciptaan sistem IoT adalah penting [13]. Walaupun perkembangan baru seperti IoT, pembelajaran mesin dan motor regeneratif telah meningkatkan kecekapan tenaga dan prestasi lif secara

signifikan, integrasi dengan sistem lama menghadapi cabaran dari segi keserasian dan risiko keselamatan siber.

Dari segi peranti cekap tenaga untuk kumpulan lif, sistem grid mikro arus terus (DC) terdiri daripada sumber kuasa, lif sebagai sumber dan beban, superkapasitor, beberapa pemutus litar dan peranti perlindungan. Sistem grid mikro DC menggalakkan kecekapan tenaga dalam operasi lif dengan mengawal aliran kuasa antara sumber dan beban dengan berkesan, sambil menggabungkan superkapasitor untuk penyimpanan tenaga dan pengurangan beban puncak. Selain itu, sistem pemantauan operasi menyediakan pengumpulan data dan analisis masa nyata, membolehkan pengurusan tenaga yang berkesan dan penyelenggaraan ramalan. Sistem pemantauan ini boleh beroperasi secara bebas atau berinteraksi dengan lancar dengan Sistem Automasi Bangunan [14].

1.1.4. Sistem Pencahayaan

Pencahayaan merupakan faktor utama dalam jumlah tenaga yang digunakan di bangunan pejabat, merangkumi kira-kira 17–25% daripada penggunaan tenaga elektrik dan kira-kira 10% daripada jumlah keseluruhan tenaga yang digunakan dalam struktur bangunan [15,16]. BAS boleh digunakan untuk mengesan kehadiran dan mengawal pencahayaan semula jadi dalam bidang kawalan pencahayaan. Pengesanan kehadiran amat berguna dalam pejabat yang mempunyai kadar penghunian yang berubah-ubah, manakala kecekapan pengurangan pencahayaan dengan cahaya semula jadi dipengaruhi oleh faktor seperti arah dan lokasi [17]. Walaupun adalah mungkin untuk mencapai penjimatan tenaga yang besar dalam pencahayaan dengan mengorbankan keselesaan, adalah penting untuk mengekalkan keselesaan visual bagi memastikan kepuasan dalam kalangan pekerja [18].

Beberapa kawasan di pejabat berhampiran tingkap menggunakan teknik pengurangan pencahayaan semula jadi bersama-sama dengan pengesanan kehadiran. Selain itu, DIALux ialah perisian yang popular digunakan untuk menentukan keperluan pencahayaan. Wagiman [16] dan Shankar [19] keduanya menggunakannya untuk menjimatkan tenaga dan dengan menggunakan pengawal pintar, Shankar [19] telah melaksanakan pengurangan pencahayaan solar di sebuah pejabat dan mencatatkan pengurangan penggunaan tenaga sebanyak 36%. Sebagai contoh, pertimbangkan sebuah pejabat yang menggunakan lampu T8 dan belum dinaik taraf. Naik taraf tersebut melibatkan penggunaan lampu LED dan sistem kawalan. Menurut model Shankar, pengurangan pencahayaan semula jadi memberi kesan sehingga 48%, dan jadual kehadiran boleh menjimatkan tambahan 19% [19].

1.1.5. Sistem Pengurusan Tenaga (EMS)

Sistem Pengurusan Tenaga (EMS) merupakan komponen penting dalam BAS yang memainkan peranan kritikal dalam memaksimumkan kecekapan tenaga, meminimumkan kos, dan meningkatkan kelestarian di bangunan pejabat. Penggabungan EMS ke dalam BAS adalah sangat penting di Malaysia disebabkan oleh iklim tropika dan keperluan tenaga yang tinggi untuk mengekalkan keadaan dalaman yang selesa. EMS menggunakan teknologi canggih seperti sensor IoT, meter pintar, dan analitik data untuk memantau, mengawal dan meningkatkan penggunaan tenaga secara masa nyata. EMS menyediakan pemantauan berterusan terhadap corak penggunaan tenaga dalam pelbagai sistem bangunan, seperti HVAC, pencahayaan, dan peralatan elektrik.

1.2. Pelaksanaan Sistem Automasi Bangunan dalam Bangunan Pejabat

1.2.1. Sistem Pengurusan Tenaga (EMS)

Fokus penyelidikan mengenai BAS adalah untuk mengautomasikan penjadualan pencahayaan, HVAC, dan sistem lain untuk meminimumkan penggunaan tenaga bangunan. BAS dapat meningkatkan kecekapan tenaga dengan melaksanakan banyak tugas termasuk pengawalan automatik, penyeliaan

tenaga, kesejahteraan penghuni, keselamatan dan perlindungan [20,21]. BAS adalah sistem teragih yang bertanggungjawab untuk kawalan dan pemantauan pelbagai peranti elektrik dalam bangunan. Peranti ini termasuk HVAC, pencahayaan serta sistem penggera dan keselamatan [22]. BAS terdiri daripada tiga lapisan fungsional: lapisan lapangan, yang berinteraksi dengan sensor dan penggerak; lapisan automasi, yang menguruskan peranti dan proses; dan lapisan pengurusan, yang beroperasi di peringkat loji [23].

Populariti BAS semakin meningkat kerana ia berkesan dalam menyeimbangkan keselesaan penghuni dan meminimumkan penggunaan tenaga semasa operasi bangunan. Ia semakin penting dalam sektor seni bina, kejuruteraan, dan pembinaan (AEC), terutamanya dalam konteks bangunan pintar [24]. Kajian terdahulu lebih tertumpu pada meningkatkan kecekapan tenaga, mengemas kini teknologi automasi, dan memodel serta mensimulasikan tingkah laku penghuni [25]. Hasil ini menunjukkan bahawa BAS memiliki banyak potensi untuk memudahkan pertumbuhan bangunan hijau [26]. Ia membolehkan ramalan prestasi tenaga, menjimatkan masa dan kos.

Dengan meningkatkan sistem bangunan dan mengurangkan penggunaan tenaga, teknologi BAS membolehkan pereka untuk membina struktur yang lebih mampan dan cekap tenaga. Selain itu, memasukkan teknologi BAS dalam reka bentuk dan pembinaan bangunan dapat meningkatkan keselesaan dan produktiviti penghuni, sekali gus memperbaiki pengalaman penghuni. Sistem BAS mampu memantau dan mengawal keadaan persekitaran.

