

Survei *Internet of Things* dan Kecerdasan Buatan untuk Pengujian Kualitas Struktur Beton

Sugiarto Cokrowibowo*¹, A.Amirul Asnan Cirua², Dahlia Patah³

^{1,2}Program Studi Informatika, Universitas Sulawesi Barat

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sulawesi Barat

E-mail: ¹ sugiarto.cokrowibowo@unsulbar.ac.id, ² amirulasnancirua@unsulbar.ac.id,
³ dahliapatah@unsulbar.ac.id

Abstrak

Perkembangan Internet of Things (IoT) dan Kecerdasan buatan pada bidang struktur bangunan (beton) menjadi topik yang menarik dalam beberapa tahun terakhir. Tantangan industri 4.0 yang semakin pesat pada bidang struktur bangunan sehingga penelitian terhadap kualitas struktur beton tidak terlepas dari pemantauan dan penilaian yang ketat. Metode konvensional masih banyak diterapkan tetapi memiliki kekuarangan. Dalam ulasan ini dipaparkan peran IoT dan kecerdasan buatan dalam penentuan kualitas beton. Beberapa penelitian menggunakan sensor seperti inframerah dan thermocouple berfokus pada monitoring tingkat kekuatan beton dengan parameter seperti suhu, pH, kelembaban, dan regangan, sedangkan penelitian lain berfokus pada deteksi keretakan pada beton menggunakan image processing dan integrasi kecerdasan buatan. CNN menjadi metode yang banyak diterapkan dalam deteksi retak pada beton. Selain itu, jaringan syaraf tiruan juga digunakan untuk melakukan prediksi pada kualitas beton. Dalam beberapa kasus masih ditemukan beberapa kekurangan dan topik penelitian ini masih terbuka menarik untuk diteliti.

Kata kunci—IoT, Kecerdasan buatan, Beton, Sensor, Monitoring

Abstract

The development of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence in the field of building structures (concrete) has become an interesting topic in recent years. The challenges of industry 4.0 are accelerating in the field of building structures so that research on the quality of concrete structures cannot be separated from strict monitoring and assessment. Conventional methods are still widely applied but have shortcomings. In this review, the role of IoT and artificial intelligence in determining concrete quality is presented. Some research using sensors such as infrared and thermocouple focuses on monitoring the strength level of concrete with parameters such as temperature, pH, humidity, and strain, while other research focuses on crack detection in concrete using image processing and artificial intelligence integration. CNN is a widely applied method in crack detection in concrete. In addition, artificial neural networks are also used to predict the quality of concrete. In some cases, there are still some shortcomings and this research topic is still open to interesting research.

Keywords— IoT, Artificial intelligence, Concrete, Sensor, Monitoring

1. PENDAHULUAN

Internet of Things (IoT) diperkenalkan oleh Kevin Ashton pada tahun 1990an. Gagasan utama dari IoT tersebut adalah mendigitalkan dunia fisik dengan memungkinkan pertukaran informasi antar perangkat yang terhubung, menggunakan teknologi konektivitas dan elemen semikonduktor [1]. IoT dalam perspektif fungsional merupakan objek di seluruh dunia dapat bertukar informasi melalui media internet. Sedangkan dari perspektif teknis merupakan indentifikasi, pengumpulan data, dan kemampuan pemrosesan data [2]. Melalui jaringan IoT, memungkinkan perangkat penginderaan terhubung ke jaringan Internet serta memungkinkan transfer data dan membentuk jaringan komunikasi yang dapat digunakan untuk monitoring/pelacakan dan identifikasi objek. Persepsi yang efektif, interkonektivitas yang luas, analisis dan pemrosesan cerdas, dan pengalaman individual adalah empat pilar IoT [3]. Perkembangan industri 4.0 yang berfokus pada konektivitas, *big data*, dan *machine learning*. Industri 4.0 telah bertransformasi menuju sistem manufaktur otomatis yang menjamin produktivitas tinggi dan biaya rendah serta memunculkan *Industrial Internet of Things* (IIoT) Penggabungan operasi fisik dan proses sistem cerdas yang didukung oleh model kecerdasan buatan serta otomatisasi dalam dunia industri manufaktur.

