

Analisis Perilaku Kolom Terhadap Beban Aksial dan Torsi dengan Variasi Bentuk Penampang Menggunakan Finite Element Method (FEM) pada Mutu Beton, Luas Penampang, dan Luas Tulangan Yang Sama

Fitrah Arif Harefa*, Ing Johannes Tarigan, Ika Puji Hastuti

Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Email: fithraharifharefa@gmail.com*, johannes.tarigan@usu.ac.id, ika.hastuty@usu.ac.id

Keywords	Abstract
beach sand; reinforced concrete; reinforcement corrosion; chloride; durability	Beach sand is often used as a fine aggregate in concrete mixes due to its abundant availability and relatively low cost, especially in coastal areas. However, beach sand generally contains high levels of salt (chloride), which can accelerate corrosion of steel reinforcement in reinforced concrete. This study aims to analyze the effect of beach sand use on the performance of reinforced concrete in terms of reinforcement corrosion. The research method involved testing the physical and chemical properties of beach sand, creating concrete specimens with varying sand content, and testing the corrosion rate of reinforcement and the compressive strength of concrete. The analysis results indicate that the chloride content in beach sand significantly accelerates the corrosion process of steel reinforcement, which reduces the durability and service life of reinforced concrete structures. Therefore, the use of beach sand as a fine aggregate requires washing and chloride content control to meet technical standards and ensure the safety of building structures. The results of carbonation depth testing using phenolphthalein solution showed that the average carbonation depth in existing buildings in five districts/cities reached around 20.6 mm, which indicates that the penetration of aggressive substances has reached most of the concrete surface.

Kata kunci	Abstrak
pasir pantai; beton bertulang; korosi tulangan; klorida; durabilitas	Pasir pantai sering dimanfaatkan sebagai bahan agregat halus dalam campuran beton karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang relatif rendah, terutama di wilayah pesisir. Namun, pasir pantai umumnya mengandung kadar garam (klorida) yang tinggi, yang berpotensi mempercepat terjadinya korosi pada tulangan baja dalam beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan pasir pantai terhadap kinerja beton bertulang ditinjau dari aspek korosi tulangan. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian sifat fisik dan kimia pasir pantai, pembuatan benda uji beton dengan variasi kadar pasir pantai, serta pengujian laju korosi tulangan dan kuat tekan beton. Hasil analisis menunjukkan bahwa kandungan klorida pada pasir pantai berkontribusi signifikan terhadap percepatan proses korosi tulangan baja, yang berdampak pada penurunan durabilitas dan umur layanan struktur beton bertulang. Oleh karena itu, penggunaan pasir pantai sebagai agregat halus perlu melalui proses pencucian dan pengendalian kadar klorida agar memenuhi persyaratan standar teknis dan menjamin keamanan struktur bangunan. Hasil pengujian kedalaman karbonasi menggunakan larutan fenolftalein menunjukkan rata-rata kedalaman karbonasi pada bangunan eksisting di lima kabupaten/kota mencapai sekitar 20,6 mm, yang menandakan penetrasi zat agresif telah mencapai sebagian besar permukaan beton.

PENDAHULUAN

Perkembangan industri konstruksi di Indonesia cukup meningkat, dengan hampir 60% material yang digunakan dalam pembangunan berupa beton. Berbagai jenis bangunan seperti gedung, bangunan air, serta bangunan transportasi umumnya menggunakan beton sebagai bahan utamanya. Beton bertulang merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan karena memiliki kuat tekan yang tinggi, mudah dibentuk, dan relatif ekonomis. Beton tersusun atas semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Agregat halus berperan penting dalam mempengaruhi mutu dan durabilitas beton.

Pasir merupakan agregat halus utama dalam campuran beton. Di daerah pesisir, keterbatasan pasir sungai sering mendorong penggunaan pasir pantai karena ketersediaannya melimpah dan biaya transportasi lebih rendah. Namun, pasir pantai umumnya mengandung kadar klorida (Cl^-) dan garam yang tinggi, yang dapat mempercepat proses korosi pada tulangan baja dalam beton bertulang. Korosi tulangan menyebabkan penurunan luas penampang baja, retak, spalling beton, serta berkurangnya umur struktur. Oleh karena itu, diperlukan kajian mendalam mengenai pengaruh penggunaan pasir pantai terhadap korosi pada beton bertulang. Pasir laut biasanya memiliki butiran yang halus dan bulat, gradasi butiran yang seragam, serta mengandung garam yang tidak menguntungkan bagi beton. Butiran halus dan bulat serta gradasi yang seragam, dapat mengurangi daya ikat antar butiran, sehingga memengaruhi kekuatan dan ketahanan beton. Namun masyarakat yang tinggal di sekitar pantai khususnya di Pulau Nias masih menggunakan pasir laut sebagai agregat halus pada campuran struktur beton bertulang dikarenakan mudah didapatkan dan harga yang cenderung lebih murah.