1.2.2. Cabaran Penyelenggaraan dan Pengoperasian

Proses pengurusan bangunan adalah mencabar dan bergantung bukan sahaja pada kepakaran pakar pengurusan bangunan tetapi juga pada pelbagai penyelesaian perkakasan dan perisian yang tersedia di pasaran [12]. Dalam dua dekad yang lalu, terdapat kemajuan penting dalam pembangunan alat perkakasan dan perisian, serta dalam pelaksanaan amalan pengurusan tenaga [27]. Sebagai kajian kes, kawalan untuk HVAC dalam bangunan telah berkembang dari sistem analog yang rumit dengan kemampuan terhad (seperti kawalan pneumatik) kepada BAS yang mesra pengguna dan canggih, Sistem Pengurusan Penyelenggaraan Berkomputer (CMMS) dan EMS. Pelbagai usaha kini sedang dijalankan untuk memajukan teknologi, alat dan disiplin pengurusan bangunan bagi mengurangkan pembaziran tenaga dan meningkatkan kecekapan operasi.

Alat pengurusan bangunan mempunyai pelbagai ciri yang bermanfaat, termasuk automasi HVAC dan pencahayaan serta penjadualan, pengesanan dan diagnostik kesalahan automatik (AFDD) bagi peralatan dan sistem bangunan, kawalan ramalan, pengoptimuman penggunaan ruang dan penanda aras prestasi tenaga [28]. BAS mengumpul data operasi semasa, yang boleh merangkumi meter tenaga, peralatan dan kawalan HVAC, sensor penghuni, dan kawalan pencahayaan. Walaupun tidak semua BAS mempunyai kemampuan penjejakan data yang sama, kebanyakan daripadanya sekurang-kurangnya menjejaki dan menganalisis data penggunaan tenaga yang diukur secara pukal [29]. Walaupun terdapat kemajuan besar dalam teknologi maklumat dan komunikasi, penyelesaian pengurusan bangunan masih berada di peringkat awal pembangunan. Sebagai contoh, kebanyakan BAS tidak mengambil kira rasa subjektif kawalan penghuni dan tidak disesuaikan untuk menyesuaikan diri dengan situasi di mana hanya sebahagian bangunan yang diduduki atau apabila terdapat corak penghunian yang tidak standard [30].

1.2.3. Cabaran Teknikal

Cabaran utama kebanyakannya berasal daripada integrasi BAS dengan sistem bangunan semasa. Sebilangan besar bangunan pejabat di Malaysia mempunyai infrastruktur lama yang menggunakan beberapa protokol komunikasi dan piawaian perkakasan. Sebagai contoh, sistem HVAC mungkin menggunakan protokol eksklusif yang tidak serasi dengan platform BAS moden yang menyukarkan

untuk mencapai integrasi yang lancar yang diperlukan bagi prestasi sistem yang optimum. Kehadiran pelbagai sistem bangunan, termasuk kawalan pencahayaan, sistem keselamatan dan sistem pengurusan tenaga, memperburuk masalah berkaitan dengan keserasian. Kehadiran masalah ketidakserasian dan integrasi sering kali membawa kepada fungsionaliti BAS yang kurang daripada optimum yang menyekat keupayaannya untuk mencapai kecekapan tenaga dan penambahbaikan operasi yang diinginkan.

1.2.4. Cabaran Kewangan

Perbelanjaan utama yang berkaitan dengan pelaksanaan BAS merangkumi kos pemasangan perkakasan, mendapatkan lesen perisian dan mengkonfigurasi sistem. Pemasangan BAS di bangunan yang sudah dibina boleh menjadi agak mahal kerana ia melibatkan perubahan pada infrastruktur dan peralatan sedia ada untuk menyokong teknologi automasi yang lebih maju. Di samping itu, perbelanjaan berterusan yang berkaitan dengan penyelenggaraan, kemas kini perisian dan latihan kakitangan menyumbang kepada kos keseluruhan untuk memiliki dan mengendalikan sistem. Tanggungjawab kewangan yang berkaitan dengan BAS boleh menghalang pemilik dan pemaju bangunan daripada melabur dalamnya, terutamanya apabila pulangan pelaburan jangka pendek tidak sepadan dengan had bajet segera mereka.

Secara global, bangunan menyumbang hampir 40% daripada jumlah penggunaan tenaga dengan angka ini dijangka mencapai 50% menjelang tahun 2030. Di Malaysia, bangunan menggunakan kira-kira 48% daripada elektrik negara, dengan bangunan komersial sahaja menggunakan 38,645 GWh lebih separuh daripadanya diperuntukkan untuk sistem penyaman udara dan penyejukan [31]. Permintaan tenaga yang semakin meningkat ini menekankan keperluan mendesak untuk strategi penjimatan tenaga bagi menyokong matlamat pembangunan mampan [32]. Teknologi BAS menawarkan penyelesaian yang menjanjikan dengan mengautomasikan sistem utama seperti HVAC dan pencahayaan untuk mengoptimumkan penggunaan tenaga. Walau bagaimanapun, penerapan BAS yang meluas terhalang oleh beberapa cabaran termasuk infrastruktur usang di bangunan lama, masalah keserasian sistem dan kekurangan kakitangan yang berkemahiran. Selain itu, kos tinggi untuk menaik taraf dan mengintegrasikan sistem canggih membataskan pelaksanaan, terutamanya di negara-negara membangun. Usaha bersama antara pembuat dasar, penyedia teknologi dan pemilik bangunan untuk mewujudkan persekitaran yang menyokong integrasi BAS diperlukan dalam mengatasi halangan ini. Malaysia yang kini bergerak ke arah pembangunan bandar pintar dan mampan di bawah Rancangan Malaysia Ke-12 (2021–2025) menjadikan peranan BAS dalam mengurangkan penggunaan tenaga, meminimumkan pelepasan, dan mencapai kecekapan kos menjadi semakin penting. Oleh itu, kajian ini meneroka potensi BAS dalam meningkatkan penjimatan tenaga dan kos di bangunan komersial, sejajar dengan agenda kemampanan jangka panjang Malaysia.