Fokus pada penelitian ini adalah struktur pada beton. Sejarah semen dijelaskan oleh [4], dimana Bangsa Romawi Kuno mungkin merupakan bangsa yang pertama kali menggunakan beton, dimana sebuah kata berasal dari bahasa latin yang kemudian didasarkan pada semen hidrolik, yaitu bahan yang mengeras di bawah air. Pada tahun 1824, semen romawi telah ditinggalkan dan beralih menggunakan semen modern atau yang dikenal dengan semen portland. Semen Portland adalah semen yang diperoleh dengan mencampurkan kapur dan argillaceous, atau bahan yang mengandung silika, alumina, dan oksida besi lainnya, membakarnya pada suhu yang tinggi, dan menggiling klinker yang dihasilkan. Permasalahan yang sering ditemukan pada beton adalah daya tahan dari struktur beton itu sendiri. Secara umum, daya tahan beton dipengaruhi oleh banyak faktor, misalnya material, lingkungan, konstruksi, dan desain. Di antara faktor-faktor tersebut, retak usia dini selama proses konstruksi, merupakan salah satu faktor yang paling penting. Retak usia dini disebabkan oleh hidrasi dan penyusutan beton selama tahap curing, belum mendapat perhatian yang cukup hingga saat ini [5], [6]. Penelitian [7], berfokus pada sensor yang dikembangkan dalam memantau suhu, kelembapan, pH, laju korosi, dan tegangan/regangan, serta sensor yang dibuat secara khusus berdasarkan teknologi serat optik, kisi Bragg, piezoelektrik, elektrokimia, nirkabel, dan penginderaan mandiri. Selanjutnya penelitian oleh [8] mengatakan bahwa dalam dekade terakhir penerapan IoT dan *Artificial Intelligence* (AI) telah meningkat pesat dalam otomatisasi diberbagai industri dimana untuk efisiensi konstruksi dan pemeliharaan infrastruktur terdapat kebutuhan untuk mengakses dan memeriksa data terukur secara *real-time* serta kecerdasan buatan tingkat lanjut dilakukan untuk optimalisasi metaheuristik. implementasi kecerdasan buatan pada beton bendungan dilakukan untuk prediksi deformasi beton bendungan [9].

2. METODE

Metode kualitatif serta kajian literatur dilakukan pada penelitian ini. Pengkajian terhadap teori dan hubungan antar variabel terkait berdasarkan jurnal serta buku yang membahas tentang implementasi IoT dan *Artificial Intelligence* (AI) dalam perkembangan industri 4.0. Literatur review secara sistematis dilakukan terhadap penelitian sebelumnya banyak membahas tentang proyeksi IoT dan AI dimana fokus utama pada penelitian ini adalah implementasi terhadap pengujian beton.

Hasil dari literatur review ini akan menjelaskan peluang IoT dan *Artificial Intelligence* seperti penggunaan sensor, prediksi, dan penggunaan model pembelajaran mesin dalam membantu proses pengujian beton.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

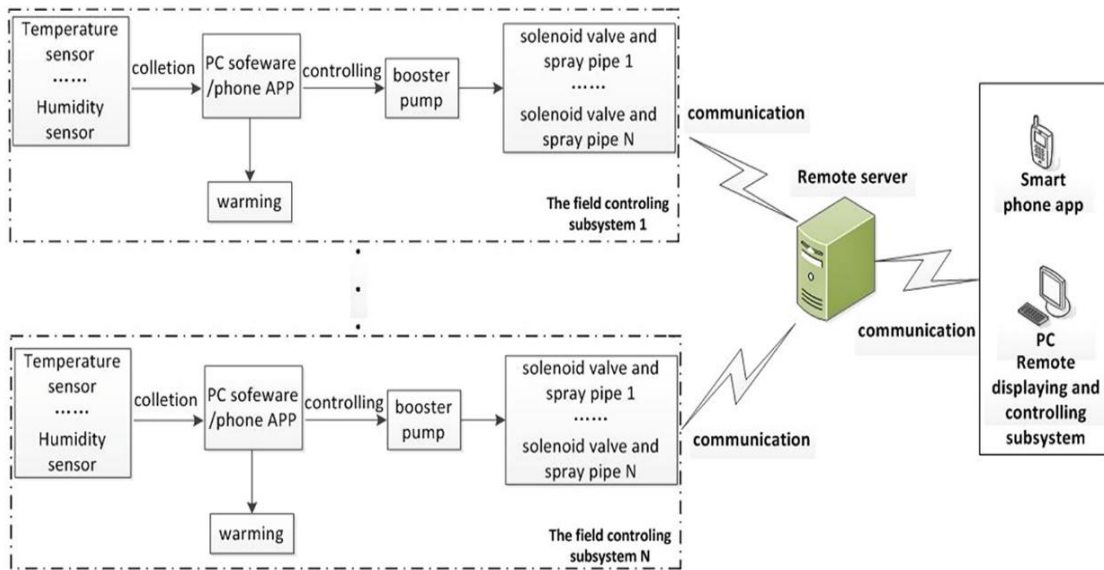
Berdasarkan kajian literatur mengenai peranan *Internet of Things* dan *Artificial Intelligence* terhadap bidang struktur beton. Beberapa penelitian sebelumnya dipaparkan pada yang mengacu pada fokus riset yang diteliti.

