



Pemetaan Daya Dukung Lingkungan Penyedia Air Bersih Berbasis Jasa Ekosistem di Tarempa Kabupaten Anambas

*Mapping the Environmental Supporting Capacity of Clean Water
Providers Based on Ecosystem Services in Tarempa, Anambas Regency*

Erik Febriarta¹

Magister Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia

Lulu Mari Fitria

Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta Yogyakarta, Indonesia

Karina Bunga Hati

Magister Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia

Ahmad Ghazali

Mitra Geotama Indonesia, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

Deni Agus Setyono

Jurusan Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

Rakyan Paksi Nagara

Pusat Pemetaan Tata Ruang dan Atlas, Badan Informasi Geospasial, Bogor, Indonesia

Artikel Masuk : 20 November 2020

Artikel Diterima : 2 Agustus 2022

Tersedia Online : 31 Agustus 2022

Abstrak: Daya dukung lingkungan merupakan kondisi kemampuan lingkungan secara fisik untuk dimanfaatkan dan dapat dikelola untuk mencukupi kebutuhan hidup dan pembangunan suatu daerah. Sumber daya air merupakan kebutuhan dasar untuk aktivitas manusia dan makhluk hidup di sekitarnya. Daya dukung lingkungan hidup dari faktor penyedia berupa air bersih merupakan bagian dari langkah strategis pengelolaan dan perlindungan lingkungan hidup di Kepulauan Anambas. Studi bertujuan untuk menganalisis tingkat daya dukung lingkungan dari faktor penyedia air bersih. Studi dilakukan dengan menggunakan metode jasa

¹ Korespondensi Penulis: Magister Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Indonesia
Email: e.febriarta@gmail.com

ekosistem. Parameter yang digunakan untuk perhitungan daya dukung yaitu ekoregion yang memberikan informasi kondisi fisik bentang lahan dengan ciri dan karakteristik yang sama, penutup lahan yang memberikan koreksi kegiatan ekonomi berbasis lahan dan kondisi hidrogeologi yang memberikan informasi keterdapatannya air tanah dan potensi produktivitas air. Ketiga data lingkungan tersebut dinilai skor dan nilai bobot secara bertingkat dengan *analytical hierarchy process* (AHP) kemudian dihitung secara linier seluruh variabel yang menghasilkan nilai indeks jasa lingkungan. Nilai jasa lingkungan kelompok menjadi lima kelas, sehingga diketahui daya dukung lingkungan lingkungan penyedia air bersih di Pulau Siantan yaitu (1) daya dukung sangat tinggi 32,9%, (2) daya dukung tinggi 1,36%, (3) daya dukung sedang 6,2%, (4) daya dukung rendah 21%, dan (5) daya dukung sangat rendah 38,5%. Secara umum kondisi lingkungan hidup penyedia air bersih di Pulau Siantan adalah sangat rendah.

Kata Kunci: air bersih; *analytical hierarchy process* (AHP); daya dukung; jasa ekosistem

Abstract: *Carrying capacity of the environment is a condition of the physical ability of the environment to be utilized and manageable to meet the needs of life and development of an area. Water resources are a basic need for human activities and living things around them. The environmental carrying capacity of the supply factor in the form of clean water is part of the strategic steps for environmental management and protection in the Anambas Islands. The study aims to determine the level of environmental carrying capacity of clean water supply factors. The study was conducted using the ecosystem service method. The parameters used for the calculation of carrying capacity are the ecoregion which provides information on the physical condition of the landscape with the same characteristics and characteristics, the land cover which provides corrections to land-based economy activities and hydrogeological conditions, which provide information on the availability of groundwater and the potential for water productivity. The three environmental data scores and weight values are graded using the analytical hierarchy process (AHP) and then are calculated linearly for all these variables, resulting in an environmental services index value. The value of environmental services is grouped into five classes, so it is known that the environmental carrying capacity of clean water providers on Siantan Island is 32.9% very high carrying capacity, 1.36% high carrying capacity, 6.2% medium carrying capacity, low carrying capacity 21 %, and the carrying capacity is very low 38.5%. In general, the environmental conditions of clean water providers on Siantan Island are very low.*

Keywords: *analytical hierarchy process (AHP); carrying capacity; clean water; ecosystem services*

Pendahuluan

Daya dukung lingkungan merupakan kenampakan fisik yang dapat menunjang kebutuhan dasar manusia dan makhluk hidup di sekitarnya untuk hidup dan beraktivitas (Santosa, 2010). Sementara itu, definisi daya dukung lingkungan di dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PPLH) adalah kemampuan lingkungan hidup untuk mendukung perikehidupan manusia, makhluk hidup lainnya dan keseimbangan di antara keduanya (Febriarta & Oktama, 2020; Pemerintah Republik Indonesia, 2009). Lingkungan sebagai tempat tinggal dan tempat memperoleh manfaat untuk bertahan hidup dan beraktivitas. Kemampuan lingkungan atau daya dukung tersebut harus dimanfaatkan secara bijak dan dengan berwawasan lingkungan untuk dapat menyediakan sumber daya secara optimal dengan faktor kerusakan yang minimal dan berkelanjutan. Salah satu upaya untuk memanfaatkan secara optimal adalah dengan identifikasi sumber daya alam secara spasial atau keruangan (BAPPEDA

Kabupaten Meranti, 2017; Das & Das, 2019; Grizzetti et al., 2019; Monk et al., 2019; Zawadzka et al., 2019)

Pemetaan sumber daya merupakan salah satu langkah strategis untuk mengetahui karakteristik fisik lingkungan sebagai data dasar dalam pengambilan keputusan oleh pemerintah, pemangku kebijakan dalam pembangunan berkelanjutan (Febriarta et al., 2020; Fitria et al., 2019; Hidayat & Nagara, 2019; KLHK, 2019; Muta'ali, 2019). Identifikasi sumber daya alam menggambarkan kondisi alam dari faktor fungsi penyedia, pengatur atau pengendali, sosial budaya, dan pendukung (KLHK, 2019; Muta'ali, 2015). Satuan terkecil dari faktor lingkungan tersebut dapat diidentifikasi dari ekosistem. Definisi ekosistem merupakan tatanan unsur lingkungan hidup yang merupakan kesatuan utuh menyeluruh dan saling mempengaruhi dalam membentuk kesetimbangan, stabilitas, dan produktivitas lingkungan hidup (Broszeit et al., 2019; KLHK, 2019; MEA, 2005).

Pembangunan dan meningkatnya aktivitas perekonomian memberikan dampak terhadap ketidakseimbangan ekosistem, antara lain penurunan sumber daya lahan dan penurunan sumber daya air. Upaya dalam pengelolaan dan perlindungan lingkungan perlu menerapkan prinsip pembangunan berkelanjutan dengan pendekatan memperhatikan daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup (Ernamaiyanti & Yunanda, 2019; DLH, 2018; KLHK, 2019). Dengan demikian, pemetaan sumber daya alam atau daya dukung lingkungan hidup mempunyai manfaat penilaian kapasitas penampungan di alam (populasi dan beban pencemar) dengan tujuan ternetralisasinya buangan tanpa menguras kapasitas alam.

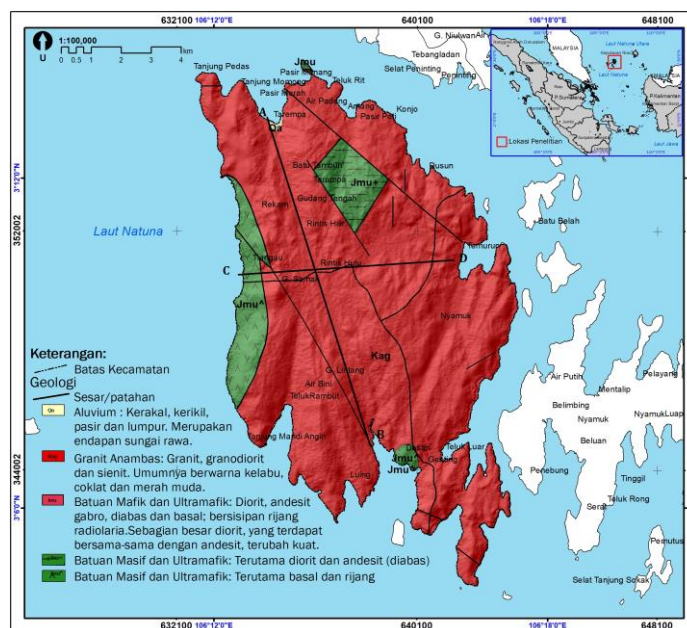
Perkembangan pembangunan daerah dan pengembangan wilayah sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik lingkungan salah satunya kondisi penyusun batuan (geologi) (BIG, 2018; KLHK, 2019). Isu permasalahan lingkungan fisik dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pembentukannya. Muta'ali (2019) menyebutkan bahwa diperlukan identifikasi kondisi lingkungan salah satunya dengan pendekatan geologi dan kenampakan fisik di atasnya. Struktur secara fisiografi, daerah Pulau Siantan dan sekitarnya (Anambas) berhubungan dengan Natuna dan Kalimantan Barat. Runtutan ofilit Jura dan sedimen laut dalam skala umur geologi Jura-kapur yang ada di Kalimantan merupakan batuan kerak samudera agak menerus ke Barat Laut hingga Kepulauan Anambas, demikian pula dengan batuan dasar benua yang diwakili oleh kenampakan batu granit, kapur, meskipun kenampakan granit di Anambas sedikit lebih muda (Samodra, 1995). Secara struktural, pengendapan di Anambas berlangsung selama masa umur geologi Miosen, dengan gaya tarik secara bersamaan atau sesudahnya sehingga terdapat kenampakan retas-retas atau patahan minor bersusun menengah dengan arah timur laut – barat daya dan barat laut – tenggara. Kondisi topografi di Pulau Siantan dengan daerah rendah 0 mdpal sepadan pantai atau pesisir (Kota tarempa) (Gambar 1) dan lokasi daerah tertinggi 367 mdpal merupakan perbukitan dari Gunung Samak di Kecamatan Siantan Selatan (Gambar 2). Pulau Siantan memiliki topografi perbukitan dengan morfologi datar hingga terjal. Kondisi dengan kenampakan fisik bergelombang dan berbukit memiliki potensi kemampuan daya dukung lingkungan yang dinamis, yang dipengaruhi oleh faktor penyusunnya (geologi) (BIG, 2018b).

