



Distribusi Pencemaran Sampah Plastik pada Sempadan Sungai di Bali yang Bermuara di Perairan Selat Bali dengan Analisis *Generalized Additive Models* (GAM)

Putu Bagus Angga Utama^a, I Gede Hendrawan^{a*}, I Wayan Gede Astawa Karang^a, Putra Bagus Panji Pamungkas^a

^aProgram Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Udayana, Bali, Indonesia

*Corresponding author, email: hendrawan@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 Mei 2022

Received in revised form: 12 Juni 2022

Accepted: 13 Desember 2022

Available online: 28 Februari 2023

Keywords:

Plastic;

Waste;

Riverbanks;

CSIRO;

GAM

ABSTRACT

Plastic waste in the oceans is a global problem which becomes a primary concern. The oceans become the final waste shelter that comes from land. Rivers essentially distribute plastic waste from the ground to the sea. Still, few studies currently examine waste distribution on riverbanks, especially rivers that discharge into the Bali Strait. This study aimed to determine the distribution of plastic waste along rivers in Bali Island that discharge into Bali Strait. Waste data was collected using the method developed by CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). The data collected was used to generate prediction models with GAM to predict the distribution of plastic waste on riverbanks. The GAM method was chosen because it can accommodate non-linear influences; furthermore, GAM uses the smooth function to substitute details of parametric relationships on covariates so that it would give a good prediction. The distribution of plastic waste in 30 rivers was predicted. This research data showed that the most common waste found was a plastic waste at 90%, and non-plastic waste was found at 10%. Based on the prediction, most of the distribution of plastic waste along these 30 rivers had a relative concentration of plastic waste of about 0-20%. The highest concentration of plastic waste was found on the riverbanks of Selanbawak village, Pekutatan village, Pulukan village, Pendem village, and Tuwed village, with 80-100%. The riverbanks close to markets and tourism destinations and the number of populations with a strong relationship with smooth contributions caused relatively high plastic waste concentration. The prediction of the total plastic waste leakage at the riverbanks of the 30 rivers is 3,438,472 pieces, which this plastic waste will pollute Bali Strait.

2023 JMRT. All rights reserved.

1. Pendahuluan

Sampah plastik di lautan merupakan permasalahan global yang semakin memprihatinkan. Seluruh lautan di dunia tercemar sampah plastik mulai dari daerah kutub hingga khatulistiwa (Allsopp *et al.*, 2006). Law *et al.* (2010) menyatakan bahwa sampah plastik telah mencemari perairan laut sebesar 580 ribu buah per kilometer persegi, dengan perkiraan sebesar 4,8 – 12,7 juta metrik ton sampah plastik yang masuk ke lautan setiap tahun (Jambeck *et al.*, 2015). Indonesia merupakan negara penyumbang sampah plastik di laut terbesar nomor dua di dunia setelah China yaitu sebesar 0,48 – 1,29 juta metrik ton per tahun (Jambeck *et al.*, 2015). *United Nations Environment Programme* atau UNEP (2014) menyatakan bahwa pencemaran plastik di laut dapat menyebabkan kematian biota akibat menelan dan terjerat sampah plastik. Keberadaan sampah ini dapat menjadi ancaman bagi kelestarian ekosistem laut, terutama daerah *fishing ground* seperti yang terdapat di perairan Selat Bali.

Wilayah perairan Selat Bali mempunyai peranan dan fungsi penting bagi masyarakat pesisir salah satunya yaitu terdapat

potensi penangkapan ikan pelagis (Setyohadi, 2009). Pencemaran sampah kini terjadi di perairan Selat Bali. Menurut Bali Partnership (2019) 33.000 ton sampah plastik dari Pulau Bali, berakhir di laut setiap tahun. Sampah plastik dan sampah non plastik ditemukan mengapung dan tersebar di permukaan air, hal ini dapat berdampak terhadap kualitas tangkapan (Times Indonesia, 2018). Sampah di perairan Selat Bali juga mempengaruhi sektor pariwisata. Balai Penelitian dan Observasi Laut atau BPOL (2018) telah melakukan penelitian trajektori partikel (model pelacakan asal partikel) ditemukan bahwa sampah-sampah perairan Selat Bali mencemari Pantai Kuta, yang mana sumber-sumber sampah ini berasal dari daratan bagian barat Pantai Kuta, yang dihanyutkan melalui aliran sungai hingga bermuara di perairan Selat Bali, kemudian sampah-sampah ini terhempas angin dan arus akhirnya terdeposisi di Pantai Kuta. Adapun sungai-sungai di Bali yang bermuara di perairan Selat Bali diantaranya sungai Umalas, Canggus, Pangsi, Penet, Yeh Empas, Yeh Abe, Sembung, Yeh Latung, Yeh Ho, Unun, Matan, Yeh Otan, Payan, Puteh, Balian, Selabih, Yeh Leh, Pangyangan, Yeh Lebah, Pulukan, Medewi, Yeh Sumbul, Yeh Embang,

Bilukpoh, Pergung, Daya Timur, Ijo Gading, Aya Barat, Sanghyanggede dan Melaya.

Sungai memainkan peran penting dalam mengangkut sampah plastik yang berasal dari darat ke laut. Sungai merupakan aliran air panjang yang melewati berbagai sempadan dengan penggunaan lahan dan populasi yang berbeda di masing-masing daerah yang dilewati sebelum memasuki lautan. Ketinggian permukaan air sungai mempengaruhi pergerakan sampah, yang mana sampah-sampah ini dapat tersangkut di zona vegetasi sekitar sempadan sungai (Emmerik *et al.*, 2019). Kebocoran sampah plastik di sempadan sungai dapat menurunkan kualitas lingkungan dan menurunkan nilai estetika lingkungan. Sampah-sampah yang telah bocor di lingkungan sungai ini pun dapat terhanyut ke aliran sungai dan tersangkut di area vegetasi sempadan hulu sungai lainnya secara alami karena adanya luapan air ketika banjir dan hempasan angin. Selain itu aktivitas manusia mempengaruhi kualitas sungai, khususnya yang berada di dekat area sungai (Ibisch and Borchardt, 2009).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi pencemaran sampah plastik pada sempadan sungai di Bali yang bermuara di perairan Selat Bali. Akan tetapi pendataan sampah di seluruh sungai dapat memakan waktu, tenaga dan biaya yang tidak sedikit. Untuk menyiasati hal tersebut, prediksi berbasis model regresi GAM (*Generalized Additive Models*) dapat digunakan. Hardesty *et al.* (2017) menerapkan model GAM untuk mengestimasi distribusi sampah di sepanjang pesisir benua Australia dengan mengambil titik setiap 100 km. Estimasi dapat didasari oleh karakteristik lapangan (variabel x), yang mana Hardesty *et al.* (2017) menggunakan beberapa variabel sebagai dasar pembangun persamaan dalam mengestimasi sampah plastik, diantaranya variabel karakteristik pesisir (bentuk pesisir, substrat, gradien dan tipe belakang pantai), jarak terhadap populasi dan jarak terhadap jalan.

