

BAB I

PENDAHULUAN

Bab I berisi uraian tentang latar belakang permasalahan, fokus penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan manfaat yang dapat diperoleh mahasiswa serta perusahaan konstruksi dari penelitian ini

1.1 Latar Belakang Masalah

Industri konstruksi Indonesia memegang peranan penting dalam perekonomian nasional, terbukti dari sumbangannya terhadap PDB yang mencapai 10,43% pada kuartal IV tahun 2024, menjadikannya sebagai sektor ekonomi terbesar keempat di Indonesia (BPS-Statistics Indonesia, 2024). Sektor ini diproyeksikan akan terus berkembang dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) sebesar 7,50% hingga menyentuh nilai USD 438,56 miliar pada tahun 2030, seiring dengan alokasi anggaran infrastruktur pemerintah yang mencapai IDR 400,3 triliun untuk tahun 2025 (Ministry of Finance Indonesia, 2025; Mordor *Intelligence*, 2024). Dalam pembangunan infrastruktur berskala besar tersebut, kolom beton memiliki peran penting sebagai elemen struktural pada bangunan bertingkat yang bertugas menahan beban dari lantai-lantai di atasnya dan meneruskannya ke fondasi. Salah satu ancaman serius dalam struktur bangunan adalah keruntuhan progresif (*progressive collapse*), yaitu kegagalan struktur yang terjadi secara berantai dimana kerusakan pada satu kolom memicu keruntuhan kolom-kolom lainnya seperti efek domino. Fenomena ini bermula ketika kolom yang mengalami kerusakan tidak lagi mampu menahan beban, mengakibatkan *transfer* beban ke kolom-kolom di sekitarnya dengan intensitas 1,5 hingga 2 kali lipat dari beban semula, yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan pada kolom-kolom tersebut.

Risiko *progressive collapse* tersebut semakin meningkat ketika terjadi degradasi struktural pada kolom beton yang tidak terdeteksi sejak dini. Degradasi struktural adalah proses penurunan kualitas dan kekuatan struktur bangunan secara bertahap akibat faktor lingkungan, beban berlebih, atau usia bangunan yang menyebabkan retak, korosi, dan kerusakan lainnya. Indonesia sebagai negara beriklim tropis dengan kelembaban 70-90% dan risiko gempa tinggi menghadapi tantangan serius dalam pemeliharaan struktur beton. Rincon *et al.* (2024) dalam

kajian menyeluruh mereka mengkonfirmasi bahwa struktur beton bertulang di lingkungan pesisir tropis mengalami degradasi dipercepat akibat mekanisme korosi yang diinduksi klorida, dengan struktur yang dirancang untuk 50-100 tahun dapat mengalami deteriorasi nyata setelah hanya 15-30 tahun, mengakibatkan pengurangan kapasitas struktural yang substansial. Proses degradasi ini terjadi melalui penetrasi air dan zat kimia agresif ke dalam beton, perubahan suhu ekstrem, serta getaran dari aktivitas sekitar.

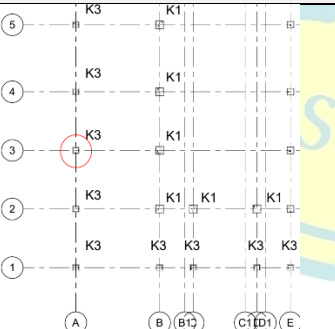
Deteksi dini kerusakan struktural menjadi kritis untuk mencegah kegagalan yang lebih parah, namun pemeriksaan visual secara manual yang masih menjadi metode dominan di Indonesia menghadapi berbagai keterbatasan fundamental. Kim dan Cho (2020) secara langsung mengidentifikasi bahwa pengamatan langsung bersifat "*labor-intensive*" dan "*time-consuming*", dengan hasil yang sangat tergantung pada opini pribadi pihak *quality control*. Ketergantungan pada penilaian subjektif ini menghasilkan ketidaksesuaian nyata, dimana tingkat keparahan kerusakan yang sama dapat dinilai berbeda oleh pihak *quality control* yang berbeda, menciptakan perbedaan hasil pengawasan yang tinggi. Lebih lanjut, metode manual menghadapi kendala serius terkait keselamatan pihak *quality control*, khususnya dalam mengakses area berbahaya seperti kolom pada ketinggian atau lokasi yang sulit dijangkau. Risiko kecelakaan kerja meningkat drastis ketika pihak *quality control* harus menggunakan *scaffolding*, tangga, atau alat akses ketinggian lainnya untuk memeriksa struktur di lantai atas, menambah kesulitan operasional dan biaya keselamatan kerja. Keterbatasan dokumentasi sistematis juga menjadi masalah penting, dimana pencatatan manual menyulitkan analisis trend degradasi jangka panjang dan perbandingan kondisi struktur antar periode pengawasan.