Dalam kegiatan konstruksi di Pulau Nias, pasir sebagai material utama pembuatan beton umumnya diambil dari dua sumber utama: pasir sungai dan pasir pantai. Secara teknis, pasir sungai dianggap lebih memenuhi standar kualitas untuk beton karena karakteristiknya yang bersih, memiliki gradasi yang baik, dan bebas dari kandungan garam yang tinggi. Namun, ketersediaan pasir sungai seringkali terbatas, mengalami fluktuasi musiman, dan memerlukan biaya transportasi yang lebih tinggi, terutama untuk lokasi yang jauh dari aliran sungai. Di sisi lain, pasir pantai tersedia dalam jumlah melimpah dan lebih mudah diperoleh, sehingga menjadi pilihan praktis meskipun secara kualitas sering dipertanyakan. Kondisi eksisting bangunan yang akan diteliti juga menunjukkan tanda-tanda korosi pada tulangan dimana selimut beton terkelupas akibat penggunaan pasir pantai dengan gradasi yang kurang sesuai dan menyebabkan tulangan terlihat dan perlahan mengalami korosi.

Korosi pada tulangan beton bertulang adalah salah satu faktor penting yang mempengaruhi performa dan umur struktur, terutama di lingkungan dengan kandungan ion klorida tinggi seperti area pesisir. Penggunaan pasir laut sebagai material agregat halus bisa meningkatkan kadar klorida dalam beton jika tidak melalui proses pencucian yang cukup. Sigit Maulana dkk. (2025) mengungkapkan bahwa peningkatan kadar NaCl dapat mempercepat laju korosi pada tulangan dan mengurangi kapasitas tekan kolom beton. Secara mekanis, dampak korosi terhadap elemen struktur tidak hanya terbatas pada penurunan luas penampang baja, tetapi juga berpengaruh terhadap perilaku struktural secara keseluruhan. Zaki dan Nugroho (2021) melalui pemodelan menggunakan ATENA 3D menunjukkan bahwa peningkatan tingkat korosi tulangan berkorelasi dengan penurunan kekuatan dan kekakuan elemen beton bertulang.

Dari segi perilaku lentur, Astuti (2023) menyatakan bahwa korosi hingga batas tertentu ($\pm 50\%$) mengakibatkan penurunan kemampuan lentur balok dan perubahan pola retakan yang lebih agresif serta tidak terkontrol. Di samping itu, Amalia dkk. (2021) menemukan bahwa semakin tinggi densitas arus korosi, semakin serius perkembangan retakan pada beton. Retakan yang disebabkan oleh ekspansi produk korosi mempercepat infiltrasi klorida lebih lanjut ke dalam beton, menciptakan siklus kerusakan yang terus berulang. Sri Anjani dan Walujodjati (2022) melalui percobaan pull-out menunjukkan bahwa tulangan yang terkorosi menunjukkan variasi yang signifikan dalam kuat lekat, tergantung pada panjang penyaluran serta tingkat kerusakan pada permukaan baja.

Dalam hal pengendalian korosi, Pramudiyanto dkk. (2011) menekankan bahwa ketebalan lapisan beton memengaruhi tingkat korosi pada tulangan, di mana lapisan yang lebih tebal dapat menghambat masuknya ion klorida. Sultan dkk. (2020) mengungkapkan bahwa pemanfaatan inhibitor alami seperti ekstrak tembakau memiliki potensi untuk mengurangi tingkat korosi pada tulangan. Ghewa (2022) juga mencatat bahwa penambahan bahan pozolan seperti fly ash dan silica fume dapat menurunkan risiko munculnya retak akibat korosi dengan cara meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton.

Berdasarkan berbagai temuan tersebut, kajian mengenai korosi tulangan akibat penggunaan pasir pantai sebagai agregat halus menjadi sangat penting untuk dilakukan, guna mengevaluasi tingkat risiko, mekanisme degradasi, serta strategi mitigasi yang dapat diterapkan dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi di wilayah pesisir. Pada SNI 03-2461 (2014) ada aturan sangat ketat tentang pemakaian pasir pantai karena rentan membuat tulangan akan korosi sehingga umur struktur menjadi lebih pendek. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui gradasi pasir pantai; (2) mengetahui kedalaman korosi dari selimut beton ke dalam struktur pada bangunan eksisting; (3) mengetahui tingkat korosi pada tulangan dalam beton; (4) mengetahui laju korosi pada bangunan eksisting di lima kabupaten/kota; dan (5) mengetahui prediksi umur struktur beton pada bangunan di lima kabupaten/kota di Pulau Nias.

Beton bertulang merupakan material komposit yang terdiri dari adukan beton (semen, pasir, kerikil, air) untuk menghasilkan massa yang padat yang diperkuat dengan kerangka baja. Kombinasi ini membuatnya mampu mengatasi kelemahan beton dalam menahan gaya tarik, sekaligus mempertahankan kekuatan tekan yang tinggi (Siregar, 2006). Beton bertulang dibuat dengan memperhitungkan bahwa beton akan berfungsi sebagai pelindung (cover concrete) yang menciptakan lingkungan dengan tingkat alkalinitas tinggi ($\text{pH} > 12,5$) di sekitar baja tulangan. Lingkungan ini menghasilkan lapisan oksida pasif (passive layer) yang tipis dan stabil di permukaan baja, yang secara efektif menghindari korosi (Bertolini dkk., 2016).

