

Contents list available at journal.uib.ac.id**Journal of Civil Engineering and Planning**Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>

Effect of Rebound Hammer Test Point Location on the Variability and Accuracy of Concrete Compressive Strength Estimation

Pengaruh Posisi Pengambilan Titik Uji *Hammer Test* terhadap Variasi dan Akurasi Estimasi Kuat Tekan Beton

Y Djoko Setiyarto¹, Muhammad Pramudita Mustopa¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Komputer Indonesia

Email korespondensi: y.djoko.setiyarto@email.unikom.ac.id

INFO ARTIKEL

Kata kunci :

Hammer Test; Kuat Tekan Beton; Posisi Titik Uji; Non-Destructive Testing; *Compression Testing Machine*

ABSTRAK

Kuat tekan beton merupakan parameter utama dalam evaluasi mutu dan kinerja struktur beton. Pengujian destruktif menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) masih dianggap sebagai metode paling akurat, namun keterbatasannya pada struktur eksisting mendorong penggunaan metode non-destruktif, salah satunya *Hammer Test*. Meskipun praktis dan cepat, *Hammer Test* sering menunjukkan deviasi terhadap hasil CTM, sehingga akurasinya masih diperdebatkan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh posisi pengambilan titik uji *Hammer Test* terhadap variasi dan akurasi estimasi kuat tekan beton, serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan hasil uji tekan destruktif. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Beton dengan mutu rencana 15 MPa digunakan untuk membuat lima benda uji silinder dan lima benda uji kubus. Pengujian *Hammer Test* dilakukan pada umur beton 28 hari pada beberapa posisi titik uji, yaitu permukaan atas, bawah, dan sisi, dengan orientasi penumbukan tegak lurus sesuai ASTM C805. Selanjutnya, pengujian kuat tekan beton dilakukan menggunakan CTM berdasarkan ASTM C39 sebagai nilai acuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi titik uji berpengaruh secara sistematis terhadap nilai *Hammer Test*. Posisi bawah menghasilkan estimasi kuat tekan tertinggi dan deviasi terbesar terhadap CTM, sedangkan posisi atas memberikan nilai terendah dan paling mendekati kuat tekan aktual. Penelitian ini menyimpulkan bahwa variasi hasil *Hammer Test* dipengaruhi oleh karakteristik lokal permukaan beton akibat proses pengecoran dan pengaruh gravitasi, sehingga posisi titik uji perlu dipertimbangkan secara eksplisit dalam interpretasi hasil.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Rebound Hammer Test; Concrete Compressive Strength; Test Point Location; Non-Destructive Testing; Compression Testing Machine

Concrete compressive strength is a fundamental parameter for evaluating the performance of concrete structures. Although destructive testing using a Compression Testing Machine (CTM) is considered the most accurate method, its limited applicability to existing structures has encouraged the use of non-destructive methods such as the rebound hammer test. However, rebound hammer results often deviate from CTM measurements, raising concerns regarding their reliability. This study investigates the effect of rebound hammer test point location on the variability and accuracy of estimated concrete compressive strength and evaluates its agreement with destructive test results. A quantitative laboratory experimental program was conducted using concrete with a target strength of 15 MPa. Five cylindrical and five cubic specimens were tested at 28 days. Rebound hammer tests were performed on top, bottom, and side surfaces in accordance with ASTM C805, followed by destructive compressive strength testing using CTM based on ASTM C39. The results show that test point location systematically influences rebound hammer outcomes. Bottom test points produce the highest estimated strengths and the largest deviations from CTM results, whereas top test points yield the closest agreement with actual compressive strength. The findings confirm that rebound hammer accuracy is position-dependent and should be explicitly considered in concrete strength evaluation.

1. Pendahuluan

Kuat tekan beton merupakan parameter utama yang merepresentasikan mutu dan kinerja struktur beton, sehingga keandalannya sangat menentukan dalam proses evaluasi, pengendalian mutu, dan penilaian kondisi struktur eksisting. Pengujian kuat tekan secara destruktif menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) hingga saat ini masih dipandang sebagai metode paling akurat karena mampu menggambarkan kapasitas material secara menyeluruh. Namun, sifat pengujian yang merusak benda uji serta keterbatasannya untuk diterapkan langsung pada struktur yang telah beroperasi mendorong penggunaan metode non-destruktif sebagai alternatif. Di antara berbagai metode non-destruktif, *Hammer Test* menjadi salah satu yang paling luas digunakan karena praktis, cepat, dan tidak merusak elemen struktur, sehingga sering dimanfaatkan dalam evaluasi awal mutu beton di lapangan.

Meskipun demikian, berbagai studi menunjukkan bahwa hasil *Hammer Test* sering kali menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan terhadap hasil uji tekan CTM, baik pada pengujian laboratorium maupun evaluasi struktur eksisting [1]; [2]; [3]; [4]; [5]. Ketidaksesuaian ini menimbulkan keraguan terhadap keandalan *Hammer Test* dalam mengestimasi kuat tekan beton secara akurat. Sejumlah penelitian terdahulu telah mengaitkan perbedaan tersebut dengan berbagai faktor, seperti umur beton, kondisi kelembaban, degradasi akibat lingkungan ekstrem, heterogenitas material, maupun karakteristik permukaan beton. Selain itu, kajian mutakhir juga menegaskan bahwa *Hammer Test* pada dasarnya mengukur kekerasan permukaan beton yang bersifat lokal, bukan kekuatan beton secara global, sehingga respons pengujian sangat sensitif terhadap kondisi zona dekat permukaan.

Berdasarkan perkembangan penelitian tersebut, *state of the art* menunjukkan bahwa sebagian besar studi masih berfokus pada perbandingan hasil *Hammer Test* dan CTM, pengaruh kondisi lingkungan, atau peningkatan akurasi melalui kombinasi metode non-destruktif maupun pendekatan berbasis

kecerdasan buatan. Meskipun sejumlah standar dan kajian terdahulu mengakui bahwa lokasi atau posisi pengambilan titik uji dapat memengaruhi hasil Hammer Test [6]; [3]; [4] aspek ini umumnya diperlakukan sebagai faktor prosedural atau sumber variabilitas lokal, bukan sebagai variabel utama yang dianalisis secara sistematis. Dalam praktik pengujian maupun penelitian eksperimental sebelumnya, nilai Hammer Test lazim diperoleh dengan merata-ratakan beberapa titik uji pada satu elemen beton tanpa memisahkan kontribusi masing-masing posisi terhadap hasil estimasi kuat tekan [1]; [2].

