

## Pemberdayaan Komunitas Pesisir dalam Adaptasi Perubahan Iklim melalui Teknologi Smart-Sensor dan Edukasi Lingkungan

Mya Dewi Suprihandari<sup>1\*</sup>, Teguh Purnomo<sup>2</sup>, Muslikun<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>STIE Mahardhika Surabaya, Indonesia

<sup>2</sup>Universitas 17 Agustus 1945 Banyuwangi, Indonesia

<sup>3</sup>STIE Mahardhika Surabaya, Indonesia

E-mail: <sup>1)</sup> miyadewi@stiemahardhika.ac.id, <sup>2)</sup> Purnomo\_teguh@untag-banyuwangi.ac.id,

<sup>3)</sup> muslikhun@stiemahardhika.ac.id

### ABSTRAK

Perubahan iklim mengancam keberlanjutan komunitas pesisir yang berpotensi memicu kerentanan sosial-ekonomi yang parah (IPCC, 2022). Penelitian ini mengeksplorasi integrasi teknologi smart-sensor berbiaya rendah dan program edukasi lingkungan sebagai strategi inovatif untuk memberdayakan komunitas pesisir dalam mengantisipasi dan beradaptasi dengan dampak perubahan iklim. Penelitian partisipatoris ini dilakukan (12 bulan) di dua desa pesisir di Jawa Timur, Indonesia, dengan metode mixed-methods, yaitu penerapan jaringan sensor untuk memantau kualitas air, salinitas, dan kenaikan permukaan air; pelatihan capacititation building bagi pemuda setempat mengoperasikan dan memelihara teknologi sensor; serta modul edukasi lingkungan berbasis komunitas. Hasilnya, pendekatan integratif ini secara signifikan meningkatkan pemahaman komunitas tentang risiko iklim lokal dan mekanisme adaptasinya. Partisipasi aktif komunitas dalam pemantauan berbasis sensor meningkatkan rasa kepemilikan dan kewaspadaan dini terhadap ancaman lingkungan, yang sejalan dengan prinsip citizen science untuk membangun ketahanan (Craglia et al., 2021). Namun, tantangan utama yang dihadapi meliputi keberlanjutan teknis (perawatan perangkat) dan keterbatasan anggaran untuk replikasi, yang juga dicatat dalam studi serupa di konteks negara berkembang (Ford et al., 2020). Kombinasi teknologi smart-sensor yang terjangkau dan edukasi yang kontekstual terbukti efektif sebagai katalis untuk pemberdayaan komunitas pesisir. Model ini meningkatkan kapasitas adaptif secara teknis dan memperkuat kohesi sosial dan agensi lokal dalam menghadapi perubahan iklim.

Kata kunci: pemberdayaan, komunitas pesisir, adaptasi, perubahan iklim, teknologi Smart-Sensor edukasi, lingkungan

### ABSTRACT

*Climate change threatens the sustainability of coastal communities, potentially triggering severe socio-economic vulnerabilities (IPCC, 2022). This research explores the integration of low-cost smart sensor technology and environmental education programs as an innovative strategy to empower coastal communities to anticipate and adapt to climate change impacts. This participatory research was conducted (12 months) in two coastal villages in East Java, Indonesia, using a mixed-methods approach: the deployment of a sensor network to monitor water quality, salinity, and water level rise; capacity-building training for local youth to operate and maintain the sensor technology; and community-based environmental education modules. As a result, this integrative approach significantly improved community understanding of local climate risks and adaptation mechanisms. Active community participation in sensor-based monitoring increased ownership and early warning of environmental threats, which aligns with the principles of citizen science for building resilience (Craglia et al., 2021). However, key challenges include technical sustainability (device maintenance) and limited budget for replication, which have also been noted in similar studies in developing country contexts (Ford et al., 2020). The combination of affordable smart-sensor technology and contextualized education has proven effective as a catalyst for empowering coastal communities. This model increases technical adaptive capacity and strengthens social cohesion and local agency in the face of climate change.*

*Keywords:* empowerment, coastal communities, adaptation, climate change, educational Smart-Sensor technology, environment

## 1. Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan salah satu tantangan global paling kritis abad ini, dengan dampak yang tidak proporsional dirasakan oleh komunitas pesisir di seluruh dunia. Laporan IPCC (2022) mengonfirmasi bahwa kenaikan muka air laut, intensifikasi badai, dan intrusi air laut telah mengancam keberlanjutan ekosistem pesisir dan mata pencaharian masyarakat yang bergantung padanya. Di Indonesia sebagai negara kepulauan, ancaman ini sangat nyata dengan panjang garis pantai lebih dari 54.000 km dan konsentrasi penduduk pesisir yang tinggi, dimana banyak di antaranya termasuk dalam kelompok rentan secara sosial-ekonomi.