Kajian ini bertujuan untuk meneroka peranan Sistem Automasi Bangunan (BAS) di bangunan pejabat Malaysia dengan menilai keadaan semasa pelaksanaan BAS, mengenal pasti cabaran dalam penerimaannya, dan menganalisis potensi untuk penjimatan tenaga dan kos. Kajian ini memberi tumpuan kepada bangunan pejabat bertingkat tinggi di kawasan tengah Malaysia melibatkan pengurus bangunan dan kemudahan serta pasukan teknikal. Penilaian siang hari telah dilakukan untuk mengenal pasti pemasangan BAS yang sedia ada. Kepentingan kajian ini terletak pada potensi untuk meningkatkan keberkesanan BAS di bangunan pejabat semasa dengan menggalakkan penerimaan yang lebih luas dan peningkatan sistem. Dengan membandingkan amalan BAS di bangunan-bangunan terpilih, kajian ini bertujuan untuk mempromosikan operasi yang cekap tenaga, meningkatkan keselesaan dan produktiviti penghuni, serta menyokong strategi penjimatan kos.

2. Metodologi

Kajian ini menggunakan komponen kualitatif untuk mengenal pasti dan mencadangkan bangunan yang sesuai, dengan menyasarkan pengurus kemudahan dan pengurus bangunan untuk mengumpul data mengenai keadaan semasa teknologi BAS, impaknya terhadap kecekapan tenaga dan penjimatan kos yang berkaitan. Temu bual mendalam dengan pakar dan pihak berkepentingan utama serta kajian kes terperinci mengenai bangunan pejabat terpilih yang telah melaksanakan BAS bertujuan untuk mendapatkan pandangan yang mendalam tentang cabaran dan manfaat pelaksanaan BAS.

2.1. Strategi Pensampelan dan Saiz Sampel

Untuk kajian ini, strategi pensampelan bertujuan digunakan untuk memilih peserta yang terlibat secara langsung dalam pelaksanaan dan pengurusan BAS di bangunan pejabat. Sampel terdiri daripada tiga bangunan pejabat: Bangunan A, Bangunan B, dan Bangunan C yang mewakili pelbagai jenis bangunan pejabat di wilayah tengah Malaysia. Dari setiap bangunan ini, pengurus bangunan, kakitangan teknikal dan kakitangan penyelenggaraan telah ditemu bual. Individu-individu ini dipilih kerana keterlibatan langsung mereka dengan operasi, penyelenggaraan dan pengurusan sistem BAS. Input ini adalah penting untuk memahami cabaran pelaksanaan, manfaat kecekapan tenaga, dan keberkesanan keseluruhan BAS di bangunan pejabat.

Seramai 5 peserta telah ditemu bual dengan setiap sesi mengambil masa kira-kira 30-45 minit. Saiz sampel ini dipilih untuk memberikan pemahaman yang menyeluruh tentang pelbagai perspektif sambil menguruskan ruang lingkup kajian. Peserta dipilih berdasarkan pengalaman langsung mereka dengan sistem BAS, menjadikan mereka berada dalam kedudukan yang baik untuk memberikan pandangan yang relevan mengenai soalan kajian yang berkaitan dengan pelaksanaan sistem, kecekapan tenaga dan penjimatan kos.

2.2. Temu bual

Temu bual separa berstruktur dipilih sebagai kaedah utama untuk meneroka pengalaman mendalam peserta dengan BAS serta untuk memahami kompleksiti dan konteks di sebalik pelaksanaannya di bangunan pejabat yang dikaji. Temu bual ini berfungsi sebagai medium untuk mengumpul pandangan kualitatif daripada pihak berkepentingan utama dan pakar dalam bidang tersebut. Peserta dipilih berdasarkan kepakaran mereka dalam pelaksanaan BAS, pengurusan kemudahan dan amalan kecekapan tenaga.

Temu bual ini memberi tumpuan kepada mengenal pasti halangan umum terhadap pelaksanaan BAS termasuk cabaran seperti isu integrasi sistem, keserasian dengan infrastruktur bangunan sedia ada, jurang dalam latihan dan kemahiran serta kesukaran teknikal yang ditemui semasa proses pelaksanaan. Matlamat pendekatan ini adalah untuk menangkap data kualitatif yang mendalam yang menonjolkan cabaran khusus yang dihadapi oleh mereka yang terlibat dalam pelaksanaan BAS. Data yang dikumpul kemudiannya akan dianalisis secara tematik untuk mengenal pasti cabaran dan halangan yang berulang.

Selain temu bual, kajian ini juga merangkumi pemerhatian tapak untuk membandingkan teknologi BAS di tiga bangunan pejabat terpilih: Bangunan A, Bangunan B dan Bangunan C. Lawatan ini memberikan maklumat terperinci mengenai teknologi BAS yang dilaksanakan di setiap bangunan. Temu bual dengan pengurus bangunan dan kakitangan teknikal dijalankan semasa lawatan untuk mendapatkan input yang lebih mendalam mengenai aspek operasi sistem ini. Tujuan pendekatan ini adalah untuk mengumpul data dunia nyata mengenai keadaan semasa BAS di setiap bangunan, dengan fokus khusus pada teknologi yang digunakan dan keberkesanan operasinya.

Kajian ini menggunakan analisis perbandingan komponen BAS di ketiga-tiga bangunan tersebut. Data dianalisis dengan membandingkan secara langsung sistem BAS yang berbeza yang dilaksanakan di setiap lokasi. **Jadual 1** menunjukkan komponen utama BAS, termasuk sistem HVAC, sistem kawalan pencahayaan, sistem keselamatan dan kawalan akses, sistem pengurusan tenaga (EMS), sistem keselamatan kebakaran dan kehidupan, kawalan lif, sistem paip dan pengurusan air, sistem kuasa dan elektrik serta infrastruktur data dan komunikasi. Objektif metodologi kualitatif ini adalah untuk mengumpul dan menganalisis data secara sistematik mengenai kewujudan, keberkesanan dan integrasi komponen BAS ini di pelbagai bangunan. Dengan memeriksa corak, kekuatan, dan kelemahan, kajian ini bertujuan untuk menemui pandangan mengenai aplikasi BAS di pelbagai lokasi geografi dan jenis bangunan.

Jadual 1: Perbandingan Elemen BAS di dalam Bangunan Pejabat.