Pada penelitian oleh [7], memberikan review terhadap penelitian terkini pada bidang sensor dalam pengembangan monitoring infrastruktur beton. Fokus pada penelitian ini yaitu parameter suhu, kelembapan, pH, korosi, dan tegangan/regangan. Penekanannya lebih pada sensor yang dibuat berdasarkan teknologi serat optik, kisi Bragg, piezoelektrik, elektrokimia, nirkabel, dan penginderaan mandiri. Sedangkan sensor berbasis serat optik dan kisi Bragg lebih banyak digunakan dalam memantau kelembapan, suhu dan pH, sedangkan sensor elektrokimia umumnya digunakan untuk pemantauan korosi, dan transduser piezoelektrik serta beton penginderaan mandiri terutama digunakan untuk deteksi dan pemantauan regangan/tekanan.

Penelitian yang dilakukan oleh [10], pentingnya prediksi terhadap perilaku higrotermal secara akurat dapat membantu dalam mengetahui masa ketahanan beton. Pada penelitian tersebut dikembangkan model prediksi higrotermal berbasis jaringan saraf untuk memperkirakan kondisi higrotermal temporal pada anggota fasad beton yang dilindungi permukaan. Model ini berfokus pada fitur spesifik dari perilaku higrotermal menggunakan data suhu dan kelembapan relatif selama dua tahun yang diperoleh dari probe yang dipasang. Metode jaringan saraf tiruan adalah jaringan komputasi yang terinspirasi oleh jaringan saraf biologis yang terdiri dari unit pemrosesan sederhana yang saling berhubungan sebagian atau seluruhnya yang disebut neuron buatan. Model neuron buatan yang menjadi dasar perancangan jaringan saraf pada dasarnya terdiri dari sekumpulan sinapsis, penambah, fungsi aktivasi, dan bias. Model yang digunakan pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan arsitektur jaringan saraf berulang NARX. Penelitian ini menggunakan data kelembapan relatif lingkungan dan suhu lingkungan sebagai masukan. Data kelembapan dan suhu relatif yang diukur di dalam bagian fasad beton yang dilindungi permukaan pada kedalaman diagonal 40 mm ditetapkan sebagai target. Tahap selanjutnya adalah melakukan *training*, validasi, dan *testing* menggunakan data dua tahun. Uji kinerja model yang disajikan menunjukkan bahwa model tersebut memprediksi kinerja higrotermal di dalam beton dengan kesalahan yang cukup rendah. Data higrotermal yang diperoleh dari model digunakan untuk menghitung laju korosi dan memperkirakan tingkat risiko kerusakan yang disebabkan oleh embun beku dan serangan kimia.

