

# Penyelidikan Forensik pada Kerusakan Bangunan Pasar Ikan di Pulau Belakang Padang, Kota Batam, Indonesia

Wa Ode Sumartini<sup>\*</sup>, Marvin Tandedi<sup>1</sup>

1. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Internasional Batam, Jalan Gajah Mada, Batam, 29426, Indonesia

<sup>\*</sup>e-mail: waode\_sumartini@yahoo.co.id

(Received: 16 Mei 2023.; Reviewed: 24 Mei 2023; Accepted: 30 Mei 2023)

## Abstrak

### **Forensic Investigation into Damage to Fish Market Building in Pulau Rear Padang, Batam City, Indonesia.**

A deteriorated fish market building situated on Rear Padang Island in Kepulauan Riau Province, Indonesia has raised concerns among the local population. Consequently, it is imperative to assess the extent of the building's damage. To accomplish this, forensic investigations were conducted utilizing visual inspections, field measurements, and non-destructive testing using the Hammer Test. This study aims to outline and summarize the causes of the observed damage. Visual inspections revealed that more than 50% of the column web exhibited significant cracks, approximately 30% of the column's concrete had chipped off, and the steel reinforcement was extensively corroded. The Hammer Test results indicated that the column's strength was below 5 MPa. Based on these findings, it is evident that the building has sustained significant structural damage, necessitating either its demolition or comprehensive restoration and reinforcement. In its current deteriorated state, the building poses a severe risk and requires evacuation for safety reasons.

**Keywords:** Forensic Investigation, Structure deterioration, Corrosion, Reinforced concrete column

## Abstrak

Sebuah bangunan pasar ikan rusak yang terletak di pulau Belakang Padang, Provinsi Kepulauan Riau, Indonesia telah menimbulkan kekhawatiran di kalangan warga sipil. Oleh karena itu, penting untuk menyelidiki tingkat keparahan kerusakan bangunan tersebut. Dengan demikian, penyelidikan forensik dilakukan menggunakan inspeksi visual, pengukuran lapangan, dan pengujian non-destruktif menggunakan Hammer Test. Penelitian ini mengilustrasikan dan meringkas penyebab kerusakan tersebut. Pengamatan visual mengungkapkan bahwa lebih dari 50% badan kolom mengalami retakan besar, dengan sekitar 30% beton kolom terkelupas dan tulangan baja mengalami korosi berat. Hasil uji *Hammer test* menunjukkan bahwa kekuatan kolom kurang dari 5 MPa. Penyelidikan ini menunjukkan bahwa kerusakan bangunan merupakan kerusakan structural utama sehingga bangunan tersebut perlu dibongkar atau perlu dilakukan pemulihan dan penguatan menyeluruh. Dalam kondisi rusak seperti ini, bangunan menjadi sangat berbahaya sehingga harus dikosongkan.

**Kata Kunci:** Pemeriksaan Forensik, Kerusakan Struktur, Korosi, Kolom Beton Bertulang.

## Pendahuluan

Rekayasa forensik melibatkan penggunaan prinsip-prinsip rekayasa untuk menyelidiki kerusakan atau kegagalan struktur (Noon, 2000). Tujuan utamanya adalah menjawab pertanyaan-pertanyaan penting seperti apa kerusakannya, seberapa parah kerusakannya, kapan terjadinya, dan mengapa kegagalan itu terjadi. Pendekatan analisis multi-level diperlukan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut (Ratay, 2010). Selain itu, rekayasa forensik juga berperan dalam mencegah masalah serupa terjadi di masa depan pada gedung dan infrastruktur. Ada sangat sedikit literatur yang tersedia tentang masa pakai struktur yang diharapkan namun, bangunan beton bertulang umumnya berusia 100 tahun dan setidaknya 60-80 tahun untuk bangunan rumah tinggal/kantor/ bangunan komersial (Gupta Y. P., 2010) sedikit lebih tinggi dari yang dipersyaratkan oleh (ISO 2394, 1998) yaitu 50 tahun. Sehingga apabila bangunan telah mengalami kerusakan bahkan dibawah dari setengah umur layannya maka akan menimbulkan kerugian yang sangat besar.