	SISTEM/ KOMPONEN	BANGUNAN					
		BANGUNAN A		BANGUNAN B		BANGUNAN C	
		Kepatuhan					
		Ya	Tidak	Ya	Tidak	Ya	Tidak
A	Kawalan HVAC						
B	Sistem Kawalan Pencahayaan						
C	Sistem Keselamatan dan Kawalan Akses						
D	Sistem Pengurusan Tenaga (EMS)						
E	Sistem Keselamatan Kebakaran						
F	Kawalan Lif						
G	Sistem Perpaipan dan Pengurusan Air						
H	Sistem Elektrik dan Kuasa						
I	Infrastruktur Komunikasi dan Data						

Untuk menilai kecekapan tenaga dan penjimatan kos BAS, kajian ini menganalisis data penggunaan tenaga bersama dengan temu bual. Data tenaga dikumpul daripada sistem BAS di tiga bangunan pejabat dengan memberi tumpuan kepada penggunaan tenaga sistem HVAC, pencahayaan dan sistem lain yang dikawal oleh BAS. Data tersebut dibandingkan sebelum dan selepas pelaksanaan BAS untuk menilai penjimatan tenaga. Temu bual dengan pengurus bangunan juga dijalankan untuk memahami strategi pengurusan tenaga dan bagaimana ia menyumbang kepada penjimatan kos. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang jelas mengenai potensi BAS untuk meningkatkan kecekapan tenaga dan mengurangkan kos operasi di bangunan pejabat.

3. Keputusan dan perbincangan

Data dikumpulkan daripada tiga bangunan pejabat bertingkat tinggi sebagai kajian kes dan daripada tinjauan literatur mengenai perbandingan pelaksanaan komponen BAS, cabaran dalam pelaksanaan BAS serta analisis kecekapan tenaga dan kos tenaga di bangunan-bangunan tersebut.

3.1. Perkembangan Terkini Teknologi Automasi Bangunan (BAS)

Analisis perbandingan komponen BAS di bangunan pejabat yang dikaji di Bangunan A, B, dan C menonjolkan beberapa perbezaan dalam teknologi, tahap automasi dan keberkesanan keseluruhan, seperti yang tertunjuk di [Jadual 2](#).

Jadual 2: Perincian Sistem Komponen BAS di Bangunan Kajian.

Bangunan	Komponen BAS	Teknologi/ Jenama yang Digunakan	Tahap Automasi	Kecekapan
<i>Bangunan A</i>	HVAC	Reliable	Automatik Penuh	Tinggi (anggaran lebih kurang 15% penjimatan tenaga)
<i>Bangunan B</i>	HVAC	Pegasus	Automatik Penuh	Tinggi (anggaran lebih kurang 20% penjimatan tenaga)
	Sistem Kawalan Lif	Schindler	Semi-Automatik	Sederhana - tinggi
	Sistem Keselamatan dan Kebakaran	Pro Q Cemerlang	Semi-Automatik	Sederhana
<i>Bangunan C</i>	HVAC	Integra - Honeywell	Automatik Penuh	Tinggi (anggaran lebih kurang 15% penjimatan tenaga)
	Pencahayaan	Philips	Semi-Automatik	Sederhana

Dari segi tahap automasi, sistem HVAC automatik penuh di semua bangunan menghasilkan penjimatan tenaga yang ketara (15–20%) yang sejajar dengan amalan terbaik industri untuk pengurusan tenaga. BAS boleh menyesuaikan tetapan HVAC seperti suhu dan kadar pengudaraan berdasarkan data kehadiran masa nyata. Dengan menyesuaikan diri secara dinamik dengan corak kehadiran dan keadaan persekitaran, ia memastikan keselesaan yang optimum sambil meminimumkan pembaziran tenaga [33]. Sistem lain seperti keselamatan kebakaran dan kawalan lif, menunjukkan tahap automasi separa. Sebagai contoh, Bangunan B menawarkan sistem keselamatan kebakaran separa automatik yang memerlukan kawalan manusia tetapi masih memberikan tindak balas kecemasan yang lebih cepat dan efisien.

Seterusnya, integrasi teknologi cekap tenaga seperti kawalan redup dan tenaga boleh diperbaharui telah membolehkan Bangunan B mencapai penjimatan tenaga yang terbesar antara bangunan-bangunan tersebut. Sementara itu, sistem yang lebih sederhana di Bangunan C dan Bangunan A menghasilkan manfaat kecekapan yang lebih rendah, menunjukkan kemungkinan untuk menaik taraf ke komponen BAS yang lebih kompleks. Untuk integrasi sistem, sistem yang sepenuhnya berintegrasi lebih jelas di Bangunan B, di mana EMS, teknologi keselamatan dan pencahayaan bekerjasama untuk memaksimumkan prestasi bangunan. Sistem separa automatik dan berdiri sendiri di bangunan lain menunjukkan potensi penambahbaikan dalam mencapai integrasi BAS yang lebih komprehensif, yang penting untuk kecekapan operasi dan kelestarian.

Oleh itu, kajian ini menunjukkan bahawa Bangunan B menetapkan penanda aras dengan teknologi BAS moden dan berintegrasi menghasilkan penjimatan tenaga dan peningkatan kecekapan operasi. Sebaliknya, Bangunan C dan Bangunan A bergantung pada kaedah konvensional, yang walaupun berfungsi, membataskan potensi untuk kecekapan tenaga. Hasil-hasil ini menunjukkan kepentingan

untuk melaksanakan sistem BAS yang lebih kompleks dan berintegrasi untuk mempromosikan kecekapan tenaga, automasi dan kelestarian di seluruh bangunan pejabat [20].

3.2. Analisis Cabaran dalam Pelaksanaan BAS

Faktor-faktor seperti penglibatan pihak berkepentingan, kekangan kewangan, dan keupayaan teknologi mempengaruhi halangan unik yang dihadapi oleh setiap bangunan. Kekangan teknikal seperti infrastruktur yang usang dan isu integrasi serta kos tinggi yang berkaitan dengan pemasangan awal dan peningkatan sistem adalah antara cabaran yang dihadapi. Seksyen-seksyen berikut menganalisis cabaran utama yang dihadapi oleh Bangunan A, B, dan C, seperti yang ditunjukkan dalam [Jadual 3](#). Ia menekankan cabaran yang khusus kepada setiap bangunan dan implikasi lebih luas untuk penggunaan BAS.

