

Jurnal Kejuruteraan 38(5) 2026: 2533-2545
[https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38\(5\)-33](https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38(5)-33)

Sistem Pintar Berasaskan Fotopletismografi dalam Telinga untuk Pengesanan Aritmia: Potensi Aplikasi dalam Eksplorasi Angkasa

(Smart In-Ear PPG-Based System for Arrhythmia Detection:
 Potential Applications in Space Exploration)

Khalida Azudin^a, Kok Beng Gan^{a*}, Rosmina Jaafar^a, Mahmoud Muhanad Fadhel^a, Wallace Wong Ming Yip^b, Kow Ping^b, Mohd Hasni Ja'afar^c, Mohd Shawal Faizal Mohammad^d & Kok Swee Sim^e

^aJabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik dan Sistem, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

^bWell Being Digital Limited (WBD101), Hong Kong

^cJabatan Perubatan Kesihatan Awam, Fakulti Perubatan, Hospital Canselor Tuanku Muhriz,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, Cheras 56000, Kuala Lumpur, Malaysia

^dJabatan Perubatan, Fakulti Perubatan, Hospital Canselor Tuanku Muhriz,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, Cheras 56000, Kuala Lumpur, Malaysia

^eFakulti Kejuruteraan dan Teknologi, Universiti Multimedia,
 Jalan Ayer Keroh Lama, Bukit Beruang, 75450 Melaka, Malaysia

*Corresponding author: kbgan@ukm.edu.my

Received 19 November 2025, Received in revised form 20 April 2026
 Accepted 20 May 2026, Available online 30 August 2026

ABSTRAK

Misi angkasa lepas memerlukan sistem pemantauan fisiologi yang boleh dipercayai dan selamat, serta mampu beroperasi secara berterusan, memandangkan mikrograviti memberi kesan kepada fungsi kardiovaskular dan kestabilan irama jantung. Kajian ini membangunkan dan mengesahkan sistem pintar berasaskan fotopletismografi (PPG) dalam telinga untuk pemantauan berterusan irama jantung dan pengesanan aritmia secara masa nyata. Sebanyak 2,926 segmen isyarat PPG diperolehi, merangkumi keadaan normal dan aritmia. Isyarat direkod pada 75 Hz dan diupsample kepada 256 Hz, kemudian dipaproses melalui penapisan Butterworth 0.5–6 Hz, pengesanan artifak, dan pensegmenan kepada 2560 titik data (≈ 10 s). Model kacukan ResNet–LSTM–Attention dibangunkan untuk mengekstrak ciri morfologi dan temporal, manakala prestasi dinilai menggunakan pengesahan silang 5 lipatan. Keputusan menunjukkan prestasi yang konsisten dan kukuh dengan ketepatan 0.7138 ± 0.1115 , AUC 0.8078 ± 0.0492 , dan F1-Score 0.7198 ± 0.0788 , membuktikan keupayaan model mengesan keabnormalan irama jantung daripada isyarat PPG dalam telinga. Dapatan ini menegaskan potensi teknologi ini sebagai platform pemantauan kardiovaskular berterusan, sesuai untuk integrasi ke dalam peranti boleh pakai dan aplikasi penjagaan kesihatan mudah alih, serta penggunaan dalam persekitaran ekstrem seperti angkasa lepas di mana penggunaan elektrokardiografi konvensional adalah kurang praktikal.

Kata kunci: Fotopletismografi; peranti dengar pintar; misi angkasa lepas; kardivaskula; aritmia

ABSTRACT

Space missions require reliable and safe physiological monitoring systems, as well as capable of continuous operation, as microgravity affects cardiovascular function and heart rhythm stability. This study develops and validates an intelligent in-ear photoplethysmography (PPG) system for continuous cardiac rhythm monitoring and real-time arrhythmia detection. A total of 2,926 PPG signal segments were collected, covering both normal and arrhythmic conditions. Signals were recorded at 75 Hz and upsampled to 256 Hz, then preprocessed using a 0.5–6 Hz Butterworth

filter, artifact detection, and segmentation into 2,560 data points (≈ 10 s). A hybrid ResNet–LSTM–Attention model was developed to extract morphological and temporal features, while performance was evaluated using 5-fold cross-validation. The results demonstrated consistent and robust performance with accuracy 0.7138 ± 0.1115 , AUC 0.8078 ± 0.0492 , and F1-Score 0.7198 ± 0.0788 , confirming the model's capability to detect cardiac rhythm abnormalities from in-ear PPG signals. These findings highlight the potential of this technology as a continuous cardiovascular monitoring platform, suitable for integration into wearable devices and mobile health applications, as well as for use in extreme environments such as space, where conventional electrocardiography is less practical.

Keywords: Photoplethysmography; hearable; space mission; cardiovascular; arrhythmia

PENGENALAN

Eksplorasi angkasa lepas merupakan satu bidang kajian yang semakin mendapat sambutan dengan misi untuk menempatkan manusia di Bulan dan Marikh. Penerokaan angkasa membawa bersama-sama risiko kesihatan yang signifikan akibat pendedahan kepada faktor persekitaran yang unik seperti radiasi angkasa, mikrograviti, pengasingan, dan kehidupan dalam habitat tertutup. Faktor-faktor ini mencetuskan pelbagai cabaran biologi pada tubuh manusia, termasuk tekanan oksidatif, kerosakan DNA, disfungsi mitokondria, perubahan epigenetik, pengubahsuaian sel-sel badan, dan peralihan dalam mikrobiom (Convertino 1996; Demontis et al. 2017; H. Han et al. 2024; López Garzón et al. 2025; Mavragani et al. 2017). Kesan-kesan ini seterusnya boleh menjejaskan pelbagai sistem organ dan meningkatkan risiko terhadap penyakit serius seperti barah, penyakit kardiovaskular, serta disfungsi sistem imun (Convertino, 1996; López Garzón et al. 2025; Mircea et al. 2024).

Cadangan penempatan jangka panjang manusia di luar Bumi ini akan memberi kesan yang serius kepada kesihatan manusia, khususnya dalam sistem kardiovaskular (Han et al. 2024; Hughson et al. 2018; Mircea et al. 2024). Keadaan mikrogravitasi dan pendedahan terhadap stress psikologi yang dialami oleh angkasawan telah dikenal pasti memberi kesan negatif terhadap fungsi jantung dan saluran darah (Hughson et al. 2018; Mircea et al. 2024). Beberapa kajian lepas menunjukkan bahawa angkasawan mengalami perubahan struktur jantung, gangguan irama jantung dan pengurangan isipadu semasa berada di persekitaran angkasa lepas dalam tempoh yang panjang (Dietlein 1983; Hughson et al. 2018; Johnston et al. 1975; Platts et al. 2014). Selain itu, keadaan mikrograviti menyebabkan pengaliran songsang cecair badan, iaitu menuju ke arah kepala. Keadaan ini meningkatkan isipadu cecair yang keluar dari jantung, yang turut juga mengakibatkan hipovolemia iaitu pengurangan isipadu darah dalam badan, atrofi kardiak, dan ketidakseimbangan ortostatik selepas kembali ke Bumi (Convertino 1996; H. Han et al. 2024). Keadaan atrofi kardiak, perubahan tekanan arteri serta perubahan dalam pengalihan aliran isipadu darah adalah

perkara yang seringkali berlaku dan angkasawan cenderung mengalami peningkatan kekakuan (stiffness) arteri dan perubahan variabiliti kadar jantung.

Menurut, kajian longitudinal dari NASA mengenai kesihatan angkasawan, kohort retrospektif dan prospektif dari 1959 hingga 2010, mendapati bahawa pengalaman penerbangan angkasa jangka pendek tidak mendedahkan angkasawan NASA kepada peningkatan risiko yang signifikan terhadap jantung (Anzai et al. 2014; Dietlein 1983; Hughson et al. 2018; Johnston & Dietlein 1977; Mircea et al. 2024). Kebanyakan fungsi dan keadaan kardiovaskular yang berubah semasa di angkasa akan kembali ke keadaan asal sejurus kembali ke Bumi. Kajian terhadap angkasawan yang ditempatkan di Stesen Angkasa Antarabangsa mendapati tiada peningkatan kadar penyakit kardiovaskular baru selepas misi angkasa jangka panjang (Johnston et al. 1975; Johnston & Dietlein 1977). Walau bagaimanapun, terdapat beberapa kes dimana angkasawan Apollo yang pergi melepasi lapisan magnetosfera Bumi mengalami kadar kematian yang lebih tinggi akibat penyakit jantung jika dibandingkan dengan angkasawan yang hanya terbang di orbit rendah Bumi (Johnston et al. 1975).