Kerusakan pada struktur beton pada usia dini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, kelemahan dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi, seperti ketidakcukupan pemadatan beton dan penempatan tulangan yang tidak tepat, dapat menyebabkan korosi dini pada tulangan baja (Gupta Y. P., 2010). Iklim juga memainkan peran penting, karena paparan yang berkepanjangan terhadap polusi, hujan asam, dan fluktuasi kelembaban dapat merusak beton dan menyebabkan retakan permukaan. Jumlah semen yang tidak memadai dan perbandingan air-semen yang berlebihan selama proses pencampuran dapat melemahkan matriks beton, mengurangi daya tahan beton. Ketebalan penutup beton yang tidak memadai untuk tulangan, yang sering terjadi akibat penempatan dan pembengkakan yang tidak benar, dapat menyebabkan karbonasi dan korosi dini. Beton yang berpori atau tidak terkompaksi dengan baik, ditandai dengan pemadatan yang tidak memadai, merupakan kelemahan utama yang memengaruhi integritas struktural kolom, dinding, balok, dan pelat.

Perencanaan dan pelaksanaan yang buruk pada sambungan konstruksi dapat menghasilkan sambungan dingin, di mana beton segar dan beton keras tidak menyatu dengan baik. Reaktivitas alkali-agregat adalah masalah lainnya, di mana reaksi kimia antara mineral tertentu dalam agregat dan hidroksida alkali dari semen menghasilkan pembentukan gel yang mengembang, menyebabkan retakan. Karat pada tulangan baja akibat paparan kelembaban dan kurangnya pembersihan sebelum pengecoran dapat mempercepat proses korosi. Penempatan tulangan yang terlalu padat, terutama pada elemen yang sempit dan ramping, dapat menghambat pemadatan yang baik dan mengakibatkan pembentukan rongga dan penetrasi kelembaban. Terakhir, penggunaan blok penutup yang berpori yang memungkinkan masuknya kelembaban dapat menyebabkan korosi pada tulangan baja. Peneliti lain juga mengungkapkan bahwa beton bertulang, yang sering digunakan dalam struktur, rentan terhadap kerusakan dari berbagai faktor seperti paparan bahan kimia, suhu tinggi, benturan, beban struktural, dan pengaruh lingkungan (Jiang et al., 2021) (Van Steen et al., 2022) (Chen et al., 2021) (Wu et al., 2021).

Beberapa penyelidikan forensik telah dilakukan untuk menganalisis kegagalan struktur bangunan (Etemadi & Balkaya, 2020) (Awoyera, et al., 2014) (Rabindra et al., 2022). Salah satunya adalah investigasi tentang runtuhnya bangunan beton bertulang di Turki yang menemukan masalah redistribusi kekuatan dalam struktur bangunan (Etemadi & Balkaya, 2020). Studi lain mengungkapkan efek kerusakan akibat kebakaran pada beton bertulang, di mana kekuatan beton mengalami penurunan signifikan (P.O, Awoyera, et al., 2014). Investigasi ketiga memfokuskan pada kegagalan jembatan beton pratekan di Nepal dan menemukan faktor penyumbang utamanya adalah kegagalan beban mati akibat pekerjaan yang tidak benar (Rabindra et al., 2022). Namun, penelitian yang dilakukan sebagian besar berfokus pada bangunan yang runtuh atau hancur, sedangkan penelitian tentang bangunan yang rusak pada usia dibawah 30 tahun masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran tingkat kerusakan dan kemungkinan penyebab kerusakan pada bangunan pasar ikan berumur 26 tahun di Pulau Belakang Padang, Kota Batam, Indonesia, yang telah beroperasi sejak tahun 1996. Bangunan ini semakin memburuk karena tidak adanya tindakan perawatan maupun perbaikan yang dilakukan oleh masyarakat maupun pihak terkait untuk mempertahankan kelangsungan bangunan tersebut.

