

Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT untuk Meningkatkan Efisiensi Penggunaan Air

Lailatul Fitriyah^{1)*} , Zahrotun Naimah²⁾ , Sofa Aulia Rofika³⁾

¹⁾³⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾lailatul123ascil@gmail.com, ²⁾nnajmiy@gmail.com, ³⁾sofaauliarofika@gmail.com

Abstract

Penelitian ini membahas pembuatan sistem irigasi otomatis yang menggunakan Internet of Things (IoT) sebagai cara untuk meningkatkan penggunaan air secara lebih efisien di bidang pertanian. Tujuan dari penelitian ini adalah membuat dan menerapkan sistem irigasi yang dapat memberi air secara otomatis sesuai kondisi lingkungan secara langsung. Cara penelitian ini mencakup perancangan perangkat keras dengan menggunakan sensor kelembapan tanah, sensor suhu, dan mikrokontroler yang terhubung ke platform IoT, serta pengembangan perangkat lunak untuk melihat dan mengendalikan sistem dari jauh. Sistem ini diuji di lahan percobaan dengan membandingkan penggunaan air dan kelembapan tanah sebelum dan sesudah sistem diterapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem irigasi otomatis berbasis IoT mampu menghemat penggunaan air secara signifikan tanpa memengaruhi kualitas tanah dan tanaman. Selain itu, sistem ini juga lebih akurat dan konsisten dalam memberi air dibandingkan metode lama. Kontribusi dari penelitian ini adalah menyediakan model sistem irigasi yang cerdas dan bisa diubah sesuai kebutuhan untuk mendukung pertanian yang ramah lingkungan serta penggunaan air yang lebih efisien.

Keywords: IoT, irigasi otomatis, efisiensi air, pertanian cerdas

Article history: Received 5 April 20XX, first decision 22 April 20XX, accepted 22 August 20XX, available online 28 October 20XX

I. PENDAHULUAN

Air adalah salah satu sumber daya alam yang sangat penting dalam kegiatan pertanian, karena sekitar 72% dari total air tawar di dunia digunakan oleh sektor pertanian untuk keperluan menyiram tanaman, memelihara tanah, dan menjaga hasil panen[1][2][3]. Ketergantungan yang tinggi pada air ini menjadi tantangan besar, terutama karena tekanan semakin besar terhadap ketersediaan air akibat perubahan iklim, pertumbuhan jumlah penduduk, perkembangan kota, dan penurunan kualitas sumber daya air[4][5][6]. Situasi ini semakin kritis karena metode irigasi yang digunakan biasanya tidak efisien—seringkali tidak sesuai dengan kebutuhan sebenarnya tanaman, sehingga menyebabkan pemborosan air hingga beberapa puluh persen dari volume air yang dialirkan ke tanaman[7][8][9].

Dengan berkembangnya teknologi digital, Internet of Things (IoT) menjadi solusi yang sangat efektif untuk mengatasi ketidaksempurnaan dalam sistem irigasi[10][11][12]. IoT menghubungkan sensor-sensor yang bisa mendeteksi kondisi secara real-time, seperti tingkat kelembapan tanah, suhu udara, pola cuaca, dan faktor lain yang memengaruhi kebutuhan air tanaman[10][13][14]. Dengan data yang diperoleh, sistem pengendali irigasi bisa langsung mengatur pengairan secara otomatis[15][16]. Berdasarkan studi yang ada, penggunaan teknologi IoT dalam irigasi cerdas bisa menghemat penggunaan air hingga 30–50%, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, dan tetap menjaga atau bahkan meningkatkan hasil pertanian dibandingkan metode konvensional. Meski telah banyak penelitian yang mengembangkan prototipe sistem irigasi berbasis IoT, hasilnya masih terbatas hanya di tingkat uji coba, fokus pada satu jenis sensor, atau masih mengalami kendala seperti keterbatasan infrastruktur komunikasi di daerah pedesaan, biaya awal yang tinggi, serta kurangnya penelitian yang menyeluruh menggabungkan efisiensi air, evaluasi lingkungan, dan aspek ekonomi[17][18][11][19]. Misalnya, penelitian sebelumnya berhasil menurunkan penggunaan air sebesar sekitar 28,6%–30% lewat sistem IoT, namun masih sedikit yang melakukan pengujian secara luas dan menganalisis dampak jangka panjang terhadap pertanian secara keseluruhan[15][11][12].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi sistem irigasi otomatis berbasis IoT yang tidak hanya mengukur efisiensi penggunaan air melalui sensor secara real-time, tetapi juga memperhatikan dampaknya terhadap hasil panen tanaman dan kelangsungan operasional dalam pertanian

* Corresponding author

nyata[11][18][20]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah membuat model sistem yang dapat mendistribusikan air secara optimal sesuai dengan kebutuhan tanaman secara fleksibel, mengurangi pemborosan air, serta meningkatkan pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan[11][20][21]. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi yang berarti secara teoritis dalam pengembangan pertanian cerdas (smart agriculture) dan bisa dijadikan acuan dalam penerapan teknologi di lapangan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air serta ketahanan pangan[10][18][22].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk mempelajari konsep dasar, perkembangan teknologi, dan hasil penelitian sebelumnya terkait penerapan Internet of Things (IoT) dalam sistem irigasi otomatis[18], [23]. Pembahasan difokuskan pada peran IoT dalam meningkatkan penggunaan air secara efisien, mengoptimalkan pengelolaan irigasi, serta penerapannya dalam pertanian cerdas[24], [25], [26]. Kajian ini disusun sebagai dasar teori untuk memahami pendekatan yang sudah dilakukan, membandingkan berbagai metode dan hasil yang dicapai, serta mengidentifikasi batasan dan ruang penelitian yang masih belum terpecahkan[18], [21], [27]. Dengan demikian, tinjauan pustaka ini menjadi dasar penting dalam menentukan arah, inovasi, dan kontribusi penelitian yang dilakukan.

