

Robot Humanoid Berintegrasi Suria sebagai Agen Interaktif untuk Sistem Pengetahuan Fotovolta Berasaskan Kecerdasan Buatan

A Solar-Integrated Humanoid Robot as an Interactive Agent for AI-Driven Photovoltaic Knowledge Systems

Muhammad Azri Che Mohd Shabri¹, Shafidah Shafian^{1*}

¹Solar Energy Research Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor, 43600, Malaysia

Email: azricms@outlook.com, norshafidah@ukm.edu.my

ABSTRACT

The rapid global expansion of photovoltaic technologies has increased the need for accessible and engaging platforms that can effectively communicate solar energy knowledge to diverse audiences. Although solar technologies and policies continue to evolve rapidly, much of the available information remains embedded within technical reports, regulatory documents, and scientific publications that are often difficult for the general public and non-specialist users to interpret. This study presents the conceptual design and development of a solar-integrated humanoid robotic agent intended to function as an interactive interface for an AI-driven photovoltaic knowledge system. The humanoid robot visually integrates photovoltaic panels within its body structure, enabling users to immediately associate the character with solar energy while establishing a distinctive visual identity for renewable energy communication. The development process follows a structured digital design pipeline consisting of two-dimensional (2D) conceptual sketching, three-dimensional (3D) humanoid modelling, and gesture-based animation development. Unlike conventional digital assistants that rely primarily on textual interfaces, the proposed robot provides a recognizable visual identity for solar knowledge communication. The character functions as the interactive front-end of a solar knowledge assistant powered by a large language model (LLM) integrated with a retrieval-augmented generation (RAG) knowledge base containing information on photovoltaic technologies, solar system components, renewable energy policies, and sustainability practices. Through this integration, the humanoid assistant can explain solar concepts, interpret photovoltaic technologies, and guide users in understanding solar policy and energy adoption within digital environments such as chatbots, educational platforms, and virtual exhibitions. Overall, this work demonstrates how a solar-themed humanoid robotic agent can serve as an intuitive and engaging interface for AI-driven solar knowledge systems, supporting broader public understanding of photovoltaic technologies and sustainability initiatives.

Keywords: *Solar-Integrated Humanoid Robot; AI Virtual Assistant; Photovoltaic Knowledge System; Interactive Digital Media; Renewable Energy Education*

ABSTRAK

Perkembangan pesat penggunaan teknologi fotovolta di peringkat global telah meningkatkan keperluan terhadap platform yang lebih mudah diakses dan menarik bagi menyampaikan pengetahuan berkaitan tenaga suria kepada lapisan masyarakat. Walau bagaimanapun, kebanyakan maklumat berkaitan pendidikan dan dasar tenaga suria masih disampaikan dalam bentuk dokumen teknikal yang sukar difahami oleh golongan bukan pakar. Sehubungan itu, kajian ini membentangkan reka bentuk konseptual serta pembangunan sebuah agen robot humanoid berintegrasi suria yang bertujuan berfungsi sebagai antara muka interaktif bagi sistem pengetahuan fotovolta yang dipacu oleh kecerdasan buatan (AI). Robot humanoid ini mengintegrasikan panel fotovolta secara visual pada struktur badannya, membolehkan pengguna mengaitkan karakter tersebut dengan tenaga suria serta-merta, di samping mewujudkan identiti visual yang tersendiri bagi komunikasi tenaga boleh baharu. Proses pembangunan robot ini merangkumi beberapa peringkat utama, iaitu penghasilan lakaran konseptual dua dimensi (2D), pemodelan humanoid tiga dimensi (3D), serta pembangunan animasi berasaskan pergerakan dan isyarat. Berbeza dengan pembantu digital konvensional yang berkomunikasi melalui teks, robot yang dicadangkan menampilkan identiti visual yang mudah dikenali bagi menyampaikan pengetahuan berkaitan tenaga boleh baharu. Karakter ini berfungsi sebagai agen interaktif yang dikuasakan oleh model bahasa berskala besar (LLM) dan digabungkan dengan pangkalan pengetahuan berasaskan Retrieval-Augmented Generation (RAG) yang mengandungi maklumat berkaitan teknologi fotovolta, komponen sistem suria, dasar tenaga boleh baharu dan isu kelestarian yang lebih luas. Melalui integrasi ini, robot humanoid tersebut mampu menerangkan konsep tenaga suria, membantu pengguna memahami maklumat berkaitan teknologi dan dasar tenaga suria, serta menyokong penyampaian pendidikan tenaga suria secara interaktif melalui pelbagai platform digital seperti chatbot, persekitaran maya dan pameran interaktif. Secara keseluruhannya, kajian ini menunjukkan bahawa agen robot humanoid bertemakan tenaga suria berpotensi berfungsi sebagai antara muka yang intuitif dan menarik bagi sistem pengetahuan tenaga suria yang dipacu oleh kecerdasan buatan (AI), sekali gus menyokong pemahaman masyarakat yang lebih luas terhadap teknologi fotovolta dan inisiatif kelestarian.

Kata Kunci: Robot Humanoid Berintegrasi Surya; Pembantu Maya Berasaskan Kecerdasan Buatan; Sistem Pengetahuan Fotovolta; Media Digital Interaktif; Pendidikan Tenaga Boleh Baharu

PENGENALAN

Peralihan global ke arah sistem tenaga yang lebih lestari telah mempercepatkan penggunaan teknologi fotovolta dalam pelbagai sektor termasuk kediaman, komersial dan utiliti (Chua & Oh, 2012; Shafian, 2025a, 2025b, 2025c). Tenaga suria kini menjadi antara sumber tenaga boleh baharu yang paling pesat berkembang berikutan penurunan kos pemasangan, peningkatan kecekapan teknologi serta sokongan dasar kerajaan melalui pelbagai polisi dan insentif kepada pengguna (Koerner et al., 2022; Lau et al., 2022). Seiring dengan peningkatan penggunaan tenaga suria di seluruh dunia, kefahaman masyarakat terhadap teknologi fotovolta, komponen sistem suria serta dasar tenaga berkaitan menjadi semakin penting (Lam et al., 2025). Walau bagaimanapun, kebanyakan maklumat berkaitan sistem tenaga suria, prosedur pemasangan, integrasi grid dan kerangka peraturan lazimnya disampaikan melalui laporan teknikal, dokumen dasar dan penerbitan saintifik yang sukar difahami oleh pengguna bukan dalam bidang tersebut.

