



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 21871-21882

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Pelaksanaan dan Pengendalian Mutu Pekerjaan Balok Beton Bertulang pada Proyek Pembangunan Rumah Susun

Diego Meco Alrahman

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Bina Darma

diegoalrahman11@gmail.com

Abstrak

Pekerjaan balok beton bertulang merupakan salah satu elemen struktural penting pada bangunan gedung bertingkat karena berfungsi menyalurkan beban dari pelat lantai ke kolom. Kualitas pelaksanaan dan pengendalian mutu pada pekerjaan balok sangat menentukan keamanan dan keandalan struktur bangunan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tahapan pelaksanaan serta pengendalian mutu pekerjaan balok beton bertulang pada Proyek Pembangunan Rumah Susun. Metode yang digunakan adalah metode deskriptif kualitatif melalui observasi lapangan, studi dokumen proyek, dan wawancara selama kegiatan magang pada periode Februari–Mei 2026. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan balok dilakukan secara sistematis melalui tahapan persiapan, pemasangan perancah dan bekisting, pembesian, pengecoran beton, perawatan beton, hingga pembongkaran bekisting sesuai gambar kerja dan spesifikasi teknis proyek. Pengendalian mutu dilaksanakan pada setiap tahapan pekerjaan melalui pemeriksaan material, inspeksi bekisting dan tulangan, penggunaan checklist quality control, inspection request, serta pengujian slump beton sebelum pengecoran. Hasil pengujian menunjukkan nilai slump sebesar 12 cm yang masih berada dalam rentang persyaratan 12 ± 2 cm sehingga memenuhi syarat workability beton. Pemeriksaan pembesian dan dimensi balok juga menunjukkan kesesuaian dengan shop drawing dan spesifikasi teknis proyek. Dengan demikian, penerapan pengendalian mutu yang dilakukan telah mendukung tercapainya kualitas pekerjaan balok beton bertulang yang sesuai dengan standar dan persyaratan teknis yang ditetapkan.

Kata kunci: rumah susun, balok beton bertulang.

1. Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan hunian di kawasan perkotaan mendorong pembangunan rumah susun sebagai solusi pemanfaatan lahan yang lebih efisien. Dalam konstruksi bangunan bertingkat, balok beton bertulang merupakan elemen struktur yang berperan penting dalam menahan dan menyalurkan beban dari pelat lantai menuju kolom sehingga kualitas pelaksanaannya harus memenuhi persyaratan teknis yang telah ditetapkan. Kegagalan pada pekerjaan balok dapat menurunkan kinerja struktur serta berpotensi mengurangi tingkat keamanan bangunan. Oleh karena itu, pelaksanaan pekerjaan balok harus didukung oleh sistem pengendalian mutu yang efektif sejak tahap persiapan hingga penyelesaian pekerjaan.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa keberhasilan pekerjaan struktur beton bertulang sangat dipengaruhi oleh ketepatan metode pelaksanaan dan pengendalian mutu yang diterapkan di lapangan. Putriani dan Ikhwanudin menjelaskan bahwa tahapan pekerjaan balok yang dilakukan secara sistematis mampu meningkatkan kualitas hasil konstruksi dan meminimalkan kesalahan pelaksanaan. Jalaludin menemukan bahwa pengendalian mutu melalui pemeriksaan material, pengawasan pembesian, dan pengujian beton berperan penting dalam menjaga mutu struktur beton bertulang. Sementara itu, Azmi et al. menegaskan bahwa penggunaan dokumen quality control dan inspeksi lapangan secara berkala dapat meningkatkan kesesuaian pekerjaan dengan spesifikasi teknis proyek.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pelaksanaan dan pengendalian mutu pekerjaan struktur beton, sebagian besar penelitian masih berfokus pada proyek gedung komersial, gudang, maupun bangunan umum lainnya. Kajian mengenai pelaksanaan pekerjaan balok beton bertulang pada proyek rumah susun, khususnya yang dikaitkan dengan penerapan pengendalian mutu pada setiap tahapan pekerjaan di lapangan, masih relatif terbatas. Selain itu, penelitian terdahulu umumnya hanya meninjau salah satu aspek, baik pelaksanaan pekerjaan maupun pengendalian mutu, sehingga belum memberikan gambaran yang komprehensif mengenai keterkaitan antara kedua aspek tersebut dalam menghasilkan kualitas struktur yang sesuai dengan spesifikasi proyek.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini dilakukan pada Proyek Pembangunan Rumah Susun untuk menganalisis secara langsung tahapan pelaksanaan pekerjaan balok beton bertulang dan penerapan pengendalian mutu yang dilakukan selama proses konstruksi. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyajian analisis terpadu antara metode pelaksanaan pekerjaan balok dan implementasi pengendalian mutu berdasarkan

kondisi aktual proyek rumah susun pemerintah, mulai dari pemeriksaan material, pembesian, pengecoran, hingga pengujian mutu beton di lapangan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan kualitatif untuk menganalisis pelaksanaan dan pengendalian mutu pekerjaan balok beton bertulang pada Proyek Pembangunan Rumah Susun . Penelitian dilaksanakan selama kegiatan magang pada periode Februari–Mei 2026. Objek penelitian difokuskan pada pekerjaan balok beton bertulang lantai dua yang meliputi tahapan persiapan, pemasangan perancah (shoring), pemasangan bekisting, pemasangan tulangan, pengecoran beton, perawatan beton (curing), dan pembongkaran bekisting. Selain itu, penelitian juga mengkaji penerapan pengendalian mutu pada setiap tahapan pekerjaan berdasarkan gambar kerja (shop drawing), Rencana Kerja dan Syarat-Syarat (RKS), serta standar teknis yang berlaku.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung di lapangan, studi dokumentasi proyek, dan wawancara dengan personel yang terlibat dalam pelaksanaan pekerjaan. Data primer diperoleh dari hasil pengamatan terhadap proses pekerjaan balok dan kegiatan pengendalian mutu di lapangan. Data sekunder diperoleh dari dokumen proyek berupa shop drawing, checklist quality control, inspection request, hasil pengujian slump beton, serta dokumen teknis lainnya yang mendukung penelitian.

Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan kondisi pelaksanaan pekerjaan di lapangan terhadap spesifikasi teknis proyek dan standar mutu yang berlaku. Evaluasi pengendalian mutu dilakukan pada aspek pemeriksaan pembesian, dimensi balok, pemasangan bekisting, serta hasil pengujian slump beton sebelum pengecoran. Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk uraian untuk menggambarkan kesesuaian pelaksanaan pekerjaan balok beton bertulang dengan persyaratan teknis yang telah ditetapkan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil penelitian

1. Pelaksanaan Beton Bertulang

Pelaksanaan pekerjaan balok beton bertulang pada Proyek Pembangunan Rumah Susun dilakukan secara berurutan sesuai metode kerja yang telah ditetapkan. Tahapan pekerjaan meliputi pekerjaan persiapan, pemasangan perancah dan bekisting, pemasangan tulangan, pengecoran beton, perawatan beton, serta pembongkaran bekisting. Material utama yang digunakan terdiri atas baja tulangan ulir diameter 16 mm dan 19 mm, baja tulangan polos diameter 10 mm, multipleks tebal 12 mm sebagai bekisting, beton ready mix mutu $f_c' 25$ MPa, serta beton decking. Peralatan utama yang digunakan meliputi truck mixer, concrete pump, concrete vibrator, bar bender, dan scaffolding. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh tahapan pekerjaan dilaksanakan sesuai urutan pekerjaan yang tercantum dalam metode pelaksanaan proyek. Pekerjaan pengecoran dilakukan menggunakan beton ready mix yang dipompa menuju lokasi pengecoran dan dipadatkan menggunakan concrete vibrator.