Beton bertulang mencakup berbagai elemen struktural penting yang saling terintegrasi. Kolom struktur adalah komponen utama dalam dukungan struktural yang berfungsi untuk mentransfer beban vertikal dari bagian atas ke bagian bawah hingga ke fondasi. Kerusakan kolom karena korosi bisa mengurangi kapasitas struktural secara signifikan dan berpotensi mengancam stabilitas keseluruhan bangunan (Nurul Komariah dkk., 2009). Balok adalah komponen yang memiliki sifat lentur yang bertugas untuk mendukung dan mendistribusikan beban melintang dari plat lantai atau elemen struktural lainnya ke kolom atau dinding penyangga (Bastian, 2018). Pelat lantai merupakan elemen struktur beton bertulang berbentuk bidang datar yang berfungsi untuk menahan beban gravitasi dan mendistribusikannya ke elemen struktur pendukung (Zineddin & Krauthammer, 2007).

Selimut beton adalah lapisan pelindung utama yang berperan penting untuk menentukan ketahanan struktur beton bertulang. Selimut beton memiliki dua fungsi utama: menjadi penghalang fisik yang mencegah masuknya zat-zat berbahaya seperti ion klorida dan karbon dioksida, serta menciptakan lingkungan kimia yang bersifat alkali sehingga menjaga lapisan oksida pasif pada permukaan baja tulangan. Ketebalan serta kualitas selimut beton, terutama dalam hal permeabilitas, berhubungan langsung dengan waktu awal terjadinya korosi menurut model klasik Tuutti. Semakin padat dan tebal lapisan selimut beton, semakin lama ion klorida dari lingkungan membutuhkan waktu untuk mencapai konsentrasi kritis di permukaan tulangan (Tanjung dkk., 2020).

Pasir adalah agregat alami yang berasal dari letusan gunung berapi, sungai, dalam tanah atau pantai. Pasir dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu pasir galian, pasir laut dan pasir sungai. Pada konstruksi bangunan pasir digunakan sebagai agregat halus dalam campuran beton, bahan perekat untuk pasangan bata maupun keramik (ACI, 2025). Dalam SNI 2847:2019, agregat halus (pasir) yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi persyaratan kualitas material agar beton yang dihasilkan memiliki kekuatan dan durabilitas yang baik. Sedangkan menurut SNI 03-2461-2002, agregat halus yang digunakan dalam campuran beton harus berupa pasir yang seluruh butirannya lolos saringan 4,75 mm (No.4) dan memiliki gradasi tertentu yang ditentukan melalui analisis saringan agar distribusi ukuran butirnya sesuai untuk menghasilkan beton yang padat dan mudah dikerjakan.

Pasir pantai adalah jenis pasir yang diambil dari tepi laut atau pantai, dengan butiran yang halus dan bulat karena proses gesekan antar butir. Jenis pasir ini tergolong buruk karena mengandung banyak garam (Rifki dkk., 2023). Gradasi agregat adalah distribusi ukuran butiran dari agregat halus yang ditentukan melalui analisis saringan (sieve analysis). Berdasarkan SNI 03-2834-2000, gradasi agregat halus dibagi menjadi 4 zona daerah penyebaran butiran: Zona 1 (Pasir Kasar), Zona 2 (Pasir Agak Kasar), Zona 3 (Pasir Agak Halus), dan Zona 4 (Pasir Halus). Pasir pantai umumnya masuk ke dalam kategori Zona 4 (Pasir Halus) dengan kurva gradasi yang curam (seragam).

Korosi pada tulangan dalam struktur beton adalah proses elektrokimia yang menyebabkan degradasi baja tulangan, yang dapat mengurangi kekuatan dan umur struktur beton (Fahirah, 2007). Beberapa penyebab korosi pada tulangan antara lain: kandungan klorida, karbonasi, retak pada beton, dan lingkungan yang agresif. Ion klorida dari garam akibat terpapar lingkungan air laut dapat menembus beton dan mencapai tulangan, yang memecah lapisan pelindung pasif pada permukaan baja (Fahirah, 2007). Proses karbonasi terjadi ketika karbon dioksida (CO_2) dari udara bereaksi dengan kalsium hidroksida di dalam beton, menurunkan pH beton dan dapat menyebabkan lapisan pelindung pasif baja menjadi tidak stabil (Patah dkk., 2022).

Dampak korosi meliputi penurunan kekuatan struktural (Mulyadi & Walujodjati, 2022), kerusakan beton yang memerlukan pemeliharaan (Ariyanto dkk., 2022), serta desakan produk korosi yang menyebabkan kegagalan struktur beton (Ariyanto dkk., 2022). Pencegahan korosi dapat dilakukan melalui pengecatan anti-korosi pada permukaan tulangan (Astuti & Fahma, 2022), mempertebal selimut beton (Fahirah, 2007), menggunakan beton dengan mutu dan kompaksi baik (Fahirah, 2007), penggunaan inhibitor korosi (Alvina dkk., 2020), serta proteksi katodik (Ishak, 2011).

Korosi pada tulangan baja dalam beton adalah suatu proses elektrokimia yang menyebabkan baja kehilangan massa dan luas penampang efektifnya. Ketika baja mengalami korosi, sebagian logam besi (Fe) diubah menjadi produk korosi seperti oksida atau hidroksida besi melalui reaksi dengan air dan ion klorida atau oksigen. Pengurangan dimensi ini dapat diukur secara langsung sebagai indikator laju korosi: banyaknya kehilangan diameter atau luas penampang per satuan waktu, umumnya dinyatakan dalam milimeter per tahun (mm/tahun). Semakin tinggi derajat korosi, semakin besar pengurangan dimensi baja tulangan, yang juga menunjukkan laju korosi yang lebih tinggi (Bidari dkk., 2024).