Analisis terhadap penelitian terdahulu menunjukkan adanya kesenjangan pengetahuan yang jelas. Hingga saat ini, masih sangat terbatas penelitian eksperimental yang secara khusus mengisolasi posisi pengambilan titik uji *Hammer Test*—seperti permukaan atas, samping, dan bawah elemen beton—sebagai variabel utama dan mengkaji pengaruhnya secara kuantitatif terhadap variasi hasil serta tingkat kesesuaiannya dengan kuat tekan beton hasil CTM. Akibatnya, variasi hasil *Hammer Test* sering diinterpretasikan sebagai keterbatasan metode atau akibat degradasi material, tanpa mempertimbangkan bahwa sebagian variasi tersebut mungkin berasal dari perbedaan posisi titik uji pada satu elemen beton yang sama. Ketiadaan kajian terfokus ini menunjukkan bahwa pengaruh posisi titik uji *Hammer Test* belum dikaji secara komprehensif dan sistematis dalam literatur yang ada.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh posisi pengambilan titik uji *Hammer Test* terhadap variasi dan akurasi estimasi kuat tekan beton, serta mengevaluasi tingkat kesesuaiannya dengan hasil uji tekan menggunakan *Compression Testing Machine*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik respons lokal *Hammer Test*, mengidentifikasi posisi titik uji yang paling representatif, serta berkontribusi dalam penyempurnaan interpretasi dan praktik pengujian non-destruktif beton, baik dalam konteks penelitian maupun aplikasi rekayasa di lapangan.

2. Tinjauan Pustaka

Kuat tekan beton merupakan parameter fundamental yang merepresentasikan mutu dan kinerja material beton dalam struktur. Secara konseptual, kuat tekan beton dipahami sebagai sifat mekanik global yang ditentukan oleh komposisi campuran, rasio air–semen, karakteristik agregat, serta proses pengerasan dan perawatan beton. Pendekatan ini tercermin dalam pedoman perancangan campuran beton yang dikembangkan oleh ACI Committee 211 [7], yang mendasarkan perencanaan mutu beton pada asumsi homogenitas material pada skala elemen struktural. Dalam konteks ini, nilai kuat tekan hasil uji tekan destruktif menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) dipandang sebagai representasi paling andal dari kapasitas beton secara keseluruhan.

Namun demikian, keterbatasan pengujian destruktif dalam evaluasi struktur eksisting mendorong berkembangnya metode non-destruktif (Non-Destructive Testing/NDT). Salah satu metode NDT yang paling luas digunakan adalah *Rebound Hammer Test*. Standar ASTM C805 menegaskan bahwa *Hammer Test* mengukur nilai pantul yang berkaitan dengan kekerasan permukaan beton, bukan kuat tekan beton secara langsung [6]. Oleh karena itu, hasil *Hammer Test* bersifat lokal dan sangat dipengaruhi oleh kondisi zona dekat permukaan beton. Prinsip ini diperkuat oleh kajian mekanistik yang dilakukan oleh Szilágyi et al., yang menjelaskan bahwa respons pantulan *Hammer Test* ditentukan oleh karakteristik mikrostruktur dan kepadatan lapisan permukaan beton, sehingga dapat berbeda secara signifikan dari kekuatan beton di bagian inti [8].

Sejumlah penelitian empiris menunjukkan bahwa keterbatasan *Hammer Test* dalam merepresentasikan kuat tekan beton sering kali ditunjukkan oleh deviasi yang cukup besar terhadap

hasil CTM. Studi perbandingan yang dilakukan oleh Ichsan et al. menunjukkan bahwa korelasi antara *Hammer Test* dan CTM tidak selalu kuat, sehingga *Hammer Test* tidak dapat digunakan sebagai pengganti pengujian destruktif [1]. Temuan serupa juga dilaporkan dalam berbagai studi lapangan, termasuk evaluasi struktur pascabencana oleh Riskawati et al., yang memanfaatkan *Hammer Test* untuk menilai mutu beton kolom bangunan pascatsunami [2]. Meskipun bermanfaat secara praktis, penelitian tersebut menunjukkan bahwa variasi nilai *Hammer Test* sering diinterpretasikan langsung sebagai indikasi degradasi material namun belum mengkaitkan terhadap faktor prosedural pengujian.

Penelitian pada struktur nyata juga dilakukan oleh Benyahia et al., yang membandingkan metode destruktif dan non-destruktif dalam penentuan kuat tekan beton in-situ [5]. Hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa estimasi kuat tekan berbasis NDT memiliki tingkat ketidakpastian yang relatif tinggi, terutama akibat heterogenitas struktur dan sensitivitas metode terhadap kondisi lokal. Dalam kerangka yang lebih luas, Helal et al. melalui kajian ulasan metode NDT menyimpulkan bahwa tidak ada satu metode non-destruktif pun yang sepenuhnya bebas dari pengaruh kondisi lokal dan praktik pengujian, sehingga interpretasi hasil NDT harus dilakukan secara hati-hati [3].

Kajian ulasan yang lebih terfokus pada *Hammer Test* dilakukan oleh Kumavat et al., yang mengidentifikasi berbagai faktor yang memengaruhi kinerja *Hammer Test*, seperti umur beton, kelembaban, karbonasi, orientasi pengujian, serta lokasi pengambilan titik uji [4]. Meskipun demikian, sebagai studi ulasan, penelitian tersebut belum mengkaji secara kuantitatif besarnya pengaruh masing-masing faktor, khususnya posisi titik uji, terhadap variasi dan akurasi estimasi kuat tekan beton. Pendekatan serupa juga terlihat dalam kajian oleh Kouddane et al., yang merekomendasikan kombinasi beberapa metode NDT untuk meningkatkan akurasi estimasi kuat tekan beton, sebagai respons terhadap keterbatasan *Hammer Test* sebagai metode tunggal [9].

