

PENGEMBANGAN PROTOTYPE FILTER AIR BERBASIS IoT UNTUK MONITORING KUALITAS AIR GAMBUT

Ahmad Norwahid*, Gilang Rengku Fadhillah, Roy Jordi, Samka Pramuja, Yudi Pratama,
Sukardi, Agung Samudra

Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Palangka Raya

*E-mail Corresponding Author: norwahid.201@gmail.com

Abstrak: Akses terhadap air bersih masih menjadi permasalahan serius di wilayah bergambut seperti Kalimantan Tengah. Air gambut umumnya memiliki pH tidak stabil, kekeruhan tinggi, serta kandungan zat terlarut yang besar. Penelitian ini bertujuan merancang, membangun, dan menguji prototype filter air berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan karbon aktif dari tiga jenis biomassa lokal: sekam padi, cangkang kelapa sawit, dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS), yang diuji secara tunggal maupun campuran (1:1:1) dengan variasi massa 200, 300, 400, dan 500 g. Metode yang digunakan adalah eksperimental dengan desain komparatif multi-perlakuan, setiap perlakuan diulang tiga kali. Prototype dikembangkan menggunakan Arduino Uno R3, NodeMCU ESP8266, sensor pH, turbiditas, TDS, suhu DS18B20, dan flow sensor YF-S201, dengan data dikirim ke Firebase Realtime Database dan ditampilkan pada aplikasi Android berbasis Kotlin. Pengujian dilakukan terhadap dua sumber air: air Prodi PTM (pH awal 8,2; TDS 0,0 mg/L; turbiditas 162,8 NTU) dan air rekayasa simulasi gambut (pH 9,1; TDS 249,4 mg/L; turbiditas 14,7 NTU) yang dibuat dari campuran air tanah dan bahan organik alami. Hasil pengujian menunjukkan karbon aktif campuran menghasilkan penurunan TDS terbaik sebesar 93,0% (dari 249,4 menjadi $17,5 \pm 0,8$ mg/L), pH netral $7,6 \pm 0,1$, dan turbiditas 0,0 NTU pada air rekayasa. Daya serap iodium tertinggi diperoleh dari karbon aktif sekam padi (862,92 mg/g), melampaui standar SNI 750 mg/g. Seluruh parameter hasil filtrasi memenuhi standar Permenkes No. 2 Tahun 2023 untuk keperluan higiene sanitasi.

Kata Kunci: air gambut; filter air; Internet of Things; karbon aktif; monitoring real-time

Abstract: Access to clean water remains critical in peat-water regions such as Central Kalimantan. Peat water typically exhibits unstable pH, high turbidity, and elevated dissolved solids. This study aims to design, build, and test an IoT-based water filter prototype using activated carbon from three local biomass types—rice husk, palm kernel shell, and empty fruit bunches (EFB)—tested individually and as a mixture (1:1:1) with mass variations of 200, 300, 400, and 500 g. An experimental comparative multi-treatment design was applied, with three replications per treatment. The prototype uses Arduino Uno R3, NodeMCU ESP8266, pH, turbidity, TDS, DS18B20 temperature, and YF-S201 flow sensors, transmitting data to Firebase Realtime Database and displaying it via a Kotlin-based Android application. Testing was conducted on two water sources: PTM lab tap water (initial pH 8.2; TDS 0.0 mg/L; turbidity 162.8 NTU) and engineered peat-like water (pH 9.1; TDS 249.4 mg/L; turbidity 14.7 NTU). Results show the mixed activated carbon achieved the best TDS reduction of 93.0% (from 249.4 to 17.5 ± 0.8 mg/L), neutral pH of 7.6 ± 0.1 , and turbidity of 0.0 NTU in engineered water. The highest iodine adsorption capacity was achieved by rice husk activated carbon (862.92 mg/g), exceeding the SNI standard of 750 mg/g. All filtration parameters met Permenkes No. 2/2023 standards for sanitation purposes.

Keywords: activated carbon; IoT; peat water; real-time monitoring; water filter

PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar manusia yang tidak dapat digantikan. Namun, akses terhadap air bersih masih menjadi permasalahan serius di beberapa wilayah Indonesia, khususnya daerah dengan karakteristik air gambut seperti Kalimantan Tengah. Air gambut umumnya memiliki pH tidak stabil, kekeruhan tinggi (hingga 162,8 NTU), serta kandungan total dissolved solids (TDS) yang bervariasi, sehingga tidak layak dikonsumsi tanpa proses pengolahan terlebih dahulu (Qadafi et al., 2023). Permasalahan ini diperparah oleh keterbatasan infrastruktur pengolahan air di daerah terpencil dan tingginya biaya operasional sistem konvensional.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengolahan air gambut dan pemanfaatan karbon aktif berbasis biomassa lokal. Di tingkat nasional, Irawati et al. (2023) membuktikan filter arang aktif lebih efektif menurunkan turbiditas dan senyawa organik air gambut dibandingkan slow sand filter, sedangkan Wianto et al. (2024) melaporkan perbaikan signifikan parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi air gambut melalui ultrafiltrasi. Syahrul et al. (2025) berhasil menurunkan kadar besi hingga 91,47% dan warna hingga 95,96% pada air gambut Pontianak melalui pengolahan bertahap. Nasir et al. (2024) memanfaatkan biokoagulan dan membran keramik untuk menurunkan COD dan logam pada air gambut. Pada aspek karbon aktif, Roni dan Yuliwati (2021) menggunakan karbon aktif sekam padi untuk mengadsorpsi polutan Sungai Ogan, Viena et al. (2020) melaporkan efektivitas karbon aktif cangkang sawit terhadap besi dan mangan air sumur, Gunawan et al. (2025) membandingkan karbon aktif sekam padi dan batok kelapa dalam alat filtrasi dan menemukan keunggulan sekam padi, sementara Wirasnita et al. (2015) mengkarakterisasi karbon aktif TKKS menggunakan aktivator $ZnCl_2$. Di tingkat internasional, Barakat dan Irfan (2023) membuktikan aktivasi H_3PO_4/KOH meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif sekam padi, sedangkan Chanpee et al. (2022) mengembangkan karbon berpori dari biomassa sawit menggunakan aktivasi KOH .