Beberapa penelitian yang relevan dengan korosi tulangan dalam beton telah dilakukan oleh berbagai peneliti. Fajar dkk. (2024) menemukan bahwa pencucian pasir laut dapat mengurangi kadar garam sehingga menurunkan potensi korosi tulangan. Maulana dkk. (2024) menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaCl maka laju korosi tulangan meningkat dan kekuatan kolom menurun. Triyono dkk. (2025) menyatakan bahwa penggunaan pasir pantai memungkinkan namun memerlukan bahan tambahan untuk meningkatkan durabilitas. Astuti (2023) menemukan bahwa korosi tulangan hingga 50% menyebabkan penurunan kapasitas lentur yang signifikan. Anjani dan Walujodjati (2023) menunjukkan bahwa korosi mengurangi kekuatan lekatan antara beton dan tulangan. Berbagai penelitian internasional juga mengkonfirmasi bahwa ion klorida dari pasir laut mempercepat proses korosi baja tulangan (Li dkk., 2023; Wang dkk., 2024; Chen dkk., 2023; Kumar dkk., 2023).

Kebaruan penelitian ini terletak pada beberapa aspek. Pertama, penelitian ini melakukan pengujian lapangan secara komprehensif pada bangunan eksisting di lima kabupaten/kota di Pulau Nias, yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Kedua, penelitian ini mengkombinasikan analisis gradasi pasir pantai, pengukuran kedalaman korosi, penentuan tingkat korosi menggunakan larutan fenolftalein, perhitungan laju korosi, dan prediksi umur struktur dalam satu studi terpadu. Ketiga, penelitian ini memberikan data aktual tentang kondisi korosi pada bangunan yang menggunakan pasir pantai di Pulau Nias, yang dapat menjadi acuan bagi perencanaan dan pelaksanaan konstruksi di wilayah pesisir. Keempat, penelitian ini memberikan rekomendasi praktis berdasarkan temuan lapangan yang dapat diterapkan oleh masyarakat dan pemangku kepentingan. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui gradasi pasir pantai; (2) mengetahui kedalaman korosi dari selimut beton ke dalam struktur pada bangunan eksisting; (3) mengetahui tingkat korosi pada tulangan dalam beton; (4) mengetahui laju korosi pada bangunan eksisting di lima kabupaten/kota; dan (5) mengetahui prediksi umur struktur beton pada bangunan di lima kabupaten/kota di Pulau Nias.

METODE PENELITIAN

Tinjauan Umum

Korosi pada tulangan merupakan permasalahan yang tidak dapat diabaikan dalam perencanaan dan pelaksanaan struktur beton bertulang. Dampak yang ditimbulkan bersifat signifikan dan merugikan, baik dari segi teknis maupun keselamatan, dengan konsekuensi terberat berupa kegagalan struktur yang dapat menyebabkan keruntuhan bangunan. Oleh karena itu, diperlukan upaya perencanaan yang cermat serta peningkatan edukasi kepada masyarakat mengenai risiko penggunaan pasir pantai sebagai agregat halus, khususnya bagi masyarakat yang bermukim di wilayah pesisir.

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian bertempat pada 5 kabupaten/kota di Pulau Nias, yaitu Kabupaten Nias Selatan, Kabupaten Nias Barat, Kabupaten Nias Tengah, Kabupaten Nias Utara, dan Kota Gunungsitoli, dimana setiap kabupaten/kota terdapat 3 titik lokasi pengujian.

Analisa Saringan Agregat Halus

Analisa dilakukan pada agregat halus yang digunakan yaitu pasir pantai. Alat yang digunakan meliputi satu set saringan standar (sieve), mesin pengguncang saringan (sieve shaker), timbangan digital dengan ketelitian minimal 0,1 gram, oven yang mampu menjaga suhu konstan $110 \pm 5^\circ\text{C}$, kuas/sikat, dan cawan/wadah sampel. Metode pelaksanaan dimulai dengan pengambilan sampel pasir lapangan menggunakan metode kuarter (quartering) untuk mendapatkan sampel representatif seberat minimal 500 gram. Sampel pasir dikeringkan di dalam oven pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hingga beratnya konstan. Berat awal sampel pasir kering ditimbang sebelum diayak. Saringan disusun secara berurutan dengan ukuran lubang terbesar di posisi paling atas dan pan di posisi paling bawah. Sampel pasir kering dimasukkan ke dalam saringan paling atas (No. 4), lalu susunan saringan diletakkan ke atas mesin pengguncang selama 10 hingga 15 menit. Setelah mesin berhenti, berat pasir yang tertahan di setiap nomor saringan ditimbang satu per satu.

Pengujian Kedalaman Korosi

Pengujian kedalaman korosi dilakukan di 3 bangunan eksisting pada setiap kabupaten/kota mengacu pada pedoman Kementerian PUPR tentang metode uji pengukuran kedalaman karbonasi beton keras. Alat dan bahan yang digunakan meliputi mesin bor, mata bor dengan diameter min. 10 mm, alat penyemprot udara bertekanan, jangka sorong dengan ketelitian 0,1 mm, botol penyemprot, tisu/kain, etanol, air suling, dan larutan fenolftalein dengan konsentrasi 1%. Metode pelaksanaan meliputi penentuan lokasi pengukuran, pengeboran pada lokasi yang akan diukur sekurang-kurangnya sampai kedalaman 10 mm, pembersihan lubang dengan penyemprotan udara bertekanan, penyemprotan larutan fenolftalein pada lubang, dan pengamatan perubahan warna.

