

**PENGARUH IOD (*INDIAN OCEAN DIPOLE*) TERHADAP VARIABILITAS  
NILAI SERTA DISTRIBUSI SUHU PERMUKAAN LAUT DAN  
KLOROFIL-a PADA PERIODE *UPWELLING* DI PERAIRAN SEKITAR  
BUKIT BADUNG BALI**

**Irfan Hafizhurrahman, Kunarso, Agus Anugroho Dwi Suryoputro<sup>\*)</sup>**

Program Studi Oseanografi, Jurusan Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu  
Kelautan, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudarto, SH Tembalang Tlp. / Fax. (024)7474698 Semarang 50275

Email: [irfan.hafizhurrahman@gmail.com](mailto:irfan.hafizhurrahman@gmail.com) , [kunarsojpr@yahoo.com](mailto:kunarsojpr@yahoo.com)

**ABSTRAK**

Perairan Badung Bali merupakan salah satu perairan dengan sumber daya perikanan yang tinggi. Pemahaman IOD terhadap variabilitas suhu permukaan laut dan klorofil-a dapat digunakan untuk membantu menentukan daerah potensi perikanan. Tujuan dari penelitian ini adalah mendeskripsikan pengaruh IOD terhadap variabilitas nilai serta distribusi suhu permukaan laut dan klorofil-a di perairan Badung Bali. Penelitian ini menggunakan data citra MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spektrometri*) level 3(tiga) berupa data SPL dan klorofil-a periode bulanan, data angin, data arus insitu dan permodelan serta data DMI (*Dipole Mode Index*) periode *upwelling* pada bulan Agustus-November setiap tahunnya yang dianalisis tahun 2010-2014. Distribusi parameter diolah menggunakan software ArcGIS 10.0, sedangkan data pendukung disajikan dengan software SMS 10.0. Metode yang digunakan dalam penelitian yaitu studi kasus dan pengambilan data arus insitu menggunakan metode Lagrange. Berdasarkan hasil analisis terjadinya variabilitas nilai SPL dan klorofil-a. SPL mengalami peningkatan pada bulan Agustus-November pada setiap tahun yang dianalisis (2010-2014). Hasil sebaliknya pada konsentrasi klorofil-a yang mengalami penurunan. Nilai SPL tertinggi pada tahun 2010 dan terendah pada tahun 2011. Konsentrasi klorofil-a tertinggi pada tahun 2012 dan terendah pada tahun 2010. SPL tinggi dengan nilai maksimal 33,88°C, hal ini berkaitan dengan fenomena IOD negative. SPL rendah dengan nilai minimal 24,00°C, hal ini berkaitan dengan fenomena IOD positif. Pada sisi lain, konsentrasi klorofil-a di lokasi kajian tersebar di beberapa daerah, dengan nilai maksimal 4,47 mg/m<sup>3</sup>. Hal ini juga dipengaruhi transport massa air dari lapisan bawah dengan meningkatnya intensitas *upwelling*, sehingga memicu pertumbuhan produktivitas primer yang mengakibatkan terjadinya peningkatan klorofil-a. Proses hidrodinamika yang mempengaruhi SPL dan Klorofil-a di perairan Badung Bali secara dominan adalah arus ke barat laut dengan kecepatan berkisar 0,0980-0,2083 m/s.

**Kata kunci:** *IOD, Suhu Permukaan Laut, Klorofil-a, Arus laut, Upwelling, Badung*

**ABSTRACT**

Badung Bali waters is one of the waters with high fishing resources. IOD understanding of the variability of sea surface temperature and chlorophyll-a can be used to help determine areas of potential fishery. The purpose of this study is to describe the effect of the variability IOD values and distribution of sea surface temperature and chlorophyll-a in Badung Bali. This study uses MODIS image data (Moderate-Resolution Imaging spectroradiometer) level 3 (three) in the form of data SPL and chlorophyll-a monthly period, wind data, the data flow in situ and modeling as well as data DMI (Dipole Mode Index) in August-upwelling period November each year 2010-2014 were analyzed. Distribution parameters processed with ArcGIS 10.0 software, while supporting data presented by SMS software 10.0. The method used in the study of case studies and current data collection in situ using Lagrange method. Based on the results of the analysis of the variability of the SPL value and chlorophyll-a. SPL has increased in the month from August to November in each year analyzed (2010-2014). Opposite results in the concentration of chlorophyll-a were decreased. The highest SPL value in 2010 and the lowest in 2011. The highest concentration of chlorophyll-a in 2012 and the lowest in 2010. High SPL with a maximum value 33,88°C, this is related to the phenomenon of negative IOD. Low SPL