2. Hasil Pengendalian Mutu Pembesian Balok

Pengendalian mutu pembesian dilakukan sebelum pengecoran melalui pemeriksaan lapangan menggunakan checklist quality control.

Pada balok tipe B24AX diperoleh hasil pemeriksaan sebagai berikut:

Parameter	Hasil Pemeriksaan
Dimensi Balok	250 mm x 400 mm
Tulangan Tumpuan	8D16
Tulangan Lapangan	8D16
Diameter Sengkang	D10
Jarak Sengkang Tumpuan	100 mm
Jarak Sengkang Lapangan	150 mm

Pemeriksaan menunjukkan seluruh komponen pembesian telah sesuai dengan shop drawing dan spesifikasi proyek.

Pada balok tipe B23C diperoleh hasil pemeriksaan sebagai berikut:

Parameter	Hasil Pemeriksaan
Dimensi Balok	250 mm x 350 mm
Tulangan Tumpuan	7D16
Tulangan Lapangan	5D16
Diameter Sengkang	D10
Jarak Sengkang Tumpuan	100 mm
Jarak Sengkang Lapangan	150 mm

Hasil pemeriksaan menunjukkan tidak ditemukan penyimpangan pada jumlah tulangan, diameter tulangan, maupun posisi pemasangannya.

3. Hasil Pengendalian Mutu Pengecoran

Pengendalian mutu pada tahap pengecoran dilakukan melalui pengujian slump beton segar menggunakan kerucut Abrams.

Hasil Pengujian Slump Beton.

Parameter	Nilai
Mutu Beton	$F_c' 25 \text{ MPa}$
Nilai Slump Aktual	12 cm
Persyaratan Slump	$12 + 2 \text{ cm}$
Keterangan	Memenuhi Persyaratan

Hasil pengujian menunjukkan nilai slump sebesar 12 cm. Selama proses pengecoran tidak ditemukan indikasi segregasi dan beton dapat mengisi area bekisting dengan baik.

4. Kendala Pelaksanaan

Kendala yang ditemukan selama pekerjaan balok adalah kondisi cuaca yang tidak menentu. Hujan terjadi pada saat pelaksanaan pengecoran sehingga menyebabkan keterlambatan pekerjaan. Untuk mengatasi kondisi tersebut dilakukan penyesuaian jadwal pekerjaan melalui koordinasi antara kontraktor pelaksana dan konsultan pengawas.

3.2 Pembahasan

1. Analisis Pelaksanaan Pekerjaan Balok

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan balok dilakukan secara sistematis mulai dari tahap persiapan hingga pembongkaran bekisting. Pelaksanaan yang berurutan menunjukkan bahwa metode kerja yang diterapkan telah sesuai dengan prosedur konstruksi beton bertulang. Kesesuaian tahapan pekerjaan tersebut berperan penting dalam menjaga kualitas struktur dan meminimalkan potensi kesalahan selama proses konstruksi.

Pemasangan bekisting dan perancah yang dilakukan sebelum pekerjaan pembesian memberikan dukungan yang memadai terhadap stabilitas struktur selama proses pengecoran. Selain itu, penggunaan beton decking pada pemasangan tulangan membantu menjaga ketebalan selimut beton sehingga perlindungan tulangan terhadap korosi dapat tercapai dengan baik.

2. Analisis Pengendalian Mutu Pembesian

Hasil pemeriksaan pembesian menunjukkan bahwa dimensi balok, jumlah tulangan, diameter tulangan, dan jarak sengkang telah sesuai dengan detail penulangan pada shop drawing. Kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa proses fabrikasi dan pemasangan tulangan telah dilaksanakan dengan baik.

Ketepatan pemasangan tulangan menjadi faktor penting karena berpengaruh langsung terhadap kemampuan balok dalam menahan gaya lentur dan gaya geser. Pemeriksaan menggunakan checklist quality control sebelum pengecoran juga terbukti membantu mengurangi potensi kesalahan yang dapat memengaruhi kualitas struktur.

3. Analisis Pengendalian Mutu pengecoran

Hasil pengujian slump sebesar 12 cm menunjukkan bahwa beton yang digunakan memiliki tingkat workability yang sesuai dengan persyaratan proyek. Nilai slump yang memenuhi standar menunjukkan bahwa campuran beton memiliki kelecakan yang cukup untuk memudahkan proses pengecoran dan pemadatan tanpa menyebabkan segregasi.

Penggunaan concrete vibrator selama pengecoran juga berkontribusi terhadap terbentuknya beton yang lebih padat dan homogen. Tidak ditemukannya honeycomb maupun cacat permukaan beton setelah pengecoran menunjukkan bahwa proses pemadatan berjalan dengan baik dan mutu beton dapat terjaga.

4. Analisis Kendala Pelaksanaan

Faktor cuaca menjadi kendala utama dalam pelaksanaan pekerjaan balok. Hujan yang terjadi saat proses pengecoran berpotensi memengaruhi kualitas beton dan menghambat pencapaian target waktu pelaksanaan. Namun demikian, koordinasi antara kontraktor dan konsultan pengawas melalui penjadwalan ulang pekerjaan mampu mengurangi dampak keterlambatan yang terjadi.

Temuan ini menunjukkan bahwa selain aspek teknis, keberhasilan pekerjaan balok juga dipengaruhi oleh kemampuan manajemen proyek dalam mengantisipasi dan menangani risiko yang muncul selama pelaksanaan konstruksi.

5. Kesesuaian Pelaksanaan terhadap Shop Drawing dan Standar Teknis

Kesesuaian antara pelaksanaan di lapangan, shop drawing, Rencana Kerja dan Syarat-Syarat, serta standar teknis merupakan dasar utama pengendalian mutu pekerjaan balok beton bertulang. Pada penelitian ini, dimensi balok B24AX sebesar 250 mm x 400 mm dan balok B23C sebesar 250 mm x 350 mm telah diperiksa sebelum pengecoran. Pemeriksaan tersebut penting karena perubahan dimensi penampang, walaupun terlihat kecil, dapat memengaruhi kekakuan, kapasitas lentur, berat sendiri, dan hubungan balok dengan elemen struktur lainnya. Kesesuaian dimensi juga memastikan posisi garis as, elevasi dasar balok, dan pertemuan balok-kolom tidak menyimpang dari rancangan. Dalam kerangka SNI 2847:2019, pemenuhan detail penampang dan tulangan bukan hanya persoalan administratif, tetapi bagian dari pemenuhan asumsi desain yang digunakan dalam analisis struktur [8]. Oleh sebab itu, hasil pemeriksaan yang tidak menemukan penyimpangan pada dua tipe balok dapat dinilai sebagai indikator bahwa komunikasi antara dokumen perencanaan dan pekerjaan lapangan telah berlangsung dengan baik.

Pengendalian kesesuaian tidak seharusnya berhenti pada pencocokan ukuran akhir. Proses pemeriksaan perlu menelusuri urutan persetujuan dokumen, mulai dari gambar rencana, shop drawing, metode kerja, material approval, hingga inspection request sebelum pengecoran. Setiap perubahan di lapangan harus memiliki dasar teknis dan persetujuan pihak yang berwenang, sehingga keputusan tidak hanya bergantung pada kebiasaan pekerja. Model inspeksi berbasis tahapan yang dikemukakan Shin dan Cha menekankan pentingnya formulir pemeriksaan, pencatatan data, pelacakan status temuan, dan komunikasi kelompok dalam satu alur pengendalian mutu [10]. Prinsip tersebut relevan dengan penggunaan checklist quality control dan inspection request pada proyek yang diteliti. Ketika dokumen pemeriksaan diisi secara lengkap, proyek memperoleh jejak audit yang dapat menunjukkan siapa yang memeriksa, objek yang diperiksa, waktu pemeriksaan, hasil pengukuran, serta tindak lanjut apabila ditemukan ketidaksesuaian.