Sejumlah penelitian mencoba mengatasi keterbatasan *Hammer Test* melalui pendekatan lanjutan, termasuk pemodelan berbasis kecerdasan buatan. Studi oleh Park et al. menunjukkan bahwa penggunaan neural network dan genetic algorithm dapat meningkatkan akurasi estimasi kuat tekan beton berbasis data NDT [10]. Namun, pendekatan ini memperlakukan data *Hammer Test* sebagai input numerik global, belum mengkaji sumber fisik variasi data tersebut, termasuk pengaruh posisi titik uji pada permukaan beton.

Penelitian eksperimental dan lapangan juga menunjukkan bahwa kondisi lingkungan ekstrem dan degradasi material semakin memperkuat sensitivitas *Hammer Test* terhadap kondisi lokal permukaan beton. Studi oleh Celerinos et al. pada beton di lingkungan air laut [11], Wang et al. pada kondisi kering dan basah [12], serta penelitian pasca kebakaran oleh Widiyanto et al. [13] dan Dharmawan et al. [14] menunjukkan bahwa perubahan kondisi permukaan beton akibat lingkungan atau suhu tinggi menghasilkan deviasi signifikan antara hasil *Hammer Test* dan CTM. Variasi ini umumnya diinterpretasikan sebagai degradasi material, meskipun pengaruh lokasi pengujian pada elemen beton belum dianalisis secara spesifik.

Dalam konteks aplikasi struktural, penelitian oleh Ernawati et al. pada jembatan eksisting [15] serta Sumajouw et al. pada portal beton bertulang [16] menunjukkan bahwa *Hammer Test* pada elemen struktur nyata sering kali memberikan hasil yang berbeda dibandingkan uji tekan pada benda uji standar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa geometri elemen, kondisi permukaan, dan praktik pengujian memegang peranan penting dalam interpretasi hasil *Hammer Test*. Sensitivitas *Hammer Test* terhadap heterogenitas material juga ditunjukkan oleh Saha et al., yang meneliti beton dengan agregat daur ulang dan menemukan variasi nilai pantul yang tinggi akibat kondisi lokal material [17].

Berdasarkan keseluruhan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa literatur secara konsisten menegaskan *Hammer Test* sebagai metode yang sangat sensitif terhadap kondisi lokal permukaan beton. Namun, meskipun posisi atau lokasi pengambilan titik uji sering disebut sebagai salah satu faktor yang memengaruhi hasil *Hammer Test*, hingga saat ini masih sangat terbatas penelitian yang secara sistematis dan eksperimental menjadikan posisi titik uji sebagai variabel utama penelitian. Dengan demikian, kajian mengenai pengaruh posisi titik uji *Hammer Test* menjadi penting untuk menjembatani kesenjangan antara teori kekerasan permukaan beton, standar pengujian non-destruktif, dan praktik evaluasi kuat tekan beton di laboratorium maupun di lapangan.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif, yang dirancang untuk mengkaji secara sistematis pengaruh posisi pengambilan titik uji *Hammer Test* terhadap hasil estimasi kuat tekan beton. Pendekatan eksperimental dipilih agar seluruh variabel yang berpotensi memengaruhi hasil pengujian dapat dikendalikan dengan baik, sehingga variasi hasil yang diperoleh dapat dikaitkan secara langsung dengan variabel yang diteliti. Dalam penelitian ini, posisi titik uji *Hammer Test* ditetapkan sebagai variabel utama dan estimasi kuat tekan beton hasil *Hammer Test* sebagai variabel terikat. Sementara faktor-faktor lain yang berkaitan dengan mutu beton dan prosedur pengujian dijaga tetap konstan.

3.1. Benda Uji dan Bahan

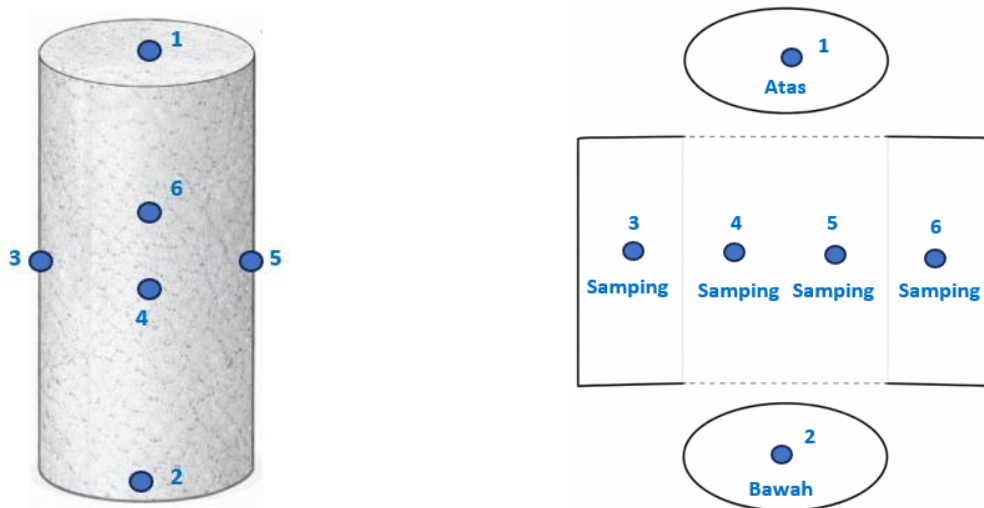
Benda uji beton dibuat di laboratorium dengan menggunakan satu komposisi campuran yang sama untuk seluruh sampel, sehingga mutu beton yang dihasilkan dapat dianggap homogen secara material. Mutu beton yang direncanakan adalah 15 MPa dengan mengikuti standar acuan mix design ACI 211.1-22. Proses pencampuran, pengecoran, pemadatan, dan perawatan beton dilakukan dengan prosedur yang seragam untuk meminimalkan variasi yang tidak diinginkan. Jenis benda uji yang digunakan adalah silinder (diameter 15 cm, tinggi 30 cm) sebanyak 5 buah dan kubus (15 cm x 15 cm x 15 cm) sebanyak 5 buah juga. Pengujian kuat tekan dilakukan saat beton berumur 28 hari.