Kajian Anzai et al. telah merekodkan bacaan aritmia jantung dalam beberapa misi angkasa lepas termasuk program Apollo, Skylab dan MIR rujuk Jadual 1 (Anzai et al. 2014; Johnston et al. 1975; Rossum et al. 1997). Data ini penting termasuk kontraksi pramatang ventrikular dan atrium semasa misi Apollo 15, yang dikaitkan dengan ketidakseimbangan elektrolit (Johnston et al. 1975). Dalam misi Skylab, VPC terpencil dan aritmia multifokal dilaporkan berlaku semasa aktiviti luar kenderaan angkasa (EVA), yang kemungkinan disebabkan oleh tekanan dan perubahan bendalir badan. Program MIR dari Rusia pula mencatatkan kes takikardia ventrikular serta puluhan kes aritmia, menjadikannya masalah kesihatan kedua paling kerap dilaporkan (Fritsch-Yelle et al. 1998; Gontcharov et al. 2005; Johnston & Dietlein 1977). Kejadian-kejadian ini menekankan keperluan pemantauan kardiovaskular secara berterusan dan tidak invasif semasa misi angkasa lepas yang panjang demi keselamatan angkasawan.

Kajian Baran et al. turut menunjukkan jisim ventrikel kiri berkurang sebanyak 12% selepas misi 10 hari, dan

output jantung meningkat sebanyak 29% selepas pelancaran (Baran et al. 2022; Summers et al. 2005). Sekembalinya ke Bumi, angkasawan kehilangan 10–20% isipadu darah dan menunjukkan intoleransi ortostatik yang tinggi. Keadaan ini meningkatkan keperluan pemantauan kardiovaskular di angkasa (Buckey et al. 1996; Convertino 1996; Perhonen et al. 2001). Tambahan pula, kajian, berkaitan penyakit kardiovaskular (CVD) menunjukkan bahawa CVD merupakan satu daripada punca utama kematian di seluruh dunia dengan anggaran sebanyak 17.9 juta kematian setiap tahun, di mana ia merupakan 32% dari seluruh kematian global (Hussain et al. 2024; Roth et al.

2020). Sebanyak 85% jumlah kematian adalah berpunca daripada serangan jantung dan strok (Anzai et al. 2014; Gontcharov et al. 2005; Johnston et al. 1975; Johnston & Dietlein 1977). Pengesanan awal ketidakaturan irama jantung boleh mengurangkan risiko komplikasi yang serius termasuk kematian mengejut. Oleh itu, integrasi antara teknologi pemantauan kardiovaskular dan eksplorasi angkasa tidak hanya memberikan manfaat kepada kru misi angkasa, malah berpotensi menghasilkan inovasi yang boleh digunakan secara meluas dalam penjagaan kesihatan awam.

JADUAL 1. Sejarah dan Insiden Aritmia dalam Misi Angkasa Lepas

No	Program Angkasa	Tahun	Jenis Aritmia
1.	Apollo (Johnston et al. 1975)	1961-1972	Ventricular arrhythmias, Atrial premature contraction
2.	Skylab (Dietlein, 1983; Johnston & Dietlein, 1977)	1973-1979	VPC, APC
3.	MIR (Gontcharov et al. 2005)	1986-2001	Ventricular Tachycardia

Aritmia merujuk kepada keadaan gangguan pada sistem elektrofisiologi jantung yang mengakibatkan ritma denyutan jantung menjadi tidak normal. Gangguan ini berlaku akibat ketidakstabilan dalam penjanaan atau pengaliran impuls elektrik melalui nod sinus-atrium, nod atrioventrikular, dan sistem His-Purkinje (Parmley & Chatterjee 1986). Secara klinikal, aritmia boleh diklasifikasikan kepada tiga kategori utama: degupan terlalu laju (takikardia dengan kadar >100 bpm), terlalu perlahan (bradikardia dengan kadar <60 bpm), atau tidak teratur (Parmley & Chatterjee 1986; Vatterott 1991). Ketidakstabilan hemodinamik yang terhasil menghalang keupayaan pengisian dan pengepaman jantung secara optimum, yang menyebabkan pengurangan output kardiak, hipoperfusi organ sasaran, dan dalam kes yang serius boleh mengakibatkan kematian disebabkan strok iskemia, embolisme sistemik, atau kegagalan jantung kongestif (Parmley & Chatterjee 1986; Verbrugge et al. 2020).

Fibrilasi atrium (AF) merupakan manifestasi aritmia yang paling prevalen secara global, dengan insiden yang meningkat seiring penuaan populasi. Kondisi ini dicirikan oleh depolarisasi atrium yang tidak terselaraskan, menyebabkan kehilangan kontraksi atrium yang efektif. Pesakit yang menghidap AF mempunyai risiko morbiditi kardiovaskular lima kali ganda lebih tinggi berbanding populasi sihat [sihat (Parmley & Chatterjee 1986; Ruddox et al. 2017; Tanaka et al. 2021). Walaupun intervensi seperti alat perentak jantung (pacemaker), kardioversi elektrik, atau terapi ablasi kateter boleh membantu mengawal ritma jantung, pencegahan adalah lebih baik. Pencegahan menggunakan alat pengesanan awal tetap menjadi keutamaan dalam kalangan pesakit berisiko tinggi, terutamanya bagi

mencegah kematian jantung mengejut pasca-infarksi miokardium yang sering dikaitkan dengan takiaritmia ventrikel (Parmley & Chatterjee 1986).

Elektrokardiogram (ECG) kekal sebagai modaliti diagnostik piawai emas untuk menilai aktiviti elektrik jantung secara invasif. Teknologi ini berfungsi dengan merekodkan perbezaan potensi elektrik antara elektrod permukaan kulit yang diletakkan pada posisi anatomi tertentu. Kajian [18-19] telah menunjukkan ECG (electrocardiogram patches) dan pemantauan Holter 24 jam dapat mengesan aritmia paroksismal, terutamanya dalam pemantauan yang lebih panjang (sehingga 14 hari) (Chua et al. 2020; Liu et al. 2021). Namun, sistem ini mempunyai beberapa limitasi iaitu aplikasi elektrod secara langsung pada kulit boleh mengakibatkan dermatitis, iritasi kulit, dan ketidakselesaan pesakit (Özkaya & Kavlak Bozkurt 2014). Bagi angkasawan, kekangan ini ditambah dengan kesan persekitaran mikrograviti yang mengubah pengedaran cecair badan dan gangguan sambungan wayar dan elektrod. Wayar yang banyak dalam sistem konvensional bukan sahaja menghalang mobiliti tetapi menimbulkan risiko tersangkut pada peralatan kritikal dalam kapsul angkasa. Selain itu, isyarat ECG sangat terdedah kepada artifak pergerakan yang boleh memburukkan lagi kualiti isyarat dalam persekitaran operasi angkasawan yang dinamik.

Fotoplethismografi (PPG) telah muncul sebagai teknologi alternatif yang dapat digunakan untuk pemantauan kardiovaskular secara berterusan. Prinsip asas PPG bergantung pada pengukuran transmisi atau pantulan cahaya (kebiasanya hijau atau inframerah) melalui tisu vaskular untuk mengesan perubahan isipadu darah yang

bergantung kepada kitaran kardiak (Allen 2007; Charlton et al. 2022; Charlton et al. 2022). Berbeza dengan ECG yang mengukur voltaj elektrik, PPG mengesan variasi hemodinamik secara optik, menghapuskan penggunaan elektrod. Kepelbagaian bentuk peranti PPG membolehkan penggunaannya dalam pelbagai peralatan boleh pakai (wearables) seperti fon telinga, jam pintar, gelang kecergasan, atau patch epidermal (Athavale & Krishnan 2017; Charlton et al. 2022; Davies et al. 2022; Tamura et al. 2014). Kelebihan utamanya adalah kos yang lebih rendah, keselesaan pemakaian jangka panjang tanpa iritasi kulit, dan keupayaan multimodal untuk mengukur bukan sahaja kadar jantung, tetapi juga variabiliti kadar jantung (HRV), mengesan episod aritmia, menganggarkan tekanan darah melalui analisis gelombang nadi, dan memantau ketepuan oksigen darah (SPO2) (Longmore et al. 2019; Nilsson et al. 2007). Perkembangan terkini dalam algoritma pembelajaran mesin telah membolehkan peningkatan ketepatan PPG dalam mengesan corak kardiovaskular kompleks seperti fibrilasi atrium, takikardia ventrikel, dan extrasistol melalui analisis ciri morfologi gelombang nadi dan variasi temporal (D. Han et al. 2024; Sun et al. 2019; L. Wang et al. 2009; Z. Wang et al. 2024a, 2024b).

