

Implementasi Teknologi Sensor di Bangunan Komersial Pulau Pinang

Implementation of Sensor Technology in Commercial Buildings in Penang Island

Aina Mardia Sallehuddin^{1,2*}, Muhammad Faris Abdullah², Hilyati Sabtu @ Othman^{1,2}, Zailawati Khalid^{1,2}

¹ Jabatan Pengurusan Pembinaan, Fakulti Pengurusan Teknologi dan Perniagaan, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Parit Raja, Batu Pahat, Johor 86400, MALAYSIA

² Center of Sustainable Infrastructure and Environmental Management (CSIEM), Fakulti Pengurusan Teknologi dan Perniagaan, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Parit Raja, Batu Pahat, Johor 86400, MALAYSIA

*Pengarang Utama: aina@uthm.edu.my

DOI: <https://doi.org/10.30880/rmtb.2026.07.01.047>

Maklumat Artikel

Diserah: 31 Mac 2026

Diterima: 31 Mei 2026

Diterbitkan: 30 Jun 2026

Kata Kunci

Teknologi pintar, Teknologi sensor, Penyelenggaraan prediktif, Bangunan komersial, Kecekapan operasi.

Abstrak

Kajian ini meneliti penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial di Pulau Pinang yang masih rendah meskipun terbukti berkesan dalam meningkatkan kecekapan operasi, menjimatkan tenaga dan mengurangkan kos jangka panjang. Teknologi sensor membolehkan pemantauan masa nyata dan pelaksanaan penyelenggaraan prediktif yang dapat mengurangkan kebergantungan kepada pendekatan reaktif tradisional. Namun, antara masalah utama yang dikenal pasti termasuk kos permulaan yang tinggi, kekurangan tenaga mahir tempatan dalam bidang sistem pintar dan Internet of Things (IoT), serta isu ketidakserasian antara sistem daripada pelbagai vendor. Objektif kajian ini adalah untuk menganalisis cabaran pelaksanaan, mengenal pasti kaedah penggunaan, serta mengkaji manfaat teknologi sensor dalam perkhidmatan penyelenggaraan bangunan komersial. Skop kajian tertumpu kepada bangunan komersial di Pulau Pinang yang menggunakan sistem teknologi sensor, melibatkan pengurus fasiliti, penyelia bangunan dan juruteknik sebagai responden yang terlibat secara langsung dalam operasi harian penyelenggaraan. Kajian ini menggunakan pendekatan kualitatif melalui temu bual separa berstruktur, di mana data dianalisis menggunakan kaedah tematik untuk mengenal pasti pola, cabaran dan peluang berkaitan pelaksanaan teknologi sensor. Kajian ini penting kerana dapat menyumbang kepada pemahaman praktikal dalam bidang pengurusan fasiliti serta membantu pihak industri, pembuat dasar dan akademik dalam merangka strategi pelaksanaan teknologi sensor yang lebih berkesan. Hasil kajian ini juga dijangka menyokong agenda pembangunan bandar pintar dan amalan penyelenggaraan mampan dalam industri pembinaan di Malaysia.

Keywords

Smart technology, Sensor technology, Predictive maintenance, Commercial buildings, Operational efficiency, Implementation challenges, Malaysia

Abstract

This study examines the use of sensor technology in the maintenance of commercial buildings in Penang, which remains relatively low despite its proven effectiveness in improving operational efficiency, conserving energy, and reducing long-term costs. Sensor technology enables real-time monitoring and the implementation of predictive maintenance, thereby reducing reliance on traditional reactive approaches; however, key challenges have been identified, including high initial investment costs, a shortage of local skilled personnel in smart systems and the Internet of Things (IoT), and compatibility issues among systems from different vendors. The objectives of this study are to analyze implementation challenges, identify application methods, and examine the benefits of sensor technology in commercial building maintenance services, with the scope focusing on commercial buildings in Penang that utilize sensor technology systems and involving facility managers, building supervisors, and technicians who are directly engaged in daily maintenance operations. The study adopts a qualitative approach through semi-structured interviews, with data analyzed using thematic analysis to identify patterns, challenges, and opportunities related to sensor technology implementation, and it is significant in contributing to practical understanding in facility management while supporting industry players, policymakers, and academics in formulating more effective implementation strategies, as well as promoting smart city development and sustainable maintenance practices within Malaysia's construction industry.

1. Pengenalan

Penggunaan teknologi sensor dalam pengurusan dan penyelenggaraan bangunan komersial di Pulau Pinang semakin penting seiring kemajuan digital industri pembinaan (Ahmad *et al.*, 2020). Teknologi ini membolehkan pemantauan masa nyata sistem seperti HVAC, elektrik, dan keselamatan, serta menyokong penyelenggaraan prediktif yang cekap, selaras dengan pembangunan bangunan pintar dan kecekapan pengurusan fasiliti (Ahmad *et al.*, 2021; Mohamad & Omar, 2021). Pengesanan awal ini secara tidak langsung dapat memanjangkan jangka hayat peralatan serta mengurangkan kos kerosakan dan penyelenggaraan. Di Malaysia, khususnya Pulau Pinang, kadar penggunaan masih rendah akibat cabaran seperti kos permulaan tinggi, kekurangan tenaga mahir, kesedaran ROI jangka panjang rendah, dan ketidakserasian sistem, walaupun ia menyokong matlamat pembangunan mampan negara (Khouluddin *et al.*, 2023). Berbanding negara jiran seperti Singapura, kadar tinggi dengan IoT meluas di ribuan bangunan dan Jepun penggunaan daripada kadar peratus 35% sehingga 70% bangunan. Manakala Malaysia masih dikategorikan penggunaan IoT yang rendah (Sallehuddin, 2022).