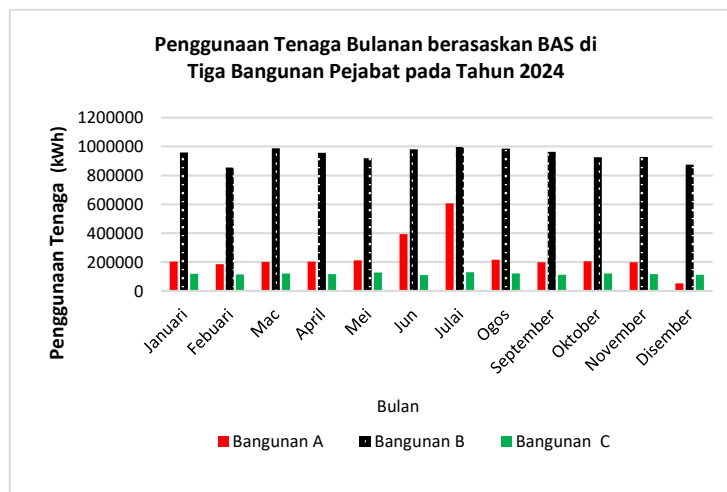
Jadual 3: Cabaran Utama Pelaksanaan BAS di Bangunan Pejabat.

Bangunan	Jenis Cabaran	Deskripsi	Kesan kepada Pelaksanaan BAS
Bangunan A	Kewangan-kelewatan penaiktarafan	Kekangan kewangan menghalang keupayaan untuk menaik taraf BAS kepada teknologi yang lebih baru dan lebih cekap. Ini mengakibatkan sistem beroperasi pada kecekapan yang kurang daripada optimum, meningkatkan lagi kos operasi dan mengurangkan pulangan kewangan jangka panjang terhadap pelaburan. Bangunan menghadapi masalah bajet untuk mengintegrasikan sistem HVAC dengan lif.	Potensi penjimatan tenaga yang berkurangan disebabkan oleh komponen yang lama atau kurang cekap.
	Kewangan-Kos permulaan yang tinggi	Pelaksanaan BAS untuk pelbagai sistem, termasuk HVAC, kebakaran dan lif memerlukan pelaburan kewangan yang besar. Cabaran ini juga disebabkan bangunan beroperasi di bawah pembiayaan kerajaan, di mana peruntukan bajet dipantau dengan teliti. Kos untuk mengintegrasikan sistem-sistem ini dengan komponen berkualiti tinggi dan memastikan fungsi jangka panjang merupakan halangan utama.	Kadangkala berlaku kelewatan pelaksanaan dan skop yang terhad semasa fasa awal. Kekangan bajet menyebabkan beberapa ciri yang diinginkan terpaksa ditangguhkan atau dikurangkan. Perancangan kewangan jangka panjang diperlukan untuk memastikan kelestarian sistem.
Bangunan B	Teknikal-Sistem yang rumit	Mengintegrasikan BAS merentasi sistem kritikal seperti lif dan sistem kebakaran memerlukan kepakaran teknikal yang tinggi. Namun begitu, pelaksanaan BAS memberikan cabaran kerana pengurus fasiliti memerlukan pengetahuan khusus untuk merancang dan mengendalikan sistem ini dengan berkesan [34].	Kebergantungan kepada vendor luar untuk sokongan teknikal telah meningkatkan kos operasi dan melambatkan penyelesaian isu. Keperluan latihan kakitangan juga meningkat, menambah cabaran operasi semasa fasa awal.
	Kewangan-Kekangan bajet	Kekangan kewangan telah menghalang penaiktarafan sepenuhnya kepada teknologi BAS moden. Pihak pengurusan terpaksa bergantung kepada penyelesaian sementara, seperti membaik pulih komponen lama yang hanya bersifat jangka pendek dan seterusnya meningkatkan kos operasi dalam jangka masa panjang.	Ketidakmampuan untuk memodenkan sistem telah menghadkan bangunan daripada mengadaptasi ciri-ciri BAS yang lebih maju, sekali gus menghadkan potensi penjimatan tenaga dan prestasi keseluruhan bangunan.
Bangunan C	Teknikal-Teknologi yang ketinggalan	Sistem Integra di bawah Honeywell beroperasi menggunakan Windows 98 dan merupakan versi lama sistem tersebut. Ketiadaan alat ganti dan kemas kini perisian yang serasi menimbulkan cabaran besar terhadap kebolehpercayaan dan fungsi sistem.	Peningkatan risiko kegagalan sistem dan masa henti operasi. Ketidakmampuan untuk menaik taraf atau menggantikan bahagian tepat pada masanya menyebabkan kebolehpercayaan sistem berkurang dan ketidakcekapan dalam operasi sistem.

Faktor luaran-Sokongan terhad daripada pembekal	Oleh kerana sistem ini sudah usang, tidak semua vendor menyediakan perkhidmatan sokongan untuk PC Windows 98. Penyelenggaraan bergantung kepada kontraktor pihak ketiga yang pakar dalam sistem lama, yang sering mengakibatkan kelewatan dan peningkatan kos bagi kerja-kerja penyelesaian masalah.	Penyelenggaraan dan penyelesaian masalah memakan masa dan mahal disebabkan oleh kebergantungan kepada kontraktor pihak ketiga. Kekurangan sokongan terus dari pembekal mengurangkan jangka hayat sistem dan menyukarkan pembaikan kecemasan.
---	--	--

3.3. Analisis Data Penggunaan Tenaga

Rajah 1 menunjukkan data penggunaan tenaga yang diperoleh daripada Bangunan A, B dan C. Data ini dianalisis untuk menilai kecekapan tenaga dan mengenal pasti peluang penjimatan kos yang dicapai melalui pelaksanaan Sistem Automasi Bangunan (BAS).



Rajah 1: Perbandingan penggunaan tenaga di tiga bangunan pejabat.

Ia menunjukkan penggunaan tenaga HVAC bulanan (dalam kWh) untuk tiga bangunan pada tahun 2024, Bangunan A, Bangunan B, dan Bangunan C. Berdasarkan pemerhatian, rajah ini menunjukkan perbezaan yang ketara dalam kecekapan tenaga bagi setiap bangunan. Bangunan B mencatatkan penggunaan tenaga tertinggi, antara 800,000 hingga 1,000,000 kWh sebulan, yang mencerminkan liputan BAS yang luas, termasuk HVAC, sistem kebakaran dan lif. Sebaliknya, Bangunan C menunjukkan penggunaan tenaga terendah pada kira-kira 100,000–250,000 kWh sebulan, terutamanya disebabkan oleh teknologi BAS yang ketinggalan zaman dan liputan sistem yang terhad. Bangunan A menunjukkan penggunaan tenaga sederhana, antara 100,000–700,000 kWh, yang menunjukkan prestasi BAS yang seimbang.