GAM mampu memprediksi konsentrasi sampah pada seluruh sempadan sungai berdasarkan data observasi yang dilakukan hanya pada beberapa sungai, dengan menggunakan beberapa variabel sebagai dasar pembangun persamaan statistik dalam mengestimasi distribusi sampah plastik pada sempadan sungai yang secara umum memiliki karakteristik yang sama. Analisis GAM digunakan karena mampu mengakomodasi hubungan non-linier serta terdapat fungsi *smooth* sebagai pengganti detail hubungan parametrik pada kovariat sehingga memberikan hasil yang baik dalam memprediksi distribusi sampah di seluruh sempadan sungai.

Penelitian ini diharapkan dapat membantu sebagai informasi kepada masyarakat maupun pemerintah terkait dengan pencemaran plastik pada sempadan sungai di daerah Bali.

2. Metodologi

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Pengambilan data dilaksanakan pada bulan September hingga Oktober 2020 yang berlokasi di sempadan Sungai Umalas (Kab. Badung), Penet (Kab. Tabanan), Ijo Gading (Kab. Jembrana) dan Aya (Kab. Jembrana). Sungai - sungai ini digunakan sebagai pembangun model untuk prediksi distribusi sampah plastik pada sungai yang bermuara di perairan Selat Bali (Gambar 1).



Gambar 1. Peta titik pengambilan data primer yang berada di sempadan Sungai Umalas, Penet, Ijo Gading dan Aya Barat.

2.2. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan 3 tahapan, tahapan yang pertama yaitu pengambilan data lapangan (primer), tahapan kedua yaitu perolehan data sekunder dan tahapan ketiga yaitu analisis regresi GAM (*Generalized Additif Model*). Data primer dan sekunder bersama sama digunakan sebagai pembangun model sedangkan metode GAM berperan dalam memprediksi konsentrasi sampah plastik yang terdistribusi pada sempadan sungai di Bali yang bermuara ke perairan Selat Bali.

2.2.1. Data Primer

Titik yang diambil pada data primer sebanyak 22 titik yang berada pada 4 sungai, yaitu Sungai Umalas (6 titik), Penet (6 titik), Ijo Gading (5 titik) dan Aya Barat (5 titik), hal ini dikarenakan terbatasnya akses menuju sungai, titik penelitian dapat dilihat pada (Gambar 1). Adapun data primer yang diambil dalam penelitian ini disajikan pada tabel 1.

Tabel 1. Pengumpulan data primer

No	Data
1	Karakteristik sampah (Jenis, ukuran, bentuk)
2	Konsentrasi sampah
3	Karakteristik sungai (bentuk sungai, tipe belakang sungai, vegetasi sungai)

Data primer diambil menggunakan metode yang dikembangkan oleh CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) dimana metode ini bertujuan untuk memperkirakan distribusi sampah di lingkungan. Titik sampling diambil setiap 3 km agar diperoleh perbedaan karakteristik sempadan sungai, jenis dan jumlah sampah yang terdistribusi di sempadan sungai. Pengambilan data dalam satu titik dilakukan dengan pengulangan transek sebanyak 3 kali. Jarak antar transek sejauh 50 m. Transek dimulai dari garis air sungai, hingga 2 m di belakang vegetasi (daerah yang sudah tidak dipengaruhi oleh sungai). Transek memiliki lebar 2 m yaitu 1 m ke kiri dan 1 m ke kanan.

2.2.2. Data Sekunder

Perolehan data sekunder dilakukan setiap 1 km pada sempadan kiri dan kanan sungai. Aliran sungai yang diteliti sepanjang 5,3 km hingga 53,6 km sesuai dengan panjang setiap aliran sungai yang termuat di wilayah Kabupaten Badung, Tabanan dan Jembrana yang bermuara di perairan Selat Bali. Total perolehan data

sekunder penelitian ini sebanyak 1253 titik. Adapun data sekunder yang diperoleh dalam penelitian ini disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Data dan sumber perolehan data sekunder

No	Data Sekunder	
	Data	Sumber
1	Karakteristik sungai (bentuk sungai, tipe belakang sungai, vegetasi sungai)	Google Earth dan Badan Informasi Geospasial (BIG)
2	Potensi sumber sampah (jarak sungai terhadap pariwisata dan pasar)	Quantum GIS (QGIS) dan Badan Informasi Geospasial (BIG)
3	Populasi	Badan Pusat Statistik (BPS)

2.3 Analisis Data

2.3.1 Konsentrasi Sampah

Perhitungan konsentrasi sampah (buah/m²) dilakukan per transek. Untuk mendapatkan nilai konsentrasi sampah dilakukan pembagian total jumlah sampah didapat dengan luas cakupan pengambilan sampel (Lippiatt *et al.*, 2013).

$$C = \frac{n}{w \times l} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- C = Konsentrasi sampah (buah/m²)
- n = Jumlah sampah ditemukan
- w = Lebar transek (m)
- l = Panjang transek (m)

Sebelum sebaran konsentrasi sampah dipetakan secara spasial dengan *software Quantum GIS*, nilai konsentrasi sampah (buah/m²) dikonversi menjadi nilai indeks jumlah sampah relatif (%) agar peta prediksi mudah dipahami. Nilai konsentrasi sampah plastik terkecil (buah/m²) dikonversi menjadi nilai minimum konsentrasi sampah plastik relatif (0%) begitu pula sebaliknya. Nilai terbesar konsentrasi sampah plastik (buah/m²) dikonversi menjadi nilai maksimum konsentrasi sampah plastik relatif (100%).

2.3.2 Generalized Additive Models (GAM)

Metode GAM mengganti bentuk linier hubungan Y dan X sebagai suatu hubungan fungsional yang mampu mengatasi pengaruh non linier variabel bebas terhadap variabel terikat (Hastie dan Tibshirani, 1986). Variabel terikat dalam model adalah konsentrasi sampah yang ada pada setiap transek penelitian sedangkan variabel bebas dalam penelitian ini terbagi menjadi 3 kategori. Kategori yang dimaksud adalah karakteristik sungai, potensi sumber sampah dan populasi. Karakteristik sungai dalam penelitian ini meliputi tipe bentuk sungai yaitu *back river bank* (tipe belakang sungai), *bank vegetation* (vegetasi di sempadan sungai). Potensi sumber sampah dalam penelitian ini yaitu jarak titik penelitian dengan pasar terdekat dan jarak titik penelitian dengan destinasi pariwisata terdekat. Populasi dalam penelitian ini yaitu jumlah penduduk per desa yang termuat di sepanjang aliran sungai.