Penelitian dilakukan oleh [11], terhadap monitoring suhu pada bangunan saat terjadi kebakaran diusulkan. Penggunaan sensor serat optik berdasarkan Regenerated Fiber Bragg Gratings yang dirancang khusus untuk ditanam dalam struktur beton untuk memantau suhu selama peristiwa kebakaran. Uji praktis dilakukan pada balok sepanjang 5,8 m yang dikenai kurva kebakaran ISO-834 selama 77 menit di bawah beban tipikal yang ditanggung oleh balok pada struktur konvensional. Sembilan sensor optik dipasang di bagian tengah bentang balok dan mengarah langsung ke api dan gradien suhu tinggi (dengan urutan 200° C/menit) yang membuatnya mengukur suhu maksimum 953° C. Temperatur yang direkam oleh sensor baru dibandingkan dengan yang diperoleh dari sensor listrik (termokopel) dan model numerik, yang menunjukkan kecocokan yang baik, kecuali di tempat-tempat di mana keretakan beton menyebabkan distorsi pada hasil dan / atau kegagalan sensor. Kendala yang ditemukan pada penelitian ini yaitu pada kabel yang menghubungkan sensor ke unit pembacaan, keretakan beton mempengaruhi sensor sehingga beberapa sensor berhenti beroperasi sebelum pengujian berakhir. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan desain kabel yang benar dan bagaimana kabel tersebut harus dihubungkan ke sensor agar tidak rusak akibat spalling.

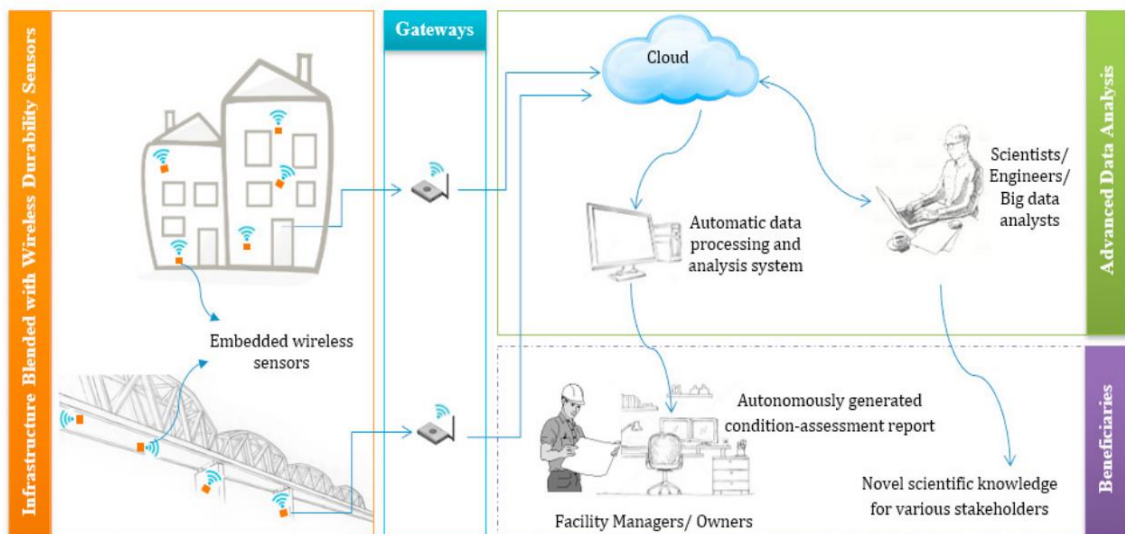
Penelitian oleh [12], mengusulkan sistem pengawetan beton cerdas berbasis internet yang baru dikembangkan untuk konstruksi struktur bawah tanah. Sistem pengawetan beton menggunakan arsitektur terdistribusi dan terdiri dari subsistem pengukuran dan pengendalian lapangan, subsistem tampilan dan pengendalian jarak jauh, dan server jarak jauh. Arsitektur keseluruhan sistem diusulkan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Arsitektur pengawetan beton [12]

Sistem yang diusulkan dilakukan dengan pemantauan secara *realtime* dari suhu internal dan kelembaban beton, sehingga penyemprotan pada beton secara otomatis dilakukan untuk menjamin kadar air pada permukaan beton. Sistem ini dapat menghindari ketidakseragaman kadar air yang disebabkan oleh pekerjaan manual dan terbentuknya retakan, serta meningkatkan kualitas pemeliharaan beton.