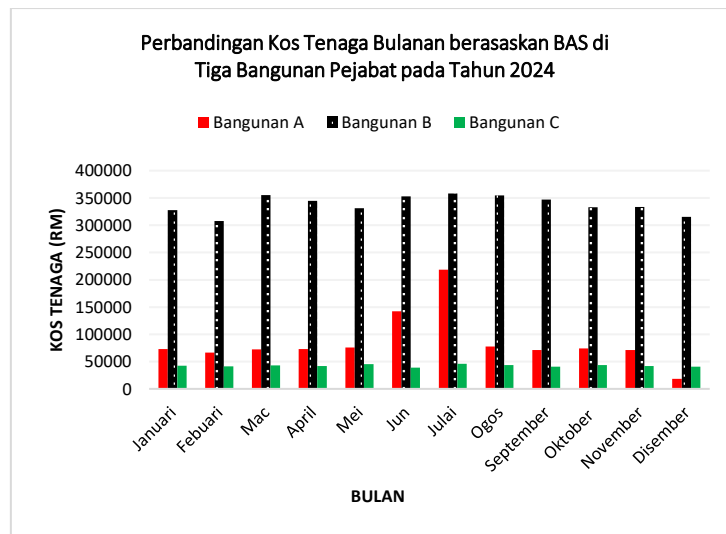
Penemuan ini mendedahkan hubungan langsung antara liputan BAS, kemajuan teknologi dan kecekapan tenaga. Kebanyakan bangunan mempunyai penggunaan tenaga yang lebih tinggi disebabkan oleh permintaan sistem HVAC. Menurut Mistry [7], sistem HVAC menyumbang sejumlah besar penggunaan tenaga dalam kedua-dua bangunan komersial dan kediaman. Walaupun bangunan dengan BAS moden dan komprehensif seperti di Bangunan B menggunakan lebih banyak tenaga disebabkan oleh operasi yang lebih luas dan mempunyai potensi untuk mencapai pengoptimuman yang lebih baik dan keselesaan penghuni, sejajar dengan objektif menganalisis kecekapan tenaga dan impaknya terhadap penjimatan kos. Mistry [7] menyatakan bahawa keupayaan untuk menyesuaikan pemanasan, pengudaraan, penyaman udara (HVAC) dan keselamatan melalui satu sistem mempromosikan kecekapan operasi dan keselesaan penghuni. Sebaliknya, sistem yang terhad atau ketinggalan zaman seperti di Bangunan C menghasilkan penggunaan tenaga yang lebih rendah tetapi boleh mempengaruhi kecekapan jangka panjang dan kos yang efektif.

3.4. Analisis Kos Tenaga

Menurut data penggunaan tenaga bagi setiap bulan di setiap bangunan, kos tenaga dikira berdasarkan kadar tarif yang diandaikan sebanyak 36.5sen/kWh di bawah tarif C1, yang merujuk kepada bangunan komersial voltan sederhana, dan menggunakan [Formula \(1\)](#).

$$\text{Kos Tenaga (RM)} = \text{Penggunaan Tenaga (kWh)} \times \text{Kadar Tarif (RM/kWh)} \quad (1)$$

Rajah 2 di bawah menunjukkan perbandingan kos tenaga antara tiga bangunan pejabat bertingkat tinggi. Perbezaan kos tenaga bagi setiap bangunan adalah tidak sama disebabkan oleh penggunaan komponen BAS yang berbeza-beza.



Rajah 2: Perbandingan kos tenaga di tiga bangunan pejabat.

Bagi Bangunan A, kos tenaga bermula pada RM66,502.80 pada bulan Februari dan tiba-tiba memuncak kepada RM218,268.72 pada bulan Julai. Ini menunjukkan penggunaan tenaga yang ketara, terutamanya pada pertengahan tahun. Bangunan B pula menunjukkan kos tenaga yang agak stabil antara RM307,558.08 pada bulan Februari dan RM358,372.44 pada bulan Julai. Jumlah ini mencerminkan penggunaan tenaga yang konsisten sepanjang tahun. Sementara itu, Bangunan C menunjukkan kos tenaga paling rendah dalam kalangan ketiga-tiga bangunan, iaitu antara RM39,076.56 pada bulan Jun hingga RM46,263.96 pada bulan Julai.

Data ini menunjukkan perbezaan besar dalam penggunaan tenaga dan kecekapan kos antara bangunan-bangunan tersebut, yang berkemungkinan dipengaruhi oleh keberkesanan BAS mereka dalam menguruskan sistem HVAC, pencahayaan, lif, sistem keselamatan kebakaran dan operasi lain yang menggunakan tenaga secara intensif. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi penggunaan dan kos tenaga ialah sistem HVAC. Oleh itu, penjadualan masa untuk menghidupkan dan mematikan penghawa dingin sangat membantu dalam mengawal dan mengekalkan kecekapan tenaga di bangunan. Pada bulan Jun dan Julai, penggunaan dan kos tenaga adalah yang tertinggi kerana bulan-bulan ini merupakan bulan paling kering di kebanyakan daerah. Maka, permintaan terhadap HVAC meningkat dan ini menyerlahkan keperluan strategi pengurusan tenaga yang lebih cekap untuk mengurangkan kos terutamanya bagi bangunan seperti Bangunan A.

4. Perbincangan

Dapatan kajian menunjukkan perbezaan ketara dari segi kecekapan BAS, penjimatan kos tenaga dan prestasi keseluruhan. Berdasarkan hasil temu bual dan perbincangan, Bangunan B menggunakan BAS untuk sistem HVAC, sistem keselamatan kebakaran dan sistem kawalan lif. Bangunan ini menggunakan sistem canggih yang mengintegrasikan BAS, membolehkan pengurusan tenaga yang tepat dan mencapai pengurangan penggunaan tenaga sebanyak 20% serta kos tenaga yang stabil. Walaupun penggunaan tenaga dan kos tenaga bagi Bangunan B lebih tinggi berbanding bangunan lain. Hal ini disebabkan oleh penggunaan pelbagai sistem dan komponen automasi canggih, bangunan ini telah dibina lebih daripada 20 tahun lalu dan kos penyelenggaraannya adalah yang tertinggi berbanding bangunan lain kerana faktor usia dan keperluan teknikalnya.

