

**PENGAPLIKASIAN INTERNET OF THINGS (IOT) DALAM KELESTARIAN
PEMULIHARAAN HAIWAN TERANCAM DI MALAYSIA: KAJIAN KES
TERHADAP SISTEM PEMANTAUAN ANAK PENYU DI
PULAU BAKUNGAN, SANDAKAN SABAH**

**THE APPLICATION OF THE INTERNET OF THINGS (IOT) IN THE
SUSTAINABLE CONSERVATION OF ENDANGERED WILDLIFE IN
MALAYSIA: A CASE STUDY OF THE SEA TURTLE HATCHLING
MONITORING SYSTEM ON BAKUNGAN ISLAND,
SANDAKAN, SABAH**

M. Malik Ag Rasin

Calon PhD di Program Sejarah, Fakulti Sains Sosial & Kemanusiaan, Universiti
Malaysia Sabah, Jalan UMS, 88400 Kota Kinabalu, Sabah
Email: almaliki@ums.edu.my

Ismail Ali

Pusat Penataran Ilmu & Bahasa, Universiti Malaysia Sabah, Jalan UMS,
88400 Kota Kinabalu, Sabah
Email: ismailrc@ums.edu.my

Mosli Tarsat

Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan, Universiti Malaysia Sabah, Jalan UMS,
88400 Kota Kinabalu, Sabah
Email: mos_79@ums.edu.my

Awang Bono

Faculty of Business Management & IT, Universiti Muhammadiyah Malaysia, Padang
Besar, 02100, Perlis
Email: awangbono@umam.edu.my

Corresponding author: *almaliki@ums.edu.my

Dihantar: 5 Oktober 2025/ Diterima: 25 Nobemberr 2025/ Terbit: 31 Disember 2025

Abstrak

Pengintegrasian teknologi *Internet of Things (IoT)* dalam bidang pemuliharaan hidupan liar semakin mendapat perhatian sebagai pendekatan baharu yang mampu meningkatkan keberkesanan pengurusan spesies terancam. Dalam konteks Malaysia, penyu merupakan antara spesies marin yang paling kritikal dari segi kelangsungan populasi, khususnya di kawasan pendaratan utama seperti Pulau Bakungan, Sandakan Sabah. Kajian ini meneliti keberkesanan sistem pemantauan berasaskan IoT dalam mengurus sarang dan anak penyu, di samping menilai penerimaan komuniti serta implikasi sosial yang timbul daripada penggunaan teknologi tersebut. Menggunakan reka bentuk kajian kualitatif melalui temu bual separa berstruktur, pemerhatian lapangan, dan analisis dokumen, kajian ini mendapati bahawa IoT berupaya menyediakan data suhu sarang yang lebih tepat, membolehkan pemantauan masa nyata, dan mengurangkan kebergantungan kepada kaedah

manual yang sering terdedah kepada ralat manusia. Dapatan turut menunjukkan bahawa penerimaan komuniti terhadap teknologi adalah positif, namun dipengaruhi oleh faktor seperti literasi digital, sokongan institusi, dan keberlanjutan kos penyelenggaraan. Cabaran teknikal seperti kestabilan rangkaian, ketahanan *sensor*, dan kebergantungan kepada tenaga solar turut dikenal pasti sebagai kekangan utama. Secara keseluruhan, kajian ini menegaskan bahawa pengaplikasian IoT bukan sahaja meningkatkan kecekapan konservasi, tetapi juga membuka ruang kepada pendekatan pengurusan berasaskan data yang lebih sistematik. Namun, kejayaan jangka panjang memerlukan integrasi antara teknologi, pengetahuan tempatan, dan dasar pemuliharaan maritim yang lebih menyeluruh.

Kata kunci: Internet of Things (IoT), pemuliharaan penyu, Pulau Bakungan, teknologi maritim, Sandakan

Pengenalan

Secara amnya, Pulau Bakungan terbahagi kepada dua buah pulau yang dibahagikan kepada dua sempadan politik iaitu Bakungan Kecil (Malaysia) dan Bakungan Besar (Filipina). Jarak antara kedua-dua buah pulau hanyalah sekitar 15-20 minit menggunakan medium laut, bergantung kepada gelora ombak. Kedua-dua pulau juga dipisahkan dengan pembinaan bagang yang didirikan bagi tujuan penangkapan ikan bilis selain sebagai penanda garis pemisah politik antara Malaysia-Filipina. Masyarakat yang mendiami Pulau Bakungan Besar terdiri daripada suku kaum Bajao atau Badjau yang juga rakyat Filipina. Namun begitu, semasa kajian ini dijalankan, penyelidik juga mendapati bahawa terdapat rakyat Malaysia turut mendiami pulau berkenaan kerana mempunyai pertalian saudara dengan masyarakat di sana.