Kondisi geologi regional di Pulau Siantan Kabupaten Anambas, tersusun atas tiga (3) batuan, yaitu batu terobosan (Kag), batu beku (Jmu), dan material endapan (Qa). Secara umum, formasi batuan Granit Amanbas (Kag) merupakan bagian dari batuan terobosan dengan umur kapur akhir. Formasi batuan Granit Anambas (Kag) secara umum mendominasi 89% dari penyusun geologi regional. Formasi Anambas (Kag) tersusun atas granit mengandung pirit arsenopirit dan hematit, ganodiorit dan sienit umumnya berwarna kelabu, coklat dan merah muda (KESDM, 2012, 2015). Formasi batu beku yaitu Batuan Mafik dan Ultramafik (Jmu) terdistribusi pada bagian tengah, barat dan selatan pulau (Gambar 3). Batuan mafik dan Ultramafik (Jmu) tersusun atas batuan diorit, andesit, gabro,

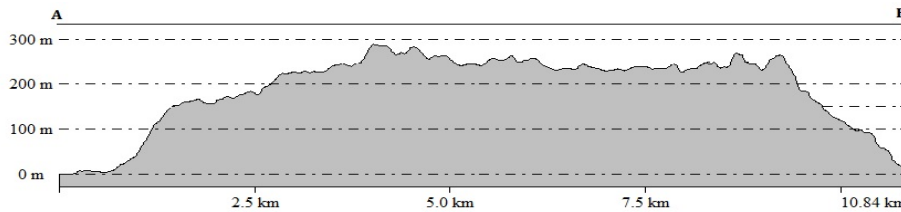
gabro porfir, diabas dan basal, bersisipan dengan rijang radiolaria (Samodra, 1995). Sebagian besar diorit yang terdapat bersamaan dengan andesit berubah kuat. Formasi Aluvium (Qa) atau endapan sedimen (pasiran) terdapat di pusat kawasan Kota Tarempa (bagian utara Pulau Siantan). Formasi Aluvium (Qa) tersusun atas kerakal, kerikil, pasir dan lumpur (KESDM, 2012). Formasi tersebut merupakan endapan sungai, rawa dan pantai. Berdasarkan kondisi penyusun batuan, menurut Fetter (2014) potensi air tanah termasuk potensi rendah yang dipengaruhi oleh batuan padu yang rendah akan menyimpan air tanah, sehingga dapat memunculkan indikasi kelangkaan air.

Kondisi hidrogeologi di Pulau Siantan, terdapat potensi produktivitas air tanah yang seragam, yaitu produktivitas langka (KESDM, 2015a, 2015b). Sumber air tanah sebagian besar berasal dari curah hujan, yang kemudian masuk meresap ke dalam bawah permukaan tanah menjadi akuifer (Febriarta et al., 2015; Febriarta & Larasati, 2020; Febriarta et al., 2018; Singhal & Gupta, 2010). Karakteristik produktivitas langka, terdapat nilai kelulusan rendah dan sangat rendah. Kelulusan/permeabilitas (K) merupakan kondisi yang menunjukkan kemampuan batuan meluluskan air di dalam rongga-rongga batuan, yang disajikan dengan satuan panjang/waktu (meter/hari) (BSN, 2005; Todd & Mays, 2005).

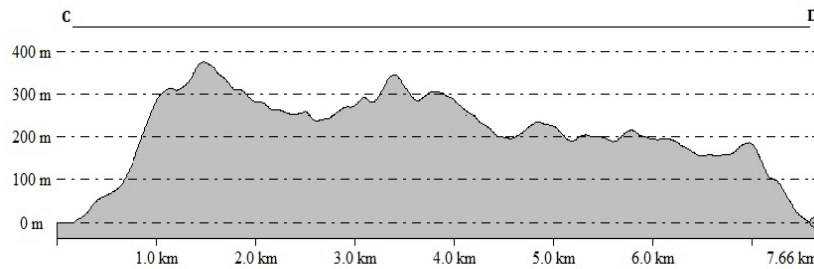
Karakteristik produktivitas langka dengan kelulusan rendah terdistribusi pada Formasi Aluvium (Qa) pada kawasan Kota Tarempa atau bagian utara pulau (Gambar 1). Sifat media aliran celah atau sarang dengan keterdapatannya air tanah pada lapisan batuan endapan lepas-lepas, aluvium endapan rawa terdiri atas material lepas berukuran kerikil, pasir, lempung, lumpur, dan gambut, kelulusan rendah dengan potensi debit <1 l/detik (KESDM, 2015b; Gunawan et al., 2013; Purnama et al., 2019). Sementara itu, produktivitas air tanah langka dengan kelulusan sangat rendah terdistribusi pada Formasi Granit Anambas (Kag) dan Batuan Mafik dan Ultramafik (Jmu). Karakteristik kelulusan sangat rendah berada pada litologi akuifer berupa batuan malihan dan beku yang tersusun atas granit, granodiorit, dan syenit. Berdasarkan karakteristik tersebut menurut BSN (2005) menyebutkan bahwa, potensi air tanah spasial dengan sifat batuan tersebut tergolong rendah hingga tidak terdapat air tanah (nihil).



Gambar 1. Kondisi Geologi Regional Pulau Siantan



Gambar 2. Penampang Melintang A-B (Utara-Selatan)



Gambar 3. Penampang Melintang C-D (Barat-Timur)

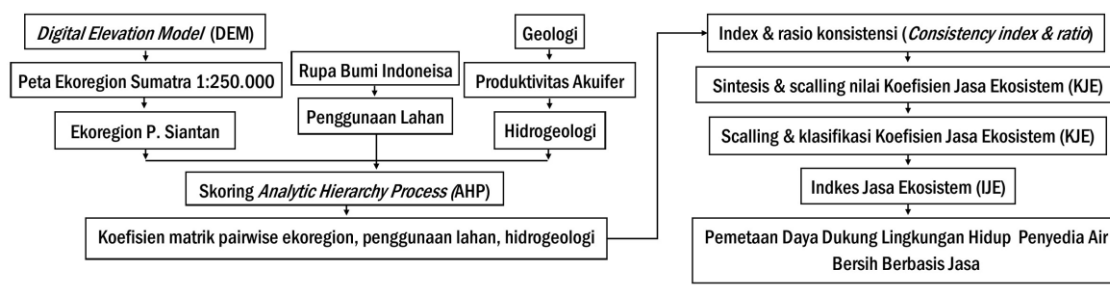
Dengan ditetapkannya Kota Tarempa (Pulau Siantan) sebagai Pusat Kegiatan Strategis Nasional (PKSN) Tarempa yang menurut Peraturan Presiden Nomor 43 Tahun 2020 ditetapkan sebagai kawasan perkotaan untuk mendorong pengembangan kawasan perbatasan negara. Maka perlu adanya informasi dasar atau informasi geospasial untuk inovasi percepatan pembangunan berkelanjutan (Brykała & Podgórski, 2020; Chen et al., 2021; Gao et al., 2020). Di dalam Rencana Kerja Pemerintah (RKP) arahan lokasi Kabupaten Anambas tahun 2017, salah satu program prioritas nasional adalah kegiatan peningkatan akses air minum dan sanitasi (Kementerian ATR/BPN, 2017). Dengan ditetapkannya sebagai kawasan kota, sumber daya yang utama yang harus ada untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia dan makhluk hidup di sekitarnya adalah sumber daya air (Anibas et al., 2016; Casagrande et al., 2021; Febriarta & Oktama, 2020; KLHK, 2019; Setyono et al., 2019).

