

AIR TAWAR DI PULAU KECIL (TERUMBU KARANG) DAN WILAYAH PESISIR DI INDONESIA : MASALAH DAN ANTISIPASI TERHADAP KENAIKAN MUKA AIR LAUT GLOBAL

Hantoro W.S.¹, Hadiwisastra S.¹, Arsadi E.M.¹, Masduki A.², Susilohadi²,
Latif H.³, Suyatno¹, Kosasih E.¹, Gertz vd B.⁴, Nagtegaal R.⁴

- ¹ Research Center for Geotechnology LIPI, Jl Sangkuriang, Bandung 40135,
hantoro@geotek.lipi.go.id, whantoro@gmail.com, hadiwisastra@geotek.lipi.go.id,
² Research and Development Center for Marine Geology, Dept. of Mining & Energy, Jl
Junjuran, Bandung. s.susilohadi@mgi.esdm.go.id
³ School of Oceanography, Bandung Institute of Technology. Jl ganeca 10 Bandung
hamzah@ppk.itb.ac.id
⁴ Dept. of Geology, Royal Netherland Institute for Sea research (NIOZ), PO Box 59, NL-
1790 AB Den Burg, Texel, The Netherland. nagtegaal@nioz.nl.

ABSTRAK

Pulau-pulau kecil di Indonesia, berdasar genesanya dapat dikelompokkan sebagai pulau vulkanik, tetonik, relik sisa paparan, delta dan pulau terumbu karang. Pengelompokan genesa ini menghasilkan gambaran morfologi pulau-pulau kecil dimana satu dengan yang lain sangat berbeda. Pulau dengan morfologi berbukit dan berpantai curam mencirikan pulau tektonik dan vulkanik, maupun relik paparan, sementara pulau delta dan terumbu karang pada umumnya memiliki morfologi landai dan datar. Demikian halnya dengan kawasan pesisir pulau utama, pada dasarnya dapat dikenali genesanya seperti halnya pada pulau kecil, namun umumnya memiliki paparan luas dataran rendah basah dan atau rawa. Sejumlah pulau kecil dan wilayah pesisir terpilih telah dipelajari genesa dan geologinya dengan berbagai pendekatan untuk mengetahui perubahan lingkungan serta mengenali sifatnya pada keragaman sumberdaya hayati maupun nirhayati, dalam hal ini neraca hidrologi yang sangat tergantung pada kondisi geologi dan meteorologinya. Kajian terutama dilakukan pada pulau dan pesisir berpantai landai dengan sedimen lepas karbonat resen hingga Holosen. Beberapa pengukuran geofisika dan pemboran inti telah dilakukan untuk mengetahui geologi dan keberadaan air tawar di pulau kecil serta pesisir. Geologi di pulau kecil memperlihatkan suatu urutan pengendapan terumbu karang yang mengalami perulangan perubahan muka laut terutama dengan ciri pengendapan seiring kenaikan cepat muka laut sejak zaman es terakhir (14.000 th). Data tersebut juga mengandung ciri dimana gugusan pulau terumbu karang berada pada gejala tektonik penurunan maupun pengangkatan, yang dalam hal ini juga dipertegas oleh data seismik pantul dangkal dari kawasan disekitarnya. Geologi di bagian delta juga memperlihatkan ciri sedimentasi di suatu cekungan dengan gejala penurunan tektonik seiring perubahan muka laut sejak beberapa kali periode ulang muka laut glasial-interglasial (Kuartar Atas). Walau pada sekuen sedimennya terdapat endapan pasir, namun sangat kecil menemukan aquifer air tawar yang memadai untuk pengelolaan berkelanjutan. Memperhatikan skenario pesimistik IPCC mengenai kenaikan muka laut global 1 cm/tahun, maka sebagian besar pesisir dan terutama pulau-pulau kecil sesungguhnya saat ini berada pada ancaman serius dengan berbagai akibatnya. Ancaman tersebut, salah satunya adalah akan menjadi sangat berkurangnya ketersediaan air tawar pulau yang hanya diperoleh dari air meteorik. Naiknya muka air laut akan menaikkan muka air asin di pulau yang di atas mana saat ini bertengger lensa air tawar yang akan segera menipis, yang berdasar pengukuran saat ini mempunyai tebal tidak merata hanya antara 2-4 m. Langkah awal mengatasi masalah ini terutama di pulau terumbu karang karbonat adalah melakukan upaya peningkatan imbuhan air meteorik

dengan injeksi pada akuifer berdasar keadaan geologinya, serta diikuti dengan pengaturan pemakaian air tawar sehingga selalu seimbang neracanya. Di sisi lain perlu diusahakan memperhalus sedimen yang menjadi tempat air tawar terkumpul sehingga dapat menghalangi masuknya air asin dari formasi dibawahnya maupun langsung dari arah samping (pantai) ketika pasang naik paling tinggi. Upaya ini dapat dilakukan dengan penanaman jenis pohon tertentu yang sudah diuji kemampuan dan perilakunya sehingga dapat cepat memberi hasil utama dan sampingan namun juga terhindar dari dampak-dampak negatif antara lain kelebihan evapotranspirasi yang pada akhirnya bahkan dapat mengurangi persediaan air di pulau. Upaya peningkatan kualitas air tawar juga dilakukan dengan pengolahan limbah air keluarga yang luarannya juga diusahakan dikembalikan sebagai bagian dari neraca air tawar pulau kecil-pesisir.

Kata kunci : Pulau kecil, Air tawar

ABSTRACT

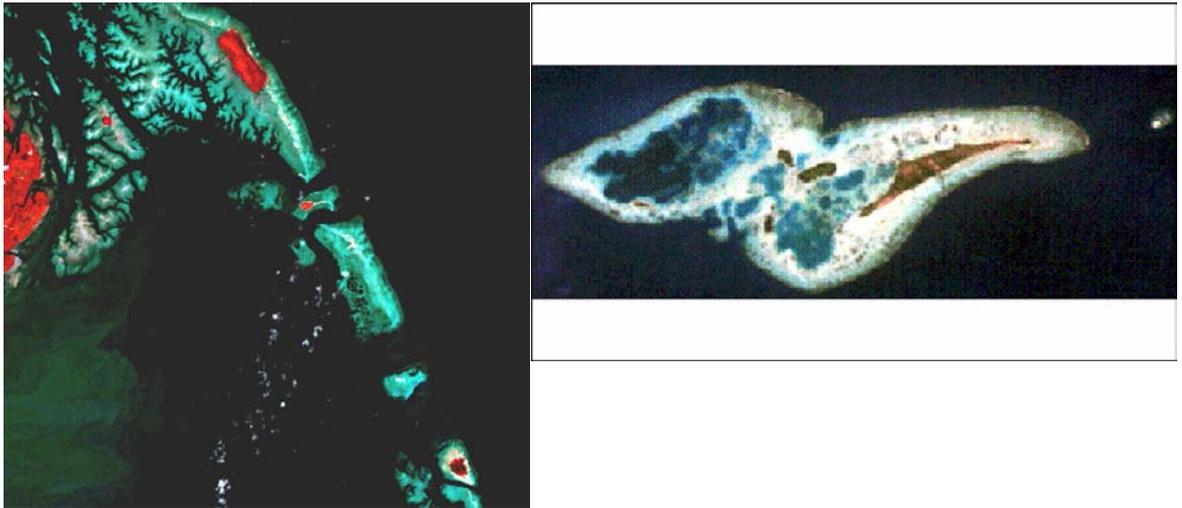
Based on their genetic unit, small islands in Indonesia can be classified as volcanic, tectonic, deltaic, continental relict as well coral reef islands. The genetic clustering gives different morphological appearance. The steep coast and hilly island reflects tectonic and volcanic or continental relict islands, but deltaic and reefal island has the low lying coastal plain. As well as the coastal plain of the main island, which morphological view depends to the genetic unit and usually covered by a large swampy and wetland area. Small islands and coastal plain had been studied on their genetic unit based on several approaches to understand the change of its environment and to know the diversity on its natural resource, as on the hydrological balance that just depends to the geological and meteorological conditions. The study focused on the low lying small island and coastal plain that had been developed from the Holocene and Recent (carbonate) sediment accumulation. Resistivity profiling and sediment core drillings had been conducted to obtain geological and hydrological of fresh water information in the small island and coastal plain. Small reef island shows a carbonate sequence that overlay the fluvial, coastal and shallow marine sediment sequences under the transgression-regression process, which indicates a rapid sea level rise since the last maximum glacial period (14.000 yrs BP). Based on the data, some of the reefs islands are being submerged or emerged, which are supported by seismic profile data. Geology of delta area also shows a similar process, tectonic subsidence as well the relative sea level variation that last since Upper Quaternary. Although a sandy layer in the deltaic sediment sequence was found, the opportunity is very small to find a fresh water aquifer that is sustainable for a long term. Consider the pessimistic of IPCC scenario on the global sea level rise on 1 cm/yr, the lowest lying coastal plain and small islands are under the serious threats. One of the threats is diminishing of fresh water stock, which its input just comes from meteoric water. Sea level rise will be followed by an increasing level of salt water table where the fresh water lay over on its top will decrease soon. From current measurement, the fresh water layer has thickness less than 2 – 4 m. On the small reef island, the first step to overcome the problem is to increase the input through fresh water injection into the substrate of the island based on its geological condition. It must be followed by such regulation to the fresh water management to keep sustain the balance. Fining the grain size of the sediment is necessarily needed to prevent the lateral and vertical salt water encroachment during the maximum spring tide and outflow of the excessive water recharge during the high rainfall. Replant of tested and selected trees that are suitable gives maximum benefit but minimum negative impact to the small island environment. The well management of disposal water treatment should be included to keep a good quality of fresh water. For instance, return it into the cycle of closed hydrological system of the small island.