Oleh itu, kajian ini bertujuan mereka satu peranti pintar berasaskan PPG yang dioptimumkan untuk pengesanan aritmia menggunakan sensor dalam telinga, direka khas untuk keperluan unik angkasawan. Sistem ini menggabungkan sensor PPG dengan algoritma analisis masa nyata yang mampu membezakan variasi ritma fisiologi daripada aritmia patologis. Dengan menyediakan amaran awal untuk tindakan pencegahan yang tepat pada masanya, penyelesaian ini berpotensi menyumbang kepada peningkatan keselamatan kardiovaskular dan keberkesanan misi angkasa jangka panjang, sekaligus memberi pendekatan baru dalam pemantauan kesihatan yang invasif dan minimalis serta berfungsi untuk penjelajahan angkasa masa depan.

LATAR BELAKANG

FOTOPLETISMOGRAFI (PPG)

PPG ialah satu kaedah tidak invasif yang menggunakan cahaya untuk mengukur perubahan isipadu darah dengan menilai penyerapan cahaya oleh tisu. Sistem PPG terdiri daripada gabungan pemancar foto dan pengesan foto. Interaksi antara tisu dan cahaya optik dipengaruhi oleh pelbagai faktor termasuk kedalaman penembusan tisu, panjang gelombang isosbestik, dan tingkap air optik. Panjang gelombang yang berbeza mempunyai kedalaman penembusan yang berbeza, membolehkan PPG mengukur isyarat daripada lapisan tisu yang berbeza.

Isyarat bentuk gelombang PPG terdiri daripada dua tetapan arus yang berasingan: arus ulang alik (AC) dan arus terus (DC). Bahagian AC terdiri daripada komponen frekuensi tinggi gelombang PPG yang sepadan dengan turun naik isipadu darah dalam jantung. Variasi dalam isipadu darah ini menyebabkan perubahan dalam intensiti cahaya yang dikesan oleh fototransistor apabila darah mengalir melalui tisu. Frekuensi ini biasanya berada dalam julat 0.5 hingga 25 Hz bagi individu yang sihat. Ia mengandungi maklumat mengenai tekanan darah, tonus vaskular periferi, dan kepatuhan arteri (Allen 2007).

Komponen DC merupakan garis dasar yang merangkumi aktiviti berfrekuensi rendah berpunca dari aktiviti sistem saraf autonomi seperti pernafasan dan termoregulasi. Ia merupakan komponen tidak berdenyut yang boleh dipengaruhi oleh biologi seperti komposisi tisu badan serta faktor luaran seperti cahaya persekitaran dan spesifikasi peranti. Komponen frekuensi rendah ini mengandungi maklumat daripada pernafasan, termoregulasi dan aktiviti vasomotor. Ia merangkumi maklumat denyutan jantung pada 1 hingga 1.67 Hz dan kadar pernafasan pada 0.25 Hz.

PEMBELAJARAN MENDALAM KACUKAN

Model jaringan reja atau dikenali sebagai Residual Network (ResNet), diperkenalkan oleh He et al. (2015) untuk mengatasi masalah vanishing gradient yang sering berlaku kepada rangkaian neural konvolusi (CNN) terlalu dalam (He et al. 2015). Arkitektur tradisional CNN menghadapi cabaran prestasi yang merosot apabila lapisan semakin bertambah, menyebabkan kesukaran dalam proses pengoptimuman. ResNet mengatasi isu ini dengan memperkenalkan residual learning, iaitu pemetaan fungsi reja di mana lapisan hanya mempelajari perbezaan (residual) antara input dan output yang diingini.

Konsep ini dipermudahkan melalui *skip connection* atau *shortcut pathway*, yang membenarkan maklumat terus ke lapisan lebih dalam tanpa diubah. Pendekatan ini menstabilkan kecerunan, memudahkan latihan model dalam, serta meningkatkan ketepatan pengekstrakan ciri.

Walaupun pada asalnya dibangunkan untuk imej 2D, variasi ResNet 1D kini digunakan secara meluas dalam analisis isyarat seperti ECG, PPG, dan EEG, kerana keupayaannya untuk mengekstrak ciri temporal dan morfologi dengan berkesan sambil mengekalkan integriti struktur isyarat bioperubatan.

Memori Jangka Panjang ke Pendek atau dikenali sebagai *Long Short-Term Memory* (LSTM) merupakan sejenis rangkaian neural berulang (RNN) yang direka untuk mengatasi isu pergantungan jangka panjang (long-term dependency) dalam data jujukan. RNN tradisional

mengalami kesukaran mengekalkan maklumat jangka panjang kerana masalah kemusnahan (*vanishing*) atau kecerunan yang meletup (*exploding gradient*). LSTM menambah baik keadaan ini melalui penggunaan tiga pintu kawalan utama : Pintu masuk (*input gate*), Pintu lupa (*forget gate*), dan Pintu keluar (*output gate*) yang membenarkan maklumat dipilih, disimpan, atau dilupakan secara dinamik.

Struktur LSTM sangat sesuai untuk menganalisis isyarat masa terutamanya isyarat fisiologi seperti PPG kerana model ini dapat mengaitkan hubungan temporal dan perubahan dinamik jantung. Dalam konteks pengesanan aritmia, LSTM berupaya mengenal pasti corak tidak normal dalam irama jantung yang mungkin tidak dapat ditangkap oleh kaedah berasaskan konvolusi sahaja.

Mekanisme Perhatian (*Attention*) diperkenalkan bagi meningkatkan keupayaan rangkaian neural memfokus kepada bahagian data yang paling relevan. Dalam model jujukan, tidak semua maklumat mempunyai kepentingan yang sama. Mekanisme Perhatian (*Attention*) berfungsi sebagai modul pemberat yang memberikan keutamaan kepada bahagian isyarat yang lebih informatif untuk tugas tertentu, seperti pengesanan abnormaliti.

Mekanisme Perhatian mengira skor kepentingan untuk setiap elemen jujukan dan menggabungkannya secara terwajar, menghasilkan representasi ciri yang lebih bermakna. Mekanisme meningkatkan prestasi model dan interpretabiliti, kerana ia menunjukkan bahagian isyarat yang menyumbang paling besar kepada keputusan klasifikasi.

Dalam analisis isyarat PPG, mekanisme ini membantu rangkaian memberi tumpuan kepada ciri morfologi yang berkaitan dengan hemodinamik jantung, seperti variasi amplitud, perubahan bentuk gelombang atau ketidakteraturan pola yang merupakan indikator aritmia.

METODOLOGI

Kajian ini dijalankan melalui pendekatan tiga fasa yang komprehensif bagi memastikan pembangunan sistem “*hearable*” pintar (AURITMA) yang efektif untuk pengesanan dan pemantauan ritma jantung, khususnya untuk disesuaikan dalam aplikasi eksplorasi angkasa. Setiap fasa direka bentuk untuk membina asas yang kukuh bagi fasa berikutnya, dengan penekanan terhadap ketepatan teknikal, penyelesaian pengguna, dan pengesahan klinikal. Rajah 1 menunjukkan peranti yang digunakan dalam kajian ini.



RAJAH 1. Peranti *hearable* Aritmia

FASA 1: REKA BENTUK DAN PEMBANGUNAN PERANTI ‘HEARABLE’ AURITMA

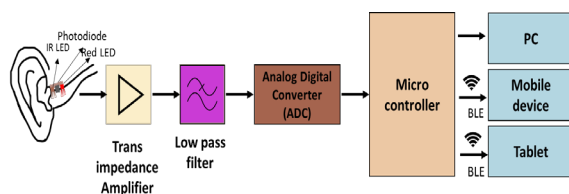
Fasa pertama memfokuskan pada mereka bentuk peranti fizikal Aritmia itu sendiri. Tujuan utama fasa ini adalah untuk mencipta sebuah peranti “*hearable*” yang menggabungkan sensor PPG, modul pengurusan kuasa yang cekap, dan sistem penghantaran data tanpa wayar yang boleh dipercayai. Prinsip ergonomik diberikan keutamaan tinggi dalam proses reka bentuk untuk memastikan keselesaan pemakaian jangka panjang, suatu faktor kritikal bagi misi angkasa yang berlarutan selama berbulan-bulan.