with a minimum value 24,00°C, this is related to the phenomenon of positive IOD. On the other hand, the concentration of chlorophyll-a in the study sites in several areas, with a maximum value of 4.4810 mg / m<sup>3</sup>. It is also influenced by the mass transport of water from the bottom layer with increasing intensity of upwelling, fueling the growth of primary productivity resulting in an increase in chlorophyll-a. Hydrodynamic processes that affect the SPL and Chlorophyll-a in Badung Bali is predominantly flows to the northwest with speeds ranging from 0.0980 to 0.2083 m/s.

**Keywords:** *IOD, Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a, Ocean Currents, Upwelling, Badung*

## **PENDAHULUAN**

Perairan Selatan Bali merupakan suatu wilayah perairan di Indonesia yang sangat terkenal potensial di bidang perikananannya. Perairan ini memiliki potensi sumber daya perikanan yang sangat tinggi sehingga daerah ini umumnya sebagai *fishing ground*. Kesuburan wilayah ini terkait dengan adanya pola arus yang memungkinkan terjadinya *mixing* dan *upwelling* (Kunarso *et al.*, 2005). Martono *et al.* (2008), mengemukakan bahwa perairan selatan Bali mempunyai sifat yang unik dan dinamika yang kompleks. Kompleksnya fenomena interaksi laut yang terpengaruhi atmosfer di wilayah diatas karena adanya IOD (*Indian Ocean Dipole*), dan monsoon, disamping itu dinamika laut yang kompleks karena adanya arus lintas Indonesia (Arlindo) dan sistem arus permukaan yang menyebabkan variabilitas pola arus dan *upwelling* (Susanto *et al.*, 2001). Variabilitas *upwelling* di perairan Samudera Hindia terkait dengan fenomena IOD (Susanto *et al.* 2001). Pengaruh IOD terhadap perairan Samudera Hindia Bagian Timur secara global di daerah *upwelling* mempunyai variabilitas kisaran suhu permukaan laut dan klorofil-a yang spesifik (Kunarso *et al.*, 2011). Variabilitas SPL selama IOD negatif terjadi terkait dengan perubahan medan angin di tengah Samudera Hindia ekuator sehingga variabilitas nilai serta distribusi suhu permukaan laut relatif hangat daripada bagian barat (Martono *et al.*, 2008). Variabilitas SPL ditunjukkan dengan adanya penurunan suhu seiring perubahan waktu hingga puncak *upwelling*. Pada sisi lain klorofil-a naik seiring dengan perubahan waktu pada variansi kejadian IOD positif (Kunarso *et al.*, 2011). Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah mendeskripsikan pengaruh IOD terhadap variabilitas nilai serta distribusi suhu permukaan laut dan klorofil-a pada periode *upwelling* di perairan sekitar Bukit Badung Bali.

## **MATERI DAN METODE PENELITIAN**

### **Materi Penelitian**

Materi yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data citra MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spektrometri*) level 3(tiga) dari satelit Aqua periode bulanan, berupa distribusi spasial SPL (Suhu Permukaan Laut) dan klorofil-a bulanan, peta bathimetri Perairan Bukit Badung Bali, data angin, data arus insitu, dan data arus hasil model. Disamping itu dilengkapi dengan data DMI (*Dipole Mode Index*) periode *upwelling* pada bulan Agustus-November setiap tahunnya yang dianalisis (2010-2014).

### **Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan penelitian deskriptif yang bersifat eksploratif, yaitu metode yang berusaha mendeskripsikan, menginterpretasikan sesuatu, akibat atau efek yang terjadi atau tentang kecenderungan yang sedang berlangsung secara sistematis, faktual dan akurat mengenai fakta-fakta dan sifat-sifat daerah tertentu (Suryabrata, 1998). Metode yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengukuran di lapangan dan analisis data. Hasil akhir pada penelitian ini akan menggambarkan tentang pengaruh dari IOD terhadap variabilitas nilai serta distribusi suhu permukaan laut dan klorofil-a yang berguna untuk dasar peramalan potensi perikanan di Perairan Badung Bali secara long-periode dan bisa memberikan tambahan pemahaman khususnya di bidang oseanografi perikanan di wilayah Perairan Badung Bali.