Keywords : Small island, fresh water

PENDAHULUAN

Walau isu mengenai kenaikan muka laut global hanya menyangkut perubahan dalam besaran mili hingga sentimeter dalam satu tahun, namun bagi wilayah pesisir dan terutama pulau kecil berpantai landai dapat memberi dampak jauh lebih besar.

Sementara ini definisi pulau kecil lebih banyak membuat batasan mengenai ukurannya, sementara ciri umum yang dapat dikenali yaitu yang terpenting adalah terpisahnya ekosistem berikut sumberdayanya dari pulau utama serta dari pulau lainnya. Dalam beberapa hal, tidak sepenuhnya ekosistemnya terpisah bila yang dimaksud adalah lingkungan lautnya, terlebih bila dialasi oleh dasar perairan dangkal. Dalam hal ekosistem daratnya, yang menjadi batas fisik adalah air laut yang mengelilingi pulau, menjadikan sistem air tawar yang ada dipulau tidak mempunyai hubungan terbuka dengan daratan utama. Air tawar hanya berasal dari air meteorik, jatuh setitik demi setitik, meresap dan merembes keluar ketika air telah memenuhi rongga tanah. Keberadaan air tawar hanya ada di permukaan seolah mengapung di atas air asin yang mengisi rongga pori tanah dibagian bawah. Jumlah dan keberadaan air tawar di pulau kecil berada pada keterbatasan yang tergantung oleh banyak hal, antara lain kondisi geologi, bentuk ukuran pulau, kondisi perairan (tinggi pasang surut, arus, dll), hujan serta biota yang menghuninya. Pada keadaan sekarang, manusia menjadi penentu utama pada neraca air tawar di pulau.



Gambar 1. Citra Satelit TM 7 memperlihatkan gugusan pulau terumbu karang di depan estuari Sungai Berau (a) dan (b) Pulau pari di Kepulauan Seribu.

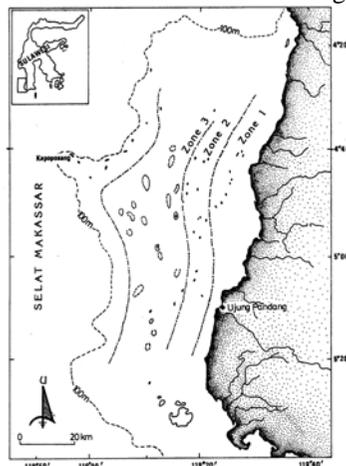
Pulau-pulau kecil yang terserak diberbagai perairan di Indonesia, memperlihatkan keragaman yang dikendalikan terutama oleh bagaimana proses dan pada mandala geologi seperti apa ia terbentuk. Delta dan pulau terumbu karang adalah jenis pulau relatif belum lama terbentuk, dari sekian jenis pulau kecil lainnya. Pembentukan pulau-pulau tersebut erat kaitannya dengan kondisi geologi serta gerak tektonik dan perubahan muka laut yang memberi kendali pada neraca pengendapan sedimen dan pertumbuhan terumbu pembentuk pulau. Genesa pulau kecil sangatlah penting artinya bagi ciri geologi yang pada gilirannya sangat menentukan cara tersimpan dan neraca air tawar pulau. Salah satu unsur penentu neraca air tawar pulau dan wilayah pesisir, yaitu perubahan muka air laut, pada saat ini merebak menjadi isu penting yang berkaitan dengan isu pemanasan global.

Pulau Derawan merupakan satu dari beberapa pulau yang terdapat di perairan di muka estuari Sungai Berau di Kalimantan Timur (gambar 1). Pada gambar terlihat luasnya rata-rata terumbu karang pada mana terdapat ongkongan pasir karbonat yang membentuk pulau (Derawan dan Samama). Pasir karbonat berasal dari rombakan koral penyusun terumbu, bertambah setiap

saat selama terumbu karang masih dalam keadaan sehat lingkungannya. Sebaran kekeruhan yang mengandung bahan organik di sisi kiri peta merupakan sedimen yang ditumpahakan dari muara Sungai Berau. Genesa, geologi dan bentuk dari pulau terumbu karang tersebut yang beralaskan endapan laut dangkal menawarkan bahan kajian mengenai neraca air tawar yang terdapat di suatu ekosistem pulau kecil yang mengalami tekanan eksplotasi di satu sisi sementara di sisi lain sedang mengalami proses penenggelaman akibat proses tektonik dan kenaikan air laut dampak pemanasan global.

Contoh lain adalah pulau kecil terumbu karang yang berada di perairan utara Jakarta yang dikenal sebagai Kepulauan Seribu. Salah satunya adalah Pulau Pari, yang terbentuk pada salah satu dari dua rataan terumbu karang yang membentuk satu rataan besar di atas mana terdapat beberapa daratan lebih kecil. Rataan terumbu karang bertumpu pada seri endapan darat, fluviatil pantai dan endapan laut dari zaman pra Glasial saat muka laut jauh di bawah muka laut saat sekarang. Seri endapan klastik ini mengalami pemancungan dan pengendapan ulang beberapa kali. Rataan besar Pulau Pari mempunyai arah perkembangan ke sisi barat dan timur mengikuti arah angin dan gelombang musim. Rataan timur merupakan alas dari Pulau Pari. Daratan Pulau Pari sebagai timbunan pasir karbonat rombakan dari terumbu yang terkumpul oleh agitasi gelombang, terbentuk sejak 6.000 tahun silam saat muka air laut zaman Holosen berada pada ketinggian relatif seperti muka laut sekarang, namun daratan mengalami pelentingan naik ke atas mengangkat rataan membentuk pulau seperti saat ini. Bagian bawah dari daratan merupakan endapan campuran antara pasir karbonat hasil rombakan dan bongkah koral. Pemakaian air di pulau ini untuk keperluan rumah tangga penduduk yang jumlah jiwanya semakin meningkat, dan pemakaian air untuk keperluan pencucian hasil rumput laut.

Contoh lain pulau kecil adalah Pulau Kapoposang di perairan Selat Makasar, salah satu dari beberapa pulau kecil terumbu karang yang membentuk gugusan kepulauan Spermonde. Sejarah pulau ini juga sama dengan pulau-pulau di Kepulauan Seribu, namun untuk Pulau Kapoposang, keadaannya lebih mendekati geologi sistim pulau di perairan lepas Berau dimana gejala penurunan daratan akibat proses bukaan Selat Makasar sedang berlangsung.