Komunitas pesisir tradisional seringkali menghadapi paradoks adaptasi: mereka memiliki pengetahuan lokal yang kaya tentang dinamika lingkungannya namun memiliki akses terbatas terhadap teknologi dan informasi ilmiah mutakhir untuk merespons perubahan yang belum pernah terjadi sebelumnya ini (Berkes, 2017). Kesenjangan ini mengakibatkan rendahnya kapasitas adaptif dan meningkatnya kerentanan terhadap guncangan iklim. Studi oleh Ford et al. (2020) menunjukkan bahwa pendekatan adaptasi yang hanya mengandalkan intervensi top-down dari pemerintah seringkali gagal karena tidak melibatkan partisipasi aktif dan kebutuhan spesifik komunitas lokal.

Dalam konteks ini, teknologi smart-sensor yang terjangkau menawarkan potensi transformatif untuk memberdayakan komunitas pesisir. Teknologi ini memungkinkan pemantauan lingkungan real-time yang dapat dioperasikan secara mandiri oleh masyarakat, sekaligus berfungsi sebagai alat early warning system yang kritis. Penelitian Craglia et al. (2021) menegaskan bahwa integrasi antara citizen science dan teknologi digital dapat memperkuat ketahanan komunitas dengan meningkatkan literasi lingkungan dan kapasitas respons cepat. Namun, implementasi teknologi saja tidak cukup; diperlukan pendekatan holistik yang memadukan inovasi teknis dengan peningkatan kapasitas manusia melalui edukasi lingkungan yang berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi efektivitas pendekatan integratif yang menggabungkan teknologi smart-sensor dan program edukasi lingkungan dalam memberdayakan komunitas pesisir untuk adaptasi perubahan iklim. Fokus penelitian tidak hanya pada aspek teknis implementasi sensor, tetapi juga pada proses pemberdayaan komunitas, peningkatan pengetahuan, dan penguatan kelembagaan lokal. Dengan mempelajari proses dan hasil intervensi ini, penelitian ini berupaya memberikan model pemberdayaan yang dapat direplikasi untuk meningkatkan ketahanan iklim komunitas pesisir di berbagai wilayah di Indonesia.

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Kerentanan Komunitas Pesisir Terhadap Perubahan Iklim

Komunitas pesisir secara global diakui sebagai kelompok yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. Menurut laporan IPCC (2022), kenaikan muka air laut 0.3-1.0 meter pada akhir abad ini akan mempengaruhi langsung lebih dari 680 juta orang yang tinggal di wilayah pesisir. Studi oleh Neumann et al. (2019) memproyeksikan bahwa tanpa adaptasi yang memadai, kerugian tahunan akibat banjir pesisir dapat mencapai US\$ 1 triliun secara global. Kerentanan ini diperparah oleh faktor sosio-ekonomi seperti ketergantungan pada sumber daya pesisir, keterbatasan akses terhadap teknologi, dan kapasitas kelembagaan yang lemah (Adger et al., 2018).

### 2.2 Teknologi Smart-Sensor dalam Pemantauan Lingkungan Pesisir

Perkembangan teknologi sensor yang terjangkau telah membuka peluang baru untuk pemantauan lingkungan partisipatif. Penelitian oleh Craglia et al. (2021) menunjukkan bahwa sensor berbiaya rendah mampu memberikan data real-time tentang parameter kritis seperti kualitas air, salinitas, dan ketinggian air dengan akurasi yang memadai untuk keperluan peringatan dini. Aplikasi citizen science berbasis sensor telah berhasil diimplementasikan dalam pemantauan kualitas air di komunitas pesisir Florida (Bridges et al., 2021) dan sistem peringatan dini banjir di Bangladesh (Haque et al., 2020). Namun, tantangan utama yang dihadapi meliputi kalibrasi perangkat, transmisi data di daerah dengan sinyal terbatas, dan keberlanjutan perawatan perangkat.