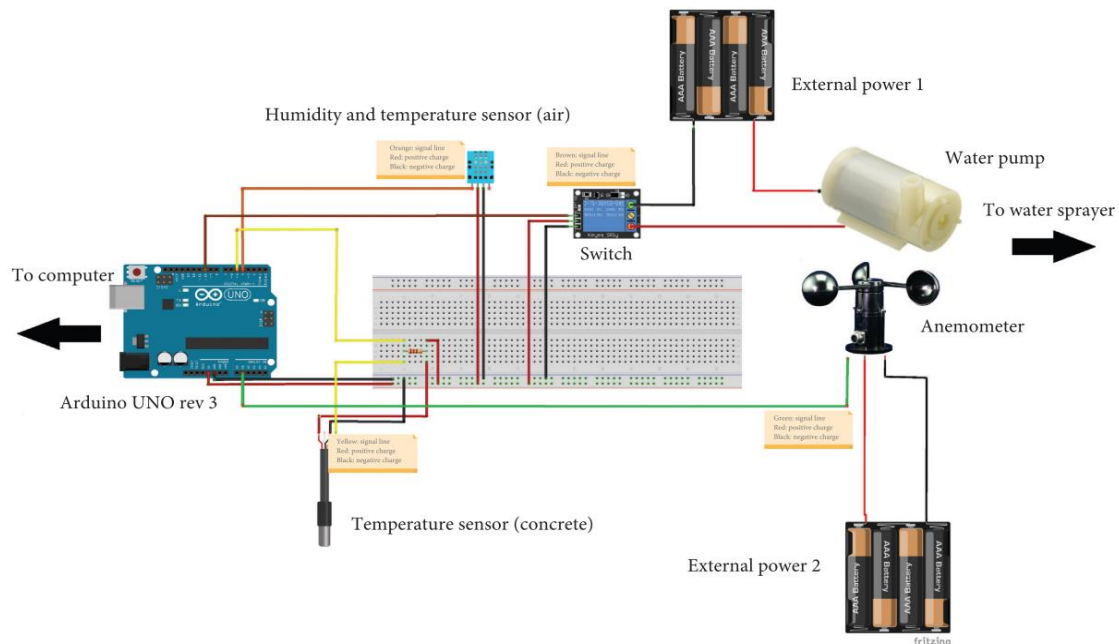
Penelitian oleh [13], menyajikan kerangka konseptual untuk pemantauan dan penilaian ketahanan dalam layanan yang berkelanjutan terhadap struktur beton bertulang. Penilaian konvensional dilakukan melalui pengujian laboratorium terhadap sampel yang diambil secara destruktif dari struktur, yang memerlukan banyak tenaga kerja, memakan waktu dan biaya. pemanfaatan *internet of things*, pemantauan struktur dalam secara terus-menerus dapat dilakukan dengan cara yang hemat biaya. Ketersediaan data yang dipantau dalam jangka panjang serta penggunaan analisis data yang cerdas memungkinkan penangkapan interaksi nonlinier yang kompleks dari parameter pengontrol ketahanan, sehingga membuat penilaian kondisi struktur menjadi lebih andal. Usulan model arsitektur pemantauan beton bertulang pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Arsitektur Pemantauan Beton Bertulang [13]

Konsep yang diusulkan mengatasi keterbatasan metode konvensional dengan memanfaatkan IoT dan kemajuan dalam teknik analisis data. Melalui penerapan sistem IoT dalam struktur, pemantauan berkelanjutan dan pengumpulan data jangka panjang dapat dilakukan. Dengan menerapkan teknik analisis data cerdas pada data yang dikumpulkan, interaksi nonlinier kompleks dari parameter pengendalian korosi dapat diketahui, sehingga menghasilkan penilaian yang andal dan informasi terbaru.