Walaupun *Construction Industry Development Board* (CIDB) menggalakkan teknologi sensor untuk penyelenggaraan ramalan dan pemantauan efisien (Kumar *et al.*, 2018). Namin begitu, penerimaan IoT di Malaysia masih rendah (Sallehuddin, 2022). Menurut Rahman *et al.* (2022) isu seperti kekurangan pengetahuan pengurus fasiliti, kos tinggi, serta isu logistik seperti pembekal tempatan terhad menyebabkan penggunaan IoT mencabar dalam industri pembinaan. Manakala Ahmad *et al.* (2020) menekankan isu kekurangan kesedaran dalam organisasi serta isu tenaga mahir dalam kalangan pengurus fasiliti menyebabkan implementasi IoT bergerak secara perlahan. Kajian Lim & Chong (2021) mendapati mendapati hanya 37% pengurus fasiliti di Malaysia memahami potensi IoT untuk penyelenggaraan prediktif, menyebabkan masih ramai pengurus fasiliti bergantung kepada kaedah manual yang kurang cekap. Kekurangan ini juga turut meningkatkan risiko kemalangan seperti kegagalan pengesanan kebocoran air atau pergerakan tidak sah di bangunan komersial yang menyebabkan kerosakan tambahan dan serta memdedahkan kepada persekitaran kerja yang merbahaya.

Di Pulau Pinang, kekangan ini menjadi lebih ketara akibat pertumbuhan pesat bangunan komersial yang tidak seiring dengan pembangunan infrastruktur sokongan dan insentif kerajaan, sekali gus meningkatkan risiko kemalangan seperti kegagalan pengesanan kebocoran atau pergerakan tidak sah akibat kekurangan pengetahuan pengurus fasiliti dan tenaga mahir (Mohamad & Omar, 2021). Oleh itu, kajian ini dijalankan bagi meneliti secara mendalam penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan projek pembangunan di Pulau Pinang Cabaran, kaedah dan kesan dalam penggunaan teknologi sensor terhadap penyelenggaraan bangunan akan dikupas dan lebih mendalam permasalahan.

2. Kajian Literatur

Perbincangan ini meneliti kajian-kajian terdahulu berkaitan penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial. Fokus diberikan kepada jenis-jenis teknologi sensor, perkembangan dan evolusi penggunaannya, serta aplikasinya dalam pelbagai sistem bangunan seperti sistem pemanasan, pengudaraan dan penyaman udara (HVAC) serta sistem keselamatan. Dapatan kajian lepas menunjukkan bahawa penggunaan teknologi sensor berupaya meningkatkan kecekapan tenaga, tahap keselamatan, serta mengurangkan kos penyelenggaraan jangka panjang. Walau bagaimanapun, pelaksanaan teknologi ini masih berdepan dengan beberapa kekangan utama, antaranya kos pemasangan awal yang tinggi, kekurangan kepakaran teknikal dan isu keserasian antara sistem yang berbeza. Selain itu, model teori seperti Model Penerimaan Teknologi (Technology Acceptance Model, TAM) dan Teori Difusi Inovasi turut dirujuk bagi memahami faktor-faktor yang mempengaruhi penerimaan teknologi sensor dalam industri pembinaan.

2.1 Teknologi Sensor dalam Bangunan Komersial

Teknologi sensor dan kawalan dalam bangunan komersial menggunakan sistem pintar untuk memantau serta mengoptimumkan prestasi sistem seperti HVAC dan pencahayaan. Ia bertindak balas secara masa nyata terhadap perubahan persekitaran, membantu mengurangkan pembaziran tenaga. Kajian oleh PNNL dan Xu *et al.* (2020) menunjukkan teknologi ini bersama langkah penjimatan tenaga mampu mengurangkan penggunaan tenaga sehingga 29%. Dalam bangunan pintar, sensor mengesan dan menghantar maklumat ke sistem kawalan pusat untuk menyokong pengurusan tenaga, keselamatan dan penyelenggaraan. Data masa nyata yang dikumpul membolehkan sistem bertindak balas terhadap perubahan operasi dengan lebih cekap. Secara keseluruhan, teknologi sensor bukan sahaja menjimatkan kos dan tenaga, tetapi juga meningkatkan keselamatan, keselesaan penghuni dan menyokong amalan pembinaan lestari.

Teknologi sensor telah menjadi fokus utama dalam pelbagai kajian terdahulu yang meneliti penggunaannya dalam pengurusan dan penyelenggaraan bangunan, terutamanya dari segi kecekapan tenaga, keselamatan, dan kemudahan operasi. Dalam konteks bangunan komersial, sensor digunakan untuk memantau suhu, kelembapan, kehadiran penghuni, dan status peralatan, bagi membolehkan kawalan automatik terhadap sistem seperti HVAC, pencahayaan, dan sistem keselamatan (Sofos *et al.*, 2020). Penggunaan sensor untuk pengesanan kerosakan operasi serta pelarasan automatik suhu dan pencahayaan memberi impak besar kepada keberkesanan pengurusan tenaga. Kajian oleh Fernandez *et al.* (2017) menunjukkan bahawa penggunaan sensor dan kawalan pintar boleh menjimatkan sehingga 29% tenaga setahun dan menyokong penyelenggaraan yang lebih cekap secara jangka panjang.