Das *et al.* (2025) dalam penelitian *Real-time detection* mengklasifikasi kerusakan kolom beton yang umum terjadi meliputi: (1) *Honeycomb defects*, rongga akibat pemadatan yang tidak sempurna yang mengurangi luas bagian yang menahan beban, (2) *Cracks*, yang memungkinkan masuknya kelembapan dan mempercepat proses korosi (3) *Spalling*, pengelupasan beton karena pembesaran volume tulangan berkarat, (4) *Corrosion*, yang menyebabkan retak pada tulangan, dan (5) *Segregation*, pemisahan antar lapisan beton. Kompleksitas identifikasi lima

kategori kerusakan ini secara akurat dan konsisten semakin memperkuat urgensi pengembangan sistem deteksi otomatis yang objektif dan dapat direproduksi.

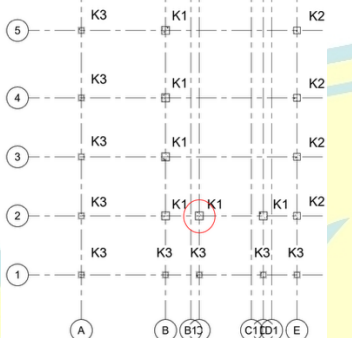
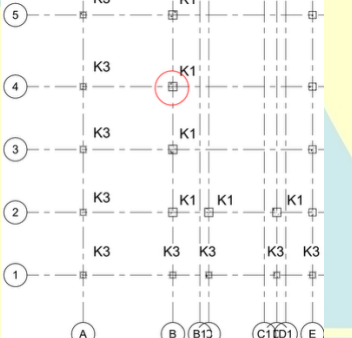
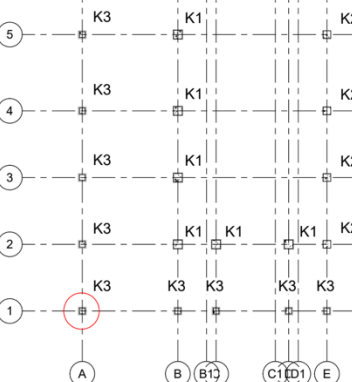
Studi kasus pada penelitian ini adalah Proyek Pembangunan X yang berlokasi di Kabupaten Bekasi. Proyek ini merupakan bangunan gedung bertingkat setinggi 4 lantai, dan pada saat penelitian dilakukan progres konstruksi telah mencapai lantai 4 sehingga seluruh struktur utama telah berdiri dan dapat dilakukan pemeriksaan visual secara menyeluruh. Pada proyek tersebut, hasil pemeriksaan visual awal mengidentifikasi adanya kerusakan struktur pada beberapa kolom beton. Berdasarkan dokumentasi lapangan, ditemukan kerusakan sebanyak 24 struktur kolom pada lantai 2 hingga lantai 4. Permasalahan yang terjadi pada Proyek X menunjukkan bahwa keterbatasan metode pengawasan manual yang subjektif dan berisiko tinggi dapat menghambat identifikasi kerusakan struktural secara menyeluruh dan tepat waktu. Berikut adalah bukti yang mendukung permasalahan di atas yang dijelaskan pada Tabel 1.1.

Tabel 1. 1 *Form* Hasil Identifikasi Kerusakan Beton

FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X					
Tanggal Periksa : 30 September 2025					
No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
1	K3 Lantai 2 As A-3			Spalling - Moderate	Barat Laut