### **3.3 Pendekatan Edukasi Lingkungan Berbasis Komunitas**

Edukasi lingkungan memainkan peran kunci dalam membangun kapasitas adaptif komunitas. Menurut teori social-ecological systems yang dikembangkan oleh Berkes (2017), pembelajaran kolektif dan pengetahuan lokal merupakan fondasi ketahanan yang kokoh. Program edukasi yang efektif harus mengintegrasikan pengetahuan ilmiah dengan kearifan lokal, serta menggunakan metode partisipatif yang melibatkan semua kelompok masyarakat (Mercer et al., 2020). Studi kasus di Kepulauan Pasifik menunjukkan bahwa pendekatan edukasi yang kontekstual dapat meningkatkan pemahaman risiko iklim sebesar 40% dan mendorong adopsi praktik adaptasi yang sesuai (Nalau et al., 2018).

### **2.4 Model Pemberdayaan Komunitas untuk Adaptasi Perubahan Iklim**

Konsep pemberdayaan komunitas dalam adaptasi perubahan iklim telah berkembang dari pendekatan teknokratis menuju model yang lebih partisipatif dan transformatif. Penelitian oleh Smit dan Wandel (2019) menekankan pentingnya membangun agensi lokal dan kontrol komunitas atas proses adaptasi. Model successful yang dikembangkan oleh Archer et al. (2022) di komunitas pesisir Afrika menunjukkan bahwa kombinasi transfer teknologi, penguatan kapasitas, dan dukungan kelembagaan dapat meningkatkan ketahanan secara signifikan. Namun, keberhasilan jangka panjang memerlukan integrasi dengan kebijakan pemerintah dan keberlanjutan finansial (Biesbroek et al., 2021).

## **3. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed-methods dengan desain partisipatoris transformative, untuk memahami fenomena tetapi juga memberdayakan komunitas melalui proses penelitian (Creswell & Plano Clark, 2018). Desain penelitian mengikuti kerangka Community-Based Participatory Research (CBPR) yang menekankan kemitraan setara antara peneliti dan komunitas (Israel et al., 2018), dilaksanakan selama 12 bulan dengan tiga fase utama: persiapan, implementasi, dan evaluasi di dua desa pesisir di Kabupaten Tuban, Jawa Timur, yang memiliki karakteristik kerentanan tinggi terhadap dampak perubahan iklim. Pemilihan lokasi menggunakan teknik purposive sampling berdasarkan kriteria: (1) mengalami abrasi pantai  $>5$  meter/tahun; (2) terdampak intrusi air laut; dan (3) memiliki kelompok masyarakat yang aktif. 120 kepala keluarga partisipan dipilih melalui stratified random sampling dengan mempertimbangkan representasi gender dan mata pencaharian, terbagi dalam kelompok nelayan (45%), petani tambak (35%), dan perempuan pengolah hasil perikanan (20%).

## **4. Hasil dan Pembahasan**

### **4.1 Peningkatan Kapasitas Teknologi dan Literasi Digital Komunitas**

Implementasi teknologi smart-sensor berhasil meningkatkan secara signifikan kapasitas teknologi komunitas pesisir. Hasil pretest-posttest menunjukkan peningkatan pemahaman teknis dari skor rata-rata 2.1 ( $SD=0.8$ ) menjadi 3.8 ( $SD=0.6$ ) pada skala Likert 1-5 ( $t(119)=15.32$ ,  $p<0.001$ ). Sebanyak 85% peserta pelatihan mampu mengoperasikan dan melakukan troubleshooting dasar pada perangkat sensor. Temuan ini sejalan dengan penelitian Craglia et al. (2021) yang menunjukkan bahwa pendekatan partisipatif dalam implementasi teknologi dapat meningkatkan adopsi dan pemahaman teknis komunitas. Namun, tantangan teknis masih ditemukan dalam hal keberlanjutan sistem. Sebanyak 30% perangkat mengalami gangguan teknis selama penelitian, terutama terkait koneksi jaringan dan daya tahan sensor di lingkungan korosif. Hal ini mengonfirmasi temuan Haque et al. (2020) tentang pentingnya desain teknologi yang sesuai dengan kondisi lingkungan pesisir.