A. Teknologi IoT dalam Sistem Irigasi Cerdas

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) membuka kesempatan besar dalam membuat sistem irigasi cerdas yang mampu memantau dan mengatur penyiraman tanaman secara otomatis sesuai dengan kondisi lingkungan di waktu nyata[28], [29]. IoT bekerja dengan menggabungkan sensor di lapangan, sistem komunikasi data, dan kontrol otomatis, sehingga bisa mengoptimalkan penggunaan air lebih baik dibandingkan metode irigasi tradisional. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan IoT dalam sistem irigasi bisa meningkatkan efisiensi penggunaan air secara signifikan serta mengurangi pemborosan air dengan terus-menerus memantau tingkat kelembapan tanah dan kondisi lingkungan[30], [31], [32].

Menggabungkan sensor seperti kelembapan tanah, suhu, dan kelembapan udara dengan mikrokontroler dan platform pemantauan berbasis awan memungkinkan pengambilan keputusan dalam irigasi yang lebih pintar dan cepat. Teknologi ini tidak hanya memberikan informasi secara langsung dan real-time, tetapi juga memungkinkan pengguna mengontrol sistem dari jarak jauh melalui aplikasi atau dashboard berbasis web atau ponsel pintar[20], [33].

B. Efisiensi Penggunaan Air melalui Sistem Irigasi Otomatis

Penelitian nyata menunjukkan bahwa sistem irigasi otomatis yang menggunakan teknologi IoT bisa menghemat banyak air[34], [35]. Misalnya, dalam sebuah penelitian, ditemukan bahwa sistem irigasi pintar yang menggunakan sensor kelembapan tanah dan mikrokontroler ESP32 berhasil mengurangi penggunaan air hingga 28,6% hingga 40% dibandingkan metode tradisional. Sistem ini juga bisa menjaga kelembapan tanah tetap dalam batas yang tepat, sehingga meningkatkan hasil panen tanaman[30], [36], [37].

Selain itu, berdasarkan studi literatur dan analisis meta, teknologi irigasi yang menggunakan IoT dan otomatisasi ternyata bisa menghemat air irigasi sekitar 30 hingga 50 persen, serta meningkatkan hasil panen tanaman hingga 20 hingga 30 persen dibandingkan dengan cara pengairan tradisional[11], [30], [38].

C. Implementasi dan Variasi Desain Sistem

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan berbagai macam desain dan cara teknis dalam pembuatan sistem irigasi berbasis IoT[15], [39]. Contohnya, ada sistem yang menggabungkan sensor kelembapan, sensor suhu, pompa otomatis, dan platform pemantauan di awan. Sistem ini mengatur penyiraman secara otomatis sesuai dengan batas kelembapan tanah yang telah ditetapkan, serta menyimpan data yang diperlukan untuk analisis dan pengambilan keputusan lebih lanjut[40], [41].

Selain itu, ada penelitian yang menggabungkan teknologi IoT dengan logika fuzzy untuk menentukan secara otomatis berapa banyak air yang diberikan, sesuai dengan kondisi lingkungan yang rumit, sehingga menunjukkan kemungkinan peningkatan hasil perawatan tanaman yang lebih baik[23], [42].

D. Keterbatasan Penelitian Sebelumnya

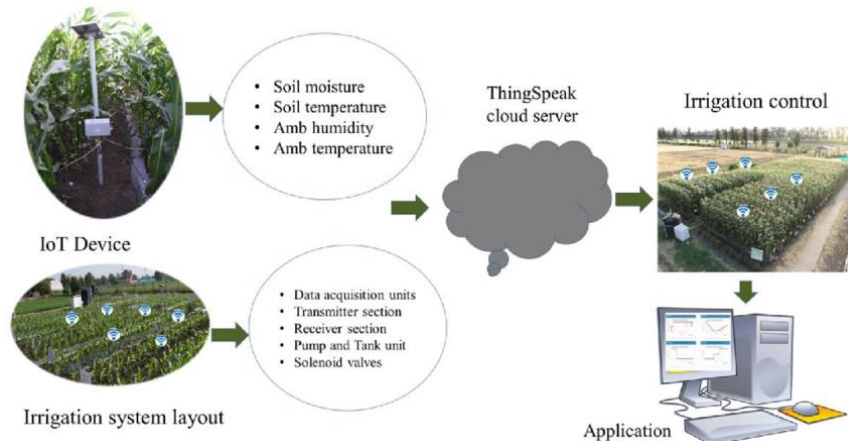
Meskipun banyak penelitian sudah membuat sistem irigasi berbasis IoT yang bisa meningkatkan penggunaan air dan hasil panen, masih ada beberapa kekurangan[43], [44]. Pertama, kebanyakan penelitian masih dilakukan dalam skala uji coba atau prototipe kecil, sehingga belum terbukti efektif ketika digunakan secara luas atau untuk berbagai jenis tanaman serta kondisi wilayah yang berbeda[11], [15]. Kedua, beberapa sistem ini masih membutuhkan jaringan internet yang stabil dan pasokan listrik yang cukup, yang seringkali sulit ditemukan di daerah pedesaan atau tempat dengan akses teknologi terbatas[18], [20].

Akhirnya, standarisasi data sensor dan model analitik yang dipakai dalam pengaturan irigasi otomatis masih belum banyak dibahas secara rinci dalam literatur, sehingga menghalangi penerapan teknologi IoT dalam sistem irigasi cerdas secara luas dan konsisten[10], [11], [21].