3.2. Penentuan Posisi Titik Uji *Hammer Test*

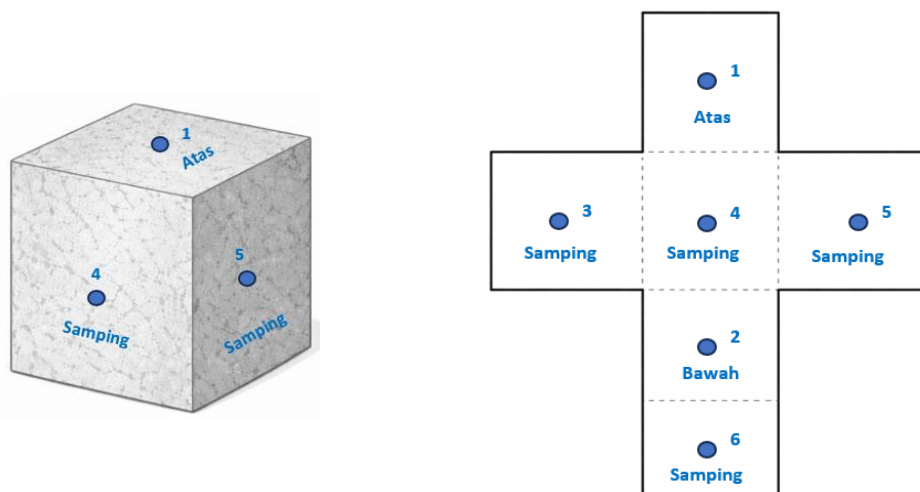
Pengujian *Hammer Test* dilakukan pada setiap benda uji dengan memperhatikan perbedaan posisi titik uji yang telah ditentukan. Posisi pengujian meliputi titik-titik pada permukaan beton yang secara geometris berbeda, sehingga dapat merepresentasikan variasi kondisi lokal permukaan beton akibat proses pengecoran dan pengaruh gravitasi. Seluruh pengujian dilakukan dengan orientasi dan prosedur yang sama, serta permukaan beton dipersiapkan terlebih dahulu untuk memastikan konsistensi kondisi pengujian. Nilai pantul yang diperoleh dari setiap posisi dicatat secara terpisah, sehingga pengaruh posisi titik uji terhadap hasil *Hammer Test* dapat dianalisis secara langsung.

Jumlah titik uji untuk setiap benda uji adalah sebanyak 6 titik. Pada benda uji silinder, satu titik uji dilakukan di sisi permukaan atas dan satu titik uji dilakukan di sisi permukaan bawah, dengan jarak dari tepi adalah di atas 5 cm, sesuai ketentuan ASTM C805 yang mensyaratkan jarak dari tepi adalah lebih dari 25 mm. Selanjutnya, 4 titik uji dilakukan di bagian tengah dinding silinder seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pada benda uji kubus, satu titik uji dilakukan pada ke enam sisi kubus dengan jarak dari tepi adalah 5 cm juga seperti yang terlihat pada Gambar 2. Orientasi penumbukan adalah tegak lurus (90°) terhadap permukaan yang diuji.

Pemilihan posisi pengambilan titik uji *Hammer Test* dalam penelitian ini didasarkan pada pemahaman terhadap proses pengecoran beton segar dan pengaruh gravitasi yang bekerja selama tahapan penuangan hingga pengerasan beton. Pada saat beton berada dalam kondisi plastis, material penyusunnya—terdiri atas pasta semen, agregat, air, dan udara—mengalami redistribusi akibat gaya gravitasi dan proses pemadatan. Interaksi ini menyebabkan terbentuknya karakteristik mikrostruktur beton yang tidak sepenuhnya seragam pada seluruh bagian elemen, khususnya pada zona dekat permukaan beton. Pada permukaan atas beton, pengaruh gravitasi mendorong terjadinya fenomena bleeding, yaitu pergerakan air ke arah permukaan. Kondisi ini dapat menghasilkan lapisan pasta semen yang relatif lebih kaya air dan memiliki kepadatan lebih rendah setelah beton mengeras. Sebaliknya, pada bagian bawah beton, agregat kasar cenderung mengalami pengendapan dan menghasilkan zona beton yang lebih padat dengan porositas yang relatif lebih kecil. Sementara itu, permukaan samping beton berada pada kondisi antara, yang dipengaruhi oleh tekanan lateral beton segar dan interaksi dengan dinding cetakan, sehingga karakteristik permukaannya dapat berbeda baik dari permukaan atas maupun bawah.



Gambar 1 Posisi Titik Uji *Hammer Test* Pada Benda Uji Silinder



Gambar 2 Posisi Titik Uji *Hammer Test* Pada Benda Uji Kubus

Perbedaan karakteristik zona permukaan yang terbentuk akibat proses pengecoran dan pengaruh gravitasi tersebut menjadi sangat relevan dalam konteks *Hammer Test*, mengingat metode ini pada dasarnya mengukur kekerasan permukaan beton secara lokal, bukan kuat tekan beton secara global. Oleh karena itu, posisi pengambilan titik uji pada permukaan atas, samping, dan bawah beton secara teoritis berpotensi menghasilkan nilai *rebound* yang berbeda, meskipun benda uji berasal dari campuran beton dan proses perawatan yang sama. Dengan mempertimbangkan mekanisme ini, pemilihan beberapa posisi titik uji dalam penelitian ini dimaksudkan untuk menangkap variasi respons lokal permukaan beton yang terbentuk secara alami selama proses pengecoran.

Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi yang lebih objektif terhadap pengaruh posisi titik uji *Hammer Test* terhadap hasil estimasi kuat tekan beton, serta memberikan dasar mekanistik yang kuat dalam menjelaskan variasi nilai yang diperoleh. Dengan demikian, perbedaan hasil *Hammer Test* yang teramati tidak semata-mata dipandang sebagai ketidakpastian metode, melainkan sebagai konsekuensi logis dari proses pembentukan beton dan distribusi material akibat pengaruh gravitasi.