Dari segi geo-maritim, Pulau Bakungan Kecil terletak di kedudukan 6°10' N Latitud, 118°7' E Longitud dan merupakan habitat semulajadi kepada beberapa spesis marin yang dilindungi (Mohd Harun Abdullah & Baba Musa, 1999: 1-9). di bawah program Dana Hidupan Liar Sedunia atau World wildlife Fund (WWF). Perairan pulau ini juga menerima hujan lebat semasa bertiup antara bulan bulan November sehingga Mac, manakala kurang hujan pada bulan April sehingga September. Dunia mengenali pulau ini sebagai sebuah pulau yang menempatkan diversiti hidupan marin yang begitu tinggi nilainya. Pulau Bakungan Kecil kaya dengan keindahan biodiversiti marin dan pihak kerajaan amat menitikberatkan penjagaan alam semulajadi yang menjadi habitat kepada hidupan marin terutamanya penyu. Sejarah pengeksploitasian sumber marin di Sandakan menerangkan bahawa aktiviti penangkapan penyu dan pengutipan telur penyu telah lama menjadi sebahagian daripada ekonomi pesisir sebelum kedatangan kuasa kolonial. Namun, kegiatan ini menjadi lebih tersusun selepas penubuhan British North Borneo Chartered Company (BNBCC) pada tahun 1881, apabila syarikat tersebut diberi kuasa mentadbir dan mengeksploitasi sumber asli Borneo Utara.

Sandakan, yang diangkat sebagai ibu pejabat pentadbiran pada tahun 1884, berkembang pesat sebagai pelabuhan utama dan pusat perdagangan hasil laut, termasuk penyu dan telur penyu yang mempunyai nilai komersial tinggi pada ketika itu (BNBH, 1 Ogos 1883). Berdasarkan *British North Borneo Herald*, perdagangan telur penyu direkodkan secara konsisten sejak dekad 1880-an, khususnya di pulau-pulau kecil berhampiran Sandakan seperti Pulau Bakungan dan Pulau Libaran. Akhbar tersebut sering melaporkan hasil kutipan telur penyu yang dilelong atau diserahkan

kepada pihak berlesen, mencerminkan kepentingannya sebagai komoditi ekonomi yang diiktiraf oleh pentadbiran kolonial. Laporan tahunan BNBBCC turut menyatakan bahawa hasil laut, termasuk penyu, merupakan antara sumber pendapatan yang dikenakan lesen dan cukai, sekali gus menunjukkan bahawa eksploitasi penyu bukan sekadar aktiviti ekonomi komuniti tempatan, tetapi juga sebahagian daripada strategi fiskal syarikat kolonial.

Rekod Colonial Office (CO), khususnya siri CO 531 dan CO 874, mengandungi surat-menyurat rasmi antara BNBBCC dan Pejabat Tanah Jajahan di London. Walaupun tidak semua fail merujuk secara langsung kepada penyu, dokumen-dokumen tersebut memperincikan dasar eksploitasi sumber asli, termasuk kawal selia terhadap hasil laut dan hak pengutipan yang diberikan kepada individu atau komuniti tertentu. Hak eksklusif ini sering digunakan sebagai alat pentadbiran untuk mengawal hubungan antara pemerintah kolonial dan penduduk tempatan, di samping memastikan aliran hasil yang stabil kepada syarikat.

Bagi komuniti pesisir Sandakan, penangkapan penyu dan pengutipan telur penyu bukan sahaja menjadi sumber pendapatan, tetapi juga sebahagian daripada ekonomi sara hidup yang diwarisi turun-temurun. Aktiviti ini menyediakan peluang pekerjaan bermusim, terutama kepada masyarakat Bajau dan Suluk yang tinggal di kawasan pesisir dan pulau-pulau kecil.⁵ Bagi pemerintah kolonial pula, kegiatan ini menawarkan dua manfaat utama: pertama, sebagai sumber pendapatan melalui sistem lesen dan kutipan hasil; kedua, sebagai mekanisme untuk mengawal mobiliti dan aktiviti ekonomi komuniti pesisir melalui pemberian hak eksklusif yang boleh ditarik balik.

Sarjana sejarah dan sains sosial turut menekankan bahawa eksploitasi penyu pada era BNBBCC mencerminkan struktur ekonomi kolonial yang berasaskan pengumpulan hasil semula jadi. Suribidari Samad, misalnya, menegaskan bahawa pembangunan pelabuhan Sandakan pada awal abad ke-20 bertujuan menyokong perdagangan komoditi pesisir, termasuk hasil laut bernilai tinggi.⁷ Kajian lain mengenai sejarah maritim Sabah menunjukkan bahawa penyu merupakan antara spesies yang paling banyak dieksploitasi sebelum wujudnya dasar pemuliharaan moden.⁸ Eksploitasi intensif pada era BNBBCC turut meninggalkan kesan jangka panjang terhadap populasi penyu di Sandakan, sekali gus menjadikan usaha pemuliharaan moden termasuk penggunaan teknologi seperti Internet of Things (IoT) lebih mendesak dan signifikan.

Sorotan Literatur

Perbincangan pemuliharaan penyu di Sabah merupakan bidang penyelidikan yang melibatkan pelbagai disiplin, termasuklah bidang biologi pemuliharaan, ekologi marin, sains sosial, dan pengurusan sumber. Literatur akademik menunjukkan bahawa usaha konservasi di Sabah telah melalui transformasi besar sejak beberapa dekad lalu, daripada pendekatan berasaskan perlindungan habitat semata-mata kepada pendekatan holistik yang menggabungkan data saintifik, penglibatan komuniti, dan kerangka dasar yang lebih menyeluruh. Di dalam memahami hasil dapatan terdahulu yang berkait rapat dengan kajian ini, sorotan literatur dicerakinkan dalam empat tema perbincangan iaitu penyelidikan biologi dan ekologi penyu, pemuliharaan berasaskan komuniti dan perspektif sains sosial, peranan institusi dan dasar konservasi, serta integrasi teknologi dalam pemantauan penyu.