Dari segi implementasi teknikal, sistem Aritmia merupakan sebuah platform perkakasan yang canggih dan diintegrasikan. Rangkaian isyarat bermula dengan komponen optoelektronik yang terdiri daripada pemancar cahaya Inframerah (IR) dan fotodiod penerima. Isyarat analog yang sangat kecil (dalam urutan mikroampere) yang dihasilkan oleh fotodioda kemudiannya diproses melalui beberapa peringkat pemprosesan isyarat yang kritikal:

Peringkat pertama melibatkan penggunaan penguat transimpedans (TIA) yang berfungsi sebagai jambatan yang menghubungkan antara fotodiod dan sistem pemprosesan seterusnya. TIA memainkan peranan penting untuk menukarkan arus yang dijana oleh fotodiod kepada isyarat voltan yang boleh diproses. Tanpa TIA, arus yang terhasil daripada fotodiod adalah terlalu kecil kebiasaannya dalam julat nanoampere hingga mikroampere. Ini menyebabkan kesukaran untuk memproses isyarat secara langsung. Penguat ini direka bentuk dengan nilai rintangan maklum balas yang sesuai untuk memberikan gandaan yang optimum, seterusnya menjadikan isyarat lebih sesuai bagi langkah pemprosesan seterusnya.

Peringkat kedua melibatkan penapis laluan rendah (Low-pass filter) yang beroperasi selepas proses penguatan. Penapis ini direka bentuk dengan frekuensi *cut-off* yang spesifik untuk membuang komponen isyarat yang tidak diperlukan serta melemahkan hingar frekuensi tinggi yang terdapat dalam isyarat keluaran selepas proses penguatan. Dengan adanya penapis laluan rendah, hanya komponen isyarat yang berkaitan dengan variasi fisiologi (dalam julat 0.5-5 Hz untuk isyarat PPG) dibiarkan melalui, manakala gangguan frekuensi tinggi seperti hingar elektrik dan interferens persekitaran dapat diminimumkan. Reka bentuk penapis yang teliti ini amat kritikal untuk memastikan kualiti isyarat yang tinggi sebelum penukaran analog-ke-digital.

Peringkat ketiga adalah Penukar Analog ke Digital (ADC) yang berperanan menukar isyarat analog berterusan kepada nilai digital diskret. Proses pensampelan ini dilakukan pada frekuensi 75 Hz yang mencukupi untuk menangkap semua maklumat fisiologi relevan dalam isyarat PPG. Keupayaan ADC untuk menghasilkan output digital dengan resolusi tinggi 16-bit amat penting untuk mengekalkan kehalusan maklumat fisiologi dalam isyarat PPG, termasuk morfologi gelombang yang mengandungi maklumat berharga tentang status kardiovaskular. Proses penukaran ini membolehkan isyarat disimpan dan dianalisis menggunakan sistem komputer atau pemproses isyarat digital untuk aplikasi seterusnya. Rajah 2 menunjukkan susun atur blok sistem pemerolehan isyarat PPG yang terdiri daripada penguat transimpedans, penapis laluan rendah dan proses pendigitalan oleh ADC.



RAJAH 2. Susun atur blok sistem pemerolehan isyarat PPG

Dari segi jaringan, peranti ini menggunakan Bluetooth 5.0 untuk penghantaran data tanpa wayar. Pilihan ini dibuat berdasarkan kelebihan protokol ini dari segi kuasa yang rendah, kelajuan data yang mencukupi, dan keserasian yang meluas dengan peranti penerima. Walaupun peranti ini dilengkapi dengan meter pecutan (accelerometer) 3-paksi untuk mengesan pergerakan dan mengimbangi artifak, komponen ini tidak dimanfaatkan dalam fasa awal kajian. Bekalan kuasa disokong oleh bateri lithium-ion boleh cas semula berkapasiti 60 mAh, yang dipadankan dengan keperluan kuasa keseluruhan sistem.

Pembangunan prototaip ini dijalankan melalui kolaborasi strategik dengan Well Being Digital, memastikan

aspek kebolehgunaan dan pematuhan peraturan diambil kira sejak peringkat reka bentuk.

FASA 2: PEMBANGUNAN ALGORITMA PEMBELAJARAN MESIN

Fasa ini memfokuskan pada penciptaan algoritma canggih yang mampu menganalisis isyarat PPG secara masa nyata untuk pengesanan sebarang ketidaknormalan degupan jantung. Proses ini bermula dengan pra-pemprosesan isyarat PPG mentah yang melibatkan pengesanan dan pembetulan artifak yang mungkin wujud akibat pergerakan atau gangguan teknikal. Isyarat kemudiannya melalui proses penapisan yang teliti menggunakan Penapis Butterworth orde kedua dengan julat frekuensi 0.5-6 Hz, yang berfungsi menyingkirkan kedua-dua komponen frekuensi tinggi yang tidak diperlukan dan hanyutan garisan dasar, sekaligus mengekalkan integriti maklumat fisiologi asas. Proses penapisan ini amat kritikal untuk memastikan ketepatan analisis berikutnya, iaitu hanya komponen isyarat yang berkaitan dengan aktiviti kardiak yang dikekalkan.

Satu model pembelajaran mendalam kacukan telah direka bina bagi pengesanan aritmia, dengan menggabungkan model jaringan reja, Memori Jangka Panjang ke Pendek dan mekanisma Perhatian atau Attention bagi mengklasifikasikan isyarat PPG. Setiap segment isyarat PPG diubahsuai ke bentuk jujukan satu dimensi (1D) sepanjang 2560 sampel. Satu lapisan normalization digunakan bagi penormalan nilai input dan meningkatkan kestabilan proses latihan. Proses pengekstrakan ciri bermula dengan lapisan Conv1D awal yang menggunakan 32 penapis (kernel bersaiz 7, stride 2), diikuti dengan Batch Normalization, pengaktifan ReLU dan MaxPooling bagi mengurangkan resolusi temporal disamping mengekalkan ciri utama signal. Blok ResNet digunakan secara berturutan dengan bilangan penapis meningkat (32, 64 dan 128) untuk mengekstrak ciri yang lebih mendalam serta mengurangkan masalah kecerunan hilang. Setiap blok ResNet mengandungi dua lapisan konvolusi, Batch Normalization serta skip connection bagi memelihara pemetaan identiti dan memastikan kestabilan latihan rangkaian.

Ciri bertaraf tinggi yang lebih abstrak diekstrak oleh ResNet kemudian dihantar ke lapisan LSTM dengan 64 unit. LSTM digunakan untuk menangkap pergantungan jangka panjang dalam isyarat PPG, yang penting dalam mengenal pasti pola temporal yang berkaitan dengan aritmia. Pemilihan 64 unit LSTM mewakili keseimbangan antara kapasiti pemodelan dan kecekapan pengiraan. Konfigurasi ini menyediakan dimensi keadaan tersembunyi yang mencukupi untuk menangkap kerumitan temporal

urutan PPG, termasuk bentuk dan corak aritmia, sambil mengelakkan parameter yang berlebihan yang boleh mengakibatkan masalah *overfitting*, terutamanya dalam set data bersaiz terhad. Kajian empirikal dalam literatur, termasuk Saranya et al. (2025) telah menunjukkan bahawa 32 sehingga 128 unit LSTM biasanya mencapai prestasi optimum untuk isyarat jantung boleh pakai, dengan 64 unit sering menunjukkan keseimbangan terbaik antara ketepatan, kestabilan latihan, dan kecekapan inferens (Saranya et al. 2025) Selain itu, tetapan ini memudahkan pelaksanaan masa nyata pada peranti boleh pakai yang terhad sumber, memastikan model dapat memproses isyarat masuk secara berterusan tanpa kelewatan yang ketara.

Bagi meningkatkan keupayaan rangkaian mengenal pasti bahagian isyarat paling informatif, satu lapisan Mekanisme Perhatian diterapkan selepas LSTM. Mekanisme ini membolehkan model memberikan pemberat yang sesuai kepada setiap maklumat temporal, meningkatkan ketepatan ciri yang dihantar ke bahagian klasifikasi. Ciri yang telah melalui mekanisme attention diproses oleh lapisan Dense dengan 64 unit ReLU dan Dropout 50% bagi mengelakkan *overfitting*. Lapisan output terdiri daripada satu unit sigmoid, yang menghasilkan kebarangkalian bagi tugas pengelasan binari (aritmia vs normal).

FASA 3: PENGESAHAN KLINIKAL ALGORITMA

Pengesahan klinikal dijalankan di fasiliti perubatan, Klinik Kardiologi, Hospital Tuanku Canselor Muhriz (HTCM). Kajian ini melibatkan kira-kira 70 subjek untuk menilai prestasi sistem berbanding ECG standard. Rakaman ECG yang digunakan dalam kajian ini telah dianotasi oleh pakar kardiologi bertauliah, sekali gus memastikan kebolehpercayaan dan kesahihan klinikal label rujukan (ground truth). Ujian ini juga menilai keselesaan dan kebolehgunaan peranti sebagai persediaan untuk aplikasi dalam misi angkasa masa depan.