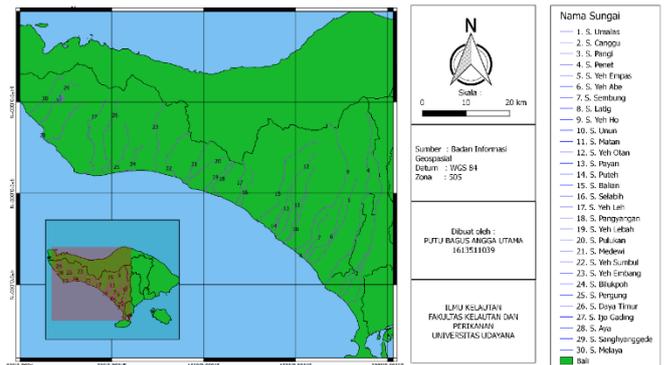
Data lapangan dengan jumlah 22 titik yang berada di 4 aliran sungai dengan total 66 transek memuat seluruh variabel kategori karakteristik sungai, potensi sumber sampah dan populasi sehingga data pengamatan ini dapat digunakan sebagai dasar pendekatan untuk prediksi konsentrasi sampah di sungai sungai lain yang secara umum memiliki kondisi lingkungan sama. Prediksi nilai

konsentrasi sampah dilakukan setiap 1 km. Adapun persamaan GAM sebagai berikut (Zahro *et al.*, 2018):

$$\eta = g(\mu_i) = f_0 + \sum_{j=1}^p f_j(x_{ij}) \dots\dots\dots (2)$$

dimana *g* adalah *link function*, μ_i adalah nilai harapan y (variabel terikat), (x_{ij}) adalah parameter yang dikembangkan, *f_j* adalah fungsi *spline smooth factor* setiap variabel prediksi.

Jumlah sungai yang dimodelkan dalam penelitian ini yaitu sebanyak 30 sungai. Sungai yang dimaksud bukan merupakan sungai musiman berdasarkan data BIG yaitu meliputi Sungai Umalas, Canggung, Pangi, Penet, Yeh Empas, Yeh Abe, Sembung, Yeh Latung, Yeh Ho, Unun, Matan, Yeh Otan, Payan, Puteh, Balian, Selabih, Yeh Leh, Panyangan, Yeh Lebah, Pulukan,



Gambar 2. Peta 30 sungai model (studi kasus)

Medewi, Yeh Sumbul, Yeh Embang, Bilukpoh, Pergung, Daya Timur, Ijo Gading, Aya Barat, Sanghyanggede dan Melaya (Gambar 2).

Analisis GAM pada penelitian ini dioperasikan menggunakan *software R Studio* (versi 1.3.959) dengan *package mgcv* yang diperkenalkan oleh Wood (2006) untuk memprediksi konsentrasi sampah, kemudian dipetakan menggunakan *software Quantum GIS*.

3.2.3 Pemilihan Model Generalized Additive Models (GAM)

Seleksi model merupakan tahapan penting dalam pemilihan persamaan model terbaik. Persamaan model terbaik dipilih dari beberapa metode yaitu metode *Akaike's Information Criteria* (AIC). AIC pertama kali dikembangkan oleh Akaike pada tahun 1973, metode ini bertujuan untuk mengkomparasi kesesuaian model yang didasarkan pada kemungkinan maksimum likelihood (Akaike, 1973). Model yang sesuai menunjukkan nilai AIC terkecil (Tirta, 2009).

Untuk mengetahui nilai galat antara data observasi lapangan dengan hasil prediksi maka dilakukan pengujian atau validasi data dengan menggunakan metode RMSE (*Root Mean Square Error*).

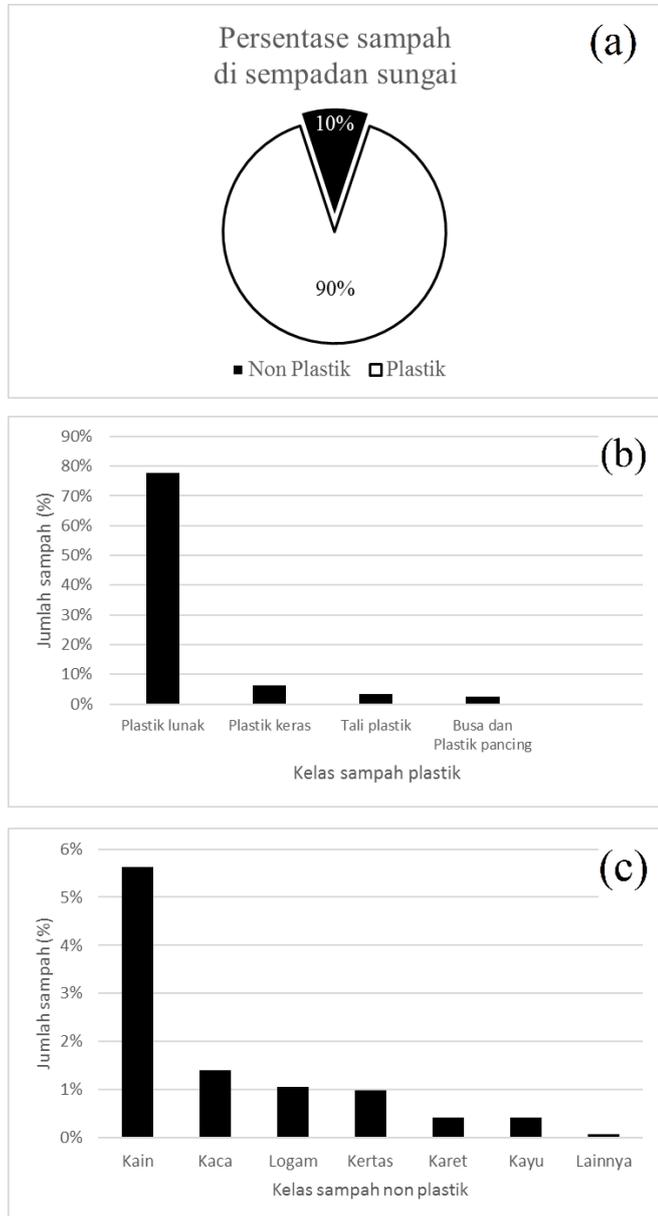
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Sampah

3.1.1 Kelas dan Jenis Sampah

Pengambilan data dilakukan selama dua minggu dengan jumlah 66 transek, total sampah yang ditemukan sebanyak 1406 buah. Dari total sampah tersebut jenis sampah yang paling banyak ditemukan adalah sampah plastik dengan persentase 90%, sedangkan sisanya adalah sampah non plastik (Gambar 3 (a)).