### **Metode Penentuan Lokasi**

Metode penentuan lokasi sebagai *ground check* data arus dengan menggunakan *purposive sampling method*, yaitu pengambilan sampel yang dipilih dengan cermat sehingga relevan dengan struktur penelitian dengan pertimbangan tertentu (Djarwanto, 1990). Pengambilan data dilakukan pada 3 stasiun pengamatan dengan pertimbangan lokasi tidak terganggu oleh aktivitas

nelayan atau kapal. Parameter oseanografi yang dikaji berupa arus dengan memperhatikan pengaruh angin.

**Metode Pengambilan Data**

Data angin yang diperoleh dari ECMWF (*The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) berupa arah dan kecepatan angin di Perairan Bukit Badung Bali. Untuk Peta bathimetri Perairan Bukit Badung Bali yang diperoleh dari BAKOSURTANAL berupa Peta Lingkungan Pantai Indonesia dengan skala 1:50.000. Data suhu permukaan laut dan klorofil-a diinterpolasikan dengan data citra MODIS yang didownload dari <http://www.oceancolor.gfsc.nasa.gov>. Data DMI yang merupakan indeks IOD di download dari <http://www.bom.gov.au/climate/enso/indices.shtml?bookmark=iod> yang menggambarkan perbedaan anomali SPL diantara bagian barat tropis Samudera Hindia yang digunakan berdasarkan adanya kejadian IOD.

Pengukuran data arus permukaan dilakukan dengan metode *lagrange* menggunakan bola duga sebagai alat untuk memperoleh kecepatan arus dilakukan pada kedalaman 0,2 d, 0,4 d, 0,8 d. Data yang diperoleh adalah waktu tempuh (t), jarak tempuh (s) dan arah (°). Hadi (2002) menjelaskan kecepatan pergerakan partikel air dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$v = \frac{s}{t} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- v : kecepatan pergerakan partikel air (m/s)
- s : jarak perpindahan partikel air (m)
- t : waktu tempuhnya (s)

**Metode Analisis Data**

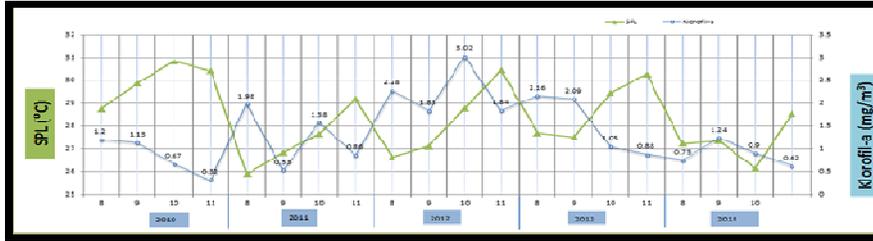
Data suhu permukaan laut dan klorofil-a dari citra MODIS yang didownload dari internet diolah dengan menggunakan *software* SeaDAS dan Arc GIS 10.0 untuk dilihat pola sebarannya. Data DMI diolah menggunakan *software* Microsoft Excel untuk mendeskripsikan hasil olahan dalam bentuk grafik. Data angin diolah dengan menggunakan *MATLAB*, *software* ini menampilkan arah dan kecepatan angin dalam bentuk mata angin. Pemodelan hidrodinamika 2D diolah menggunakan menggunakan *software* SMS (*Sea water Modelling System*) sesuai dengan modul ADCIRC menggunakan data data arus, pasang surut dan batimetri. Hasil pengambilan data lapangan berupa data arus diolah menggunakan CD-Oceanography dan *Currentrose* untuk melihat dominansi arah dan kecepatan arus disetiap stasiun. Hasil pemodelan di verifikasi dengan membandingkan pola arus hasil model dengan pola arus hasil pengukuran lapangan pada saat *ground check*. Sugiyono (2013) menjelaskan untuk analisis korelasi pengaruh IOD terhadap suhu permukaan laut dan klorofil-a dapat menggunakan perhitungan korelasi *Pearson*:

$$R = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \dots\dots\dots(2)$$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Variabilitas Temporal SPL dan Klorofil-a**

Hubungan antara data SPL dan klorofil-a ditemukan fenomena bahwa adanya peningkatan suhu permukaan laut diikuti dengan penurunan nilai klorofil-a.