Keadaan ini menjadikan penyampaian maklumat berkaitan tenaga suria secara berkesan sebagai satu cabaran penting dalam usaha menggalakkan penggunaan tenaga boleh baharu. Pelbagai inisiatif pendidikan, program kesedaran dan platform pembelajaran digital telah diperkenalkan bagi merapatkan jurang antara pengetahuan teknikal tenaga suria dan kefahaman masyarakat umum. Pendekatan ini bertujuan menjadikan maklumat berkaitan tenaga suria lebih mudah diakses serta difahami oleh pelbagai kumpulan pengguna termasuk pelajar, penyelidik dan masyarakat awam. Walau bagaimanapun, kebanyakan platform pengetahuan tenaga suria yang sedia ada masih bergantung kepada kaedah penyampaian maklumat konvensional seperti laman web, dokumen statik atau pangkalan data maklumat yang kurang menawarkan interaksi secara langsung dengan pengguna. Perkembangan teknologi komunikasi digital telah membuka peluang baharu dalam pembangunan sistem pembelajaran yang lebih interaktif dan mesra pengguna. Dalam konteks ini, kecerdasan buatan

(AI) memainkan peranan penting dalam meningkatkan keberkesanan penyebaran pengetahuan. Model bahasa besar (Large Language Model, LLM) berupaya mentafsir pertanyaan pengguna dan menghasilkan penerangan dalam bahasa semula jadi yang lebih mudah difahami (Varshney, 2023; Wang et al., 2025). Keupayaan ini membolehkan sistem berasaskan AI menerangkan topik teknikal yang kompleks kepada pengguna dengan lebih jelas dan teratur. Apabila digabungkan dengan rangka kerja Retrieval-Augmented Generation (RAG), sistem ini dapat mengakses pangkalan pengetahuan khusus untuk menghasilkan respons yang lebih tepat dan kontekstual (Klesel & Wittmann, 2025; Şakar & Emekci, 2025; Zhang et al., 2025). Pendekatan ini amat sesuai digunakan dalam domain pengetahuan yang khusus seperti teknologi fotovoltan dan dasar tenaga boleh baharu.

Walaupun sistem pengetahuan berasaskan AI semakin berkembang, kebanyakan platform maklumat tenaga suria masih menggunakan antara muka teks seperti chatbot atau portal web konvensional. Walaupun pendekatan ini berkesan dalam penyampaian maklumat, ia sering tidak mempunyai identiti visual yang jelas bagi menggambarkan domain pengetahuan sistem tersebut. Dalam konteks pendidikan tenaga boleh baharu, representasi visual memainkan peranan penting dalam meningkatkan kefahaman serta keterlibatan pengguna. Kehadiran agen visual yang mudah dikenali dapat berfungsi sebagai antara muka intuitif antara pengguna dan sistem pengetahuan yang kompleks, sekali gus membantu membimbing interaksi pengguna sambil mengekalkan fokus terhadap tema maklumat yang disampaikan.

Sehubungan itu, penggunaan pembantu maya berbentuk humanoid semakin diterokai sebagai agen interaktif dalam sistem pendidikan, pameran digital dan persekitaran pembelajaran maya. Berbanding antara muka teks semata-mata, agen humanoid menawarkan pengalaman interaksi yang lebih menarik dengan menggabungkan kecerdasan perbualan, representasi visual serta komunikasi berasaskan gerak isyarat. Bentuk humanoid membolehkan pengguna mentafsir pergerakan tangan, postur badan dan ekspresi sebagai isyarat komunikasi, sekali gus menjadikan interaksi antara manusia dan sistem digital lebih semula jadi dan intuitif. Dalam persekitaran digital, karakter humanoid boleh berfungsi sebagai perantara yang berkesan dalam membantu pengguna memahami maklumat teknologi yang kompleks.

Walau bagaimanapun, kebanyakan pembantu maya humanoid yang sedia ada direka sebagai karakter umum tanpa identiti teknologi yang jelas berkaitan dengan bidang pengetahuan tertentu. Dalam komunikasi tenaga boleh baharu, simbol visual lazimnya hanya dipaparkan dalam bentuk latar belakang grafik atau ikon tertentu dan tidak disepadukan secara langsung dalam struktur reka bentuk karakter digital. Keadaan ini menyebabkan pengguna mungkin tidak dapat mengenal pasti secara serta-merta bahawa pembantu maya tersebut adalah berkaitan dengan teknologi tertentu seperti tenaga suria. Penyepaduan identiti domain secara langsung dalam reka bentuk agen humanoid berpotensi meningkatkan pengenalan tema serta memperjelaskan penyampaian maklumat kepada pengguna.

Berdasarkan keperluan tersebut, kajian ini mencadangkan pembangunan robot humanoid berintegrasi suria yang berfungsi sebagai antara muka interaktif bagi sistem pengetahuan fotovoltan berasaskan AI. Robot ini direka dengan mengintegrasikan panel fotovoltan secara langsung dalam struktur badan bagi mewujudkan identiti visual yang jelas berkaitan teknologi tenaga suria. Integrasi ini membolehkan pengguna mengenal pasti kaitan robot dengan tenaga suria secara serta-merta apabila melihatnya. Pada masa yang sama, reka bentuk tersebut melambangkan konsep tenaga suria dan teknologi tenaga lestari. Robot yang dicadangkan dibangunkan terutamanya untuk persekitaran digital sebagai pembantu maya yang digabungkan kepada sistem pengetahuan berasaskan AI menggunakan model LLM dan rangka kerja RAG. Pangkalan pengetahuan sistem ini merangkumi maklumat berkaitan teknologi fotovoltan, komponen sistem suria, dasar tenaga boleh baharu serta isu kelestarian. Melalui interaksi perbualan, robot ini berupaya membantu pengguna memahami konsep tenaga suria, mentafsir teknologi fotovoltan serta mendapatkan maklumat berkaitan dasar dan inisiatif tenaga suria.