90% sampah plastik yang ditemukan tersebut terdiri atas beberapa kelas meliputi, kelas plastik lunak dengan persentase 77,8%, kelas plastik keras 6,4%, kelas tali plastik 3,3%, kelas busa dan sampah pancing 2,5% (Gambar 3 (b)). Sampah non plastik yang ditemukan yaitu sebesar 10% yang terbagi atas kelas kain sebesar 5,63%, kelas kaca 1,41%, kelas logam 1,06%, kelas kertas 0,99%, kelas karet 0,42%, kelas kayu 0,42% dan kelas lainnya 0,07% (Gambar 3 (c)).



Gambar 3. Persentase sampah di sempadan sungai berdasarkan data primer (a), Persentase kelas sampah non plastik (b), Persentase kelas sampah plastik (c).

Berdasarkan jenisnya, sampah plastik yang paling banyak ditemukan di masing-masing kelas adalah jenis pembungkus/label makanan dari kelas plastik lunak, botol dari kelas plastik keras, tali/pita dari kelas tali plastik, wadah makanan dari kelas busa dan tali pancing dari kelas sampah pancing. Kelas plastik lunak merupakan jenis sampah yang mendominasi di sempadan Sungai Umalas, Penet, Ijo Gading, Aya Barat dengan persentase total 77%. Hal ini berarti sampah plastik lunak di sempadan sungai tersebut belum terkelola dengan baik.



Gambar 4. Jumlah sampah plastik berdasarkan kelasnya di setiap aliran sungai

Sampah plastik secara umum dapat ditemukan di masing-masing sungai pengambilan data yaitu Sungai Umalas, Penet, Ijo Gading dan Aya. Masing-masing sungai memiliki kecenderungan sampah plastik yang tidak jauh berbeda jika dilihat dari dominansi kelasnya.

Di sempadan Sungai Umalas, sampah plastik yang paling banyak ditemukan adalah kelas plastik lunak (tas belanja, pembungkus/label makanan, gelas/tutup, sedotan dan plastik lunak lainnya). Kelas yang menduduki peringkat kedua adalah kelas tali plastik (tali/pita, tali pengepakan). Peringkat ketiga yaitu kelas plastik keras (botol, tutup botol, piring dan korek gas). Peringkat keempat yaitu kelas busa (piring, polistirena) (Gambar 4).

Di sempadan Sungai Penet ditemukan pencemaran sampah plastik. Kelas sampah plastik yang menduduki peringkat pertama pada sungai ini adalah kelas plastik lunak (pembungkus/label makanan, tas belanja, sedotan, plastik yang tidak diketahui, gelas/tutup dan plastik lembaran). Peringkat kedua yaitu kelas plastik keras (botol minum, plastik yang tidak diketahui, tutup botol, korek gas dan wadah makanan). Peringkat ketiga yaitu kelas busa dan kelas sampah pancing (polistirena, wadah makanan dan jaring). Kelas yang menduduki peringkat keempat adalah kelas tali plastik (tali plastik/pita, kabel tis dan tali pengepakan).

Sungai Ijo Gading tidak lepas dari pencemaran sampah plastik. Kelas sampah plastik yang menduduki peringkat pertama di sempadan sungai ini adalah kelas plastik lunak (pembungkus/label makanan, tas belanja, lembaran plastik, gelas/tutup dan plastik yang tidak diketahui). Peringkat kedua yaitu kelas plastik keras (pipa dan botol munim). Peringkat ketiga yaitu kelas sampah pancing dengan jenis (tali pancing). Kelas yang menduduki peringkat keempat adalah kelas tali plastik (tali/pita).

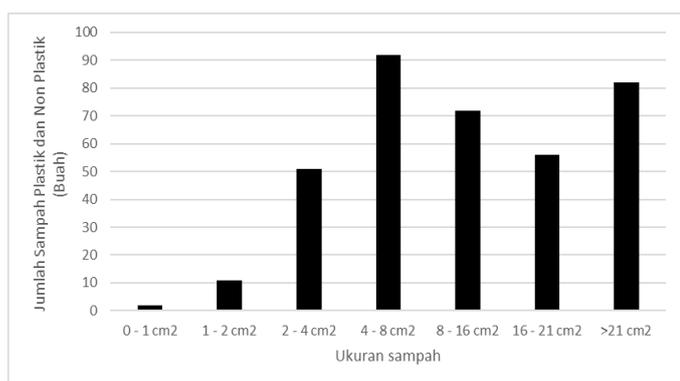
Pencemaran sampah plastik juga terdapat pada Sungai Aya Barat. Kelas sampah plastik yang menduduki peringkat pertama di sempadan sungai ini adalah kelas plastik lunak (tas belanja, pembungkus/label makanan, gelas/tutup). Peringkat kedua yaitu kelas tali plastik (tali/pita). Selanjutnya kelas busa (piring). Yang terakhir yaitu kelas plastik keras (botol minum). Sampah sampah ini merupakan sampah yang dihasilkan dari aktifitas antropogenik baik itu aktivitas pariwisata maupun kegiatan rumah tangga. Sampah berupa botol plastik sekali pakai, kemasan, tas plastik, gelas, piring, peralatan makan, sedotan hingga sandal jepit sebagian besar merupakan sampah dari aktivitas pariwisata, selain itu sampah ini juga dihasilkan oleh kegiatan lokal yang bersumber dari kegiatan rumah tangga (Maione, 2019). Menurut Barnes *et al.* (2009) sampah plastik jenis wadah makanan (botol minum) dan plastik tipis (tas

belanja, plastik pembungkus dan plastik lembaran) sebagian besar bersumber dari perkotaan sedangkan plastik jenis pipa, wadah plastik besar dan lembar plastik merupakan sampah hasil kegiatan agrikultur. Berdasarkan data primer yang dikumpulkan, jenis sampah plastik yang menempati posisi 10 besar tersaji dalam Tabel 3.

Tabel 3. 10 jenis sampah plastik yang paling banyak ditemukan.

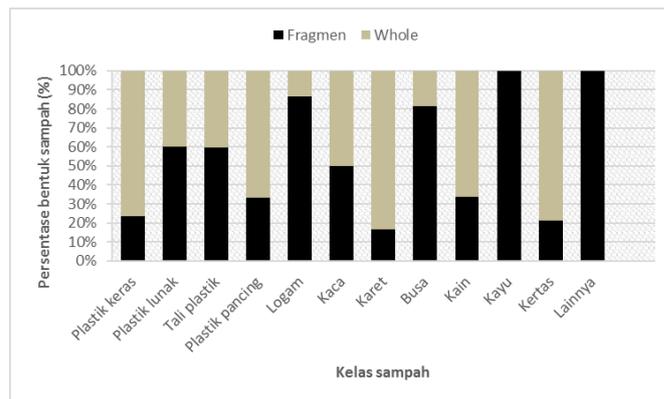
No	Fragmen	Whole
1	Thin film carry bag (Soft plastic)	Food wrapper/label (Soft plastic)
2	Food wrapper/label (Soft plastic)	Thin film carry bag (Soft plastic)
3	String/rope/ribbon (Plastic Strap)	Clothing/towel (Cloth)
4	Polystyrene (Foam)	Beverage bottle (Hard Plastic)
5	Food wrapper (Metal)	String/rope/ribbon
6	Wipes/cloths (Cloth)	Other bottle (Hard Plastic)
7	Clothing/towel (Cloth)	Bottle cap/lid (Hard Plastic)
8	Unknown/other hard (Hard Plastic)	Cup/lid (Soft plastic)
9	Beverage bottle (Glass)	Unknown/other hard (Hard Plastic)
10	Utensil/food stick (Timber)	Straw (Soft plastic)

Jenis sampah plastik berbentuk *fragment* yang paling banyak ditemukan adalah jenis tas belanja dari kelas plastik lunak sedangkan sampah plastik berbentuk *whole* yang paling banyak ditemukan adalah jenis pembungkus/label makanan dari kelas plastik lunak (Tabel 3).