Gambar 2. Peta perairan Selat Makasar dan Kepulauan Spermonde

Iklm dan kelautan:

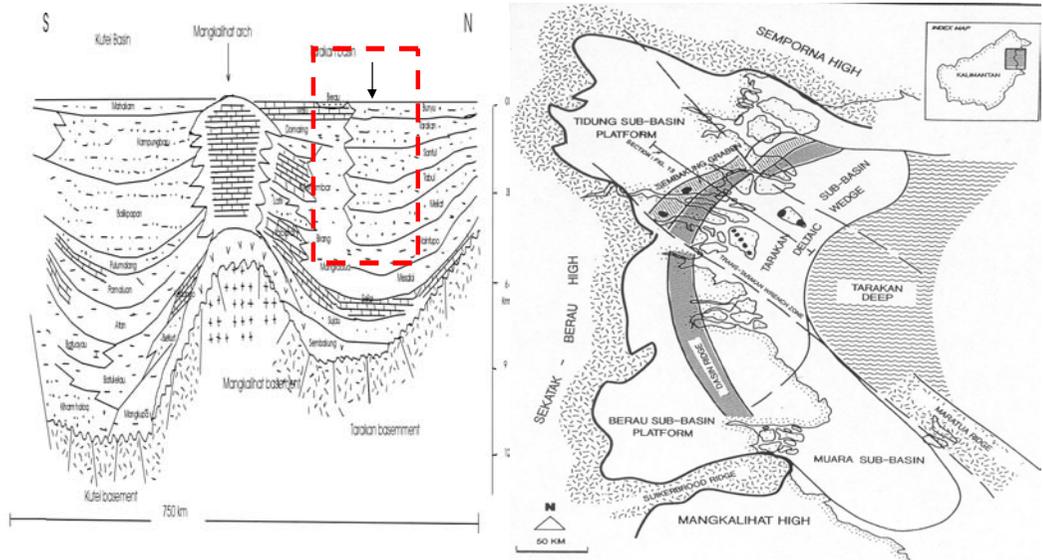
Pulau Derawan terletak di gugusan pulau karang yang terbentuk di depan perairan estuari Berau, pada koordinat N 02 16 45,2 dan E 118 14 41,6 ; di sisi barat cekungan Laut Zulu. Letak di dalam sabuk ITCZ (intertropical convergence zone) serta berada di tepian daratan luas menempatkan gugusan pulau karang pada dinamika cuaca sangat kompleks. Evaporasi tinggi terjadi di perairan maupun di hutan tropis basah menyumbang kelembaban tinggi terutama saat musim basah. Saat

puncak musim tenggara, angin selatan menyapu kuat kawasan ini menghasilkan gelombang yang bertemu dengan arus utara mengaduk perairan sehingga suspensi sedimen dari muara tidak segera terendapkan dan hanyut ke arah bagian selatan estuari. Saat puncak musim barat, arus dan gelombang bergerak ke arah selatan menyeret suspensi pekat dari sungai di estuari ke arah selatan diendapkan di rataaan serta sebagian turun ke celah diantara rataaan terumbu. Angin utara menimbulkan gelombang kuat menggerus pantai utara pulau. Sirkulasi angin darat-laut berlangsung sempurna sehingga kelembaban dari darat maupun laut dapat tersebar sebagai presipitasi yang merata. Anomali cuaca sempat teramati ketika musim kering yang ditandai oleh angin selatan justru membawa kelembaban tinggi mencapai kematangan presipitasi di perairan.

Geologi Pulau Kecil dan Pulau Derawan

Pulau-pulau kecil di Indonesia terbentuk dari proses geologi yang bermacam sejak jutaan tahun silam sebagai konsekuensi pertemuan beberapa lempeng samudra dan kerak benua. Di jalur aktif tektonik, pulau kecil terbentuk ketika dasar dari perairan mengalami pengangkatan muncul diatas atau menempatkannya dekat dengan muka laut yang segera ditempati biota terumbu, selanjutnya tumbuh membentuk rataaan dan pulau hasil rombakannya. Batuan dasar dari jenis pulau ini dapat berupa batuan yang pejal padat atau lunak berongga yang menentukan kemudian bagaimana air tawar dapat tersimpan. Pulau yang dihasilkan dari pengangkatan batuan sedimen di jalur tektonik aktif busur luar, bila memiliki lereng landai pesisir pantainya serta mempunyai lingkungan jernih memberi peluang terumbu karang tumbuh mengelilinginya. Di jalur vulkanik, terobosan magma atau lelehannya membentuk daratan sebagai pulau vulkanik dengan ciri batuan lelehan atau lahar yang mengalir menuju laut membentuk endapan kipas melandai dan berakhir di laut. Endapan vulkanik mempunyai rongga ke dalam mana air dapat meresap dan tersimpan bilamana menemukan penahan, namun seringkali merembes mengalir keluar ke laut.

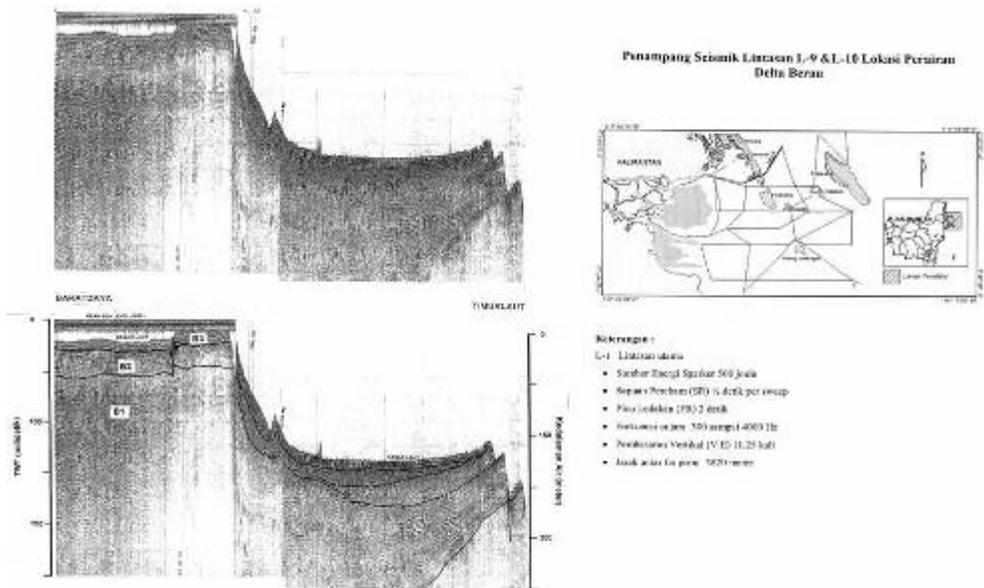
Pulau delta di muara sungai terbentuk oleh timbunan sedimen dari hulu yang menemukan tempat mengendap di bagian relatif tenang membentuk dataran yang adakalanya hanya terpisah oleh alur sempit, namun daratan ini dapat dikelompokkan sebagai pulau. Delta terbentuk dari endapan halus ketika air bermuatan sedimen kehilangan daya angkut serta mengalami koagulasi. Jenis endapan ini relatif kedap sehingga air meteorik cenderung mengalir melau alur paritan serta kanal menuju laut. Hanya ketika menemukan endapan berpasir di pematang yang telah lapuk oleh akar pepohonan, air dapat meresap tersimpan walau dalam jumlah terbatas. Di tepian pulau utama vulkanik, seringkali terdapat daratan yang semula berupa tinggian yang terpisah membentuk pulau ketika muka laut mengalami kenaikan menyusul lelehan tudung es paska zaman es terakhir 15.000 tahun silam. Demikian halnya sejumlah pulau kecil yang terserak di paparan tepian kontinen Sunda dan Sahul yang sebenarnya ada sisa tinggian paparan tersebut yang terbentuk dari batuan terobosan (granit), malihan dan sedimen tua. Tinggian tersebut mengalami penenggelaman menyusul berakhirnya zaman es yang disusul kenaikan muka laut. Seiring kenaikan muka laut, terbentuk terumbu karang pada tepian pulau yang ikut bergerak naik tumbuh seiring kenaikan mula laut, membentuk rataaan luar terumbu karang sebagai bagian ekosistem pulau kecil. Masing-masing kelompok jenis pulau mempunyai ciri batuan atau tanah yang berdasar apa terjadi perbedaan bagaimana dan berapa banyak air tawar dapat tersimpan.