III. METODE

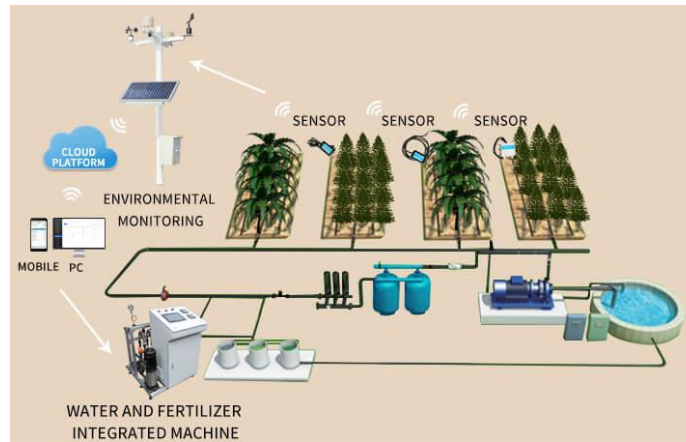
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental yang dijadikan sebagai bagian dari penelitian rekayasa[45][46]. Pendekatan ini dipilih karena penelitian ini bertujuan mengukur secara jelas dan terukur kinerja sistem irigasi otomatis berbasis Internet of Things (IoT), terutama dalam meningkatkan penggunaan air secara lebih efisien[47][24], [48]. Metode eksperimental memungkinkan peneliti untuk membandingkan kondisi sebelum dan setelah sistem diterapkan, sedangkan pendekatan rekayasa digunakan untuk merancang dan menerapkan solusi teknis yang bisa langsung digunakan di lapangan[49], [50], [51].

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mengamati langsung, menggunakan sensor, mencatat hasil, dan mencari informasi dari sumber tertulis[52], [53], [54]. Observasi dilakukan di lahan percobaan untuk mengawasi kondisi sekitar, cara irigasi berjalan, serta bagaimana sistem merespons perubahan kelembapan tanah dan suhu[11], [15]. Data utama didapat dari sensor kelembapan tanah dan sensor suhu yang terpasang di sistem IoT dan beroperasi secara langsung. Data ini digunakan untuk menentukan waktu dan cara pengirigasan, serta mengukur penggunaan air secara efisien[11], [12], [18]. Mencatat hasil digunakan untuk merekam tahap pemasangan, pengaturan sistem, dan hasil pengujian yang dilakukan. Data tambahan didapat dari membaca jurnal ilmiah dan dokumen resmi yang berkaitan[11], [20].



Gambar 1. Arsitektur dan diagram blok sistem irigasi otomatis berbasis IoT

Gambar ini menunjukkan cara kerja sistem mulai dari sensor mengambil data, data diproses oleh mikrokontroler, sampai data dikirim ke platform IoT untuk memantau dan mengendalikan sistem[53], [54]. Sumber data dalam penelitian terdiri dari data primer dan data sekunder[11], [20]. Data primer adalah hasil pengukuran seperti kelembapan tanah, suhu lingkungan, dan volume air yang digunakan oleh sistem irigasi otomatis. Data sekunder digunakan sebagai bahan analisis dan perbandingan hasil penelitian dengan informasi dari sumber ilmiah. Penelitian dilakukan bertahap dan berurutan[10], [11], [21]. Tahap pertama adalah perencanaan, yaitu mengenali masalah, merancang sistem, serta menentukan parameter uji[18]. Tahap kedua adalah implementasi, yaitu merakit perangkat keras, membuat perangkat lunak, dan menggabungkan semua komponen sistem agar dapat bekerja secara otomatis. Tahap ketiga adalah pengujian dan pengumpulan data, yaitu menjalankan sistem dalam jangka waktu tertentu untuk mendapatkan data yang dibutuhkan[20], [21]. Data tersebut kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi kemampuan dan efisiensi sistem[11], [18].



Gambar 2. Implementasi sistem irigasi otomatis berbasis IoT di lapangan

Implementasi sistem irigasi otomatis berbasis IoT yang terlihat pada Gambar 2 menunjukkan gabungan antara sensor, mikrokontroler, aktuator, dan platform IoT dalam satu sistem pengendalian irigasi yang bisa beradaptasi[11], [20]. Sensor kelembapan tanah berperan penting karena mampu mendeteksi kadar air tanah secara langsung. Sensor ditempatkan di area akar tanaman agar sistem bisa mendapatkan informasi yang tepat mengenai kebutuhan air tanaman, sehingga penyiraman bisa dilakukan secara tepat dan tidak terlalu banyak atau terlalu sedikit air[11], [20], [21]. Mikrokontroler, seperti ESP32, bertindak sebagai pusat pengendali yang memproses data dari sensor dan mengatur aktuator seperti pompa atau katup air[10], [18]. Data dari sensor dibandingkan dengan nilai kelembapan tanah yang sudah ditetapkan[18], [22]. Jika kelembapan tanah kurang dari tingkat yang ideal, sistem secara otomatis mengaktifkan aktuator untuk menyiram tanaman. Saat kelembapan sudah mencapai tingkat yang diinginkan, sistem akan menghentikan penyiraman. Selain itu, mikrokontroler juga mengirim data dari sensor ke platform IoT melalui jaringan tanpa kabel, sehingga pengguna bisa mengawasi kondisi tanah dan kinerja sistem secara langsung[1], [2], [3].