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan observasi langsung dan pengujian non destruktif seperti yang di sarankan oleh (Gupta Y. P., 2010). Pengujian non-destruktif yang digunakan adalah pengujian dengan menggunakan Schmidt hammer test, yang banyak digunakan dalam praktik teknik karena sederhana, biaya terjangkau (Brencich et al., 2020), dan tidak merusak struktur yang diuji (Schabowicz, 2019) (Kot et al., 2021) (J. Helal et al., 2015). Pengujian ini memungkinkan pengukuran langsung sifat mekanik beton pada struktur (Kovler et al., 2018), sehingga cocok digunakan dalam studi bangunan ini di mana kondisi bangunan belum diketahui. Kebermaknaan NDT terletak pada kemampuannya dalam mengidentifikasi mekanisme kegagalan

pada struktur bangunan dengan mengukur sifat mekaniknya, seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, kekuatan tekan, daktilitas, dan ketangguhan retak (J. Helal et al., 2015). *Hammer test* ini melibatkan instrumen yang dilengkapi dengan bob berat yang didorong oleh pegas dan menabrak permukaan beton melalui tuas (Malhotra & Carino, 2003). Jarak pantulan bob diukur, dan "nilai pantulan" dihitung dengan membagi jarak pantulan dengan panjang pegas awal. Nilai ini kemudian digunakan sebagai indikator kekuatan beton (Kumavat et al., 2021). Pengujian ini dilakukan pada elemen struktur tunggal dengan tingkat kekuatan yang sama (Lu, 2017). Data yang diperoleh dari uji rebound hammer mendekati kekuatan tekan kubik, dengan persyaratan sampel yang lebih kecil dan kemampuan untuk melakukan pengujian di tempat (Lu, 2017). Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu mencegah kerusakan serupa di masa depan dan mendorong pengembangan infrastruktur yang berkelanjutan.

## Metode

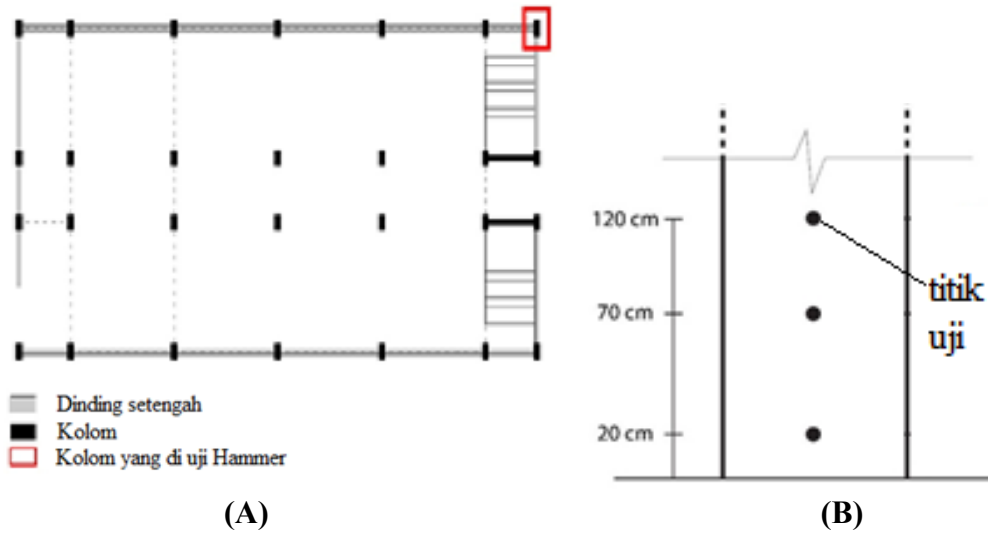
Penelitian ini dilakukan pada kolom lantai 1 bangunan pasar ikan yang terletak di Pulau Belakang Padang, Kota Batam, Provinsi Kepulauan Riau, Indonesia, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1. Sejak tahun 1996, bangunan pasar ikan ini telah beroperasi tetapi pada tahun 2021, bangunan ini ditutup karena kondisinya yang semakin memburuk.