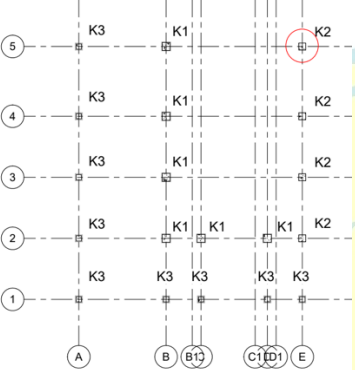
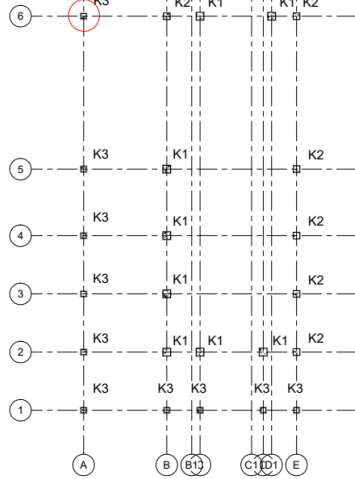
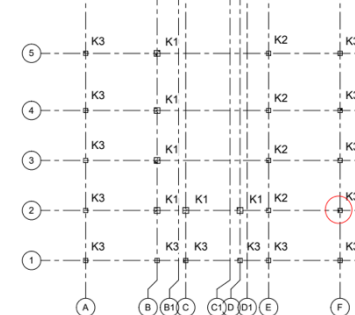
FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
2	K1 Lantai 2 As C-2			Honeycomb - Severe	Barat Daya
3	K1 Lantai 2 As B-4			Spalling - Moderate	Tenggara
4	K3 Lantai 2 As A-1			Spalling - Minor	Barat Daya

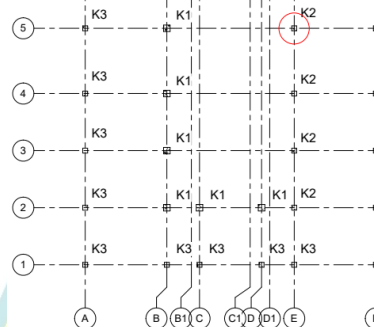
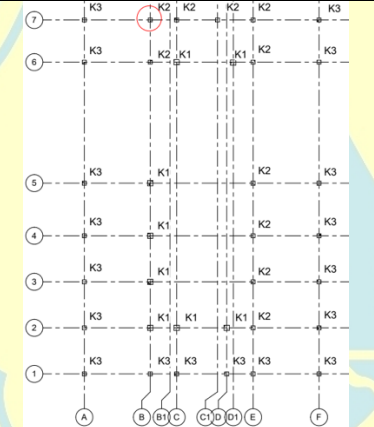
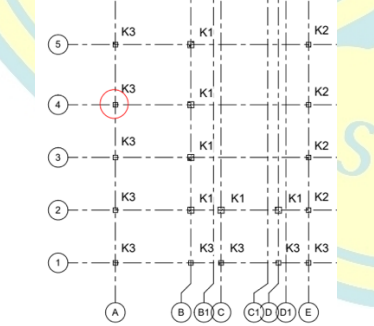
FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
5	K2 Lantai 2 As E-5			Corrosion - Moderate	Tenggara
6	K3 Lantai 2 As A-6			Spalling - Severe	Utara
7	K3 Lantai 3 As F-2			Spalling - Minor	Utara

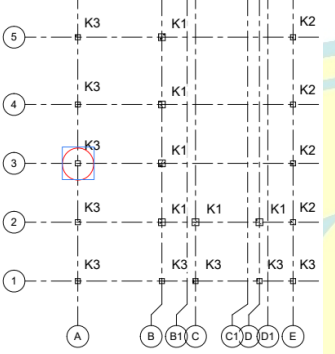
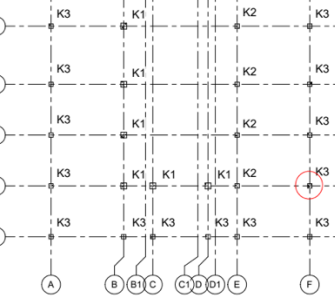
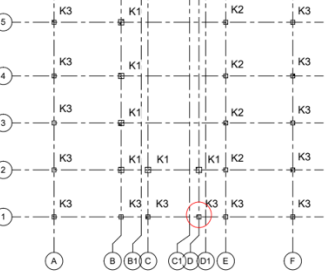
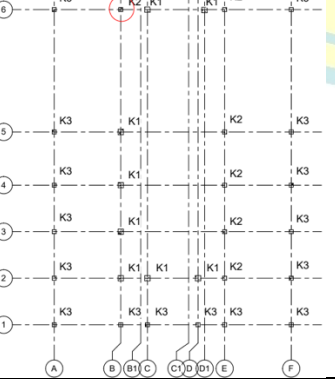
FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
8	K2 Lantai 3 As E-5			Spalling - Minor	Barat Laut
9	K2 Lantai 3 As B-7			Honeycomb - Severe	Barat Daya
10	K3 Lantai 3 As A-4			Spalling - Moderate	Utara