Aktuator di dalam sistem ini memungkinkan proses menyirami tanaman berjalan sendiri dan terus-menerus tanpa harus dioperasikan secara manual[4], [5]. Cara pengendaliannya yang otomatis ini langsung memberikan manfaat dalam penggunaan air lebih efisien, karena air hanya diberikan sesuai dengan kebutuhan tanaman[24], [48]. Penyediaan sistem irigasi berbasis IoT di lapangan juga memudahkan pengelolaan proses menyirami, terutama pada lahan pertanian yang ukurannya menengah sampai besar. Secara keseluruhan, penerapan sistem irigasi otomatis berbasis IoT seperti yang terlihat pada Gambar 2 menunjukkan kemungkinan besar dalam mendukung pertanian yang berkelanjutan[10], [55], [56]. Penggunaan data secara langsung dan pengendalian yang otomatis tidak hanya meningkatkan penggunaan air yang efisien, tetapi juga membantu menjaga kondisi tanah tetap optimal serta mendukung pengambilan keputusan menyirami yang lebih tepat di lapangan[48], [57], [58].

IV. HASIL

Hasil uji coba sistem irigasi otomatis berbasis Internet of Things (IoT) menunjukkan bahwa sistem berjalan sesuai dengan rencana awal dan bisa menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungan[32], [59]. Selama masa pengujian, sensor kelembapan tanah terus mengirimkan informasi ke mikrokontroler, yang kemudian menganalisis data tersebut untuk memutuskan apakah tanah membutuhkan air[11], [15], [60]. Dari pengamatan, nilai kelembapan tanah bisa dipertahankan dalam batas yang baik sesuai kebutuhan tanaman, sehingga tanah tidak terlalu kering atau terlalu basah. Sistem irigasi otomatis menunjukkan performa yang stabil dalam mengatur penyiraman[16], [17]. Jika kelembapan tanah di bawah batas yang ditetapkan, sistem akan mengaktifkan pompa atau katup air untuk menyiram tanaman. Tapi, ketika kelembapan tanah sudah sesuai level optimal, sistem akan berhenti menyiram secara otomatis[11], [18]. Cara kerja ini membuktikan bahwa sistem bisa berjalan terus menerus tanpa perlunya campur tangan manusia, sehingga meningkatkan efektivitas dan keandalan sistem irigasi[15], [19].

Perbandingan penggunaan air sebelum dan sesudah menggunakan sistem menunjukkan penurunan jumlah air yang digunakan secara signifikan[11], [12]. Dalam metode irigasi yang biasa digunakan, penyiraman dilakukan berdasarkan jadwal tetap atau perkiraan manual, yang sering menyebabkan pemborosan air. Setelah sistem irigasi otomatis berbasis IoT diterapkan, penggunaan air menjadi lebih terkendali karena penyiraman hanya dilakukan saat tanah benar-benar membutuhkan air[11], [18], [20]. Ini menunjukkan bahwa sistem tersebut berperan langsung dalam meningkatkan

penggunaan air secara efisien[20], [21]. Hasil penelitian ini sesuai dengan penemuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa penerapan sistem irigasi berbasis IoT dapat menghemat penggunaan air dan meningkatkan pengelolaan irigasi secara lebih efektif. Namun, kelebihan dari penelitian ini adalah penggunaan sistem yang diuji langsung di lapangan dengan integrasi sensor, mikrokontroler, dan platform IoT secara menyeluruh[10], [11], [18]. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan tidak hanya berupa prototipe, tetapi juga memiliki kemungkinan untuk diterapkan secara nyata dalam mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan dan pengelolaan air yang lebih efisien[46], [54].

V. PEMBAHASAN

Penelitian menunjukkan bahwa sistem irigasi otomatis yang menggunakan Internet of Things (IoT) bisa membuat penggunaan air lebih efisien dibandingkan cara irigasi biasa[44], [49]. Hasil ini mendukung konsep irigasi presisi, yaitu pemberian air sesuai dengan kebutuhan sebenarnya tanaman serta kondisi lingkungan. Dalam pengelolaan air pertanian, salah satu penyebab utama pemborosan adalah penyiraman yang tidak memperhatikan kondisi kelembapan tanah secara nyata[15], [48], [55]. Dengan memakai sensor kelembapan tanah, sistem yang dibuat dalam penelitian ini mampu mengatasi masalah tersebut dengan mengambil keputusan irigasi berdasarkan data secara langsung[10], [48], [57].

Sistem mampu menjaga tingkat kelembapan tanah dalam rentang yang ideal, menunjukkan bahwa integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan aktuator berjalan dengan baik[32], [59]. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penggunaan sensor kelembapan tanah dapat meningkatkan kondisi tanah dan mengurangi risiko kekurangan air bagi tanaman[11], [15]. Secara fisiologis, kelembapan tanah yang terjaga dengan baik membantu akar menyerap air dan nutrisi, sehingga mendorong pertumbuhan dan kesehatan tanaman[7], [61]. Dari segi sistem, mikrokontroler bertindak sebagai pusat pengendali yang memungkinkan proses irigasi berjalan secara otomatis dan teratur. Hal ini sesuai dengan konsep otomatisasi pertanian yang bertujuan meningkatkan efisiensi kerja dan mengurangi ketergantungan pada tenaga manusia[62], [63], [64]. Dibandingkan penelitian sebelumnya yang hanya fokus pada pembuatan prototipe kecil, penelitian ini memberikan kontribusi lebih dengan menerapkan sistem yang sudah diuji di lapangan, sehingga lebih mencerminkan kondisi nyata di sektor pertanian[55], [56].