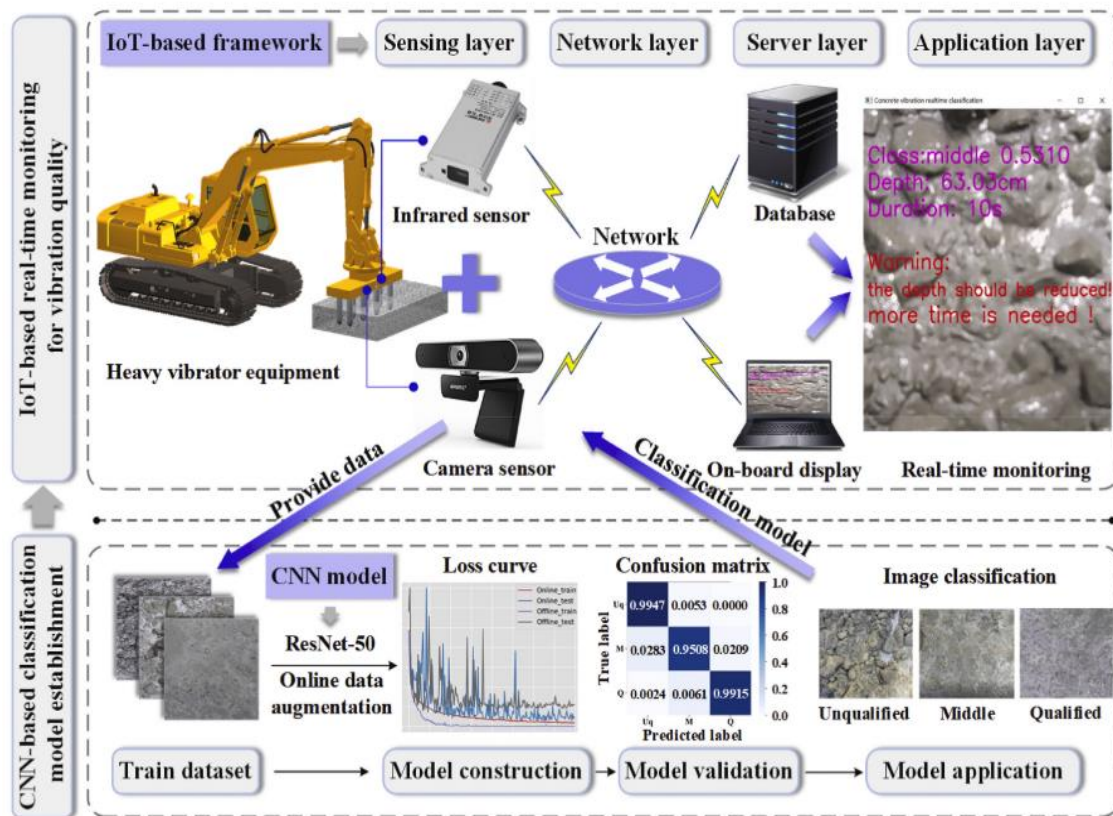
Penelitian oleh [14], menjelaskan bahwa proses pengawetan beton secara tradisional ditemukan kendala dalam pemantauan beton sehingga menyebabkan variasi pengawetan beton. Penerapan konsep IoT pada penelitian ini dilakukan dengan menciptakan model monitoring dan pengendalian kadar air pada beton sehingga dapat mengeras pada tingkat yang sesuai dan mendapatkan kualitas beton yang baik. Perancangan perangkat dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Desain Sistem Monitoring Beton [14]

Hasil penelitian dengan metode pengawetan beton berbasis IoT dapat menjaga kelembapan beton yang lebih konstan dibandingkan menggunakan metode tradisional dengan tingkat efisiensi > 90%.

Penelitian terhadap kualitas getaran pada beton oleh [15], dimana kualitas getaran sangat penting untuk memastikan kekuatan beton, yang secara langsung mempengaruhi keamanan struktur beton dalam jangka panjang. Durasi getaran dan kedalaman getaran merupakan parameter kunci untuk menjamin kualitas getaran. Namun, pemantauan secara manual/tradisional pada permukaan beton untuk menilai durasi getaran dan estimasi kedalaman getaran bersifat subjektif dan tidak dapat diandalkan. Selain itu, penelitian yang ada memantau durasi getaran berdasarkan pengetahuan dari percobaan sebelumnya, dengan mengabaikan pengaruh heterogenitas beton. Berdasarkan permasalahan tersebut dilakukan penerapan kecerdasan buatan dan konsep IoT dalam menyelesaikan masalah tersebut. Metode pemantauan kualitas getaran beton segar secara *real-time* berbasis ResNet dengan 50 lapisan (ResNet-50) dan teknologi Internet of Things (IoT). Berikut adalah framework rancangan penelitian pada gambar 4.