3.3. Pengujian *Hammer Test*

Pengujian *Hammer Test* pada penelitian ini dilaksanakan dengan mengacu pada prosedur standar pengujian non-destruktif beton yang berlaku secara internasional, sebagaimana diatur dalam ASTM C805. Tahapan pengujian diawali dengan persiapan permukaan beton untuk memastikan bahwa nilai pantul yang diperoleh merepresentasikan kondisi material, bukan dipengaruhi oleh gangguan permukaan. Permukaan beton pada setiap titik uji dibersihkan dari debu, kotoran, dan partikel lepas, serta dipastikan dalam kondisi rata dan bebas dari retak mikro yang tampak secara visual. Apabila diperlukan, permukaan diratakan secara ringan menggunakan batu gosok sesuai ketentuan standar agar area tumbukan hammer memiliki kondisi yang seragam.

Pelaksanaan *Hammer Test* dilakukan dengan menempatkan alat uji tegak lurus terhadap permukaan beton pada posisi titik uji yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan pada beberapa posisi berbeda pada satu benda uji, yang mencerminkan variasi geometris permukaan beton. Penetapan posisi titik uji dilakukan secara konsisten pada setiap benda uji untuk memastikan keterbandingan hasil. Selama pengujian, orientasi penumbukan hammer dijaga tetap sama, dan jarak titik uji dari tepi atau sudut beton memenuhi ketentuan minimum sesuai standar, sehingga pengaruh tepi dan ketidakrataan lokal dapat dihindari.



Gambar 3 Pengujian *Hammer Test* Pada Berbagai Posisi

Pada setiap titik uji, *Hammer Test* dilakukan dengan menekan alat uji secara perlahan hingga mekanisme pegas melepaskan tumbukan. Nilai pantul (*rebound number*) yang ditunjukkan oleh alat dicatat secara langsung setelah setiap tumbukan. Untuk mengurangi pengaruh variasi acak, pengujian pada satu posisi dilakukan lebih dari satu kali sesuai rekomendasi standar, dan nilai *rebound* yang tidak wajar atau menyimpang secara signifikan dari kelompok data diabaikan. Seluruh nilai *rebound* yang valid dicatat secara sistematis dan diberi kode sesuai dengan posisi titik uji tempat pengukuran dilakukan. Nilai *rebound* yang diperoleh selanjutnya dikonversi menjadi estimasi kuat tekan beton menggunakan kurva atau persamaan korelasi yang sesuai dengan jenis alat dan konfigurasi pengujian. Proses konversi ini mengikuti prinsip yang direkomendasikan dalam standar, dengan pemahaman bahwa nilai yang dihasilkan merupakan estimasi kuat tekan berbasis kekerasan permukaan beton. Oleh karena itu, hasil konversi tidak diperlakukan sebagai nilai kuat tekan aktual, melainkan sebagai indikator yang digunakan untuk analisis perbandingan.

Untuk keperluan analisis, seluruh data *Hammer Test* dipisahkan dan dikelompokkan berdasarkan posisi titik uji. Pemisahan data ini merupakan bagian penting dari desain penelitian, karena memungkinkan evaluasi langsung terhadap pengaruh posisi pengambilan titik uji terhadap variasi nilai *rebound* dan estimasi kuat tekan beton. Dengan pendekatan ini, perbedaan hasil *Hammer Test* dapat dianalisis secara kuantitatif sebagai fungsi dari posisi pengujian, bukan sebagai variasi acak atau kesalahan pengukuran semata.

3.4. Pengujian Kuat Tekan (CTM)

Sebagai pembandingan, pengujian kuat tekan beton secara destruktif dilakukan menggunakan *Compression Testing Machine* pada benda uji yang sama. Hasil uji tekan ini digunakan sebagai nilai acuan untuk mengevaluasi akurasi dan kesesuaian estimasi kuat tekan yang diperoleh dari *Hammer Test* pada masing-masing posisi titik uji. Dengan menggunakan data berpasangan antara *Hammer Test* dan uji tekan, penelitian ini memungkinkan analisis yang lebih objektif terhadap perbedaan hasil yang disebabkan oleh posisi pengujian.

Pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini dilakukan secara destruktif menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) dengan mengacu pada ketentuan standar internasional ASTM C39 [18] dan BS EN 12390-3 [19]. Metode ini dipilih karena memberikan nilai kuat tekan beton yang paling representatif terhadap kapasitas material secara keseluruhan, sehingga hasil pengujian CTM digunakan sebagai nilai acuan (referensi) dalam mengevaluasi keandalan estimasi kuat tekan yang diperoleh dari *Hammer Test*.

Sebelum pengujian, benda uji beton diperiksa secara visual untuk memastikan bahwa permukaan tekan berada dalam kondisi baik, bersih, dan bebas dari cacat yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Permukaan atas dan bawah benda uji dipastikan rata dan sejajar agar beban tekan dapat terdistribusi secara merata selama pengujian. Benda uji kemudian ditempatkan secara sentris di antara pelat tekan mesin CTM untuk menghindari eksentrisitas beban yang dapat menyebabkan kegagalan prematur.

Pelaksanaan uji tekan dilakukan dengan memberikan beban tekan secara bertahap dan kontinu pada benda uji hingga terjadi keruntuhan. Laju pembebanan dijaga konstan sesuai dengan ketentuan standar agar respons material dapat direkam secara akurat dan konsisten. Selama proses pembebanan, mesin CTM secara otomatis mencatat besarnya beban yang diterima oleh benda uji. Beban maksimum yang tercapai tepat sebelum terjadinya keruntuhan dicatat sebagai beban puncak pengujian.

Nilai kuat tekan beton selanjutnya dihitung berdasarkan beban maksimum yang tercatat dan luas penampang efektif benda uji, sesuai dengan persamaan standar. Perhitungan ini menghasilkan nilai kuat tekan beton yang merepresentasikan kapasitas tekan aktual material. Karena pengujian dilakukan hingga benda uji mengalami keruntuhan, nilai kuat tekan yang diperoleh dari CTM dianggap sebagai representasi paling akurat dari sifat mekanik beton.

4. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan dua kelompok data utama, yaitu hasil estimasi kuat tekan berbasis *Hammer Test* (HT) pada beberapa posisi titik uji serta hasil kuat tekan aktual berbasis *Compression Testing Machine* (CTM) sebagai nilai acuan. Data yang tersedia merupakan data hasil uji tekan lima sampel silinder yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan lima sampel kubus yang dapat data dilihat pada Tabel 2, dengan konfigurasi posisi uji yang sama: atas, bawah, dan empat titik pada sisi (pinggir 1–4). Pada data ini, nilai CTM ditampilkan sebagai satu nilai referensi untuk setiap bentuk benda uji, sedangkan nilai HT bervariasi antar posisi sehingga memungkinkan evaluasi pengaruh posisi titik uji terhadap variasi dan deviasi estimasi kuat tekan.

Tabel 1 Data Hasil Uji Kuat Tekan *Hammer Test* (HT) dan *Compression Testing Machine* (CTM) untuk Sampel Berbentuk Silinder dalam Satuan MPa

Posisi Titik	Sampel 1		Sampel 2		Sampel 3		Sampel 4		Sampel 5		Rata-rata	
	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM
Atas - 1	16		15		16		15		14		15,2	
Bawah - 2	41		36		39		28		37		36,2	
Sisi - 3	21	16,0	22	15,5	23	15,5	18	14,5	17	14,0	20,2	15,1
Sisi - 4	24		23		20		22		21		22,0	
Sisi - 5	21		19		17		18		17		18,4	
Sisi - 6	16		14		15		15		16		15,2	
Rata Rata Posisi	23,2	16,0	21,5	15,5	21,7	15,5	19,3	14,5	20,3	14,0	21,2	15,1

4.1. Hasil Pengujian *Hammer Test* Berdasarkan Posisi Titik Uji

Pada benda uji silinder, nilai rata-rata kuat tekan hasil *rebound* HT menunjukkan variasi yang sangat lebar antar posisi, dari 15,2 MPa hingga 36,1 MPa (rentang 20,9 MPa). Nilai HT terendah terjadi pada posisi atas-1 dan sisi-6 (keduanya 15,2 MPa), sedangkan nilai tertinggi terjadi pada posisi bawah-2 (36,1 MPa). Empat posisi sisi menghasilkan nilai menengah hingga tinggi, yaitu 15,2–22,0 MPa, yang menunjukkan bahwa bahkan pada permukaan samping pun respons HT masih bervariasi.

Tabel 2 Data Hasil Uji Kuat Tekan *Hammer Test* (HT) dan *Compression Testing Machine* (CTM) untuk Sampel Berbentuk Kubus dalam Satuan MPa

Posisi Titik	Sampel 1		Sampel 2		Sampel 3		Sampel 4		Sampel 5		Rata-rata	
	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM	HT	CTM
Atas - 1	23		22		20		22		23		22,0	
Bawah - 2	28		33		28		31		25		29,0	
Sisi - 3	24	18,9	23	18,1	21	17,8	24	18,3	23	18,5	23,0	18,3
Sisi - 4	27		24		25		24		25		25,0	
Sisi - 5	26		28		26		26		24		26,0	
Sisi - 6	24		23		21		25		22		23,0	
Rata Rata Posisi	25,3	18,9	25,5	18,1	23,5	17,8	25,3	18,3	23,7	18,5	24,7	18,3

Pada benda uji kubus, pola yang sama muncul namun dengan rentang variasi yang lebih kecil. Nilai HT berada pada kisaran 22–29 MPa (rentang 7 MPa). Nilai terendah terjadi pada posisi atas (22 MPa), sedangkan nilai tertinggi pada posisi bawah (29 MPa). Keempat sisi (pinggir 3–6) menunjukkan nilai menengah (23–26 MPa), menandakan bahwa permukaan samping menghasilkan estimasi yang cenderung lebih tinggi dibanding permukaan atas, tetapi masih lebih rendah dibanding permukaan bawah.

Secara umum, baik pada silinder maupun kubus, data HT memperlihatkan kecenderungan konsisten: bawah > sisi > atas, yang memberi indikasi awal bahwa posisi titik uji memang menghasilkan respons permukaan yang berbeda, bukan sekadar variasi acak.

4.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan CTM

Hasil uji tekan destruktif CTM pada data ini digunakan sebagai nilai referensi tunggal untuk masing-masing bentuk benda uji. Untuk silinder, nilai CTM adalah 15,1 MPa, sedangkan untuk kubus sebesar 18,3 MPa. Dengan menempatkan CTM sebagai acuan, interpretasi dapat difokuskan pada sejauh mana nilai HT pada setiap posisi mendekati atau menyimpang dari nilai kuat tekan aktual tersebut.

4.3. Perbandingan *Hammer Test* dan CTM Berdasarkan Posisi Titik Uji

Nilai kuat tekan silinder hasil CTM = 15,1 MPa. Perbandingan HT terhadap CTM menunjukkan bahwa hanya posisi tertentu yang sangat dekat dengan CTM, sementara posisi lain memberikan over-estimation yang besar.

- Posisi atas - 1: HT 15,2 MPa, selisih 0,1 MPa, error 0,66% (paling dekat dengan CTM).
- Sisi - 6: HT 15,2 MPa, selisih 0,1 MPa, error 0,66% (setara dengan posisi atas).
- Sisi - 5: HT 18,3 MPa, selisih 3,2 MPa, error 17,49%.
- Sisi - 4: HT 20,2 MPa, selisih 5,1 MPa, error 25,25%.

- Sisi - 3: HT 22,1 MPa, selisih 7,0 MPa, error 31,67%.
- Posisi bawah - 2: HT 36,1 MPa, selisih 21,0 MPa, error 58,17% (deviasi paling tinggi).

Nilai rata-rata HT silinder adalah 21,18 MPa, sedangkan CTM 15,1 MPa, yang berarti secara rata-rata *Hammer Test* mengestimasi lebih tinggi sekitar 40,29% dibanding uji tekan destruktif.

Nilai kuat tekan kubus hasil CTM = 18,3 MPa. Pada kubus, seluruh posisi menghasilkan nilai HT yang lebih tinggi daripada CTM.