Bagi Bangunan C, ia masih bergantung kepada BAS lama yang menggunakan sistem operasi Windows 98 yang menimbulkan cabaran dari segi penyelenggaraan, bajet untuk peningkatan dan integrasi teknikal ke dalam BAS. Ini menyebabkan keuntungan kecekapan tenaga dan kos tenaga yang sangat minimum. Bangunan A pula menumpukan kepada sistem HVAC BAS dan berjaya mencapai pengurangan penggunaan tenaga sebanyak 15%. Namun, kos tenaga tidak konsisten sepanjang tahun disebabkan oleh permintaan penyaman udara tetapi ia masih mencapai kecekapan tenaga kerana sistem diselenggara dengan baik.

Antara cabaran paling ketara yang dikenalpasti termasuklah teknologi yang sudah ketinggalan, bajet yang terhad untuk perubahan sistem, kekurangan kemahiran dalam mengendalikan dan menyelenggara BAS serta ralat yang berpunca daripada integrasi sistem yang tidak menyeluruh. Hasil kajian ini jelas menunjukkan bahawa BAS yang moden dan diselenggara dengan baik bukan sahaja meningkatkan kecekapan penggunaan tenaga malah menjimatkan kos tenaga secara signifikan. Ini membuktikan betapa pentingnya pelaburan yang bijak dalam peningkatan sistem dan latihan staf untuk kejayaan jangka panjang dan kecemerlangan operasi.

Oleh itu, penemuan daripada perbandingan dan analisis komponen BAS dalam bangunan pejabat yang dikaji menonjolkan tahap kecanggihan teknologi dan automasi yang berbeza-beza. Walaupun sistem automasi sepenuhnya memberikan penjimatan tenaga dan kecekapan operasi yang ketara, sistem separa automasi pula menawarkan peluang penambahbaikan. Integrasi sumber tenaga boleh diperbaharui dan analitik lanjutan, seperti yang dilihat dalam Bangunan B, merupakan penanda aras bagi pengurusan bangunan yang lestari dan cekap. Pemerhatian ini menekankan kepentingan inovasi berterusan dan pelaburan dalam teknologi automasi bangunan untuk mencapai kecekapan tenaga dan prestasi yang optimum.

5. Kesimpulan

Kajian ini mengenai Sistem Automasi Bangunan (BAS) di bangunan pejabat bertingkat tinggi di wilayah tengah Malaysia telah berjaya mencapai objektifnya dengan objektif pertama; iaitu menganalisis keadaan semasa teknologi BAS telah dicapai melalui perbandingan sistem di tiga buah bangunan. Bangunan B dan Bangunan A menampilkan BAS moden dan bersepadu dengan fokus kepada sistem HVAC, keselamatan kebakaran, dan kawalan lif. Sebaliknya, BAS Bangunan C yang masih menggunakan sistem operasi Windows 98 yang lapuk menyerlahkan kekangan sistem lama tersebut.

Objektif seterusnya iaitu mengenal pasti cabaran dalam pelaksanaan BAS telah dicapai melalui temu bual dan analisis data. Cabaran utama yang dikenalpasti termasuk kos pemasangan yang tinggi, kekangan bajet, kerumitan sistem, dan sokongan vendor yang terhad. Cabaran ini jelas ketara dalam sistem usang Bangunan C dan juga kekangan kewangan yang dihadapi oleh dua bangunan lain.

Objektif terakhir iaitu menganalisis kecekapan tenaga dan penjimatan kos, telah dicapai dengan membandingkan data penggunaan tenaga dan kos. Secara keseluruhannya, kajian ini mengesahkan bahawa BAS moden dapat meningkatkan kecekapan tenaga dan penjimatan kos, sekaligus memberikan manfaat kewangan dan alam sekitar yang signifikan serta menyokong matlamat kelestarian Malaysia.

Pengenalan ORCID

Ariza Sharikin Abu Bakar  <https://orcid.org/0000-0002-5692-0098>

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para pengarang menyatakan bahawa tiada konflik kepentingan dengan mana-mana pihak lain dalam penerbitan karya ini.

Rujukan

- [1] F. Shu, Malka. N. Halgamuge, and W. Chen, Building Automation Systems Using Wireless Sensor Networks: Radio Characteristics and Energy Efficient Communication Protocols. *Electronic Journal of Structural Engineering* 01 (2009) 66–73. <https://doi.org/10.56748/ejse.11101>
- [2] S. C. Chua and T. H. Oh, Review on Malaysia's National Energy Developments: Key Policies, Agencies, Programmes and International Involvements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9) (2010) 2916–2925. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.031>
- [3] E. M. Erebor, E. O. Ibem, I. C. Ezema, and A. B. Sholanke, Energy Efficiency Design Strategies in Office Buildings: A Literature IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 665(1) (2021) 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/665/1/012025>
- [4] S. Barlow and D. Fiala, Occupant Comfort in UK offices—How Adaptive Comfort Theories might Influence Future Low Energy Office Refurbishment Strategies. *Energy and Buildings* 39(7) (2007) 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.002>
- [5] X. Xu, P. J. Culligan, and J. E. Taylor, Energy Saving Alignment Strategy: Achieving Energy Efficiency in Urban Buildings by Matching Occupant Temperature Preferences with a Building's Indoor Thermal Environment. *Applied Energy* (123) (2014) 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.039>
- [6] N. Fernandez, S. Katipamula, W. Wang, Y. Huang, and G. Liu, Energy Savings Modeling of Standard Commercial Building Re-tuning Measures: Large Office Buildings. OSTI OAI (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 2012. <https://doi.org/10.2172/1048616>
- [7] V. Mistry, Energy Efficiency in HVAC Systems through Building Automation. *Journal of Biosensors and Bioelectronics Research* 1(1) (2023) 1–4. [https://doi.org/10.47363/JBBER/2023\(1\)113](https://doi.org/10.47363/JBBER/2023(1)113)
- [8] P. Lamsal, S. B. Bajracharya, and H. B. Rijal, A Review on Adaptive Thermal Comfort of Office Building for Energy-Saving Building Design. *Energies* 16(3) (2023) 1524. <https://doi.org/10.3390/en16031524>.
- [9] D. Ramsauer, M. Dorfmann, H. Tellioglu, and W. Kastner, Human Perception and Building Automation Systems. *Energies* 15(5) (2022) 1745. <https://doi.org/10.3390/en15051745>
- [10] Z. Pang, P. Xu, Z. O'Neill, J. Gu, X. Lu, and X. Li, Application of mobile positioning occupancy data for building energy simulation: An engineering case study. *Building and Environment* 141 (2018) 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.030>
- [11] D. H. Wang and K. W. E. Cheng, General Discussion on Energy Saving. In: *Proceedings. 2004 First International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, 2004., Hong Kong, China, 2004, pp. 298-303.