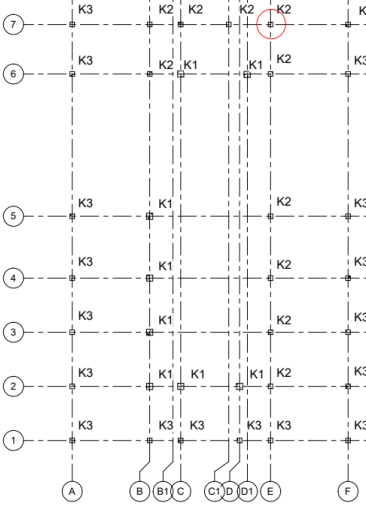
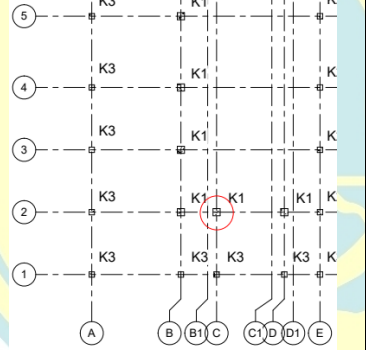
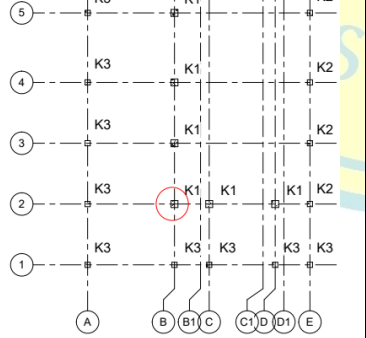
FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
11	K3 Lantai 3 As A-3			Spalling - Severe	Selatan
12	K3 Lantai 3 As F-2			Spalling - Minor	Timur
13	K3 Lantai 3 As D-1			Honeycomb - Severe	Timur
14	K2 Lantai 3 As B-6			Honeycomb - Moderate	Selatan

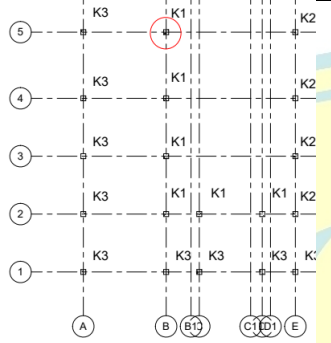
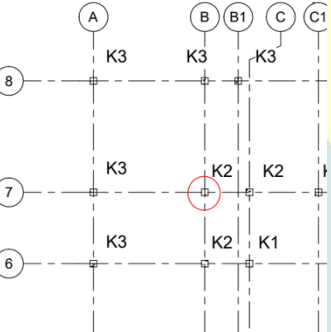
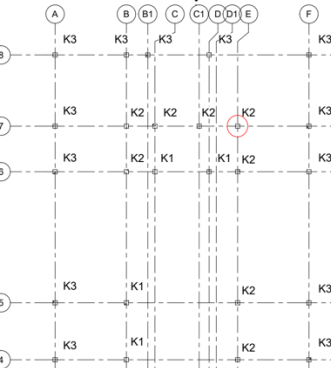
FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
15	K2 Lantai 3 As E-7			Spalling - Minor	Utara
16	K1 Lantai 3 As C-2			Honeycomb - Moderate	Barat Daya
17	K1 Lantai 3 As B-2			Honeycomb - Moderate	Tenggara

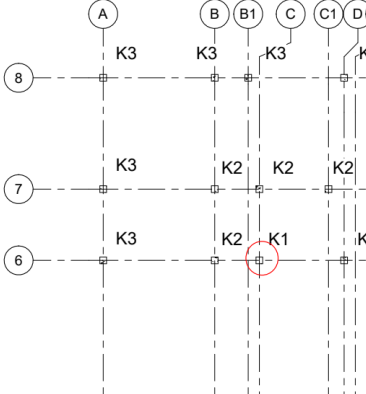
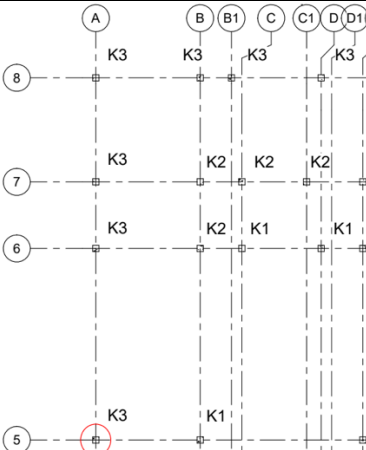
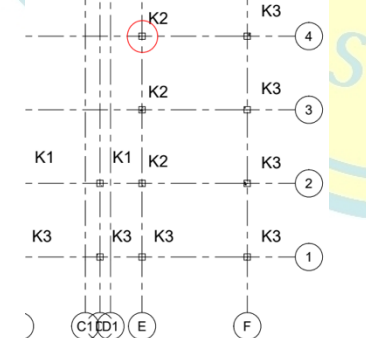
FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