Gambar 3. Penampang geologi dan peta tektonik Kalimantan Timur

Geologi Pulau Derawan tidak lepas dari evolusi sub cekungan Berau, sebagai bagian dari cekungan Kutai yang dapat ditelusuri sejak mulai terjadinya bukaan pada awal Eosen antara Sulawesi dan Kalimantan. Sejarah tektonik sub cekungan Berau diawali oleh tektonik tarikan pada zaman Eosen Tengah, menyebabkan sesar blok pada cekungan, sama halnya yang terjadi pada cekungan Kutai (Katili, 1978). Pada Miosen Tengah, lempeng Laut Sulu yang berada di utara Sulawesi bergerak menunjam di bawah kerak kontinen Kalimantan Utara, menghasilkan ekstrusi gunung api Neogen di Semenanjung Semporna serta mengontrol kelurusan berarah Barat Laut-Tenggara, serta penunjaman berarah Tenggara lipatan-lipatan di utara cekungan Tarakan. Progradasi urutan tebal sedimentasi delta selama Miosen tengah hingga Pleistosen menghasilkan pula sesar tumbuh dengan struktur “rollover” tegak lurus terhadap arah sedimentasi dan mengalami penurunan di bagian timur atau distalnya (Satyana et.al, 1999). Sekuen stratigrafi di kawasan ini mirip dengan sekuen kawasan delta dan perairan depan muara Mahakam (gambar 3), dimana sekuen delta atau estuari Holosennya ditandai oleh “downlapping” sedimentasi transgresi yang mengisi bagian sayatan lembah dari daratan zaman es sebelumnya. Bagian lebih jauh ditandai oleh sedimentasi “contourit, menandai adanya pengaruh arus yang diduga sebagai bagian dari Arlindo yang melintas di kawasan ini.

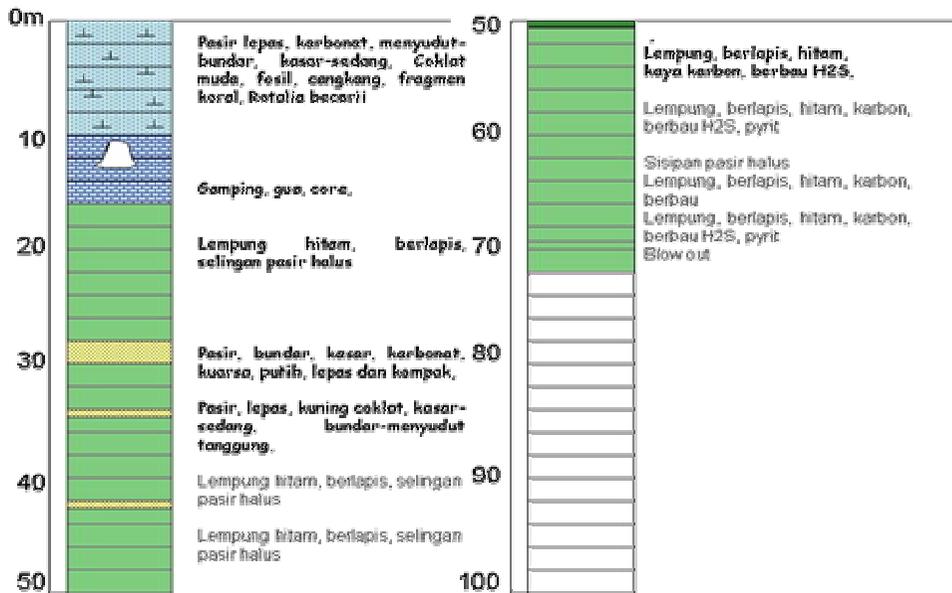
Pulau Derawan terbentuk sebagai pulau terumbu karang (gambar 2), dimulai ketika muka laut naik setelah berakhirnya zaman es dan susut laut. Ketika muka air laut pada ketinggian -5-7 m di bawah muka laut sekarang, di atas substrat pasir dan lempung endapan zaman Kuarter, terbentuklah koloni biota stabil yang mengawali ekosistem terumbu karang. Diawali oleh alga dan koloni moluska, kerangkanya membentuk substrat stabil diatas mana kemudian secara bertahap tumbuh koloni koral di perairan yang relatif jernih. Pada saat pembentukan awal koloni terumbu karang ini, kondisi lingkungan di hulu diduga terjaga dari erosi sehingga perairan juga tidak menerima sedimen klastik dari sungai terlalu banyak. Kejernihan diduga dibantu oleh mulai intensifnya Arlindo menyapu bagian tepian ini sehingga salinitas tinggi mempercepat flokulasi sedimen yang segera mengendap membuat perairan selalu jernih. Data seismik pantul dangkal diperoleh dari pengukuran yang melintas tegak lurus pantai melalui jalur tinggian Derawan dan berarah sejajar sumbu jalur (gambar 4).



Gambar 4. Penampang seismik pantul dangkal tegak lurus sumbu jajaran pulau terumbu karang lepas pantai estuari Sungai Berau.

Pada penampang seismik ini terlihat dengan jelas sekuen sediment Holosen telah terbentuk sangat tebal, menumpang secara tidak selaras pada satuan lebih tua yang diduga berumur lebih dari 20.000 tahun. Ketebalan sedimen Holosen ini, selain tingginya muatan sedimen pada air sungai, juga disebabkan terjadinya penurunan cekungan di lepas estuari. Sekuen lebih tua tersebut merupakan gabungan beberapa seri endapan yang mewakili beberapa perioda pengendapan, namun mengalami pemancungan ketika laut mengalami penurunan permukaan.

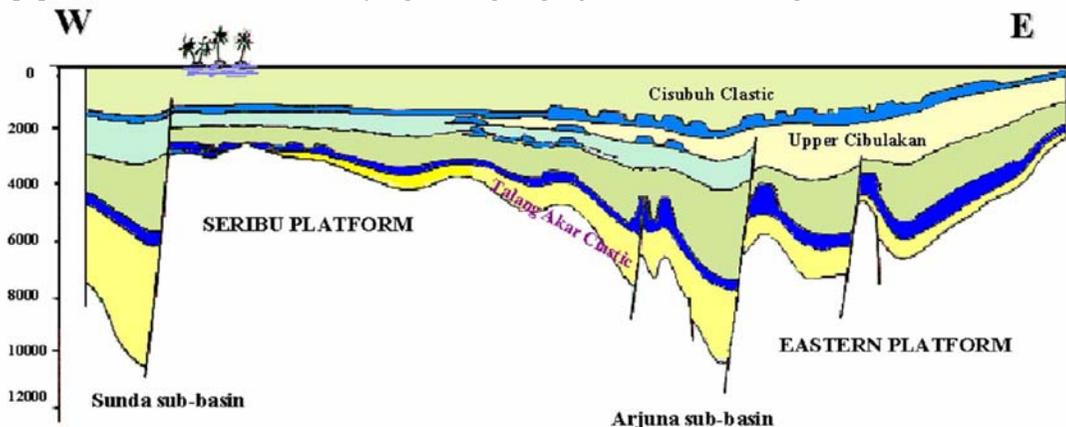
Data seismik juga menyatakan dengan jelas bahwa sesar normal bekerja aktif di bagian luar gugusan pulau di jalur Muara Tua, namun dengan besaran kurang pada jalur dalam yang ditempati Pulau Panjang, Derawan, dan Samama. Tidak berkembangnya pulau delta kipas sebagaimana dijumpai di Mahakam merupakan salah satu tanda adanya penurunan dasar cekungan.



Gambar 5. Penampang stratigrafi pemoran di Pulau Derawan

Data dari sedimen inti pemoran di Pulau Derawan mendukung penafsiran evolusi perairan ini sejak Kuartar (gambar 4).