Implikasi nyata dari hasil penelitian ini cukup penting, terutama dalam hal pengelolaan air secara berkelanjutan. Sistem irigasi otomatis yang menggunakan teknologi IoT bisa membantu petani mengatur penggunaan air secara optimal, mengurangi biaya pemeliharaan, serta meningkatkan kinerja pengelolaan irigasi[48], [57], [58]. Selain itu, kemampuan memantau dari jarak jauh melalui platform IoT membuat proses pengambilan keputusan menjadi lebih mudah dan berbasis informasi[7], [60], [61]. Secara akademis, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan penggunaan IoT di bidang pertanian cerdas dengan memperkuat bukti-bukti nyata mengenai efektivitas sistem irigasi otomatis dalam meningkatkan penggunaan air yang lebih efisien[6], [7], [8].

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas tentang pembuatan dan penerapan sistem irigasi otomatis yang menggunakan teknologi Internet of Things (IoT) sebagai cara untuk meningkatkan penggunaan air secara lebih efisien di bidang pertanian. Berdasarkan langkah-langkah penelitian yang telah dilakukan, mulai dari membuat rancangan sistem, memasang perangkat keras dan perangkat lunak, hingga melakukan uji coba di lapangan, dapat disimpulkan bahwa sistem irigasi otomatis berbasis IoT mampu berjalan secara fleksibel dan efektif dalam mengatur proses penyiraman tanaman. Sistem ini menggunakan sensor untuk mengukur tingkat kelembapan tanah sebagai dasar pengambilan keputusan dalam penyiraman, sehingga air hanya diberikan sesuai dengan kebutuhan sebenarnya tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem irigasi otomatis berbasis IoT dapat mengurangi konsumsi air dibandingkan dengan metode irigasi tradisional yang masih mengandalkan jadwal tetap atau penilaian manual. Dengan menjaga tingkat kelembapan tanah dalam batas yang ideal, sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air, tetapi juga bisa membantu tanaman tumbuh lebih baik. Dengan demikian, hasil penelitian ini secara langsung menjawab tantangan yang diajukan terkait bagaimana teknologi IoT dapat digunakan untuk meningkatkan penggunaan air secara efisien serta mencapai tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

Kontribusi dari penelitian ini adalah pengembangan model sistem irigasi cerdas yang bisa digunakan di lapangan, terutama dalam mendukung pertanian yang ramah lingkungan. Dengan menggabungkan sensor, mikrokontroler, aktuator, dan platform IoT, penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi digital bisa digunakan secara efektif untuk mengelola air secara lebih optimal. Selain itu, penelitian ini juga memperkuat hasil penelitian sebelumnya tentang peran IoT dalam pertanian cerdas dengan menunjukkan contoh nyata implementasi sistem tersebut. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa kekurangan. Uji coba sistem dilakukan dalam skala dan durasi yang terbatas, sehingga hasil yang didapatkan belum mampu menggambarkan performa sistem dalam jangka waktu yang

lebih lama dan berbagai kondisi lingkungan yang berbeda. Oleh karena itu, disarankan untuk penelitian berikutnya dilakukan uji coba dengan skala lahan yang lebih luas, berbagai jenis tanaman, serta berbagai kondisi iklim. Selain itu, pengembangan sistem dapat diperluas dengan mengintegrasikan data cuaca, menerapkan algoritma pengambilan keputusan yang lebih cerdas, serta melakukan analisis aspek ekonomi untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan sistem secara menyeluruh.

Kontribusi Penulis: [Lailatul Fitriyah] berkontribusi pada perancangan dan implementasi sistem. [Zahrotun Naimah] berperan dalam pengumpulan serta analisis data. [Sofa Aulia Rofika] bertanggung jawab atas penulisan, pembahasan, dan penyuntingan naskah. Seluruh penulis berpartisipasi dalam peninjauan akhir artikel

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi: -

Pernyataan Dewan Peninjau Institusional: -

Subjek Hewan: -

ORCID:

First Author: -

Second Author: -

Third Author: -

REFERENCES

- [1] C. Ingrao, R. Strippoli, G. Lagioia, and D. Huisingsh, "Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, p. e18507, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18507.
- [2] M. A. Monteiro, Y. T. Bahta, and H. Jordaan, "A Systematic Review on Drivers of Water-Use Behaviour among Agricultural Water Users," *Water*, vol. 16, no. 13, p. 1899, Jul. 2024, doi: 10.3390/w16131899.
- [3] S. Shang, H. F. Gabriel, and Q. Zhang, "Editorial on Hydrology and Water Resources in Agriculture and Ecology," *Remote Sens.*, vol. 16, no. 2, p. 238, Jan. 2024, doi: 10.3390/rs16020238.
- [4] A. Biswas *et al.*, "Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production – A critical review of the impacts and adaptation strategies," *Cambridge Prism. Water*, vol. 3, p. e4, Jan. 2025, doi: 10.1017/wat.2024.16.
- [5] L. Rosa and L. He, "Global multi-model projections of green water scarcity risks in rainfed agriculture under 1.5 °C and 3 °C warming," *Agric. Water Manag.*, vol. 314, p. 109519, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.agwat.2025.109519.
- [6] T. T. Bamgboye, T. Avellán, B. Klöve, and A. T. Haghighi, "Compounding impacts of climate change and urbanisation on water-energy-food Nexus in global south countries. A systematic review," *Environ. Sustain. Indic.*, vol. 27, p. 100791, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.indic.2025.100791.
- [7] A. Batisha, "Multi-disciplinary strategy to optimize irrigation efficiency in irrigated agriculture," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 11433, May 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61372-0.
- [8] Q. Xu *et al.*, "Evaluating the Effect of Deficit Irrigation on Yield and Water Use Efficiency of Drip Irrigation Cotton under Film in Xinjiang Based on Meta-Analysis," *Plants*, vol. 13, no. 5, p. 640, Feb. 2024, doi: 10.3390/plants13050640.
- [9] A. Matsoukis, "Irrigation Water in Agriculture: Challenges and Interventions in an Era of Global Boiling," *Curr. Agric. Res. J.*, vol. 13, no. 1, pp. 01–03, Apr. 2025, doi: 10.12944/CARJ.13.1.01.
- [10] A. A. Abdelmoneim, H. N. Kimaita, C. M. Al Kalaany, B. Derardja, G. Dragonetti, and R. Khadra, "IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects," *Sensors*, vol. 25, no. 7, p. 2291, Apr. 2025, doi: 10.3390/s25072291.
- [11] S. Gupta *et al.*, "Smart agriculture using IoT for automated irrigation, water and energy efficiency," *Smart Agric. Technol.*, vol. 12, p. 101081, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.101081.
- [12] N. Jaiswal, T. V. Kumar, and C. Shukla, "Smart drip irrigation systems using IoT: a review of architectures, machine learning models, and emerging trends," *Discov. Agric.*, vol. 3, no. 1, p. 253, Nov. 2025, doi: 10.1007/s44279-025-00430-1.
- [13] M. Mohiuddin, M. S. Islam, and S. Shanjida, "Internet of Things (IoT)-Based Smart Agriculture Irrigation and Monitoring System Using Ubidots Server," in *ECSA-11*, Basel Switzerland: MDPI, Nov. 2024, p. 99. doi: 10.3390/ecsa-11-20528.