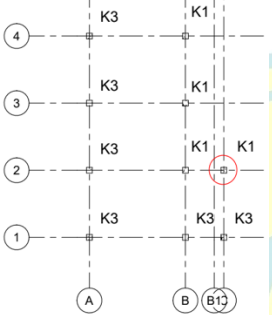
Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
18	K1 Lantai 4 As B-5			Segregasi - Moderate	Barat Daya
19	K2 Lantai 4 As B-7			Segregasi - Moderate	Barat Laut
20	K3 Lantai 4 As E7			Segregasi - Severe	Utara

FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X

Tanggal Periksa : 30 September 2025

No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
21	K1 Lantai 4 As C-6			Segregasi - Moderate	Barat – Barat Laut
22	K3 Lantai 4 As A-5			Segregasi – Severe	Timur
23	K2 Lantai 4 As E-4			Honeycomb - Minor	Timur

FORM HASIL IDENTIFIKASI KERUSAKAN BETON PROYEK X					
Tanggal Periksa : 30 September 2025					
No	Tipe Kolom dan Lokasi	Denah Lokasi Kerusakan Yang Di Tinjau	Dokumentasi	Jenis Kerusakan dan Severity Level	Defect Side
24	K1 Lantai 4 As C-2			Crack - Moderate	Utara

Data pada Tabel 1.1 menunjukkan bahwa dari 24 kerusakan yang teridentifikasi, 7 kolom mengalami kerusakan dengan tingkat keparahan *Severe* yang memerlukan penanganan segera, 11 kolom dengan tingkat *Moderate* yang perlu *monitoring* ketat, dan 6 kolom dengan tingkat *minor* yang memerlukan perhatian berkelanjutan. Distribusi kerusakan yang tersebar pada lantai 2, 3, dan 4 dengan berbagai lokasi *grid* (As A-1 hingga F-8) serta tingkat keparahan yang bervariasi menggambarkan kompleksitas pengawasan. Ketika pihak *quality control* yang berbeda memeriksa kolom yang sama, variasi dalam pengalaman, pelatihan, dan interpretasi visual dapat menghasilkan klasifikasi tingkat keparahan yang berbeda, menciptakan inkonsistensi dalam prioritas penanganan. Tantangan ini semakin diperparah oleh risiko keselamatan yang harus dihadapi pihak *quality control* saat mengakses setiap lokasi pada ketinggian berbeda, mempertegas kebutuhan mendesak akan sistem deteksi otomatis yang dapat mengurangi subjektivitas penilaian dan meminimalkan paparan risiko personel di area berbahaya.

Perkembangan teknologi *artificial intelligence* khususnya dalam bidang *computer vision* telah membawa solusi transformatif untuk mengatasi keterbatasan utama dalam pengawasan manual. Teknologi deteksi otomatis berbasis *deep learning* menawarkan konsistensi penilaian yang tidak tergantung pada faktor

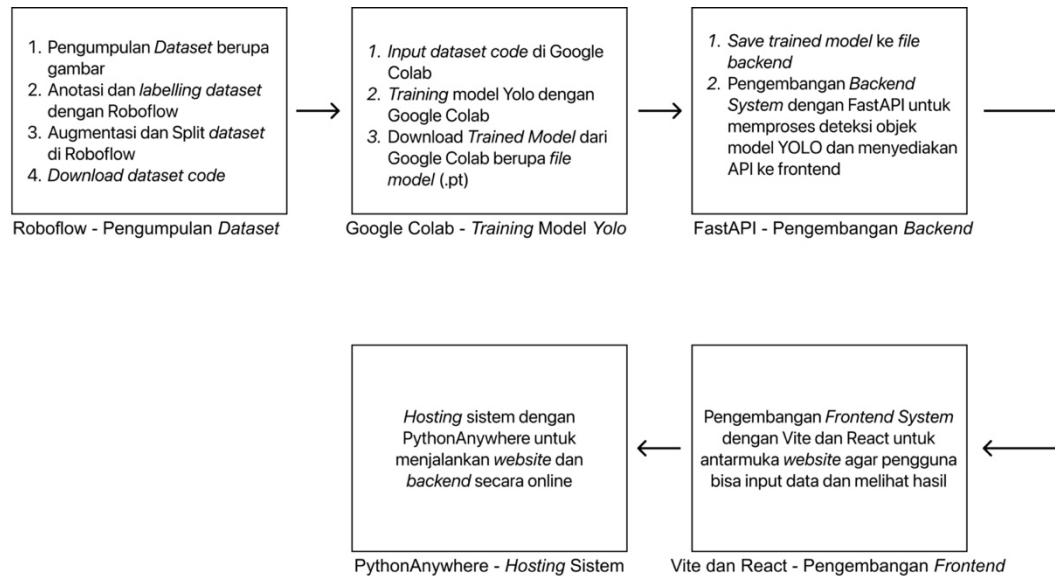
subjektif manusia, dapat beroperasi pada data gambar atau video yang diambil dengan perangkat sederhana seperti *smartphone*, sehingga mengeliminasi kebutuhan personel untuk mengakses area berbahaya secara langsung. Meskipun implementasi YOLO untuk deteksi kerusakan beton telah menunjukkan hasil menjanjikan pada berbagai studi. Tian *et al.* (2025) melaporkan mAP50 66.6% untuk *multi-kategori defect* dan Dong *et al.* (2025) mencapai 94.3% untuk *bridge crack detection*—mayoritas penelitian menggunakan *dataset* hasil pengambilan data di lingkungan terkontrol, sehingga belum menggambarkan kondisi sebenarnya di lapangan Indonesia dengan variasi pencahayaan alami, sudut pengambilan gambar yang tidak ideal, dan *background* yang kompleks.