Temuan lapangan juga memperlihatkan bahwa pengendalian mutu dilakukan sebelum pekerjaan tertutup oleh beton. Tahap ini merupakan titik kendali yang sangat penting karena setelah pengecoran, dimensi tulangan, jarak sengkang, jumlah batang, dan posisi sambungan tidak lagi dapat diperiksa secara langsung. Tierney dan Safiuddin menjelaskan bahwa siklus pekerjaan beton terdiri atas rangkaian pembentukan, pemasangan tulangan, pengecoran, dan pembongkaran, sehingga kegagalan pada satu tahap dapat terbawa ke tahap berikutnya [9]. Dengan demikian, keputusan untuk menahan pekerjaan sampai inspeksi dinyatakan memenuhi persyaratan merupakan tindakan pencegahan yang lebih efektif dibandingkan melakukan perbaikan setelah beton mengeras. Pendekatan ini juga mengurangi kemungkinan pembobokan beton, penambahan tulangan secara tidak terencana, atau pekerjaan ulang yang dapat meningkatkan biaya dan mengganggu jadwal proyek.

Walaupun hasil pemeriksaan menunjukkan kesesuaian, pengendalian mutu tetap memerlukan konsistensi pada seluruh balok, bukan hanya pada sampel yang diamati. Balok B24AX dan B23C dapat digunakan sebagai contoh penerapan inspeksi, tetapi kesimpulan tentang mutu keseluruhan lantai harus didukung oleh rekaman pemeriksaan pada setiap zona pengecoran. Karena penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif, data yang tersedia belum menjelaskan tingkat variasi dimensi pada seluruh elemen. Oleh karena itu, penerapan toleransi pengukuran, dokumentasi foto, serta rekapitulasi hasil inspeksi per lokasi perlu menjadi bagian dari pengembangan sistem mutu proyek. Langkah tersebut akan memperkuat bukti bahwa kesesuaian bukan terjadi secara kebetulan, melainkan merupakan hasil dari proses pengawasan yang berulang dan terkendali.

6. Evaluasi Sistem Perancah dan Bekisting

Perancah dan bekisting berfungsi sebagai struktur sementara yang menahan berat beton segar, tulangan, pekerja, peralatan, serta beban dinamis selama pengecoran. Walaupun bersifat sementara, kegagalan sistem ini dapat menyebabkan perubahan bentuk balok, penurunan elevasi, kebocoran pasta semen, bahkan keruntuhan saat pengecoran. Dalam penelitian ini, pemasangan perancah dan bekisting dilakukan sebelum pembesian dan menjadi bagian dari urutan metode pelaksanaan. Urutan tersebut tepat karena stabilitas bidang kerja harus tersedia sebelum tulangan ditempatkan. Tierney dan Safiuddin menegaskan bahwa kualitas elemen beton sangat dipengaruhi oleh kestabilan formwork dan ketepatan pelaksanaan pada siklus form-pour-strip [9]. Oleh sebab itu, pengendalian mutu bekisting perlu mencakup pemeriksaan kekuatan penyangga, jarak antarpengopang, sambungan panel, kekakuan sisi balok, elevasi, kelurusan, kebersihan bagian dalam, dan penggunaan bahan pelepas bekisting yang tidak merusak permukaan beton.

Pemakaian multipleks tebal 12 mm pada proyek harus dilihat bersama dengan konfigurasi pengaku dan jarak tumpuan, karena ketebalan panel saja tidak cukup untuk menjamin kekakuan. Tekanan lateral beton segar dapat mendorong sisi bekisting, terutama ketika laju pengecoran tinggi atau pemadatan dilakukan terlalu lama pada satu titik. Pemeriksaan sebelum pengecoran perlu memastikan tidak terdapat celah yang memungkinkan grout keluar. Kebocoran pasta dapat menghasilkan permukaan keropos, memperbesar porositas lokal, dan mengurangi kualitas selimut beton. Sistem bekisting juga harus dipastikan bebas dari sisa potongan kawat, serbuk kayu, genangan air, atau material lain yang dapat terperangkap di dalam balok. Pembersihan dengan udara bertekanan atau alat yang sesuai sebaiknya dilakukan sebelum inspection request diajukan, kemudian kondisi tersebut didokumentasikan sebagai bagian dari bukti kesiapan pengecoran.

Hasil penelitian tidak melaporkan terjadinya deformasi bekisting atau cacat permukaan yang signifikan setelah pengecoran. Hal ini mengindikasikan bahwa dukungan perancah dan proses pemadatan secara umum mampu menjaga bentuk elemen. Namun, evaluasi sistem bekisting akan lebih kuat apabila dilengkapi data elevasi sebelum dan sesudah pengecoran, pengamatan lendutan sementara, serta waktu pembongkaran. Wu et al. menunjukkan bahwa inspeksi bekisting secara manual sangat dipengaruhi faktor manusia dan dapat menghasilkan ketidakakuratan, sehingga pemanfaatan data tiga dimensi dapat membantu menilai posisi, orientasi, dan toleransi pemasangan secara lebih objektif [12]. Pada proyek rumah susun, pendekatan digital belum menjadi keharusan, tetapi penggunaan total station, laser level, atau pengukuran grid sederhana sudah dapat meningkatkan ketelitian dibandingkan pemeriksaan visual semata.

Aspek keselamatan juga tidak dapat dipisahkan dari pengendalian mutu perancah. Perancah yang tidak stabil dapat menimbulkan bahaya bagi pekerja sekaligus merusak mutu struktur. Oleh karena itu, pemeriksaan harus mencakup kondisi base plate, verticality, bracing, penguncian sambungan, akses kerja, dan larangan perubahan konfigurasi tanpa persetujuan. Setiap pembongkaran sebagian untuk membuka jalur material harus segera dipulihkan dan diperiksa kembali. Pada proyek yang memiliki beberapa zona pengecoran, penandaan status layak pakai pada perancah dan bekisting dapat membantu mencegah penggunaan area yang belum disetujui. Dengan prosedur tersebut, pengendalian mutu tidak hanya memastikan geometri balok sesuai gambar, tetapi juga menjamin bahwa proses pembentukan elemen berlangsung dalam kondisi kerja yang aman dan terkendali.

7. Evaluasi Detail Pembesian dan Perilaku Struktural Balok

Pemeriksaan pembesian pada balok B24AX menunjukkan penggunaan tulangan tumpuan 8D16, tulangan lapangan 8D16, serta sengkang D10 dengan jarak 100 mm pada daerah tumpuan dan 150 mm pada daerah lapangan. Sementara itu, balok B23C menggunakan tulangan tumpuan 7D16, tulangan lapangan 5D16, dan konfigurasi sengkang yang sama. Perbedaan jumlah tulangan longitudinal tersebut menunjukkan bahwa setiap tipe balok memiliki kebutuhan kapasitas yang berbeda sesuai bentang, pola pembebanan, dan kondisi tumpuannya. Oleh karena itu, penyamaan detail antarbalok tanpa mengacu pada shop drawing merupakan risiko yang harus dihindari. Pemeriksaan jumlah batang, diameter, posisi atas-bawah, dan kontinuitas tulangan memastikan bahwa konfigurasi yang direncanakan benar-benar diwujudkan pada elemen yang dibangun.