### **4.2 Efektivitas Sistem Pemantauan Berbasis Komunitas**

Sistem smart-sensor berhasil mendeteksi fluktuasi salinitas dan kenaikan muka air yang mengancam sumber air bersih komunitas. Data real-time menunjukkan peningkatan salinitas air sumur dari 500 ppm menjadi 1800 ppm selama musim kemarau, memicu respons cepat komunitas untuk konservasi air. Sistem early warning berhasil memberikan peringatan 2-3 jam sebelum banjir

rob dengan akurasi 85%. Keberhasilan ini mendukung penelitian Bridges et al. (2021) tentang efektivitas sistem pemantauan real-time untuk adaptasi perubahan iklim. Seperti diungkapkan seorang peserta: "Dengan sensor ini, kami bisa antisipasi banjir rob lebih awal dan menyelamatkan dokumen penting serta peralatan nelayan." (Responden A, Kelompok Nelayan)

#### **4.3 Peningkatan Pengetahuan dan Perilaku Adaptasi**

Program edukasi lingkungan meningkatkan secara signifikan pengetahuan komunitas tentang perubahan iklim. Skor pengetahuan rata-rata meningkat dari 45% menjadi 78% ( $t(119)=12.45$ ,  $p<0.001$ ). Sebanyak 90% peserta mampu mengidentifikasi minimal tiga dampak perubahan iklim lokal dan strategi adaptasinya. Peningkatan pengetahuan ini diikuti dengan perubahan perilaku, dimana 75% rumah tangga telah menerapkan setidaknya dua praktik adaptasi baru.

Temuan ini konsisten dengan penelitian Nalau et al. (2018) bahwa edukasi lingkungan yang kontekstual dapat mendorong perubahan perilaku adaptif. Namun, implementasi praktik adaptasi masih terhambat oleh keterbatasan ekonomi, sebagaimana diungkapkan dalam FGD: "Kami tahu harus membangun tanggul, tapi tidak ada biaya untuk material yang berkualitas." (Peserta FGD, Petani Tambak)

#### **4.4 Penguatan Kelembagaan dan Jejaring Kolaborasi**

Penelitian ini berhasil membentuk kelompok adaptasi perubahan iklim di kedua desa yang terdiri dari perwakilan berbagai elemen masyarakat. Kelompok ini telah mengembangkan rencana aksi adaptasi berbasis data sensor dan melakukan advokasi kepada pemerintah desa. Terjadi peningkatan partisipasi perempuan dalam pengambilan keputusan dari 15% menjadi 45%, meskipun tantangan budaya masih ditemui. Hasil ini mendukung temuan Archer et al. (2022) tentang pentingnya kelembagaan lokal dalam ketahanan iklim. Pembentukan jejaring dengan pemerintah daerah dan akademisi juga memperkuat sustainability program, sebagaimana dikemukakan oleh Berkes (2017) mengenai pentingnya multi-stakeholder collaboration.

#### **4.5 Faktor Penentu Keberhasilan dan Tantangan**

Analisis regresi mengidentifikasi tiga faktor utama penentu keberhasilan: (1) kepemimpinan lokal ( $\beta=0.42$ ,  $p<0.01$ ), (2) dukungan teknis berkelanjutan ( $\beta=0.38$ ,  $p<0.01$ ), dan (3) integrasi dengan program pemerintah ( $\beta=0.35$ ,  $p<0.01$ ). Tantangan utama meliputi keterbatasan anggaran (disebutkan 65% responden), resistensi terhadap perubahan (25%), dan keterbatasan infrastruktur digital (40%). Temuan ini sejalan dengan penelitian Biesbroek et al. (2021) bahwa faktor sosial-institusional seringkali lebih menentukan daripada faktor teknis dalam adaptasi perubahan iklim.

#### **4.6 Dampak Terhadap Ketahanan Sosial-Ekologis**

Pendekatan integratif smart-sensor dan edukasi terbukti meningkatkan ketahanan sosial-ekologis komunitas. Indeks ketahanan meningkat dari 2.8 menjadi 3.9 pada skala 1-5. Komunitas menunjukkan kemampuan lebih baik dalam mengantisipasi guncangan, beradaptasi dengan perubahan, dan mentransformasi sistem menuju ketahanan yang lebih berkelanjutan. Hasil ini mendukung framework SETS McPhearson et al. (2021) tentang interlinkage antara sistem sosial, ekologis, dan teknologi.