- [14] M. R. Ariwibowo, L. A. Setiawan, and A. Iman, "SISTEM PEMANTAU KELEMBAPAN TANAH DAN DEBIT AIR PADA TANAMAN CABAI MENGGUNAKAN ESP32 BERBASIS INTERNET OF THINGS," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6382.
- [15] W. Wahyudi, A. I. Pradana, and H. Permatasari, "Implementasi Sistem Irigasi Otomatis Berbasis IoT untuk Pertanian Greenhouse," *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 5, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.52436/1.jpiti.656.
- [16] Budi Gunawan, Arbi Alfian Mas'ud, Khasanul Khakim, Muhammad Febriyanda Wiryawan, and Reza Rachmat Setyabudi, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Irigasi Otomatis Berbasis IoT untuk Tanaman Stevia," *Mars J. Tek. Mesin, Ind. Elektro Dan Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 6, pp. 40–51, Nov. 2024, doi: 10.61132/mars.v2i6.492.
- [17] R. Ojha, Manvir, A. Fayaz, and M. Kaundal, "Smart Irrigation Systems Using the Internet of Things: Applications in Farming Systems," *J. Adv. Biol. Biotechnol.*, vol. 28, no. 8, pp. 361–376, Jul. 2025, doi: 10.9734/jabb/2025/v28i82712.
- [18] A. Julianto Pratama and R. Mandela, "Evaluating the Effectiveness of Smart Irrigation Systems in Improving Agricultural Productivity," *Agric. Power J.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–9, Nov. 2024, doi: 10.70076/apj.v1i4.43.
- [19] P. Tang, Q. Liang, H. Li, and Y. Pang, "Application of Internet-of-Things Wireless Communication Technology in Agricultural Irrigation Management: A Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3575, Apr. 2024, doi: 10.3390/su16093575.
- [20] N. Nurhaliza, "PERANCANGAN SISTEM IRIGASI OTOMATIS BERBASIS IOT UNTUK OPTIMALISASI PENGGUNAAN AIR PADA LAHAN PERTANIAN KERING," *J. Tek. Indones.*, vol. 3, no. 4, pp. 129–137, Apr. 2025, doi: 10.58860/jti.v3i4.668.
- [21] P. M. D. S. Duraisamy, and D. R. Shankar, "Hydrosense: Pioneering Iot for Precision Drip Irrigation and Sustainable Water Management," *Int. J. Res. Sci. Innov.*, vol. XII, no. V, pp. 1130–1137, Jun. 2025, doi: 10.51244/IJRSI.2025.120500110.
- [22] R. H. Harefa and H. Gunawan, "Perancangan Smart Agriculture System Berbasis Internet of Things," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 79–86, Mar. 2024, doi: 10.47709/digitech.v4i1.3647.
- [23] V. Kumar, K. V. Sharma, N. Kedam, A. Patel, T. R. Kate, and U. Rathnayake, "A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies," *Smart Agric. Technol.*, vol. 8, p. 100487, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100487.
- [24] K. A. Saragih and R. Kurniawan, "Sistem Penyiraman Otomatis Berbasis IoT dengan Logika Fuzzy Sugeno untuk Pengendalian Kelembapan Tanah di Greenhouse," *J. Algoritma*, vol. 22, no. 1, pp. 808–819, Jun. 2025, doi: 10.33364/algoritma/v.22-1.2327.
- [25] Abdullah Azzam Alhudhaibi, Ida Nurlinda, and Nadia Astriani, "Implementasi Pengaturan Adaptasi Perubahan Iklim di Sektor Pertanian dalam Mencapai Ketahanan Pangan di Indonesia," *Hidroponik J. Ilmu Pertan. Dan Teknol. Dalam Ilmu Tanam.*, vol. 2, no. 1, pp. 238–245, Feb. 2025, doi: 10.62951/hidroponik.v2i1.274.
- [26] D. P. Ayuningtyas and F. Rositawati, "Pemanfaatan AI dalam Smart Farming untuk Mencapai SDGs 2 (Zero Hunger) di Indonesia," *ANTASENA Gov. Innov. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 176–190, Jun. 2025, doi: 10.61332/antasena.v3i1.325.
- [27] C. Huda, B. Etikasih, and P. S. D. Puspitasari, "A Smart Greenhouse Production System Utilizes an IoT Technology," *JUITA J. Inform.*, vol. 11, no. 1, p. 117, May 2023, doi: 10.30595/juita.v11i1.16191.
- [28] Muhammad Zikri, Muhammad Fikry, and Rizki Suwanda, "RANCANG BANGUN SMART GREENHOUSE OTOMATIS BERBASIS INTERNET OF THINGS DENGAN KONTROL RULE-BASED UNTUK OPTIMALISASI PERTUMBUHAN TANAMAN TOMAT," *Rabit J. Teknol. Dan Sist. Inf. Univrab*, vol. 10, no. 2, pp. 693–700, Jul. 2025, doi: 10.36341/rabit.v10i2.6435.
- [29] Suraj Singh Mehta, Heer Patel, and Khushboo Shah, "Optimizing Agriculture Water Use with Arduino Based IOT Smart Irrigation," *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 5, pp. 160–170, Sep. 2025, doi: 10.32628/IJRSSET251368.