Daerah tumpuan dan lapangan memiliki pola gaya dalam yang berbeda. Pada balok menerus, momen negatif umumnya dominan di sekitar tumpuan, sedangkan momen positif berkembang pada daerah lapangan. Penempatan tulangan atas dan bawah harus mengikuti detail perencanaan agar kapasitas lentur tersedia pada lokasi yang tepat. Selain itu, jarak sengkang yang lebih rapat pada daerah tumpuan mencerminkan kebutuhan pengendalian gaya geser dan pengekanan yang lebih besar. Ketelitian pemasangan sengkang pada jarak 100 mm dan 150 mm perlu diperiksa menggunakan tanda ukur yang jelas, bukan hanya perkiraan visual. SNI 2847:2019 menempatkan ketentuan detail tulangan, penyaluran, kait, dan jarak sebagai bagian penting dari keamanan struktur [8]. Karena itu, hasil kesesuaian pada kedua tipe balok harus dipertahankan sampai sebelum pengecoran, termasuk setelah pekerja atau selang concrete pump beraktivitas di atas area tulangan.

Kualitas pembesian juga dipengaruhi oleh kondisi sambungan, panjang penyaluran, lokasi lap splice, kait sengkang, dan ikatan kawat. Artikel asal belum menyajikan data rinci mengenai parameter tersebut, sehingga penelitian tidak dapat menyimpulkan seluruh aspek detailing hanya berdasarkan jumlah batang dan jarak sengkang. Namun, tidak ditemukannya penyimpangan pada parameter utama menunjukkan bahwa proses fabrikasi dan pemasangan telah mengikuti shop drawing. Chen et al. dan Wang et al. menunjukkan bahwa pemeriksaan diameter, jarak, posisi, dan ketebalan selimut merupakan fokus utama penerimaan tulangan sebelum beton dituang [13], [14]. Temuan tersebut memperkuat pentingnya daftar periksa yang lebih rinci agar pemeriksaan tidak hanya mencatat “sesuai”, tetapi juga menyimpan hasil ukur aktual untuk setiap parameter kritis.

Selama tahap akhir sebelum pengecoran, tulangan perlu dijaga dari pergeseran akibat lalu lintas pekerja, penempatan pipa pompa, dan getaran. Ikatan yang longgar dapat menyebabkan sengkang bergeser atau jarak antarbatang berubah. Untuk mengurangi risiko tersebut, jalur kerja sebaiknya menggunakan papan pijakan yang tidak bertumpu langsung pada tulangan utama. Pemeriksaan ulang sesaat sebelum pengecoran perlu dilakukan khususnya pada pertemuan balok-kolom, daerah sambungan, dan area dengan kepadatan tulangan tinggi. Dengan cara ini, mutu pembesian tidak hanya dinilai ketika pertama kali dipasang, tetapi dipertahankan sampai beton benar-benar menutup elemen. Pendekatan tersebut penting karena kualitas akhir balok merupakan hasil dari ketepatan detail sekaligus kemampuan proyek menjaga konfigurasi tulangan sepanjang proses pelaksanaan.

8. Selimut Beton, Beton Decking, dan Durabilitas

Penggunaan beton decking pada pekerjaan balok bertujuan menjaga jarak antara tulangan dan permukaan bekisting sehingga selimut beton memenuhi persyaratan. Selimut beton memiliki fungsi proteksi terhadap korosi, kebakaran, dan pengaruh lingkungan, sekaligus menyediakan media lekatan yang cukup antara beton dan tulangan. Beton decking harus memiliki ketebalan yang sesuai, mutu yang memadai, dan dipasang pada jarak yang mampu mencegah tulangan turun atau bergeser. Spacer yang terlalu sedikit dapat pecah atau berpindah saat pekerja melintas dan saat vibrator digunakan. Sebaliknya, spacer dengan ukuran tidak seragam dapat membuat posisi tulangan tidak konsisten. Oleh karena itu, pemeriksaan selimut perlu dilakukan pada beberapa titik, khususnya bagian bawah dan sisi balok, bukan hanya pada satu lokasi yang mudah dijangkau.

Kesesuaian selimut beton berkaitan langsung dengan durabilitas jangka panjang. Selimut yang terlalu tipis memperpendek jalur masuk karbonasi, kelembapan, dan ion agresif menuju tulangan, sedangkan selimut yang berlebihan dapat mengubah tinggi efektif penampang serta meningkatkan potensi retak permukaan pada kondisi tertentu. Wang et al. mengembangkan pemeriksaan berbasis point cloud yang dapat mengukur ketebalan selimut, jarak lapis tulangan, dan spasi tulangan dengan ketelitian tinggi [13]. Walaupun teknologi tersebut belum digunakan pada proyek ini, prinsip pengukurannya dapat diadaptasi melalui cover meter sebelum atau setelah pengecoran pada lokasi sampel. Pengukuran tersebut dapat menjadi verifikasi tambahan terhadap pemasangan beton decking dan melengkapi dokumentasi visual yang sudah dilakukan oleh tim quality control.

Dalam konteks penelitian ini, pernyataan bahwa beton decking membantu menjaga selimut dapat diterima secara teknis, tetapi belum disertai data ketebalan selimut aktual. Keterbatasan ini perlu dicatat agar interpretasi hasil tetap proporsional. Penelitian lanjutan dapat memasukkan pengukuran selimut aktual, pemeriksaan jenis spacer, jarak pemasangan, serta evaluasi kondisi setelah pengecoran. Data tersebut akan memperkuat hubungan antara pengendalian pembesian dan kinerja durabilitas balok. Dengan demikian, inspeksi selimut beton tidak hanya menjadi bagian kecil dari checklist, melainkan salah satu indikator mutu yang menentukan masa layan struktur rumah susun.

9. Penerimaan Beton Segar dan Interpretasi Uji Slump

Beton ready mix dengan mutu rencana $f_c' 25$ MPa digunakan pada pekerjaan balok yang diamati. Sebelum pengecoran, dilakukan uji slump menggunakan kerucut Abrams dan diperoleh nilai 12 cm, sedangkan persyaratan proyek adalah 12 ± 2 cm. Nilai tersebut berada tepat pada nilai sasaran dan menunjukkan bahwa konsistensi beton segar memenuhi kriteria penerimaan workability yang ditetapkan. SNI 1972:2008 menjelaskan prosedur uji slump sebagai cara untuk menilai konsistensi beton segar [5]. Namun, hasil slump tidak dapat dipakai sebagai satu-satunya bukti bahwa mutu kuat tekan akan tercapai, karena pengujian tersebut terutama menggambarkan respons campuran terhadap deformasi akibat berat sendiri. Oleh karena itu, hasil uji harus dibaca bersama data mutu beton, waktu kedatangan, kondisi visual, serta hasil benda uji kuat tekan apabila tersedia.

Kesesuaian slump memberikan keuntungan praktis pada pengecoran balok dengan tulangan yang relatif rapat. Beton yang terlalu kaku berisiko sulit mengisi ruang di antara tulangan dan sudut bekisting, sedangkan beton yang terlalu encer dapat meningkatkan segregasi dan bleeding apabila perubahan konsistensi disebabkan oleh penambahan air yang tidak terkendali. Nilai 12 cm pada penelitian ini menunjukkan tingkat kelecakan yang memadai untuk dipompa dan dipadatkan. Valente Monteiro et al. menegaskan bahwa workability dan pemadatan saling berhubungan dalam menentukan porositas, kekuatan, durabilitas, dan lekatan tulangan [16]. Dengan

demikian, penerimaan slump 12 cm sebaiknya dipandang sebagai prasyarat untuk pelaksanaan yang baik, bukan sebagai pengganti pengendalian proses pengecoran dan pemadatan.