Gambar 1. Hubungan antara SPL dan Klorofil-a pada Periode *Upwelling* Bulan Agustus–November Tahun 2010-2014

Tabel. 1. Tabel Kenaikan SPL dari Agustus ke November

No	Tahun	Rerata SPL Agustus (°C)	Rerata SPL November (°C)
1	2010	28,75	30,40
2	2011	25,90	29,17
3	2012	26,61	30,44
4	2013	27,69	30,26
5	2014	27,21	28,54

Tabel. 2. Variabilitas Rerata SPL Minimum dan Maksimum Antar Tahunan

No	Tahun	Rerata SPL Minimum (°C)	Rerata SPL Maksimum (°C)	Rerata SPL Total (°C)
1	2010	27,26	32,62	28,54
2	2011	24,24	30,50	26,52
3	2012	25,51	30,95	27,80
4	2013	26,17	31,28	27,93
5	2014	25,92	28,69	26,65

Berdasarkan analisis data tampak adanya fenomena variabilitas tahunan dimana SPL dari bulan Agustus hingga November mengalami peningkatan. Hal ini bisa terjadi tampak berkaitan dengan menurunnya intensitas *upwelling*. Fenomena ini dipengaruhi oleh angin monsun timur yang bergeser ke monsun barat, dimana proses ini berkaitan dengan adanya pergeseran pusat tekanan udara rendah di atas benua Australia yang menyebabkan kecepatan angin monsun timur menurun seiring dengan perubahan bulan (Susanto *et al.*, 2001). Berkurangnya tekanan angin mengakibatkan transport Ekman sebagai pembangkit *upwelling* di pantai selatan Bali termasuk di Pantai Bukit Badung juga akan berkurang kecepatannya. Hal ini mengakibatkan transport massa air yang membawa massa air dingin dari lapisan bawah berkurang dengan perubahan bulan (Susanto *et al.*, 2001). Bulan Agustus yang merupakan puncak terjadinya *upwelling* merupakan periode dimana SPL bernilai minimum, dengan perubahan bulan dari Agustus hingga November menyebabkan intensitas kekuatan *upwelling* semakin menurun dan suplai air dingin dari lapisan dalam semakin menurun pula, sehingga menyebabkan suhu permukaan laut meningkat di perairan Bukit Badung Bali.

Tabel. 3. Tabel Penurunan Klorofil-a dari Agustus ke November

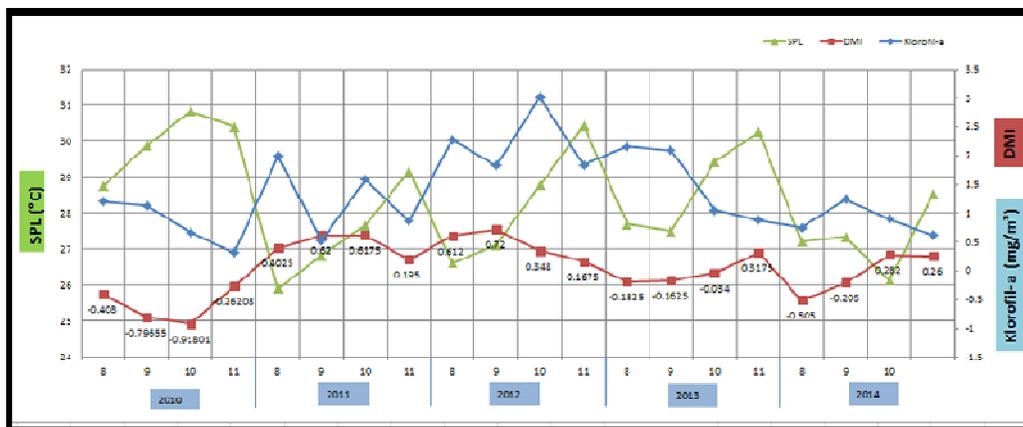
No	Tahun	Rerata SPL Agustus (mg/m <sup>3</sup> )	Rerata SPL November (mg/m <sup>3</sup> )
1	2010	1,20	0,31
2	2011	1,99	0,86
3	2012	2,28	1,84
4	2013	2,16	0,88
5	2014	0,75	0,62