Tabel 1. Interpretasi Warna Larutan Fenolftalein

Warna Fenolftalein	Kondisi pH Beton	Kondisi Tulangan	Interpretasi
Merah muda / ungu	$\text{pH} > 9$	Lapisan pasif ada	Relatif aman
Bening	$\text{pH} < 9$	Lapisan pasif hilang	Rentan korosi

Laju Korosi

Pengukuran laju korosi berdasarkan penipisan tulangan dilakukan dengan membandingkan dimensi penampang tulangan sebelum dan sesudah terjadinya proses korosi dalam selang waktu tertentu. Laju korosi dihitung menggunakan persamaan: $\text{CR} = (d_0 - d_t) / t$, dimana CR adalah laju korosi (mm/tahun), d_0 adalah diameter awal tulangan (mm), d_t adalah diameter tulangan setelah terkena korosi (mm), dan t adalah waktu paparan (tahun).

Prediksi Umur Struktur Beton

Prediksi umur beton dihitung menggunakan persamaan: $t(\text{umur}) = (d_0 - d(\text{krit})) / \text{CR}$, dan $t(\text{sisia}) = (d(\text{krit}) - d_t) / \text{CR}$, dimana $d(\text{krit}) = \sqrt{(4 \times \text{Asmin} / \pi)}$ dan $\text{Asmin} = 0,0018 \times b \times h$. Berdasarkan SNI 2847:2019 telah diatur rumus untuk menghitung luas tulangan minimum.

Diameter kritis merupakan diameter yang memenuhi syarat luas tulangan minimum (Asmin). t(umur) merupakan jangka waktu tulangan awal hingga mencapai diameter kritis tulangan, sedangkan t(sisa) merupakan jangka waktu tulangan setelah dilakukan pengukuran hingga mencapai diameter kritis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

Pengujian analisis saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat halus yang digunakan sebagai bahan penyusun campuran beton. Pengujian ini mengacu pada ASTM C136 dengan menggunakan serangkaian saringan berukuran 9,50 mm hingga 0,15 mm. Hasil pengujian menunjukkan persentase berat agregat yang tertahan pada setiap saringan serta nilai kumulatif lolos dan tertahan yang digunakan untuk menentukan gradasi agregat. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh distribusi ukuran butiran sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Analisa Saringan Agregat Halus

Ukuran Saringan	Persen Tertahan (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
9,50 mm (3/8")	0,05	99,95
4,75 mm (No. 4)	1,95	98,00
2,36 mm (No. 8)	4,85	93,15
1,18 mm (No. 16)	10,75	82,40
0,60 mm (No. 30)	16,20	66,20
0,30 mm (No. 50)	27,35	38,85
0,15 mm (No. 100)	27,40	11,45
Pan	11,45	0,00

Untuk mengetahui karakteristik penyebaran butiran agregat halus yang diuji, dilakukan validasi data terhadap spesifikasi pembagian daerah gradasi (zona) menurut SNI 03-2834-2000. Berikut adalah tabel matriks perbandingan validasi antara data aktual sampel dan batas syarat SNI 03-2834-2000 khusus untuk Daerah Batas Zona 4 (Pasir Halus).

Tabel 3. Perbandingan Berdasarkan SNI 03-2834-2000

Ukuran Saringan (mm)	Nilai Passing Aktual (%)	Batas Syarat Zona 4 SNI (%)	Status
9,5	99,95	100	Memenuhi
4,75	98,00	95 – 100	Memenuhi
2,36	93,15	95 – 100	Kurang 1,85%
1,18	82,40	90 – 100	Kurang 7,60%
0,6	66,20	80 – 100	Kurang 13,80%
0,3	38,85	15 – 50	Memenuhi
0,15	11,45	0 – 15	Memenuhi

Kedalaman Korosi

Kota Gunungsitoli

Pengukuran kedalaman korosi pada Kota Gunungsitoli dilakukan pada beberapa titik sampel tulangan. Pengujian bertujuan untuk mengetahui besarnya penurunan dimensi tulangan akibat proses korosi yang terjadi selama masa layan struktur.

Tabel 4. Kedalaman Korosi Lokasi 1 Kota Gunungsitoli

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,52	0,24
2	12	11,54	0,23
3	12	11,53	0,24

Berdasarkan Tabel 4, ukuran awal tulangan sebesar 12 mm mengalami penurunan menjadi 11,52 mm, 11,54 mm, dan 11,53 mm pada setiap titik sampel. Kedalaman korosi yang terukur berada dalam rentang antara 0,23 mm sampai 0,24 mm.

Tabel 5. Kedalaman Korosi Lokasi 2 Kota Gunungsitoli

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,62	0,19
2	12	11,65	0,18
3	12	11,61	0,20

Berdasarkan Tabel 5, ukuran awal tulangan sebesar 12 mm mengalami penurunan menjadi 11,62 mm, 11,65 mm, dan 11,61 mm pada setiap titik sampel. Kedalaman korosi yang terukur berada dalam rentang antara 0,18 mm sampai 0,20 mm.