#### **4.7 Pembahasan Integratif**

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemberdayaan komunitas pesisir memerlukan pendekatan holistik yang mengintegrasikan teknologi, edukasi, dan penguatan kelembagaan. Keberhasilan program tidak hanya diukur dari aspek teknis, tetapi juga dari peningkatan kapasitas adaptif dan transformatif komunitas. Temuan ini memperkuat konsep community-based adaptation yang menekankan pentingnya local ownership dan contextual solution (Mercer et al., 2020). Namun, keberlanjutan program memerlukan dukungan kebijakan dan integrasi dengan pembangunan daerah. Seperti diungkapkan oleh Smit dan Wandel (2019), adaptasi perubahan iklim yang efektif membutuhkan pendekatan multi-level governance yang menghubungkan aksi lokal dengan kebijakan nasional.

## 5. Kesimpulan

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pendekatan integratif antara teknologi smart-sensor dan edukasi lingkungan terbukti efektif dalam memberdayakan komunitas pesisir untuk adaptasi perubahan iklim. Penelitian ini berhasil menunjukkan peningkatan signifikan dalam tiga aspek utama: kapasitas teknologi, pengetahuan adaptasi, dan kelembagaan lokal.

Pertama, implementasi smart-sensor berhasil meningkatkan literasi digital komunitas sebesar 81% dan membangun sistem peringatan dini dengan akurasi 85%. Teknologi ini memungkinkan deteksi dini intrusi air laut dan banjir rob, memberikan waktu respons 2-3 jam bagi komunitas untuk mengambil tindakan preventif. Temuan ini sejalan dengan penelitian Craglia et al. (2021) tentang potensi teknologi terjangkau dalam membangun ketahanan komunitas.

Kedua, program edukasi lingkungan yang kontekstual berhasil meningkatkan pengetahuan perubahan iklim dari 45% menjadi 78% dan mendorong adopsi praktik adaptasi oleh 75% rumah tangga. Pendekatan partisipatif yang mengintegrasikan pengetahuan ilmiah dengan kearifan lokal terbukti efektif dalam membangun pemahaman komprehensif tentang risiko iklim, sebagaimana ditekankan oleh Berkes (2017).

Ketiga, terbentuknya kelembagaan adaptasi yang inklusif dengan peningkatan partisipasi perempuan hingga 45% menunjukkan keberhasilan pendekatan pemberdayaan. Kelompok adaptasi ini telah mengembangkan rencana aksi berbasis data dan melakukan advokasi kebijakan, mengkonfirmasi temuan Archer et al. (2022) tentang pentingnya kelembagaan lokal dalam ketahanan iklim.

### 5.2 Saran

#### 5.2.1 Saran Teoritis

Penelitian ini merekomendasikan pengembangan model "Community-based Climate Technology Adaptation" (CCTA) yang mengintegrasikan kerangka Social-Ecological-Technological Systems (SETS) McPhearson et al. (2021) dengan pendekatan pemberdayaan komunitas. Model ini perlu memperkuat aspek gender mainstreaming dan local knowledge integration dalam adaptasi perubahan iklim.

#### 5.2.2 Saran Praktis

Bagi pemangku kepentingan, penelitian ini merekomendasikan:

##### A. Pemerintah Daerah:

- Mengintegrasikan sistem pemantauan berbasis komunitas ke dalam kebijakan adaptasi perubahan iklim daerah
- Mengalokasikan anggaran khusus untuk maintenance dan pengembangan teknologi smart-sensor
- Mengembangkan program replikasi dengan modul pelatihan yang terstandarisasi

##### B. Lembaga Pendidikan dan Penelitian:

- Mengembangkan kurikulum edukasi lingkungan yang spesifik untuk konteks pesisir
- Membentuk pusat inovasi teknologi adaptif berbiaya rendah untuk komunitas pesisir
- Melakukan penelitian lanjutan tentang integrasi kearifan lokal dengan teknologi modern

##### C. Komunitas dan Organisasi Masyarakat Sipil:

- Membentuk jaringan komunitas pesisir untuk berbagi pembelajaran dan sumber daya
- Mengembangkan mekanisme rotasi dan regenerasi dalam pengelolaan teknologi
- Memperkuat kapasitas advokasi untuk akses pendanaan dan dukungan kebijakan

#### 5.2.3 Saran Kebijakan

- Penyusunan regulasi yang mendukung skema pendanaan berkelanjutan untuk adaptasi berbasis komunitas
- Pengembangan standar operasional sistem peringatan dini berbasis teknologi terjangkau

- Integrasi adaptasi perubahan iklim dalam perencanaan pembangunan desa pesisir

### 5.3 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal cakupan geografis yang terbatas pada dua desa dan periode observasi 12 bulan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk: (1) memperluas cakupan wilayah dan durasi penelitian; (2) mengeksplorasi integrasi dengan sistem pemantauan nasional; (3) mengembangkan model keberlanjutan finansial untuk replikasi program; dan (4) meneliti efektivitas pendekatan ini dalam konteks bencana klimatologis yang berbeda.

Keberhasilan model integratif ini membuka peluang untuk pengembangan strategi adaptasi yang lebih partisipatif, inklusif, dan berkelanjutan, tidak hanya di komunitas pesisir Indonesia tetapi juga dalam konteks global menghadapi tantangan perubahan iklim.

### 5.4 Novelty Penelitian

#### 1 Kontribusi Teoritis dan Inovasi Konseptual

Penelitian ini memberikan beberapa kontribusi orisinal dan novelty dalam bidang studi adaptasi perubahan iklim berbasis komunitas:

- a. Pengembangan Model "Socio-Ecological-Technological Empowerment" (SETE)

Penelitian ini mengembangkan model SETE yang secara inovatif mengintegrasikan tiga pilar utama: sistem sosial (pemberdayaan komunitas), ekologis (edukasi lingkungan), dan teknologi (smart-sensor). Berbeda dengan pendekatan konvensional yang seringkali memisahkan aspek teknologi dan sosial, model ini menekankan interaksi dinamis dan saling memperkuat antara ketiga elemen tersebut. Model ini merupakan elaborasi dari framework SETS McPhearson et al. (2021) dengan penekanan khusus pada dimensi pemberdayaan dan adaptasi lokal.

- b. Konsep "Appropriate Climate Technology" untuk Komunitas Rentan

Penelitian ini memperkenalkan konsep "Appropriate Climate Technology" - pendekatan implementasi teknologi yang mempertimbangkan keterjangkauan, kemudahan operasi, dan keberlanjutan dalam konteks komunitas berkapasitas terbatas. Konsep ini menantang paradigma implementasi teknologi canggih berbiaya tinggi dengan mengusulkan solusi yang sesuai dengan kapasitas teknis dan finansial komunitas pesisir, sekaligus responsive terhadap kebutuhan lokal yang spesifik.

#### 2 Inovasi Metodologis

- a. Integrasi Mixed-Methods Partisipatoris dan Real-Time Data

Penelitian ini mengembangkan pendekatan metodologis yang mengintegrasikan data kualitatif partisipatoris dengan data kuantitatif real-time dari smart-sensor. Inovasi ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap efektivitas adaptasi, tidak hanya dari perspektif outcomes tetapi juga processes. Metode ini mengatasi keterbatasan pendekatan konvensional yang seringkali hanya mengandalkan data survei retrospektif.

- b. Framework "Community-Led Technology Co-Design"\*

Penelitian menerapkan framework co-design yang melibatkan komunitas secara aktif dalam perancangan dan implementasi teknologi. Berbeda dengan pendekatan technology transfer tradisional, framework ini menempatkan komunitas sebagai co-creator, bukan hanya penerima teknologi. Pendekatan ini meningkatkan ownership dan keberlanjutan, sekaligus memastikan kesesuaian teknologi dengan konteks lokal.

#### 3 Kontribusi Empiris dan Kontekstual

- a. Bukti Empiris Integrasi Teknologi-Edukasi di Konteks Pesisir\*

Penelitian ini memberikan bukti empiris yang langka tentang efektivitas integrasi teknologi smart-sensor dan edukasi lingkungan dalam konteks komunitas pesisir negara berkembang. Temuan mengenai peningkatan 81% literasi digital dan 85% akurasi sistem peringatan dini memberikan kontribusi penting pada literatur tentang technology-enabled adaptation di settings berkapasitas terbatas.

- b. Model Inklusi Gender dalam Adaptasi Berbasis Teknologi

Penelitian ini mengembangkan model inklusi gender yang spesifik untuk program adaptasi berbasis teknologi. Peningkatan partisipasi perempuan hingga 45% dalam pengambilan keputusan teknologi memberikan kontribusi baru pada pemahaman tentang gender mainstreaming dalam climate technology adoption.

#### 4 Originalitas dalam Pendekatan Keberlanjutan

- a. Model "Triple-S Sustainability" untuk Program Adaptasi

Penelitian ini mengembangkan model "Triple-S Sustainability" (Social, System, Structural) yang menawarkan kerangka komprehensif untuk memastikan keberlanjutan program adaptasi. Model ini mengintegrasikan sustainability sosial (kepemilikan komunitas), sistem (maintenance teknologi), dan struktural (integrasi kebijakan).

- b. Konsep "Adaptive Governance Micro-Structure"

Temuan penelitian tentang pembentukan kelompok adaptasi tingkat komunitas mengilhami pengembangan konsep "adaptive governance micro-structure" - struktur governance dalam skala kecil yang memungkinkan respons cepat terhadap dampak perubahan iklim, sekaligus terhubung dengan sistem governance yang lebih luas.

#### 5 Kontribusi pada Praktik dan Kebijakan

- a. Protokol Implementasi Teknologi Berbiaya Rendah

Penelitian ini mengembangkan protokol implementasi teknologi smart-sensor berbiaya rendah yang dapat direplikasi di berbagai konteks komunitas pesisir. Protokol ini mencakup aspek teknis, sosial, dan kelembagaan, memberikan panduan praktis bagi pelaku adaptasi perubahan iklim.

- b. Model Integrasi Data Komunitas dalam Kebijakan

Penelitian ini menawarkan model integrasi data pemantauan berbasis komunitas ke dalam sistem perencanaan pembangunan daerah. Model ini mengatasi kesenjangan antara data lapangan dan proses pengambilan kebijakan yang sering terjadi dalam adaptasi perubahan iklim.

Kontribusi-kontribusi novelty ini tidak hanya mengisi celah literatur yang signifikan tetapi juga memberikan landasan konseptual dan praktis untuk pengembangan program adaptasi perubahan iklim yang lebih inklusif, berkelanjutan, dan efektif di komunitas pesisir.

### 6. Daftar Pustaka

- Adger, W. N., Brown, K., & Conway, D. (2018). Resilience implications of policy responses to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 9(1), e576. <https://doi.org/10.1002/wcc.576>
- Archer, D., Tredoux, M., & Ziervogel, G. (2022). Community-based adaptation to climate change: Lessons from Mozambique. *Climate and Development*, 14(3), 193-206. <https://doi.org/10.1080/17565529.2021.1912434>
- Berkes, F. (2017). Environmental governance for the anthropocene? Social-ecological systems, resilience, and collaborative learning. *Sustainability*, 9(7), 1232. <https://doi.org/10.3390/su9071232>
- Biesbroek, R., Badloe, S., & Athanasiadis, I. N. (2021). Machine learning for research on climate change adaptation policy: A systematic review. *Climate Risk Management*, 34, 100361. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100361>
- Bridges, T. S., Ankley, G. T., & Schubauer-Berigan, M. K. (2021). Natural and nature-based features for coastal resilience. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(3), 466-476. <https://doi.org/10.1002/ieam.4386>
- Craglia, M., Annoni, A., Benczur, P., Bertoldi, P., Delipetrev, P., De Prato, G., ... & Vespe, M. (2021). \*Artificial Intelligence and Digital Transformation: early lessons from the COVID-19 crisis\*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/97437>

- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.). Sage Publications.
- Ford, J. D., King, N., Galappaththi, E. K., Pearce, T., McDowell, G., & Harper, S. L. (2020). The resilience of Indigenous Peoples to environmental change. *One Earth*, 2(6), 532-543. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.014>
- Haque, A. N., Grafakos, S., & Huijsman, M. (2020). Assessment of adaptation measures against flooding in the city of Dhaka, Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 47, 101573. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101573>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Israel, B. A., Schulz, A. J., Parker, E. A., & Becker, A. B. (2018). Critical issues in developing and following community based participatory research principles. In *Community-based participatory research for health* (pp. 47-66). Jossey-Bass.
- McPhearson, T., Cook, E. M., Berbés-Blázquez, M., Cheng, C., Grimm, N. B., & Andersson, E. (2021). A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services. *One Earth*, 4(4), 505-518. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.03.002>
- Mercer, J., Gaillard, J. C., & Fordham, M. (2020). Handbook for disaster risk reduction and climate change adaptation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51, 101813. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101813>
- Nalau, J., Becken, S., & Mackey, B. (2018). Ecosystem-based adaptation in the Pacific Islands. *Climate Policy*, 18(1), 122-135. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1253660>
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., & Nicholls, R. J. (2019). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Climate Change*, 9(3), 231-236. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0405-0>
- Smit, B., & Wandel, J. (2019). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008>

## Copyrights

Copyright for this article is retained by the author(s), with first publication rights granted to the journal.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).