Tabel 4. Variabilitas Klorofil-a Antar Tahunan

No	Tahun	Rerata Klorofil-a Minimum (mg/m <sup>3</sup> )	Rerata Klorofil-a Maksimum (mg/m <sup>3</sup> )	Rerata SPL Total (mg/m <sup>3</sup> )
1	2010	0,06	1,60	0,26
2	2011	0,09	2,39	0,34
3	2012	0,09	4,34	0,49
4	2013	0,10	2,98	0,36
5	2014	0,11	1,65	0,42

Pada sisi lain klorofil-a tampak adanya fenomena variabilitas tahunan dari bulan Agustus hingga November nilainya mengalami penurunan. Menurunnya kadar klorofil-a tersebut diduga berkaitan dengan proses *upwelling* yang semakin menurun. Menurunnya intensitas *upwelling* menyebabkan turunnya kadar nutrien yang berada di lapisan permukaan perairan. Menurunnya kadar nutrien menjadikan perairan menjadi semakin tidak subur, sehingga pertumbuhan fitoplankton berkurang. Hal inilah yang menyebabkan kadar klorofil-a menurun, seiring perubahan bulan dari Agustus hingga November.

a. Keterkaitan antara IOD (*Indian Ocean Dipole*) dengan SPL dan Klorofil-a



Gambar 2. Grafik Anomali DMI (*Dipole Mode Indeks*), SPL (*Suhu Permukaan Laut*) dan Klorofil-a Citra MODIS pada Periode *upwelling* (Agustus–November) Tahun 2010 - 2014

Suhu permukaan laut pada periode *upwelling* tertinggi terjadi pada tahun 2010 dan terendah pada tahun 2011. Tahun 2010 tertinggi hal ini terjadi karena bertepatan dengan fenomena IOD negatif, dengan nilai DMI berkisar -0,918. Pada kondisi ini terjadi anomali suhu permukaan laut (SPL) di Samudera Hindia bagian barat tropis turun atau lebih rendah daripada di bagian timurnya. Dalam kondisi ini tekanan udara rendah terjadi di Samudera Hindia bagian timur, sehingga angin bertiup kuat dari Samudera Hindia Barat ke Samudera Hindia Timur (termasuk perairan selatan Indonesia) (Marsac dan Le Blanc, 1998). Angin ke arah timur ini menghambat angin monsun timur yang bertiup di wilayah Indonesia termasuk di selatan Bali (Kunarso, 2014). Hal ini menyebabkan melemahnya intensitas *upwelling* di perairan tersebut. Akibat dari fenomena dan proses ini maka SPL pada tahun 2010 tampak paling tinggi daripada tahun-tahun yang lain.

Pada tahun 2011 SPL terendah, hal ini terjadi karena bertepatan dengan fenomena IOD positif dengan nilai rerata DMI berkisar 0,62. Fenomena ini mengakibatkan pusat tekanan udara rendah di Samudera Hindia bagian barat dan pusat tekanan udara tinggi di Samudera Hindia timur. Kondisi ini mengakibatkan angin bertiup kuat dari Samudera Hindia timur ke Samudera Hindia barat, sekaligus membawa massa air hangat dari timur ke barat, hal ini mengakibatkan slope muka air yang rendah di Samudera Hindia bagian timur dan tinggi di Samudera Hindia

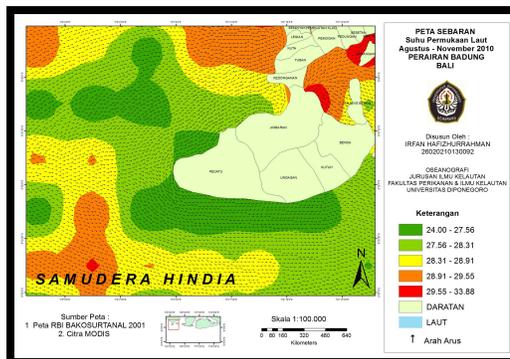
bagian barat (Marsac dan Le Blanc, 1998). *Slope* muka air laut yang rendah di Samudera Hindia bagian timur kemudian diisi oleh massa air dari bawah, dalam proses ini terjadi peningkatan intensitas *upwelling* yang lebih tinggi daripada tahun yang lain. Kondisi yang hampir sama terjadi pada tahun 2014.