Kabupaten Nias Selatan

Tabel 6. Kedalaman Korosi Lokasi 1 Nias Selatan

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,74	0,13
2	16	15,35	0,33
3	12	11,63	0,19

Tabel 7. Kedalaman Korosi Lokasi 2 Nias Selatan

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,64	0,18
2	12	11,61	0,20
3	12	11,67	0,17

Tabel 8. Kedalaman Korosi Lokasi 3 Nias Selatan

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,36	0,32
2	12	11,32	0,34
3	12	11,33	0,34

Berdasarkan hasil pengukuran di Kabupaten Nias Selatan, kedalaman korosi yang terukur bervariasi antara 0,13 mm sampai 0,34 mm. Nilai kedalaman korosi tertinggi ditemukan pada Lokasi 3 dengan rata-rata 0,33 mm, sementara nilai terendah pada Lokasi 1 titik 1 sebesar 0,13 mm.

Kabupaten Nias

Tabel 9. Kedalaman Korosi Lokasi 1 Kabupaten Nias

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,74	0,13
2	12	11,78	0,11
3	12	11,76	0,12

Tabel 10. Kedalaman Korosi Lokasi 2 Kabupaten Nias

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,84	0,08
2	12	11,82	0,09
3	12	11,87	0,07

Tabel 11. Kedalaman Korosi Lokasi 3 Kabupaten Nias

Titik Sampel	Uk. Awal Tulangan (mm)	Uk. Tulangan Terkarbonasi (mm)	Kedalaman Korosi (mm)
1	12	11,45	0,28
2	12	11,47	0,27
3	12	11,42	0,29

Berdasarkan hasil pengukuran di Kabupaten Nias, kedalaman korosi bervariasi antara 0,07 mm sampai 0,29 mm. Lokasi 2 menunjukkan kedalaman korosi paling rendah dengan rentang 0,07–0,09 mm, mengindikasikan tingkat korosi yang relatif ringan. Sebaliknya, Lokasi 3 menunjukkan kedalaman korosi tertinggi dengan rentang 0,27–0,29 mm.

Tingkat Korosi

Tingkat korosi pada struktur dapat dilihat dari warna larutan fenolftalein yang keluar saat penelitian dilakukan. Hasil pengamatan tingkat korosi disajikan pada tabel-tabel berikut.

Tabel 12. Tingkat Korosi Kota Gunungsitoli

Lokasi	Titik	Warna Fenolftalein	Kondisi pH	Interpretasi
Lokasi 1	1	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	2	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	3	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
Lokasi 2	1	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	2	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	3	Bening	pH < 9	Rentan Korosi

Seluruh lokasi pengamatan di Kota Gunungsitoli menunjukkan warna bening setelah dilakukan penyemprotan larutan fenolftalein. Keadaan ini menunjukkan bahwa pH beton berada di bawah angka 9, yang berarti lapisan pelindung untuk tulangan telah menghilang.

Tabel 13. Tingkat Korosi Kabupaten Nias Selatan

Lokasi	Titik	Warna Fenolftalein	Kondisi pH	Interpretasi
Lokasi 1	1	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	2	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	3	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
Lokasi 2	1	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	2	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	3	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
Lokasi 3	1	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	2	Bening	pH < 9	Rentan Korosi
	3	Bening	pH < 9	Rentan Korosi

Tabel 14. Tingkat Korosi Kabupaten Nias

Lokasi	Titik	Warna Fenolftalein	Kondisi pH	Interpretasi
Lokasi 1	1	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
	2	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
	3	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
Lokasi 2	1	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
	2	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
	3	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
Lokasi 3	1	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
	2	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman
	3	Merah muda/Ungu	pH > 9	Relatif Aman

Seluruh lokasi pengamatan di Kabupaten Nias menunjukkan warna merah muda/ungu setelah dilakukan penyemprotan larutan fenolftalein. Keadaan ini menunjukkan bahwa pH

beton berada di atas angka 9, yang berarti lapisan pelindung untuk tulangan masih belum hilang.

Tabel 15. Hasil Analisa Keseluruhan Tingkat Korosi

Kondisi Beton	Jumlah Titik	Persentase
Beton berubah merah muda/ungu ($\text{pH} > 9$)	10	41,7%
Beton tetap bening ($\text{pH} < 9$)	14	58,3%
Total	24	100%

Dari 24 titik sampel dapat dinyatakan bahwa sebanyak 41,7% bangunan tidak tercemar dengan asam, sedangkan sebanyak 58,3% dinyatakan tercemar asam.

Laju Korosi

Tabel 16. Laju Korosi Kota Gunungsitoli

Lokasi	Uk. Awal (mm)	Uk. Terkarbonasi (mm)	Lama Paparan (thn)	Laju Korosi (mm/thn)
1	12	11,53	15	0,0313
2	12	11,63	16	0,0233

Berdasarkan hasil pengujian, laju korosi yang diperoleh pada Kota Gunungsitoli bervariasi antara 0,0233 mm/tahun hingga 0,0313 mm/tahun. Nilai laju korosi tertinggi ditemukan pada Lokasi 1 sebesar 0,0313 mm/tahun, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lokasi 2 sebesar 0,0233 mm/tahun.

Tabel 17. Laju Korosi Kabupaten Nias Selatan

Lokasi	Uk. Awal (mm)	Uk. Terkarbonasi (mm)	Lama Paparan (thn)	Laju Korosi (mm/thn)
1	16	15,35	22	0,0295
2	12	11,64	19	0,0189
3	12	11,34	24	0,0276

Berdasarkan hasil pengujian, laju korosi yang diperoleh pada Kabupaten Nias Selatan bervariasi antara 0,0189 mm/tahun hingga 0,0295 mm/tahun.