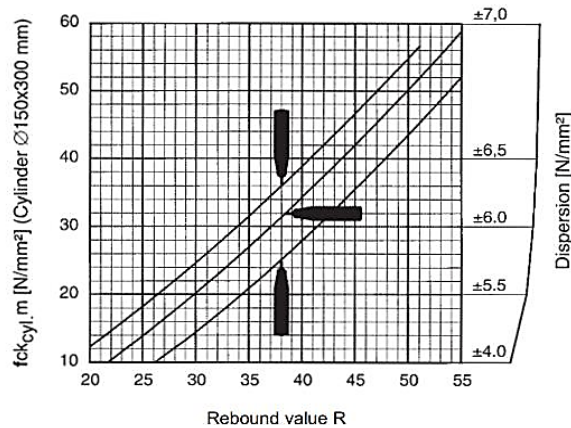
**Gambar 1. Lokasi penelitian, sumber: Google Earth dengan adaptasi (2022)**

Penelitian ini dilakukan untuk mengklasifikasikan tingkat kerusakan dan merekomendasikan tindakan apa yang diperlukan pada bangunan pasar ikan tersebut dengan cara melakukan observasi langsung dan pengujian hammer test. Observasi visual dilakukan pada semua kolom yang ada dilantai tersebut yang berjumlah 28 kolom. Observasi dilakukan mendokumentasikan kondisi kolom, menentukan penyebab kerusakan kolom, mengukur dimensi kolom, mengukur ketebalan slab beton dan dimensi tulangan beton. Sedangkan pengujian non destruktif hammer test) dilakukan dengan menggunakan alat Schmidt rebound hammer yang dilakukan dengan memposisikan mata hammer tegak lurus dengan bidang kolom. Hammer test dilakukan untuk menentukan kekuatan kolom bangunan. Kolom yang di uji terletak di sudut bangunan yang ditunjukkan pada Gambar 2A.

Lokasi titik pengujian berada ditengah kolom pada jarak 20 cm, 70 cm, dan 150 cm dari permukaan lantai (Gambar 2B). Nilai pantulan selanjutnya dikonversikan menjadi data kekuatan beton menggunakan grafik konversi untuk uji rebound hammer (Gambar 3). Dari kedua penyelidikan ini, maka dibuatlah klasifikasi tingkat kerusakan bangunan dan rekomendasi tindakan yang diperlukan berdasarkan klasifikasi tingkat kerusakan, deskripsi klasifikasi, dan kondisi bangunan menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia yang ditunjukkan pada tabel 1.



Gambar 2. (A) Layout lantai 1 bangunan pasar ikan dan (B) posisi kolom yang diuji.



Gambar 3. Grafik konversi nilai *hammer test*, sumber: Test manual (2022)

Tabel 1. Tingkat kerusakan, deskripsi klasifikasi, dan kondisi bangunan menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia (Dep. PU Dirjen Cipta Karya, 2006).

Klasifikasi	Keterangan	Kondisi
Kerusakan non-struktural ringan	a. Muncul retakan halus (lebar celah lebih kecil dari 0,075 cm) pada plester b. Potongan plester yang jatuh Mencakup area terbatas	Dimungkinkan untuk digunakan setelah perbaikan arsitektural tanpa mengosongkan gedung
Kerusakan struktural kecil	a. Retakan kecil (lebar celah antara 0,075 dan 0,6 cm) pada dinding. b. Plester jatuh. c. Mencakup area yang luas. d. Kerusakan pada bagian non-struktural seperti cerobong asap, papan penyisipan, dll. e. Kemampuan struktur untuk memikul beban tidak terpengaruh Apakah bangunan tersebut masih layak fungsi/layak huni	Dimungkinkan untuk digunakan setelah perbaikan arsitektur sehingga keawetan bangunan tetap terjaga. Perbaikan dengan kerusakan ringan pada struktur dapat dilakukan tanpa mengosongkan bangunan
Kerusakan struktural sedang	a. retakan besar (lebar celah lebih dari 0,6 cm) di dinding;	Dimungkinkan untuk digunakan setelah reparasi besar.