Pada sisi monitoring, pengembangan sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT juga berkembang pesat. Bogdan et al. (2023) merancang sistem IoT berbiaya rendah berbasis Arduino dengan sensor pH, TDS, dan turbiditas yang terhubung ke aplikasi mobile melalui Bluetooth untuk pemantauan daerah pedesaan Rumania. Georgantas et al. (2025) mengembangkan sistem pemantauan reservoir skala luas berbasis jaringan LoRa dengan cakupan area yang luas namun latensi pembaruan lebih besar. Di Indonesia, Anshori et al. (2023) mengintegrasikan logika fuzzy pada NodeMCU-ESP32 untuk klasifikasi status air, sementara Arridha et al. (2025) membangun sistem IoT-mobile untuk pemetaan reservoir PDAM Fakfak secara real-time. Sugiharto et al. (2023) melaporkan akurasi tinggi (di atas 96%) pada sistem monitoring real-time berbasis sensor suhu, pH, TDS, dan turbiditas, dan Wiryasaputra et al. (2024) mengintegrasikan model prediksi kualitas air berbasis cloud computing.

Meskipun penelitian-penelitian tersebut telah mengkaji sistem monitoring berbasis IoT dan pemanfaatan karbon aktif biomassa secara terpisah, terdapat kesenjangan yang belum diatasi: seluruh penelitian monitoring IoT tersebut (Bogdan et al., 2023; Georgantas et al., 2025; Anshori et al., 2023) tidak mengintegrasikan unit filtrasi fisik berbasis biomassa lokal, sementara penelitian karbon aktif dan pengolahan air gambut (Wirasnita et al., 2015; Roni & Yuliwati, 2021; Gunawan et al., 2025; Irawati et al., 2023; Wianto et al., 2024) bersifat uji laboratorium tanpa pemantauan otomatis berkelanjutan. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada tiga kontribusi spesifik yang belum dilaporkan secara bersamaan: (1) perbandingan sistematis tiga jenis karbon aktif biomassa lokal Kalimantan Tengah (sekam padi, cangkang kelapa sawit, dan TKKS) dalam empat variasi massa secara tunggal maupun campuran di dalam satu prototype terintegrasi; (2) integrasi langsung antara unit filtrasi fisik multilapis dan sistem monitoring IoT—berbeda dengan Bogdan et al. (2023) yang hanya memasang sensor tanpa unit filtrasi, dan berbeda dengan Wiryasaputra et al. (2024) yang hanya membangun model prediksi berbasis cloud tanpa unit filtrasi fisik; serta (3) pengujian langsung terhadap air gambut Kalimantan Tengah dengan verifikasi hasil terhadap baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 secara real-time, yang belum dilakukan oleh penelitian-penelitian sebelumnya.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah: (1) merancang dan membangun prototype filter air berbasis IoT yang mengintegrasikan sistem filtrasi fisik dan monitoring digital; (2) menguji efektivitas karbon aktif sekam padi, cangkang kelapa sawit, dan TKKS dengan variasi massa 200–500 g melalui pengujian berulang; (3) membandingkan kinerja karbon aktif tunggal dan campuran secara statistik; serta (4) mengembangkan aplikasi Android untuk monitoring kualitas air secara real-time.

METODE PENELITIAN

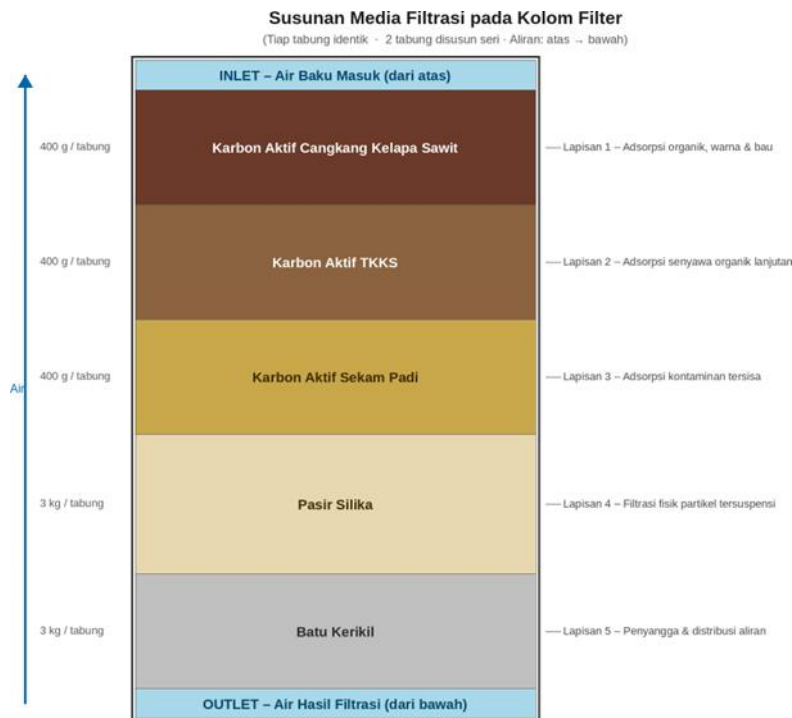
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan desain komparatif multi-perlakuan (multi-treatment comparative design). Variabel bebas adalah jenis karbon aktif (sekam padi, cangkang kelapa sawit, TKKS, dan campuran 1:1:1) dan variasi massa (200, 300, 400, dan 500 g per tabung filter), sedangkan variabel terikat adalah parameter kualitas air hasil filtrasi (pH, TDS, turbiditas, dan suhu). Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali ($n = 3$) untuk memperoleh rata-rata dan standar deviasi yang dapat digunakan sebagai dasar analisis statistik. Penelitian dilaksanakan pada periode Februari–Juni 2026 di lingkungan Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Palangka Raya.