Daripada perspektif kajian sains tulin, Juanita Joseph (2014) menjalankan kajian mengenai tingkah laku migrasi, ekologi sarang, dan ancaman antropogenik terhadap penyu hijau (*Chelonia mydas*) dan penyu karah (*Eretmochelys imbricata*) (Joseph, J, 2014). Kajian ini dijalankan dengan menggunakan sistem pemantauan satelit yang meneliti pergerakan migrasi spesies penyu tersebut merentasi sempadan Filipina dan Indonesia. Penyelidikan turut membincangkan analisa terhadap suhu sarang yang menjadi faktor pemboleh ubah dalam menentukan jantina anak penyu dan ini menjadikan pemantauan suhu sebagai komponen kritikal dalam konteks perubahan iklim di kawasan perairan Sandakan.

Kajian daripada Mohd Harun Abdullah dan Baba Musta (1999) bertajuk *Phreatic Water Quality of the Turtle Islands of East Malaysia: Pulau Selingan and Pulau Bakkungan Kechil* menjelaskan bahawa pemantauan kepada kelestarian penyu pula dipengaruhi oleh kualiti air yang terdapat di di Pulau Bakungan (Mohd Harun Abdullah & Baba Musta, 1999: 1-9). Kajian dijalankan dengan mengambil sampel air dan diuji secara makmal untuk mendapatkan data suhu serta mengukur kepekatan ion hidrogen dalam larutan. Menurut kajian, kaedah saintifik ini penting kerana kepekatan ion hydrogen dapat mempengaruhi tumbesaran embrio dan kadar penetasan anak penyu sebelum dilepaskan di lautan terbuka.

Gavin Jolis *et al.* (2023) dalam kajian bertajuk *Marine Turtle Nesting and Hatching in Tun Mustapha Park, Malaysia, Revealed by Community-Based Monitoring*, membincangkan dapatan penting mengenai pola pendaratan dan penetasan penyu di Taman Tun Mustapha melalui program pemantauan berasaskan komuniti (Gavin Jolls, et.al, 2023: 275-289). Kajian ini menunjukkan bahawa data jangka panjang yang dikumpul oleh komuniti tempatan boleh menyokong penyelidikan saintifik dan membantu mengenal pasti ancaman seperti pemangsa, pencemaran, dan gangguan manusia. Kajian-kajian lain yang dijalankan di kawasan seperti Sipadan dan Semporna turut menekankan kepentingan perlindungan habitat pantai, pengurusan pencahayaan, dan kawalan pencerobohan manusia sebagai faktor utama kejayaan penetasan.

Dari sudut sains sosial, pemuliharaan penyu di Sabah semakin dilihat sebagai isu yang melibatkan nilai budaya, struktur sosial, dan hubungan kuasa antara komuniti dan institusi. Artikel akademik yang ditulis oleh Ismail Ali *et all* (2023) bertajuk *Conservation And Sustainability of Turtle From The Perspective of Social Science In Bakungan Kecil Island, Sandakan, Sabah, Malaysia* meneliti bagaimana komuniti pesisir memahami kepentingan penyu, tahap kesedaran mereka terhadap ancaman semasa, dan bentuk penglibatan mereka dalam aktiviti konservasi (Ismail Ali, Mosli Tarsat& Encep Supriantna 2023). Dapatan menunjukkan bahawa kejayaan pemuliharaan tidak hanya bergantung kepada peraturan atau sains biologi, tetapi juga kepada penerimaan sosial, pendidikan alam sekitar, dan kesediaan komuniti untuk menyesuaikan amalan tradisional.

Pendekatan ini selari dengan teori sains sosial yang menekankan bahawa konservasi merupakan proses sosial yang dipengaruhi oleh faktor ekonomi, budaya, dan institusi. Fikret Berkes *et all* (2003) menjelaskan bahawa biodiversiti antara manusia dan ekologi mewujudkan kebergantungan dan membentuk satu sistem bersepadu yang sentiasa berinteraksi dan dinamik (Fikret Berkes, Johan Colding & Carl Folke, 2004). Dalam konteks ini, kelestarian bukan semata-mata bergantung kepada perlindungan biologi spesies, tetapi sejauhmana hubungan antara faktor

ekologi, ekonomi, budaya, institusi, dan pengetahuan itu diurus secara bersistematik. Teori ini juga menjelaskan bahawa kegagalan konservasi sering berpunca daripada pemisahan peranan manusia daripada alam sekitar. Dalam konteks pemuliharaan penyu sebagai haiwan maritim yang terancam, masalah populasi yang semakin meruncing bukan sahaja disebabkan oleh faktor semula jadi, tetapi juga oleh aktiviti ekonomi komuniti pesisir, nilai budaya setempat, serta dasar dan institusi yang mengawal penggunaan sumber. Oleh itu, kelestarian penyu perlu difahami sebagai sebahagian daripada sistem sosio-ekologi yang lebih luas, di mana perubahan dalam struktur ekonomi atau dasar pembangunan boleh memberi kesan langsung terhadap keberkesanan usaha konservasi.

Dalam membincangkan fungsi dan sumbangan IoT dalam keberkesanan sistem pemantauan penyu, Ratnesh Kumar Choudhary (2020) dalam penulisan artikelnya bertajuk *Internet of Things: Wildlife Conservation and its Challenges* menjelaskan bahawa aspek IoT berpotensi memperkasakan sistem pemantauan hidupan liar tanpa perlu mengeluarkan belanja yang besar (Ratnesh Kumar Choudhary, 2020: 8-13). Namun begitu kerjasama antara pembuat dasar, agensi pelaksana dan komuniti setempat amat diperlukan agar agenda kelestarian ini berjalan beriringan.