Prosedur penerimaan beton segar idealnya juga mencakup pemeriksaan delivery ticket, identitas mutu, volume, waktu batching, waktu tiba, serta larangan penambahan air tanpa otorisasi. Kondisi cuaca dan lama antrean truck mixer dapat memengaruhi slump saat beton sampai di lokasi. Apabila terjadi penundaan, keputusan menerima atau menolak beton perlu didasarkan pada spesifikasi proyek dan koordinasi dengan pemasok, bukan hanya pada kebutuhan mengejar jadwal. Pencatatan setiap hasil slump per truck atau per interval pengecoran dapat digunakan untuk melihat konsistensi produksi. Data tersebut juga membantu penelusuran apabila pada kemudian hari ditemukan perbedaan hasil kuat tekan atau cacat pada zona tertentu.

Pengembangan sistem mutu dapat dilakukan dengan dokumentasi digital terhadap proses uji slump. Schack et al. menunjukkan bahwa analisis citra dan segmentasi semantik dapat membantu memperoleh parameter beton segar secara lebih konsisten dan menyediakan data tambahan untuk pengendalian mutu [15]. Pada skala proyek, penerapan sederhana dapat berupa foto atau video standar dari setiap pengujian yang menyertakan identitas truck, waktu, dan hasil ukur. Cara ini tidak menggantikan pengujian standar, tetapi meningkatkan transparansi dan memudahkan audit. Dengan dokumentasi yang tertib, nilai slump 12 cm tidak hanya menjadi angka pada laporan, melainkan bagian dari rangkaian bukti penerimaan beton yang dapat ditelusuri.

10. Pengecoran, Pemadatan, dan Pencegahan Cacat Beton

Pengecoran dilakukan menggunakan concrete pump dan pemadatan dengan concrete vibrator. Kombinasi tersebut sesuai untuk pekerjaan balok pada bangunan bertingkat karena pompa mempercepat distribusi beton, sedangkan vibrator membantu mengeluarkan udara terperangkap dan memastikan beton mengisi ruang di antara tulangan. Hasil pengamatan tidak menemukan indikasi segregasi, dan beton dapat mengisi bekisting dengan baik. Setelah bekisting dibuka, tidak dilaporkan adanya honeycomb atau cacat permukaan yang signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa secara visual proses penempatan dan pemadatan telah berlangsung efektif. Meskipun demikian, mutu pemadatan perlu dijaga melalui teknik yang konsisten pada seluruh panjang balok, terutama di daerah pertemuan balok-kolom yang memiliki kepadatan tulangan lebih tinggi.

Penggunaan vibrator harus mempertimbangkan kedalaman penetrasi, jarak titik pemadatan, lama getaran, dan kesinambungan antar lapisan. Getaran yang terlalu singkat dapat meninggalkan rongga, sementara getaran berlebihan dapat mendorong agregat kasar turun dan pasta naik, terutama pada campuran dengan workability tinggi. Vibrator tidak seharusnya digunakan untuk memindahkan beton secara horizontal dalam jarak panjang karena tindakan tersebut dapat menyebabkan segregasi. Valente Monteiro et al. menunjukkan bahwa pemadatan yang buruk meningkatkan rongga dan dapat menurunkan kinerja mekanis serta durabilitas beton [16]. Oleh karena itu, operator vibrator perlu memahami tanda-tanda pemadatan cukup, seperti berkurangnya gelembung udara, permukaan yang relatif rata, dan tidak adanya perubahan campuran yang menunjukkan segregasi.

Pengendalian mutu selama pengecoran juga meliputi kontinuitas suplai. Jeda yang terlalu lama dapat membentuk cold joint yang mengganggu monolititas elemen. Perencanaan jumlah truck mixer, kapasitas pompa, rute kendaraan, tenaga kerja, penerangan, dan alat cadangan perlu diselesaikan sebelum pengecoran dimulai. Pada proyek yang menghadapi cuaca tidak menentu, material pelindung dan rencana penghentian darurat harus tersedia. Apabila hujan terjadi, keputusan melanjutkan atau menunda harus mempertimbangkan intensitas hujan, area yang telah dicor, kemampuan perlindungan, dan risiko perubahan rasio air-semen pada permukaan. Pencatatan waktu mulai, waktu selesai, serta kejadian khusus selama pengecoran akan membantu evaluasi kualitas apabila muncul masalah setelah beton mengeras.

Tidak ditemukannya honeycomb merupakan hasil yang positif, tetapi inspeksi visual permukaan belum cukup untuk menggambarkan mutu internal secara menyeluruh. Cacat internal, distribusi rongga, atau ketidaksempurnaan di sekitar tulangan tidak selalu terlihat dari permukaan. Karena itu, evaluasi hasil pengecoran sebaiknya dihubungkan dengan hasil kuat tekan benda uji dan pemeriksaan tambahan apabila terdapat indikasi anomali. Artikel ini belum menyajikan data kuat tekan, sehingga kesimpulan mengenai tercapainya $f_c' 25$ MPa harus dibatasi pada mutu rencana dan pengendalian beton segar. Penelitian berikutnya dapat mengintegrasikan hasil slump, benda uji, hammer test sesuai kebutuhan, dan inspeksi visual untuk memberikan gambaran mutu yang lebih komprehensif.

11. Perawatan Beton dan Pembongkaran Bekisting

Perawatan beton merupakan tahap setelah pengecoran yang bertujuan menjaga kelembapan dan temperatur agar proses hidrasi berlangsung memadai. Dalam metode pelaksanaan penelitian, curing disebut sebagai salah satu tahapan pekerjaan, tetapi hasil penelitian belum menjelaskan jenis, durasi, dan frekuensi perawatan yang diterapkan. Kekosongan informasi tersebut penting karena mutu beton tidak hanya ditentukan oleh

campuran dan pemadatan, tetapi juga kondisi setelah pengecoran. Kehilangan air terlalu cepat dapat meningkatkan susut plastis, retak permukaan, dan menurunkan perkembangan kekuatan pada lapisan luar. Oleh karena itu, laporan pengendalian mutu sebaiknya mencatat metode curing, waktu mulai, periode pelaksanaan, kondisi cuaca, dan petugas yang bertanggung jawab.

Metode curing dapat disesuaikan dengan kondisi proyek, misalnya pembasahan berkala, penutupan menggunakan bahan lembap, penggunaan lembaran plastik, atau curing compound yang memenuhi spesifikasi. Untuk balok yang masih berada di dalam bekisting, panel dapat membantu mengurangi kehilangan kelembapan pada sisi elemen, tetapi permukaan atas tetap memerlukan perlindungan. Pada cuaca panas atau berangin, penguapan berlangsung lebih cepat sehingga pengendalian perlu ditingkatkan. Sebaliknya, hujan tidak selalu berarti curing otomatis terpenuhi, karena air hujan yang deras pada beton muda dapat merusak permukaan. Prosedur harus membedakan perlindungan terhadap hujan saat beton belum mengeras dan pemeliharaan kelembapan setelah permukaan cukup stabil.

Pembongkaran bekisting harus dilakukan setelah beton memiliki kemampuan menahan berat sendiri dan beban konstruksi yang bekerja. Waktu pembongkaran tidak hanya ditentukan oleh umur kalender, tetapi juga mutu beton, bentang, temperatur, sistem perancah, serta urutan pekerjaan lantai di atasnya. Pembongkaran yang terlalu dini dapat menimbulkan lendutan, retak, atau kerusakan sudut balok. Sebaliknya, pembongkaran yang terencana dan bertahap memungkinkan beban dialihkan secara aman. Pada bangunan bertingkat, kebutuhan reshoring juga perlu dievaluasi karena lantai dan balok muda dapat menerima beban dari aktivitas konstruksi berikutnya. Checklist pembongkaran sebaiknya memuat persetujuan teknis, kondisi beton, urutan pelepasan, serta pemeriksaan permukaan setelah bekisting dibuka.