Isu lingkungan di Kota Tarempa adalah potensi ketersediaan air yang terbatas (BIG, 2018a). Muta'ali (2019) dan Zhang et al., (2021) mengungkapkan bahwa penilaian daya dukung lingkungan dapat dinilai dengan penilaian geomorfologi terdapat penggunaan lahan. Pendekatan yang dapat digunakan untuk mengetahui kondisi kemampuan lingkungan adalah dengan pendekatan jasa ekosistem (P3EJ, 2017; P3ES, 2011; Febriarta, et al., 2018). Namun demikian Kang & Xu (2012) mengungkapkan bahwa diperlukan informasi penggunaan lahan secara ekstisting untuk dapat dievaluasi nilai daya dukung lingkungan. Jasa ekosistem merupakan manfaat yang didapatkan oleh manusia dari berbagai sumber daya alam (DLH, 2018; Hugé et al., 2020; Santoso et al., 2020). Zhang et al. (2021) mengungkapkan bahwa satuan daya dukung dapat dianalisis dengan satuan bentuk lahan. Seperti dalam penelitian Febriarta et al. (2020) mengungkapkan bahwa penilaian pendekatan geomorfologi (satuan bentuk lahan) dengan analisis ekoregion dibandingkan dengan penggunaan lahan eksisting belum dapat menghasilkan daya dukung dengan skala pemetaan yang menengah hingga detail. Penelitian sebelumnya berfokus pada ekoregion pada skala tinjau hingga menengah (1:100.000). Ada yang belum dijelaskan pada studi sebelumnya mengenai pemetaan pada skala lebih detail (1:50.000). Oleh karena

itu, penelitian ini berfokus pada pendetailan parameter ekoregion dan penggunaan lahan dengan satuan pemetaan lebih detail. Selain itu, penelitian ini menambahkan penilaian dari parameter sifat hidrogeologi yaitu potensi produktivitas akuifer air tanah dan debit air tanah yang dapat memberikan informasi yang lebih akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi daya dukung lingkungan hidup dari jenis penyedia air bersih. Hasil dari penelitian dapat menjadi informasi dasar dalam pengelolaan dan perlindungan air bersih bagi pemerintah daerah Tarempa, pemerintah pusat dalam inovasi percepatan informasi geospasial maupun dalam bagi pengambil kebijakan dalam pengembangan Kota Tarempa sebagai pusat kegiatan strategis nasional (PKSN).

Metode Penelitian

Lokasi kajian analisis daya dukung lingkungan hidup faktor penyedia air bersih berbasis jasa ekosistem berada di Pulau Siantan merupakan kota terdepan yang berbatasan batas negara Republik Indonesia bagian utara. Secara geografis lokasi tersebut berada di $3^{\circ}13'55.02''\text{LU}$ dan $106^{\circ}11'10.70''\text{BT}$ hingga $3^{\circ}4'27.14''\text{LU}-106^{\circ}17'33.08''\text{BT}$. Secara administrasi Pulau Siantan berada di Kabupaten Anambas, Provinsi Kepulauan Riau. Batas utara berbatasan dengan Laut Natuna Utara dan negara Thailand. Sebelah barat berbatasan dengan Pulau Jemaja, Laut Natuna, dan negara Malaysia. Sebelah selatan berbatasan dengan Pulau Airabu (Kepulauan Anambas) dan Laut Natuna. Sebelah timur berbatasan dengan Pulau Batubelah, Pulau Bajau, dan Laut Natuna (Gambar 1). Langkah untuk menghitung indeks daya dukung dan daya tampung mengacu pedoman KLH (2014) dan KLHK (2019) yang dilakukan dalam beberapa tahapan perhitungan, seperti yang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Penyusunan Daya Dukung Lingkungan Hidup

Penilaian Ekoregion, Hidrogeologi, Penutup Lahan, dan Pembobotan Analytical Hierarchy Process (AHP)

Mengacu pedoman penyusunan daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup KLHK (2019) disebutkan bahwa penilaian menggunakan data dan indikator terdiri atas dua konsep input data dasar keruangan (spasial) berupa ekoregion dan pemanfaatan lahan /penggunaan lahan dengan konsep output jasa ekosistem. Ekoregion merupakan suatu wilayah geografis yang memiliki kesamaan ciri iklim, tanah, air flora dan fauna asli, serta pola interaksi manusia dengan alam yang menggambarkan integritas sistem alam dan lingkungan hidup (KLH, 2014). Penutup lahan menggunakan rupa bumi Indonesia dengan klasifikasi penutup lahan atau penggunaan lahan skala kecil mengacu BSN (2014) yang diperoleh dari data penggunaan lahan BIG (2018c) dengan tahun perekaman tahun 2018. Data ekoregion (peta ekoregion) bersumber dari KLHK (2013), kemudian didetailkan menjadi skala 1:50.000 dengan pendekatan geomorfologi dengan bantuan interpretasi data

topografi, relief, dan kemiringan lereng mengacu KLHK (2019) menggunakan data *seamless digital elevation model nasional* (DEMNAS) dari BIG (2018a). Ekoregion merupakan unit analisis terkecil untuk inventarisasi data lingkungan dengan berbasis bentanglahan. Untuk mempertajam analisis daya dukung daya tampung lingkungan untuk penyedia air bersih menggunakan pendekatan hidrogeologi (Febriarta & Larasati, 2020; Febriarta & Purnama, 2020; Pekalongan, 2018). Data hidrogeologi diperoleh dari analisis sifat hidrologi (sifat ketersediaan air tanah pada batuan) dari KESDM (2012) (Gambar 1), KESDM (2015a) dan KESDM (2015b).

Penilaian setiap parameter ekoregion, hidrogeologi, dan penggunaan lahan menggunakan pendekatan pembobotan dari setiap parameter tersebut. Penilaian dengan pembobotan (pemberian kelas) untuk menghasilkan nilai bobot relatif antar kriteria dari setiap parameter (Saaty, 1980). Penilaian setiap parameter menggunakan pendekatan matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) secara bertingkat *analytical hierarchy process* (AHP). Untuk mendapatkan nilai dengan tingkat kepercayaan yang tinggi maka dilakukan valuasi standar dan normalisasi dari data populasi penilaian dengan perbandingan nilai indeks konsistensi dan rasio konsistensi (Meranti, 2017; Saaty, 2004; Setyaningrum & Febriarta, 2019). Nilai perbandingan korelasi penilaian dari *scoring* setiap parameter dengan konsistensi yang kecil untuk dapat digunakan untuk perhitungan dengan tingkat kepercayaan data yang tinggi. Persamaan nilai konsistensi indeks menggunakan persamaan (Saaty, 2004) dapat dilihat pada Persamaan 1 dan Persamaan 2.

$$CI = \frac{\lambda_{maks} - n}{n - 1} \dots \dots \quad (1)$$

Keterangan: CI = *Consistency Index*; λ_{maks} = nilai eigen faktor maksimal; n = jumlah data

$$CR = \frac{CI}{RI} \dots \dots \quad (2)$$

Keterangan: CR = *Consistency Ratio*; CI = *Consistency Index* (persamaan rumus 1); RI = *Random index* (Tabel 1)

Tabel 1. Random Index Consistency

n	Random Indeks	n	Random Indeks
1	0,00	6	1,24
2	0,00	7	1,32
3	0,58	8	1,41
4	0,90	9	1,45
5	1,12	10	1,49

Sumber: Saaty, 2004

Scaling Koefisien Jasa Ekosistem (KJE)

Nilai koefisien jasa ekosistem diperoleh dari penilaian matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) pada pembobotan matriks *Analytical Hierarchy Process* (AHP) sebelumnya, yang menunjukkan besar kecilnya nilai jasa ekosistem yang dominan. Nilai koefisien matriks diperoleh dari perkalian matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) ekoregion, hidrogeologi, dan penggunaan lahan. Pendekatan rumus yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan 3 (KLH, 2014; KLHK, 2019).

$$\text{KJE} = \text{Kec} \times \text{Kh} \times \text{Kpl} \dots \quad (3)$$

Keterangan: Kec = koefisien berdasarkan ekoregion; Kh = koefisien berdasarkan hidrogeologi; Kpl = koefisien berdasarkan penutup lahan

Scaling dan Klasifikasi Koefisien Jasa Ekosistem (KJE)

Penilaian dan klasifikasi koefisien jasa ekosistem (KJE), dinyatakan dengan nilai rentang anatra 0-1. Fungsi dari pemberian nilai skala tersebut adalah jika nilai mendekati nilai 1, maka koefisien jasa ekosistem (KJE) semakin tinggi. Sebaliknya bila nilai dengan nilai 0, maka memiliki tingkat jasa ekosistem yang rendah. Hasil dari *scaling* nilai koefisien jasa ekosistem menunjukkan beragam dipengaruhi oleh nilai maksimum dan minimum setiap parameter. Persamaan 4 merupakan pendekatan rumus yang digunakan yaitu pendekatan geometrik luasan spasial (KLH, 2014).

$$X = B/A \dots \quad (4)$$

Keterangan: X = koefisien jasa ekosistem; B = nilai maksimum; A = nilai minimum; n = jumlah kelas

Indeks Jasa Ekosistem (IJE)

Nilai indeks jasa ekosistem (IJE) diperoleh dari perhitungan *scaling* dan klasifikasi koefisien jasa ekosistem. Nilai indeks jasa ekosistem (IJE) merupakan nilai indeks besar-kecil dari setiap jasa ekosistem dari rentang nilai 0-1. Untuk dapat merepresentasikan kondisi wilayah atau spasial (luas), dihitung pembobotan dengan satuan luas, dengan persamaan rumus (Persamaan 5) (KLH, 2014).

$$\text{IJE}_{i,x} = \text{KJE}_{i,a} \times L_{pa} / L_{\text{total}} \dots \quad (5)$$

Keterangan: IJE _{i,x} = nilai indeks jasa ekosistem; KJE _{i,x} = koefisien jasa ekosistem; L_{pa} = luas polygon a pada nilai KJE a; L_{total} = luas poligin total (km²)

Hasil dan Pembahasan

Penutup Lahan, Ekoregion, dan Hidrogeologi

Kondisi penutup lahan menurut (BAPPEDA Kabupaten Meranti, 2017) didominasi oleh vegetasi hutan. Pembaharuan data penggunaan lahan menggunakan data dari (BIG, 2018d) dengan tahun perekaman tahun 2018 dan dilakukan validasi data di lapangan. Validasi atau pengujian kebenaran data penggunaan lahan dilakukan dengan pengamatan langsung di lapangan (lihat Gambar 5). Berdasarkan perhitungan *pairwise comparison* setiap parameter daya dukung menghasilkan nilai koefisien jasa ekosistem (KJE). Berdasarkan perhitungan *analytical hierarchy process* (AHP) diperoleh nilai rasio konsistensi (CR) sebesar 4,7%, dari skala maksimal rasio konsistensi (CR) sebesar 10% (Saaty, 2004). Nilai 4,7% dapat digunakan untuk analisis, nilai tersebut termasuk kelas nilai dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Luas penggunaan lahan dengan nilai jasa lingkungan di Pulau Siantan disajikan pada Tabel 2 dan distribusi penggunaan lahan disajikan pada Gambar 6 (a).

Penggunaan lahan pada tahun 2018 merupakan daerah permukiman terdistribusi mendekati daerah pusat pemerintahan. Terutama penggunaan lahan di Kecamatan Siantan

yang merupakan pusat kota dan pusat pemerintahan Kota Tarempa (bagian utara Pulau Siantan), vegetasi didominasi dengan permukiman, tegalan, dan lahan terbangun. Penggunaan lahan di daerah penelitian (Pulau Siantan) didominasi oleh hutan. Kondisi tersebut menurut (Wang et al., 2014) merupakan daerah tangkapan air hujan (meteorologi) yang potensial. Tetapi dengan kondisi ketebalan tanah yang dangkal dan dengan litologi akuifer batuan padu, hanya sedikit yang dapat tersimpan di dalam tanah (Guo et al., 2017). Kondisi tersebut menurut Mirzahosseini et al. (2021) dengan rendahnya infiltrasi ke dalam tanah mengakibatkan aliran permukaan (*runoff*) yang tinggi mengalir ke sungai. Berdasarkan penilaian jasa lingkungan pada penggunaan lahan hutan dan tegalan memiliki potensi ketersediaan air yang tinggi dikarenakan dapat menangkap dan menyimpan air dalam waktu yang relatif lama. Li et al. (2018) juga menyebutkan hal yang serupa, yaitu wilayah atau daerah tangkapan hujan memiliki potensi daya dukung ketersediaan air tinggi. Penggunaan lahan dengan kerapatan vegetasi yang semakin jarang dan terbuka memiliki potensi keterdapatannya air yang rendah, hal tersebut dipengaruhi oleh, laju infiltrasi yang rendah dan potensi evapotranspirasi yang tinggi (Ma et al., 2017; Singhal & Gupta, 2010).

Ekoregion merupakan satuan terkecil analisis spasial yang mempunyai karakteristik informasi geomorfologi (morfologi, morfokronologi, morfogenesis, morfoansem) dengan informasi penyusun batuan (geologi) (Hammar et al., 2020; Hipsey et al., 2020). Definisi tersebut sejalan dengan Akhtar et al., (2020) dan Sharma et al., (2020), sehingga dalam pemetaan daya dukung lingkungan menggunakan satuan pemetaan bentuk lahan (Lilburne et al., 2020; von Thenen et al., 2020; Zhang et al., 2020). Secara umum Pulau Siantan merupakan bentukan dari proses struktural dengan kondisi topografi (relief) berupa datar hingga perbukitan, sehingga termasuk ekoregion perbukitan terdenudasional (terombak) pada skala 1:5.000.000 (P3ES, 2011). Pemetaan dengan skala lebih detail dilakukan dengan analisis dan pembaharuan data ekoregion dilakukan dengan menggunakan analisis geomorfologi dari *digital elevation model* nasional (DEMNAS) bersumber dari BIG (2018a) dan dilakukan pengamatan dilapangan seperti pada Gambar 5. Berdasarkan analisis dengan skala pemetaan 1: 50.000 dan pengamatan lapangan untuk validasi dan evaluasi data dasar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5b, pembaharuan data dilapangan diperoleh kondisi geologi berupa rombakan batuan berupa perselingan diorit. Skala data yang semula hanya terdapat satu unit ekoregion berupa perbukitan struktural (terdenudasional) menurut P3ES (2011), dapat didetailkan menjadi sembilan (9) ekoregion. Hasil analisis ekoregion pada skala 1: 50.000 disajikan pada Tabel 3 dan distribusi ekoregion disajikan pada Gambar 6(b). Dari hasil penilaian menunjukkan bahwa jasa ekosistem sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (Teixeira et al., 2019; Culhane et al., 2018). Berdasarkan hasil penelitian tersebut disarankan analisis ekosistem disusun secara hierarkis menurut signifikansi dalam penyediaan jasa ekosistem. Hasil studi mendapatkan satuan unit terkecil analisis berupa unit lahan yang lebih detail, dibandingkan hasil penelitian dengan pendekatan ekoregion yang diinterpretasi secara morfologi dan geneisis saja seperti pada penelitian Febriarta et al. (2020). Hasil penelitian juga mendapatkan satuan analisis yang lebih detail dibandingkan hasil penelitian Febriarta & Oktama (2020) dengan interpretasi morfokronologi dan morfoansem. Perhitungan analisis perbandingan dengan pendekatan *analytical hierarchy process* (AHP), diperoleh nilai rasio konsistensi (CR) sebesar 4,6%. Nilai tersebut memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi dan dapat digunakan untuk analisis daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup.

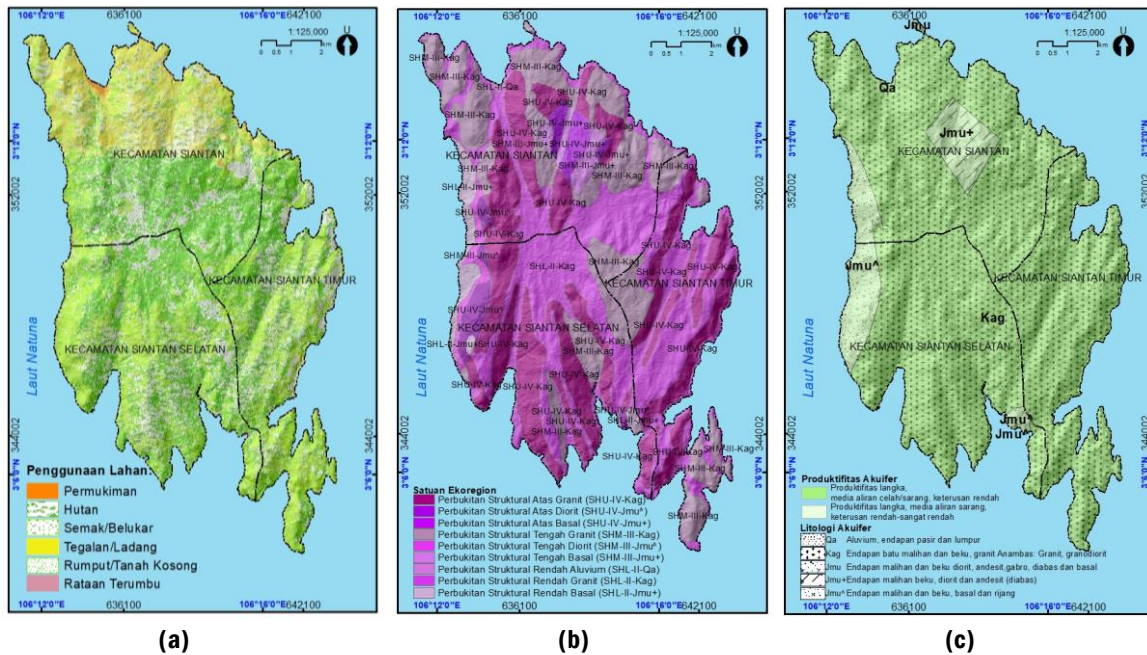


Gambar 5. Validasi dan Pembaharuan Data di Lapangan (a) Sumber Air (*Mata Air*) di Desa Sianta dan (b) Pengamatan Rombakan Batuan (*Diorit*)

Parameter untuk mendapatkan kondisi penyedia air bersih untuk daya dukung lingkungan hidup menggunakan parameter informasi keterdapatannya air tanah. Parameter yang digunakan antara yaitu potensi akuifer, kondisi litologi akuifer, dan sifat keterusan. Potensi sebaran hidrogeologi merupakan informasi keterdapatannya air tanah dari sebaran, sifat pengaliran, dan keterusan air tanah (BSN, 2002; KESDM, 2015a). Secara umum kondisi hidrogeologi tersusun atas produktivitas langka dengan keterusan rendah dan keterusan sangat rendah. Produktivitas langka dipengaruhi oleh sifat fisik batuan dalam menahan dan meloloskan air tanah (Fetter, 2014; Fitoka et al., 2020). Dengan demikian, zona yang langka air tanah memiliki daya dukung rendah, hal tersebut dipengaruhi oleh kemampuan batuan yang sedikit menyimpan air dan secara morfologi pada daerah yang semakin curam air tanah mengalir ke daerah dataran (lembah) sedangkan aliran permukaan (*runoff*) cepat jenuh dan mengalir ke aliran sungai. Seperti pada hasil penelitian Wang et al. (2021) disebutkan bahwa karakteristik kondisi tanah yang cepat jenuh cepat terjadi aliran permukaan (*runoff*) memiliki kualitas yang rendah, sehingga kategori tersebut termasuk daya dukung rendah. Distribusi kondisi hidrogeologi disajikan pada Gambar 6 (c). Berdasarkan perhitungan, diketahui nilai rasio konsistensi (CR) sebesar 9,1% untuk parameter hidrogeologi. Nilai rasio konsistensi (CR) 9,1%, termasuk nilai yang ditoleransi, dikarenakan berada di bawah nilai rasio konsistensi (CR) 10%, sehingga dapat digunakan untuk analisis (Enrique & Milagros, 2017; Lin & Kou, 2021; Rosellon-Druker et al., 2020).

Tabel 2. Luas Penggunaan Lahan dan Perhitungan Jasa (KJE)

Penggunaan Lahan	Luas (ha)	%	Jasa Lingkungan
Hutan	5.926,11	56,58	0,39
Tegalan/Ladang	442,40	4,22	0,26
Semak/Belukar	914,83	8,73	0,17
Rumput/Tanah Kosong	3.068,58	29,30	0,09
Permukiman	102,29	0,98	0,04
Rataan Terumbu	20,49	0,20	0,02



Gambar 6. Parameter Daya Dukung Lingkungan Terhadap Penyedia Air Bersih (a) Penggunaan Lahan; (b) Ekoregion; dan (c) Hidrogeologi

Tabel 3. Luas Ekoregion dan Perhitungan Jasa (KJE)

Ekoregion	Luas (ha)	%	Jasa Lingkungan
Perbukitan struktural mesozoik rendah curam endapan aluvium (pasiran) (HL-II-Qa)	12,05	0,11	29,70
Perbukitan struktural mesozoik rendah curam batuan granit (SHL-II-Kag)	3.904,77	37,01	16,70
Perbukitan struktural mesozoik bagian tengah curam batuan basal (SHL-II-Jmu ⁺)	190,83	1,81	15,70
Perbukitan struktural mesozoik bagian tengah curam batuan granit (SHM-III-Kag)	2.331,48	22,10	13,90
Perbukitan struktural mesozoik rendah curam batuan basal (SHM-III-Jmu ⁺)	283,68	2,69	13,30
Perbukitan struktural mesozoik bagian tengah curam batuan diorit (SHM-III-Jmu [^])	135,59	1,29	2,90
Perbukitan struktural mesozoik bagian atas terjal batuan granit (SHU-IV-Kag)	3.262,93	30,93	3,40
Perbukitan struktural mesozoik bagian atas terjal batuan diorit (SHU-IV-Jmu ⁺)	209,89	1,99	2,40
Perbukitan struktural mesozoik bagian atas terjal batuan basal (SHU-IV-Jmu [^])	218,75	2,07	2,00

Tabel 4. Luas Hidrogeologi dan Perhitungan Jasa (KJE)

Hidrogeologi	Luas (ha)	%	Jasa Lingkungan
Produktivitas Langka, Keterusan rendah (Qa)	12,051	0.12	58.7
Produktivitas Langka, Keterusan rendah (Kag)	9.424,9	89.97	20.5
Produktivitas Langka, Keterusan sangat rendah (Jmu)	7,19	0.07	11.3
Produktivitas Langka, Keterusan sangat rendah (Jmu ⁺)	400,72	3.83	5.3
Produktivitas Langka, Keterusan sangat rendah (Jmu [^])	630,83	6.02	4.3

Daya Dukung Lingkungan Jasa Ekosistem Penyedia Air Bersih

Daya dukung daya tampung lingkungan hidup merupakan kemampuan lingkungan fisik penyedia air untuk dimanfaatkan (KLHK, 2019). Nilai daya dukung daya tampung diperoleh dari nilai total dari setiap parameter (Persamaan 5) kemudian diklasifikasikan ke dalam lima (5) tingkat daya dukung lingkungan hidup seperti yang disajikan pada Tabel 4 dan secara spasial disajikan pada Gambar 7. Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui bahwa daya dukung lingkungan hidup dengan nilai sangat tinggi seluas 3.431,6 ha (32,9%) tersebar merata di Pulau Siantan dengan karakteristik fisik berupa lereng tengah dengan kondisi yang didominasi kemiringan lereng miring hingga dataran rendah dengan kondisi kemiringan lereng datar. Kota Terempa termasuk ke dalam daya dukung sangat tinggi yang sangat dipengaruhi juga oleh bagian hilir jaringan daerah aliran sungai dan berada sebagian di Formasi Aluvium (endapan pasir) yang merupakan daerah cekungan keterdapatan air tanah di daerah pesisir. Hasil tersebut mirip serupa dengan Febriarta et al. (2018) dengan kondisi umur batuan yang sama, karakteritik batuan padu, menunjukkan daya dukung tinggi di daerah pengendapan pada dataran rendah. Menurut Zheng (2020) nilai daya dukung tinggi di daerah pesisir dipengaruhi oleh ketersediaan air tanah yang mengalir mendekati laut, tetapi secara kualitas belum tentu baik dikarenakan pada dataran rendah merupakan muara dari akumulasi air dari bagian hulu yang membawa bahan pencemar (polutan).

Daya dukung lingkungan hidup penyedia air bersih dengan kelas tinggi, memiliki luas yang paling kecil yaitu 132 ha atau seluas 1,26% dari luas total Pulau Siantan (10.474,7 ha). Daya dukung lingkungan tinggi memiliki kriteria berada pada bentuk lahan ekoregion perbukitan bagian lereng tengah hingga lereng bawah (morfologi landai). Distribusi daya dukung lahan tinggi banyak ditemukan pada lembah antar perbukitan dengan kondisi penggunaan lahan berupa lahan hutan, tegalan/ladang dan semak/belukar. Secara kondisi penyusun batuan (geologi regional), berada pada endapan batu malihan dengan dominasi rombakan batuan granit. Material rombakan seperti yang diungkapkan Świąder et al. (2020) wilayah dengan morfologi bergelombang dan sifat batuan yang terombak memiliki ketersediaan air sedang hingga tinggi. Daya dukung lingkungan penyedia air bersih dengan kelas sedang, memiliki luas 648,6 atau seluas 6,2% dari luas Pulau Siantan. Daya dukung lingkungan sedang memiliki karakteristik lingkungan dengan dominasi perbukitan lereng tengah dengan kelas kemiringan lereng agak miring (8-15%).

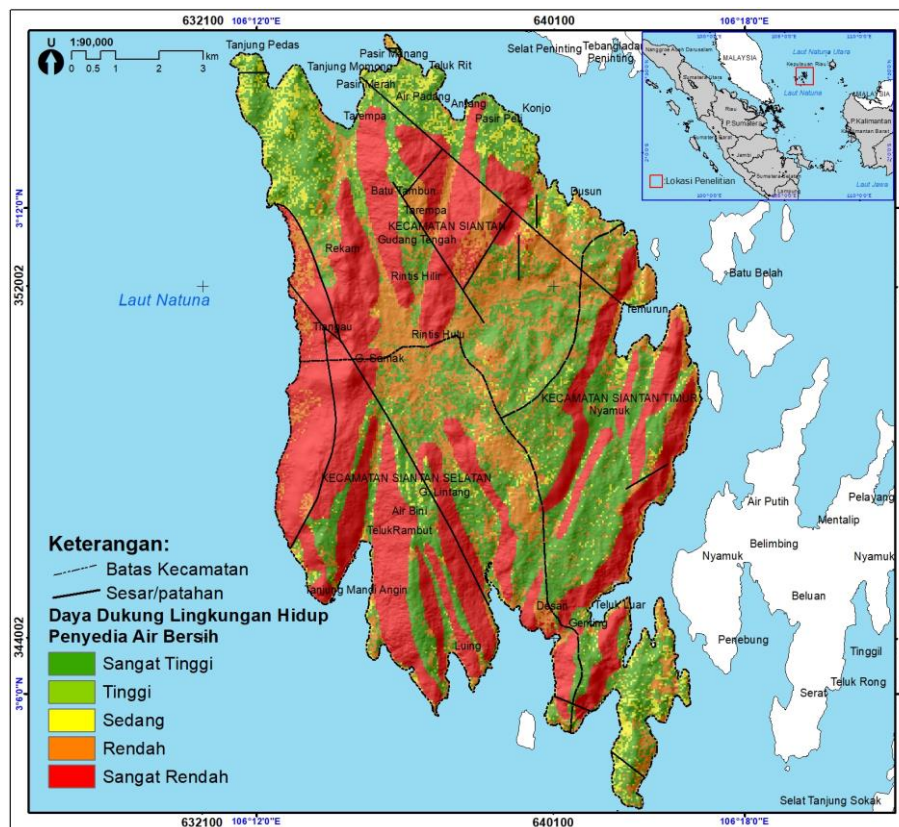
Tabel 5. Luas Daya Dukung Lingkungan Hidup Penyedia Air Bersih

Kecamatan	Sangat Tinggi		Tinggi		Sedang		Rendah		Sangat Rendah	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Siantan (Tarempa)	1.264,4	12,1	131,5	1,26	359,1	3,4	1.043,45	1,0	1.365,26	13,0
Siantan Selatan (Air Bini)	953,7	9,1	-	-	94,9	0,9	681,26	6,5	1.831,64	17,5
Timur (Nyamuk)	1.213,4	11,64	0,5	0,005	194,6	1,8	465,65	4,4	827,08	7,9
Total	3.431,6	32,9	132,0	1,26	648,6	6,2	2.190,36	21	4.023,98	38,5

Daya dukung lingkungan hidup penyedia air bersih dengan kelas rendah terdistribusi pada topografi perbukitan dengan kondisi morfologi kemiringan lereng agak miring. Karakteristik daya dukung rendah dicirikan dengan penggunaan lahan dengan dominasi semak/belukar dan rumput/tanah kosong. Hal tersebut serupa kondisi ekosistem dengan daya dukung rendah yang dicirikan dengan vegetasi yang tidak lebat (Pogue et al., 2020; Small et al., 2017). Daya dukung rendah dicirikan dengan manfaat yang sedikit dari yang disediakan lingkungan, hal tersebut sejalan dengan ungkapan Zhang et al. (2021) bahwa kondisi lingkungan dengan wilayah yang ekstrem (topografi curam/terjal) dan wilayah yang gersang (lahan kosong) atau tidak menguntungkan untuk ditinggali memiliki daya dukung rendah.

Berdasarkan perhitungan, distribusi daya dukung lingkungan rendah secara spasial banyak ditemukan ditengah Pulau Siantan pada daerah dataran, dengan penyusun batuan (geologi) yang didominasi oleh endapan rombakan batu malihan yang didominasi granit. Sifat pada penyusun tersebut bersifat rendah dikarenakan media antar butir padu atau kompak sehingga ruang menyimpan air tanah terbatas (Bhakar & Singh, 2018; Gutierrez et al., 2021). Kondisi tersebut mirip dengan hasil penelitian Wicaksono et al. (2020) dan Anzaldua et al. (2018) mengungkapkan bahwa batuan padu memiliki porositas yang rendah yang dipengaruhi oleh sifat media aliran berupa celah atau rekah dengan nilai jasa ekosistem yang rendah. Berdasarkan hasil penelitian luas daya dukung lingkungan rendah seluas 2.190,36 ha atau seluas 21% (Tabel 4) dari luas Pulau Siantan.

Daya dukung lingkungan sangat rendah secara keruangan (spasial) terdapat dengan kondisi topografi perbukitan lereng atas dengan kondisi morfologi miring hingga curam, secara spasial daya dukung sangat rendah mengelilingi Pulau Siantan seperti yang disajikan pada Gambar 7. Inácio et al. (2020) dan Bagstad et al. (2018) juga menjelaskan bahwa lingkungan kondisi ekstrem yang dicirikan dengan topografi terjal atau sulit untuk ditinggali memiliki kemampuan penyedia jasa ekosistem yang rendah, dikarenakan manfaat yang dapat diambil atau diolah dari alam sangat terbatas. Luas daya dukung lingkungan sangat rendah adalah 4.023,98 ha atau seluas 38% dari luas wilayah Pulau Siantan. Berdasarkan luas wilayah, sebaran daya dukung lingkungan sangat rendah mendominasi kondisi penyedia lingkungan untuk air bersih.



Gambar 7. Daya Dukung Lingkungan Hidup Penyedia Air Bersih

Berdasarkan perhitungan daya dukung lingkungan penyedia air bersih dengan pendekatan jasa ekosistem, diketahui bahwa perikat pertama adalah daya dukung lingkungan sangat rendah (38,5%), peringkat kedua daya dukung lingkungan sangat tinggi

(32,9%), peringkat ketiga daya dukung lingkungan rendah (21%), peringkat keempat daya dukung lingkungan sedang (6,2%), dan peringkat kelima (terakhir) daya dukung lingkungan tinggi (1,36%). Berdasarkan luas nilai daya dukung lingkungan, secara umum daya dukung lingkungan penyedia air bersih adalah sangat rendah. Faktor tersebut dipengaruhi oleh kondisi topografi perbukitan dengan morfologi miring dan formasi batuan yang batuan berupa endapan dan rombakan batuan granit yang memiliki kelulusan yang rendah dan bersifat akuifug. Hubungan kondisi lingkungan dengan potensi rendah dalam menyimpan air menjadikan nilai jasa ekosistem yang rendah (Anim-Gyampo et al., 2019; Watson et al., 2016; Zulian et al., 2018). Kondisi tersebut dipengaruhi oleh sifat akuifug pada rombakan batuan granit (batuan kompak), tidak dapat menyimpan dan meloloskan air tanah dalam jumlah yang besar.

Kesimpulan

Hasil penilaian (indeks) daya dukung lingkungan dari penyedia air bersih dengan metode jasa ekosistem dengan menggunakan parameter ekoregion pada skala interpretasi menengah, penggunaan lahan dan penambahan informasi kondisi hidrogeologi menghasilkan rentang yang panjang sehingga dapat diidentifikasi faktor dominan yang mempengaruhi. Dibutuhkan data dengan skala pemetaan besar untuk menghasilkan indeks daya dukung yang detail. Pendekatan daya dukung lingkungan hidup dapat dikembangkan dengan parameter dinamis, seperti neraca sumber daya air untuk mendapatkan hasil yang lebih representatif terhadap pemanfaatan sumber daya. Penilaian zona daya dukung daya lingkungan hidup dapat digunakan sebagai informasi dasar pengelolaan, langkah perlindungan dan mitigasi keterdapatan sumber daya air, dan diharapkan dapat digunakan dalam proses pengambilan keputusan untuk mencapai hasil lingkungan yang bermanfaat. Saran yang dapat diberikan dalam pengelolaan sumber daya air adalah memanfaatkan dan memaksimalkan air limpasan atau air permukaan pada daerah tekuk lereng (lembah), pemanfaatan mataair pada daerah topografi perbukitan lereng tengah dengan perlindungan daerah tangkapan air tanah (daerah dengan topografi perbukitan atas) dan daerah aliran sungai.

Ucapan Terima Kasih

Artikel ini merupakan salah satu bagian dari analisis lanjut dari penelitian terkait penyusunan Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) Wilayah Pusat Kegiatan Strategis Nasional (PKSN) di Kepulauan Anambas, Kabupaten Kepulauan Riau yang difasilitasi oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) Republik Indonesia. Ucapan terima kasih ditujukan kepada Pusat Pemetaan Tata Ruang dan Atlas, Badan Informasi Geospasial (BIG) Republik Indonesia dan Badan Penelitian, Pembangunan dan Perencanaan Daerah (BALITBANGPEDA) Kabupaten Anambas yang telah memfasilitasi dan mendukung penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Akhtar, M., Zhao, Y., Gao, G., Gulzar, Q., Hussain, A., & Samie, A. (2020). Assessment of ecosystem services value in response to prevailing and future land use/cover changes in Lahore, Pakistan. *Regional Sustainability*, 1(1), 37–47. doi: 10.1016/j.regus.2020.06.001.
- Anibas, C., Kukral, J., Possemiers, M., & Huysmans, M. (2016). Assessment of seasonal aquifer thermal energy storage as a groundwater ecosystem service for the Brussels-Capital Region: Combining groundwater flow, and heat and reactive transport modeling. *Energy Procedia*, 97, 179–185. doi:

- 10.1016/j.egypro.2016.10.048.
- Anim-Gyampo, M., Anornu, G. K., Appiah-Adjei, E. K., & Agodzo, S. K. (2019). Quality and health risk assessment of shallow groundwater aquifers within the Atankwidi basin of Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100217. doi: 10.1016/j.gsd.2019.100217.
- Anzaldua, G., Gerner, N. V., Lago, M., Abhold, K., Hinzmann, M., Beyer, S., ... Birk, S. (2018). Getting into the water with the ecosystem services approach: The DESSIN ESS evaluation framework. *Ecosystem Services*, 30, 318–326. doi: 10.1016/j.ecoser.2017.12.004.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2002). Penyusunan neraca sumber daya – bagian 1: Sumber daya air spasial SNI 19-6728.1-2002. *Badan Standardisasi Nasional (BSN)*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2005). *Penyelidikan potensi air tanah skala 1 : 100 . 000 atau lebih besar SNI 13-7121-2005*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Bagstad, K. J., Cohen, E., Ancona, Z. H., McNulty, S. G., & Sun, G. (2018). The sensitivity of ecosystem service models to choices of input data and spatial resolution. *Applied Geography*, 93, 25–36. doi: 10.1016/j.apgeog.2018.02.005.
- Bhakar, P., & Singh, A. P. (2018). Life cycle assessment of groundwater supply system in a hyper-arid region of India. *Procedia CIRP*, 69, 603–608. doi:10.1016/j.procir.2017.11.050.
- Bappeda Kabupaten Meranti. (2017). *Daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup Kabupaten Meranti*. Selat Panjang: Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (BAPPEDA) Kabupaten Kepulauan Meranti.
- BIG. (2018a). *DEMNAS 1219-6 s/d DEMNAS 1320-21*. Indonesia: Badan Informasi Geospasial.
- BIG. (2018b). *Penyusunan peta rencana detail tata ruang (RDTR) Wilayah Pusat Kawasan Strategis Nasional (PKSN) Perbatasan Negara* (Laporan Ak; D. B. IGT, Ed.). Bogor: Badan Informasi Geospasial.
- BIG. (2018c). *Peta digital Kabupaten Kepulauan Anambas*. Bogor: Badan Informasi Geospasial (BIG).
- Broszeit, S., Beaumont, N. J., Hooper, T. L., Somerfield, P. J., & Austen, M. C. (2019). Developing conceptual models that link multiple ecosystem services to ecological research to aid management and policy, the UK marine example. *Marine Pollution Bulletin*, 141, 236–243. doi:10.1016/j.marpolbul.2019.02.051.
- Brykala, D., & Podgórski, Z. (2020). Evolution of landscapes influenced by watermills, based on examples from Northern Poland. *Landscape and Urban Planning*, 198, 103798. doi:10.1016/j.landurbplan.2020.103798.
- BSN. (2014). *Standar Nasional Indonesia (SNI) nomor 7645-1:2014 tentang klasifikasi penutup lahan-bagian 1: skala kecil dan menengah*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Casagrande, E., Recanati, F., Rulli, M. C., Bevacqua, D., & Melià, P. (2021). Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon. *Ecological Indicators*, 121, 107155. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107155.
- Chen, H.-P., Lee, M., & Chiueh, P.-T. (2021). Creating ecosystem services assessment models incorporating land use impacts based on soil quality. *Science of The Total Environment*, 773, 145018. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145018.
- Culhane, F. E., Frid, C. L. J., Royo Gelabert, E., White, L., & Robinson, L. A. (2018). Linking marine ecosystems with the services they supply: what are the relevant service providing units? *Ecological Applications*, 28(7), 1740–1751. doi: 10.1002/eap.1779.
- Das, M., & Das, A. (2019). Dynamics of urbanization and its impact on urban ecosystem services (UESs): A study of a medium size town of West Bengal, Eastern India. *Journal of Urban Management*, 8(3), 420–434. doi: 10.1016/j.jum.2019.03.002.
- DLH. (2018). *Daya dukung daya tampung Kabupaten Semarang* (Laporan Ak). Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Semarang.
- Enrique, M., & Milagros, P. R. (2017). *Practical decision making: An introduction to the analytic hierarchy process (AHP) using super decisions*. Springer International Publishing: Springer Briefs in Operations Research.
- Ernamaiyanti, & Yunanda, M. (2019). Analisis daya dukung dan daya tampung lahan pengembangan perumahan dan permukiman Provinsi Banten. *Jurnal Teknik Sipil UNPAL*, 9(1), 25–31.
- Febriarta, E., Haryono, E., & Adji, T. N. (2015). Aplikasi teknologi isotop alam untuk menentukan asal usul air

- tanah pesisir. *Seminar Nasional Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai Ke-1, 1*, 100–105. doi:10.17605/osf.io/7a5m6.
- Febriarta, E., & Larasati, A. (2020). Karakteristik akuifer air tanah dangkal di endapan muda Merapi Yogyakarta. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan, 12*(2), 84–99. doi:10.20885/jstl.vol12.iss2.art1.
- Febriarta, E., & Oktama, R. (2020). Pemetaan daya dukung lingkungan berbasis jasa ekosistem penyedia pangan dan air bersih di Kota Pekalongan. *Jurnal Ilmu Lingkungan, 18*(2), 283–289. doi:10.14710/jil.18.2.283-289.
- Febriarta, E., Oktama, R., & Purnama, S. (2020). Analisis daya dukung lingkungan berbasis jasa ekosistem penyediaan pangan dan air bersih di Kabupaten Semarang. *Geomedia: Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian, 18*(1), 12–24. doi:10.21831/gm.v18i1.30612.
- Febriarta, E., Prabawa, B. A., & Rosaji, F. S. C. (2018). Sumber daya air di Pulau Pelapis Kepulauan Karimata, Kabupaten Kayong Utara, Kalimantan Barat. *Seminar Nasional IV Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, 4*, 174–181. doi:10.17605/osf.io/v6nx8.
- Febriarta, E., & Purnama, S. (2020). Identifikasi ketersediaan air tanah dengan electromagnetic very low frequency (EM-VLF) di non cekungan air tanah Kecamatan Ungaran Timur. *Jurnal Geosains Dan Teknologi, 3*(2), 52–62. doi:10.14710/jgt.3.2.2020.52-62.
- Febriarta, E., Vienastra, S., & Rosaji, F. S. candra. (2018). Identifikasi kapasitas embung Tambakboyo Yogyakarta. *Seminar Nasional IV Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai, 4*, 200–210.
- Fetter, C. W. (2014). *Applied Hydrogeology*. England: Pearson New Internasional Edition.
- Fitoka, E., Tompoulidou, M., Hatziiordanou, L., Apostolakis, A., Höfer, R., Weise, K., & Ververis, C. (2020). Water-related ecosystems' mapping and assessment based on remote sensing techniques and geospatial analysis: The SWOS national service case of the Greek Ramsar sites and their catchments. *Remote Sensing of Environment, 245*, 111795. doi:10.1016/j.rse.2020.111795.
- Fitria, L. M., Ni'mah, N. M., & Danu, L. K. (2019). Kerentanan fisik terhadap bencana banjir di Kawasan Perkotaan Yogyakarta. *Reka Ruang, 3*(1), 1–9. doi:10.33579/rkr.v2i1.1048.
- Gao, Y., Zhang, S.-X., Geng, R.-T., Ren, G.-P., Cui, L.-W., & Xiao, W. (2020). Control selection for the assessment of protected areas in the Hengduan Mountains: A case study in Yunlong Tianchi National Nature Reserve, China. *Global Ecology and Conservation, 23*, e01170. doi:10.1016/j.gecco.2020.e01170
- Grizzetti, B., Liqueste, C., Pistocchi, A., Vigiak, O., Zulian, G., Bouraoui, F., ... Cardoso, A. C. (2019). Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters. *Science of The Total Environment, 671*, 452–465. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.155
- Gunawan, W. A. ., Sisinggih, D., & Dermawan, V. (2013). Studi kerentanan air tanah terhadap kontaminan di cekungan airtanah negara Kabupaten Jembrana. *Jurnal Pengairan, 4*(2), 1–10.
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors, 17*(4), 777. doi:10.3390/s17040777
- Gutierrez, M., Bekessy, S. A., & Gordon, A. (2021). Biodiversity and ecosystem services in strategic environmental assessment: An evaluation of six Australian cases. *Environmental Impact Assessment Review, 87*, 106552. doi:10.1016/j.eiar.2021.106552
- Hammar, L., Molander, S., Pålsson, J., Schmidtbauer Crona, J., Carneiro, G., Johansson, T., ... Andersen, J. H. (2020). Cumulative impact assessment for ecosystem-based marine spatial planning. *Science of The Total Environment, 734*, 139024. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139024
- Hidayat, F., & Nagara, R. P. (2019). Dataset batas wilayah administrasi untuk penataan ruang wilayah. *Seminar Nasional Geomatika, 3*, 441. doi:10.24895/SNG.2018.3-0.984
- Hipsey, M. R., Gal, G., Arhonditsis, G. B., Carey, C. C., Elliott, J. A., Frassl, M. A., ... Robson, B. J. (2020). A system of metrics for the assessment and improvement of aquatic ecosystem models. *Environmental Modelling & Software, 128*, 104697. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104697
- Hugé, J., Rochette, A. J., de Béthune, S., Parra Paitan, C. C., Vanderhaegen, K., Vandervelden, T., ... Janssens de Bisthoven, L. (2020). Ecosystem services assessment tools for African Biosphere Reserves: A review and user-informed classification. *Ecosystem Services, 42*, 101079. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101079
- Inácio, M., Karnauskaitė, D., Baltranaitė, E., Kalinauskas, M., Bogdzevič, K., Gomes, E., & Pereira, P. (2020). Ecosystem services of the Baltic Sea: An assessment and mapping perspective. *Geography and Sustainability, 1*(4), 256–265. doi:10.1016/j.geosus.2020.11.001

- Kang, P., & Xu, L. (2012). Water environmental carrying capacity assessment of an industrial park. *Procedia Environmental Sciences*, 13(2011), 879–890. doi:10.1016/j.proenv.2012.01.082
- Kementerian Agraria dan Tata Ruang /Badan Pertahanan Nasional (ATR/BPN). (2017). *Sinkronasi Program pemanfaatan ruang tahunan Provinsi Kepulauan Riau*. Jakarta: Subdit Pemanfaatan Kawasan Strategis Nasional Wilayah I Direktorat Pemanfaatan Ruang, Direktorat Jenderal Tata Ruang, Kementerian Agraria dan Tata Ruang/BPN.
- KESDM. (2012). *Geologi*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. (2015a). *Litologi akuifer*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KESDM. (2015b). *Produktivitas akuifer*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- KLHK. (2013). *Peta ekoregion skala 1:250.000*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) dan Badan Informasi Geospasial (BIG).
- KLHK. (2014). *Pedoman daya dukung daya tampung lingkungan*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Lingkungan Hidup Deputi 1 Bidang Tata Lingkungan Asisten Deputi Perencanaan Pemanfaatan SDA & LH & Kajian Kebijakan LH Wilayah & Sektor.
- KLHK. (2019). *Pedoman penentuan pedoman penentuan daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup daerah*. Jakarta, Indonesia: Direktorat Pencegahan Dampak Lingkungan Kebijakan Wilayah dan Sektor (PDLKWS).
- Li, R., Yin, Z., Wang, Y., Li, X., Liu, Q., & Gao, M. (2018). Geological resources and environmental carrying capacity evaluation review, theory, and practice in China. *China Geology*, 1(4), 556–565. doi: 10.31035/cg2018050.
- Lilburne, L., Eger, A., Mudge, P., Ausseil, A.-G., Stevenson, B., Herzig, A., & Beare, M. (2020). The land resource circle: Supporting land-use decision making with an ecosystem-service-based framework of soil functions. *Geoderma*, 363, 114134. doi:10.1016/j.geoderma.2019.114134.
- Lin, C., & Kou, G. (2021). A heuristic method to rank the alternatives in the AHP synthesis. *Applied Soft Computing*, 100, 106916. doi:10.1016/j.asoc.2020.106916.
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P., & Liu, Y. (2017). A review of supervised object-based land-cover image classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 277–293. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2017.06.001.
- MEA. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Washington, USA: Island Press.
- Mirzahosseini, H., Safari, F., & Hassannayebi, E. (2021). Estimation of highway capacity under environmental constraints vs. conventional traffic flow criteria: A case study of Tehran. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. doi:10.1016/j.jtte.2020.04.006.
- Monk, W. A., Compson, Z. G., Choung, C. B., Korbil, K. L., Rideout, N. K., & Baird, D. J. (2019). Urbanisation of floodplain ecosystems: Weight-of-evidence and network meta-analysis elucidate multiple stressor pathways. *Science of The Total Environment*, 684, 741–752. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.02.253.
- Muta'ali, L. (2015). *Teknik analisis regional untuk perencanaan wilayah tata ruang dan lingkungan*. Yogyakarta: Badan Penerbit Fakultas Geografi.
- Muta'ali, L. (2019). *Daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup berbasis jasa ekosistem untuk perencanaan lingkungan hidup*. Yogyakarta: Badan Penerbit Fakultas Geografi.
- P3EJ. (2017). *Pedoman penggunaan peta daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup (D3TLH)*. Yogyakarta: Pusat Pengendalian Pembangunan Ekoregion Jawa.
- P3ES. (2011). *Daya dukung dan daya tampung lingkungan hidup ekoregion Sumatera berbasis jasa ekosistem*. Pekanbaru: Pusat Pengendalian Pembangunan Ekoregion Sumatera.
- Pekalongan, D. L. H. (DLH) K. (2018). *Kajian daya dukung daya tampung lingkungan Kota Pekalongan Provinsi Jawa Tengah* (Laporan Pe). Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Pekalongan.
- Pemerintah Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.
- Peraturan Presiden. (2020). *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 43 Tahun 2020 tentang Rencana Tata Ruang Kawasan Perbatasan Negara di Provinsi Riau dan Provinsi Kepulauan Riau*. Jakarta, Indonesia: Presiden Republik Indonesia.

- Pogue, S. J., Kröbel, R., Janzen, H. H., Alemu, A. W., Beauchemin, K. A., Little, S., ... McAllister, T. A. (2020). A social-ecological systems approach for the assessment of ecosystem services from beef production in the Canadian prairie. *Ecosystem Services*, 45, 101172. doi:10.1016/j.ecoser.2020.101172
- Purnama, S., Tivianton, T. A., Cahyadi, A., & Febriarta, E. (2019). Kajian daerah imbuhan air tanah di Kabupaten Ngawi. *Kajian Daerah Imbuhan Airtanah Di Kabupaten Ngawi*, 16(1), 54–59. doi: 10.15294/jg.v16i1.18358
- Pemerintah Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Lembaran Negara RI Tahun 2009 Nomor 140*. Jakarta, Indonesia: Sekretariat Negara Republik Indonesia.
- Rosellon-Druker, J., Szymkowiak, M., Aydin, K. Y., Cunningham, C. J., Fergusson, E. A., Kasperski, S., ... Yasumiishi, E. M. (2020). Participatory place-based integrated ecosystem assessment in Sitka, Alaska: Constructing and operationalizing a socio-ecological conceptual model for sablefish (*Anoplopoma fimbria*). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 104912. doi: 10.1016/j.dsr2.2020.104912
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Saaty, T. L. (2004). Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35. doi:10.1007/s11518-006-0151-5.
- Samodra, H. (1995). *Peta Geologi Lembar Tarempa dan Jemaja*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Santosa, L. W. (2010). *Ekoregion sebagai kerangka dasar dalam perlindungan dan pengelolaan lingkungan* (makalah). University Center UGM, Yogyakarta: Seminar Nasional “Semangat Perjuangan dari Jogja: Kembalikan Indonesiaku Hijau.
- Santoso, D. H., Prasetya, J. D., & Rahman, D. (2020). Analisis daya dukung lingkungan hidup berbasis jasa ekosistem penyediaan air bersih di Pulau Karimunjawa. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 290–296. doi: 10.14710/jil.18.2.290-296.
- Setyaningrum, A., & Febriarta, E. (2019). Analisis kesesuaian dan daya dukung ekowisata pantai kategori rekreasi Pantai Kuwaru Kabupaten Bantul Yogyakarta. *Seminar Nasional Pengelolaan Pesisir Dan Daerah Aliran Sungai Ke-5*, 5(March), 36–41. doi:10.17605/OSF.IO/82PTU.
- Setyono, D., Hariyani, S., & Haryani, B. (2019). Identifikasi bentuk struktur ruang Kota Batu. *Tata Kota dan Daerah*, 11(2), 85–92. doi:10.21776/ub.takoda.2019.011.02.5.
- Sharma, S., Nahid, S., Sharma, M., Sannigrahi, S., Anees, M. M., Sharma, R., ... Joshi, P. K. (2020). A long-term and comprehensive assessment of urbanization-induced impacts on ecosystem services in the capital city of India. *City and Environment Interactions*, 7, 100047. doi:10.1016/j.cacint.2020.100047
- Singhal, B. B. ., & Gupta, R. . (2010). *Applied hydrogeology of fracture rock*. London: Springer Dordrecht Heidelberg London.
- Small, N., Munday, M., & Durance, I. (2017). The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits. *Global Environmental Change*, 44, 57–67. doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.03.005
- Świąder, M., Lin, D., Szwedrański, S., Kazak, J. K., Iha, K., van Hoof, J., ... Altiok, S. (2020). The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment: A new approach for European cities. *Environmental Science and Policy*, 105(October 2019), 56–74. doi: 10.1016/j.envsci.2019.12.010.
- Teixeira, H., Lillebø, A. I., Culhane, F., Robinson, L., Trauner, D., Borgwardt, F., ... Nogueira, A. J. A. (2019). Linking biodiversity to ecosystem services supply: Patterns across aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 657, 517–534. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.440.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). Denver: John Wiley & Sons, Inc.
- von Thenen, M., Frederiksen, P., Hansen, H. S., & Schiele, K. S. (2020). A structured indicator pool to operationalize expert-based ecosystem service assessments for marine spatial planning. *Ocean & Coastal Management*, 187, 105071. doi:10.1016/j.ocecoaman.2019.105071.
- Wang, G., Xiao, C., Qi, Z., Meng, F., & Liang, X. (2021). Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China. *Ecological Indicators*, 122, 107232. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107232.

- Wang, Z. gen, Luo, Y. zhou, Zhang, M. hua, & Xia, J. (2014). Quantitative evaluation of sustainable development and eco-environmental carrying capacity in water-deficient regions: A case study in the Haihe River Basin, China. *Journal of Integrative Agriculture*, *13*(1), 195–206. doi: 10.1016/S2095-3119(13)60423-2.
- Watson, S. C. L., Paterson, D. M., Queirós, A. M., Rees, A. P., Stephens, N., Widdicombe, S., & Beaumont, N. J. (2016). A conceptual framework for assessing the ecosystem service of waste remediation: In the marine environment. *Ecosystem Services*, *20*, 69–81. doi:10.1016/j.ecoser.2016.06.011.
- Wicaksono, A. P., Febriarta, E., Nurani, D. T. T., & Larasati, A. (2020). Evaluasi kebutuhan air persemaian di Kawasan Karst Nggorang Manggarai Barat, Labuan Bajo, Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *18*(3), 572–581. doi:10.14710/jil.18.3.572-581.
- Zawadzka, J., Gallagher, E., Smith, H., & Corstanje, R. (2019). Ecosystem services from combined natural and engineered water and wastewater treatment systems: Going beyond water quality enhancement. *Ecological Engineering: X*, *2*, 100006. doi:10.1016/j.ecoena.2019.100006.
- Zhang, B., DeAngelis, D. L., & Ni, W. M. (2021). Carrying capacity of spatially distributed metapopulations. *Trends in Ecology and Evolution*, *36*(2), 164–173. doi: 10.1016/j.tree.2020.10.007.
- Zhang, J., Qu, M., Wang, C., Zhao, J., & Cao, Y. (2020). Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes: A case study at the county level in the Chinese Loess Plateau. *Global Ecology and Conservation*, *23*, e01110. doi:10.1016/j.gecco.2020.e01110.
- Zheng, L. (2020). Research on the impact of mega-projects on carrying capacity of cities taking the first-line project of the West-East gas pipeline as an example. *Journal of Management Science and Engineering*, *5*(3), 195–211. doi:10.1016/j.jmse.2020.08.001.
- Zulian, G., Stange, E., Woods, H., Carvalho, L., Dick, J., Andrews, C., ... Viinikka, A. (2018). Practical application of spatial ecosystem service models to aid decision support. *Ecosystem Services*, *29*, 465–480. doi:10.1016/j.ecoser.2017.11.005.