Walaupun bagaimanapun, terdapat juga kajian yang menyoroti beberapa cabaran dalam pelaksanaan teknologi sensor. Antaranya termasuklah kekangan dari segi kos, isu ketidakserasian sistem, serta keperluan kepakaran teknikal untuk pemasangan, penentuan, dan penyelenggaraan sensor (Gupta *et al.*, 2020). Kajian Urban *et al.* (2016) turut menunjukkan bahawa prestasi sensor sebenar kadangkala tidak menepati simulasi, menjejaskan keberkesanan sistem. Selain itu, Urban *et al.* (2016) melaporkan bahawa jurang antara simulasi dan operasi sebenar turut menjadi isu, di mana sensor yang diuji dalam keadaan ideal tidak sentiasa memberikan keputusan yang konsisten apabila diaplikasikan di lapangan. Oleh itu, pelaksanaan teknologi sensor perlu disesuaikan dengan infrastruktur dan keupayaan pengurusan tempatan bagi menjamin keberhasilan dalam bangunan komersial.

2.2 Cabaran Dalam Penggunaan Teknologi Sensor

Walaupun teknologi sensor menawarkan banyak manfaat, pelaksanaannya di bangunan komersial bandar seperti Pulau Pinang masih terhalang oleh cabaran seperti kos tinggi, kekurangan kepakaran, penyelenggaraan sistem, dan isu integrasi teknologi (Mohamad & Omar, 2021). Kos pemasangan awal merupakan antara halangan utama pelaksanaan teknologi sensor. Pelaburan ini melibatkan kos perkakasan, pemasangan, integrasi sistem serta latihan kakitangan. Walaupun teknologi sensor berpotensi menjimatkan kos operasi dalam jangka panjang, kos permulaan yang tinggi sering menyebabkan pemilik bangunan menanggukkan pelaksanaannya, terutamanya bagi bangunan komersial berskala sederhana dan kecil (Sofos *et al.*, 2020). Kos yang tinggi juga berkait rapat dengan keperluan untuk menyesuaikan teknologi sedia ada dengan reka bentuk dan struktur bangunan yang berbeza-beza. Tidak semua bangunan komersial dibina dengan kemudahan untuk integrasi sistem pintar, maka penyesuaian sistem sensor memerlukan pengubahsuaian fizikal yang mahal.

Pelaksanaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial juga memerlukan kemahiran teknikal yang tinggi, terutamanya dalam aspek pemasangan, pemantauan, penyelenggaraan, dan analisis data. Namun begitu, kekurangan kepakaran tempatan dalam bidang ini masih menjadi cabaran utama, khususnya di negara membangun seperti Malaysia. Menurut Ahmad *et al.* (2020), jurang kemahiran dalam kalangan jurutera

dan pengurus fasiliti terhadap teknologi canggih seperti Internet of Things (IoT) dan sistem kawalan pintar menghalang pelaksanaan sistem secara menyeluruh. Hal ini menyebabkan banyak organisasi terpaksa bergantung kepada tenaga kerja luar atau konsultan asing yang melibatkan kos yang tinggi. Tambahan, ketiadaan latihan formal dan kurangnya kurikulum pendidikan yang relevan turut menyumbang kepada kekurangan tenaga pakar tempatan (Kamaruzzaman *et al.*, 2018).

Salah satu cabaran utama dalam penggunaan teknologi sensor dalam bangunan komersial ialah keperluan penyelenggaraan dan kalibrasi yang berterusan bagi memastikan prestasi optimum sistem. Sensor yang digunakan dalam pengurusan fasiliti sering terdedah kepada faktor persekitaran seperti habuk, kelembapan, dan suhu ekstrem yang boleh menjejaskan ketepatan bacaan (Fernandez *et al.*, 2017). Ketiadaan prosedur penyelenggaraan yang sistematik berpotensi menyebabkan data tidak tepat, pembaziran tenaga dan gangguan operasi bangunan (Sofos *et al.*, 2020). Tambahan pula, isu ketidakserasian antara peranti dan perisian daripada pelbagai pengeluar turut menghalang pelaksanaan teknologi sensor secara bersepadu (Ahmad *et al.*, 2020). Kekurangan standardisasi menyebabkan kesukaran integrasi data dan kawalan sistem secara menyeluruh, terutamanya dalam bangunan sedia ada. Keadaan ini boleh meningkatkan kos operasi dan mengehadkan keberkesanan sistem pengurusan bangunan pintar (Gupta *et al.*, 2020).

Ketidakserasian sistem merujuk kepada masalah integrasi antara pelbagai peralatan, perisian, dan protokol dalam penggunaan teknologi sensor di bangunan komersial. Dalam banyak kes, peranti yang dibangunkan oleh pengeluar yang berbeza tidak serasi antara satu sama lain, menyebabkan kesukaran dalam menggabungkan data dan mengawal sistem secara menyeluruh. Menurut Gupta *et al.* (2020), kekurangan standardisasi dalam reka bentuk dan komunikasi sensor menyebabkan sistem pengurusan bangunan menjadi terfragmentasi, menyukarkan usaha ke arah pengurusan fasiliti pintar secara bersepadu. Tambahan pula, isu ketidakserasian sering melibatkan perisian kawalan dan platform pengurusan data. Sistem yang tidak direka untuk berkomunikasi antara satu sama lain menyebabkan keperluan untuk penyelesaian pihak ketiga atau *middleware* yang kompleks dan mahal. Kajian oleh Fernandez *et al.* (2017) menunjukkan bahawa walaupun sesetengah teknologi sensor mampu menghasilkan data berkualiti tinggi, ia tidak dapat diintegrasikan dengan sistem pengurusan tenaga kerana protokol yang berbeza.