Metadologi

Kajian ini dirancang sebagai sebuah kajian kes yang memberi tumpuan kepada Pulau Bakungan di Sandakan, Sabah, iaitu salah satu lokasi penting bagi pemuliharaan penyu di Malaysia. Pendekatan yang digunakan adalah bersifat gabungan kuantitatif dan kualitatif kerana isu pemuliharaan tidak hanya berkisar pada angka dan data, tetapi juga melibatkan pengalaman, persepsi, dan komitmen manusia yang terlibat dalam aspek pengurusan konservasi. Di lapangan, pemerhatian dilakukan terhadap sistem pemantauan berasaskan Internet of Things (IoT) yang digunakan untuk memantau sarang penyu, termasuk sensor suhu pasir, kamera, dan GPS tracker. Pemerhatian ini bukan sahaja bertujuan merekod data teknikal, tetapi juga untuk memahami bagaimana teknologi ini benar-benar berfungsi dalam konteks ekologi yang rapuh. Selain itu, temu bual separa berstruktur dijalankan bersama kakitangan Taman-Taman Sabah yang terdiri daripada pegawai pengurusan dan petugas konservasi (ranjer) yang terlibat secara langsung di tapak konservasi tersebut. Temu bual ini memberi ruang kepada suara manusia yang berada di barisan hadapan pemuliharaan, agar pengalaman mereka sama ada dari segi cabaran, harapan, atau pandangan terhadap teknologi semasa memberi impak positif kepada pengurusan konservasi. Soal selidik turut dijalankan untuk mendapatkan gambaran lebih luas tentang keberkesanan sistem IoT dalam pemantauan species haiwan terancam. Data sekunder pula diperoleh daripada laporan rasmi, artikel jurnal, dan dokumen teknikal, yang membantu membina kerangka perbandingan antara teori dan realiti di lapangan.

Analisis data dilakukan dengan dua pendekatan iaitu kuantitatif melalui statistik deskriptif bagi menilai kadar penetasan dan survival rate anak penyu, serta kualitatif melalui analisis tematik daripada temu bual. Gabungan ini membolehkan kajian bukan sahaja menjawab persoalan berapa banyak anak penyu yang berjaya menetas, bahkan sejauhmana komuniti melihat teknologi sebagai sebahagian daripada usaha kelestarian. Kerangka teori yang digunakan merangkumi konsep Teknologi Hijau, Matlamat Pembangunan Mampan (SDG 14: Life Below Water), dan

Model Penerimaan Teknologi (TAM), yang bersama-sama membantu menilai keberkesanan dan penerimaan IoT dalam konteks pemuliharaan.

Perbincangan & Dapatan Kajian

Menurut laporan yang dikeluarkan oleh Pertubuhan Hidupan Liar Dunia atau World Wildlife (WWF) yang dikemaskini sehingga Oktober 2022, sebanyak tujuh spesis penyu telah dikenalpasti dan direkodkan seperti berikut:

Jadual 1: Maklumat Spesis Penyu di Perairan Dunia

No	Nama Komersil	Nama Saintifik	Ukuran badan (Inci)	Lingkungan Perairan
1	Penyu Belimbing (Leatherback)	<i>Dermochelys coriacea</i>	55-63	Zon Tropika hingga sub-Artik, habitat di perairan di setiap benua selain Antartika. Spesis penyu ini tidak hanya tertumpu di satu tempat malah berhijrah secara meluas untuk mencari makanan.
2	Penyu Tempayan (Loggerhead)	<i>Caretta caretta</i>	33-49	Perairan Tropika dan Subtropika di seluruh dunia, berhijrah ke semua perairan untuk mencari makanan
3	Penyu Hijau (Green Turtle)	<i>Chelonia mydas</i>	31-47	Kebanyakannya ditemui di zon Tropika dan kurang di zon Subtropika
4	Penyu Pipih (Flatback)	<i>Natator depressus</i>	31-37	Zon pantai Subtropika di pinggir utara, timur laut dan barat laut Australia, hingga ke perairan di selatan Papua New Guinea.
5	Penyu Sisik (Hawksbill)	<i>Eretmochelys imbricata</i>	30-35	Perairan tropika dan subtropika di seluruh dunia. Kebanyakannya di perairan pantai, zon berbatu, terumbu karang dan muara bakau.
6	Kemp's Ridley	<i>Lepidochelys kempii</i>	24-28	Perairan Tropika hingga Pantai Timur Amerika Syarikat (Teluk Mexico ke Atlantik)
7	Penyu Lipas (Olive Ridley)	<i>Lepidochelys olivacea</i>	24-28	Perairan tropika dan subtropika di seluruh lautan terbuka

Sumber: Diubahsuai daripada Laporan World Wildlife Fund, 2022 & Laporan Tahunan Upwell, 2021

Penyu merupakan hidupan asas dalam kitaran ekosistem marin di laut dan membantu mengekalkan kesegaran rumput laut dan terumbu karang yang memberi manfaat biologi kepada hidupan komersial yang lain seperti udang laut, udang galah dan tuna. Hidupan ini terus diancam oleh aktiviti manusia seperti pengambilan telur,

pemburuan haram, aktiviti perikanan, pencemaran laut dan kerosakan habitat. Selain itu, hasil pemerhatian penyelidik di lapangan mendapati bahawa prosedur pelepasan anak-anak penyu ke laut terbuka akan lebih terancam kerana menjadi makanan kepada pemangsa-pemangsa yang terdapat di kawasan sekitar seperti ikan-ikan besar, biawak laut dan memerang laut.