Hasil penelitian yang menyatakan tidak terdapat cacat signifikan merupakan indikasi bahwa tahapan akhir berjalan cukup baik. Akan tetapi, dokumentasi curing dan pembongkaran akan meningkatkan kekuatan kesimpulan tersebut. Rekaman foto harian, formulir curing, dan tanggal pembongkaran dapat menghubungkan kondisi akhir permukaan dengan proses yang dilakukan. Dengan demikian, evaluasi mutu tidak hanya berfokus pada tahap sebelum dan saat pengecoran, tetapi mencakup keseluruhan siklus sampai elemen siap menerima tahapan pekerjaan selanjutnya.

12. Dokumentasi Quality Control dan Ketertelusuran Pekerjaan

Penggunaan checklist quality control dan inspection request pada proyek merupakan praktik yang tepat karena kedua dokumen tersebut berfungsi sebagai titik verifikasi sebelum pekerjaan dilanjutkan. Checklist membantu memastikan bahwa item penting telah diperiksa secara konsisten, sedangkan inspection request menjadi media formal untuk meminta persetujuan dari pihak pengawas. Sistem ini mengurangi ketergantungan pada komunikasi lisan yang mudah terlupakan atau disalahartikan. Shin dan Cha menunjukkan bahwa pengelolaan data inspeksi, pelacakan status, dan komunikasi yang terintegrasi dapat meningkatkan efektivitas proses quality inspection [10]. Dalam konteks proyek ini, dokumen yang telah tersedia dapat dikembangkan menjadi basis data mutu yang menghubungkan lokasi balok, tipe elemen, hasil ukur, foto, tanggal pemeriksaan, dan status persetujuan.

Ketertelusuran sangat penting apabila ditemukan ketidaksesuaian setelah pekerjaan selesai. Dengan identitas zona pengecoran yang jelas, tim proyek dapat menelusuri sumber beton, hasil slump, petugas pemeriksaan, waktu pelaksanaan, dan catatan kejadian cuaca. Tanpa ketertelusuran, proses investigasi cenderung bergantung pada ingatan personel dan sulit menghasilkan keputusan yang objektif. Setiap balok tidak harus memiliki formulir terpisah apabila pengecoran dilakukan dalam satu zona, tetapi daftar elemen yang tercakup harus dinyatakan dengan jelas. Nomor grid, lantai, tipe balok, dan tanggal pengecoran dapat digunakan sebagai identitas minimum. Dokumen tersebut juga berguna pada tahap serah terima dan pemeliharaan karena menyediakan catatan kondisi awal struktur.

Kualitas dokumen tidak hanya ditentukan oleh keberadaannya, tetapi juga kelengkapan dan validitas isinya. Kolom yang diisi dengan tanda centang tanpa hasil ukur aktual dapat menyulitkan evaluasi. Untuk item seperti dimensi balok, jarak sengkang, dan slump, nilai aktual perlu dicatat. Apabila terdapat koreksi, formulir harus menunjukkan temuan awal, tindakan perbaikan, hasil pemeriksaan ulang, dan pihak yang menyetujui. Penggunaan foto sebelum pengecoran sebaiknya memperlihatkan skala, label lokasi, dan konteks elemen agar tidak menjadi dokumentasi umum yang sulit diverifikasi. Dengan cara ini, checklist berubah dari sekadar persyaratan administrasi menjadi alat pengendalian proses.

Digitalisasi dokumen dapat dilakukan secara bertahap tanpa sistem yang mahal. Formulir elektronik melalui perangkat bergerak, penyimpanan foto dengan penamaan standar, dan rekapitulasi berbasis spreadsheet sudah dapat meningkatkan konsistensi. Pada tahap yang lebih maju, data dapat dihubungkan dengan model BIM atau dashboard proyek. Tujuan utama digitalisasi bukan menggantikan penilaian teknis, melainkan mengurangi kehilangan data, mempercepat persetujuan, dan menyediakan informasi real-time bagi pengambil keputusan.

Dengan ketertelusuran yang baik, temuan penelitian tentang kesesuaian pembesian dan slump dapat dipertanggungjawabkan secara lebih kuat.

13. Pengendalian Risiko Cuaca dan Penjadwalan

Cuaca tidak menentu menjadi kendala utama yang dilaporkan pada pelaksanaan pekerjaan balok. Hujan saat pengecoran dapat memengaruhi produktivitas, keselamatan kerja, akses kendaraan, dan kualitas permukaan beton. Risiko tersebut tidak selalu dapat dihilangkan, tetapi dampaknya dapat dikurangi melalui perencanaan. Špak et al. menjelaskan bahwa pengelolaan risiko pada pekerjaan struktur beton perlu mempertimbangkan frekuensi, peluang kejadian, dan dampaknya terhadap efektivitas proyek [11]. Pada proyek rumah susun, data prakiraan cuaca, kondisi drainase area kerja, ketersediaan terpal, penerangan, dan jalur aman pekerja perlu diperiksa sebelum jadwal pengecoran ditetapkan. Keputusan mulai pengecoran sebaiknya menggunakan kriteria yang disepakati, bukan hanya tekanan untuk mencapai target harian.

Koordinasi antara kontraktor dan konsultan pengawas untuk melakukan penyesuaian jadwal merupakan respons yang tepat. Namun, penjadwalan ulang harus diikuti evaluasi terhadap kesiapan beton, tenaga kerja, alat, dan pekerjaan yang telah terpasang. Tulangan dan bekisting yang tertunda lama perlu diperiksa kembali karena dapat terkena kotoran, air, pergeseran, atau perubahan kondisi perancah. Air yang menggenang di dalam bekisting harus dibuang sebelum pengecoran. Apabila penundaan terjadi setelah sebagian elemen dicor, lokasi penghentian harus ditangani sesuai prosedur sambungan konstruksi. Oleh karena itu, rencana kontinjensi cuaca perlu memuat skenario sebelum pengecoran dan skenario ketika hujan terjadi di tengah pelaksanaan.

Risiko cuaca juga berkaitan dengan mutu beton segar. Waktu perjalanan truck mixer dapat bertambah akibat kondisi jalan, sehingga konsistensi beton saat tiba mungkin berbeda dari rencana. Pengujian slump pada lokasi proyek menjadi alat verifikasi penting, tetapi keputusan penerimaan harus tetap mempertimbangkan batas waktu penggunaan dan ketentuan pemasok. Penambahan air di lapangan untuk mengembalikan slump tanpa pengendalian dapat mengubah rasio air-semen dan menurunkan mutu. Karena itu, seluruh penyesuaian campuran harus dilakukan berdasarkan prosedur yang disetujui dan dicatat pada delivery ticket. Disiplin ini memastikan bahwa upaya mengejar keterlambatan tidak menghasilkan kompromi mutu.

Dari sisi manajemen, risiko hujan dapat dimasukkan dalam look-ahead schedule dan rapat koordinasi mingguan. Pekerjaan yang sensitif terhadap cuaca perlu memiliki waktu cadangan dan alternatif urutan kerja. Evaluasi pascakejadian juga penting untuk memperbaiki rencana berikutnya, misalnya dengan mencatat intensitas hujan, lama penundaan, tindakan yang dilakukan, dan dampak aktual. Dengan pendekatan tersebut, kendala cuaca tidak hanya dicatat sebagai faktor eksternal, tetapi dikelola sebagai risiko proyek yang memiliki tindakan pencegahan, penanggung jawab, dan indikator keberhasilan.