Gambar 4. Kerangka penelitian [15]

Penggunaan sensor inframerah dalam mengukur kedalaman getaran dan kamera untuk menangkap CSI. Hasil penelitian menunjukkan kinerja klasifikasi mencapai angka rata-rata 97,97%.

Penelitian terhadap struktur beton tidak hanya terbatas pada penggunaan sensor dalam melakukan pemantauan terhadap kondisi beton. penelitian oleh [16], berfokus pada perbandingan kinerja deteksi tepi dan algoritma *Deep Convolutional Neural Network* (DCNN) dalam mendeteksi retakan pada struktur beton. Kumpulan data 19 gambar definisi tinggi (3420 sub-gambar, 319 dengan retakan dan 3101 tanpa retakan) beton dianalisis menggunakan enam skema deteksi tepi yang umum digunakan yaitu Roberts, Prewitt, Sobel, Laplacian of Gaussian, Butterworth, dan Gaussian serta menggunakan AlexNet Arsitektur DCNN. Hasil yang penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan metode DCNN untuk deteksi kerusakan beton berbasis gambar dapat dilakukan serta dalam mengurangi *noise*, metode hibrid diusulkan dengan menggabungkan DCNN dan detektor tepi yang mengurangi *noise* sebanyak 24 kali.

Penelitian yang sama terhadap deteksi retakan juga dilakukan oleh [5]. Pada penelitian ini ditemukan kelemahan dalam deteksi retakan di luar bidang, sehingga diusulkan deteksi retakan menggunakan metode pembelajaran mendalam (CNN) berbasis region atau wilayah. Pengujian dilakukan dengan menerapkan basis region pada tiga detektor yang berbeda yaitu yaitu Faster R-CNN, jaringan konvolusional penuh berbasis wilayah (R-FCN), dan Faster R-CNN berbasis jaringan piramida fitur (FPN). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan basis region tersebut meningkatkan rata-rata presisi (mAP) pada ketiga detektor serta detektor dapat mendeteksi retakan pada luar bidang.

Penelitian oleh [17], mengusulkan metode *Convolutional Neural Network* (CNN) dalam mendeteksi retakan pada struktur beton. Metode yang diusulkan dibandingkan dengan empat metode pembelajaran mendalam yang ada berdasarkan ukuran data latih, heterogenitas data, kompleksitas jaringan, dan jumlah epoch. Kinerja model jaringan saraf konvolusional (CNN) yang diusulkan dievaluasi dan dibandingkan dengan jaringan yang telah dilatih sebelumnya, yaitu

model VGG-16, VGG-19, ResNet-50, dan Inception V3, pada delapan kumpulan data publik dengan ukuran berbeda. Hasil dari pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa model CNN dan CGG-16 memperoleh hasil klasifikasi dan waktu komputasi yang unggul dalam melakukan deteksi retakan pada beton.

Penelitian serupa terhadap retakan beton juga dilakukan oleh [18]. Penelitian ini melakukan perbandingan terhadap model CNN dengan OpenMV Cam H7 Plus dalam mendeteksi retakan beton secara *realtime*. parameter pembandingan kinerja kedua model ini yaitu penggunaan dan akurasi memori. Pada hasil pengujian menunjukkan bahwa CNN bekerja lebih baik dengan menggunakan memori hanya sebesar 6% hingga 26% dari memori yang dibutuhkan oleh LeNet serta memberikan akurasi yang lebih baik dari OpenMV Cam H7.

4. KESIMPULAN

Dengan adanya perkembangan sistem IoT yang meluas di berbagai bidang, serta integrasi kecerdasan buatan semakin mempercepat perkembangan dunia industri 4.0. Metode konvensional yang masih banyak diterapkan tetapi memiliki kekurangan seperti dalam hal informasi tingkat keawetan beton. berdasarkan literatur dari beberapa penelitian mengenai implementasi IoT dan kecerdasan buatan terhadap kualitas beton dapat disimpulkan bahwa dalam penggunaan sensor dan citra gambar menjadi topik yang menarik. Beberapa sensor dan model pemantauan kualitas beton dikembangkan dengan parameter suhu, kelembapan, pH, korosi, dan tegangan/regangan menjadi variabel penting dalam beberapa penelitian. Implementasi kecerdasan buatan juga berperan penting terutama dalam mendeteksi retakan pada beton. Dalam penelitian literatur ini, beberapa tantangan yang menarik untuk diteliti lebih lanjut seperti model kalibrasi sensor dalam mendeteksi kualitas beton serta integrasi data sensor dan data gambar dalam monitoring dan pengujian beton.