2.3 Kaedah Penggunaan

Penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial melibatkan pelbagai pendekatan teknikal yang membolehkan pemantauan dan pengesanan keadaan sistem bangunan secara automatik dan masa nyata. Sensor biasanya dipasang pada sistem kritikal seperti HVAC, pencahayaan, sistem elektrik dan paip air bagi mengumpul data prestasi yang menyokong pelaksanaan penyelenggaraan ramalan berbanding pendekatan reaktif tradisional. Pemantauan keadaan peralatan merupakan kaedah utama penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan moden. Sensor digunakan untuk memantau parameter operasi seperti suhu, getaran dan tekanan bagi mengesan perubahan prestasi peralatan secara awal. Pendekatan ini membolehkan kerosakan dikenal pasti sebelum berlaku kegagalan serius, sekali gus mengurangkan gangguan operasi dan kos pembaikan kecemasan (Sofos *et al.*, 2020; Fernandez *et al.*, 2017).

Integrasi sensor dengan Sistem Pengurusan Bangunan (BMS) membolehkan pemantauan dan kawalan bangunan dilakukan secara berpusat. Data daripada sensor seperti suhu, pencahayaan dan kehadiran penghuni digunakan untuk membuat pelarasan automatik terhadap sistem bangunan bagi meningkatkan kecekapan tenaga dan keselesaan pengguna (Lim & Chong, 2021). Pendekatan ini juga mengurangkan keperluan pemeriksaan manual dan menyokong pengurusan bangunan pintar. Penyelenggaraan ramalan menggunakan data yang dikumpul oleh sensor untuk meramal keperluan penyelenggaraan sebelum kegagalan sistem berlaku. Analitik data dan kecerdasan buatan digunakan untuk mengenal pasti corak operasi dan anomali yang menunjukkan tanda awal kerosakan, seterusnya membolehkan penyelenggaraan dilaksanakan secara lebih efisien dan terancang (Tan *et al.*, 2021; Fernandez *et al.*, 2017).

Penggunaan aplikasi mudah alih dan teknologi Internet of Things (IoT) membolehkan pemantauan sistem bangunan dilakukan dari jarak jauh secara masa nyata. Aplikasi ini membolehkan pengurus fasiliti menerima amaran awal, menyusun jadual penyelenggaraan serta memantau prestasi peralatan dengan lebih efisien, sekali gus meningkatkan keberkesanan operasi bangunan (Ahmad *et al.*, 2021). Teknologi sensor menyokong pelaksanaan automasi dalam penyelenggaraan bangunan melalui tindakan kawalan automatik berdasarkan data masa nyata. Sistem ini membolehkan pelarasan operasi dilakukan tanpa campur tangan manual serta menyokong penambahbaikan berterusan melalui analisis data jangka panjang. Integrasi sensor, automasi dan BMS menjadikan pengurusan bangunan lebih efisien, mampan dan responsif terhadap perubahan operasi (Sofos *et al.*, 2020; Lim & Chong, 2021).

2.4 Keberkesanan Teknologi Sensor

Keberkesanan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial dapat dilihat melalui peningkatan kualiti penyelenggaraan, pengurangan kos operasi serta pemanjangan jangka hayat bangunan. Penggunaan sensor membolehkan pemantauan masa nyata terhadap sistem utama seperti HVAC, pencahayaan dan keselamatan, sekali gus menyokong pengesanan awal kerosakan dan pelaksanaan penyelenggaraan berasaskan keadaan sebenar (Sofos *et al.*, 2020; Tan *et al.*, 2021).

Teknologi sensor meningkatkan keberkesanan penyelenggaraan dengan menyediakan data masa nyata yang membolehkan pemantauan berterusan terhadap prestasi peralatan. Pendekatan ini menyokong penyelenggaraan berasaskan keadaan yang lebih sistematik dan mengurangkan kebergantungan kepada kaedah penyelenggaraan berjadual tradisional (Sofos *et al.*, 2020; Fernandez *et al.*, 2017). Integrasi sensor dengan sistem pengurusan bangunan (BMS) turut membolehkan tindakan automatik dilaksanakan, sekali gus meningkatkan kecekapan operasi harian (Lim & Chong, 2021).

Penggunaan teknologi sensor membantu mengurangkan kos penyelenggaraan jangka panjang melalui pengesanan awal kerosakan dan pengurangan pembaikan kecemasan. Penyelenggaraan berasaskan data membolehkan kerja penyelenggaraan dilaksanakan hanya apabila diperlukan, seterusnya mengoptimumkan penggunaan sumber dan mengurangkan pembaziran kos (Tan *et al.*, 2021; Sofos *et al.*, 2020). Selain itu, pemantauan jarak jauh melalui sistem pintar juga mengurangkan keperluan pemeriksaan manual dan kos tenaga kerja (Ahmad *et al.*, 2021).

Teknologi sensor berupaya memanjangkan jangka hayat bangunan melalui pemantauan berterusan dan penyelenggaraan yang lebih terancang. Analisis data jangka panjang membolehkan pengesanan awal kehausan peralatan dan perancangan penggantian dilakukan sebelum kegagalan sistem berlaku (Tan *et al.*, 2021). Pendekatan ini membantu mengekalkan prestasi bangunan pada tahap optimum serta mengurangkan risiko kerosakan besar dalam jangka panjang (Ahmad *et al.*, 2021).