Berbeza dengan banyak sistem robotik yang menumpukan kepada pembangunan perkakasan fizikal, robot dalam kajian ini dibangunkan sebagai karakter humanoid digital yang boleh digunakan dalam pelbagai platform seperti antara muka chatbot, aplikasi pendidikan, pameran digital serta persekitaran pembelajaran imersif. Pendekatan ini membolehkan sistem dilaksanakan dengan lebih fleksibel tanpa memerlukan pembangunan perkakasan yang kompleks. Walau bagaimanapun, reka bentuk struktur robot ini masih mengekalkan potensi untuk diadaptasi kepada robot fizikal pada masa hadapan sekiranya pembangunan perkakasan menjadi lebih praktikal.

Oleh itu, kajian ini bertujuan meneroka bagaimana identiti tenaga suria dapat disepadukan dalam reka bentuk agen robot humanoid bagi menyokong komunikasi pengetahuan fotovoltan berasaskan AI. Kajian ini memperkenalkan proses pembangunan yang merangkumi lakaran konseptual dua dimensi

(2D), pemodelan humanoid tiga dimensi (3D) serta pembangunan animasi berasaskan gerak isyarat. Melalui integrasi simbolisme tenaga boleh baharu dan sistem pengetahuan berasaskan AI, pendekatan ini menunjukkan potensi penggunaan pembantu humanoid sebagai antara muka intuitif dalam penyampaian maklumat tenaga suria. Secara keseluruhannya, kajian ini menyumbang kepada penyelidikan yang menggabungkan pendidikan tenaga boleh baharu, komunikasi AI dan media digital interaktif.

PENYATAAN MASALAH

Perkembangan pesat teknologi fotovoltla telah meningkatkan penggunaan sistem tenaga suria dalam sektor kediaman, komersial dan utiliti. Seiring dengan perkembangan ini, pelbagai maklumat berkaitan teknologi PV, pemasangan sistem suria, dasar tenaga boleh baharu serta strategi kelestarian telah dihasilkan oleh kerajaan, institusi penyelidikan dan pihak industri. Walau bagaimanapun, penyampaian maklumat berkaitan tenaga suria kepada masyarakat umum masih menjadi salah satu cabaran utama. Kebanyakan maklumat disampaikan dalam bentuk laporan teknikal, dokumen dasar dan penerbitan saintifik yang sukar difahami oleh pengguna bukan dalam bidang. Keadaan ini menyukarkan masyarakat, termasuk bakal pengguna sistem suria, pelajar dan orang awam, untuk memahami konsep asas teknologi fotovoltla serta dasar tenaga boleh baharu.

Selain itu, kebanyakan platform pengetahuan suria yang sedia ada masih menggunakan kaedah penyampaian maklumat konvensional seperti laman web atau dokumen statik. Walaupun sumber ini mengandungi maklumat penting, ia sering kurang menyediakan elemen interaktif yang dapat membantu pengguna memahami konsep teknologi suria dengan lebih jelas. Ketiadaan antara muka komunikasi yang intuitif dan menarik boleh menjejaskan tahap penglibatan pengguna serta mengehadkan keberkesanan usaha pendidikan berkaitan tenaga suria.

Kemajuan dalam AI, khususnya LLM, membuka peluang baharu dalam pembangunan sistem pengetahuan yang mampu menerangkan maklumat teknikal dalam bahasa yang lebih mudah difahami. Apabila digabungkan dengan rangka kerja RAG, sistem ini dapat mengakses pangkalan pengetahuan khusus untuk menghasilkan respons yang lebih tepat dan relevan. Namun demikian, kebanyakan sistem pengetahuan berasaskan AI masih menggunakan antara muka teks seperti chatbot tanpa identiti visual yang jelas, sekali gus menyukarkan pengguna mengaitkan sistem tersebut dengan domain teknologi tertentu.

Oleh itu, terdapat keperluan untuk membangunkan pendekatan komunikasi pengetahuan yang lebih interaktif dengan menggabungkan AI dan agen visual yang mewakili teknologi tenaga suria. Sehubungan itu, kajian ini mencadangkan pembangunan robot humanoid berintegrasi suria sebagai antara muka interaktif bagi sistem pengetahuan fotovoltla berasaskan AI. Robot ini direka sebagai karakter humanoid digital yang dapat menyokong sistem pengetahuan berasaskan LLM dan RAG, sekali gus meningkatkan kefahaman, keterlibatan pengguna dan kejelasan komunikasi berkaitan teknologi tenaga suria.

KAJIAN LITERATUR

Komunikasi Pengetahuan Tenaga Suria

Peralihan global ke arah penggunaan tenaga boleh baharu telah meningkatkan keperluan terhadap penyampaian maklumat berkaitan teknologi dan dasar tenaga suria secara berkesan. Sistem fotovoltla kini menjadi antara teknologi tenaga yang paling meluas digunakan berikutan menyokong teknologi hijau, peningkatan kecekapan teknologi, serta sokongan dasar kerajaan di banyak negara. Seiring dengan perkembangan ini, kefahaman masyarakat terhadap teknologi fotovoltla, komponen sistem suria dan kerangka peraturan tenaga menjadi semakin penting bagi menyokong proses membuat keputusan yang lebih tepat serta memperluas penggunaan tenaga boleh baharu.

Walaupun bagaimanapun, maklumat berkaitan tenaga suria kebiasaannya disampaikan melalui sumber yang bersifat teknikal seperti laporan kejuruteraan, dokumen dasar dan penerbitan saintifik. Walaupun sumber ini menyediakan maklumat yang terperinci, kandungannya sering sukar difahami oleh masyarakat umum. Oleh itu, kajian dalam bidang pendidikan tenaga boleh baharu menekankan kepentingan strategi komunikasi yang lebih mudah diakses bagi menterjemahkan maklumat teknikal kepada bentuk yang lebih mudah difahami oleh pengguna bukan pakar.