14. Hubungan Mutu, Biaya, Waktu, dan Pencegahan Pekerjaan Ulang

Pengendalian mutu pada pekerjaan balok memiliki hubungan langsung dengan biaya dan waktu. Pemeriksaan pembesian, bekisting, dan beton segar memerlukan sumber daya di awal, tetapi biaya tersebut lebih kecil dibandingkan perbaikan setelah pengecoran. Ketidaksesuaian jumlah tulangan atau dimensi yang ditemukan sebelum beton dituang dapat diperbaiki dengan relatif cepat. Sebaliknya, temuan setelah beton mengeras dapat membutuhkan pembobokan, evaluasi struktur, metode perkuatan, atau bahkan pembongkaran. Pekerjaan ulang tidak hanya menambah biaya material dan tenaga kerja, tetapi juga mengganggu pekerjaan lanjutan dan meningkatkan risiko keselamatan. Oleh karena itu, checklist dan inspection request yang digunakan pada proyek memiliki nilai ekonomi sebagai alat pencegahan, bukan sekadar beban administrasi.

Kesesuaian yang ditemukan pada balok B24AX dan B23C menunjukkan bahwa proses inspeksi berhasil mencegah penyimpangan utama masuk ke tahap pengecoran. Namun, manfaat tersebut perlu diukur secara lebih sistematis. Proyek dapat mencatat jumlah temuan sebelum pengecoran, jenis koreksi, waktu penyelesaian, serta potensi biaya yang dihindari. Data ini membantu manajemen memahami area yang paling sering menimbulkan masalah dan menentukan kebutuhan pelatihan. Misalnya, apabila kesalahan jarak sengkang sering berulang, penyebabnya dapat berasal dari shop drawing yang kurang jelas, pemotongan yang tidak konsisten, atau pengawasan yang terlambat. Tindakan perbaikan kemudian diarahkan pada akar masalah, bukan hanya mengoreksi hasil akhir.

Pengendalian mutu yang terlalu lambat juga dapat menimbulkan antrean pekerjaan. Inspection request harus diajukan ketika area benar-benar siap dan pengawas perlu memiliki waktu respons yang jelas. Pemeriksaan bertahap selama pemasangan dapat mengurangi jumlah koreksi pada saat inspeksi final. Praktik ini menciptakan keseimbangan antara kualitas dan produktivitas. Tim quality control tidak hanya berperan sebagai pihak yang menolak pekerjaan, tetapi sebagai mitra yang memberikan umpan balik sejak awal. Dengan komunikasi yang baik, pekerjaan dapat diselesaikan benar pada kesempatan pertama dan jadwal pengecoran lebih dapat diprediksi.

Špak et al. menempatkan pengendalian risiko sebagai instrumen untuk meningkatkan efisiensi pekerjaan struktur beton [11]. Temuan tersebut relevan karena mutu, biaya, dan waktu tidak seharusnya diperlakukan sebagai tujuan yang saling bertentangan. Mutu yang direncanakan dan dikendalikan sejak awal justru mengurangi variabilitas, klaim, serta pekerjaan ulang. Pada proyek rumah susun dengan banyak elemen berulang, pembelajaran dari satu zona dapat diterapkan pada zona berikutnya sehingga produktivitas meningkat tanpa mengurangi standar. Standardisasi metode kerja, penggunaan contoh pemasangan yang disetujui, dan rapat evaluasi setelah pengecoran merupakan langkah praktis untuk mencapai perbaikan berkelanjutan.

15. Peluang Pemanfaatan Teknologi Digital dalam Inspeksi Struktur

Inspeksi pada proyek yang diteliti masih bertumpu pada pengukuran lapangan, checklist, dan dokumen inspection request. Metode tersebut tetap relevan, tetapi perkembangan teknologi menyediakan peluang untuk meningkatkan ketelitian dan kecepatan. Wu et al. menggunakan point cloud untuk menilai kualitas pemasangan formwork, sedangkan Wang et al. memanfaatkan pemrosesan point cloud dan segmentasi semantik untuk mengukur jarak tulangan dan selimut beton [12], [13]. Chen et al. juga menunjukkan bahwa model pengenalan citra dapat mengidentifikasi ukuran dan posisi tulangan secara cepat [14]. Temuan-temuan tersebut memperlihatkan arah transformasi inspeksi dari pencatatan manual menuju verifikasi digital yang lebih objektif.

Penerapan teknologi pada proyek tidak harus langsung menggunakan sistem yang kompleks. Tahap awal dapat berupa pengambilan foto terstruktur sebelum pengecoran, penggunaan kode lokasi, dan penyimpanan pada folder proyek yang konsisten. Selanjutnya, foto dapat dihubungkan dengan checklist elektronik dan model BIM apabila tersedia. Penggunaan laser distance meter, total station, atau pemindaian sederhana dapat membantu memeriksa elevasi dan geometri bekisting. Untuk tulangan, aplikasi pengukuran berbasis citra dapat dikembangkan sebagai alat bantu, tetapi hasilnya tetap harus diverifikasi oleh tenaga teknis yang memahami gambar dan toleransi. Teknologi berfungsi memperkuat keputusan, bukan menggantikan tanggung jawab profesional.

Manfaat utama digitalisasi adalah ketertelusuran dan konsistensi. Data inspeksi dapat dibandingkan antar lantai, antar zona, atau antar tim kerja. Sistem dapat memberikan peringatan apabila item penting belum diperiksa atau hasil ukur berada di luar toleransi. Shin dan Cha menunjukkan bahwa integrasi formulir, data mutu, pelacakan, dan komunikasi dapat mempercepat alur inspeksi [10]. Pada proyek rumah susun yang memiliki elemen berulang, data historis dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola kesalahan dan memperbaiki metode pelaksanaan. Misalnya, lokasi yang berulang kali mengalami pergeseran sengkang dapat menjadi fokus pengawasan atau perubahan detail kerja.

Tantangan penerapan teknologi meliputi biaya perangkat, keterampilan personel, kualitas jaringan, standardisasi data, dan penerimaan pengguna. Oleh sebab itu, implementasi perlu dilakukan bertahap dengan tujuan yang jelas. Sistem yang canggih tetapi tidak digunakan secara konsisten tidak akan meningkatkan mutu. Prioritas pertama adalah memastikan data dasar yang benar, seperti identitas elemen, hasil ukur aktual, dan foto yang dapat diverifikasi. Setelah budaya pencatatan terbentuk, teknologi analisis yang lebih maju dapat diterapkan. Pendekatan bertahap tersebut sesuai untuk proyek yang ingin meningkatkan mutu tanpa menambah kompleksitas secara berlebihan.

16. Implikasi Praktis, Keterbatasan, dan Rekomendasi Penelitian

Secara praktis, penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas pekerjaan balok dapat dijaga melalui kombinasi metode kerja yang berurutan dan pengendalian pada titik-titik kritis. Kesesuaian dimensi dan tulangan pada B24AX serta B23C, hasil slump 12 cm, tidak adanya segregasi yang teramati, dan tidak ditemukannya cacat permukaan signifikan merupakan rangkaian indikator yang saling mendukung. Tidak satu pun indikator tersebut cukup berdiri sendiri. Kesesuaian pembesian tidak akan menghasilkan elemen yang baik apabila bekisting tidak stabil, beton tidak memenuhi konsistensi, atau pemadatan tidak memadai. Sebaliknya, beton yang baik tidak dapat menggantikan tulangan yang salah. Oleh karena itu, mutu harus dipahami sebagai hasil sistem, bukan hasil satu pengujian.