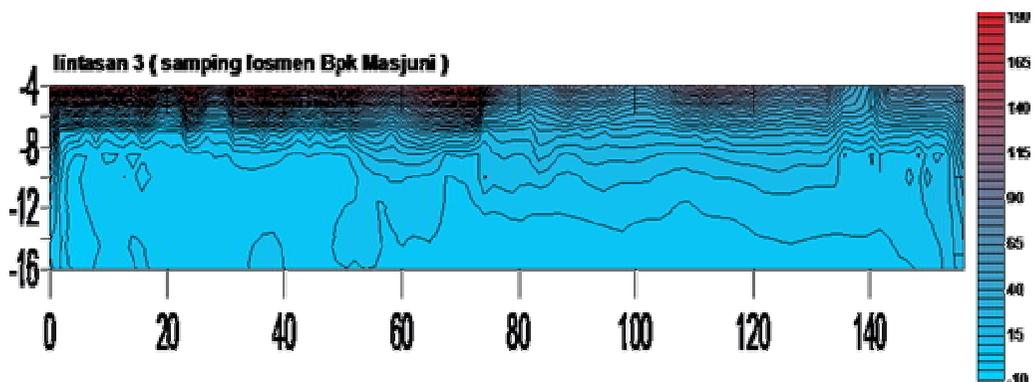
Kepulauan Seribu terbentuk terutama pada zaman Holosen, yaitu saat tinggi muka laut mencapai posisi seperti tinggi muka laut saat sekarang. Terumbu karang terbentuk bertumpu pada tinggian yang mulai digenangi air laut yang naik sejak puncak zaman es terakhir pada mana letak muka laut berada pada -130 m dari muka laut sekarang. Pada zaman tersebut Laut Jawa merupakan daratan luas, mulai mengalami penenggelaman ketika muka laut mencapai -40 m dari muka laut saat sekarang. Berdasarkan stratigrafi kawasan ini dari hasil beberapa pemoran yang dibuat, tinggian diatas mana rataannya dan pulau terumbu karang saat ini berada, merupakan sisa perbukitan yang terbangun dari endapan darat, sungai, pantai dan sebagian lagi adalah batugamping dari zaman Kuartar Atas. Penampang geologi di utara Pulau Jawa memberi gambaran pembentukan berulang paparan karbonat di kawasan ini yang berlangsung sejak Tersier Bawah (gambar 5).



Gambar 5. Panampang geologi evolusi cekungan sedimen di Jawa Utara

Geohidrologi Pulau Derawan dan pulau kecil lain

Berdasar genesa pulau kecil dan wilayah pesisir, geohidrologi pulau kecil dapat dikenali dalam beberapa jenis. Perbedaan dasar ada pada sebaran, bentuk dan sedimen aquifer tanah dangkal serta cara pengisiannya. Pada pulau terumbu karang, aquifer tanah dangkal terbentuk dari sedimen pasir kasar karbonat yang menutup sisa kerangka koral, tersebar terutama menutup bagian yang mempunyai arah menghadap energi paling tinggi dengan apa sedimen dapat ditimbun. Pengisian air tawar hanya berasal dari air meteorik. Keseimbangan untuk pulau menyimpan air tawar memerlukan waktu lama sehingga terbentuk cebakan air tawar yang umumnya berupa lensa. Lensa ini seolah mengapung di atas air asin, bergerak naik turun seiring ayunan pasang surut. Terdapatnya pohon dengan akar yang mampu menghancurkan sedimen menjadi lebih halus, membantu menahan lebih baik air tawar tidak merembes mengalir ke laut. Lapukan sedimen di bagian tengah pulau oleh pohon (sukun, nangka, pace dll), selain mengikat molekul air, juga memperkaya mineral pada air yang tersimpan pada sedimen. Ketebalan aquifer tanah dangkal pulau jenis ini sangat tergantung pada banyak hal, terutama pada berapa kuat gelombang pada tinggi variasi pasut tertentu telah menghasilkan ketebalan tertentu pasir karbonat teronggok di atas rata-rata terumbu. Di kawasan Indonesia Barat, agitasi kuat gelombang saat musim barat ditandai sebagai penentu terbentuknya timbunan pasir karbonat, sementara di Indonesia Timur, agitasi gelombang saat musim tenggara yang berperan lebih dominan. Unsur dan mekanismenya yang mengendalikan sedimentasi klastik karbonat di Pulau Derawan tidak sederhana. Arus kuat dari utara bertemu dengan gelombang selatan saat musim tenggara mengaduk sedimen yang kemudian terputar di rata-rata dan teronggok di pantai bagian selatan pulau. Bagian utara tergerus oleh gelombang musim barat, namun sebagian sedimen terangkut ke pantai sisi selatan. Pengangkutan sedimen ke arah selatan ini terganggu oleh tiang penopang bangunan pondok wisata yang semakin menjorok ke arah tubir karang. Efisiennya sedimentasi di bagian barat daya dan selatan pulau dapat dilihat dari gambaran sebaran sedimen dan air tawar hasil pengukuran tahanan jenis. Air tawar hanya mengisi bagian atas membentuk lensa dengan ketebalan air berkisar 4-5,5 m dengan kedalaman 1 m dari permukaan. Lensa air tawar mengapung di atas air asin, bergerak naik turun seiring gerakan pasang surut laut. Ketebalan maksimum terdapat pada bagian barat daya dan selatan pulau, menipis di bagian timur dan utara. Setelah kedalaman 6,5 dan 8 m, air tawar berangsur menjadi payau dan asin. Berdasar penafsiran tahanan jenis, air asin menjadi dominan setelah kedalaman 8 m, pada bagian mana sedimen ditandai oleh pasir kasar dan kerikil karbonat remah terumbu karang yang menutup bongkah sisa inti terumbu karang, yang diduga semula sebagai bagian inti atau "reef crest".



Gambar 6. Penampang tahanan jenis di Pulau Derawan memperlihatkan Sebaran air tawar ddi dalam endapan klastik karbonat.

Sedimen pasir halus hingga sedang di Derawan menutup terutama di bagian barat daya dan selatan sementara bagian utara lebih berupa sedimen pasir kasar mengandung kerikil hancuran terumbu karang. Bagian tepi pulau, sebagai bagian yang relatif baru terbentuk, masih berupa sedimen segar belum mengalami pelapukan dan tersemen. Bagian Timur dan Timur Laut merupakan daerah rawa yang terisi endapan halus dan tertutup bakau serta nipah. Bagian ini memiliki nilai tahanan jenis yang mencirikan kandungan air lebih payau.

Status Pulau Derawan dan pulau kecil lainnya

Neraca sumberdaya pulau kecil sekarang dan masa yang akan datang nampaknya semakin tergantung pada sejauh mana campur tangan manusia mengatur lingkungan pulau kecil. Berbagai upaya untuk mengolah lahan di pulau kecil terumbu karang dilakukan dari semula semata dipakai sebagai tempat singgah dan berlindung saat cuaca buruk selama pelayaran atau menangkap ikan dilaut, hingga dikembangkan sebagai pemukiman atau hunian wisata berikut kelengkapannya. Pulau delta dan tepian muara tidak lagi tersisa tumbuhan bakaunya, dirambah untuk kayu bakar atau habis dibongkar untuk tambak udang atau ikan bandeng. Pulau vulkanik atau yang terbentuk dari sisa tonjolan batuan terobosan dan batuan keras lainnya, memiliki pantai landai sempit yang padat rumah sehingga harus membuka lahan baru mengorbankan hutan bakau di sepanjang pantai.

Derawan dan Maratua merupakan jenis pulau kecil terumbu karang, bagian dari kompleks atol karang halang yang terbentuk di lepas perairan estuari Berau. Derawan terletak relatif dekat dengan daratan pulau utama sementara Maratua sebagai pulau terluar. Beberapa pulau kecil lainnya tidak berpenghuni namun memiliki rataan terumbu karang luas dan masih memiliki sisa tutupan hutan lahan basah. Sejarah mencatat kedatangan suku pengembara yang singgah sementara atau terdampar dan tinggal menetap di pulau Maratua, pulau terluar berupa atol, maupun di Derawan. Semula membuka hutan di bagian pulau yang beralas pasir, kemudian berkembang menjadi pemukiman dari berbagai suku yang datang mencari peluang usaha jasa disekitar kehidupan nelayan. Untuk memperoleh lahan lebih luas dan akses mudah ke laut, rataan bakau dipangkas, pohon tanaman asli ditebang diganti tanaman kelapa dan pisang.