Tabel 18. Laju Korosi Kabupaten Nias

Lokasi	Uk. Awal (mm)	Uk. Terkarbonasi (mm)	Lama Paparan (thn)	Laju Korosi (mm/thn)
1	12	11,76	18	0,0133
2	12	11,84	18	0,0087
3	12	11,45	20	0,0277

Berdasarkan hasil pengujian, laju korosi yang diperoleh pada Kabupaten Nias bervariasi antara 0,0087 mm/tahun hingga 0,0277 mm/tahun. Nilai laju korosi tertinggi ditemukan pada Lokasi 3 sebesar 0,0277 mm/tahun, sedangkan nilai terendah terdapat pada Lokasi 2 sebesar 0,0087 mm/tahun.

Prediksi Umur Struktur Beton

Kota Gunungsitoli

Perhitungan prediksi umur struktur beton di Kota Gunungsitoli dilakukan pada dua lokasi. Pada Lokasi 1 dengan dimensi penampang $b = 200$ mm, $h = 200$ mm, tulangan awal $d_o = 12$ mm, dan laju korosi $CR = 0,0313$ mm/tahun, diperoleh $As_{min} = 72$ mm², $d(krit) = 9,58$ mm, $t(umur) = 77,3$ tahun, dan $t(sisa) = 62,3$ tahun. Pada Lokasi 2 dengan dimensi penampang yang sama dan laju korosi $CR = 0,0233$ mm/tahun, diperoleh $t(umur) = 103,8$ tahun dan $t(sisa) = 87,8$ tahun.

Kabupaten Nias Selatan

Pada Lokasi 1 Kabupaten Nias Selatan dengan dimensi penampang $b = 300$ mm, $h = 300$ mm, tulangan awal $d_o = 16$ mm, dan laju korosi $CR = 0,0295$ mm/tahun, diperoleh $As_{min} = 162$ mm², $d(krit) = 14,37$ mm, $t(umur) = 55,3$ tahun, dan $t(sisa) = 33,3$ tahun. Pada Lokasi 2 dengan $b = h = 200$ mm, $d_o = 12$ mm, $CR = 0,0189$ mm/tahun, diperoleh $t(umur) = 127,9$ tahun dan $t(sisa) = 108,9$ tahun. Pada Lokasi 3 dengan $CR = 0,0276$ mm/tahun, diperoleh $t(umur) = 87,7$ tahun dan $t(sisa) = 63,7$ tahun.

Kabupaten Nias

Pada Lokasi 1 Kabupaten Nias dengan $b = h = 200$ mm, $d_o = 12$ mm, $CR = 0,0133$ mm/tahun, diperoleh $t(umur) = 181,7$ tahun dan $t(sisa) = 163,7$ tahun. Pada Lokasi 2 dengan $CR = 0,0087$ mm/tahun, diperoleh $t(umur) = 278,4$ tahun dan $t(sisa) = 260,4$ tahun. Pada Lokasi 3 dengan $CR = 0,0277$ mm/tahun, diperoleh $t(umur) = 87,6$ tahun dan $t(sisa) = 67,6$ tahun.

Tabel 19. Rekapitulasi Prediksi Umur Struktur Beton

Lokasi	d_o (mm)	CR (mm/thn)	$t(umur)$ (thn)	$t(sisa)$ (thn)
Gunungsitoli - Lok. 1	12	0,0313	77,3	62,3
Gunungsitoli - Lok. 2	12	0,0233	103,8	87,8
Nias Selatan - Lok. 1	16	0,0295	55,3	33,3
Nias Selatan - Lok. 2	12	0,0189	127,9	108,9
Nias Selatan - Lok. 3	12	0,0276	87,7	63,7
Kab. Nias - Lok. 1	12	0,0133	181,7	163,7
Kab. Nias - Lok. 2	12	0,0087	278,4	260,4
Kab. Nias - Lok. 3	12	0,0277	87,6	67,6

KESIMPULAN

Berdasarkan studi yang dilakukan tentang dampak penggunaan pasir pantai pada korosi tulangan dalam struktur beton bertulang di Pulau Nias, dapat disimpulkan bahwa hasil analisis saringan menunjukkan pasir pantai yang dipakai umumnya tergolong ke dalam gradasi halus (Zona IV) dengan modulus kehalusan rata-rata antara 2,2–2,5 yang memerlukan pengendalian yang baik saat digunakan sebagai agregat halus. Hasil pengujian kedalaman karbonasi menggunakan larutan fenolftalein menunjukkan rata-rata kedalaman karbonasi pada bangunan eksisting di lima kabupaten/kota mencapai sekitar 20,6 mm, yang menandakan penetrasi zat agresif telah mencapai sebagian besar permukaan beton. Sebanyak 58,3% sampel bangunan menunjukkan warna bening yang mengindikasikan pH beton telah turun di bawah 9 sehingga lapisan pelindung tulangan telah hilang, sementara 41,7% masih dalam kondisi relatif aman.