YOLOv12 sebagai arsitektur terbaru yang dirilis Februari 2025 menawarkan keunggulan teknis melalui *Area Attention (A2) module* dan *Residual Efficient Layer Aggregation Networks (R-ELAN)* dengan pengurangan parameter hingga 52% dibandingkan YOLOv11 (Y. Tian *et al.*, n.d.; Ultralytics, 2025), namun belum ada publikasi yang mengimplementasikan YOLOv12 untuk deteksi kerusakan kolom beton pada kondisi iklim tropis Indonesia dengan *dataset* yang mencerminkan tantangan lapangan nyata. Pan, *et al.* (2025) dalam tinjauan sistematis terhadap 890 publikasi mengonfirmasi bahwa meskipun metode *Computer Vision* berbasis *Deep Learning* menunjukkan potensi besar, performa aktual sangat bervariasi (30-95% akurasi) tergantung karakteristik *dataset*, kondisi pencahayaan, tingkat kerumitan *background*, dan kualitas *training data*. Sohaib *et al.* (2024) melengkapi temuan ini dengan menunjukkan bahwa implementasi praktis YOLO untuk *concrete damage* pada *custom datasets* dari kondisi lapangan aktual sering menghasilkan mAP 50-75%, menekankan pentingnya validasi performa pada konteks spesifik penggunaan.

Meskipun penelitian tentang deteksi kerusakan beton menggunakan *Deep Learning* telah berkembang pesat, terdapat gap riset nyata dalam implementasi arsitektur YOLO generasi terbaru untuk kondisi lapangan tropis Indonesia yang menghadapi tantangan degradasi dipercepat. Penelitian-penelitian sebelumnya umumnya menggunakan *dataset* dari lingkungan terkontrol atau wilayah dengan kondisi iklim berbeda, belum secara sistematis menangani perbedaan kondisi pencahayaan alami, sudut pengambilan gambar yang tidak ideal karena keterbatasan akses, dan *background* kompleks yang khas pada proyek konstruksi

aktif di Indonesia. Lebih utama lagi, belum ada studi yang secara khusus mengevaluasi efektivitas sistem deteksi otomatis dalam mengatasi keterbatasan utama pengawasan manual, subjektivitas penilaian dan risiko keselamatan pihak *quality control* di area berbahaya. Penelitian ini mengisi gap tersebut dengan mengimplementasikan YOLOv12 pada *dataset* yang dikumpulkan langsung dari Proyek X di Kabupaten Bekasi, mencerminkan kondisi aktual dengan segala kerumitan, untuk menghasilkan sistem deteksi yang objektif, konsisten, dan aman bagi operator yang tidak perlu mengakses area berisiko tinggi secara langsung.

Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan tahapan sistematis yang telah divalidasi dalam berbagai studi *Computer Vision* untuk *structural damage detection*. Penelitian ini menerapkan lima tahapan utama: (1) Pengumpulan dan kurasi *dataset* kerusakan kolom beton dari Proyek X yang mencakup berbagai kondisi pencahayaan, sudut pengambilan, dan tingkat keparahan kerusakan untuk memastikan representasi kondisi lapangan nyata; (2) Pelatihan dan optimasi model YOLOv12 dengan arsitektur *Attention-centric* untuk *instance segmentation* dengan fokus pada deteksi *multi-class* kerusakan (*Honeycomb, cracks, Spalling, corrosion, segregation*) menggunakan teknik *transfer learning* dan *data augmentation* sesuai dengan klasifikasi Das *et al.* (2025), mengadopsi inovasi *Area Attention* (A2) *module* dan *Residual Efficient Layer Aggregation Networks* (R-ELAN) yang menawarkan pengurangan parameter hingga 52% dibandingkan generasi sebelumnya (Y. Tian *et al.*, n.d.; Ultralytics, 2025); (3) Pengembangan sistem *web-based* dengan arsitektur *client-server* yang responsif mengadopsi prinsip yang digunakan Dong *et al.* (2024) untuk *Real-time processing*; (4) Integrasi antarmuka pengguna untuk mengunggah gambar, menampilkan hasil deteksi dengan *bounding boxes* dan klasifikasi kerusakan, serta menghasilkan laporan inspeksi yang terstandarisasi; dan (5) Implementasi serta evaluasi sistem dengan pengukuran metrik kinerja mencakup akurasi deteksi (*precision, recall, mAP*), kecepatan *inference* (FPS, *latency*), *usability interface*, dan efektivitas dalam mengurangi subjektivitas penilaian dibandingkan pengawasan manual.



Gambar 1. 1 Alur Pengembangan Sistem

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tahapan pengembangan sistem dalam satu rangkaian, alur penelitian ini divisualisasikan dalam bentuk alur pada Gambar 1.1. Alur tersebut menggambarkan proses pengembangan yang dimulai dari tahap pengumpulan *dataset* yang diperoleh melalui dokumentasi lapangan dan referensi internet. *Dataset* yang terkumpul kemudian diunggah ke *platform* Roboflow untuk dilakukan proses anotasi dan *labelling*, dimana setiap gambar diberi *bounding box* dan label kategori kerusakan (*honeycomb*, *cracks*, *spalling*, *corrosion*, *segregation*). Selanjutnya, *dataset* mengalami proses augmentasi untuk meningkatkan variasi data dan dibagi menjadi *training set* (80%), *validation set* (10%), dan *testing set* (10%). *Dataset* yang telah siap kemudian di-download dalam format kode yang kompatibel dengan YOLOv12 dan diinputkan ke Google Colab untuk proses *training* model menggunakan teknik *transfer learning* dan optimasi *hyperparameter*. Model yang telah dilatih kemudian dievaluasi berdasarkan metrik *precision*, *recall*, *mAP*, dan *F1-Score*, dan apabila belum memenuhi target dilakukan optimasi ulang hingga mencapai performa yang diharapkan. Setelah model *valid*, dilakukan *export* model dalam format yang siap digunakan dan disimpan ke *file backend*. Tahap selanjutnya adalah pengembangan *backend system* menggunakan FastAPI yang berfungsi untuk memuat model YOLOv12 dan menyediakan API *endpoints* untuk proses deteksi, dilanjutkan dengan pengembangan *frontend system* menggunakan Vite dan React untuk membangun antarmuka pengguna yang responsif dan intuitif. Kedua komponen

backend dan *frontend* kemudian diintegrasikan agar dapat berkomunikasi secara efektif melalui API. Tahap akhir adalah *hosting* sistem ke *platform* PythonAnywhere sehingga aplikasi *website* dapat diakses secara *online* oleh para pemangku kepentingan dalam pengawasan struktur beton. Alur pengembangan sistematis ini dirancang untuk menghasilkan sistem deteksi kerusakan yang objektif, akurat, dan dapat dioperasikan dengan mudah.

1.2 Fokus Penelitian

Fokus penelitian ini dilakukan agar penelitian lebih terarah dan memiliki tujuan yang jelas sesuai metode yang akan digunakan. Lingkup dan batasan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Penerapan model YOLOv12 untuk mendeteksi lima kategori kerusakan: *Honeycomb*, *cracks*, *Spalling*, *corrosion*, dan segregasi dengan target akurasi $mAP > 50\%$.
2. Pengembangan sistem berbasis *website* dengan antarmuka untuk mengunggah gambar kolom beton, menampilkan hasil deteksi dengan *bounding boxes* dan klasifikasi kerusakan, serta menghasilkan laporan pengawasan terstandarisasi yang mengeliminasi ketidakseragaman subjektif dari pengawasan manual.
3. Pengembangan sistem prioritas perbaikan berbasis tingkat keparahan dan fitur riwayat pemeriksaan untuk mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan.
4. Penelitian ini dilakukan pada satu studi kasus bangunan gedung bertingkat empat lantai.

1.3 Perumusan Masalah

Dari latar belakang dan fokus penelitian yang telah dijelaskan, maka permasalahan yang akan diteliti adalah "Bagaimana mengembangkan sistem deteksi kerusakan kolom beton berbasis *website* yang menerapkan YOLOv12 untuk mengatasi subjektivitas penilaian dan risiko keselamatan pihak *quality control* dalam pengawasan manual pada Proyek Pembangunan X?"

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sesuai dengan rumusan masalah adalah untuk mengembangkan dan menerapkan sistem deteksi kerusakan kolom beton berbasis

web yang mengintegrasikan teknologi YOLOv12 pada Proyek Pembangunan X, yang mampu mendeteksi lima kategori kerusakan struktural (*honeycomb, cracks, spalling, corrosion, segregation*) dengan akurasi $>50\%$ mAP. Sistem ini bertujuan mengurangi subjektivitas penilaian yang melekat dalam pengawasan manual dengan menyediakan hasil deteksi yang objektif dan konsisten, mengurangi risiko keselamatan pihak *quality control* dengan memungkinkan pengawasan melalui analisis gambar tanpa akses langsung ke area berbahaya, menghasilkan dokumentasi terstandarisasi yang memfasilitasi perbandingan kondisi struktural antar periode, serta menyediakan sistem prioritas perbaikan berbasis tingkat keparahan yang mendukung pengambilan keputusan yang terukur dan konsisten dalam penanganan kerusakan struktur pada kondisi iklim tropis Indonesia.

1.5 Manfaat Penelitian

Merujuk pada tujuan penelitian yang telah ditetapkan, adapun kontribusi penelitian ini mencakup manfaat dari segi teoritis, produktif, serta praktis.

1.5.1 Manfaat Teoritis

Manfaat teoritis yang diharapkan dari penelitian ini yaitu memperkaya literatur aplikasi AI dalam pengawasan struktur khususnya untuk mengatasi keterbatasan pengawasan manual di iklim tropis Indonesia, memberikan bukti empiris untuk studi perbandingan arsitektur YOLO dalam *structural damage detection* pada kondisi lapangan nyata dengan *dataset* yang mencerminkan perbedaan pencahayaan, sudut, dan *background* rumit, serta berkontribusi pada pengembangan teori *automated inspection systems* yang menekankan objektivitas, konsistensi, dan keselamatan operator.

1.5.2 Manfaat Produktif

Manfaat produktif yang diharapkan dari penelitian ini yaitu menghasilkan sistem deteksi kerusakan berbasis *website* yang siap diterapkan di lapangan untuk mengurangi subjektivitas penilaian pengawasan manual, model YOLOv12 terlatih yang dapat direproduksi dan diadaptasi untuk struktur beton lainnya, serta *framework* penerapan yang dapat diadopsi oleh proyek konstruksi lain di Indonesia. Sistem mempercepat proses pengawasan dibandingkan metode manual, mengeliminasi kebutuhan pihak *quality control* untuk mengakses area berbahaya secara langsung sehingga meningkatkan keselamatan kerja, menghasilkan laporan

inspeksi terstandarisasi yang konsisten antar periode dan pihak *quality control*, mendorong adopsi teknologi *Industry 4.0* di sektor konstruksi Indonesia dengan fokus pada keselamatan dan akurasi, serta memfasilitasi *transfer* teknologi dan peningkatan kapasitas SDM bidang AI untuk pengawasan struktur.

1.5.3 Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi para praktisi di bidang konstruksi, khususnya kontraktor, dalam memberikan penilaian kerusakan struktur yang objektif dan konsisten tanpa tergantung pada subjektivitas pihak *quality control* individual, memfasilitasi pengawasan secara menyeluruh tanpa membahayakan keselamatan pihak *quality control* di area sulit dijangkau atau ketinggian, menyediakan dokumentasi terstandarisasi yang memungkinkan *tracking* perkembangan kerusakan dari waktu ke waktu secara sistematis, mengurangi waktu dan biaya inspeksi dengan proses deteksi otomatis yang cepat dan akurat, menyediakan *tools* praktis untuk *facility management* yang berdatabase objektif, meningkatkan kepatuhan terhadap standar keselamatan konstruksi nasional melalui pengawasan yang lebih teliti dan konsisten, serta berpotensi menjadi acuan praktik terbaik bagi penerapan teknologi AI untuk inspeksi struktural di berbagai jenis bangunan di Indonesia.