Pelbagai pendekatan seperti visualisasi interaktif, platform pembelajaran multimedia dan sumber pendidikan digital telah digunakan untuk meningkatkan pemahaman terhadap teknologi tenaga boleh baharu. Walau bagaimanapun, kebanyakan platform maklumat suria masih bergantung kepada dokumen statik atau laman web konvensional yang menawarkan tahap interaksi yang terhad.

AI dan Sistem Pengetahuan Berasaskan LLM

Kemajuan dalam AI telah membuka peluang baharu dalam penyampaian pengetahuan melalui sistem perbualan pintar. LLM berupaya mentafsir pertanyaan pengguna dan menjana penerangan dalam bahasa semula jadi. Dalam konteks pendidikan, sistem ini boleh membantu menjelaskan konsep teknikal secara lebih mudah difahami. Walau bagaimanapun, ketepatan maklumat yang dijana oleh LLM sering menjadi cabaran, khususnya bagi bidang pengetahuan yang khusus (Farquhar et al., 2024; Huang et al., 2025; Martino et al., 2023). Bagi mengatasi isu ini, rangka kerja RAG diperkenalkan bagi menghubungkan model bahasa dengan pangkalan pengetahuan yang teratur. Melalui pendekatan ini, maklumat yang relevan diperoleh daripada pangkalan pengetahuan sebelum respons dijana, sekali gus menghasilkan jawapan yang lebih tepat, relevan dan berasaskan sumber rujukan yang sahih.

Dalam konteks tenaga boleh baharu, sistem pengetahuan berasaskan LLM dan RAG berpotensi membantu menyampaikan maklumat berkaitan teknologi fotovolta, dasar tenaga suria serta konsep kelestarian secara lebih interaktif. Namun begitu, kebanyakan sistem tersebut masih bergantung pada antara muka berasaskan teks, seperti chatbot, yang kurang menyokong penyampaian identiti visual dan konteks bidang pengetahuan yang diwakilinya.

Robot Humanoid dan Agen Maya dalam Pendidikan

Robot humanoid dan agen maya semakin digunakan dalam sistem pendidikan bagi meningkatkan interaksi dan penglibatan pengguna. Kajian dalam bidang interaksi manusia-robot menunjukkan bahawa agen yang mempunyai representasi visual atau bentuk humanoid dapat meningkatkan kefahaman pengguna serta menjadikan komunikasi lebih intuitif.

Dalam persekitaran pendidikan, robot humanoid telah digunakan sebagai pembantu pengajaran, pemandu interaktif dan medium penyampaian maklumat di muzium atau platform pembelajaran digital. Agen humanoid maya juga digunakan dalam persekitaran realiti maya, sistem pembelajaran dalam talian serta aplikasi pameran interaktif.

Walaupun penggunaan agen humanoid semakin meluas, kebanyakan reka bentuk pembantu maya masih bersifat generik tanpa identiti visual yang jelas berkaitan dengan bidang pengetahuan tertentu. Keadaan ini menyebabkan hubungan antara karakter digital dan tema pengetahuan yang disampaikan kurang jelas kepada pengguna.

Integrasi Identiti Teknologi dalam Agen Maya

Identiti visual memainkan peranan penting dalam membentuk persepsi pengguna terhadap fungsi sesuatu sistem interaktif. Dalam reka bentuk digital, integrasi simbol visual dan elemen struktur tertentu boleh membantu menyampaikan maksud teknologi serta memperkukuhkan naratif sesuatu karakter digital.

Dalam konteks komunikasi tenaga boleh baharu, penyepaduan elemen fotovolta dalam reka bentuk agen maya dapat mewujudkan hubungan visual yang jelas antara karakter digital dan teknologi tenaga suria. Pendekatan ini membolehkan agen maya berfungsi bukan sahaja sebagai antara muka komunikasi, tetapi juga sebagai simbol visual bagi teknologi tenaga boleh baharu.

Jurang Penyelidikan

Berdasarkan kajian literatur, beberapa jurang penyelidikan dapat dikenal pasti. Pertama, walaupun platform digital telah digunakan dalam pendidikan tenaga suria, pendekatan komunikasi yang lebih interaktif dan intuitif masih diperlukan bagi menjelaskan teknologi fotovolta dan dasar tenaga kepada masyarakat. Kedua, sistem pengetahuan berasaskan LLM kebanyakannya tidak mempunyai representasi visual yang dapat memperkukuhkan identiti domain pengetahuan. Ketiga, integrasi simbolisme tenaga boleh baharu dalam reka bentuk agen humanoid masih kurang diberi perhatian dalam penyelidikan sedia ada.

Sehubungan itu, kajian ini mencadangkan pembangunan robot humanoid berintegrasi suria yang berfungsi sebagai aset interaktif bagi sistem pengetahuan fotovolta berasaskan AI. Gabungan identiti visual tenaga suria dan sistem pengetahuan berasaskan LLM dan RAG berpotensi meningkatkan

kejelasan komunikasi, keterlibatan pengguna serta keberkesanan penyampaian maklumat berkaitan teknologi tenaga suria dalam persekitaran digital.

METODOLOGI

Kajian ini menggunakan pendekatan pembangunan reka bentuk digital bagi menghasilkan robot humanoid berintegrasi suria yang berfungsi sebagai agen pembantu dalam sistem pengetahuan fotovoltan berasaskan AI. Proses pembangunan robot dilaksanakan melalui tiga peringkat utama iaitu pembangunan lakaran konseptual 2D, pemodelan robot humanoid 3D, dan pembangunan animasi berasaskan gerak isyarat. Pendekatan ini membolehkan identiti visual, struktur reka bentuk serta tingkah laku interaktif robot dibangunkan secara sistematik sebelum digunakan sebagai antara muka visual bagi sistem pengetahuan suria berasaskan AI.