Aktiviti pemuliharaan penyu telah berkembang di negara ini sejak tahun 70-an dengan telah diwartakan sebagai haiwan perlindungan di bawah Enakmen Taman-Taman Sabah (Pindaan) 1996, Enakmen Hidupan Liar Sabah 1997 dan Akta Perikanan Malaysia 1985 (Ismail Ali *et al*, 2010). Peruntukan undang-undang ini membuktikan bahawa pihak kerajaan Malaysia amat memandang serius akan perihail perlindungan terhadap hidupan terancam agar risiko kepupusan spesies tersebut dapat diatasi. Telur penyu dikutip oleh petugas-petugas Taman-Taman Sabah atau dikenali sebagai *ranjer* bermula jam 8 malam pada setiap hari secara berjadual yang diselia oleh pihak pengurusan yang berpejabat di Pulau Bakkungan tersebut. Rekod penggiliran ini dihantar ke ibu pejabat di Kota Kinabalu agar setiap pergerakan dan rutin harian tugas dipantau bagi tujuan fail dan keselamatan. Telur-telur penyu yang dikutip dicatat dan diletakkan di tapak penetasan telur. Melihat kepada tapak penetasan yang dibina secara terbuka dan mudah untuk dicerobohi, ianya secara tidak langsung terdedah kepada ancaman haiwan pemangsa seperti memerang dan biawak.

Kajian turut mendapati beberapa cabaran yang perlu dinilai semula samada di peringkat dasar ataupun pelaksanaan operasi konservasi. Contohnya dari segi sumber manusia. Bilangan petugas (*ranjer*) didapati tidak seimbang jika dibandingkan dengan beban tugas terutama yang melibatkan proses pengumpulan telur-telur penyu pada waktu malam, memantau sarang telur secara fizikal dan kerja-kerja perekodan. Dari aspek teknologi pula, walaupun sistem berasaskan Internet of Things (IoT) seperti sensor suhu, kamera pintar, dan Sistem Kedudukan Sejagat atau Global Positioning Systems (GPS) telah diperkenalkan, cabaran tetap wujud dalam konteks pengesanan dan pemantauan anak-anak penyu. Kedudukan Pulau Bakkungan yang jauh menyukarkan capaian internet dan ini secara langsung mengekang sistem pemantauan yang berteraskan kepada pengaplikasian elemen IoT. Kos pemasangan dan penyelenggaraan juga sangat tinggi menyebabkan sokongan kewangan berterusan daripada pihak berwajib sukar untuk diperolehi.

Suhu pasir yang semakin meningkat akibat pemanasan global boleh mengganggu nisbah jantina anak penyu. Suhu pasir merupakan rekod penentu kepada pertumbuhan telur-telur penyu yang diletakkan di tapak penetasan. Jantina anak penyu ditentukan oleh suhu inkubasi telur di dalam pasir. Suhu yang lebih rendah biasanya menghasilkan anak penyu jantan, manakala suhu yang lebih tinggi menghasilkan anak penyu betina. Dalam keadaan normal, keseimbangan suhu ini memastikan populasi penyu mempunyai nisbah jantina yang seimbang. Namun, pemanasan global telah mengubah landskap ini. Pasir pantai yang semakin panas akibat peningkatan suhu bumi menyebabkan lebih banyak anak penyu betina dilahirkan, sekali gus menimbulkan risiko kepada kelangsungan populasi jangka panjang. Kajian Sarahaizad *et al* (2018) mendapati bahawa suhu pasir dan saiz partikel pasir memainkan peranan besar dalam kejayaan penetasan, sekali gus mempengaruhi nisbah jantina anak penyu hijau (Sarahaizad Mohd Salleh, Hideaki Nishizawa, Takashi Ishihara, *et al.*, 2018). Begitu juga dengan kajian Wyneken & Lolavar (2015), menunjukkan bahawa perubahan suhu dan kelembapan pasir boleh

mengubah respons fisiologi embrio, menyebabkan ketidakseimbangan jantina yang ketara (Wyneken, J., & Lolavar, A. 2015).

Gambar 1: Tapak penetasan telur



Sumber: Lapangan Kajian, 16 November 2021

Di sinilah teknologi dan manusia perlu bergabung tenaga. Sensor IoT yang dipasang di sarang boleh memberi amaran awal apabila suhu pasir melebihi tahap optimum. Namun, data sahaja tidak mencukupi dan ianya memerlukan tindakan segera daripada manusia. Antara langkah yang boleh diambil termasuk memindahkan telur ke kawasan yang lebih teduh, menggunakan penutup pelindung untuk mengurangkan pendedahan haba, atau mengalihkan sebahagian telur ke pusat inkubasi terkawal. Semua ini memerlukan komitmen, kos, dan tenaga kerja, tetapi ia adalah usaha penting untuk memastikan kelestarian kehidupan penyu.

Faktor perubahan iklim seperti ribut, hujan lebat, dan banjir kecil memberi kesan besar kepada kelestarian perkembangan penyu. Hujan lebat boleh menyebabkan sarang ditenggelami air, manakala ribut pantai berpotensi merosakkan struktur pasir yang melindungi telur. Keadaan ini bukan sahaja menjejaskan survival anak penyu, tetapi juga menyukarkan pemantauan kerana data yang dikumpul sering terganggu oleh faktor cuaca ekstrem. Cabaran iklim ini menuntut pemantauan yang lebih teliti dan berterusan. Walaupun teknologi seperti sensor IoT mampu merekod suhu dan kelembapan pasir secara masa nyata, data tersebut hanya bermakna jika disusuli dengan tindakan segera. Intervensi seperti pemindahan telur ke pusat inkubasi terkawal atau perlindungan sarang dengan penutup khas perlu dilakukan bagi memastikan kelancaran sistem pemantauan.