- Posisi atas: HT 22 MPa, selisih 3,7 MPa, error 16,82% (paling kecil).
- Sisi - 3: HT 23 MPa, selisih 4,7 MPa, error 20,43%.
- Sisi - 6: HT 23 MPa, selisih 4,7 MPa, error 20,43%.
- Sisi - 4: HT 25 MPa, selisih 6,7 MPa, error 26,80%.
- Sisi - 5: HT 26 MPa, selisih 7,7 MPa, error 29,62%.
- Posisi bawah: HT 29 MPa, selisih 10,7 MPa, error 36,90% (deviasi terbesar).

Nilai rata-rata HT kubus adalah 24,67 MPa, sedangkan CTM 18,3 MPa, sehingga secara rata-rata *Hammer Test* mengestimasi lebih tinggi sekitar 34,79% dibanding CTM.

Sebagai inti temuan komparatif yaitu pada silinder, HT bisa sangat akurat pada posisi tertentu (atas dan sisi - 6), tetapi bisa sangat bias pada posisi bawah. Pada kubus, HT cenderung *over-estimation* pada semua posisi, namun derajatnya bervariasi; posisi atas paling kecil, bawah paling besar. Pola umum yang konsisten pada dua bentuk benda uji adalah posisi bawah menghasilkan deviasi paling tinggi.

4.4. Pembahasan Pengaruh Posisi Titik Uji terhadap Variasi *Hammer Test*

Temuan utama penelitian ini memperlihatkan bahwa variasi hasil *Hammer Test* bersifat sistematis mengikuti posisi titik uji, bukan acak. Secara mekanistik, hal ini dapat dijelaskan melalui hubungan antara proses pengecoran, pengaruh gravitasi, dan pembentukan zona permukaan beton. Selama beton masih segar, gravitasi mendorong terjadinya bleeding menuju permukaan atas, sementara agregat kasar cenderung mengendap ke bagian bawah. Konsekuensinya, zona dekat permukaan (*near-surface zone*) pada bagian atas dapat terbentuk dengan kepadatan yang relatif lebih rendah, sedangkan bagian bawah cenderung lebih padat. Karena *Hammer Test* pada dasarnya mengukur kekerasan permukaan lokal, perbedaan karakteristik zona permukaan ini akan termanifestasi sebagai perbedaan *rebound number* dan selanjutnya perbedaan estimasi kuat tekan.

Konsistensi pola hasil kuat tekan sisi bawah lebih besar daripada sisi dinding dan lebih besar daripada sisi atas pada silinder dan kubus mendukung logika tersebut. Khusus pada silinder, perbedaan yang sangat ekstrem pada posisi bawah (HT 36,1 MPa) dibanding CTM (15,1 MPa) menunjukkan bahwa posisi bawah berpotensi menghasilkan *over-estimation* sangat besar bila digunakan sebagai satu-satunya dasar estimasi kuat tekan. Sebaliknya, posisi atas dan salah satu sisi pada silinder memberikan hasil yang hampir identik dengan CTM, yang mengindikasikan bahwa posisi tertentu dapat lebih representatif terhadap kuat tekan aktual untuk konfigurasi spesimen dan prosedur yang digunakan.

4.5. Keterkaitan dengan Standar dan Penelitian Terdahulu

Secara konseptual, hasil ini sejalan dengan prinsip pada ASTM C805 bahwa *Hammer Test* mengukur respons lokal permukaan beton dan sangat dipengaruhi kondisi serta lokasi pengujian [6]. Temuan ini juga konsisten dengan kerangka pemahaman *rebound surface hardness* yang menekankan bahwa respons pantulan merupakan karakteristik *near-surface zone*, sehingga wajar jika posisi berbeda menghasilkan nilai yang berbeda. Dalam konteks literatur yang lebih luas, pola deviasi HT-CTM yang bervariasi menurut kondisi lokal juga sering muncul pada studi perbandingan HT dan CTM, baik pada beton normal maupun pada beton yang mengalami perubahan kondisi (misalnya lingkungan basah-kering, pasca kebakaran, atau kondisi lapangan). Kontribusi penting penelitian ini adalah menunjukkan

bahwa variasi serupa dapat muncul tanpa perubahan mutu beton, hanya karena posisi titik uji yang berbeda.

Beberapa penelitian internasional secara konsisten melaporkan bahwa *Hammer Test* pada benda uji kubus hampir selalu menghasilkan estimasi kuat tekan yang lebih tinggi dibanding uji tekan destruktif, terlepas dari posisi pengujian. Benyahia et al. menunjukkan bahwa pada spesimen kubus, nilai *rebound* cenderung memberikan over-estimation sistematis, karena kubus memiliki empat sisi vertikal simetris, zona permukaan relatif seragam, sehingga respons *rebound* tinggi muncul hampir di semua sisi [5]. Helal et al. (review NDT) menegaskan bahwa *Hammer Test* pada spesimen dengan geometri simetris seperti kubus, lebih rentan menghasilkan nilai pantul yang tidak proporsional terhadap kuat tekan aktual [3]. Pada kubus distribusi material akibat gravitasi relatif lebih homogen secara geometris, tetapi zona permukaan tetap lebih keras daripada inti, sehingga *Hammer Test over-estimation* hampir di semua posisi.

Berbeda dengan kubus, banyak studi internasional menunjukkan bahwa *Hammer Test* pada silinder dapat sangat akurat pada posisi tertentu, tetapi sangat bias pada posisi lain. Szilágyi et al. menjelaskan bahwa *Hammer Test* mengukur *rebound surface hardness* pada silinder, berdasarkan zona permukaan tidak simetris secara vertikal akibat efek pengecoran dan gravitasi [8]. Kumavat et al. (review faktor *Hammer Test*) secara eksplisit menyebut posisi pengujian (top, side, bottom) sebagai salah satu faktor dominan, tetapi belum dikaji secara kuantitatif dalam banyak studi [4]. Wang et al. menunjukkan bahwa pada spesimen silinder, respons *Hammer Test* sangat dipengaruhi oleh zona permukaan lokal, sehingga akurasi dapat sangat bervariasi antar posisi [12]. Pada silinder permukaan atas dipengaruhi *bleeding* sehingga cenderung lebih lunak dan menghasilkan nilai HT lebih rendah. Permukaan bawah terjadi pengendapan agregat sehingga lebih padat dan menghasilkan nilai HT sangat tinggi.

4.6. Keterbatasan Penelitian dan Arah Penelitian Lanjutan

Interpretasi pada tahap ini memiliki keterbatasan karena data yang tersedia hanya terdiri atas 5 sampel dan 6 titik posisi uji HT dengan satu mutu beton, sehingga belum memungkinkan evaluasi statistik yang lebih kaya, seperti simpangan baku per posisi, uji signifikansi, atau besaran efek (*effect size*). Kajian lanjutan juga dapat memasukkan variasi mutu beton, umur beton, kondisi kelembaban, serta validasi pada elemen beton in-situ untuk melihat apakah pola pengaruh posisi titik uji tetap konsisten pada kondisi lapangan.

5. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan data hasil eksperimental, diketahui bahwa posisi titik uji terbukti memengaruhi hasil *Hammer Test* secara sistematis. Pada kedua bentuk benda uji, posisi bawah menghasilkan estimasi kuat tekan tertinggi sekaligus deviasi terbesar terhadap CTM, sedangkan posisi atas cenderung memberikan estimasi lebih rendah dan deviasi lebih kecil. Temuan ini memperkuat justifikasi bahwa posisi titik uji *Hammer Test* merupakan variabel utama yang relevan dan perlu dikontrol untuk meningkatkan keandalan estimasi kuat tekan beton. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dengan menunjukkan bahwa keandalan *Hammer Test* dalam mengestimasi kuat tekan beton bersifat bergantung pada posisi titik uji, dan bahwa pada kondisi tertentu *Hammer Test* dapat digunakan secara lebih akurat bila posisi pengujian dipilih secara tepat.

Daftar Rujukan

- [1] M. Ichsan, D. Tanjung, M. Husni, and M. Hasibuan, "Analisa Perbandingan Hammer Test dan Compression Testing Machine Terhadap Uji Kuat Tekan Beton," *Buletin Utama Teknik*, vol. 17, no. 1, pp. 1410–4520, 2021.
- [2] Riskawati, A. Yusra, and S. Mahmud, "Analisa Perbedaan Kekuatan Beton Akibat Tsunami (Studi Kasus : Pengujian Nilai Pantul Hammer Test Pada Kolom Bangunan Masjid Paya Peunaga Kec. Meureubo Kab. Aceh Barat)," *Jurnal Teknik Sipil Universitas Teuku Umar*, vol. 1, no. 1, Oct. 2015.
- [3] J. Helal, M. Sofi, and P. Mendis, "Non - Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods," *Journal of Structural Engineering*, vol. 14, no. 1, 2015.
- [4] H. R. Kumavat, N. R. Chandak, and I. T. Patil, "Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 14, pp. 1–12, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.E00491.
- [5] K. Ali-Benyahia, S. Kenai, M. Ghrici, Z. M. Sbartai, and S. M. Elachachi, "Analysis of the accuracy of in-situ concrete characteristic compressive strength assessment in real structures using destructive and non-destructive testing methods," *Constr Build Mater*, vol. 366, p. 130161, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130161.
- [6] ASTM C805, *Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2025.
- [7] ACI Committee 211, *ACI PRC-211.1-22: Selecting proportions for normal-density and high density-concrete : guide*. American Concrete Institute, 2022.
- [8] K. Szilágyi, A. Borosnyói, and I. Zsigovics, "Understanding the rebound surface hardness of concrete," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 21, no. 2, pp. 185–192, Jan. 2015, doi: 10.3846/13923730.2013.802722.
- [9] B. Kouddane *et al.*, "Assessment of Concrete Strength Using the Combination of NDT—Review and Performance Analysis," Dec. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/app122312190.
- [10] J. S. Park, S. Park, B. K. Oh, T. Hong, D. E. Lee, and H. S. Park, "Estimation of concrete compressive strength from non-destructive tests using a customized neural network and genetic algorithm," *Appl Soft Comput*, vol. 164, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.asoc.2024.111941.
- [11] P. J. Celerinos, P. M. Dedel, N. V. Fernandez, K. I. Muñoz, and F. A. Suelane, "An Assessment of Rebound Hammer Test in Estimating The Concrete Compressive Strength in Seawater," *Research on Engineering Structures and Materials*, vol. 9, no. 3, pp. 947–967, 2023, doi: 10.17515/resm2023.712me0321.
- [12] J. Wang *et al.*, "Evaluation of compressive strength of concrete durability degradation in dry and wet environments using destructive and non-destructive testing," *Measurement (Lond)*, vol. 223, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113702.
- [13] D. Widianto, R. Suryanita, and I. R. Sitompul, "Kuat Tekan Beton Pasca Bakar Menggunakan Hammer Test dan Compression Testing Machine (CTM)," *JOM FTEKNIK*, vol. 5, no. 2, 2018.
- [14] W. I. Dharmawan, D. Oktarina, and M. Safitri, "Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton Menggunakan Hammer Test dan Compression Testing Machine terhadap Beton Pasca Bakar," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 22, no. 1, 2016.

- [15] Ernawati, Tumingan, and B. Nugroho, "Evaluasi Kuat Tekan Beton Menggunakan Hammer Test Dan Ultrasonic Pulse Velocity (Upv) Pada Jembatan Kuala Samboja," *Jurnal Inersia*, vol. 14, no. 1, 2022.
- [16] A. J. Sumajouw, R. Pandaleke, and S. E. Wallah, "Perbandingan Kuat Tekan Menggunakan Hammer Test Pada Benda Uji Portal Beton Bertulang Dan Menggunakan Mesin Uji Kuat Tekan Pada Benda Uji Kubus," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 6, no. 11, pp. 941–948, 2018.
- [17] A. S. Saha and K. M. Amanat, "Rebound hammer test to predict in-situ strength of concrete using recycled concrete aggregates, brick chips and stone chips," *Constr Build Mater*, vol. 268, p. 121088, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121088.
- [18] ASTM C39, "Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," Feb. 01, 2020, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/C0039_C0039M-20.
- [19] BS EN 12390-3, *Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens*. BSI, 2019.