- [12] W. Wang, T. Hong, N. Li, R. Q. Wang, and J. Chen, Linking Energy-Cyber-Physical Systems with Occupancy Prediction and Interpretation through WiFi Probe-Based Ensemble Classification. *Applied Energy* 236 (2019) 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.079>
- [13] I. González, A. J. Calderón, A. Mejías, and J. M. Andújar, Novel Networked Remote Laboratory Architecture for Open Connectivity Based on PLC-OPC-LabVIEW-EJS Integration. *Application in Remote Fuzzy Control and Sensors Data Acquisition. Sensors* 16(11) (2016) 1822. <https://doi.org/10.3390/S16111822>
- [14] Y. Zhang, Z. Yan, F. Yuan, J. Yao, and B. Ding, A Novel Reconstruction Approach to Elevator Energy Conservation based on a DC Micro-Grid in High-Rise Buildings. *Energies* 12(1) (2019) 33. <https://doi.org/10.3390/en12010033>
- [15] G. Lowry, Energy Saving Claims for Lighting Controls in Commercial Buildings. *Energy and Buildings* 133 (2016) 489–497. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.10.003>
- [16] K. R. Wagiman, M. N. Abdullah, M. Y. Hassan, and N. H. Mohammad Radzi, A New Metric for Optimal Visual Comfort and Energy Efficiency of Building Lighting System Considering Daylight using Multi-Objective Particle Swarm Optimization. *Journal of Building Engineering* 43 (2021) 102525. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102525>
- [17] B. Roisin, M. Bodart, A. Deneyer, and P. D’Herdt, Lighting Energy Savings in Offices using Different Control Systems and Their Real Consumption. *Energy and Buildings* 40(4) (2008) 514–523. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.04.006>
- [18] N. Gentile, T. Laike, and M. C. Dubois, Lighting Control Systems in Individual Offices Rooms at High Latitude: Measurements of Electricity Savings and Occupants’ Satisfaction. *Solar Energy* 127 (2016) 113–123. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2015.12.053>
- [19] A. Shankar, V. Krishnasamy, and B. Chitti Babu, Smart LED Lighting System with Occupants’ Preference and Daylight Harvesting in Office Buildings. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 47(1) (2025) 3966–3986. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1859650>
- [20] V. S. K. V. Harish and A. Kumar, A Review on Modeling and Simulation of Building Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016) 1272–1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>
- [21] A. Verma, S. Prakash, and A. Kumar, AI-based Building Management and Information System with Multi-agent Topology for an Energy-efficient Building: Towards Occupants Comfort. *IETE Journal of Research* 69(2) (2023) 1033–1044, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1080/03772063.2020.1847701>
- [22] A. Mirakhorli and B. Dong, Occupancy Behavior based Model Predictive Control for Building Indoor Climate—A Critical Review. *Energy and Buildings* 129 (2016) 499–513. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.036>
- [23] P. Domingues, P. Carreira, R. Vieira, and W. Kastner, Building Automation Systems: Concepts and Technology Review. *Computer Standards & Interfaces* 45 (2016) 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2015.11.005>
- [24] Z. Afroz, G. Shafiullah, T. Urmee, and G. Higgins, Modeling Techniques used in Building HVAC Control Systems: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 83 (2018) 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.044>
- [25] Y. Jin, D. Yan, A. Chong, B. Dong, and J. An, Building Occupancy Forecasting: A Systematical and Critical Review. *Energy and Buildings* 251 (2021) 111345. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111345>
- [26] D. Chakraborty and H. Elzarka, Early Detection of Faults in HVAC Systems using an XGBoost Model with a Dynamic Threshold. *Energy and Buildings* 185 (2019) 326–344. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.032>
- [27] H. Kramer, G. Lin, C. Curtin, E. Crowe, and J. Granderson, Building Analytics and Monitoring-Based Commissioning: Industry Practice, Costs, and Savings. *Energy Efficiency* 13(3) (2020) 537–549. <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09790-2>

- [28] J. Ock, R. R. A. Issa, and I. Flood, Smart Building Energy Management Systems (BEMS) Simulation Conceptual Framework. In: 2016 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, Dec. 2016, pp. 3237–3245. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822355>
- [29] H. Burak Gunay, W. Shen, and G. Newsham, Data Analytics to Improve Building Performance: A Critical Review. *Automation in Construction* 97 (2019) 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.020>
- [30] J. Y. Park, M. M. Ouf, B. Gunay, Y. Peng, W. O’Brien, M. B. Kjærgaard, and Z. Nagy, A Critical Review of Field Implementations of Occupant-Centric Building Controls. *Building and Environment* 165 (2019) 106351. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106351>
- [31] J. S. Hassan, R. M. Zin, M. Z. Abd Majid, S. Balubaid, M. R. Hainin, and J. Bahru, Building Energy Consumption in Malaysia: An Overview. *70*(7) (2014) 33-38. <https://doi.org/10.1113/jt.v70.3574>
- [32] M. K. M. Shapi, N. A. Ramli, and L. J. Awaln, Energy Consumption Prediction by using Machine Learning for Smart Building: Case Study in Malaysia. *Developments in the Built Environment* 5 (2021) 100037. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2020.100037>
- [33] Delshya Selvaraj, Using a Building Automation System for Energy Audits. Retrieved from: <https://facilio.com/blog/energy-audits-with-a-bas/> (accessed on Jan. 16, 2025).
- [34] S. van Roosmale, P. Hellinckx, J. Meysman, S. Verbeke, and A. Audenaert, Building Automation and Control Systems for Office Buildings: Technical Insights for Effective Facility Management - A Literature Review. *Journal of Building Engineering* 97 (2024) 110943. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110943>