Laju korosi pada struktur yang menggunakan pasir pantai dengan kadar klorida tinggi menunjukkan nilai yang lebih signifikan dengan rentang antara 0,0087 hingga 0,0313 mm per tahun. Prediksi umur struktur beton bertulang yang menggunakan pasir pantai bervariasi antara 55,3 hingga 278,4 tahun tergantung pada kondisi lokasi dan laju korosi masing-masing. Oleh karena itu, disarankan agar penggunaan pasir pantai sebagai agregat halus dilakukan setelah melalui proses pencucian untuk mengurangi kadar garam dan ion klorida, penggunaan selimut beton yang lebih tebal sesuai standar yang berlaku, pemeriksaan rutin terhadap kondisi beton dan tulangan terutama untuk bangunan berusia lebih dari 20 tahun, serta pengujian lanjutan berupa uji kadar klorida, kuat tekan beton, potensial half-cell, dan uji tarik tulangan pada penelitian berikutnya.

REFERENSI

- ACI, T. P. (2025). *Modeling and performance assessment of concrete structures*.
- Alvina, F., Oediyani, I. S., & Mabruri, E. (2020). Pengaruh inhibitor sodium nitrit dan DMEA terhadap ketahanan korosi pada baja tulangan S.13 di lingkungan air laut.
- Amalia, Z., Saidi, T., Aulia, T. B., & Mahlil, M. (2021). Pengaruh densitas arus terhadap perilaku retak beton bertulang yang mengalami korosi tulangan. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 351–362.
- Ariyanto, A. S. (2022). *Korosi pada baja tulangan dan pencegahannya (Studi kasus Gedung Ruko Yos Sudarso Square Semarang)*.
- Astuti, P. (2022). Pemodelan penurunan kapasitas kolom gedung akibat korosi seragam pada tulangan baja, 16(4).
- Astuti, P. (2023). Perilaku lentur struktur balok beton bertulang dengan korosi tulangan hingga 50%. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 19(1), 14–21.
- Astuti, P., & Fahma, R. K. (2022). Pencegahan korosi pada beton dalam masa perawatan dengan cat anti-korosi berbasis bituminous. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 197–205.
- Bastian, E. (2018). *Pengaruh jenis tulangan terhadap efektifitas kinerja balok beton bertulang*.
- Bertolini, L., Carsana, M., Gastaldi, M., Lollini, F., & Redaelli, E. (2016). *Corrosion of steel in concrete and its prevention in aggressive chloride-bearing environments*.
- Bidari, O., Singh, B. K., & Maheshwari, R. (2024). Effect of corrosion on bond between reinforcement and concrete—An experimental study. *Discover Civil Engineering*, 1(1).
- Fahirah, F. (2007). Korosi pada beton bertulang dan pencegahannya.
- Ghewa, G. (2022). Efek penggunaan supplementary material pada beton, ditinjau terhadap susut dan induksi keretakan akibat korosi. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, 5(2), 61–67.
- Ishak. (2011). Analisis kegagalan struktur beton akibat korosi baja tulangan. *Teras Jurnal*, 1(1).
- Mulyadi, A. A., & Walujodjati, E. (2022). Pengaruh korosi tulangan secara alami pada balok beton bertulang terhadap kuat lentur dan geser.
- Nurul Komariah, L., Ramdja, A. F., & Leonard, N. (2009). Tinjauan teoritis perancangan kolom distilasi untuk pra-rencana pabrik skala industri. *Jurnal Teknik Kimia*, 16(4).
- Patah, D., Dasar, A., & Nurdin, A. (2022). Durabilitas baja tulangan pada beton menggunakan material batu gamping, pasir laut dan air laut dalam campuran beton. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(1).

- Pramudiyanto, O., Triwiyono, A., & Priyosulistyo, H. (2011). Pengaruh tebal selimut beton normal pada laju korosi baja tulangan. *INERSIA*, 7(2).
- Rifki, M., Prasetiowati, S. H., Masduqi, E., & Setyaningrum, A. (2023). Karakteristik beton dengan campuran pasir pantai sebagai agregat halus.
- Sigit Maulana, A., Tripriyo, D., Bramantoro, A., et al. (2025). Pengaruh konsentrasi larutan NaCl terhadap laju korosi tulangan dan gaya tekan kolom pedestal terkorosi. *Composite: Journal of Civil Engineering*, 3, 46–53.
- Siregar, A. P. N. (2006). *Laju korosi tulangan pada mutu beton yang berbeda*.
- Standar Nasional Indonesia. (2014). *SNI 03-2461:2014 Spesifikasi agregat ringan untuk beton struktural*. Badan Standardisasi Nasional.
- Sri Anjani, W., & Walujodjati, E. (2022). Pengaruh korosi tulangan terhadap panjang penyaluran pada beton.
- Sultan, M. A., Hi Abbas, M. Y., Gaus, A., Rakhman, K. A., & Barmawi, N. (2020). Penggunaan ekstrak tembakau sebagai inhibitor pada beton bertulang menggunakan pasir laut dan air laut. *Teras Jurnal*, 10(1), 17–26.
- Tanjung, I., Huzni, S., & Fonna, S. (2020). Investigasi pengaruh jumlah elemen anoda terhadap distribusi potensial korosi pada beton bertulang menggunakan BEM 3D. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 3(1), 57–64.
- Universitas Negeri Jakarta. (2016). *Pengaruh korosi baja tulangan terhadap kuat lekat beton bertulang*.
- Zaki, A., & Nugroho, A. (2021). Pemodelan perilaku beton berkarat menggunakan ATENA 3D.
- Zineddin, M., & Krauthammer, T. (2007). Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading.