



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

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

Vol. 4 No. 4 (2025) pp: 1767-1773

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

Studi Komparatif Kondisi Geoteknik dan Respon Seismik Lokal untuk Perencanaan Pondasi Radar Cuaca S-Band di Wilayah Kepulauan Riau

Muhamad Habibi^{1*}, Sigit Pramono², Hanif Andi Nugraha², Ardian Yudhi Octantyo², Oriza Sativa²,
Tumpal Gultom¹, Maulana Putra²

¹ Program Profesi Insinyur, Institut Teknologi PLN Jakarta

² Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika

*E-mail: mhabibi@itpln.ac.id

Abstrak

Kondisi geoteknik dan karakteristik seismik lokal menjadi faktor penting dalam menentukan desain pondasi bangunan radar cuaca. Kajian ini membandingkan dua lokasi pembangunan radar cuaca S-Band di Kepulauan Riau—Natuna dan Tanjung Pinang—yang memiliki perbedaan geotektonik dan komposisi tanah. Penelitian ini bertujuan menganalisis hubungan antara parameter geoteknik (CPT dan SPT) dan parameter seismik (MASW dan SPAC) untuk rekomendasi pondasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa Natuna memiliki lapisan tanah lebih kaku dan kedalaman lapisan keras yang lebih dangkal dibanding Tanjung Pinang. Temuan utama menunjukkan bahwa amplifikasi percepatan tanah di Tanjung Pinang ($\approx 1,6$ kali) lebih tinggi dibanding Natuna ($\approx 1,16$ kali), menandakan kerentanan seismik yang lebih besar, sehingga risiko penguatan gelombang gempa lebih dominan pada lokasi tersebut. Implikasi teknis penelitian ini menunjukkan bahwa kedua lokasi direkomendasikan menggunakan pondasi tiang, namun Tanjung Pinang memerlukan kedalaman dan kapasitas tiang yang lebih besar agar beban struktur dapat dialirkan ke lapisan keras serta meminimalkan dampak amplifikasi seismik. Dengan demikian, kajian ini tidak hanya memberikan rekomendasi desain pondasi, tetapi juga mendukung penyusunan standar teknis pembangunan radar cuaca di wilayah rawan gempa. Secara keseluruhan, kajian ini memberikan landasan teknis bagi BMKG dalam pengembangan jaringan radar cuaca yang lebih aman, efisien, dan sesuai karakteristik geologi wilayah kepulauan.

Kata kunci: geoteknik, mikrozonasi, radar cuaca

1. Latar Belakang

Radar cuaca merupakan infrastruktur utama dalam sistem observasi atmosfer modern yang dimiliki BMKG (Anwar Syaefudin et al., 2021; Putra et al., 2024). Kinerja radar cuaca tidak hanya ditentukan oleh kualitas sensor dan sistem elektroniknya, tetapi juga sangat bergantung pada kondisi tapak dan struktur pendukungnya (Putra et al., 2025). Bangunan radar, yang terdiri atas menara dan kubah pelindung (radome), memerlukan perencanaan geoteknik dan desain pondasi yang presisi agar mampu menahan beban dinamik serta pengaruh guncangan gempa. Oleh karena itu, pemahaman mengenai kondisi tanah dan karakteristik seismik di lokasi pembangunan gedung radar menjadi hal yang esensial untuk menjamin keamanan struktur dan keberlangsungan operasional sistem radar cuaca.

Rencana pembangunan radar cuaca S-Band di Natuna dan Tanjung Pinang merupakan bagian dari upaya penguatan jaringan observasi meteorologi nasional yang dikelola oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) (Putra, 2025). Kedua lokasi tersebut memiliki kondisi geotektonik yang berbeda meskipun sama-sama berada di wilayah pesisir, sehingga diperlukan analisis geoteknik dan seismik sebelum menentukan desain pondasi. Tanpa adanya kajian mikrozonasi dan karakterisasi tanah secara detail, perencanaan struktur berpotensi menghadapi risiko penurunan tanah (settlement) maupun amplifikasi getaran gempa (Molina et al., 2023; Vessia et al., 2021). Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting sebagai dasar teknis dan ilmiah dalam perencanaan pondasi radar cuaca S-Band.

Pengukuran data geoteknik dan parameter seismik telah banyak diterapkan dalam analisis tapak bangunan infrastruktur (Fida Ismaili & Asyifa, 2022; Novtrisa et al., 2025; Prayogo & Saptowati, 2016). Namun, kajian serupa belum pernah diterapkan secara khusus pada tapak bangunan gedung radar cuaca S-Band di Kepulauan

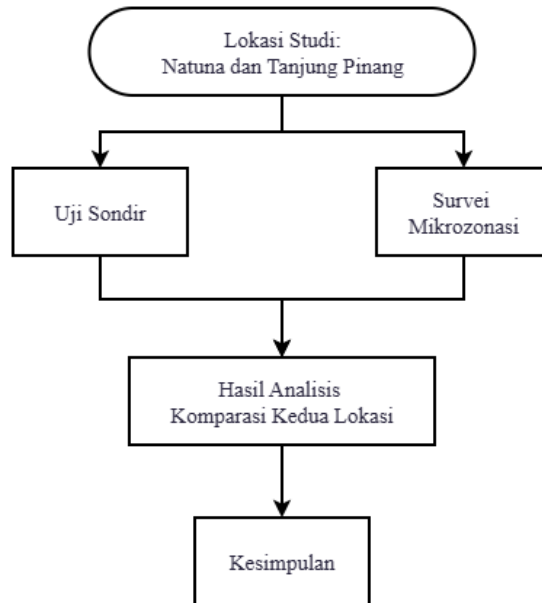
Riau, yang menjadi proyek pertama di Indonesia dalam pengembangan sistem radar nasional. Kajian integrasi parameter geoteknik dan parameter seismik juga telah dikembangkan untuk mendukung analisis tapak bangunan tahan gempa, termasuk struktur radar cuaca S-Band (Putra et al., 2025). Namun, pendekatan yang bersifat komparatif untuk membandingkan karakteristik kedua parameter tersebut pada lokasi dengan kondisi geologi berbeda namun masih dalam satu kawasan, seperti Natuna dan Tanjung Pinang, sejauh ini belum dilakukan. Sebagian penelitian sebelumnya cenderung meninjau aspek geoteknik atau seismik secara terpisah, sehingga keterkaitan kuantitatif antar parameter tersebut belum tergambar secara utuh. Kondisi ini menunjukkan adanya ruang pengembangan pendekatan analisis yang lebih komprehensif untuk memahami local site condition secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengintegrasikan hasil uji geoteknik dan mikrozonasi secara komprehensif untuk mendukung desain struktur radar yang kokoh dan aman.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kondisi geoteknik serta respons seismik lokal pada tapak pembangunan radar cuaca S-Band di Natuna dan Tanjung Pinang sebagai dasar penentuan desain pondasi yang aman, efisien, dan sesuai karakteristik geologi masing-masing wilayah. Melalui pendekatan komparatif, penelitian ini mengintegrasikan hasil uji geoteknik melalui Cone Penetration Test (CPT) dan Standard Penetration Test (SPT) untuk memperoleh parameter tahanan konus (q_c) dan nilai N-SPT dengan hasil mikrozonasi menggunakan metode Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) dan Spatial Auto-Correlation (SPAC) yang menghasilkan nilai rata-rata kecepatan gelombang geser 30 meter teratas (V_{s30}) dan PGA. Integrasi kedua kelompok data ini memungkinkan perumusan rekomendasi pondasi berdasarkan standar ketahanan gempa nasional. Secara ilmiah, penelitian ini memperkaya literatur nasional dengan memperkenalkan pendekatan integratif geoteknik–seismik untuk karakterisasi tapak struktur berisiko tinggi, sementara secara praktis, hasilnya menjadi acuan bagi BMKG dalam desain pondasi radar cuaca S-Band pertama di Indonesia, guna memastikan keamanan struktur, efisiensi biaya, serta keberlanjutan operasional di wilayah kepulauan.

2. Metode Penelitian

Kajian ini merupakan studi komparatif yang dilakukan di dua lokasi, yaitu Natuna dengan koordinat 3.9598° LU; 108.3863° BT dan Tanjung Pinang dengan koordinat 0.9189° LU; 104.5208° BT, dalam rangka mendukung pembangunan radar cuaca S-Band. Kedua lokasi ini dipilih untuk mewakili kondisi geotektonik yang berbeda di wilayah Kepulauan Riau, sehingga hasil kajian dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai karakteristik tanah dan perilaku seismik lokal pada masing-masing area.

Alur penelitian dimulai dengan akuisi data lapangan menggunakan metode mikrozonasi dengan pendekatan MASW dan SPAC, serta uji sondir atau CPT dan boring atau SPT. Hasil dari masing-masing metode kemudian diolah dan dianalisis. Data mikrozonasi digunakan untuk menentukan parameter dinamika tanah, termasuk kecepatan gelombang geser (V_{s30}), serta estimasi engineering bedrock. Sedangkan data sondir atau CPT dan boring atau SPT digunakan untuk memperoleh parameter geoteknik seperti nilai tahanan konus (q_c) dan nilai N-SPT yang merepresentasikan kekuatan dan komposisi tanah pada lokasi pengeboran. Selanjutnya, hasil dari ketiga kelompok data tersebut diintegrasikan secara komparatif untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi tanah lokal (local site condition) di kedua lokasi. Berdasarkan integrasi ini dilakukan klasifikasi situs dan evaluasi bahaya seismik sesuai acuan SNI 1726:2019, menghasilkan zonasi tanah serta nilai percepatan tanah maksimum (PGA) dan faktor amplifikasi. Tahap berikutnya adalah analisis kapasitas tanah dan opsi pondasi, mencakup estimasi kedalaman lapisan keras dan rekomendasi desain pondasi radar yang aman terhadap guncangan gempa. Hasil kedua lokasi kemudian dibandingkan untuk menilai perbedaan karakteristik geotektonik, kekuatan tanah, serta respons seismik, sehingga dapat disusun rekomendasi desain dan strategi konstruksi yang sesuai dengan kondisi geologi masing-masing wilayah guna menjamin keamanan struktur dan keberlanjutan operasional radar cuaca BMKG.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengukuran mikrozonasi dilakukan menggunakan metode MASW dengan bentangan 48 meter dan jarak antar geofon 2 meter untuk menentukan profil kecepatan gelombang geser dangkal ($V_s(z)$) hingga kedalaman sekitar 30 meter, serta metode SPAC dengan konfigurasi array segitiga atau lingkaran multi-radius untuk mengidentifikasi kecepatan gelombang geser dan memperkirakan kedalaman engineering bedrock. Pengujian lapangan mencakup sondir atau CPT yang dilakukan dengan interval pencatatan setiap 10–20 cm hingga mencapai kedalaman target atau kondisi refusal (sekitar ≥ 15 meter), sesuai standar ASTM D5778 (ASTM Internasional, 2020), guna memperoleh parameter (q_c). Selain itu, dilakukan boring atau SPT dan pengujian sesuai standar ASTM D1586 (ASTM International, 2011), disertai pengambilan contoh tanah untuk pengujian laboratorium. Seluruh kegiatan lapangan dilaksanakan dengan sistem kontrol kualitas (QA/QC) yang mencakup kalibrasi peralatan, pengujian ulang pada titik acak, pencatatan koordinat, serta sinkronisasi waktu dan metadata agar hasil pengukuran memiliki ketertelusuran dan konsistensi yang tinggi.

Langkah berikutnya setelah akuisisi dan pengolahan data lapangan adalah klasifikasi jenis tanah berdasarkan parameter hasil mikrozonasi dan uji geoteknik dengan mengacu pada SNI 1726:2019. Proses ini dilakukan dengan membandingkan nilai V_s30 , nilai N-SPT terkoreksi, dan kuat geser niralir (s_u) terhadap kriteria klasifikasi tanah SA hingga SF. Hasil perbandingan tersebut digunakan sebagai dasar penilaian tingkat kekakuan atau kelunakan tanah serta potensi amplifikasi gelombang gempa. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan SNI 1726:2019 disajikan pada Tabel 1. Melalui klasifikasi ini diperoleh informasi penting mengenai karakteristik lapisan bawah permukaan yang selanjutnya digunakan dalam analisis bahaya seismik dan perencanaan pondasi radar cuaca S-Band agar memenuhi standar ketahanan terhadap beban gempa.

Tabel 1. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan SNI 1726:2019 (BSN, 2019)

Kelas Situs	\bar{V}_s (m/detik)	\bar{N} atau \bar{N}_{ch}	\bar{S}_u (kPa)
SA (batuan keras)	> 1500	N/A	N/A
SA (batuan)	750 – 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 – 750	> 50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 – 350	15 – 50	50 – 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50

Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 meter tanah dengan karakteristik sebagai berikut:

1. Indeks plastisitas, $PI > 20$
2. Kadar air, $w \geq 40\%$
3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < 25 \text{ kPa}$

SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik)

Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari katagori berikut:

- Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah.
- Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3 m$).
- Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7,5 m$ dengan indeks plastisitas $PI > 75$).
- Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35 m$ dengan $\bar{S}_u < 50 kPa$.

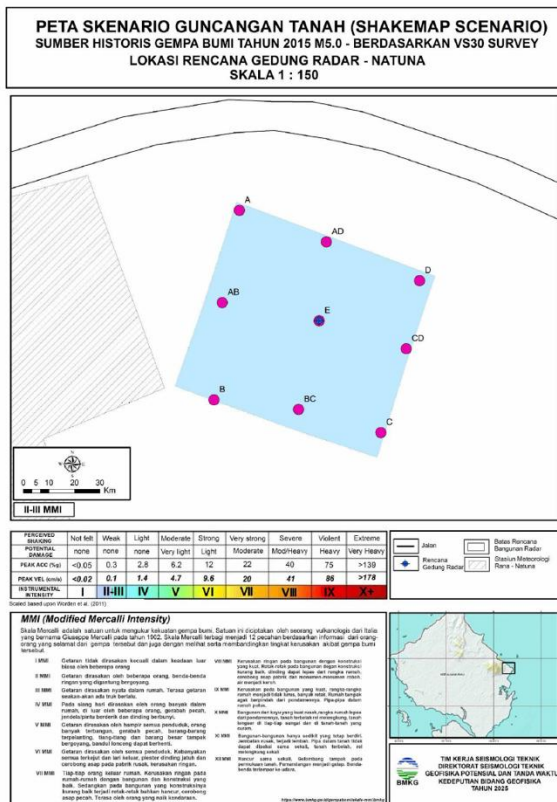
Catatan: N/A = tidak dapat dipakai

3. Hasil dan Diskusi

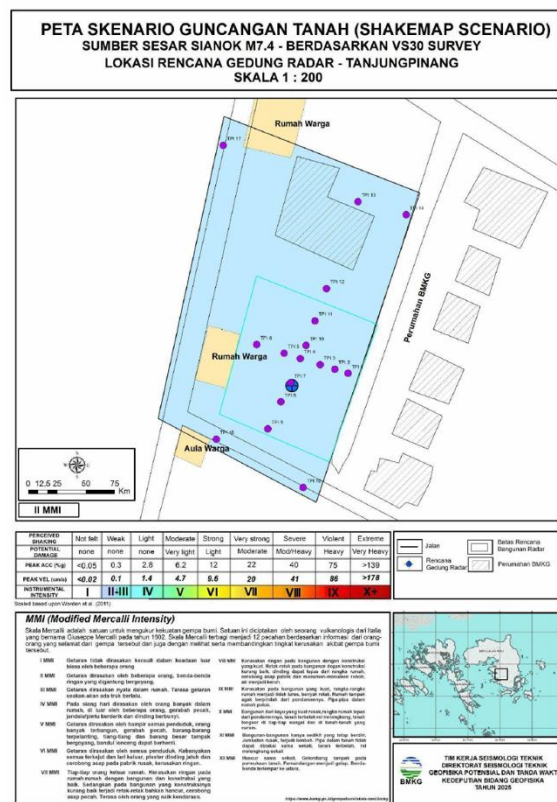
3.1. Hasil

Hasil mikrozonasi kecepatan gelombang geser (V_{s30}) di dua lokasi, yaitu Natuna dan Tanjung Pinang, menunjukkan bahwa keduanya memiliki karakteristik tanah yang homogen, namun dengan kisaran nilai V_{s30} yang berbeda. Di Natuna, nilai V_{s30} berkisar antara 276–320 m/s. Sementara itu, di Tanjung Pinang, nilai V_{s30} berada pada kisaran 175–350 m/s, menunjukkan kondisi homogen namun dengan lapisan tanah yang sedikit lebih lunak secara umum.

Berdasarkan peta bahaya gempa Indonesia, lokasi pembangunan radar cuaca di Natuna dan Tanjung Pinang menunjukkan karakteristik respons seismik yang berbeda. Pada lokasi Natuna, nilai percepatan tanah puncak (PGA) pada batuan dasar relatif lebih rendah dan mengalami amplifikasi terbatas di permukaan tanah. Intensitas guncangan hasil simulasi skenario gempa sekitar II–III MMI, ditunjukkan pada Gambar 2a, mencerminkan tingkat kerentanan seismik yang relatif rendah. Lokasi Tanjung Pinang menunjukkan nilai PGA permukaan yang lebih tinggi akibat faktor amplifikasi lokal yang lebih signifikan, dipengaruhi oleh keberadaan lapisan tanah lunak hingga sedang pada kedalaman dangkal. Simulasi skenario gempa dari beberapa sumber sesar regional menghasilkan intensitas guncangan II MMI di lokasi Tanjung Pinang, dapat dilihat pada Gambar 2b.



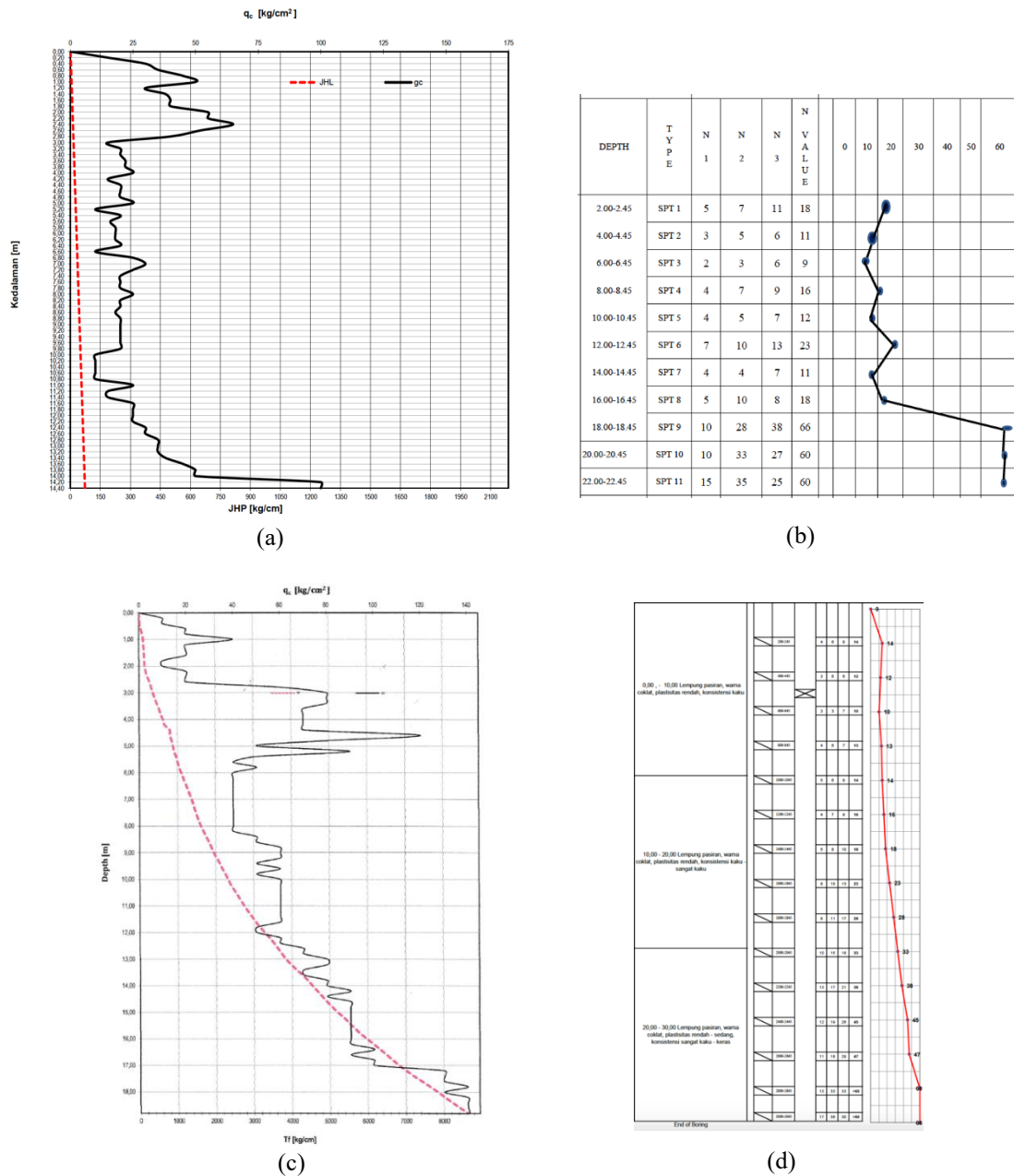
(a)



(b)

Gambar 2. (a) Peta shakemap scenario untuk sumber sesar regional di wilayah rencana pembangunan gedung radar cuaca Natuna. (b) Peta shakemap scenario untuk sumber sesar sianok dan sumpur di wilayah rencana pembangunan gedung radar cuaca Tanjung Pinang.

Hasil pengujian CPT dan SPT menunjukkan adanya perbedaan karakteristik tanah antara Natuna dan Tanjung Pinang. Berdasarkan hasil CPT, nilai tahanan konus (q_c) di Natuna mencapai 100 kg/cm^2 pada kedalaman sekitar 14,4 meter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3a, sedangkan di Tanjung Pinang nilai yang sama baru tercapai pada kedalaman sekitar 17,8 meter, disajikan pada Gambar 3c. Hal ini menunjukkan bahwa konsistensi tanah di Natuna relatif lebih kaku dengan peningkatan daya dukung yang lebih cepat terhadap kedalaman. Sementara itu, hasil uji SPT memperlihatkan bahwa nilai NSPT 60, yang menandakan lapisan tanah padat, ditemukan pada kedalaman sekitar 20 meter di Natuna (Gambar 3b) dan sekitar 30 meter di Tanjung Pinang (Gambar 3d). Secara keseluruhan, kondisi tanah di Natuna menunjukkan kekakuan dan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan Tanjung Pinang, sehingga lapisan keras di Natuna berada pada kedalaman yang lebih dangkal.



Gambar 3. Hasil pengujian lapangan di dua lokasi penelitian: (a) profil Cone Penetration Test (CPT) Natuna, (b) hasil Standard Penetration Test (SPT) Natuna, (c) hasil uji CPT Tanjung Pinang, dan (d) hasil SPT Tanjung Pinang yang menggambarkan perbandingan karakteristik kekakuan serta kedalaman lapisan keras antar lokasi

3.2. Pembahasan

Pada bagian ini disajikan matriks hasil evaluasi parameter utama yang diperoleh dari uji lapangan geoteknik dan seismik di dua lokasi penelitian. Nilai-nilai yang ditampilkan merupakan representasi karakteristik tanah dan respons seismik yang menjadi dasar perbandingan antara Natuna dan Tanjung Pinang. Ringkasan data tersebut disajikan dalam Tabel 2 untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi geoteknik di masing-masing lokasi.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Geoteknik dan Seismik di Lokasi Rencana Pembangunan Radar Cuaca S-Band Natuna dan Tanjung Pinang

Sumber data dan metode	Parameter	Lokasi Natuna	Lokasi Tanjung Pinang	Keterangan
	V _{s30}	276 – 320 m/s	175 – 350 m/s	Kedua lokasi masuk dalam kategori tanah sedang (<i>site class D</i>)
	<i>Engineering bedrock</i>	50,9 meter	42 meter	Lapisan sedimen di Natuna lebih tebal
Mikrozonasi		Batuan Dasar: 0.0068 g	Batuan Dasar: 0.0296 g	
	PGA	Permukaan: 0.011 g Amplifikasi: 1.16 kali	Permukaan: 0.0473 g Amplifikasi: 1.6 kali	Amplifikasi lebih besar di lokasi Tanjung Pinang
Sondir (CPT)	qc	Nilai qc 100 kg/cm ² pada kedalaman tanah 14,4 Meter	Nilai qc 100 kg/cm ² pada kedalaman tanah 17,8 Meter	Konsistensi tanah di Natuna relatif lebih kaku dengan peningkatan tahanan lebih cepat terhadap kedalaman dibanding Tanjung Pinang
Boring (SPT)	N-Value	NSPT 60 pada kedalaman 20 meter	NSPT 60 pada kedalaman 30 meter	Lapisan padat di Natuna berada lebih dangkal dibanding Tanjung Pinang.

Kajian mikrozonasi menghasilkan pemetaan rinci kondisi dinamik tanah berdasarkan hasil pengolahan data metode MASW dan SPAC. Integrasi metode dilakukan dengan menggabungkan sensitivitas dangkal dari MASW (0–30 m) dan kedalaman menengah dari SPAC (hingga >100 m) guna membentuk model kecepatan yang kontinu dari permukaan hingga mencapai engineering bedrock. Secara keseluruhan, hasil mikrozonasi menunjukkan bahwa lapisan sedimen di Natuna sedikit lebih tebal dengan kedalaman engineering bedrock sekitar 50,9 meter, sedangkan di Tanjung Pinang sekitar 42 meter. Dari hasil analisis percepatan puncak tanah (PGA), diperoleh bahwa amplifikasi di Tanjung Pinang lebih besar ($\approx 1,6$ kali) dibanding Natuna ($\approx 1,16$ kali), menandakan karakter tanah yang lebih lunak dan lebih rentan terhadap penguatan gelombang gempa. Temuan ini menjadi dasar dalam perencanaan pondasi untuk struktur radar cuaca S-Band. Kondisi tanah di Natuna dan Tanjung Pinang disarankan menggunakan pondasi tiang (pile foundation) agar beban struktur dapat disalurkan hingga lapisan keras di kedalaman sekitar 20–25 meter. Pondasi tiang di Tanjung Pinang perlu dibuat sedikit lebih dalam untuk menjamin daya dukung dan mengurangi efek amplifikasi getaran tanah.

4. Kesimpulan

Analisis mikrozonasi seismik dan data geoteknik efektif dalam mengungkap variabilitas bawah permukaan yang berpengaruh langsung terhadap respon dinamik tapak radar cuaca S-Band di wilayah Kepulauan Riau. Studi ini menunjukkan bahwa Natuna dan Tanjung Pinang memiliki perilaku geotektonik yang berbeda. Temuan ini memberikan implikasi langsung terhadap perencanaan pondasi gedung radar cuaca, di mana desain struktur perlu disesuaikan secara spesifik terhadap kondisi lokal dengan mempertimbangkan heterogenitas tanah dan tingkat amplifikasi seismik untuk memastikan kestabilan struktur terhadap beban dinamis.

Referensi

1. Anwar Syaefudin, M., Sugiarto, & Putra, M. (2021). Sistem Informasi Monitoring Intensitas Hujan Berdasarkan Citra Radar Cuaca. Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Aplikasinya, 12, 2021.
2. Fida Ismaili, A., & Asyifa, A. (2022). Analysis of Liquefaction Potential Based on SPT and CPT Data in the Yogyakarta International Airport Area. *International Journal of Engineering*, 4(2), 158–164.
3. Molina, S., Garcia-Jerez, A., Hloupis, G., & Oda, Y. (2023). Editorial: Seismic microzonation and risk reduction. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1292265>
4. Novtrisa, I., Mase, L. Z., Refrizon, R., Misliniyati, R., Amri, K., Hadi, A. I., & Fadli, D. I. (2025). Studi Mikrozonasi Kerentanan Seismik dan Bangunan Bertingkat Menggunakan Metode HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) di Kabupaten Bengkulu Selatan. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 21(3), 241. <https://doi.org/10.20527/flux.v21i3.19616>
5. Prayogo, K., & Saptowati, H. (2016). Penyelidikan Struktur dan Karakteristik Tanah untuk Desain Pondasi Iradiator Gamma Kapasitas 2 MCi. *JURNAL PERANGKAT NUKLIR*, 10.
6. Putra, M. (2025). Pengelolaan Barang Milik Negara (BMN) Alat Operasional Utama (Aloptama) Radar Cuaca BMKG. *Jurnal Ilmu Multidisiplin*, 4, 484–493. <https://doi.org/10.38035/jim.v4i2>
7. Putra, M., Romadhon, H. C., Pramono, S., & Nugraha, H. A. (2025). Penggunaan Data Sondir dan Mikrozonasi untuk Interpretasi Parameter Tanah dan Perencanaan Pondasi Gedung Radar Cuaca S-Band. *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business*, 4(3), 5218–5224. <https://doi.org/10.31004/riggs.v4i3.2761>
8. Putra, M., Rosid, M. S., & Handoko, D. (2024). A Review of Rainfall Estimation in Indonesia: Data Sources, Techniques, and Methods. *Signals*, 5(3), 542–561. <https://doi.org/10.3390/signals5030030>
9. BSN. (2019). SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung (p. 1). Badan Standarisasi Nasional. www.bsn.go.id
10. ASTM International. (2011). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1586-11>
11. ASTM Internasional. (2020). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5778-20>
12. Vessia, G., Laurenzano, G., Pagliaroli, A., & Pilz, M. (2021). Seismic site response estimation for microzonation studies promoting the resilience of urban centers. *Engineering Geology*, 284, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106031>