Kerusakan struktural utama	<p>b. retakan tersebar luas di banyak tempat, seperti pada dinding penahan beban, kolom; cerobong miring; dan runtuh;</p> <p>c. kapasitas struktur untuk membawa beban telah berkurang sebagian; fungsional/layak huni.</p> <p>a. Dinding penahan beban terbelah dan runtuh;</p> <p>b. Bangunan terpisah karena kegagalan elemen pengikat;</p> <p>c. Kira-kira 50% elemen utama rusak;</p> <p>d. Tidak layak untuk fungsi/layak huni.</p>	<p>Bangunan itu perlu dibongkar. Atau pemulihan dan penguatan menyeluruh. Dalam kondisi rusak seperti ini, bangunan menjadi sangat berbahaya sehingga harus dikosongkan</p>
Kerusakan total	<p>a. Bangunan runtuh total (&gt; 65%)</p> <p>b. Sebagian besar komponen utama struktur rusak</p> <p>d. Tidak cocok untuk fungsi / tempat tinggal</p>	<p>Itu perlu dibongkar, dan diganti dengan bangunan baru.</p>

## Hasil

Dari hasil observasi diketahui bahwa kolom berbentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 50 cm, lebar 25 cm dan tinggi 250 cm. Tulangan kolom menggunakan besi ulir berdiameter sekitar 16 mm. Jumlah tulangan utama untuk setiap kolom berjumlah 10 batang. Ketebalan selimut beton bervariasi mulai dari sekitar 3 mm hingga 1,5 cm. Observasi visual dilakukan pada 28 kolom yang ada dilantai 1 bangunan pasar ikan tersebut menunjukkan bahwa semua kolom tersebut telah mengalami kerusakan yang parah dimana lebih dari 50% bagian kolom telah retak dan sekitar 30% bagian kolom selimut beton telah terlepas. Tulangan kolom tersebut dapat terlihat dengan jelas dan mengalami korosi yang parah. Bagian tulangan yang terekspos tersebut sangat rapung hingga dapat di ambil dengan tangan kosong. Kondisi umum kerusakan kolom bangunan ditunjukkan pada Gambar 4 dan hasil pengujian hammer test ditunjukkan pada Gambar 5.



1. Ukuran selimut beton pada sebagian sisi beton tidak memadai

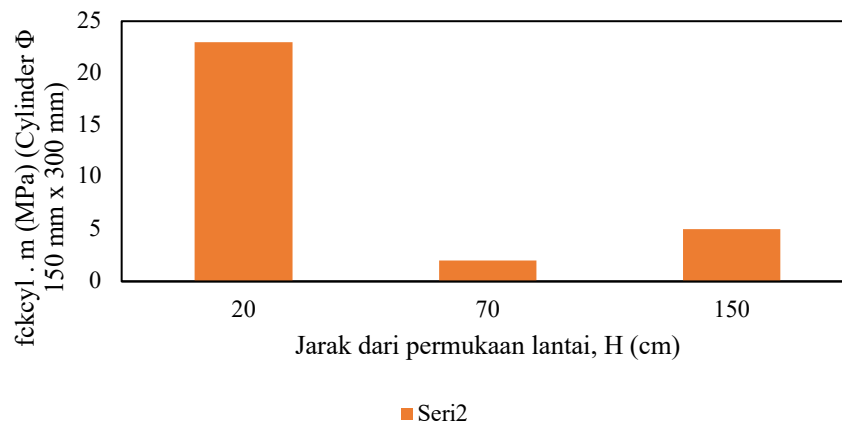


2. Selimut beton terkupas dan tulangan mengalami korosi yang parah



3. semen terlepas dari agregat dan kolom berlumut

**Gambar 4. Kondisi umum kerusakan kolom lantai 1 bangunan pasar ikan**



**Gambar 5 Hasil pengujian *hammer test* yang telah dikonversikan kedalam kekuatan tekan cylinder berukuran 150 mm x 300 mm.**

## Pembahasan

Dari gambar 4 telah diketahui bahwa terdapat 3 temuan utama yang dapat digunakan sebagai dasar analisa penyebab kerusakan yang terjadi pada kolom lantai 1 gedung pasar ikan yang diteliti. Pertama adalah ukuran selimut beton pada sebagian sisi beton tidak memadai. Hal ini terjadi karena pemosisian tulangan pada bekisting saat pengecoran tidak rapih sehingga ukuran selimut beton pada sebagian sisi beton menjadi tidak memadai. Namun, menurut (Gupta Y. P., 2010) hal ini terjadi karena pengerjaan yang buruk dimana tukang besi yang merakit tulangan tidak dilatih untuk membengkokkan tulangan secara akurat untuk memastikan bahwa penutup yang ditentukan tertinggal di antara tulangan dan bekisting (penutup). Menurutnya hal ini cukup sering, tidak hanya batangan itu sendiri yang menyentuh bekisting, tetapi juga ujung kawat pengikat yang lepas dan batangan baja terlihat di permukaan beton dan terkena karbonasi awal beton. Kedua, selimut beton terkupas dan tulangan mengalami korosi yang parah. Hal ini terjadi karena pemasangan batang tulangan tidak teratur. Jarak tulangan ada yang terlalu rapat dan ada yang terlalu jarang sehingga kekuatan tulangan untuk menopang beton tidak merata yang berdampak pada kemampuan kolom untuk menopang beban (Gupta Y. P., 2010). Dan yang terakhir yaitu. semen terlepas dari akregat dan kolom berlumut. Hal ini diakibatkan oleh Kuantitas semen yang tidak memadai menyebabkan kualitas beton menjadi buruk dan beton mengalami situasi basah-kering akibat aktifitas pedagang ikan yang sering membasahi daerah kolom memberikan efek erosi pada tubuh kolom ditambah lagi air yang digunakan oleh penjual ikan adalah air laut yang semakin memicu korosi pada tulangan beton.

Dari gambar 5 dapat diketahui bahwa kekuatan kolom cenderung menurun dari arah lantai. Hingga ketitik 20 cm dari lantai, kekuatan beton kolom masih memenuhi standar kuat tekan minimum ( $f'_c$ ) untuk beton di Indonesia yaitu minimal 17 MPa (SNI 2847-2019, 2019). Namun, pada titik 70 cm dan 150 cm, kekuatan beton kolom sudah berada pada 5 MPa kebawah. Hal ini mengisyaratkan bahwa kondisi kolom sudah dalam kondisi menuju ke keruntuhan. Apalagi bila mempertimbangkan kolom masih harus menopang 1 lantai bangunan lagi di atasnya. Dengan demikian, berdasarkan hasil uji tersebut, kolom sudah hamper mengalami kegagalan struktur.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan dari observasi dan pengujian *hammer test*, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kolom bangunan telah mengalami kerusakan yang sangat parah dimana dapat terlihat dari terkelupasnya beton dan kerapuhan tulangan beton.
2. Klassifikasi kerusakan kolom bangunan merupakan kerusakan struktural utama. Kerusakan ini ditandai dengan berkurangnya kekuatan beton kolom secara signifikan hingga mencapai 5 Mpa kebawah yang mana sudah jauh dari memenuhi standar kekuatan minimum beton struktural.
3. Bangunan pasar ikan tersebut perlu dibongkar atau dilakukan pemulihan dan penguatan menyeluruh. Dalam kondisi rusak seperti ini, bangunan menjadi sangat berbahaya sehingga harus dikosongkan.

4. Penyebab kerusakan kolom terjadi karena 2 hal yaitu karena pengerjaan yang buruk dan kurangnya kuantitas semen.
5. Untuk memastikan penyebab kerusakan dengan lebih pasti, faktor-faktor lain sebagai pemicu kerusakan beton perlu di teliti lebih lanjut misalnya pengaruh iklim, pengaruh kualitas material, hujan asam, dan sebagainya. Selanjutnya, studi yang melibatkan simulasi numerik juga direncanakan untuk mengevaluasi penurunan kekuatan struktur dari waktu ke waktu. Melalui investigasi yang lebih mendalam dan analisis yang komprehensif, diharapkan penyebab kerusakan yang akurat dapat diidentifikasi dan langkah perbaikan yang tepat dapat direkomendasikan untuk memulihkan kekuatan dan keandalan bangunan tersebut.

### Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Internasional Batam (UIB) yang telah mendanai penelitian ini. Penulis juga ingin mengucapkan terimakasih kepada saudara M. Alfi Wahyudi (Mahasiswa Teknik Sipil UIB), Bapak Yudi Admajianto (Camat Belakang Padang), Bapak Azhar (Kepala Seksi Trantib Kecamatan Belakang Padang), Bapak Deny Ardiansyah (Anggota Satpol PP Belakang Padang), dan Bapak Muhammad Suwardi (Anggota TPA Belakang Padang) atas bantuannya selama penelitian kami di Pulau Belakang Padang.

### Referensi

- Brencich, A., Bovolenta, R., Ghiggi, V., Pera, D., & Redaelli, P. (2020). *Rebound Hammer Test: An Investigation into Its Reliability in Applications on Concrete Structures*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/6450183>
- Chen, D., Deng, Y., Shen, J., Sun, G., & Shi, J. (2021). *Study on damage rules on concrete under corrosion of freeze-thaw and saline solution*. *Construction and Building Materials*, 304(August), 124617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124617>
- Etemadi, A., & Balkaya, C. (2020). *Collapsed-RC Building Failure Mechanisms with a Forensic Engineering Approach*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(5), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001462](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001462)
- Gupta Y. P. (2010). *Use of MALWA Recycled Aggregate in Concrete Construction: a Need of Society for Better Environment*, Vol. 10, No. 4, Jan 2010. *Journal of Indian Concrete Institute*, 4(4).
- ISO 2394. (1998). *General principles on reliability for structures*.
- J. Helal, M. Sofi, & Mendis, P. (2015). *Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods*. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 97–105. <https://doi.org/10.56748/ejse.141931>
- Jiang, Y., Pang, D., & Li, C. (2021). *A Deep Learning Approach for Fast Detection and Classification of Concrete Damage*. *Automation in Construction*, 128(January), 103785. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103785>
- Kot, P., Muradov, M., Gkantou, M., Kamaris, G. S., Hashim, K., & Yeboah, D. (2021). *Recent Advancements in Non-Destructive Testing Techniques for Structural Health Monitoring*. *Applied Sciences*, 11(6), 2750. <https://doi.org/10.3390/app11062750>
- Kovler, K., Wang, F., & Muravin, B. (2018). *Testing of concrete by rebound method: Leeb versus Schmidt hammers*. *Materials and Structures*, 51(5), 138. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1265-1>
- Kumavat, H. R., Chandak, N. R., & Patil, I. T. (2021). *Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. Case Studies in Construction Materials*, 14, e00491. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00491>
- Lu, X. (Ed.). (2017). *Retrofitting design of building structures* (1st ed.). CRC Press.

- Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420040050>
- Noon, R. K. (2000). *Forensic Engineering Investigation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420041415>
- P.O, Awoyera, I.I., A., A.N, E., & M.O, O. (2014). *Forensic Investigation of Fire-affected Reinforced Concrete Buildings*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, *11*(4), 17–23. <https://doi.org/10.9790/1684-11441723>
- Rabindra, A., Pratyush, J., Lalit, B., Dipesh, T., Davide, F., & Dipendra, G. (2022). *Failure Investigation of Under Construction Prestressed Concrete Bridge in Chitwan, Nepal*. *Infrastructures*, *7*(14).
- Ratay, R. T. (2010). *Forensic structural engineering handbook*. McGraw-Hill Education.
- Schabowicz, K. (2019). Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering. *Materials*, *12*(19), 3237. <https://doi.org/10.3390/ma12193237>
- SNI 2847-2019. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung SNI 1726-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.
- Van Steen, C., Nasser, H., Verstryng, E., & Wevers, M. (2022). *Acoustic emission source characterisation of chloride-induced corrosion damage in reinforced concrete*. *Structural Health Monitoring*, *21*(3), 1266–1286. <https://doi.org/10.1177/14759217211013324>
- Wu, Q., Ma, Q., & Huang, X. (2021). *Mechanical properties and damage evolution of concrete materials considering sulfate attack*. *Materials*, *14*(9). <https://doi.org/10.3390/ma14092343>