Pada 4 Disember 2021 telah berlaku angin kuat, ombak besar dan pasang surut yang melanda perairan Pulau Bakungan Kecil. Fenomena ini telah mengakibatkan kerosakan total terhadap struktur sangkar penyelidikan anak-anak penyu dengan jumlah kerugian kira-kira RM 5,000. Salain itu, kira-kira 10 ekor anak-anak penyu juga terlepas disebabkan arus yang membawa ke lautan terbuka.

**Gambar 2: Keadaan sangkar pertama semasa kejadian pasang surut pada
4 Disember 2021**



Sumber: Kajian Lapangan, 4 Disember 2021

Pemerhatian empirical di lapangan juga mendapati bahawa, anak penyu yang baru menetas terdedah kepada bahaya pelbagai haiwan pemangsa seperti biawak, burung camar, memerang ketam pantai dan ikan-ikan yang lebih besar. Kehadiran pemangsa ini secara langsung menjejaskan kadar kelangsungan hidup anak penyu, yang secara purata hanya sekitar 1–2% berjaya mencapai usia dewasa. Cabaran ini bukan sahaja memberi kesan kepada data pemantauan, tetapi juga menimbulkan dilema dalam strategi pemuliharaan.

Gambar 3: Pelepasan Anak penyu ke laut



Sumber: Lapangan Kajian, 16 November 2021

Walaupun teknologi Internet of Things (IoT) telah terbukti berkesan dalam pemantauan hidupan liar terancam di pelbagai negara seperti Australia, Costa Rica, dan Maldives, aplikasi sistem IoT bersepadu yang merangkumi sensor suhu, kamera

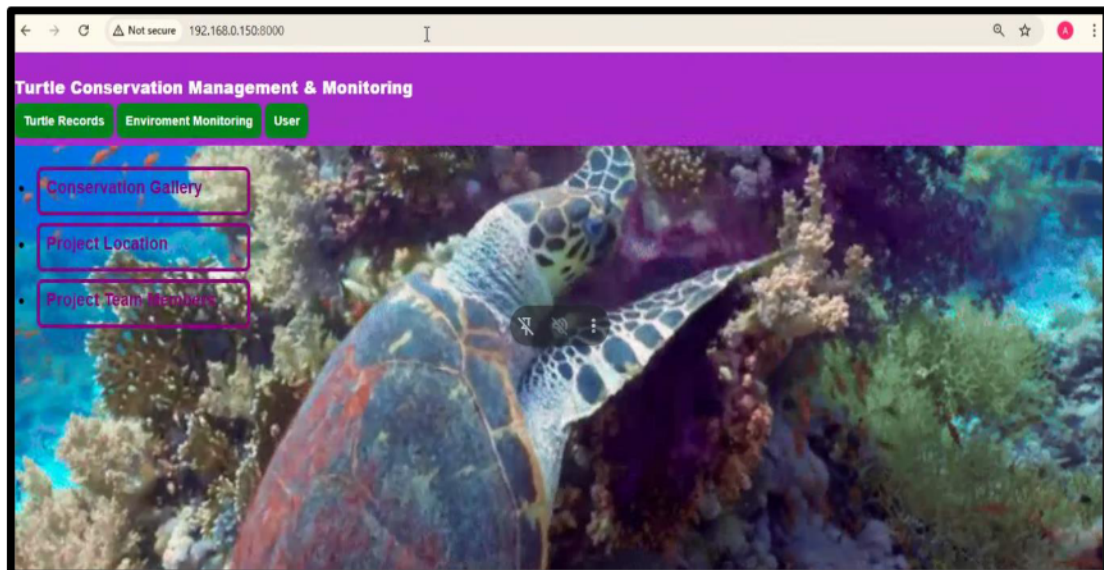
inframerah, pengesanan gerakan, dan penghantaran data jarak jauh masih belum pernah dibangunkan dan diuji secara empirikal dalam konteks pantai tropika Malaysia, terutamanya di kawasan terpencil seperti Pulau Bakungan. Ketiadaan bukti saintifik tempatan ini menyebabkan pengurusan pemuliharaan penyu di Sabah terus bergantung kepada kaedah tradisional yang kurang efisien, seterusnya menghalang pencapaian matlamat yang disasarkan dalam World Wildlife Federation (WWF) Malaysia serta Matlamat Pembangunan Mampan atau Sustainable Development Goal (SDG) ke-14 iaitu Kehidupan di Bawah Air. Oleh itu, wujud jurang penyelidikan dan aplikasi praktikal yang ketara berkaitan keberkesanan meningkatkan kadar kelangsungan hidup anak penyu di lokasi terpencil terutama di Pulau Bakungan, Sandakan.