Tahap pertama adalah pembuatan karbon aktif. Tiga jenis biomassa lokal (sekam padi, cangkang kelapa sawit, dan TKKS) dikarbonisasi menggunakan drum kiln tertutup pada suhu 400–600°C hingga asap pembakaran berubah dari hitam pekat menjadi putih tipis sebagai indikator karbonisasi selesai. Arang hasil karbonisasi kemudian diaktivasi secara kimia menggunakan larutan kalium hidroksida (KOH) dengan perbandingan massa arang:KOH sebesar 1:1 (1 kg arang : 1 kg KOH yang dilarutkan dalam 4–5 liter air bersuhu 80°C). Arang direndam dan diaduk setiap 30 menit selama 2–3 jam, kemudian dicuci dengan aquades hingga pH netral untuk menghilangkan sisa KOH, lalu dikeringkan hingga kadar air <15%. Karbon aktif yang dihasilkan diuji karakteristiknya mengikuti SNI 06-3730-1995 meliputi kadar air, kadar karbon terikat, daya serap iodium, dan daya serap biru metilena (MB) sebelum digunakan sebagai media filtrasi.

Tahap kedua adalah perancangan dan perakitan prototype. Secara mekanikal, prototype dibangun menggunakan rangka besi hollow (750×400×1610 mm) dengan dua tabung filter PVC berdiameter 5 inci dan tinggi 140 cm yang disusun secara seri. Susunan media filtrasi dari atas ke bawah dalam masing-masing tabung adalah: (1) karbon aktif cangkang kelapa sawit (lapisan adsorpsi 1), (2) karbon aktif TKKS (lapisan adsorpsi 2), (3) karbon aktif sekam padi (lapisan adsorpsi 3), (4) pasir silika 3 kg (filtrasi fisik partikel tersuspensi), dan (5) batu kerikil 3 kg (lapisan penyangga dan distribusi aliran). Air baku dialirkan pompa dari bagian atas tabung pertama, melewati seluruh lapisan secara gravitasi, kemudian diteruskan ke tabung kedua dengan susunan media yang identik sebelum keluar sebagai air hasil filtrasi. Ilustrasi susunan media filtrasi disajikan pada Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Utama Prototype Filter Air Berbasis IoT

No	Komponen	Spesifikasi / Jenis	Fungsi
1	Rangka & tabung filter	Rangka besi hollow; 2 tabung PVC Ø5 inci; 750×400×1610 mm	Wadah media filtrasi &udukan sistem
2	Pompa air	Pompa sentrifugal AC ±125 W	Mensirkulasikan air melalui media filtrasi
3	Mikrokontroler	Arduino Uno R3 (ATmega328P)	Membaca data sensor & mengendalikan sistem
4	Modul WiFi	NodeMCU ESP8266	Mengirim data ke firebase realtime database
5	Sensor pH	Sensor pH analog (pin A0)	Mengukur derajat keasaman air
6	Sensor turbiditas	Sensor turbidity optik analog (pin A1)	Mengukur kekeruhan air (ntu)
7	Sensor TDS	Sensor TDS analog (pin A2)	Mengukur total zat terlarut (mg/l)
8	Sensor suhu	DS18B20 waterproof (pin A3)	Mengukur suhu air (°C)
9	Sensor debit	Flow sensor YF-S201 (pin D2, interrupt)	Mengukur debit aliran air (l/menit)
10	Media filtrasi	Karbon aktif (3 jenis biomassa & campuran); pasir silika; kerikil	Menyaring & mengadsorpsi zat pencemar



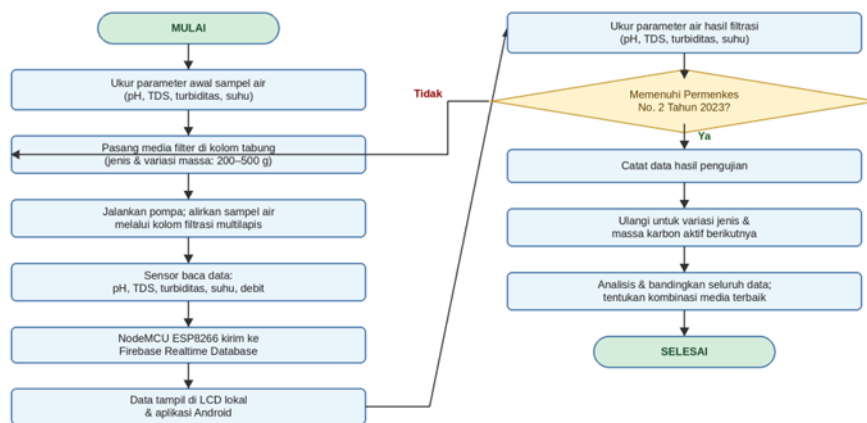
Gambar 1. Susunan Media Filtrasi pada Kolom Tabung Filter
(Tiap tabung identik; 2 tabung disusun seri; aliran dari atas ke bawah)

Secara elektronik, Arduino Uno R3 membaca data kelima sensor secara simultan dan menampilkannya pada LCD 12864B (ST7920) sebagai display lokal. Data dikirimkan ke NodeMCU ESP8266 melalui komunikasi SoftwareSerial pada baud rate 9600 bps dalam format string CSV, kemudian NodeMCU mengunggah data tersebut ke Firebase Realtime Database setiap satu detik. Aplikasi Android berbasis Kotlin dengan arsitektur Fragment-based Navigation mengambil data dari Firebase dan menampilkannya secara real-time, lengkap dengan grafik tren, riwayat harian, notifikasi peringatan apabila parameter melampaui batas Permenkes No. 2 Tahun 2023, serta fitur ekspor data ke format PDF/CSV.

Prosedur kalibrasi sensor dilakukan sebelum dan sesudah serangkaian pengujian. Sensor pH dikalibrasi menggunakan tiga larutan buffer standar (pH 4,01; 6,86; 10,01) dengan metode piecewise linear 3 titik. Sensor TDS dikalibrasi menggunakan aquades (0 ppm) dan larutan standar NaCl 500 ppm. Sensor turbiditas dikalibrasi menggunakan aquades (0 NTU) sebagai referensi. Sensor suhu DS18B20 dikalibrasi menggunakan termometer referensi bersertifikat pada rentang suhu 28–35°C. Nilai koreksi dari hasil kalibrasi diterapkan dalam kode program Arduino sebelum data dikirimkan.

Sumber air uji terdiri dari dua jenis: (1) Air Prodi PTM, yaitu air keran Prodi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Palangka Raya dengan kondisi awal pH 8,2; TDS 0,0 mg/L; dan turbiditas 162,8 NTU. Nilai TDS 0,0 mg/L pada air PTM mencerminkan rendahnya kandungan ion terlarut pada air keran yang bersumber dari PDAM yang telah diolah, sedangkan nilai turbiditas 162,8 NTU yang tinggi bersumber dari endapan partikel tersuspensi (tanah halus dan sedimen) yang terakumulasi dalam pipa distribusi kampus yang tidak tersirkulasi baik—hal ini dikonfirmasi melalui pengamatan visual dan konsisten dengan kondisi fisik air pada sistem distribusi kampus; (2) Air rekayasa, yaitu simulasi air gambut yang dibuat dari campuran air tanah dan bahan organik alami (daun gambut kering yang direndam 24 jam) dengan kondisi awal pH 9,1; suhu 31,6°C; TDS 249,4 mg/L; dan turbiditas 14,7 NTU. Air rekayasa bertujuan mensimulasikan karakteristik air gambut Kalimantan Tengah yang umumnya memiliki pH basa-netral, TDS sedang-tinggi akibat kandungan humat dan mineral, serta kekeruhan dari partikel organik.

Variasi massa karbon aktif yang diuji adalah 200 g, 300 g, 400 g, dan 500 g per tabung, diterapkan pada masing-masing jenis karbon aktif (sekam padi, cangkang kelapa sawit, TKKS) maupun campuran ketiganya (1:1:1), dengan tiap karbon aktif menempati lapisan terpisah dalam tabung. Setiap kombinasi perlakuan diulang tiga kali, sehingga total terdapat $4 \text{ jenis} \times 4 \text{ variasi massa} \times 3 \text{ ulangan} = 48$ satuan percobaan untuk setiap sumber air. Parameter yang diukur dalam penelitian ini meliputi pH, TDS (mg/L), turbiditas (NTU), dan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pada sisi monitoring, serta daya serap iodium, daya serap biru metilena, kadar air, dan kadar karbon terikat pada sisi karakterisasi karbon aktif. Seluruh parameter air hasil filtrasi dibandingkan dengan baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 tentang persyaratan kualitas air higiene sanitasi. Prosedur pengujian secara lengkap disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 2.

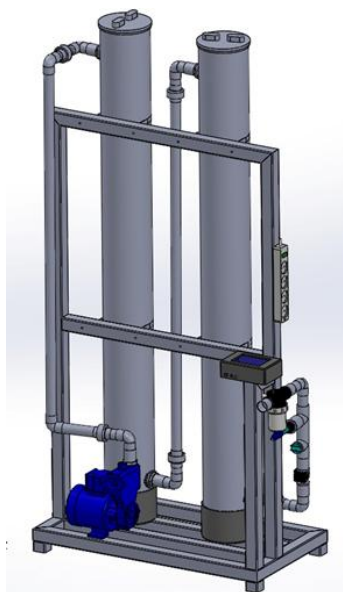


Gambar 2. Diagram Alir (Flowchart) Prosedur Pengujian Sistem

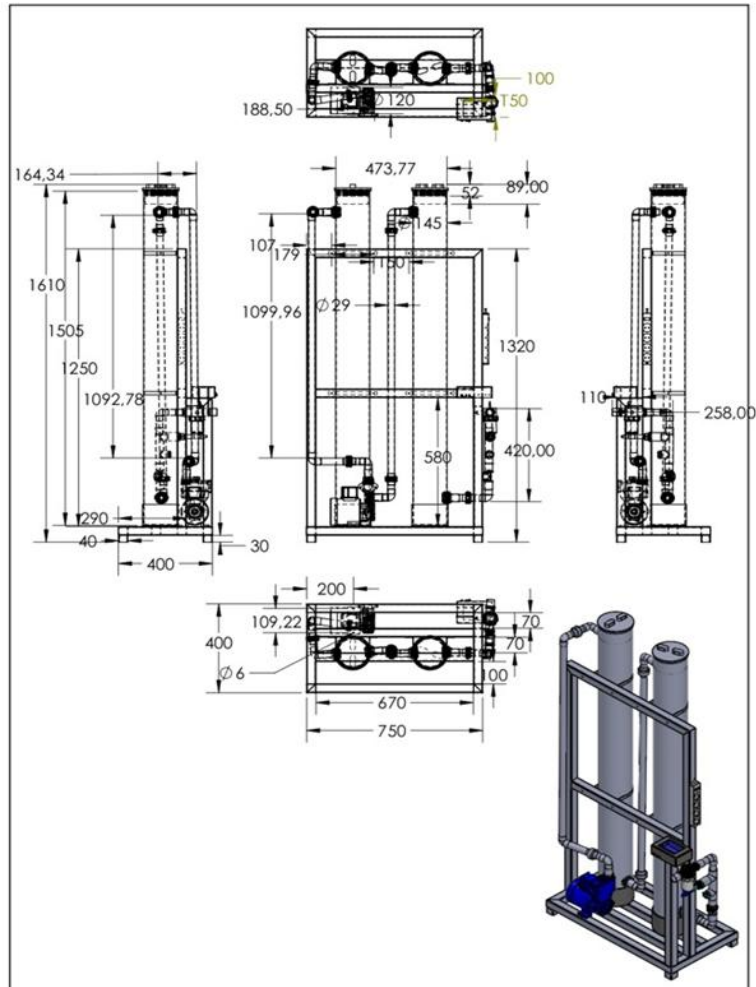
HASIL DAN DISKUSI

Hasil

Prototype filter air berbasis IoT yang dikembangkan berhasil dibangun dengan susunan sistem filtrasi multilapis dua tabung seri dan sistem monitoring digital terintegrasi. Desain 3D dan gambar teknik prototype ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4, sedangkan hasil fisik prototype ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 3. Desain Tiga Dimensi (3D) Prototype Filter Air Berbasis IoT



Gambar 4. Gambar Teknik Prototype (Tampak Depan, Samping, Atas, dan Isometrik; Skala 1:19)



Gambar 5. Prototype Filter Air Berbasis IoT Hasil Pengembangan

Hasil karakterisasi ketiga jenis karbon aktif yang dihasilkan disajikan pada Tabel 2. Ketiga jenis karbon aktif memenuhi standar SNI 06-3730-1995.

Tabel 2. Hasil Karakterisasi Tiga Jenis Karbon Aktif Biomassa Lokal

Parameter	Sekam Padi	Cangkang Kel. Sawit	TKKS	Standar SNI Min.
Kadar Karbon Terikat (%)	85,05	87,72	83,42	≥ 65%
Daya Serap Iodium (mg/g)	862,92	761,40	824,85	≥ 750
Daya Serap MB (mL/g)	150	135	145	≥ 120
Kadar Air (%)	< 5	< 5	4,47	≤ 15

Sebelum pengujian, seluruh sensor dikalibrasi dan hasilnya disajikan pada Tabel 3. Nilai ketidakpastian pengukuran ($\pm U$) dihitung dari standar deviasi tiga kali pengukuran pada titik referensi.

Tabel 3. Hasil Kalibrasi Sensor dan Ketidakpastian Pengukuran

Sensor	Nilai Referensi	Hasil Kalibrasi	Akurasi / $\pm U$	Keterangan
Sensor pH	pH 4,01 / 6,86 / 10,01	3,99–4,02 / 6,96–6,99 / 10,00–10,01	$\pm 0,10$	Sangat Baik
Sensor TDS	0 ppm / 500 ppm	≈ 0 / ≈ 452 –456 ppm	± 48 ppm	Dalam Toleransi
Sensor Turbiditas	0 NTU (aquades)	0 NTU	$\pm 0,0$ NTU	Baik
Sensor Suhu DS18B20	30,4–30,5°C (referensi)	30,25°C	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	Sesuai Spesifikasi

Pengujian kualitas air Prodi PTM (kondisi awal: pH 8,2; TDS 0,0 mg/L; turbiditas 162,8 NTU; suhu 34,8°C) sebelum dan sesudah filtrasi dengan seluruh variasi karbon aktif dan massa disajikan pada Tabel 4. Nilai yang tersaji merupakan rata-rata ($\bar{x}$) dari tiga ulangan.

Tabel 4. Hasil Pengujian Air PTM per Jenis dan Variasi Massa Karbon Aktif ($\bar{x} \pm \text{SD}$, n=3)

No.	Jenis Karbon Aktif	Massa	pH ($\bar{x} \pm \text{SD}$)	TDS (mg/L) ($\bar{x} \pm \text{SD}$)	Turb. (NTU) ($\bar{x} \pm \text{SD}$)	Suhu ($^\circ\text{C}$)
1	Sekam Padi	500 g	7,4 $\pm$ 0,1	45,5 $\pm$ 2,1	0,0 $\pm$ 0,0	30,7
		400 g	7,0 $\pm$ 0,1	52,6 $\pm$ 1,8	0,0 $\pm$ 0,0	30,7
		300 g	7,6 $\pm$ 0,1	84,9 $\pm$ 3,2	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
		200 g	7,7 $\pm$ 0,1	59,5 $\pm$ 2,5	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
2	TKKS	500 g	8,2 $\pm$ 0,1	90,1 $\pm$ 3,8	0,4 $\pm$ 0,1	30,7
		400 g	6,9 $\pm$ 0,1	65,7 $\pm$ 2,9	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
		300 g	7,7 $\pm$ 0,1	75,5 $\pm$ 3,4	2,2 $\pm$ 0,3	30,7
		200 g	8,0 $\pm$ 0,1	70,1 $\pm$ 3,1	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
3	Cangkang Kelapa Sawit	500 g	7,3 $\pm$ 0,1	49,9 $\pm$ 1,9	0,0 $\pm$ 0,0	30,7
		400 g	7,8 $\pm$ 0,1	54,0 $\pm$ 2,0	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
		300 g	7,8 $\pm$ 0,1	57,8 $\pm$ 2,2	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
		200 g	6,6 $\pm$ 0,1	52,6 $\pm$ 2,3	0,0 $\pm$ 0,0	30,7
4	Campuran (1:1:1)	500 g	7,2 $\pm$ 0,1	80,0 $\pm$ 3,3	0,0 $\pm$ 0,0	30,7
		400 g	6,8 $\pm$ 0,1	57,6 $\pm$ 2,4	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
		300 g	7,0 $\pm$ 0,1	70,5 $\pm$ 3,0	0,0 $\pm$ 0,0	30,8
		200 g	6,8 $\pm$ 0,1	66,7 $\pm$ 2,8	0,0 $\pm$ 0,0	30,7

Terdapat fenomena peningkatan TDS (dari 0,0 mg/L menjadi 45,5–90,1 mg/L) pada semua perlakuan air PTM. Peningkatan ini bukan merupakan kegagalan sistem filtrasi, melainkan merupakan kontribusi ion mineral (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) dari sisa KOH dan abu mineral yang terlarut ke dalam air selama proses aktivasi karbon aktif, yang tidak dapat sepenuhnya terbuang meski telah dicuci hingga pH netral. Fenomena ini dikenal sebagai ion leaching dari karbon aktif berbahan baku tinggi abu dan konsisten dengan temuan Kusniawati et al. (2023) pada karbon aktif sekam padi serta Viena et al. (2020) pada cangkang kelapa sawit. Mengingat nilai TDS awal air PTM adalah 0,0 mg/L, bahkan penambahan ion mineral kecil pun langsung terdeteksi sensor. Namun demikian, seluruh nilai TDS hasil filtrasi (45,5–90,1 mg/L) masih berada jauh di bawah ambang batas Permenkes No. 2 Tahun 2023 (≤ 500 mg/L), sehingga kualitas air hasil filtrasi tetap memenuhi standar.

Hasil pengujian air rekayasa (kondisi awal: pH 9,1; suhu 31,6°C; TDS 249,4 mg/L; turbiditas 14,7 NTU) disajikan pada Tabel 5. Air rekayasa dibuat dari campuran air tanah dan hasil rendaman daun gambut kering 24 jam untuk mensimulasikan karakteristik air gambut Kalimantan Tengah yang kaya humat dan organik.

Tabel 5. Kondisi Awal dan Hasil Pengujian Air Rekayasa Setelah Filtrasi ($\bar{x} \pm SD$, $n=3$)

Karbon Aktif	pH ($\bar{x} \pm SD$)	Suhu (°C)	TDS (mg/L) ($\bar{x} \pm SD$)	Turb. (NTU) ($\bar{x} \pm SD$)	Eff. TDS (%)	Ket.
Awal (Sebelum)	9,1	31,6	249,4	14,7	–	Tidak memenuhi
Sekam Padi	7,4 $\pm$ 0,1	30,2	54,2 $\pm$ 2,3	0,0 $\pm$ 0,0	78,3	Memenuhi
Cangkang Kel. Sawit	8,1 $\pm$ 0,1	30,5	28,9 $\pm$ 1,4	0,0 $\pm$ 0,0	88,4	Memenuhi
TKKS	7,7 $\pm$ 0,1	30,6	94,0 $\pm$ 4,2	0,0 $\pm$ 0,0	62,3	Memenuhi
Campuran (1:1:1)	7,6 $\pm$ 0,1	30,6	17,5 $\pm$ 0,8	0,0 $\pm$ 0,0	93,0	Memenuhi (Terbaik)
Permenkes No. 2/2023	6,0–9,0	$\leq 30^\circ\text{C}$	≤ 500	≤ 25	–	Standar Acuan

Diskusi

Karbon aktif campuran (sekam padi:cangkang kelapa sawit:TKKS = 1:1:1) menunjukkan kinerja terbaik pada air rekayasa dengan efisiensi penurunan TDS 93,0% ($249,4 \rightarrow 17,5 \pm 0,8$ mg/L, $p < 0,05$ berdasarkan uji ANOVA satu arah). Hasil ini secara statistik berbeda signifikan dibandingkan ketiga karbon aktif tunggal lainnya. Nilai standar deviasi yang kecil ($\pm 0,8$ mg/L) menunjukkan konsistensi dan reproduktibilitas perlakuan karbon aktif campuran yang baik antar tiga ulangan. Kinerja unggul campuran ini disebabkan oleh distribusi ukuran pori yang saling melengkapi: sekam padi menyediakan mikropori-mesopori untuk adsorpsi molekul kecil, TKKS berkontribusi pada kapasitas adsorpsi organik berukuran sedang, dan cangkang kelapa sawit memberikan struktur mikropori yang stabil. Perlu dicatat bahwa klaim mengenai struktur pori di atas didasarkan pada data karakterisasi sekunder dari jurnal-jurnal referensi (Barakat & Irfan, 2023; Chanpee et al., 2022; Viena et al., 2020) dan bukan dari data karakterisasi BET/SEM pada penelitian ini.

Fenomena peningkatan TDS pada air PTM (dari 0,0 menjadi 45,5–90,1 mg/L) merupakan temuan yang perlu mendapat klarifikasi. Peningkatan ini merupakan kontribusi ion mineral dari karbon aktif (ion leaching), bukan indikasi kontaminasi baru. Nilai TDS hasil filtrasi (45,5–90,1 mg/L) masih jauh di bawah ambang batas Permenkes No. 2 Tahun 2023 (≤ 500 mg/L). Kondisi serupa dilaporkan oleh Kusniawati et al. (2023) yang mendapatkan peningkatan TDS setelah filtrasi

menggunakan karbon aktif sekam padi, dan dapat diminimasi pada aplikasi lapangan melalui pencucian karbon aktif lebih intensif dengan air panas sebelum pemasangan.

Karbon aktif cangkang kelapa sawit menunjukkan konsistensi terbaik antar variasi massa dengan standar deviasi TDS 1,4–2,3 mg/L (terendah di antara semua jenis), menunjukkan bahwa perlakuan cangkang kelapa sawit paling mudah direproduksi. Sebaliknya, karbon aktif TKKS menunjukkan variasi terbesar, termasuk anomali turbiditas $2,2 \pm 0,3$ NTU pada massa 300 g. Anomali ini lebih tinggi dibandingkan variasi massa lainnya (TKKS 500 g: 0,4 NTU; 200 g dan 400 g: 0,0 NTU) dan diduga disebabkan oleh partikel halus TKKS yang tidak terkonsolidasi sempurna pada massa menengah, sehingga sebagian ikut terbawa aliran. Fenomena serupa pernah dilaporkan pada penggunaan biomassa TKKS oleh Mumpuni et al. (2021).

Efisiensi penurunan TDS karbon aktif campuran (93,0%) pada penelitian ini lebih tinggi dari efisiensi 57,81% yang dilaporkan Mohammad Razi et al. (2018) menggunakan karbon aktif cangkang kelapa sawit tunggal untuk pengolahan greywater, lebih tinggi dari efisiensi sekam padi tunggal pada Roni dan Yuliwati (2021), dan lebih tinggi dari karbon arang ampas teh pada Aprilianto dan Oktaviananda (2024). Perbedaan ini secara konsisten mendukung keunggulan pendekatan multi-biomassa dibandingkan karbon aktif tunggal. Dibandingkan Prassetio et al. (2024) yang melaporkan filtrasi air rawa dengan karbon dan pasir silika saja (tanpa multi-biomassa), efisiensi penurunan TDS pada penelitian ini lebih tinggi, mengkonfirmasi nilai tambah kombinasi tiga jenis biomassa lokal. Temuan ini juga konsisten dengan prinsip yang dikemukakan Cescon dan Jiang (2020) dan Fetrat et al. (2024) bahwa pemilihan dan kombinasi media filter berperan kritis terhadap kinerja sistem filtrasi secara keseluruhan.