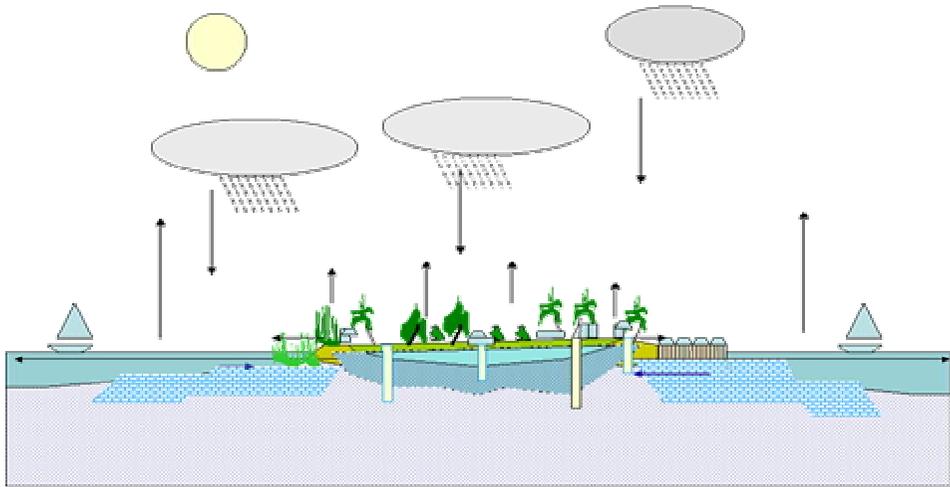
Daya tarik yang menyebabkan pesatnya pertumbuhan penduduk dari pendatang yang bergabung adalah melimpahnya biota laut, termasuk penyu (*Chelonia midas*) yang telurnya menjadi salah satu sasaran buruan karena tingginya permintaan pasar. Perairan kompleks terumbu karang menawarkan kelimpahan biota (ikan, moluska, holothuroidae, dll) yang menjadi tangkapan, namun biota tersebut bersama dengan ekosistem terumbu karang menawarkan daya tarik lain sebagai obyek wisata laut. Operator wisata modal besar menanamkan modal di pulau Derawan dan pulau-pulau lain (Maratua dan Sangalaki) setelah mengetahui potensi kawasan sekitarnya demikian besar sebagai tujuan wisata laut kelas dunia. Operator wisata lokal sudah sejak lama melayani wisata luar dan dalam negeri dalam jumlah terbatas namun tinggi frekuensinya.

Pulau kecil dan masalah daya dukung

Gambaran geologi dan terdapatnya air tawar di suatu pulau kecil seperti Pulau Derawan dapat disajikan dalam suatu model seperti pada gambar 7. Pulau terumbu karang ini semula tidak menghadapi masalah pada daya dukung sumberdaya air tawar bagi pemenuhan pemukiman yang awalnya sebagian besar penduduknya adalah nelayan. Keperluan akan air meningkat seiring berkembangnya kegiatan wisata berikut peningkatan jumlah penduduk yang datang mengiringinya.

Penghunan di Pulau Derawan diawali oleh kedatangan nelayan yang berlindung dari badai dan kemudian menetap. Air tawar terbatas digunakan untuk keperluan rumah tangga dan persediaan ketika melaut. Kompleks terumbu Derawan-Sangalaki-Kakaban dan Maratua dengan cepat

terkenal setelah datanya dimuat pada buku kunjungan wisata. Dengan cepat pula terjadi peningkatan kunjungan wisata dari dalam dan luar negeri walau akses datang ke kawasan ini cukup mahal, namun nampaknya peminat cukup banyak dari expatriat yang bekerja di sekitar Balikpapan. Pondok wisata tumbuh dengan cepat dibangun sebagai rumah panggung di atas ratahan terumbu. Pemakaian air tawar meningkat, bukan sekedar sebagai air rumah tangga, namun juga untuk air sanitasi dan pembilasan setelah kegiatan (wisata) di laut. Air tawar ini terbuang demikian saja ke laut setelah pemakaiannya.



Gambar 7. Penampang sintetik pulau kecil terumbu karang berikut gambaran Keberadaan air tawar dangkal.

Hajat masyarakat Kalimantan Timur menyelenggarakan pesta olah raga nasional akan menambah jumlah kunjungan ketika sebagian cabang olah raga diselenggarakan di kawasan ini. Pondok wisata tambahan dibangun memperluas bangunan yang bertengger di atas ratahan terumbu karang. Pondok-pondok ini menerapkan cara sama pada sanitasinya. Cara lebih bijaksana untuk menambah daya tampung bagi pengunjung dilakukan dengan meningkatkan kualitas rumah penduduk untuk lebih siap dan diminati pengunjung, setidaknya menambah penginapan yang telah ada namun dianggap belum cukup daya tampungnya.

Air tawar keperluan rumah tangga dan wisata selama ini diambil langsung sebagai air tanah dangkal dengan cara pemompaan langsung. Pemerintah daerah menawarkan kepada masyarakat dengan membangun sistim pengelolaan dan pembagian air tawar berupa menara bak air yang pompanya memakai energi (sel) matahari. Air tanah dangkal yang terkumpul di kolam dipompakan ke menara agar dapat tersebar secara gravitasi melalui jaringan pipa. Relatif mahalnya cara ini bagi masyarakat dibanding pemompaan langsung menyebabkan tidak ada yang berminat memakainya. Sarana ini memerlukan pengolaan ketat agar tidak terjadi pengambilan dari air tanah dangkal secara berlebihan yang memicu terjadinya kekosongan pori yang kemudian diisi oleh air asin yang menerobos masuk mengisi aquifer dangkal. Gejala intrusi ini sudah terjadi, namun pada sumur penduduk yang terdapat di bagian dekat pantai.

Keberadaan air tawar di Pulau Derawan dimungkinkan oleh jenis batuan penyusun berupa endapan pasir karbonat remah terumbu karang (gambar 7). Lapisan pasir ini memiliki kesarangan yang memungkinkan air meteorik meresap. Sedimen ini memiliki ketebalan hingga 6,5 m, namun tidak merata di seluruh pulau. Hal ini dapat dilihat pada diagram hasil pemeruman tahanan jenis yang memberi gambaran tebalnya air tawar yang mengisi sedimen pasir ini. Dengan penduduk mencapai 800 jiwa (telah termasuk penghuni sementara non wisata), konsumsi normal harian air tawar adalah 80.000 l/hari. Sebagian besar limbahnya kembali ke dalam tanah. Konsumsi

operator wisata untuk akomodasi dan pada kegiatan oleh raga air (selam, snorkeling, mancing) belum dapat dinyatakan dengan pasti, namun diduga lebih dari 200 liter/hari/orang. Sebagian besar dari air tawar terbuang ke laut, diduga mencapai 100 liter/orang. Bila diperkirakan rata-rata tamu mencapai 5 orang/hari (pesimistik) pada kunjungan minimum selama 250 hari dan kunjungan maksimum sebanyak 50 orang/hari (pesimistik) kunjungan selama selama 100 hari, maka konsumsi 250.000 liter + 1.000.000 liter. Konsumsi total air tawar di Pulau Derawan selama satu tahun mencapai 29,73 juta liter. Dengan kemampuan pengisian sebesar 12 juta liter, neraca tahunan dengan rata-rata curah hujan tahunan adalah 1500 mm, maka pengisian total air tawar Derawan adalah 60 juta liter. Angka curah hujan tersebut dapat saja mengalami perubahan (ekstrem) berkurang hingga dibawah 1000 mm/tahun atau meningkat intensitasnya hingga memperbanyak air lebih yang tumpah keluar ke laut. Lolosnya air tawar yang tumpah ke laut saat intensitas dan curah hujan tinggi diperkirakan mencapai dan menguap langsung serta melalui tumbuhan diperkirakan 20%, maka neraca air tanah tersisa 15,27 juta liter. Angka ini sangat rentan perubahannya ketika terancam oleh kurangnya pengisian air meteorik yang dapat melorot dibawah 1000 mm/tahun curah hujan, konsumsi yang meningkat hingga 50% dalam 10 tahun. Perkiraan perubahan kunjungan wisata dan keluarga masih sulit dinyatakan dalam angka, dapat berkurang atau bertambah tergantung beberapa hal antara lain mobilitas masyarakat lokal dan kondisi pariwisata. Bila diambil angka optimistik 10% dalam 10 tahun untuk wisata dan kunjungan keluarga, maka konsumsi keseluruhan hanya berubah menjadi 32, 800 juta liter. Ancaman yang jelas dalam hal ini adalah terjadinya pengurangan masukan air meteorik. Ketika memperhitungkan penipisan lensa air tanah oleh kenaikan muka air laut, kemudian lolosnya air tanah oleh terbukanya aquifer oleh abrasi, maka neraca diduga dapat berkurang sangat tajam menyangkut angka 35% maka pada kondisi ini hanya menyisakan 7,27 juta liter untuk 10 tahun ke depan.

Pulau Derawan dan kenaikan air laut global

Pulau Derawan merupakan pulau terumbu karang dengan ukuran luas kurang dari 1 km² tumbuh di atas rata-rata terumbu, terbentuk belum lama dimulai dari tumbuhnya terumbu di atas endapan sedimen Kuartar seiring kenaikan muka laut setelah berakhirnya zaman es.

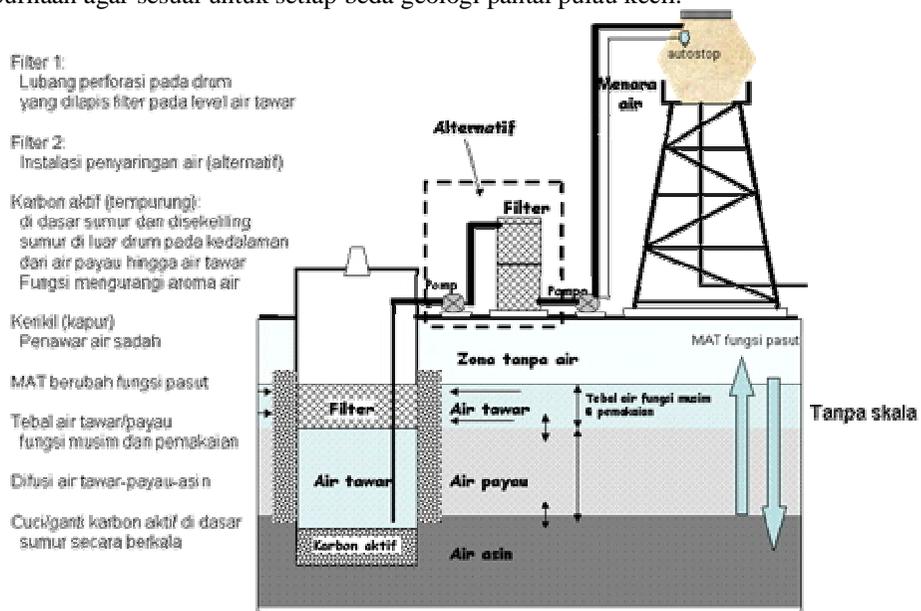
Bahaya yang dihadapi pulau menyongsong kenaikan muka laut eustasi adalah ancaman kerusakan fisik langsung oleh abrasi dan penenggelaman pulau. Intrusi air laut merupakan ancaman berikutnya pada aquifer air tanah dangkal ketika bagian pantai yang tergerus terbuka oleh masuknya air asin pada saat pasang naik sedang tinggi. Kerusakan bukan hanya pada fisik pulau, namun juga pada ekosistem perairan terumbu karangnya. Terumbu karang di bagian lereng depan yang mempunyai kecepatan tumbuh lebih rendah (2-4 mm/tahun) dari kecepatan kenaikan muka laut (10 mm/tahun), akan mengalami penyesuaian pelambatan tumbuh hingga tergantikan oleh spesies baru karena berkurangnya intensitas cahaya yang diterima. Penyesuaian terjadi pada jenis yang lebih tahan hidup pada kedalaman yang memiliki kecepatan tumbuh lebih lambat. Jenis koral pejal menggantikan koral cabang, jenis koral yang memilih lingkungan dengan sinar matahari dan agitasi maksimum air laut. Juvenil koral juga memiliki kemampuan memulai tumbuh yang berbeda tergantung pada neraca sinar matahari, tekanan air, arus dan jenis substratnya. Berkurangnya jenis koral cabang sangat merugikan neraca sedimen di ekosistem terumbu karang untuk menjaga keseimbangan antara erosi dan sedimentasi yang menjaga kelestarian pulau dan bahkan membangun daratan baru. Akibat dari ketimpangan ini, kenaikan muka laut memberi dampak lebih jauh dengan percepatan erosi pantai pulau kecil.

Erosi dan abrasi sedimen pantai serta abstraksi berlebihan mengancam intrusi air laut yang mengurangi kualitas, namun juga volume total aquifer yang dapat diisi oleh air tawar meteorik. Hitungan lain yang perlu dilakukan adalah ketika terjadi gelombang besar, air asin terhempas masuk jauh ke darat, menggenangi pulau dan mendorong serta menggantikan lebih banyak air tawar dari pori.

Peningkatan jumlah kunjungan wisata yang tidak diiringi penataan pengelolaan air tawar dapat dengan cepat menambah sumbangan defisit air tawar. Usaha yang pernah dilakukan untuk membuat industri pembibitan udang dengan memompakan air asin ke dalam tambak di pulau merupakan salah satu ancaman paling serius mempercepat pengurangan volume tampungan air tawar, atau dengan kata lain mengurangi volume lensa air tawar dengan sangat cepat dan dalam jumlah sangat besar di pulau Derawan.

Adaptasi: Pengelolaan lestari air tawar di Derawan

Memperhatikan beberapa hal yang berkaitan dengan kondisi alam dan gejalanya seperti: geologi, neraca hidrologi Pulau Derawan, kecenderungan perkembangan lingkungan disekelilingnya berikut naiknya muka air laut serta masalah sosial kependudukan, perlu segera mencari cara yang tepat untuk mengelola air tawar di pulau Derawan. Model pengelolaan didasarkan pada beberapa hal antara lain adalah daya dukung alamiah dan (rasionalisasi) pemakaiannya. Pertimbangan juga didasarkan pada masalah dan ancaman yang dihadapi pulau kecil hingga 20 tahun ke depan. Untuk pengelolaan air tawar pulau Derawan, diberikan contoh bangunan (fisik) model sumur optimalisasi air tawar (gambar 8) hasil dari pengembangan yang dilakukan oleh kelompok penelitian pulau kecil Puslit Geoteknologi LIPI (Hantoro dkk., 2007). Model ini dalam taraf penyempurnaan agar sesuai untuk setiap beda geologi pantai pulau kecil.

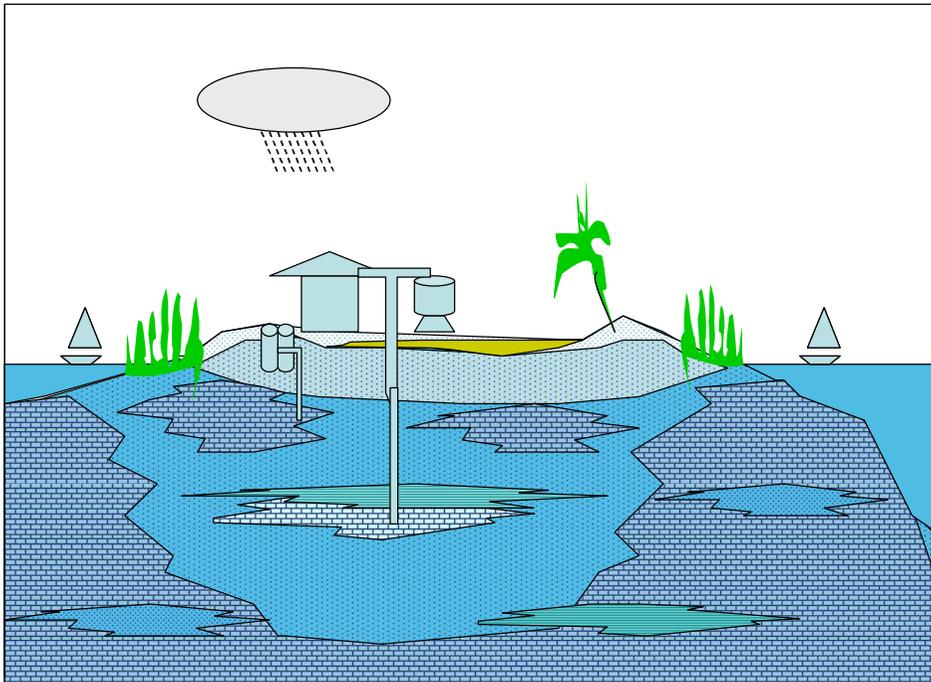


Gambar 8. Model sumur optimalisasi air tawar di pantai pulau kecil dan kawasan pesisir

Berdasar daya dukung geohidrologinya, yang perlu dilakukan adalah mengendalikan air meteorik agar ketika muka air tanah melampaui garis ketinggian muka air laut, air tidak merembes keluar dan tertahan sebagai air tanah dangkal. Penanaman bagian tepi pantai dengan tumbuhan yang perakarannya menghasilkan pengurangan kesarangan namun meningkatkan tekanan turgor tanah agar tidak menguap dan mengalir keluar. Pemilihan jenis pohon yang tepat perlu dilakukan untuk menghindarkan dampak berlebihnya penguapan serta pohon sebaiknya juga sebagai pohon yang memberi nilai tambah hasil kayu, buah atau mungkin daunnya.