Bertitik tolak daripada perbincangan ini, Pengaplikasian Internet of Things (IoT) dilihat mampu mengatasi beberapa isu yang dibincangkan dalam pemantauan anak penyu di Pulau Bakungan. IoT boleh difahami sebagai satu ekosistem teknologi yang menggabungkan bidang kejuruteraan elektronik, sains komputer, dan komunikasi data. Ia membolehkan penciptaan sistem pemantauan masa nyata yang lebih efisien, di mana data daripada pelbagai sensor dapat diproses secara automatik untuk menghasilkan maklumat yang berguna. Contohnya, dalam konteks pemuliharaan penyu di Pulau Bakungan, sensor IoT boleh dipasang di sarang untuk merekod suhu pasir, kamera pintar boleh memantau pergerakan anak penyu, dan GPS tracker boleh menjejaki laluan migrasi. Semua data ini dihantar ke platform penyimpanan data yang dikenali sebagai *cloud* untuk dianalisis dan membolehkan tindakan intervensi dilakukan dengan lebih cepat dan berasaskan rekod masa nyata (*real time*). Sensor IoT yang dipasang di sarang berfungsi merekodkan perubahan suhu secara berterusan, dan data tersebut dihantar ke pangkalan awan untuk dianalisis. Melalui mekanisme ini, pengurus pemuliharaan dapat mengenal pasti risiko awal, seperti peningkatan suhu pasir akibat perubahan iklim, lalu melaksanakan intervensi yang sesuai.

Selain sensor, kamera pintar berasaskan IoT turut memainkan peranan dalam memantau pergerakan anak penyu selepas menetas. Kamera dengan pengesanan gerakan membolehkan pemantauan dilakukan tanpa gangguan langsung terhadap habitat semula jadi, dan rakaman visual yang diperolehi bukan sahaja menyumbang kepada data saintifik, tetapi juga berfungsi sebagai bukti empirikal terhadap ancaman pemangsa atau gangguan antropogenik. Di samping itu, penggunaan GPS tracker miniatur pada sebahagian anak penyu atau induk penyu membolehkan laluan migrasi direkodkan secara sistematik. Data lokasi masa nyata ini memberi gambaran saintifik tentang corak migrasi penyu, yang penting untuk merangka strategi pemuliharaan transnasional.

Kesemua data daripada sensor, kamera, dan GPS diintegrasikan melalui platform IoT yang dibangunkan atas talian. Contoh platform IoT yang dibangunkan dan memangkin kepada usaha pemantauan adalah seperti "*Sea Turtle Conservation Management & Monitoring*". Platform ini merupakan satu sistem pemantauan data berasaskan penyimpanan dalam *cloud* yang bukan sahaja memudahkan analisis saintifik, tetapi juga membolehkan perkongsian maklumat secara kolaboratif antara penyelidik dan pihak yang berkepentingan. Dengan adanya sistem amaran awal berasaskan IoT ini, notifikasi segera dapat dihantar sekiranya berlaku ancaman terhadap sarang penyu, membolehkan tindakan pantas diambil.

Gambar 4: Sistem Pemantauan & Pangkalan Data "Sea Turtle Conservation Management & Monitoring"



Sistem IoT ini mampu menjalankan pemantauan secara jarak jauh (*remote monitoring*) dengan kelebihan penyimpanan data secara lebih efisien dan jimat. Petugas hanya masuk ke platform ini tanpa had masa dan berupaya untuk menyimpan data melebihi kapasiti sedia ada. Dengan kaedah ini, sumber manusia dapat dioptimumkan dengan kapasiti tugas yang sewajarnya. Data yang signifikan merangkumi suhu pasir (*ground temperature*), jumlah air di pasir (*ground water level*), taburan hujan harian (*daily rainfall*), suhu udara (*air temperature*), tekanan udara (*atmosphere temperature*) dan kelembapan udara (*air humidity*).

Gambar 5: Kategori Data yang Dipantau



Setiap kategori mempunyai peringkat amaran yang tersendiri. Sekiranya data yang dicatatkan menghampiri atau berada pada peringkat amaran tersebut, pengesan atau sensor diaktifkan dan memberikan notifikasi agar penyesuaian atau pemindahan anak-anak penyu dapat dilakukan.

Kesimpulan

Pengaplikasian IoT dalam sistem pemantauan anak penyu di Pulau Bakungan, Sandakan, Sabah memperlihatkan bahawa teknologi moden mampu menjadi instrumen yang dapat melancarkan lagi usaha pemuliharaan biodiversiti marin. Perbincangan yang telah dilakukan memperlihatkan bahawa cabaran utama pemantauan anak penyu merangkumi aspek sumber manusia yang terhad, teknologi yang memerlukan kos dan penyelenggaraan berterusan, perubahan iklim yang menjejaskan suhu pasir serta nisbah jantina anak penyu, dan ancaman daripada haiwan pemangsa. Walau bagaimanapun, IoT menawarkan pendekatan saintifik yang lebih sistematik dan berkesan untuk mengatasi cabaran ini.

Sensor suhu dan kelembapan pasir yang dipasang di sarang penyu membolehkan data dikumpul secara masa nyata, sekali gus membantu pengurus pemuliharaan mengenal pasti risiko awal dan melaksanakan intervensi segera. Kamera pintar berasaskan IoT pula menyediakan bukti visual tentang pergerakan anak penyu dan ancaman pemangsa, manakala GPS tracker miniatur membolehkan laluan migrasi direkodkan secara saintifik untuk tujuan analisis jangka panjang. Kesemua data ini diintegrasikan melalui platform pengurusan berasaskan awan, yang bukan sahaja memudahkan analisis saintifik tetapi juga memperkuat kerjasama antara penyelidik, NGO, dan pihak berkuasa.