Seramai 70 orang sukarelawan yang sihat (lelaki dan wanita), berumur antara 18 hingga 70 tahun, telah mengambil bahagian dalam kajian ini. Semua subjek telah memberikan persetujuan bertulis sebelum penglibatan mereka. Pangkalan data kerja telah dianonimkan bagi melindungi kerahsiaan peserta. Rajah 3 menunjukkan salah seorang subjek semasa proses pengambilan data. Dalam rajah ini, peserta dilihat duduk dengan tenang, sementara electrocardiogram (ECG) standard dipasang pada dada untuk merekodkan aktiviti elektrik jantungnya. Serentak dengan itu, subjek juga memakai peranti PPG di telinga yang diperlukan untuk kajian ini. Rajah ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang susunan fizikal peserta dan peranti, serta prosedur pengambilan data yang dilakukan dalam suasana klinikal.



RAJAH 3: Keadaan pesakit semasa proses pengambilan data

Isyarat fotoplethysmografi (PPG) telah direkodkan dari telinga menggunakan sensor yang disambungkan melalui Bluetooth dengan frekuensi pensampelan 75 Hz. Pada masa yang sama, isyarat PPG dari pergelangan tangan direkodkan menggunakan sensor berasingan yang disambungkan kepada peralatan rakaman dengan frekuensi pensampelan 200 Hz. Tempoh setiap sesi rakaman adalah antara 2 hingga 4 minit.

Tujuan utama kajian ini adalah untuk membuat perbandingan dengan isyarat elektrokardiogram (ECG) yang lazimnya direkod pada frekuensi lebih tinggi. Oleh itu, isyarat PPG telinga telah diupsample daripada 75 Hz kepada 256 Hz. Proses *upsampling* ini memastikan keseragaman frekuensi dan ketepatan penjajaran temporal antara kedua-dua jenis isyarat sebelum analisis lanjutan dilakukan.

Isyarat PPG yang telah ditingkatkan sampel kemudiannya dipotong kepada segmen sepanjang 2560 mata data (bersamaan 10 saat pada 256 Hz). Pemilihan panjang segmen ini adalah berdasarkan keperluan pemodelan pembelajaran mendalam, iaitu setiap segmen mewakili tettingkap analisis yang mencukupi untuk menangkap maklumat morfologi dan pola temporal degupan jantung.

Bagi menilai prestasi model secara objektif dan mengurangkan risiko *overfitting*, kajian ini menggunakan kaedah pengesahan silang 5 lipatan ikut subjek (subject-wise 5-fold cross validation). Kaedah ini membahagikan keseluruhan set data kepada lima lipatan (*fold*) yang sama besar. Semua segmen yang bersal daripada subjek yang sama dikelompokkan di dalam lipatan yang sama berdasarkan subjek ID dan tidak akan dipisahkan antara set latihan dan set ujian. Kaedah validasi dijalankan seperti berikut:

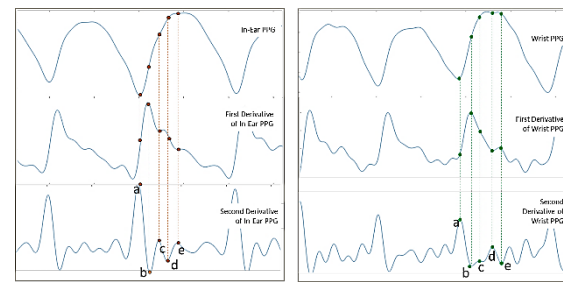
1. Keseluruhan data dibahagikan kepada lima lipatan berdasarkan subjek, iaitu setiap lipatan mengandungi subjek yang berbeza.
2. Dalam setiap iterasi, empat lipatan digunakan untuk latihan model, manakala satu lipatan digunakan sebagai set ujian.
3. Proses ini diulang sebanyak lima kali, dengan setiap lipatan berperanan sebagai set ujian sekali.
4. Prestasi keseluruhan model diperoleh dengan mengira purata (mean) dan sisihan piawai (standard deviation) merentasi kelima-lima iterasi.

Pendekatan pengesahan silang 5 lipatan ikut subjek ini memastikan bahawa setiap sampel dalam pangkalan data diuji sekurang-kurangnya sekali dan tiada segmen daripada subjek yang sama dalam kedua-dua set latihan dan ujian, sekali gus memberikan anggaran prestasi model yang lebih stabil dan bebas daripada bias pemisahan data. Kaedah ini juga sesuai digunakan untuk dataset bersaiz sederhana seperti dalam kajian ini.

KEPUTUSAN DAN DISKUSI

Hasil keputusan reka bentuk peranti hearable ini menunjukkan bahawa system PPG berasaskan sensor inframerah dapat dibangunkan dan dapat beroperasi dengan baik pada kadar pensampelan 75Hz dengan resolusi 16 bit.

Ujian awal menunjukkan isyarat PPG yang diperoleh daripada dalam telinga menunjukkan prestasi yang baik di mana bentuk dan morfologi isyarat PPG stabil. Walau bagaimanapun, hasil pemerhatian, isyarat PPG dari telinga lebih mendatar berbanding isyarat dari jari. Dicrotic notch yang juga elemen penting dalam PPG juga tidak begitu jelas. Keadaan ini disebabkan perbezaan anatomi vascular di telinga yang mempunyai salur darah lebih kecil, yang menjadikan pantulan Cahaya di arteri periferi kurang ketara. Hasil pemprosesan isyarat PPG dari telinga dapat dilihat dengan jelas dalam Rajah 4 berikut. Merujuk pada Rajah 4, memaparkan perbandingan isyarat PPG yang diperoleh daripada telinga dan tangan. Rajah 4 turut menunjukkan derivatif pertama dan kedua bagi isyarat tersebut, selaras dengan pendekatan yang digunakan dalam kebanyakan kajian terdahulu, walaupun kajian ini tidak menggunakan ciri-ciri derivatif tersebut untuk analisis.



RAJAH 4: Perbandingan Isyarat PPG Daripada Telinga dan Tangan Beserta Derivatif Pertama dan Kedua

Bagi fasa pembangunan algoritma pembelajaran mesin, model ini menganalisis isyarat mentah PPG daripada telinga. Sebanyak 2,926 segmen isyarat PPG dari telinga telah diperoleh sebelum proses pengekstrakan ciri dijalankan. Daripada jumlah tersebut, 1,275 segmen diklasifikasikan sebagai milik pesakit dengan aritmia, 1,355 segmen sebagai pesakit normal. Jadual 2 menunjukkan hasil Keputusan dari model ResNet-LSTM.

JADUAL 2. Prestasi keputusan Model ResNet-LSTM

Model	ResNet-LSTM
Ketepatan (Accuracy)	0.7138 ± 0.1115
AUC	0.8078 ± 0.0492
F1-Score	0.7198 ± 0.0788
Kejituan (Precision)	0.7715 ± 0.0694
Kepekaan (Recall)	0.7324 ± 0.0574
MCC	0.4621 ± 0.1487
Spesifisiti (Specificity)	0.7881 ± 0.1159

Model ResNet-LSTM yang dicadangkan menunjukkan prestasi yang kukuh dan konsisten berdasarkan penilaian pengesahan silang 5 lipatan ikut subjek. Model ini mencapai ketepatan (accuracy) sebanyak 0.7138 ± 0.1115 , menandakan keupayaannya untuk mengklasifikasikan segmen dengan tepat secara keseluruhan. Nilai AUC sebanyak 0.8078 ± 0.0492 pula menunjukkan keupayaan pembezaan (*discriminative power*) yang baik antara segmen normal dan aritmia.

Dari segi metrik kelas-spesifik, model mencapai F1-Score sebanyak 0.7198 ± 0.0788 , dengan kejituan (precision) 0.7715 ± 0.0694 dan kepekaan (recall) 0.7324 ± 0.0574 , menunjukkan prestasi pengesanan yang seimbang bagi kedua-dua kelas. Nilai Matthews Correlation Coefficient (MCC) 0.4621 ± 0.1487 mengesahkan keteguhan model merentasi fold, walaupun terdapat variasi, khususnya dalam situasi ketidakseimbangan data. Selain itu, model mencatat spesifisiti (specificity) 0.7881 ± 0.1159 , menunjukkan keupayaan yang baik dalam mengenal pasti segmen bukan aritmia dengan tepat.