Bagi kontraktor, temuan penelitian dapat diterjemahkan menjadi kebutuhan untuk mempertahankan inspeksi bertahap dan meningkatkan dokumentasi aktual. Bagi konsultan pengawas, hasil ini menegaskan pentingnya verifikasi sebelum pekerjaan tertutup serta pemeriksaan terhadap tindak lanjut temuan. Bagi pemilik proyek, sistem mutu yang terdokumentasi memberikan keyakinan bahwa pekerjaan dibangun sesuai persyaratan dan memudahkan evaluasi apabila terjadi masalah. Setiap pihak memiliki fungsi berbeda, tetapi keputusan harus berorientasi pada bukti teknis yang sama. Kualitas akan lebih sulit dicapai apabila dokumen, pengukuran, dan tanggung jawab tidak terhubung.

Hasil penelitian juga dapat menjadi bahan penyusunan prosedur standar untuk pekerjaan berulang pada lantai berikutnya. Parameter yang telah terbukti penting, seperti dimensi bekisting, jumlah tulangan, jarak

senggang, beton decking, hasil slump, kesiapan vibrator, dan perlindungan cuaca, dapat disusun menjadi hold point. Pekerjaan tidak dilanjutkan sebelum hold point disetujui. Pendekatan tersebut memungkinkan pembelajaran dari satu siklus pengecoran diterapkan pada siklus berikutnya. Dengan standardisasi, variasi kualitas antarzona dapat dikurangi dan produktivitas meningkat karena pekerja memahami kriteria penerimaan sejak awal.

Dari perspektif akademik, penelitian memberikan gambaran aktual pengendalian mutu pada proyek rumah susun, tetapi masih memiliki keterbatasan. Objek observasi berfokus pada pekerjaan balok lantai dua dan data kuantitatif yang disajikan terbatas pada detail dua tipe balok serta hasil slump. Penelitian belum menyertakan hasil kuat tekan, data toleransi dimensi, ketebalan selimut aktual, durasi curing, atau pengukuran lendutan bekisting. Oleh karena itu, hasilnya lebih tepat digunakan untuk menjelaskan proses dan praktik pengendalian mutu daripada menilai kinerja struktur secara menyeluruh. Keterbatasan ini tidak mengurangi manfaat penelitian, tetapi menentukan batas generalisasi kesimpulannya.

Penelitian lanjutan dapat menggabungkan observasi proses dengan data hasil pengujian beton pada umur 7 dan 28 hari, pengukuran selimut menggunakan cover meter, survei elevasi, serta evaluasi cacat permukaan berdasarkan klasifikasi yang terukur. Analisis juga dapat membandingkan beberapa zona pengecoran atau beberapa lantai untuk melihat konsistensi penerapan mutu. Penambahan data biaya pekerjaan ulang dan waktu inspeksi akan memberikan gambaran hubungan antara pengendalian mutu dan efisiensi proyek. Dengan pengembangan tersebut, kajian mengenai pelaksanaan balok tidak hanya mendokumentasikan kesesuaian pekerjaan, tetapi juga menghasilkan model evaluasi yang dapat diterapkan pada proyek bangunan gedung sejenis.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelaksanaan pekerjaan balok beton bertulang pada Proyek Pembangunan Rumah Susun telah dilaksanakan sesuai tahapan pekerjaan yang meliputi persiapan, pemasangan perancah dan bekisting, pemasangan tulangan, pengecoran, perawatan beton, hingga pembongkaran bekisting. Pengendalian mutu diterapkan pada setiap tahapan pekerjaan melalui pemeriksaan pembesian, pemeriksaan bekisting, penggunaan checklist quality control dan inspection request, serta pengujian slump beton sebelum pengecoran. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa dimensi balok, jumlah tulangan, diameter tulangan, dan jarak senggang telah sesuai dengan shop drawing dan spesifikasi teknis proyek. Pengujian slump beton menghasilkan nilai 12 cm yang berada dalam rentang persyaratan proyek sebesar 12 ± 2 cm sehingga memenuhi kriteria workability yang ditetapkan. Selain itu, hasil pengecoran menunjukkan tidak adanya cacat signifikan yang dapat memengaruhi kualitas struktur. Temuan penelitian ini mengindikasikan bahwa penerapan pengendalian mutu yang dilakukan secara konsisten mampu mendukung tercapainya kualitas pekerjaan balok beton bertulang sesuai standar yang ditetapkan. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam pelaksanaan dan pengawasan pekerjaan struktur beton bertulang pada proyek bangunan gedung sejenis. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan kajian pada aspek pengendalian mutu struktur lainnya, seperti kolom, pelat lantai, atau evaluasi mutu beton berdasarkan hasil uji kuat tekan.

Referensi

1. Putriani, L., & Ikhwaniudin. (2023). Pelaksanaan Pekerjaan Struktur Atas Balok dan Pelat Lantai Proyek Pembangunan Rumah Susun Polresta Pati. *Science And Engineering National Seminar 8 (SENS 8)*, 8.
2. Jalaludin. (2025). Pengendalian Mutu Pekerjaan Struktur Beton Bertulang Bangunan Gudang X di Kota Tangerang. *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, 10(1).
3. Azmi, R., Supriyadi, I., & Sukarno, P. (2025). Tinjauan pekerjaan balok dan pelat lantai 2 pada proyek Cella Modern Logistic Warehouse. *Seminar Nasional Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta*.
4. Badan Standardisasi Nasional. (1997). *SNI 03-4430-1997 Metode Pengujian Kuat Tekan Elemen Struktur Beton dengan Alat Palu Beton Tipe N dan NR*.
5. Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1972:2008 Cara Uji Slump Beton*.
6. Badan Standardisasi Nasional. (2015). *SNI 2049:2015 Semen Portland*.
7. Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 2052:2017 Baja Tulangan Beton*.
8. Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*.
9. Tierney, L., & Safiuddin, M. (2022). Insights into Concrete Forming, Reinforcing, and Pouring in Building Construction. *Buildings*, 12(9), 1303. <https://doi.org/10.3390/buildings12091303>
10. Shin, H.-J., & Cha, H.-S. (2023). Proposing a Quality Inspection Process Model Using Advanced Technologies for the Transition to Smart Building Construction. *Sustainability*, 15(1), 815. <https://doi.org/10.3390/su15010815>
11. Špak, M., Mandičák, T., Spišáková, M., & Verčimák, D. (2023). Risk Management on Concrete Structures as a Tool for the Control of Construction Efficiency. *Sustainability*, 15(12), 9577. <https://doi.org/10.3390/su15129577>
12. Wu, K., Prieto, S. A., Mengiste, E., & García de Soto, B. (2024). Automated Quality Inspection of Formwork Systems Using 3D Point Cloud Data. *Buildings*, 14(4), 1177. <https://doi.org/10.3390/buildings14041177>
13. Wang, R., Zhang, J., Qiu, H., & Sun, J. (2024). Intelligent Inspection Method for Rebar Installation Quality of Reinforced Concrete Slab Based on Point Cloud Processing and Semantic Segmentation. *Buildings*, 14(11), 3693. <https://doi.org/10.3390/buildings14113693>
14. Chen, W., Fu, X., Chen, W., & Peng, Z. (2023). Intelligent Detection of Rebar Size and Position Using Improved DeeplabV3+. *Applied Sciences*, 13(19), 11094. <https://doi.org/10.3390/app131911094>

15. Schack, T., Coenen, M., & Haist, M. (2024). Image-based Quality Control of Fresh Concrete Based on Semantic Segmentation Algorithms. *Civil Engineering Design*, 6(3), 96–105. <https://doi.org/10.1002/cend.202410011>
16. Valente Monteiro, A., Gonçalves, A., Balayssac, J.-P., Yssorche-Cubaynes, M.-P., & Costa, A. (2023). On the Role of Compaction in Disputes over the Quality of the Supplied Concrete. *Materials and Structures*, 56, 60. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02148-2>