3. Metodologi Kajian

Kajian ini menggunakan pendekatan kualitatif melalui temu bual separa berstruktur bagi meneroka secara mendalam pengalaman responden berkaitan penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan di Pulau Pinang. Temu bual dijalankan secara bersemuka atau dalam talian, dirakam dengan keizinan, dan dianalisis menggunakan kaedah analisis tematik untuk mengenal pasti pola dan makna utama. Kajian ini melibatkan populasi pengurus fasiliti, juruteknik, dan profesional penyelenggaraan bangunan komersial di Pulau Pinang, dipilih kerana pengalaman mereka dalam penggunaan teknologi sensor. Sampel dipilih melalui pensampelan bertujuan berdasarkan kriteria seperti pengalaman kerja minimum tiga tahun dan penglibatan langsung dalam sistem penyelenggaraan. Seramai 5 responden telah ditemu bual sehingga mencapai ketepuan data. Pendekatan ini membolehkan pengumpulan maklumat yang relevan dan mendalam untuk menjawab persoalan kajian secara holistik. Dalam kajian ini, analisis tematik digunakan untuk mengenal pasti dan menganalisis tema daripada data temu bual. Proses bermula dengan pembacaan transkrip secara menyeluruh, diikuti oleh pengekodan kata kunci dan frasa penting yang berkaitan dengan isu kajian.

4. Dapatan Kajian

4.1 Latar Belakang Responden

Pada bahagian demografi, latar belakang para responden yang terlibat akan dikenalpasti mengikut jenis dan bentuk kajian. Pelbagai aspek mengenai latarbelakang responden diambil kira termasuk umur, jawatan, pengalaman kerja, jenis bangunan/organisasi dan lain-lain. Namun begitu, demografi respondent hanyalah akan ditanya sekiranya ia memberi impak dan kesan kepada kajian. Jadual 1 memaparkan latar belakang lima orang responden yang terlibat dalam kajian ini, terdiri daripada Pengurus Bangunan, Pengurus Fasiliti, Jurutera Perkhidmatan Bangunan, Pengurus Operasi dan Juruteknik HVAC, yang berperanan penting dalam operasi serta penyelenggaraan bangunan komersial. Kesemua responden mempunyai pengalaman kerja melebihi lapan tahun, dengan pengalaman tertinggi melebihi empat belas tahun, menunjukkan tahap pendedahan yang luas terhadap pengurusan bangunan dan penggunaan teknologi sensor.

Jadual 1 Latar belakang responden (Demografi)

Responden	Jawatan	Pengalaman Kerja	Umur	Jenis Bangunan/ Organisasi
R1	Pengurus Bangunan	>14	39 Tahun	IJM Land

R2	Pengurus Fasilitas	>12	35 Tahun	Queensbay Mall, Bayan Lepas
R3	Jurutera Perkhidmatan Bangunan	>9	32 Tahun	Setia SPICE Convention Centre
R4	Pengurus Operasi	>11	40 Tahun	Sunway Carnival Mall
R5	Juruteknik HVAC	>8	30 Tahun	Gurney Plaza

Responden berumur antara 30 hingga 40 tahun dan terlibat dalam pengurusan bangunan komersial berskala besar seperti pusat membeli-belah, pusat konvensyen dan organisasi pembangunan hartanah, sekali gus membolehkan kajian memperoleh pandangan yang menyeluruh dan representatif terhadap amalan penyelenggaraan bangunan komersial di Pulau Pinang.

4.2 Menganalisis cabaran dalam penggunaan teknologi sensor dalam perkhidmatan bangunan.

Berdasarkan analisis temu bual yang dijalankan, beberapa cabaran utama telah dikenal pasti dalam pelaksanaan teknologi sensor di bangunan komersial.

4.2.1 Kos Awalan Pemasangan yang Tinggi

Berdasarkan Jadual 2, kesemua lima (5) responden bersetuju bahawa kos awalan pemasangan merupakan cabaran utama dalam pelaksanaan teknologi sensor. Responden menyatakan bahawa pelaburan awal yang tinggi sering menjadi faktor utama pihak pengurusan bangunan menanggukkan penggunaan teknologi ini, terutamanya bagi bangunan sedia ada. R1 menyatakan bahawa kebanyakan bangunan lama tidak direka untuk integrasi sistem sensor, menyebabkan kos pemasangan menjadi lebih tinggi berbanding bangunan baharu.

“Kalau bangunan lama, kos memang naik sebab sistem asal tak support sensor. Jadi pihak pengurusan kena fikir banyak kali sebelum luluskan bajet.” (R1)

R4 turut menegaskan bahawa walaupun manfaat jangka panjang wujud, kekangan bajet tahunan menyebabkan pelaksanaan teknologi sensor dibuat secara berperingkat atau ditangguhkan.

4.2.2 Kekurangan Tenaga Kerja Mahir

Kesemua responden juga bersetuju bahawa kekurangan tenaga kerja mahir menjadi cabaran utama dalam pelaksanaan teknologi sensor. Responden menyatakan bahawa pengendalian, pemantauan dan penyelenggaraan sensor memerlukan kemahiran teknikal khusus yang tidak semua kakitangan penyelenggaraan miliki. R5 menjelaskan bahawa kerosakan kecil pada sensor sering memerlukan bantuan pihak vendor kerana kekurangan kepakaran dalaman.

“Sensor ni bukan macam peralatan biasa. Kalau ada error, technician biasa pun kadang-kadang tak tahu nak troubleshoot. Terpaksa tunggu vendor.” (R5)

R3 turut menyatakan bahawa kekurangan latihan teknikal menyebabkan sistem sensor tidak digunakan sepenuhnya walaupun telah dipasang.

4.2.3 Kesukaran Integrasi dengan Sistem Sedia Ada (BMS)

Majoriti responden menyatakan bahawa integrasi teknologi sensor dengan Sistem Pengurusan Bangunan (BMS) sedia ada merupakan satu cabaran yang signifikan. Empat (4) daripada lima responden bersetuju bahawa isu keserasian sistem sering berlaku, terutamanya apabila melibatkan sistem lama daripada vendor berbeza. R2 menyatakan bahawa sesetengah sensor tidak dapat disepadukan sepenuhnya dengan BMS, menyebabkan data tidak dipaparkan secara menyeluruh.

“Ada sensor yang jalan sendiri, tak masuk dalam BMS. Jadi kita kena check dua sistem berbeza, itu menyusahkan.” (R2)

Keadaan ini menyebabkan keberkesanan sistem sensor tidak dimanfaatkan secara optimum.

4.2.4 Isu Penyelenggaraan dan Kalibrasi Sensor

Empat (4) responden bersetuju bahawa penyelenggaraan dan kalibrasi sensor merupakan cabaran berterusan. Sensor memerlukan pemeriksaan dan penentuan berkala bagi memastikan ketepatan bacaan, namun perkara ini sering diabaikan akibat kekangan masa dan sumber manusia.

R4 menyatakan bahawa sensor yang tidak dikalibrasi dengan betul boleh memberikan bacaan yang tidak tepat dan menjejaskan keputusan penyelenggaraan.

"Kalau sensor tak calibrate, data jadi tak betul. Nanti kita salah buat keputusan, mesin sebenarnya ok tapi kita sangka rosak." (R4)

4.3 Mengenal pasti kaedah-kaedah penggunaan teknologi sensor dalam perkhidmatan bangunan.

Bahagian ini membincangkan secara terperinci kaedah penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial di Pulau Pinang.

4.3.1 Pemantauan Keadaan Peralatan (Condition Monitoring)

Kesemua responden bersetuju bahawa teknologi sensor digunakan secara meluas bagi tujuan pemantauan keadaan peralatan, khususnya sistem HVAC dan peralatan elektromekanikal. Sensor digunakan untuk memantau parameter seperti suhu, getaran dan tekanan bagi mengesan perubahan prestasi peralatan.

R2 menyatakan bahawa kaedah ini membantu pihak pengurusan mengenal pasti masalah awal sebelum berlaku kerosakan serius.

"Bila ada sensor, kita boleh tahu mesin mula tak normal. Jadi boleh plan servis awal sebelum rosak teruk." (R2)

"R5 turut menambah bahawa pemantauan berterusan dapat mengurangkan gangguan operasi dan kerja pembaikan kecemasan."

4.3.2 Integrasi Teknologi Sensor dengan Sistem Pengurusan Bangunan (BMS)

Majoriti responden menyatakan bahawa teknologi sensor diintegrasikan dengan Sistem Pengurusan Bangunan (BMS) bagi membolehkan pemantauan dan kawalan dilakukan secara berpusat. Integrasi ini membantu pengurus fasiliti memantau prestasi sistem bangunan secara masa nyata.

R1 menyatakan bahawa integrasi dengan BMS memudahkan proses pemantauan tanpa perlu pemeriksaan manual yang kerap.

"Semua data boleh tengok dekat satu sistem. Tak perlu round bangunan hari-hari." (R1)

Walau bagaimanapun, beberapa responden menyatakan bahawa tahap integrasi bergantung kepada keserasian sistem dan vendor yang digunakan.

4.3.3 Penyelenggaraan Ramalan (Predictive Maintenance)

Sebahagian besar responden menyatakan bahawa data daripada sensor digunakan untuk menyokong penyelenggaraan ramalan. Melalui analisis data prestasi peralatan, kerja penyelenggaraan dapat dirancang berdasarkan keadaan sebenar peralatan dan bukan semata-mata jadual tetap.

R3 menjelaskan bahawa pendekatan ini membantu mengoptimumkan perancangan penyelenggaraan dan penggunaan sumber.

"Kita tak tunggu mesin rosak baru baiki. Bila data tunjuk trend tak normal, kita terus plan servis." (R3)

4.3.4 Pemantauan Penggunaan Tenaga

Responden turut menyatakan bahawa teknologi sensor digunakan untuk memantau penggunaan tenaga bangunan. Data penggunaan tenaga digunakan untuk mengenal pasti pembaziran dan meningkatkan kecekapan operasi sistem. R4 menyatakan bahawa pemantauan ini membantu pihak pengurusan mengawal kos operasi bangunan.

"Bila nampak penggunaan tenaga naik luar biasa, kita boleh siasat cepat dan ambil tindakan." (R4)

4.3.5 Penggunaan Aplikasi Mudah Alih dan IoT

Penggunaan aplikasi mudah alih dan platform IoT masih terhad dan bergantung kepada tahap kesiapsiagaan organisasi. Beberapa responden menyatakan bahawa aplikasi mudah alih memudahkan pemantauan jarak jauh, namun tidak semua bangunan mempunyai kemudahan tersebut. R3 menyatakan bahawa penggunaan aplikasi ini masih dalam fasa awal pelaksanaan.

"Aplikasi memang membantu, tapi belum semua sistem fully guna. Masih dalam peringkat adaptasi." (R3)

4.4. Keberkesanan Teknologi Sensor dalam Penyelenggaraan Bangunan Komersial

Bahagian ini membincangkan keberkesanan penggunaan teknologi sensor dalam penyelenggaraan bangunan komersial berdasarkan maklum balas yang diperoleh daripada responden kajian. Perbincangan ini memberi

tumpuan kepada bagaimana teknologi sensor menyumbang kepada peningkatan kualiti penyelenggaraan, pengurangan kos operasi serta pemanjangan jangka hayat bangunan.

4.4.1 Meningkatkan Penyelenggaraan

Majoriti responden bersetuju bahawa penggunaan teknologi sensor telah meningkatkan keberkesanan aktiviti penyelenggaraan bangunan. Pemantauan sistem secara berterusan membolehkan kerja penyelenggaraan dilakukan secara lebih terancang dan berasaskan keadaan sebenar peralatan, berbanding pendekatan reaktif tradisional. R2 menyatakan bahawa teknologi sensor membantu pasukan penyelenggaraan mengenal pasti masalah lebih awal dan merancang tindakan pembaikan dengan lebih sistematik.

“Dengan sensor, kita tahu sistem mana bermasalah lebih awal. Jadi kerja penyelenggaraan lebih teratur dan tak kelam-kabut.” (R2)

Pendekatan ini bukan sahaja meningkatkan kecekapan kerja penyelenggaraan, malah mengurangkan risiko gangguan operasi bangunan secara tiba-tiba.

4.4.2 Mengurangkan Kos

Sebahagian besar responden bersetuju bahawa penggunaan teknologi sensor menyumbang kepada pengurangan kos operasi dan penyelenggaraan bangunan. Walaupun pelaburan awal bagi pemasangan sistem sensor adalah tinggi, penjimatan kos dapat dicapai dalam jangka panjang melalui pengurangan kerja pembaikan kecemasan dan penggunaan sumber yang lebih efisien.

R1 menjelaskan bahawa kos penyelenggaraan dapat dikawal dengan lebih baik apabila kerosakan dapat dikesan lebih awal.

“Bila kerosakan boleh dikesan awal, kos tak jadi tinggi. Tak perlu tukar satu sistem terus.” (R1)

Selain itu, pengurangan kebergantungan kepada pemeriksaan manual juga membantu menjimatkan kos tenaga kerja dan masa operasi.

4.4.3 Memanjangkan Jangka Hayat Bangunan

Responden turut bersetuju bahawa teknologi sensor berupaya memanjangkan jangka hayat peralatan dan bangunan secara keseluruhan. Pemantauan prestasi peralatan secara berterusan membolehkan tindakan pembaikan dan penyelenggaraan dilakukan sebelum kerosakan serius berlaku.

R3 menyatakan bahawa sistem sensor membantu memastikan peralatan beroperasi dalam keadaan optimum.

“Bila sistem sentiasa dipantau, mesin tak bekerja secara berlebihan. Jadi jangka hayat dia pun lebih panjang.” (R3)

Dengan penyelenggaraan yang lebih sistematik dan berasaskan data, risiko kerosakan besar dapat dikurangkan dan prestasi bangunan dapat dikekalkan dalam tempoh yang lebih lama.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dapatan kajian, kajian ini turut mengenal pasti beberapa cabaran utama dalam pelaksanaan teknologi sensor dalam perkhidmatan bangunan. Antaranya ialah kos awalan pemasangan yang tinggi, kekurangan tenaga kerja mahir, kesukaran integrasi dengan sistem sedia ada serta isu penyelenggaraan dan kalibrasi sensor. Cabaran-cabaran ini memberi kesan kepada tahap penerimaan dan keberkesanan penggunaan teknologi tersebut, terutamanya bagi bangunan lama yang tidak direka untuk integrasi sistem pintar. Namun begitu, secara keseluruhannya responden bersetuju bahawa teknologi sensor berpotensi meningkatkan keberkesanan penyelenggaraan bangunan, mengurangkan kos operasi dalam jangka panjang serta memanjangkan jangka hayat peralatan dan bangunan sekiranya dilaksanakan dengan perancangan dan sokongan teknikal yang mencukupi.

Penghargaan

Penulis merakamkan penghargaan terima kasih kepada Fakulti Pengurusan Teknologi dan Perniagaan (FPTP), Universiti Tun Hussein Onn Malaysia dan individu yang terlibat dalam kajian ini sama ada secara langsung ataupun tidak langsung.

Konflik Kepentingan

Penulis mengumumkan bahawa tidak ada konflik kepentingan yang berkaitan dengan penerbitan makalah ini.

Sumbangan Penulis

Penulis mengesahkan sumbangan kepada kertas ini seperti berikut: **konsepsi dan reka bentuk kajian:** Muhammad Faris bin Abdullah; **pengumpulan data,** Muhammad Faris bin Abdullah; **analisis dan interpretasi hasil:**

Muhammad Faris bin Abdullah; **penyediaan draf manuskrip:** Aina Mardia Sallehuddin, Muhammad Faris bin Abdullah, Hilyati Sabtu @ Othman, Zailawati Khalid

Rujukan

- Abdullah, M. Z., & Omar, R. (2024). Pengoperasian Sistem Sensor Gerakan Terhadap Penjimatan Elektrik. Kajian Kes: Menara JLAND, Johor Bahru. *Research in Management of Technology and Business*, 5(1), 1594-1611.
- Ahmad, N., Mohamed, S., & Ismail, R. (2020). Readiness of Malaysian Construction Professionals Towards Industry 4.0. *Journal of Construction in Developing Countries*, 25(1), 1-19. <https://doi.org/10.21315/jcdc2020.25.1.1>
- Ahmad, R., Ramli, N. A., & Khalid, N. S. (2021). Challenges in implementing smart building technologies in Malaysia. *Journal of Building Engineering*, 39, 102263. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102263>
- Alahakoon, D., & Yu, X. (2016). Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 12(1), 425-436. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.241435>
- Al-Garadi, M. A., Mohamed, A., & Ali, I. (2020). A survey of mobile applications for smart building and smart grid management. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102390. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102390>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). *Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77-101.
- Bryman, A. (2012). *Social Research Methods* (4th ed.). Oxford University Press.
- Centre for Development of Smart and Green Building. (2024). *Internet of Things (IoT) dalam bangunan cerdas*. CEDSGREEB. <https://cedsgreeb.org/kompetisi-esai/iot-bangunan/>
- Centre for Development of Smart and Green Building. (2024). *IoT untuk Bangunan Cerdas dan Efisiensi Energi*. Retrieved from <https://cedsgreeb.org/kompetisi-esai/iot-bangunan/>
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). SAGE Publications.
- Etikan, I., Musa, S. A., & Alkassim, R. S. (2016). Comparison of convenience sampling and purposive sampling. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, 5(1), 1-4.
- Fernandez, N., Katipamula, S., Wang, W., Im, P., Ngo, H., Underhill, R. M., ... & Huang, Y. (2017). *Impacts of commercial building controls on energy savings and peak load reduction* (PNNL-25985). Pacific Northwest National Laboratory.
- Guest, G., Bunce, A., & Johnson, L. (2006). How many interviews are enough? An experiment with data saturation and variability. *Field Methods*, 18(1), 59-82.
- Gupta, E., Sofos, M., Langevin, J. T., Deru, M., Benne, K. S., Blum, D., ... & Widergren, S. (2020). *Innovations in sensors and controls for building energy management: Research and development opportunities report for emerging technologies* (No. NREL/TP-5500-75601). National Renewable Energy Lab. (NREL).
- Kamaruzzaman, S. N., Egbu, C., Zawawi, N. A. W. A., & Ali, A. S. (2018). An overview of building performance assessment in Malaysia. *Journal of Facilities Management*, 16(4), 395-412. <https://doi.org/10.1108/JFM-02-2018-0010>
- Khouluddin, W. M. I. W. M., Omar, R., Masrom, M. A. N., & Wee, S. T. (2023). Perkembangan Penggunaan Internet of Things (IoT) Dalam Industri Pembinaan Di Malaysia: Persepsi Pihak Kontraktor. *Research in Management of Technology and Business*, 4(2), 378-394.
- King, N., & Brooks, J. (2017). *Template Analysis for Business and Management Students*. SAGE Publications.
- Langevin, J., Harris, C. B., & Reyna, J. L. (2019). Assessing the potential to reduce US building CO₂ emissions 80% by 2050. *Joule*, 3(10), 2403-2424. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.07.013>
- Li, H., Ding, K., & Wang, H. (2019). Intelligent predictive maintenance for complex equipment based on big data. *Journal of Manufacturing Systems*, 51, 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.06.003>
- Lim, M. H., & Chong, W. L. (2021). Readiness of facility managers towards implementation of IoT in building maintenance. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 8(2), 37-45.
- Liu, T., Zhang, X., Li, H., & Wang, W. (2021). Cost-effectiveness analysis of smart sensor systems in commercial buildings: A lifecycle approach. *Energy and Buildings*, 251, 111312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>
- Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2016). *Qualitative Research: A Guide to Design and Implementation* (4th ed.). Jossey-Bass.
- Mohamad, N. N., & Omar, R. (2021). Cabaran Penggunaan Sistem Sensor di Bangunan Pejabat Komersial Hijau. *Research in Management of Technology and Business*, 2(1), 1140-1158.
- Nahar, N. H. M., & Bakar, A. S. A. (2025). 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. *Progress in Energy and Environment*, 31(2), 1-17.

- Palinkas, L. A., Horwitz, S. M., Green, C. A., Wisdom, J. P., Duan, N., & Hoagwood, K. (2015). Purposeful sampling for qualitative data collection and analysis in mixed method implementation research. *Administration and Policy in Mental Health and Mental Health Services Research*, 42(5), 533-544.
- Rezaee, S., Yousefi, H., & Khonsari, A. (2014). Performance evaluation of wireless sensor networks in smart grid. *Computer Communications*, 36(4), 336-345.
- Rosli, A., Omar, R., Sarpin, N., & Shafii, H. (2021). Keberkesanan Penggunaan Sistem Kawalan Destinasi Lif di dalam Bangunan Komersial. *Research in Management of Technology and Business*, 2(2), 599-613.
- Saldaña, J. (2015). *The Coding Manual for Qualitative Researchers* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Sofos, M., Langevin, J. T., Deru, M., Gupta, E., Benne, K. S., Blum, D., ... & Widergren, S. (2020). *Innovations in sensors and controls for building energy management: Research and development opportunities report for emerging technologies* (No. NREL/TP-5500-75601; DOE/GO-102019-5234). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Tan, K. H., Chan, Y. S., & Low, M. C. (2021). Sensor-driven energy saving strategies in smart buildings. *Energy and Buildings*, 243, 110992.
- Tan, K. Y., Lim, Y. S., & Choo, W. T. (2021). Data-driven predictive maintenance strategy for smart buildings in Southeast Asia. *Journal of Building Engineering*, 43, 102541.
- Turner, D. W. (2010). Qualitative interview design: A practical guide for novice investigators. *The Qualitative Report*, 15(3), 754-760.
- Urban, B., Roth, K., & Singh, R. (2016). *Energy savings potential of emerging technologies in the U.S. residential and commercial buildings sectors*. Navigant Consulting, Inc.
- Wang, S., Yan, C., & Xiao, F. (2019). Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. *Energy and Buildings*, 203, 109424. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109424>
- Wong, J. K. W., Li, H., & Wang, S. W. (2018). Intelligent building research: A review. *Automation in Construction*, 17(1), 86-93.
- Xu, P., Haves, P., Kim, D., Piette, M. A., Hong, T., & Taylor, Z. T. (2020). *Innovations in sensors and controls for building energy management: Research and development opportunities report for emerging technologies* (No. NREL/TP- 5500-75601; DOE/GO-102019-5234). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO, United States.
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- Yusof, N. M., Ismail, K., & Abdullah, A. H. (2019). Integration of green building elements in smart building design: A Malaysian perspective. *Journal of Sustainable Development*, 12(2), 45-53.
- Zhou, B., Brown, M. A., & Li, Y. (2020). Smart buildings and energy efficiency: A review of policies, drivers, and barriers. *Energy Policy*, 138, 111219. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111219>