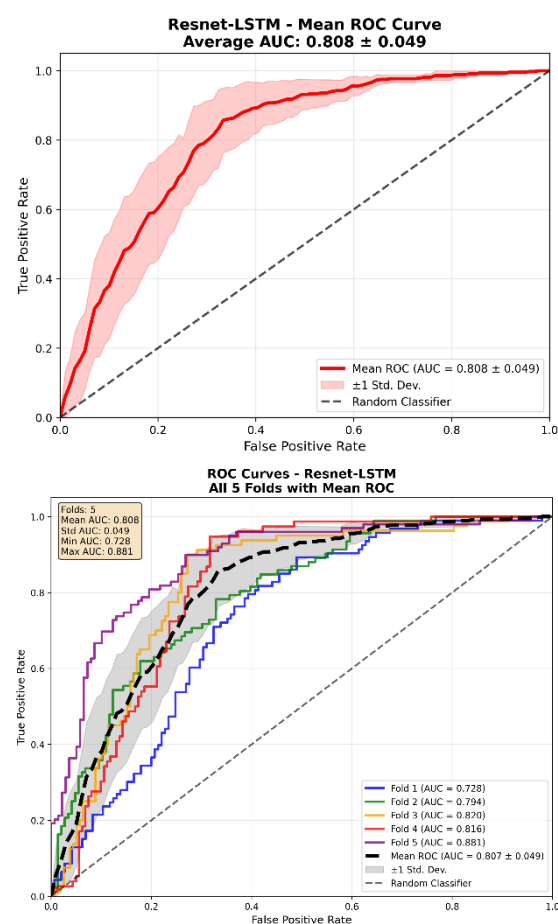
Secara keseluruhannya, keputusan ini membuktikan bahawa model ResNet-LSTM menawarkan ketepatan yang tinggi, generalisasi yang baik, dan kebolehpercayaan yang mantap dalam tugas pengesanan aritmia menggunakan isyarat PPG dalam telinga. Hasil kajian ini menunjukkan bahawa model pembelajaran mesin yang dibangunkan menggunakan isyarat PPG telinga mampu mengesan aritmia jantung dengan ketepatan tinggi. Model ini mencapai nilai AUC purata sebanyak 0.805 iaitu lipatan kelima didapati mencapai nilai AUC terbaik sebanyak 0.881. Rajah 5 menunjukkan lengkung ROC untuk setiap lipatan dalam pengesanan silang lima lipatan. Setiap lengkung mewakili prestasi model pada lipatan berbeza. Garis tebal putus-putus berwarna hitam mewakili lengkung purata AUC, memberikan ukutan keseluruhan kebolehan model dalam membezakan kelas “Normal” dan “Aritmia,”. Ini membuktikan kebolehpercayaan sistem dalam klasifikasi automatik rentak jantung. Algoritma kacukan ResNet-LSTM memberikan prestasi konsisten, dengan matriks kekeliruan menunjukkan kemampuan model berkalibrasi baik mengenal pasti kes aritmia tepat serta mengekalkan kadar kesalahan minimum bagi kelas “Normal”.

JADUAL 3. Jadual Matriks Kekeliruan (Confusion Matrix)

Model	Ramalan Kelas Aritmia	Ramalan Kelas Normal
Aritmia Sebenar	TP=934	FN = 341
Normal Sebenar	FP=288	TN = 1067

Jadual 3 menunjukkan satu matriks kekeliruan (confusion matrix) yang dibina berdasarkan purata data yang diperoleh daripada pengesanan silang 5 lipatan ikut subjek. Daripada 1275 segment aritmia, sebanyak 934 segmen telah diklasifikasikan dengan betul sebagai aritmia (true positive), manakala 341 segmen telah salah diklasifikasikan sebagai normal (false negative). Bagi 1,355 segmen bukan aritmia, sebanyak 1,067 segmen telah dikenal pasti dengan betul sebagai normal (true negative), manakala 288 segmen telah tersalah diklasifikasikan sebagai aritmia (false positive).

Keputusan ini menunjukkan bahawa model mempunyai keupayaan yang baik dalam mengenal pasti kedua-dua kelas, selaras dengan nilai kepekaan (recall) dan spesifisiti (specificity) yang diperoleh, walaupun masih terdapat beberapa kes salah klasifikasi.



RAJAH 5. Lengkungan ROC untuk ResNet-LSTM

Kajian ini juga berjaya menunjukkan potensi teknologi *hearable* yang dilengkapi deria *sensor* dalam telinga sebagai alat pemantauan kardiovaskular yang praktikal dan mesra pengguna, menawarkan alternatif yang menarik berbanding sistem elektrokardiogram (ECG) konvensional (Ferlini et al. 2022; Salleh et al. 2024; Venema et al. 2015). Peranti ini memanfaatkan teknik fotoplethysmografi (PPG) dalam telinga, yang walaupun menghadapi cabaran tersendiri, berpotensi memberikan pengukuran berterusan tanpa mengganggu aktiviti harian pengguna. Kelebihan utama pendekatan ini termasuk sifatnya yang tidak invasif, kebolehsampaian yang tinggi, dan potensi untuk integrasi yang lancar ke dalam kehidupan seharian.

Dalam kajian ini, isyarat PPG telinga hanya dibandingkan dengan isyarat ECG sebagai rujukan utama, tanpa perbandingan kuantitatif dengan PPG dari lokasi lain seperti jari atau pergelangan tangan. Hal ini kerana ciri morfologi dan sifat hemodinamik isyarat PPG berbeza mengikut lokasi anatomi, menyebabkan bentuk gelombang dan kualiti isyarat tidak setara. Justeru, perbandingan langsung antara PPG telinga dan PPG jari dianggap tidak wajar tanpa penormalan serta protokol pemerolehan data yang seragam. Pendekatan ini diambil bagi mengelakkan

dapatan yang mengelirukan dan memastikan fokus kajian kekal pada kebolehlaksanaan PPG telinga sebagai kaedah alternatif untuk mengesan aritmia di telinga.

Walau bagaimanapun, beberapa faktor teknikal dan fisiologi perlu diberi perhatian serius dalam pengembangan teknologi ini. Variasi anatomi saluran telinga antara individu, pigmentasi kulit yang berbeza-beza, dan gangguan artifak pergerakan merupakan antara halangan utama yang boleh menjejaskan ketepatan dan kebolehpercayaan bacaan PPG yang diperolehi. Faktor-faktor ini memerlukan pendekatan pemprosesan isyarat yang canggih dan algoritma pemplotan yang teguh untuk memastikan prestasi sistem yang konsisten merentasi pelbagai populasi pengguna.

Dalam konteks yang lebih luas seperti eksplorasi angkasa lepas, peranti *hearable* ini menawarkan nilai tambah yang signifikan sebagai alat pemantauan kardiovaskular yang praktikal. Sifatnya yang tidak invasif, saiznya yang padat, dan kemudahan penggunaannya menjadikannya amat sesuai untuk digunakan dalam persekitaran mikrograviti yang unik dan terhad, berbanding dengan sistem pemantauan konvensional yang lebih besar dan kompleks (Azudin et al. 2023). Kepentingan ini tidak boleh dipandang remeh memandangkan pemantauan kesihatan jantung secara berterusan dan real-time adalah kritikal untuk memastikan keselamatan dan prestasi angkasawan semasa misi jangka panjang ke stesen angkasa, Bulan, atau bahkan Marikh.

Namun, untuk memastikan keberkesanan peranti ini dalam persekitaran angkasa yang mencabar, beberapa pertimbangan khusus perlu diambil kira. Faktor seperti kesan pergerakan tanpa berat, variasi bentuk saluran telinga yang mungkin mempengaruhi penempatan sensor, dan perbezaan respons fisiologi individu terhadap persekitaran angkasa perlu dikaji dan diatasi secara menyeluruh. Hanya dengan menangani cabaran-cabaran ini, sistem pemantauan berasaskan *hearable* dapat mengekalkan ketepatan dan kestabilan prestasinya dalam pelbagai situasi operasi, sekaligus menyumbang kepada kemajuan program angkasa lepas dan kesihatan jangka panjang para angkasawan.

Terdapat beberapa kebimbangan terhadap risiko sumber radiasi angkasa terutamanya dari sinar kosmik galaksi (galactic cosmic rays) dan peristiwa zarah suria (solar particle events) terhadap komponen elektronik di angkasa. Pendedahan radiasi ini boleh mengakibatkan gangguan acara tunggal (single-event upsets) (SEU) yang mengakibatkan ralat sementara, serta kesan jumlah dos pengionan (total ionizing dose) (TID) yang mengurangkan prestasi semikonduktor secara beransur-ansur dari semasa ke semasa. Gangguan-gangguan ini boleh memperkenalkan hingar dan mengurangkan kebolehpercayaan sistem peranti PPG dalam telinga.