Gambar 5. Ukuran sampah plastik dan non plastik (per buah)

Ukuran sampah berpengaruh terhadap jarak sebaran sampah dari sumbernya. Kebocoran sampah pada area sungai dapat dihanyutkan limpasan air sungai dan memungkinkan terhanyut jauh dari tempat sebelumnya dikarenakan sampah ini dapat mengapung. Daya apung dipengaruhi oleh ukuran, volume, bentuk dan densitas (Ryan, 2015). Data menunjukan ukuran sampah yang mendominasi relatif besar yaitu 4 - 8 cm² dengan proporsi 25%, disusul >21 cm² (22%), 8-6 cm² (15%) (Gambar 5). Sampah dengan ukuran dan daya apung lebih besar berpotensi tersebar lebih jauh dibandingkan dengan ukuran sampah yang lebih kecil (Fazey dan Ryan, 2016).



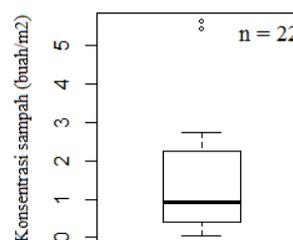
Gambar 6. Dominansi bentuk sampah *whole* (utuh) dan *fragment* (pecahan) yang teridentifikasi selama pengamatan

Sampah temuan yang berukuran relatif besar dapat diindikasikan berasal dari wilayah sekitar sempadan dan dapat berasal dari luar wilayah sempadan sedangkan sampah yang berukuran kecil dapat diindikasikan berasal dari wilayah lokal.

Total sampah yang ditemukan selama pengamatan yaitu sebanyak 1406 buah, persentase sampah *whole* (utuh) mencapai 44%, sedangkan *fragment* (pecahan) mencapai kisaran 56%. Plastik keras, sampah pancing, karet, kain dan kertas ditemukan dalam bentuk utuh sedangkan kelas lainnya ditemukan dalam bentuk pecahan (Gambar 6). Ukuran dan bentuk sampah berkaitan dengan lamanya sampah tersebut berada di lingkungan. Paparan sinar UV dan gesekan fisik yang berkepanjangan akan mempengaruhi fragmentasi sampah plastik di lingkungan (Gerritse, 2020). Sampah kelas plastik lunak, tali plastik, logam, busa, kayu dan sampah non plastik lainnya yang teridentifikasi sebagian besar dimungkinkan telah berada di lingkungan cukup lama karena telah terfragmentasi menjadi ukuran yang lebih kecil. Sedangkan sampah kelas plastik keras, plastik pancing, karet, kain dan kertas sebagian besar masih berbentuk utuh dan belum mengalami fragmentasi. Hal ini dapat mengindikasikan bahwa sampah ini belum lama berada di lingkungan sungai.

3.2 Konsentrasi dan Sebaran Sampah

Pengumpulan data lapangan sebanyak 22 titik yang terbagi atas 66 transek, didapatkan konsentrasi yang berkisar antara 0,05 – 8,35 buah/m² dengan nilai rata rata sebesar 1,49 buah/m² serta nilai tengah 0,79 buah/m². Berikut merupakan boxplot konsentrasi sampah rata rata di 22 titik. Boxplot diatas menunjukkan bahwa sebaran data tidak rata. Distribusi data condong ke arah kanan (*positive skewness*) ditunjukkan oleh whisker atas lebih panjang dari whisker bawah. Teridentifikasi 2 nilai outlier yaitu pada titik 2 dan 3 (Gambar 7).



Gambar 7. Boxplot konsentrasi sampah tiap titik penelitian (Buah)

Dari keseluruhan aliran sungai tempat pengambilan sampel, titik 2 dan 3 merupakan titik dengan konsentrasi sampah plastik

paling tinggi berkisar 4,3-5,4 buah/m². Titik 2 terletak di sungai Umalas, Desa Kerobokan Kelod. Pemukiman di titik ini tidak terlalu padat namun sampah rumah tangga seringkali dibuang di sempadan sungai titik ini. Jumlah penduduk di desa ini sebanyak 16.804 jiwa. Sampah yang ditemukan di titik ini tertimbun di sempadan sungai yaitu berupa sampah plastik sekali pakai, botol plastik, pembungkus makanan, label makanan yang merupakan sampah bekas konsumsi masyarakat.

Titik 3 berlokasi di Sungai Umalas, Desa Kerobokan Kaja. Pemukiman di titik ini relatif padat yang mana muatan penduduk di desa ini sejumlah 21.414 jiwa.



Gambar 8. Sampah rumah yang ditemukan pada sempadan sungai (titik 3, transek 1)

Penduduk sekitar titik ini membuang sampah secara sengaja ke sempadan sungai. Sampah yang ditemukan merupakan sampah plastik bekas konsumsi masyarakat sekitar berupa botol plastik, plastik tas belanja sekali pakai, plastik wadah minyak goreng, plastik pembungkus makanan, pembungkus shampoo hingga kaleng parfum (Gambar 8). World Bank (2018) menyatakan bahwa pemukiman di tepi sungai paling berkontribusi dalam hal masuknya sampah plastik ke lingkungan sungai.

3.3 Distribusi Sebaran Sampah Relatif

Banyak model telah dicoba dalam rangka menemukan model terbaik dengan memasukan beberapa variabel bebas. Model terbaik ditemukan dengan memasukan variabel karakteristik sungai (tipe belakang sungai dan vegetasi sempadan sungai), variabel sumber sampah potensial (jarak pasar dan pariwisata terhadap sempadan sungai) dan variabel populasi (jumlah penduduk per desa). Model ini merupakan model terbaik dengan nilai AIC terkecil yaitu 104,2381 dan nilai *Deviance explained* 77% yang artinya model ini mampu menjelaskan prediksi potensi data sampah sebesar 77% pada titik prediksi. Nilai RMSE prediksi ini sebesar 1.957746.

Tabel 4. Pengujian GAM terkait dengan hubungan konsentrasi sampah dengan karakteristik sungai, sumber sampah potensial dan populasi.