REFERENSI

- [1] A. K. Leiting, L. De Cuyper, and C. Kauffmann, "The Internet of Things and the case of Bosch: Changing business models while staying true to yourself," *Technovation*, vol. 118, no. November 2021, p. 102497, 2022, doi: 10.1016/j.technovation.2022.102497.
- [2] Y. Shvets and T. Hanák, "Use of the internet of things in the construction industry and facility management: Usage examples overview," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 219, no. 2021, pp. 1670–1677, 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.01.460.
- [3] R. V. Kolhe, P. William, P. M. Yawalkar, D. N. Paithankar, and A. R. Pabale, "Smart city implementation based on Internet of Things integrated with optimization technology," *Meas. Sensors*, vol. 27, no. January, p. 100789, 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100789.
- [4] A.M. Neville and J.J. Brooks, "Civil_Engineering_Materials.Pdf." 1987.
- [5] L. Deng, H. H. Chu, P. Shi, W. Wang, and X. Kong, "Region-based CNN method with deformable modules for visually classifying concrete cr," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 7, 2020, doi: 10.3390/app10072528.
- [6] W. Z. Taffese and E. Nigussie, "Automated concrete curing and assessment of strength and durability using IoT system," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.107.
- [7] S. Taheri, "A review on five key sensors for monitoring of concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 204, pp. 492–509, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172.
- [8] H. Zhu, A. Garg, X. (Bill) Yu, and H. W. Zhou, "Editorial for Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) in geotechnical engineering," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 14, no. 4, pp. 1025–1027, 2022, doi: 10.1016/j.jrmge.2022.07.001.
- [9] W. Xi, J. Yang, J. Song, and X. Qu, "Deep learning model of concrete dam deformation prediction based on CNN," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 580, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/580/1/012042.
- [10] W. Z. Taffese and E. Sistonen, "Neural network based hygrothermal prediction for deterioration

- risk analysis of surface-protected concrete façade element,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 34–48, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.029.
- [11] G. B. Torres, I. Payá-Zaforteza, P. A. Calderón García, and S. Sales Maicas, “New fiber optic sensor for monitoring temperatures in concrete structures during fires,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 254, pp. 116–125, 2017, doi: 10.1016/j.sna.2016.12.013.
- [12] Y. Wei *et al.*, *An internet based intelligent system for early concrete curing in underground structures*. Springer International Publishing, 2018.
- [13] W. Z. Taffese, E. Nigussie, and J. Isoaho, “Internet of things based durability monitoring and assessment of reinforced concrete structures,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, no. 2018, pp. 672–679, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.08.096.
- [14] K. C. Lo, H. W. T. Kwok, M. F. F. Siu, Q. G. Shen, and C. K. Lau, “Internet of Things-Based Concrete Curing Invention for Construction Quality Control,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9933615.
- [15] D. Wang, B. Ren, B. Cui, J. Wang, X. Wang, and T. Guan, “Real-time monitoring for vibration quality of fresh concrete using convolutional neural networks and IoT technology,” *Autom. Constr.*, vol. 123, no. December 2020, p. 103510, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103510.
- [16] S. Dorafshan, R. J. Thomas, and M. Maguire, “Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 1031–1045, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.011.
- [17] L. Ali, F. Alnajjar, H. Al Jassmi, M. Gochoo, W. Khan, and M. A. Serhani, “Performance evaluation of deep CNN-based crack detection and localization techniques for concrete structures,” *Sensors*, vol. 21, no. 5, pp. 1–22, 2021, doi: 10.3390/s21051688.
- [18] L. Falaschetti, M. Beccerica, G. Biagetti, P. Crippa, M. Alessandrini, and C. Turchetti, “A Lightweight CNN-Based Vision System for Concrete Crack Detection on a Low-Power Embedded Microcontroller Platform,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 207, no. Kes, pp. 3948–3956, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.09.457.