Pengaplikasian IoT dalam pemantauan anak penyu di Pulau Bakungan perlu menekankan kepada integrasi teknologi dengan dasar pemuliharaan yang inklusif, pendidikan komuniti, serta kerjasama transnasional. Dengan pendekatan holistik ini, IoT bukan sekadar alat teknikal, tetapi menjadi ekosistem pintar yang menyokong kelestarian penyu melalui data saintifik, intervensi pantas, dan komitmen manusia. Kesimpulannya, IoT berperanan sebagai jambatan antara inovasi teknologi dan tanggungjawab sosial, memastikan kelangsungan penyu sebagai warisan ekologi Malaysia yang perlu dipertahankan untuk generasi akan datang.

Rujukan

- Charles Wax Caillouet Jr. Excessive Annual Numbers of Neritic Immature Kemp's Ridleys May Prevent Population Recovery. dalam Marine Turtle Newsletter. Vol. 158. July 2019.
- Enakmen Taman-Taman Sabah (Pindan) 1996. Kota Kinabalu: Taman-Taman Sabah. Kerajaan Sabah (1997).
- Enakmen Pemuliharaan Hidupan Liar Sabah 1997. Kota Kinabalu: Jabatan Hidupan Liar Sabah.
- Fisheries Act 1985 (Act 317). Kerajaan Malaysia. Kuala Lumpur: International Law Book Services. Kerajaan Sabah (1996).

- Fikret Berkes, Johan Colding & Carl Folke. (1 January 2004). Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change. *Ecology & Society* Vol 9(1). Cambridge: Cambridge University Press.
- Gavin Jolis, et al. (2023). Marine Turtle Nesting and Hatching in Tun Mustapha Park, Malaysia, Revealed by Community-Based Monitoring. *Herpetological Conservation and Biology*. 18(2).
- Guidelines for evaluating marine turtle ranching proposals submitted pursuant to Resolution. Dalam Mesyuarat ke-9. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES). 2020.
- Ismail Ali, Mosli Tarsat & Mohammad Raduan Mohd Arif. (2010). Pemuliharaan Penyu Di Pulau Selingan Dan Pulau Gulisan Di Sandakan, Sabah: Tinjauan Awal. *Borneo Research Journal*. 4. Hlm 47-58
- Ismail Ali, Mosli Tarsat, Encep Supriatna, Ma'ruf Ma'ruf. (2023). Conservation And Sustainability of Turtle From The Perspective of Social Science in Bakungan Kecil Island, Sandakan, Sabah, Malaysia. *Jurnal Kemaritiman: Indonesian Journal of Maritime*.
- Juanita Joseph, Hideaki Nishizawa, Wahidah M. Arshaad, Syed Abdullah S. Kadir, Saifullah A. Jaaman, James Bali, Noorul Azliana Jamaludin, Masaya Katoh. (2016). Genetic Stock Compositions And Natal Origin of Green Turtle (*Chelonia Mydas*) Foraging at Brunei Bay. Dalam *Global Ecology & Conservation*.
- Laman sesawang Taman-Taman Sabah. Sabah Park: Home. Dari <https://www.sabahparks.org.my/>. Diakses pada 26 November 2022.
- Laman sesawang World Wild Life. Adopt A Sea Turtle. Dari <https://www.worldwildlife.org/species/sea-turtle>. Diakses pada 26 November 2022.
- Laman sesawang National Ocean Service. What Causes a Sea Turtle to be Born Male or Female. Dari <https://oceanservice.noaa.gov/facts/temperature-dependent.html> Diakses pada 28 November 2022.
- Mazaris A.D, Schofield G, Gkazinou C dan Almpnidou V (2017). Global Sea Turtle Conservation Success. Dalam *Science Advances*. 3(9). https://www.researchgate.net/publication/319954734_Global_sea_turtle_conservation_successes. Diakses pada 1 Disember 2022.
- Mohd Uzair Rusli, Juanita Joseph, Hock-Chark Liew & Zainudin Bachok. (2015). Effects of Egg Incubation Methods on Locomotor Performances Of Green Turtle (*Chelonia Mydas*) Hatchlings. Dalam *Sains Malaysiana*. 44(1).

Pengaplikasian Internet Of Things (Iot) Dalam Kelestarian Pemuliharaan Haiwan Terancam Di
Malaysia: Kajian Kes Terhadap Sistem Pemantauan Anak Penyu
Di Pulau Bakungan, Sandakan Sabah

Mohd Harun Abdullah & Baba Musta. (Disember 1999). Phreatic Water Quality of the
Turtle Islands of East Malaysia: Pulau Selingan and Pulau Bakkungan Kechil.
Borneo Science Vol 6. UMS: Kota Kinabalu. hlm 1-9.

Ratnesh Kumar Choudhary. (2020). Internet of Things: Wildlife Conservation and its
Challenges. Asian Journal of Computer Science and Technology Vol.9(1).
India. hlm 8-13.

Syamsyahidah Samsol, Mohd Effendy Abd Wahid, Tsung Hsien Li & Mohd Uzair Rusli.
(2020). Hematology, Blood Gases & Biochemistry Profiles of Wild-Nesting Sea
Turtles In Terengganu, Malaysia. Malaysian Applied Biology. 49(4). Hlm 25-
31.

Sarahaizad Mohd Salleh, Hideaki Nishizawa, Takashi Ishihara, et al. (2018).
Importance of Sand Particle Size and Temperature for Nesting Success of
Green Turtles in Penang Island, Malaysia. Journal of Environmental Biology,
39(1), hlm. 45–47.