<i>Factor</i>	<i>Coefficient value</i>	<i>Standar Error</i>	<i>t value</i>	<i>Pr(> t)</i>
Karakteristik Sungai				
<i>(Intercept)</i>	-0.8061	0.68803	-	0.247
<i>Back river bank</i>				
Pemukiman	-0.33394	0.67043	-	0.621
Sawah	0.72688	0.67757	1.073	0.289
Vegetasi	0.78522	0.73039	1.075	0.288
<i>Bank vegetation</i>				
None	-0.4216	0.52978	-	0.43
Shrub	0.05063	0.36191	0.14	0.889
Tree	0.24268	0.32955	0.736	0.465
Sumber Potensial				
<i>Covariate</i>	<i>edf</i>	<i>Ref.df</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>
Jarak pasar terdekat	2.356	2.718	8.047	0.000289 ***
Jarak pariwisata terdekat	1.587	1.836	5.091	0.007868 **
Populasi				
<i>Covariate</i>	<i>edf</i>	<i>Ref.df</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>
Jumlah penduduk	7.54	8.288	5.176	0.0000843 ***

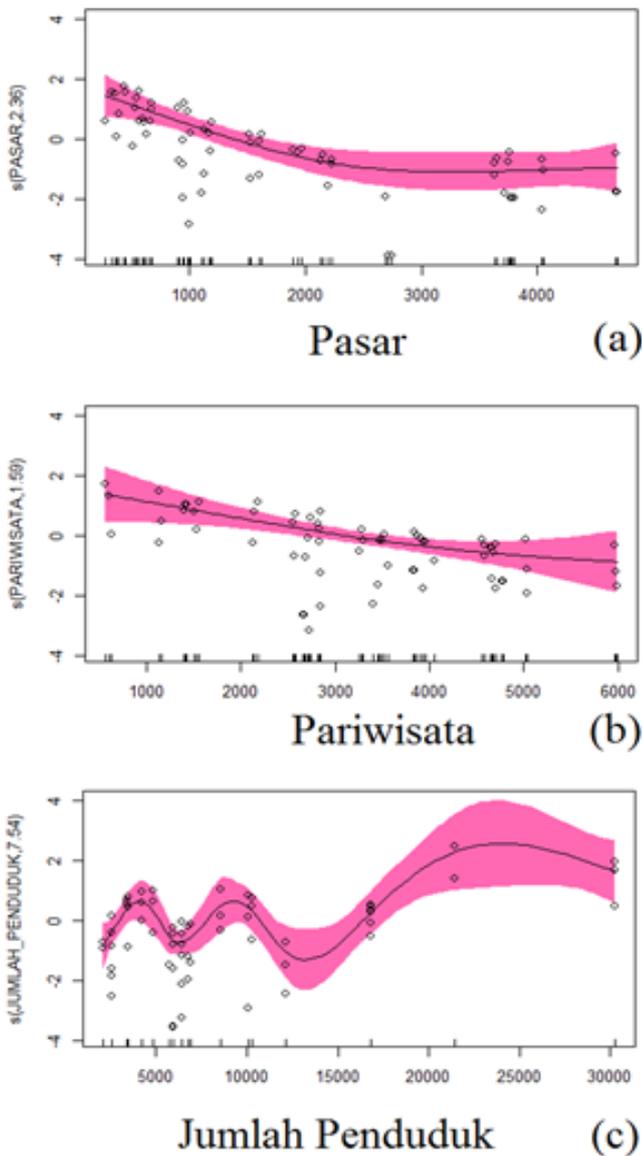
Setiap 1 level pada tiap faktor (variabel kategori) termasuk dalam istilah intersep sebagai tingkat referensi yaitu : *Back river bank - Mangrove, Bank vegetation - Grass*. Signif. Codes 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Variabel karakteristik sungai ditemukan tidak berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi sampah. Dari segi sumber potensial sampah, jarak pasar terdekat menunjukkan nilai yang signifikan terhadap konsentrasi sampah dilihat dari nilai *pvalue* bernilai 289×10^{-3} . Jarak pariwisata terdekat memiliki pengaruh signifikan dengan nilai *p-value* 78×10^{-2} . Berdasarkan populasi yaitu jumlah penduduk menunjukkan pengaruh signifikan dengan nilai *p-value* 843×10^{-4} .

Secara umum semakin dekat sempadan sungai dengan lokasi pasar akan diikuti dengan meningkatnya konsentrasi sampah seperti pada Gambar 9 (a). Hubungan kuat jarak pasar terhadap sempadan sungai ditemukan pada jarak 205 m hingga 1181 m. Hubungan kuat ini terdapat pada sempadan sungai Desa Kerobokan Kelod (aliran Sungai Umalas pada titik 2) dengan pasar Kuwumsari yang memiliki jarak 675 m, ditemukan sampah plastik sebanyak 54 buah. Hubungan lemahnya ditemukan dari jarak 1900 m - 4800 m (Gambar 9 (a)). Hubungan lemah ini terdapat pada sempadan sungai Desa Tibubeneng (aliran Sungai Umalas, Titik 1) dengan pasar Kayu Aya yang memiliki jarak 2197 m, ditemukan sampah plastik sejumlah 5 buah.

dengan objek wisata Bendungan Palasari sejauh 3835 m ditemukan 2 buah sampah plastik.

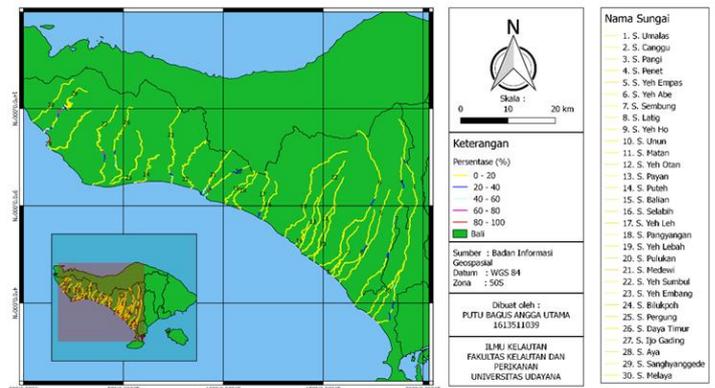
Grafik jumlah penduduk menunjukkan penduduk sebanyak 17500 hingga 30000 jiwa per desa memiliki kontribusi paling besar berhubungan dengan konsentrasi sampah plastik di sempadan sungai terdekat (Gambar 9 (c)). Hubungan kuat berada pada kisaran 17500 hingga 30000 jiwa (Gambar 9 (c)). Hubungan kuat ini ditemukan pada sempadan sungai Desa Kerobokan Kaja (aliran Sungai Umalas, titik 3) yang mana desa ini memuat penduduk sebanyak 21.414 jiwa, ditemukan sampah plastik sebanyak 90 buah sampah plastik. Hubungan paling lemah berada pada kisaran 1209 hingga 2593 jiwa. Seperti yang ditemukan di sempadan sungai desa Buwit (aliran Sungai Penet, titik 9) yang mana desa ini memuat penduduk sebanyak 2.570 jiwa, ditemukan sampah plastik sebanyak 29 buah sampah plastik. Hal ini menunjukkan jumlah penduduk sebanyak 17500 hingga 30000 jiwa per desa memiliki kontribusi paling besar berhubungan dengan konsentrasi sampah plastik di sempadan sungai terdekat



Gambar 9. Plot parsial model additive pada setiap kovariat. Kovariat terhadap jarak pasar terdekat (a), terhadap jarak pariwisata terdekat (b) dan terhadap jumlah penduduk terdekat (c).