- [30] M. E. Apriyani, A. Ismail, and A. Widya Andini, "Sistem Monitoring Budidaya Melon Melalui Greenhouse Berbasis Internet Of Things," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 12, no. 1, pp. 187–194, Feb. 2025, doi: 10.25126/jtiik.2025129164.
- [31] Julvin Saputri Mendofo, Martirah Warni Zendrato, Nisiyari Halawa, Elias Elwin Zalukhu, and Natalia Kristiani Lase, "Peran Teknologi dalam Meningkatkan Efisiensi Pertanian," *Tumbuh. Publ. Ilmu Sociol. Pertan. Dan Ilmu Kehutan.*, vol. 1, no. 3, pp. 01–12, Sep. 2024, doi: 10.62951/tumbuhan.v1i3.111.
- [32] D. S. Kingslin and M. K. Vaishnavi, "A Comprehensive Survey on IoT-Based Smart Irrigation in Agriculture," *Int. J. Res. Sci. Innov.*, vol. XII, no. VII, pp. 708–711, 2025, doi: 10.51244/IJRSI.2025.120700071.
- [33] A. Bounajra, K. El Guemmat, K. Mansouri, and F. Akef, "Towards efficient irrigation management at field scale using new technologies: A systematic literature review," *Agric. Water Manag.*, vol. 295, p. 108758, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.agwat.2024.108758.
- [34] L. K. Mohanty et al., "Water Saving Strategies in Field-based Agriculture: A Review of Traditional and Modern Approaches Across Agro-ecological Contexts in India," *J. Sci. Res. Reports*, vol. 31, no. 12, pp. 96–113, Nov. 2025, doi: 10.9734/jsrr/2025/v31i123755.
- [35] F. Rozci, "DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP SEKTOR PERTANIAN PADI," *J. Ilm. Sosio Agribis*, vol. 23, no. 2, p. 108, Jan. 2024, doi: 10.30742/jisa23220233476.
- [36] A. Kurniawan, A. Ristiono, and S. Sulistiadi, "Monitoring Iklim Mikro pada Greenhouse Secara Real Time Menggunakan Internet of Things (IoT) Berbasis Thingspeak," *J. Tek. Pertan. Lampung (Journal Agric. Eng.)*, vol. 10, no. 4, p. 468, Dec. 2021, doi: 10.23960/jtep-l.v10i4.468-480.
- [37] R. Meiyanti, N. Nunsina, R. Fitria, and M. M. Munauwar, "Application of a Smart Farming Monitoring System to Optimize Vegetable Production in North Aceh," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 2, pp. 1070–1076, Nov. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i2.7285.
- [38] L. R. E. Malau, K. R. Rambe, N. A. Ulya, and A. G. Purba, "Dampak perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan di indonesia," *J. Penelit. Pertan. Terap.*, vol. 23, no. 1, pp. 34–46, Mar. 2023, doi: 10.25181/jppt.v23i1.2418.
- [39] T. S. Kalaivani, T. Kamireddy, and S. Govindakumar, "IoT-Enabled Soil and Crop Monitoring System Using Low-Cost Smart Sensors for Precision Agriculture," in *The 12th International Electronic Conference on Sensors and Applications*, Basel Switzerland: MDPI, Nov. 2025, p. 77, doi: 10.3390/ECSA-12-26537.
- [40] K. M. Hosny, W. M. El-Hady, and F. M. Samy, "Technologies, Protocols, and applications of Internet of Things in greenhouse Farming: A survey of recent advances," *Inf. Process. Agric.*, vol. 12, no. 1, pp. 91–111, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.inpa.2024.04.002.
- [41] S. N. Kumar, K. Suriyan, A. T. Jacob, A. Varghese, and E. Francis, "Smart farming for a sustainable future: implementing IoT-based systems in precision agriculture," *Bull. Natl. Res. Cent.*, vol. 49, no. 1, p. 71, Oct. 2025, doi: 10.1186/s42269-025-01366-8.
- [42] C. da-Silva-Branco, A. G. de Brito, and P. C. Seixas, "A comprehensive review of traditional irrigation systems: Sustainability and future prospects," *Agric. Syst.*, vol. 231, p. 104481, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.agry.2025.104481.
- [43] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Zulfikri, G. Arifin, and R. M. Ilhamsyah, "Analysis of Phishing Attack Trends, Impacts and Prevention Methods: Literature Study," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 413–421, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4357.
- [44] F. P. Eka Putra, A. M. Ubaidillah Solichin, M. N. Wildanul Hakim, and M. T. Ramadhan, "Pemanfaatan Teknologi Wireless dan Mobile Network Berbasis 5G Untuk Pemerataan Akses Jaringan di Indonesia," *Infotek J. Inform. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 415–425, Jul. 2025, doi: 10.29408/jit.v8i2.30559.