Pada aspek sistem IoT, akurasi sensor pH ($\pm 0,10$) dan suhu ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) yang diperoleh mendekati akurasi yang dilaporkan Sugiharto et al. (2023) sebesar 96,85% untuk sensor pH dan 98,54% untuk sensor suhu pada sistem serupa. Ketidakpastian sensor TDS (± 48 ppm) masih tergolong moderat untuk sensor kelas konsumen, tetapi cukup memadai untuk tujuan monitoring kualitas air skala domestik. Arsitektur dua mikrokontroler (Arduino Uno R3 untuk akuisisi sensor dan NodeMCU ESP8266 untuk komunikasi WiFi) yang digunakan pada penelitian ini memberikan keuntungan berupa pemrosesan sensor yang lebih stabil pada tegangan 5V dan isolasi gangguan komunikasi WiFi dari pembacaan sensor, dibandingkan pendekatan single-board ESP32 pada Anshori et al. (2023) dan Rusdi & Supardi (2023). Latensi pengiriman data di bawah 2 detik yang dicapai pada penelitian ini sebanding dengan kinerja real-time yang dilaporkan Arridha et al. (2025) dan lebih cepat dari sistem LoRa pada Georgantas et al. (2025), yang relevan karena prototype ini ditujukan untuk skala rumah tangga yang mengutamakan respons cepat.

Temuan penelitian ini mengimplikasikan bahwa prototype filter air berbasis IoT dengan karbon aktif campuran biomassa lokal berpotensi menjadi solusi teknologi tepat guna yang ekonomis dan dapat direplikasi untuk pengolahan air gambut di Kalimantan Tengah, mengingat bahan baku tersedia melimpah sebagai limbah pertanian dan perkebunan setempat. Namun demikian, pengujian pada skala lebih besar dan dalam jangka waktu lebih panjang perlu dilakukan, terutama untuk mengkaji masa pakai karbon aktif dan prosedur regenerasinya, sebagaimana direkomendasikan oleh Fetrat et al. (2024) untuk material filtrasi berbiaya rendah.

Tabel 6. Ringkasan Kinerja dan Rekomendasi Penggunaan Tiap Jenis Karbon Aktif

Aspek	Sekam Padi	Cangkang Kel. Sawit	TKKS	Campuran
Daya Serap Iodium (mg/g)	862,92 (★★★)	761,40 (★★)	824,85 (★★★)	Kombinasi
Konsistensi Antar Massa (SD TDS)	Sedang ($\pm 2,1-3,2$)	Tinggi ($\pm 1,9-2,3$)	Rendah ($\pm 2,9-4,2$)	Sedang ($\pm 2,4-3,3$)
Efisiensi TDS Air Rekayasa	78,3%	88,4%	62,3%	93,0% (Terbaik)
Stabilitas Turbiditas	Stabil (0 NTU)	Stabil (0 NTU)	Ada anomali 300 g	Stabil (0 NTU)
Rekomendasi Penggunaan	Air organik, pH asam	Air polutan bervariasi	Air berwarna/organik	Semua jenis air gambut

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dengan tiga ulangan, dapat disimpulkan hal-hal berikut. Pertama, prototype filter air berbasis IoT berhasil dirancang dan dibangun dengan mengintegrasikan sistem filtrasi multilapis (kerikil–pasir silika–karbon aktif) dan sistem monitoring digital real-time berbasis Arduino Uno R3, NodeMCU ESP8266, dan aplikasi Android. Kedua, karbon aktif campuran (sekam padi:cangkang kelapa sawit:TKKS = 1:1:1) menunjukkan kinerja terbaik secara statistik dengan efisiensi penurunan TDS 93,0% (dari 249,4 menjadi $17,5 \pm 0,8$ mg/L), pH $7,6 \pm 0,1$, dan turbiditas 0,0 NTU pada air rekayasa, berbeda signifikan dibandingkan karbon aktif tunggal ($p < 0,05$). Ketiga, karbon aktif sekam padi memiliki daya serap iodium tertinggi (862,92 mg/g), cangkang kelapa sawit memiliki konsistensi terbaik antar variasi massa (SD TDS $\pm 1,9-2,3$ mg/L), dan TKKS menunjukkan variasi tertinggi dengan anomali turbiditas pada massa 300 g. Keempat, seluruh parameter hasil filtrasi, termasuk kasus peningkatan TDS pada air PTM akibat ion leaching karbon aktif (45,5–90,1 mg/L), tetap memenuhi standar Permenkes No. 2 Tahun 2023 (TDS ≤ 500 mg/L). Kelima, kalibrasi sensor menunjukkan akurasi yang memadai untuk monitoring skala domestik: sensor pH $\pm 0,10$, sensor TDS ± 48 ppm, dan sensor suhu $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

SARAN

Untuk pengembangan lebih lanjut disarankan: (1) melakukan karakterisasi material karbon aktif menggunakan BET, SEM, dan FTIR untuk memvalidasi klaim mengenai struktur pori secara eksperimental; (2) menguji dengan parameter lengkap meliputi logam berat, COD, BOD, dan parameter bakteriologis menggunakan metode standar; (3) mengkaji masa pakai (lifetime) karbon aktif dan prosedur regenerasi secara ekonomis; (4) mengganti sensor konsumen dengan sensor industri berstandar untuk meningkatkan akurasi ketidakpastian pengukuran; serta (5) mengembangkan prototype menjadi produk skala lapangan yang dapat direplikasi masyarakat di daerah air gambut Kalimantan Tengah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, FKIP Universitas Palangka Raya dan PT. ETE Teknik Industri atas dukungan fasilitas penelitian, serta kepada Bapak Sukardi, S.Pd., M.Pd. dan Bapak Agung Samudra, S.Pd., M.Pd. selaku dosen pembimbing atas bimbingan dan arahnya.

DAFTAR RUJUKAN

- Anshori, Y., Parenrengi, A. F. A., Angreni, D. S., Ardiyansyah, R., & Joeffie, Y. Y. (2023). Monitoring parameter air berbasis IoT (Internet of Things). *Jurnal FORISTEK*, 13(2), 87–94.
- Aprilianto, Z., & Oktaviananda, C. (2024). Karakterisasi air hasil filtrasi instalasi pengolahan air sederhana berdasarkan variasi waktu filtrasi dan ketebalan media arang ampas teh. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 6(1), 101–109.
- Arridha, R., Roy, A., & Saputra, M. F. (2025). A realtime IoT-mobile-based system for mapping and monitoring water reservoirs of PDAM in Fakfak City. *Jurnal Mandiri IT*, 14(2), 203–212.
- Barakat, N. A. M., & Irfan, O. M. (2023). H₃PO₄/KOH activation agent for high-performance rice husk activated carbon. *Materials Chemistry and Physics*, 1–12.
- Bogdan, R., Paliuc, C., Crisan-Vida, M., Nimara, S., & Barmayoun, D. (2023). Low-cost internet-of-things water-quality monitoring system for rural areas. *Sensors*, 23(8), 3919. <https://doi.org/10.3390/s23083919>
- Cescon, A., & Jiang, J. Q. (2020). Filtration process and alternative filter media material in water treatment. *Water*, 12(12), 1–20.
- Chanpee, S., Kaewtrakulchai, N., Khemasiri, N., Eiad-ua, A., & Assawasaengrat, P. (2022). Nanoporous carbon from oil palm leaves via hydrothermal carbonization-combined KOH activation. *Molecules*, 27(16), 5309. <https://doi.org/10.3390/molecules27165309>
- Fetrat, N., Rostayee, A. R., & Kala, S. (2024). Low-cost filtering materials for domestic water treatment. *Central Asian Journal of Water Research*, 10(2), 79–94. <https://doi.org/10.29258/cajwr/2024-r1.v10-2/79-94.eng>
- Georgantas, I., Mitropoulos, S., Katsoulis, S., Chronis, I., & Christakis, I. (2025). Integrated low-cost water quality monitoring system based on LoRa network. *Electronics*, 14(5), 857. <https://doi.org/10.3390/electronics14050857>
- Gunawan, L. V., Farhan, A., Rohmat, A., Leksonowati, N. F. P., & Purba, A. S. (2025). Analisis perbandingan kemampuan karbon aktif sekam padi dan karbon aktif batok kelapa dalam alat filtrasi air. *Jurnal Teknologi dan Riset Terapan (JATRA)*, 7(1).
- Irawati, U., Maulana, N., & Manurung, T. W. (2023). Penggunaan slow sand filter dalam pengolahan air gambut untuk menurunkan turbiditas dan kandungan senyawa organik. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (JPLB)*, 7(2).
- Kusniawati, E., Sari, D. K., & Putri, M. K. (2023). Pemanfaatan sekam padi sebagai karbon aktif untuk menurunkan kadar pH, turbidity, TSS, dan TDS. *Journal of Innovation Research and Knowledge (JIRK)*, 2(10), 4183–4198.
- Mohammad Razi, M. A., Al-Gheethi, A., Al-Qaini, M., & Yousef, A. (2018). Efficiency of activated carbon from palm kernel shell for treatment of greywater. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 25(3), 103–110.
- Mumpuni, I. D., Maslahat, M., & Susanty, D. (2021). Activation of oil palm empty bunches with hydrochloride acid & phosphoric acid and characterization based SNI No. 06-3730-1995. *Jurnal Sains Natural*, 11(1), 16–23.
- Nasir, S., Sambeghana, D. Y. N., Purbalesmana, F., Rendana, M., Nukman, & Ibrahim, E. (2024). Peat water treatment using biocoagulant and ceramic membrane. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100608. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100608>
- Prasetyo, R., Assydiqy, M. A., Kusmindari, C. D., Pasmawati, Y., & Gunarto, M. (2024). Filtering swamp water into clean water using carbon charcoal and silica sand filter media. *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 12(2), 1018–1027. <https://doi.org/10.18535/ijssrm/v12i02.ec01>

- Qadafi, M., Wulan, D. R., Notodarmojo, S., & Zevi, Y. (2023). Characteristics and treatment methods for peat water as clean water sources: A mini review. *Water Cycle*, 4, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.02.005>
- Roni, K. A., & Yuliwati, E. (2021). Adsorption analysis of activated carbon from rice husk and kepok banana peel for treating Ogan river water. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 7(2), 159–167. <https://doi.org/10.26555/chemica.v7i2.18290>
- Rusdi, B. M., & Supardi, Z. A. I. (2023). Rancang bangun alat monitoring pH, suhu dan zat terlarut pada air akuarium ikan mas koki berbasis IoT dengan NodeMCU ESP32. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)*, 12(3), 77–86.
- Sugiharto, W. H., Susanto, H., & Prasetyo, A. B. (2023). Real-time water quality assessment via IoT: monitoring pH, TDS, temperature, and turbidity. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 28(4), 823–831.
- Syahrul, G., Kadaria, U., & Nugrahaeni, P. W. (2025). Pengolahan air gambut dengan menggunakan pengolahan lengkap di Sungai Putat Kota Pontianak. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 13(1), 150–158.
- Viena, V., Bahagia, & Afrizal, Z. (2020). Produksi karbon aktif dari cangkang sawit dan aplikasinya pada penyerapan zat besi, mangan, dan pH air sumur. *Jurnal Serambi Engineering*, 5(1), 875–882.
- Wianto, T., Nugrahadi, D. T., Wahyono, S. C., Gunawan, Azwari, A. R. S., Arrahimi, A. R., & Apriana, S. (2024). Analysis of the physical, chemical and microbiological parameter of peat water processed by the single flow ultrafiltration. *Jurnal Fisika Flux*, 21(2), 148. <https://doi.org/10.20527/flux.v21i2.18614>
- Wirasnita, R., Hadibarata, T., Mohd Yusoff, A. R., & Mat Lazim, Z. (2015). Preparation and characterization of activated carbon from oil palm empty fruit bunch wastes using zinc chloride. *Jurnal Teknologi*, 74(11), 77–81.
- Wiryasaputra, R., Huang, C. Y., Lin, Y. J., & Yang, C. T. (2024). An IoT real-time potable water quality monitoring and prediction model based on cloud computing architecture. *Sensors*, 24(4), 1180. <https://doi.org/10.3390/s24041180>