Upaya lain meningkatkan ketersediaan berkesinambungan air tawar pulau adalah dengan melakukan penyimpanan pada bak maupun dengan melakukannya dengan cara membuat imbuan tambahan pada lapisan sedimen. Cara penyimpanan air hujan pada bak air memiliki resiko air meteorik tersebut tidak mengalami imbuan mineral sebagaimana air tanah (dangkal) serta mengalami pengotoran karena terbukanya bak atau menjadi tempat berbiaknya nyamuk. Cara lain adalah dari bak penampungan air hujan yang letaknya pada ketinggian 2-3 m dari muka tanah, air hujan dialirkan dengan pipa ke dalam lapisan sedimen. Perlu dilakukan kajian dan percobaan lebih dahulu pada cara ini.

Pada pulau terumbu karang, alas dari sedimen klastik karbonat pada umumnya adalah bongkah dan kerakal koral bercampur pasir dan lumpur karbonat. Di bawah dari lapisan ini umumnya adalah endapan klastik dari umur lebih tua (Kuarter atau Tersier). Berdasar data pemeruman tahanan jenis dan pemboran di Pulau Pari dan Derawan, endapan klastik dari seri Kuarter Atas masih mempunyai peluang mengandung air tawar fosil atau bila diperiksa lebih lanjut, terdaat kemungkinan merupakan bagian dari seri endapan klastik vulkanik yang menerus sejak dari daratan pulau utama. Pemboran di Pulau Derawan juga memberi gambaran adanya endapan karbonat yang mengalami pelarutan membentuk rongga-rongga yang saat ini terisi air asin. Berdasar geologi dari dasar pulau-pulau kecil tersebut, imbuan teknik injeksi sederhana air meteorik ke dalam formasi alas dari pulau kecil dapat dihitung dan dicoba. Secara garis besar, sketsa untuk imbuan air meteorik di pulau terumbu karang dengan alas batugamping seperti disampaikan pada gambar 9.



Gambar 8. Model sumur optimalisasi air tawar di pantai pulau kecil dan kawasan pesisir

Model ini sedang dikembangkan di Pulau Maratua yang hanya memiliki lapisan tipis penutup pasir dan lapukan karbonat sementara bagian bawahnya merupakan satuan batugamping Kuarter. Kemungkinan lolosnya air tawar ini sangat besar mengingat bagian berongga dapat saja merupakan bagian dari fasies biotanya yang tidak cukup rapat tertutup atau dikelilingi fasies

pasiran ("packstone" atau lempung ("wackystone"). Pada pulau kecil dengan alas dari seri endapan klastik, injeksi air dilakukan pada lapisan terpilih (pasir) yang berupa lensa yang terlindung oleh endapan klastik halus sehingga lebih dapat menahan rembesan air tawar lolos. Larasasin pada lensa-lensa yang menjadi target, secara perlahan digantikan oleh air tawar yang diinjeksikan.

Pendekatan sosial kependudukan juga perlu dilakukan, dengan pemilihan isu tertentu yang paling tepat dipilih untuk memperbaiki anggapan dan perilaku cara pemakaian air yang menjadi lebih berwawasan lingkungan. Selain pengurangan konsumsi yang berlebihan, cara pemakaian sebaik mungkin air tawar dipulau juga perlu disosialisasikan kepada masyarakat.

PENUTUP

Hingga saat ini, kecenderungan kenaikan muka air laut merupakan suatu hal yang harus diwaspadai. Kecepatan gerak kenaikan relatif muka air laut terhadap daratan tergantung pada banyak hal antara lain dari kecepatan penambahan volume di satu sisi, sementara disisi lain dari gerak tegak daratan yang juga berbeda dari satu ke lain tempat.

Kompleks terumbu karang di perairan estuari Berau terbentuk sebagai bagian dari evolusi perairan yang melibatkan gejala tektonik (penurunan), arus perairan dan perubahan cuaca.

Air tawar pulau-pulau terumbu karang hanya berasal dari air meteorik, tertampung dan tersimpan pada lapisan tanah membentuk lensa air tanah dangkal yang volumenya tergantung dari jenis dan bentuk sedimen yang diisinya.

Neraca air tawar di Derawan dan pulau kecil lain (Pari, Kappoposang, dll) khususnya pulau terumbu karang, rentan terhadap beberapa hal, antara lain: perubahan dan terjadinya cuaca (ekstrem), penipisan lensa air tawar akibat kenaikan muka air laut dan pengelolaan berlebih untuk keperluan kegiatan manusia. Rasionalisasi pemakaian air harus segera dilakukan berdasar hitungan yang tepat daya dukung air, kondisi lingkungan pulau dan memasukkan unsur ancaman bahaya dampak kenaikan muka air laut.

Upaya perlindungan pantai pulau kecil dilakukan dengan memulihkan/ memperkuat biota pantai perairan di sekeliling pulau kecil seperti Kepulauan Seribu, Estuari Berau maupun Kepulauan Spermonde. Upaya ini, selain mengurangi ancaman fisik, juga membantu menyelesaikan masalah lingkungan serta serapan gas rumah kaca.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepada beberapa pihak yang berperan pada proses dari pengumpulan data hingga dapat diselesaikannya tulisan ini, kami mengucapkan terima kasih, semoga amal kebajikannya diterima Allah swt.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Geologi nasional : Atlas pulau kecil Indonesia berdasar mandala geologi dan lingkungan. In press. 2007.

Hantoro, W.S. 1993b. Environment and climate changes record since the last interglacial obtained from the study of the modern and uplifted coral reef in Indonesian Island Arc: Background and strategy of the program. In: Proceeding the IAEA consultants Meeting of the Retrospective Studies on Coral Reefs, Townsville, Australia, 17-21 May 1993.

Hantoro, W.S. 1993c. Sea level variations and global climate changes: Present status of study in Indonesia. In: Proceedings of the US-Indonesia Workshop on Resources & Climate-related

- Studies of the Shallow Epicontinental Seas of South East Asia (SESSA), July 27-28 , 1993, Jakarta, Indonesia.
- Hantoro, W.S. 1993c. Sea level variations and global climate changes: Present status of study in Indonesia. In: Proceedings of the US-Indonesia Workshop on Resources & Climate-related Studies of the Shallow Epicontinental Seas of South East Asia (SESSA), July 27-28 , 1993, Jakarta, Indonesia.
- Hantoro, W.S. (1993j). Pleistocene sea level variations and global changes in Indonesia. Study of the uplifted coral reef terraces. In: Preceedings of the Committe for Co-ordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas (CCOP) Workshop XXX Session, November 9-13, 1993, Denpasar-Bali, Indonesia.
- Hantoro W.S., 1996. Low stand sea level and landform changes: climatic changes consequence to epicontinental shelf and fauna migration through Indonesian Archipelago. In Preceeding of: “The environmental and Cultural History and Dynamics of the Australian-Southeast Asian Region” seminar, Melbourne, December 10-12, 1996.
- Hantoro W.S., Handayani L., Narulita I., Suprijanto D., 1996 Tectonic and climatic influences to the spatial and temporal development of coral reef limestone in Indonesian Maritime Islands: Assessment on Quaternary coastal evolution. In: Proceedings of Coral Reef Congress, July 1996, Panama.
- Hantoro W.S. et al, 2000. Holocene Paleo oceanography of Indonesia Island Arc.
In: IOC Westpac Paleo oceanography Map & Monogram (in press). Westpac Intergovernmental Oceanographic Commission, IOC/ Westpac Sub-Commission publication.
- Hantoro W.S. et al, 2000. Tectonic and climatic influences to the spatial and temporal development of coral reef limestone in Indonesian Maritime Islands: Assessment on Tertiary to Quaternary coastal evolution to longterm carbon stock in epicontinental shelf. ICRC Spec. Pub., ICRC, October 2000, Denpasar, Bali, Indonesia
- Hughen K. A., Schrag D. P., Jacobsen S. B. and Hantoro W. S. (1999). El Niño during the last interglacial period recorded by a fossil coral from Indonesia. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 3129-3132.
- IPCC Report, 2007. Wikipedia.
- IPCC 2007. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.