- [45] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. B. Tamam, and R. W. Efendi, "Implementation And Simulation Of Dynamic Arp Inspection In Cisco Packet Tracer For Network Security," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 340–347, Jul. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4199.
- [46] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. A. Huda, H. Hasbullah, and A. Rohman, "Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 434–442, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4373.
- [47] F. P. E. Putra, D. A. M. Putra, A. Firdaus, and A. Hamzah, "Analisis Kecepatan Dan Kinerja Jaringan 5G (generasi ke 5) Pada Wilayah Perkotaan," *INFORMATICS Educ. Prof. J. Informatics*, vol. 8, no. 1, p. 47, Jul. 2023, doi: 10.51211/itbi.v8i1.2439.
- [48] Aji Nur Iman and Suyud Widiono, "PERANCANGAN APLIKASI SMART GREENHOUSE BERBASIS IOT UNTUK OPTIMALISASI PERTUMBUHAN SAYURAN," *J. Inform. dan Rekayasa Elektron.*, vol. 7, no. 2, pp. 289–401, Nov. 2024, doi: 10.36595/jire.v7i2.1322.
- [49] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, Jan. 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [50] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Hamzah, W. A. Pramadi, and A. Nuraini, "Systematic Literature Review: Security Gap Detection On Websites Using Owasp Zap," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 348–355, Jul. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4227.
- [51] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, Jul. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [52] A. F. Rachman, F. P. E. Putra, S. Syirofi, and D. Wahid, "Case Study of Computer Network Development for the Internet Of Things (IoT) Industry in an Urban Environment," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 399–407, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4302.
- [53] F. P. E. Putra, F. Muslim, N. Hasanah, Holipah, R. Paradina, and R. Alim, "Analisis Komparasi Protokol Websocket dan MQTT Dalam Proses Push Notification," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 63–72, Jan. 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.325.
- [54] F. P. E. Putra, Amir Hamzah, W. Agel, and R. O. Firmansyah Kusuma, "Implementasi Sistem Keamanan Jaringan Mikrotik Menggunakan Firewall Filtering dan Port Knocking," *J. Sistim Inf. dan Teknol.*, pp. 82–87, Jan. 2024, doi: 10.60083/jsisfotek.v5i4.329.
- [55] M. Ibnu, "Tantangan Sektor Pertanian dalam Memenuhi Kebutuhan Pangan Berkelanjutan," *J. Litbang Media Inf. Penelitian, Pengemb. dan IPTEK*, vol. 20, no. 2, pp. 135–148, Dec. 2024, doi: 10.33658/jl.v20i2.400.
- [56] A. A. El-Sheshny, A. M. Abdel-Hameed, M. A. Al-Rajhi, H. G. Ghanem, T. M. Elzanaty, and M. H. Fayed, "Optimizing water management in greenhouse farming through an IoT-enabled monitoring system," *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 24, no. 4, p. 33, Aug. 2025, doi: 10.1007/s44447-025-00039-2.
- [57] S. Mansoor, S. Iqbal, S. M. Popescu, S. L. Kim, Y. S. Chung, and J.-H. Baek, "Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future prospectives," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, May 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1587869.
- [58] M. P. Chemudugunta, M. E. and P. Anandkumar, "Automatic Water Sprinkler Using Iot Automation," *Int. J. Res. Sci. Innov.*, vol. XII, no. V, pp. 1536–1546, Jun. 2025, doi: 10.51244/IJRSI.2025.120500146.
- [59] M. Syarif, J. Maulindar, and M. Erlinawati, "RANCANG BANGUN SISTEM PENGAIRAN OTOMATIS BERBASIS IOT DENGAN MODEL PROTOTYPE DI DESA TANGKISAN," *J. Inform. Teknol. dan Sains*, vol. 7, no. 3, pp. 1241–1249, Aug. 2025, doi: 10.51401/jinteks.v7i3.5972.
- [60] R. Phandeirrot, M. Najoan, and S. Kaunang, "Smart Agriculture System in Tropical Regions Based on Internet of Things," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 14, no. 1, pp. 39–44, Jul. 2025, doi: 10.35793/jtek.v14i1.60891.
- [61] Willi Bianyosa Arif Wibiya and Aris Nasuha, "Monitoring Smart Applications for Monitoring and Controlling of IoT-Based Strawberry Hydroponic Plants," *J. Robot. Autom. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 57–69, Jan. 2024, doi: 10.21831/jraee.v1i2.166.
- [62] M. F. Al-Adhim and G. S. Dewi, "Sistem Monitoring IoT Smart Farm Berbasis Web dengan Integrasi Template Dashboard Bootstrap dan Laravel 10," *COMSERVA J. Penelit. dan Pengabd. Masy.*, vol. 4, no. 7, pp. 1973–1981, Nov. 2024, doi: 10.59141/comserva.v4i7.2595.
- [63] Z. A. Alsarray and S. A. Kadhim, "Risks and Challenges of the Internet of Things: An Analytical Review of Previous Studies and Future Research Directions," *J. Port Sci. Res.*, vol. 8, no. 4, Jun. 2025, doi: 10.36371/port.2025.4.5.
- [64] S. Lestari, T. Fadly Ramadhan, A. Hardiyanto, and P. Pramono, "Sistem Irigasi Otomatis Berbasis Sensor Kelembaban Tanah Pada Tanaman Cabai Menggunakan Esp32," *Pros. Semin. Nas. Teknol. Inf. dan Bisnis*, pp. 1154–1158, Jul. 2025, doi: 10.47701/rcryjz73.

Publisher's Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.