Bagi mengurangkan kesan radiasi terhadap sistem peranti ini adalah dengan menggunakan komponen yang tahan radiasi (radiation-hardened), pelaksanaan algoritma yang mengesan gangguan radiasi dan membuat pembetulan ralat secara automatik (Fogtman et al. 2023; Maurer et al. 2008). Penggunaan sistem kelewahan (redundancy) dan penentukuran berkala dapat meningkatkan lagi kebolehpercayaan sistem dalam misi jangka panjang (Fogtman et al. 2023; Kuwahara et al. 2012). Selain itu, penggunaan teknik perisai aktif (active shielding) yang digabungkan dengan pengesanan zarah masa nyata serta algoritma mitigasi menunjukkan potensi dalam melindungi elektronik komersial daripada peristiwa SEU (Kuwahara et al. 2012).

Kajian pada masa akan datang perlu memberi tumpuan kepada pembangunan peranti PPG dalam telinga yang lebih tahan terhadap kesan radiasi, bagi membolehkan penggunaannya dalam persekitaran angkasa lepas untuk pemantauan keadaan fisiologi angkasawan. Selain itu, pembangunan algoritma pengesanan aritmia yang lebih tepat dan mantap juga perlu diteruskan bagi meningkatkan ketepatan serta kebolehpercayaan sistem secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahawa teknologi *hearable* berasaskan penderiaan dalam telinga yang digabungkan dengan algoritma pembelajaran mesin mampu mengesan aritmia jantung dengan ketepatan tinggi menggunakan isyarat fotoplethysmograf (PPG). Model terbaik dalam kajian ini telah membuktikan keupayaan mengklasifikasikan ritma jantung secara automatik dengan nilai AUC setinggi 0.808, menjadikannya satu pendekatan yang berpotensi tinggi untuk pemantauan kesihatan kardiovaskular secara berterusan.

Dalam konteks penerokaan angkasa lepas, peranti ini menawarkan alternatif praktikal dan kurang invasif berbanding kaedah konvensional seperti ECG Holter. Ini sangat penting bagi misi jangka panjang di ruang angkasa yang terhad dari segi kemudahan rawatan perubatan. Walau bagaimanapun, cabaran seperti variasi anatomi saluran telinga, pergerakan pengguna, dan perubahan fisiologi akibat mikrograviti perlu diberi perhatian dalam pembangunan sistem.

Secara keseluruhan, hasil kajian ini membuka jalan ke arah pembangunan peranti *hearable* pintar yang dapat digunakan bukan sahaja dalam persekitaran klinikal di Bumi tetapi juga dalam penyokongan kesihatan angkasawan semasa misi eksplorasi luar angkasa pada masa hadapan.

PENGHARGAAN

Kerja ini telah disokong oleh Kementerian Pendidikan Tinggi di bawah Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS/1/2023/TK07/UKM/02/12) dan Universiti kebangsaan Malaysia dibawah Dana Impak Perdana DIP2.0 (DIP-2024-030).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Allen, J. 2007. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement* 28(3). <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/3/R01>
- Anzai, T., Frey, M. A. & Nogami, A. 2014. Cardiac arrhythmias during long-duration spaceflights. *Journal of Arrhythmia* 30(3): 139–149. <https://doi.org/10.1016/J.JOA.2013.07.009>
- Athavale, Y. & Krishnan, S. 2017. Biosignal monitoring using wearables: Observations and opportunities. *Biomedical Signal Processing and Control* 38: 22–33. <https://doi.org/10.1016/J.BSPC.2017.03.011>
- Azudin, K., Gan, K. B., Jaafar, R. & Ja'afar, M. H. 2023. The principles of hearable photoplethysmography analysis and applications in physiological monitoring: A review. *Sensors* 23(14): 6484. <https://doi.org/10.3390/S23146484>
- Baran, R., Marchal, S., Campos, S. G., Rehnberg, E., Tabury, K., Baselet, B., Wehland, M., Grimm, D. & Baatout, S. 2022. The cardiovascular system in space: Focus on in vivo and in vitro studies. *Biomedicine* 10(1). <https://doi.org/10.3390/BIOMEDICINES10010059>
- Buckey, J. C., Gaffney, F. A., Lane, L. D., Levine, B. D., Watenpaugh, D. E., Wright, S. J., Yancy, C. W., Meyer, D. M. & Blomqvist, C. G. 1996. Central venous pressure in space. *Journal of Applied Physiology* 81(1): 19–25. <https://doi.org/10.1152/JAPPL.1996.81.1.19>
- Charlton, P. H., Kyriacou, P. A., Mant, J., Marozas, V., Chowienzyk, P. & Alastruey, J. 2022. Wearable photoplethysmography for cardiovascular monitoring. *Proceedings of the IEEE* 110(3): 355–381. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3149785>
- Charlton, P. H., Pilt, K. & Kyriacou, P. A. 2022. Establishing best practices in photoplethysmography signal acquisition and processing. *Physiological Measurement* 43(5). <https://doi.org/10.1088/1361-6579/ac6cc4>
- Chua, S. K., Chen, L. C., Lien, L. M., Lo, H. M., Liao, Z. Y., Chao, S. P., Chuang, C. Y. & Chiu, C. Z. 2020. Comparison of arrhythmia detection by 24-hour Holter and 14-day continuous electrocardiography patch monitoring. *Acta Cardiologica Sinica* 36(3): 251–259. [https://doi.org/10.6515/ACS.202005_36\(3\).20190903A](https://doi.org/10.6515/ACS.202005_36(3).20190903A)
- Convertino, V. A. 1996. Clinical aspects of the control of plasma volume at microgravity and during return to one gravity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28(10 Suppl.). <https://doi.org/10.1097/00005768-199610000-00033>
- Davies, H. J., Bachtiger, P., Williams, I., Molyneaux, P. L., Peters, N. S. & Mandic, D. P. 2022. Wearable in-ear PPG: Detailed respiratory variations enable classification of COPD. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 69(7): 2390–2400. <https://doi.org/10.1109/TBME.2022.3145688>
- Demontis, G. C., Germani, M. M., Caiani, E. G., Barravecchia, I., Passino, C. & Angeloni, D. 2017. Human pathophysiological adaptations to the space environment. *Frontiers in Physiology* 8(August). <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2017.00547>
- Dietlein, L. F. 1983. Spaceflight and the telltale heart. *The American Journal of Surgery* 145(6): 703–706. [https://doi.org/10.1016/0002-9610\(83\)90125-3](https://doi.org/10.1016/0002-9610(83)90125-3)
- Ferlini, A., Montanari, A., Min, C., Li, H., Sassi, U. & Kawsar, F. 2022. In-ear PPG for vital signs. *IEEE Pervasive Computing* 21(1): 65–74. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2021.3121171>
- Fogtman, A., Baatout, S., Baselet, B., Berger, T., Hellweg, C. E., Jiggins, P., La Tessa, C., Narici, L., Nieminen, P., Sabatier, L., Santin, G., Schneider, U., Straube, U., Tabury, K., Tinganelli, W., Walsh, L. & Durante, M. 2023. Towards sustainable human space exploration: Priorities for radiation research to quantify and mitigate radiation risks. *npj Microgravity* 9(1). <https://doi.org/10.1038/S41526-023-00262-7>
- Fritsch-Yelle, J. M., Leuenberger, U. A., D'Aunno, D. S., Rossum, A. C., Brown, T. E., Wood, M. L., Josephson, M. E. & Goldberger, A. L. 1998. An episode of ventricular tachycardia during long-duration spaceflight. *American Journal of Cardiology* 81(11): 1391–1392. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(98\)00179-9](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(98)00179-9)
- Gontcharov, I. B., Kovachevich, I. V., Pool, S. L., Navinkov, O. L., Barratt, M. R., Bogomolov, V. V. & House, N. 2005. In-flight medical incidents in the NASA-Mir program. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 76(7): 692–696.
- Han, D., Moon, J., Díaz, L. R. M., Chen, D., Williams, D., Mohagheghian, F., Ghetia, O., Peitzsch, A. G., Kong, Y., Nishita, N., Ghutadaria, O., Orwig, T. A., Otabil, E. M., Noorishirazi, K., Hamel, A., Dickson, E. L.,

- DiMezza, D., Lessard, D., Wang, Z. & Chon, K. H. 2024. Multiclass arrhythmia classification using multimodal smartwatch photoplethysmography signals collected in real-life settings. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-5463126/V1>
- Han, H., Jia, H., Wang, Y. F. & Song, J. P. 2024. Cardiovascular adaptations and pathological changes induced by spaceflight: From cellular mechanisms to organ-level impacts. *Military Medical Research* 11(1). <https://doi.org/10.1186/S40779-024-00570-3>
- He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J. 2015. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2016-December: 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Hughson, R. L., Helm, A. & Durante, M. 2018. Heart in space: Effect of the extraterrestrial environment on the cardiovascular system. *Nature Reviews Cardiology* 15(3): 167–180. <https://doi.org/10.1038/NRCARDIO.2017.157>
- Hussain, M. M., Rafi, U., Imran, A., Rehman, M. U. & Abbas, S. K. 2024. Risk factors associated with cardiovascular disorders. *Pakistan BioMedical Journal*: 03–10. <https://doi.org/10.54393/PBMJ.V7I02.1034>
- Johnston, R. S. & Dietlein, L. F. 1977. *Biomedical Results from Skylab*.
- Johnston, R. S., Dietlein, L. F., Berry, C. A., Parker, J. F. Jr., West, V. & Jones, W. L. 1975. *Biomedical Results of Apollo*. NASA-SP-368.
- Kuwahara, T., Tomioka, Y., Fukuda, K., Sugimura, N. & Sakamoto, Y. 2012. Radiation effect mitigation methods for electronic systems. *2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2012)*, 307–312. <https://doi.org/10.1109/SII.2012.6427324>
- Liu, C. M., Chang, S. L., Yeh, Y. H., Chung, F. P., Hu, Y. F., Chou, C. C., Hung, K. C., Chang, P. C., Liao, J. N., Chan, Y. H., Lo, L. W., Wu, L. S., Lin, Y. J., Wen, M. S. & Chen, S. A. 2021. Enhanced detection of cardiac arrhythmias utilizing 14-day continuous ECG patch monitoring. *International Journal of Cardiology* 332: 78–84. <https://doi.org/10.1016/J.IJCARD.2021.03.015>
- Longmore, S. K., Lui, G. Y., Naik, G., Breen, P. P., Jalaludin, B. & Gargiulo, G. D. 2019. A comparison of reflective photoplethysmography for detection of heart rate, blood oxygen saturation, and respiration rate at various anatomical locations. *Sensors* 19(8). <https://doi.org/10.3390/S19081874>
- López Garzón, N. A., Pinzón-Fernández, M. V., Saavedra T, J. S., Nati-Castillo, H. A., Arias-Intriago, M., Salazar-Santoliva, C. & Izquierdo-Condoy, J. S. 2025. Microgravity and cellular biology: Insights into cellular responses and implications for human health. *International Journal of Molecular Sciences* 26(7). <https://doi.org/10.3390/IJMS26073058>
- Maurer, R., Fraeman, M., Martin, M. N. & Roth, D. 2008. Harsh environments: Space radiation environment, effects, and mitigation. *Johns Hopkins APL Technical Digest*.
- Mavragani, I. V., Nikitaki, Z., Souli, M. P., Aziz, A., Nowsheen, S., Aziz, K., Rogakou, E. & Georgakilas, A. G. 2017. Complex DNA damage: A route to radiation-induced genomic instability and carcinogenesis. *Cancers* 9(7). <https://doi.org/10.3390/CANCERS9070091>
- Mircea, A. A., Pistritu, D. V., Fortner, A., Tanca, A., Liehn, E. A. & Bucur, O. 2024. Space travel: The radiation and microgravity effects on the cardiovascular system. *International Journal of Molecular Sciences* 25(21). <https://doi.org/10.3390/IJMS252111812>
- Nilsson, L., Goscinski, T., Kalman, S., Lindberg, L. G. & Johansson, A. 2007. Combined photoplethysmographic monitoring of respiration rate and pulse: A comparison between different measurement sites in spontaneously breathing subjects. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica* 51(9): 1250–1257. <https://doi.org/10.1111/J.1399-6576.2007.01375.X>
- Parmley, W. W. & Chatterjee, K. 1986. Congestive heart failure and arrhythmias: An overview. *The American Journal of Cardiology* 57(3). [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(86\)90996-3](https://doi.org/10.1016/0002-9149(86)90996-3)
- Perhonen, M. A., Franco, F., Lane, L. D., Buckey, J. C., Blomqvist, C. G., Zerwekh, J. E., Peshock, R. M., Weatherall, P. T. & Levine, B. D. 2001. Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight. *Journal of Applied Physiology* 91(2): 645–653. <https://doi.org/10.1152/JAPPL.2001.91.2.645>
- Platts, S. H., Bairey Merz, C. N., Barr, Y., Fu, Q., Gulati, M., Hughson, R., Levine, B. D., Mehran, R., Stachenfeld, N. & Wenger, N. K. 2014. Effects of sex and gender on adaptation to space: Cardiovascular alterations. *Journal of Women's Health* 23(11): 950–955. <https://doi.org/10.1089/JWH.2014.4912>
- Rossum, A. C., Wood, M. L., Bishop, S. L., Deblock, H. & Charles, J. B. 1997. Evaluation of cardiac rhythm disturbances during extravehicular activity. *American Journal of Cardiology* 79(8): 1153–1155. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(97\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(97)00071-4)
- Roth, G. A., Mensah, G. A., Johnson, C. O., Addolorato, G., Ammirati, E., Baddour, L. M., Barengo, N. C., Beaton, A., Benjamin, E. J., Benziger, C. P., Bonny, A., Brauer, M., Brodmann, M., Cahill, T. J., Carapetis, J. R., Catapano, A. L., Chugh, S., Cooper, L. T., Coresh, J. & Fuster, V. 2020. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: Update from the GBD 2019 Study. *Journal of the American College of Cardiology* 76(25): 2982–3021. <https://doi.org/10.1016/J.JACC.2020.11.010>

- Salleh, N. I., Azudin, K., Gan, K. B., Ja'afar, M. H. & Mohamad, M. S. F. 2024. Remote cardiorespiratory monitoring with an in-ear PPG device. *Springer Proceedings in Physics* 303: 323–335. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0142-1_32
- Saranya, K., Karthikeyan, U., Kumar, A. S., Salau, A. O. & Tin Tin, T. 2025. DenseNet-ABiLSTM: Revolutionizing multiclass arrhythmia detection and classification using hybrid deep learning approach leveraging PPG signals. *International Journal of Computational Intelligence Systems* 18(1): 1–19. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44196-025-00765-z>
- Summers, R. L., Martin, D. S., Meck, J. V. & Coleman, T. G. 2005. Mechanism of spaceflight-induced changes in left ventricular mass. *American Journal of Cardiology* 95(9): 1128–1130. <https://doi.org/10.1016/J.AMJCARD.2005.01.033>
- Sun, B., Wang, C., Chen, X., Zhang, Y. & Shao, H. 2019. PPG signal motion artifacts correction algorithm based on feature estimation. *Optik* 176: 337–349. <https://doi.org/10.1016/J.IJLEO.2018.09.085>
- Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M. & Yoshida, M. 2014. Wearable photoplethysmographic sensors: Past and present. *Electronics* 3(2): 282–302. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS3020282>
- Vatterott, P. J. & G. A. G. 1991. Arrhythmias and acute myocardial infarction. *Postgraduate Medicine* 90(6): 85–88, 93–96.
- Venema, B., Blazek, V. & Leonhardt, S. 2015. In-ear photoplethysmography for mobile cardiorespiratory monitoring and alarming. *2015 IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN 2015)*. <https://doi.org/10.1109/BSN.2015.7299367>
- Verbrugge, F. H., Guazzi, M., Testani, J. M. & Borlaug, B. A. 2020. Altered hemodynamics and end-organ damage in heart failure: Impact on the lung and kidney. *Circulation* 142(10): 998–1012. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.119.045409>
- Wang, L., Pickwell-MacPherson, E., Liang, Y. P. & Zhang, Y. T. 2009. Noninvasive cardiac output estimation using a novel photoplethysmogram index. *Proceedings of the 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society: Engineering the Future of Biomedicine (EMBC 2009)*, 1746–1749. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2009.5333091>
- Wang, Z., Fan, J., Dai, Y., Zheng, H., Wang, P., Chen, H. & Wu, Z. 2024. Intelligent detection method of atrial fibrillation by CEPNCC-BiLSTM based on long-term photoplethysmography data. *Sensors* 24(16). <https://doi.org/10.3390/S24165243>