Pada peringkat pertama, lakaran konseptual 2D dibangunkan di dalam perisian Clip Studio Paint untuk menentukan struktur asas robot termasuk kepala, tubuh badan, tangan dan kaki. Panel fotovoltan turut diintegrasikan pada bahagian bahu, lengan dan belakang badan robot bagi menonjolkan identiti tenaga suria. Lakaran ini disediakan dalam pandangan ortografik hadapan, sisi dan belakang bagi memastikan perkadaran dan susun atur komponen robot dapat ditentukan dengan jelas.

Seterusnya, model robot humanoid dibangunkan dalam bentuk 3D dalam perisian Blender berdasarkan rujukan lakaran 2D yang telah dihasilkan. Pemodelan ini bertujuan menghasilkan model digital yang lengkap serta mengekalkan identiti suria melalui integrasi panel fotovoltan pada struktur robot.

Akhir sekali, animasi berasaskan gerak isyarat dibangunkan bagi membolehkan robot berfungsi sebagai agen interaktif. Animasi ini merangkumi tingkah laku asas seperti keadaan rehat, gerakan perbualan, gerak isyarat penerangan serta pose reflektif seperti berfikir dan melihat sekeliling. Animasi ini membolehkan robot menyampaikan maklumat secara visual serta menyokong interaksi pengguna dalam persekitaran digital.

Robot humanoid yang dibangunkan seterusnya diintegrasikan dengan sistem pengetahuan suria berasaskan AI yang menggunakan LLM bersama rangka kerja RAG. Pangkalan pengetahuan yang digunakan merangkumi maklumat berkaitan teknologi fotovoltan, komponen sistem suria, dasar tenaga boleh baharu serta amalan kelestarian. Dalam seni bina sistem ini, robot humanoid berperanan sebagai antara muka visual kepada agen pembantu, manakala rangka kerja LLM–RAG memproses pertanyaan pengguna dan menjana respons berdasarkan maklumat suria yang diperoleh daripada pangkalan pengetahuan.

DAPATAN DAN PERBINCANGAN

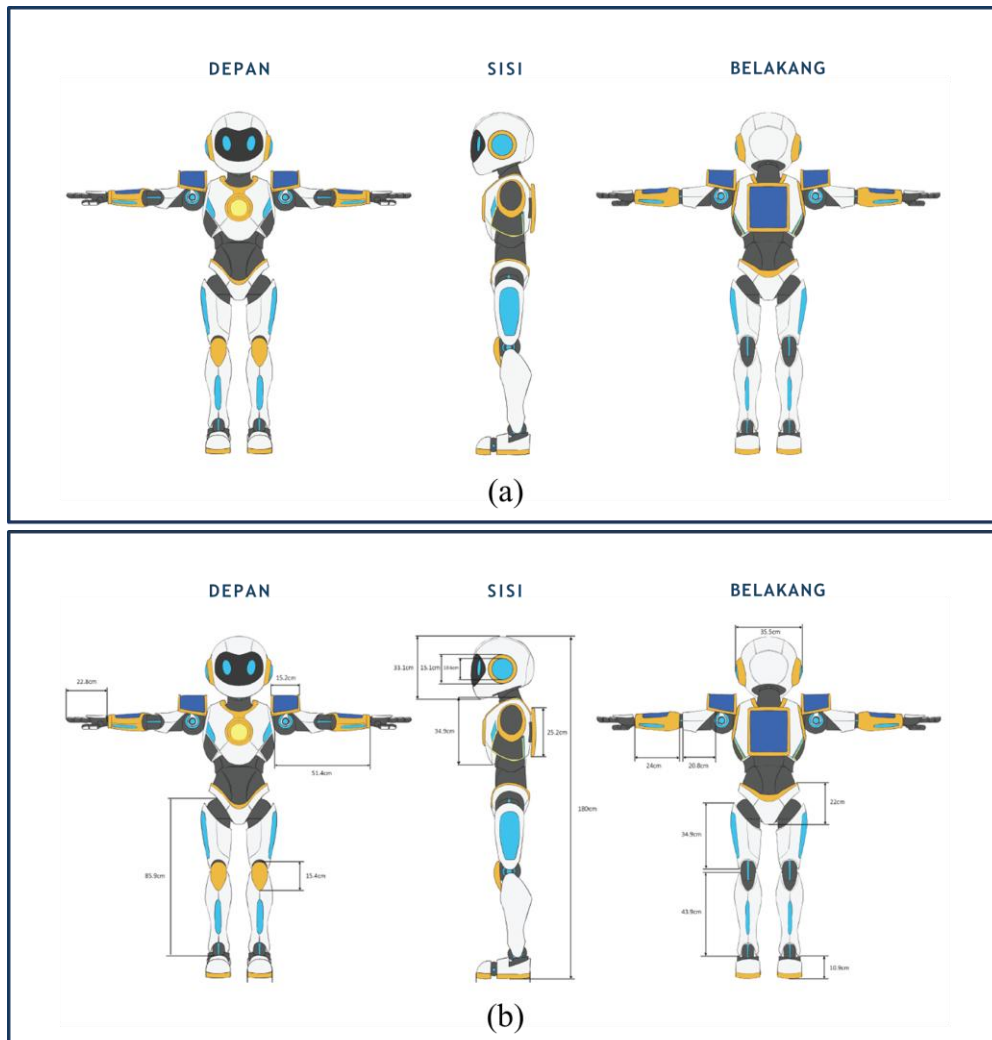
Reka Bentuk Konseptual dan Pembangunan Lakaran 2D

Objektif utama peringkat ini adalah untuk membentuk identiti visual robot dan memastikan elemen tenaga suria disepadukan secara jelas dalam seni bina karakter tersebut. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1, robot ini direka bentuk dengan struktur humanoid yang terdiri daripada kepala, tubuh badan, tangan dan kaki bagi menyokong komunikasi berasaskan gerak badan dan interaksi visual dalam persekitaran digital.

Panel fotovoltan diletakkan pada bahagian bahu, lengan dan belakang badan robot bagi mewujudkan identiti visual yang jelas sebagai robot berintegrasi suria. Susun atur ini turut meningkatkan kawasan pendedahan kepada cahaya matahari daripada pelbagai arah. Sebagai contoh, panel pada bahagian bahu dan lengan lebih terdedah kepada cahaya ketika robot berada dalam posisi berdiri, manakala panel pada bahagian belakang berpotensi menerima pendedahan cahaya apabila robot berada dalam posisi meniarap atau orientasi lain, seperti semasa simulasi pergerakan terbang. Pendekatan reka bentuk ini bertujuan memastikan pengguna dapat mengenal pasti hubungan robot dengan teknologi suria secara serta-merta apabila pertama kali melihatnya. Berbeza dengan pembantu humanoid generik yang biasanya mempunyai rupa neutral, kehadiran panel suria yang jelas pada robot ini mewujudkan identiti teknologi yang tersendiri serta mencerminkan peranannya sebagai pembantu pengetahuan berkaitan tenaga suria.

Pandangan ortografik yang ditunjukkan dalam lakaran 2D menunjukkan reka bentuk robot daripada perspektif hadapan, sisi dan belakang (Rajah 1a). Selain itu, lukisan teknikal yang disertakan turut memaparkan ukuran struktur robot secara terperinci (Rajah 1b) bagi memastikan ketepatan perkadaran dan kedudukan komponen semasa pembangunan model 3D.

Antara elemen penting dalam reka bentuk ini ialah muka wajah yang minimal terdiri daripada elemen mata berlampu. Pendekatan ini dipilih bagi mengekalkan penampilan robot yang ringkas, futuristik dan mesra pengguna. Pada masa yang sama, ekspresi komunikasi robot lebih bergantung kepada pergerakan badan dan gerak isyarat tangan berbanding animasi wajah yang kompleks.



Rajah 1: Reka Bentuk Konseptual Robot Humanoid Berintegrasi Surya dalam Bentuk Lakaran 2D. (a) Pandangan Ortografik Robot daripada Perspektif Hadapan, Sisi dan Belakang yang Menunjukkan Susun Atur Struktur Badan serta Kedudukan Panel Fotovolta pada Bahagian Bahu, Lengan dan Belakang Badan. (b) Lukisan Teknikal yang Memperlihatkan Ukuran Robot bagi Menyokong Proses Pembangunan Model 3D.

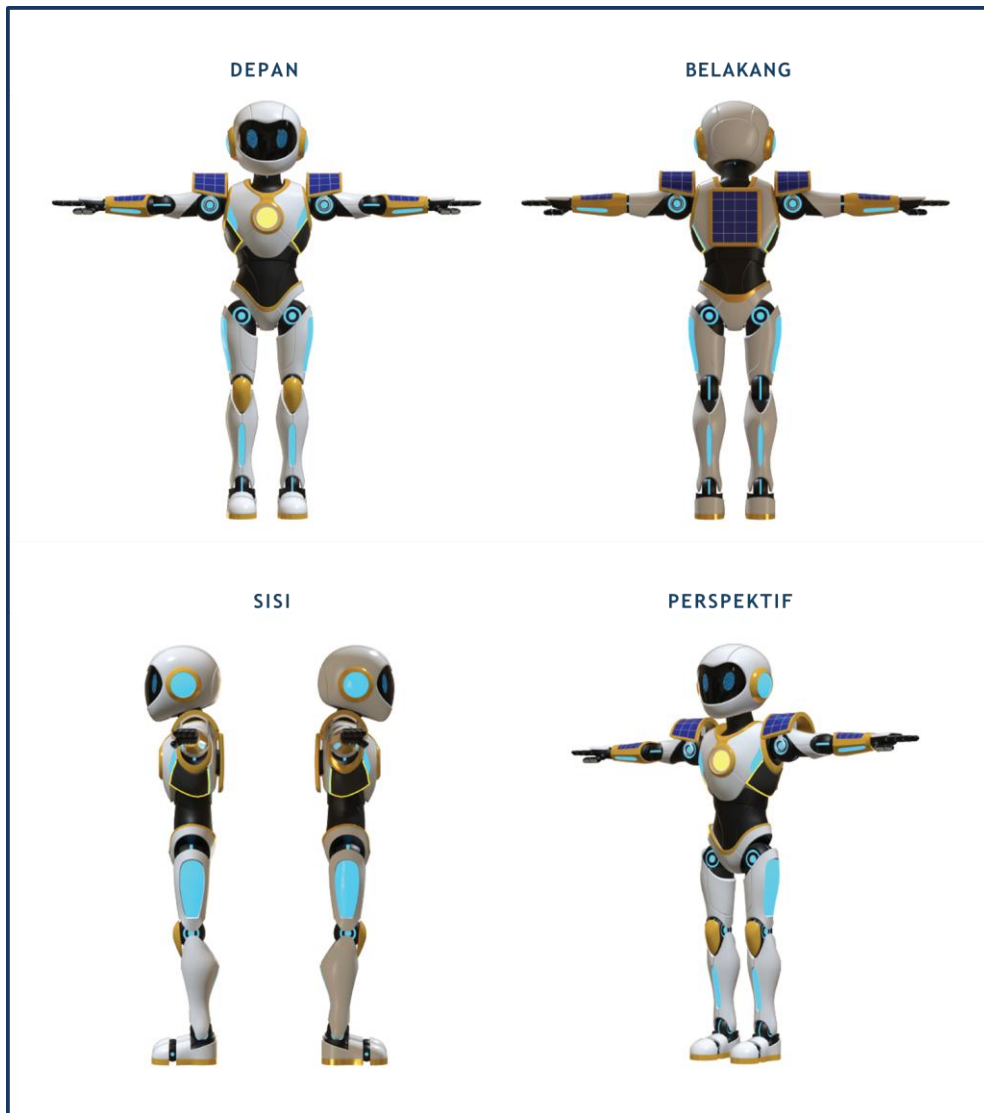
Pembangunan Model Robot Humanoid 3D

Selepas peringkat reka bentuk konseptual selesai, lukisan 2D diterjemahkan kepada model digital 3D bagi menilai kebolehlaksanaan reka bentuk dalam persekitaran volumetrik. Peringkat pemodelan 3D memberi tumpuan kepada proses menukarkan pelan ortografik kepada karakter humanoid digital yang lengkap sambil mengekalkan perkadaran dan identiti suria yang telah ditetapkan dalam lakaran awal.

Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2, model yang terhasil mengekalkan struktur badan humanoid yang jelas dengan komponen kepala, tubuh badan, tangan dan kaki yang terperinci. Panel fotovolta kekal ditempatkan secara dominan pada struktur bahu, lengan dan belakang badan bagi memastikan identiti suria robot dapat dikenal pasti dengan jelas dari pelbagai sudut pandangan. Paparan perspektif juga menunjukkan kedalaman spatial dan keseragaman struktur model yang dihasilkan.

Dari sudut reka bentuk interaksi, konfigurasi humanoid juga memberikan fleksibiliti yang lebih tinggi untuk komunikasi berasaskan gerak isyarat berbanding bentuk robot statik. Kehadiran lengan berartikulasi dan struktur badan membolehkan robot melakukan pelbagai gerakan komunikasi yang

boleh membantu pengguna memahami teknologi fotovolta dan dasar tenaga suria dalam persekitaran interaktif berasaskan AI. Oleh itu, peringkat pemodelan 3D ini mengesahkan bahawa identiti suria yang dibentuk dalam reka bentuk konseptual dapat dipelihara dengan baik dalam persekitaran digital 3D.



Rajah 2: Model 3D Robot Humanoid Berintegrasi Surya dari Pandangan Hadapan, Sisi, Belakang dan Perspektif. Panel Fotovolta yang Dipasang pada Bahu, Lengan dan Belakang Menonjolkan Identiti Tenaga Surya Robot.

Animasi Berasaskan Gerak Isyarat dan Tingkah Laku Interaktif

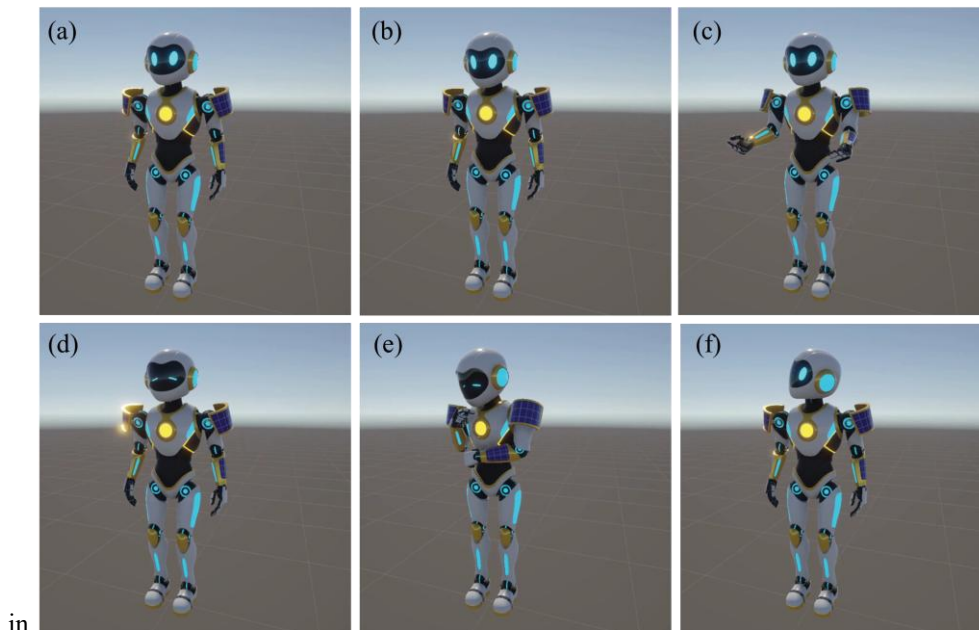
Peringkat terakhir dalam proses pembangunan melibatkan penciptaan animasi berasaskan gerak isyarat yang membolehkan robot humanoid berfungsi sebagai pembantu digital interaktif. Beberapa jenis animasi telah dibangunkan bagi mensimulasikan tingkah laku interaksi yang lazim berlaku semasa pengguna berinteraksi dengan sistem pengetahuan suria berasaskan AI. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3, animasi tersebut merangkumi pelbagai keadaan dan pergerakan robot, termasuk keadaan rehat, bercakap, pergerakan tangan semasa memberikan penerangan, serta pose reflektif seperti berkelip, berfikir dan melihat ke sekeliling.

Animasi ini menunjukkan bagaimana robot dapat melaksanakan gerakan yang menyerupai corak komunikasi manusia secara semula jadi. Sebagai contoh, gerakan tangan semasa penerangan boleh digunakan untuk menggambarkan konsep teknologi fotovolta kepada pengguna, manakala gerakan menunjuk sesuatu berfungsi untuk mengarahkan perhatian pengguna kepada elemen tertentu dalam antara muka digital. Selain itu, animasi keadaan rehat seperti kedipan mata dan pergerakan kepala

yang ringan membantu mengekalkan kehadiran visual robot walaupun ia tidak sedang berinteraksi secara aktif.

Walaupun antara muka wajah robot hanya terdiri daripada elemen mata berlampu, robot masih dapat menyampaikan pelbagai bentuk komunikasi visual melalui struktur lengan, kaki dan postur badan humanoid. Pendekatan reka bentuk ini membolehkan robot mengekalkan penampilan yang ringkas dan jelas dari segi visual, namun masih mampu menyampaikan tingkah laku interaksi yang kaya dan bermakna melalui gerak badan dan gerak isyarat tangan.

Melalui pembangunan animasi ini, robot tidak lagi sekadar model digital yang statik, sebaliknya berfungsi sebagai agen interaktif yang dapat membantu pengguna menavigasi sistem pengetahuan suria berasaskan AI seperti model bahasa besar LLM dan rangka kerja RAG. Oleh itu, tingkah laku berasaskan gerak isyarat memainkan peranan penting dalam meningkatkan tahap keterlibatan pengguna serta menjadikan interaksi manusia-AI lebih intuitif.



Rajah 3: Contoh Animasi yang Menunjukkan Tingkah Laku Komunikasi Robot Humanoid Surya. Animasi ini Merangkumi (a) Keadaan Rehat, (b) Gerakan Perbualan, (c) Gerakan Isyarat Penerangan, (d) Mata Berkelip, (e) Posisi Berfikir dan (f) Pergerakan Melihat Sekeliling yang Menunjukkan Bagaimana Robot Berkomunikasi.

KESIMPULAN

Kajian ini membentangkan reka bentuk konseptual serta pembangunan digital bagi sebuah agen robot humanoid yang bertujuan menyokong sistem pengetahuan fotovolta berasaskan AI. Robot ini direka dengan panel fotovolta yang diletakkan pada struktur badannya bagi mewujudkan hubungan visual yang membolehkan pengguna mengenal pasti bahawa karakter tersebut mewakili teknologi tenaga boleh baharu. Proses pembangunan robot ini dilaksanakan melalui aliran kerja yang merangkumi lakaran konseptual 2D, pemodelan humanoid 3D, serta pembangunan animasi berasaskan gerakan. Robot humanoid ini berfungsi sebagai antara muka visual kepada pembantu pengetahuan suria berasaskan AI yang dibangunkan menggunakan LLM serta pangkalan pengetahuan RAG. Melalui sistem ini, robot dapat membantu pengguna memahami teknologi fotovolta, komponen sistem suria serta dasar tenaga boleh baharu melalui pelbagai platform digital. Walaupun robot ini pada masa ini wujud sebagai karakter digital, kerangka reka bentuk yang dibangunkan turut membuka peluang kepada pelaksanaan masa hadapan dalam bentuk sistem robot fizikal. Secara keseluruhan, kajian ini menunjukkan bahawa pengintegrasian identiti suria dengan agen humanoid berasaskan AI mampu menyediakan suatu visual yang bermakna dan menarik untuk menyampaikan pengetahuan fotovolta, sekali gus menyokong peningkatan kefahaman masyarakat terhadap teknologi tenaga suria dan tenaga boleh baharu.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atas sokongan yang diberikan melalui Geran Translasi UKM (TR-UKM), nombor geran UKM-TR2024-09.

RUJUKAN

- Chua, S. C., & Oh, T. H. (2012). Solar energy outlook in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 564-574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.022>
- Farquhar, S., Kossen, J., Kuhn, L., & Gal, Y. (2024). Detecting hallucinations in large language models using semantic entropy. *Nature*, 630(8017), 625-630. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07421-0>
- Huang, L., Yu, W., Ma, W., Zhong, W., Feng, Z., Wang, H., Chen, Q., Peng, W., Feng, X., & Qin, B. (2025). A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions. *ACM Transactions on Information Systems*, 43(2), 1-55. <https://doi.org/10.1145/3703155>
- Klesel, M., & Wittmann, H. F. (2025). Retrieval-augmented generation (rag) m. klesel, hf wittmann. *Business & Information Systems Engineering*, 67(4), 551-561. <https://doi.org/10.1007/s12599-025-00945-3>
- Koerner, S. A., Siew, W. S., Salema, A. A., Balan, P., Mekhilef, S., & Thavamoney, N. (2022). Energy policies shaping the solar photovoltaics business models in Malaysia with some insights on Covid-19 pandemic effect. *Energy Policy*, 164, 112918
- Lam, S.-T., Yap, K.-M., & Yeoh, K.-H. (2025). Driving Sustainable Energy Transition: Understanding Residential Rooftop Solar Photovoltaic Adoption in Malaysia through a Behavioural Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 7, 100103. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100103>
- Lau, L.-S., Choong, Y.-O., Ching, S.-L., Wei, C.-Y., Senadjki, A., Choong, C.-K., & Seow, A.-N. (2022). Expert insights on Malaysia's residential solar-energy policies: shortcomings and recommendations. *Clean Energy*, 6(4), 619-631. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac043>
- Martino, A., Iannelli, M., & Truong, C. (2023). Knowledge injection to counter large language model (LLM) hallucination. The Semantic Web: ESWC 2023 Satellite Events: Hersonissos, Crete Greece, European Semantic Web Conference, 182-185. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43458-7_34
- Şakar, T., & Emekci, H. (2025). Maximizing RAG efficiency: A comparative analysis of RAG methods. *Natural Language Processing*, 31(1), 1-25. <https://doi.org/10.1017/nlp.2024.53>
- Shafian, S. (2025a). Semitransparent and Colorful Solar Cell for Architectural Application. *Future Energy and Environment Letters*, 2(1), 13-32. <https://doi.org/https://doi.org/10.37934/feel.2.1.1332>
- Shafian, S. (2025b). Semitransparent Solar Cells for Agriculture Application. *Future Energy and Environment Letters*, 3(1), 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.37934/feel.3.1.118>
- Shafian, S. (2025c). Silicon Solar Cells for Indoor Photovoltaic Applications. *Future Energy and Environment Letters*, 3(1), 50-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.37934/feel.3.1.5057>
- Varshney, T. (2023). Introduction to LLM Agents. *NVIDIA Technical Blog*. <http://developer.nvidia.com/blog/introduction-to-llm-agents>
- Wang, R., Gao, Z., Zhang, L., Yue, S., & Gao, Z. (2025). Empowering large language models to edge intelligence: A survey of edge efficient LLMs and techniques. *Computer Science Review*, 57, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2025.100755>
- Zhang, J., Li, G., & Su, J. (2025). Sage: A framework of precise retrieval for rag. *arXiv preprint arXiv:2503.01713*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.01713>