Sumbu x merupakan variabel bebas dan sumbu y merupakan kontribusi efek *smooth* terhadap konsentrasi sampah plastik. Tepi terluar atas dan bawah berwarna merah muda merepresentasikan selang kepercayaan 95% untuk masing-masing variabel bebas. Jika fungsi GAM yang dikembangkan berada pada posisi nol maka ini mengindikasikan tidak adanya pengaruh terhadap konsentrasi sampah plastik. Selanjutnya jika fungsi GAM berada diatas nol maka parameter tersebut berpengaruh kuat, sebaliknya jika fungsi GAM yang dikembangkan berada dibawah nilai nol maka parameter tersebut berpengaruh lemah (Siregar, 2018)

Grafik pariwisata menunjukkan semakin dekat sempadan sungai dengan lokasi pariwisata maka konsentrasi sampah ikut meningkat (Gambar 9 (b)). Hubungan kuat lokasi pariwisata terhadap sempadan sungai ditemukan pada jarak 272 m hingga 2267 m (Gambar 9 (b)). Hubungan kuat ini ditemukan pada sempadan sungai Desa Abiantuwung dengan objek wisata Taman Ayun sejauh 1135 m dengan jumlah sampah plastik 24 buah. Hubungan lemahnya dimulai dari jarak 3696 m hingga 6000 m. Hubungan lemah ini ditemukan pada sempadan sungai Desa Manistutu



Gambar 10. Peta prediksi distribusi sampah plastic relatif di sempadan sungai di Pulau Bali yang bermuara di perairan Selat Bali

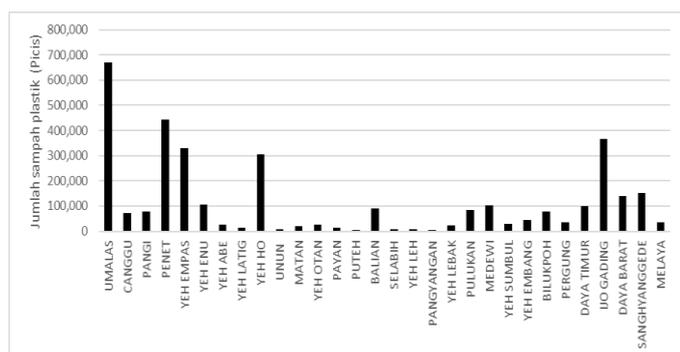
Hasil prediksi menunjukkan konsentrasi sampah plastik relatif di sepanjang aliran sungai yang bermuara di perairan Selat Bali sebagian besar berada pada kisaran 0-20%. Ditemukan beberapa sempadan sungai yang memuat konsentrasi sampah plastik melebihi 20% yaitu pada aliran Sungai Umalas, Penet, Yeh Empas, Yeh Abe, Yeh Ho, Yeh Leh, Pangyangan, Pulukan, Medewi, Yeh Embang, Bilukpoh, Daya Timur, Ijo Gading, Aya Barat, Sanghyanggede dan Melaya (Gambar 10).

Konsentrasi sampah plastik relatif tertinggi pada Sungai Umalas ditemukan pada sempadan sungai Desa Dalung 40-60%. Di sepanjang aliran Sungai Penet, konsentrasi sampah plastik relatif tertinggi yaitu pada sempadan sungai Selanbawak 80-100%. Konsentrasi sampah plastik pada Sungai Yeh Empas paling tinggi yaitu 40-60% terletak pada sempadan sungai Desa Tunjuk. Pada Sungai Yeh Abe konsentrasi sampah plastik relatif tertinggi adalah pada sempadan sungai Desa Samsam 20-40%. Konsentrasi sampah plastik relatif tertinggi pada Sungai Yeh Ho yaitu pada sempadan sungai Desa Penebel 40-60%, pada Sungai Yeh Leh 20-40% di sempadan sungai Desa Pengeragoan, Sungai Pangyangan 40-60% pada Desa Pengeragoan, Sungai Pulukan 80-100% di sempadan sungai Desa Pekutatan, Tukad Medewi 40-60% di sempadan sungai Desa Medewi, Yeh Embang 40-60% di sempadan sungai Desa Yeh Embang, Sungai Bilukpoh 20-40% di sempadan sungai Desa Penyaringan, Sungai Tukad Daya Timur 40-60% di Desa Dauharu, Sungai Ijo Gading di sempadan sungai Desa Pendem 80-100%, Tukad Daya Barat di sempadan sungai Desa Tuwed 80-100%, Sungai Sanghyanggede di sempadan sungai Desa

Candikusuma 60-80%, Sungai Melaya di sempadan Sungai Desa Melaya 20-40% (Gambar 10).

Sempadan sungai yang memuat konsentrasi sampah plastik relatif 80-100% dihasilkan oleh adanya aktivitas pasar yang jaraknya tidak jauh dengan sempadan sungai bahkan ada sempadan sungai yang berdekatan dengan 2 pasar sekaligus, yang akan menghasilkan sampah berupa tas belanja plastik sekali pakai dan ketika sampah tersebut tidak dikelola dengan baik maka sampah tersebut memungkinkan untuk bocor kelingkungan hingga ke sempadan sungai. Selain itu adanya aktivitas pariwisata juga berkontribusi terhadap sampah plastik di sekitar area sempadan sungai, pembungkus makanan dan minuman bekas konsumsi wisatawan utamanya akan berpengaruh terhadap kontribusi sampah plastik. Terlebih lagi ketika lokasi pariwisata berjarak dekat dengan sempadan sungai yang kemungkinan dapat bocor karena manajemen sampah yang tidak baik. Jumlah penduduk juga turut menyumbangkan sampah plastik berupa sampah konsumsi maupun rumah tangga ke lingkungan sungai.

Masing masing aliran sungai berpotensi mengangkut sampah plastik hingga bermuara ke perairan laut Selat Bali. Sungai Umalas merupakan aliran sungai yang berkontribusi paling besar sebagai penghasil sampah plastik ke perairan Selat Bali dengan jumlah 670,105 buah (Gambar 11).



Gambar 11. Prediksi jumlah sampah plastik yang bermuara ke perairan Selat Bali melalui aliran-aliran sungai di Bali

Hal ini dipengaruhi adanya aktifitas pariwisata yang jaraknya dekat dengan sungai seperti daerah Seminyak dan Legian, lokasi pasar yang berdekatan dengan sempadan sungai seperti Pasar Kerobokan, Rakyat Bali, Kedamping, Taman Sari, Kuwumsari, Pangosari, Putra Sedana hingga Penarungan. Jumlah penduduk yang termuat di sepanjang aliran Sungai Umalas yaitu 2,166 hingga 30,288 jiwa per desa, yang mana ini merupakan daerah aliran yang memuat penduduk paling padat dibandingkan aliran-aliran sungai lainnya. Prediksi total kontribusi pencemaran sampah plastik di 30 aliran ini sejumlah 3,438,472 buah.

Langkah preventif terkait penanggulangan sampah plastik di wilayah pariwisata, pasar dan penduduk sekitar sungai akan memberikan pengaruh terhadap pengurangan sampah plastik di sempadan Sungai di Pulau Bali, diantaranya yaitu langkah yang berhubungan dengan ketersediaan tempat sampah yang memadai serta pengadaan pengelolaan sampah di masing-masing desa secara berkelanjutan, pengadaan fasilitas daur ulang dan menerapkan perilaku membuang sampah pada tempatnya. Sebagaimana dari 10 jenis sampah, plastik belanja dan plastik bekas konsumsi masyarakat yang banyak ditemukan (Tabel 3).

4. Kesimpulan

Sampah plastik ditemukan di sempadan sungai di Pulau Bali yang memiliki muara di perairan Selat Bali dengan karakteristik sampah yang bervariasi dari kelas plastik lunak, plastik keras, tali plastik hingga sampah pancing. Tingkat konsentrasi sampah plastik relatif yang termuat di masing-masing sempadan sungai juga berbeda-beda. Sebagian besar distribusi sampah plastik di sepanjang 30 aliran sungai prediksi ini memiliki konsentrasi sampah plastik relatif yang berkisar 0-20%. Konsentrasi sampah plastik relatif paling tinggi ditemukan di sempadan sungai desa Selanbawak, Pekutatan, Pulukan, Pendem dan Tuwed yaitu mencapai kisaran 80-100%. Sempadan sungai yang memiliki jarak yang dekat dengan pasar, pariwisata dan jumlah penduduk yang memiliki hubungan kuat dengan kontribusi *smooth* menghasilkan konsentrasi sampah plastik relatif tinggi. Sampah plastik pada sempadan 30 aliran sungai ini berpotensi mencemari aliran sungai dan bermuara di perairan Selat Bali sejumlah 3.438.472 buah.

Daftar Pustaka

- [BPOL] Balai Penelitian dan Observasi Laut, 2018. Berita Penelitian : Sampah kiriman Pantai Kuta antara berkah dan bencana. <http://www.bpol.litbang.kkp.go.id/27-berita-penelitian/323-sampah-kiriman-pantai-kuta-antara-berkah-dan-bencana>.
- [UNEP] United Nations Environment Programme, 2014. *UNEP Year Book: Emerging Issues in our Global Environment*. Nairobi (KE): UNEP. 71 p.
- Akaike, H. 1973. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In B. N. Petrov, & F. Csaki (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory* (pp. 267-281). Budapest: Akademiai Kiado.
- Allsopp, M., Walters, A., Santillo, D., Johnston, P., 2006. *Plastic Debris in the World's Oceans*. Greenpeace, Netherlands. 43 hlm
- Bali Partnership. 2019. Platform Bali Partnership (Poin-poin utama hasil kajian). <https://www.balipartnership.org/id/about/>. [7 Oktober 2021]
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998.
- Emmerik, T.V., Strady, E., Kieu-Le, T.C., Nguyen, L., Gratiot, N., 2019. Seasonality of riverine macroplastic transport. *Scientific Reports*, 9(1) : 1–9
- Fazey MFC, Ryan PG. 2016. Debris Size and Buoyancy Influence The Dispersal Distance of Stranded Litter. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 110(1):371-377
- Gerritse, J., Leslie, H.A., Tender, C.A.D., Devriese, L.I., Vethaak, A.D. 2020. Fragmentation of Plastic Object in a Laboratory Seawater Microcosm. *Nature Scientific Reports*.
- Hardesty, B.D., Lawson, T.J., Velde, T.V.D., Lansdell, M., Wilcox, C., 2017. Estimating quantities and sources of marine debris at a continental scale. *Front Local Environment* Vol.15 (1): 18-25
- Hastie, T., Tibshirani, R., 1986. *Generalized Additive Models, Statistical Science*. Institute of Mathematical Science Statistics. 312-314 hal.
- Ibisch, R., Borchardt, D., 2009. *Integrated Water Resources Management (IWRM): From Research to Implementation*. Leipzig, Magdeburg : Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ. 56 hlm
- Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K.L., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* Vol. 347 : 1-4

- Law, K.L., Ferguson, S.M., Maximenko, N.A., Proskurowski, G., Peacock, E.E., Hafner, J., Reddy, C.M., 2010. Plastic Accumulation in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Science* : 1-5
- Lippiatt, Sherry, Sarah, O., Courtney, A., 2013. Marine Debris Monitoring and Assessment. USA : NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-46. 88 hlm
- Maione, C., 2019. Emergence of plastic pollution on tourism beaches in Zanzibar, Tanzania. School for Environment and Sustainability, University of Michigan. 25 hal.
- Ryan PG. 2015. Does Size and Buoyancy Affect the Long-distance Transport of Floating Debris?. *Environ. Res. Lett.* 10 (2015) 084019
- Setyohadi, D., 2009. Studi potensi dan dinamika stok ikan lemuru (*Sardinella lemuru*) di Selat Bali serta alternatif penangkapannya. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, 11 (1), 78-86.
- Siregar, E.S.Y., 2018. Prediksi Zona Potensi Penangkapan Ikan Tuna Sirip Kuning (*Thunnus albacares*) Menggunakan Model GAM di Perairan Sumatera Barat. Bogor : Teknologi Kelautan, Institut Pertanian Bogor. 73 hal.
- Tirta, I.M., 2009. *Analisis Regresi dengan R*. Jember, Universitas Jember.
- Times Indonesia, 2018. Sampah Ganggu Penyeberangan di Selat Bali. <https://www.timesindonesia.co.id/read/news/164734/sampah-ganggu-penyeberangan-di-selat-bali>. [20 Maret 2020]
- Wood, S.N., 2006. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. London: Chapman and Hall. 416 hal.
- World Bank, 2018. *Indonesia Marine Debris Hotspot. Synthesis Report*
- Zahro, J., Caraka, R.E., Herdiansyah, R., 2018. *Aplikasi Generalized Linear Model pada R*. Jogja : Innosain. 62 hlm