Klorofil-a pada periode *upwelling* tahun 2010-2014 mengalami variabilitas. Klorofil-a pada periode *upwelling* tertinggi terjadi pada tahun 2012 dan terendah pada tahun 2010 (Gambar 2). Tahun 2012 klorofil-a tertinggi diduga kuat karena adanya fenomena IOD positif yang berpengaruh terhadap kandungan klorofil-a. Pada bulan Agustus hingga Oktober 2012 nilai IOD positif berkisar 0,35-0,75 (Gambar 2). Puncak dari kisaran nilai IOD tersebut merupakan nilai IOD positif tertinggi selama periode penelitian. Nilai IOD positif yang mengakibatkan peningkatan intensitas *upwelling*. Peningkatan *upwelling* ini membawa nutrient dari lapisan bawah perairan yang merangsang pertumbuhan fitoplankton. Meningkatnya kadar fitoplankton akan meningkatkan produktivitas primer yang menghasilkan kadar klorofil-a yang tinggi pada suatu perairan (Hendiarti *et al.*, 2004). Hal inilah yang menyebabkan klorofil-a pada tahun 2012 sangat tinggi.

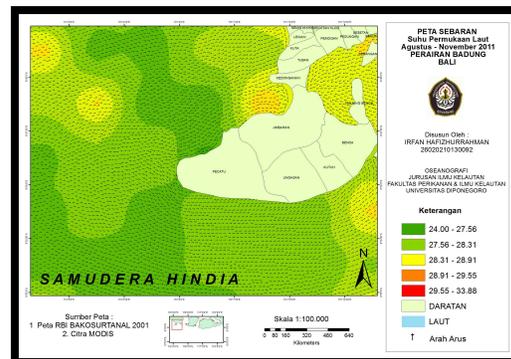
Pada bulan November 2012, meskipun terjadi penurunan nilai IOD, namun nilai klorofil-a tetap tinggi (Gambar 2). Fenomena ini diduga terjadi akibat dari peningkatan intensitas curah hujan, seiring perubahan bulan ke musim barat. Intensitas air hujan yang meningkat berakibat meningkatnya *run off* sungai-sungai di sekitar Bukit Badung. *Run off* sungai membawa serta nutrient masuk ke wilayah perairan pantai. Peningkatan nutrient di pantai mengakibatkan meningkatnya konsentrasi fitoplankton yang sekaligus meningkatkan kadar klorofil-a di perairan tersebut.

Pada tahun 2010 klorofil-a terendah, faktor penyebab turunnya klorofil-a adalah menurunnya konsentrasi nutrient terlarut di perairan (Lalli dan Parson, 1994). Hal ini bertepatan dengan fenomena IOD negatif. Fenomena ini mengakibatkan angin monsun yang bertiup di atas pulau Jawa yang memutar ke utara terhambat oleh angin timur di Samudera Pasifik yang bertiup ke arah barat (Kunarso *et al.*, 2011). Angin monsun ini dipengaruhi anomali IOD negatif, semakin kecil indeks IOD maka semakin kecil kekuatan angin yang berhembus ke arah barat yang mengakibatkan menurunnya intensitas *upwelling*. Intensitas *upwelling* yang melemah mengakibatkan kadar nutrient turun karena transport massa air yang membawa nutrient ke permukaan sangat kecil sehingga perkembangan produktivitas fitoplankton pada tahun 2010 sangat kecil. Hal inilah yang menyebabkan kandungan klorofil-a pada tahun 2010 sangat rendah.

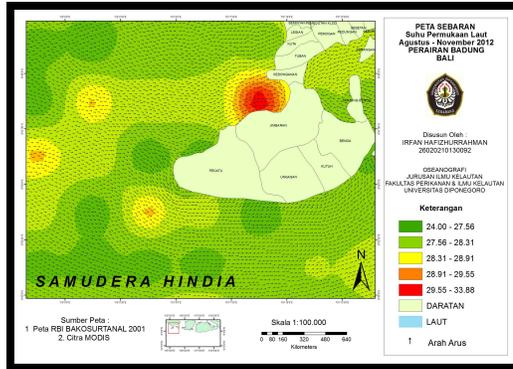
**b. Variabilitas Nilai SPL dan Klorofil-a Secara Spasial serta Kaitannya dengan Pola Arus**



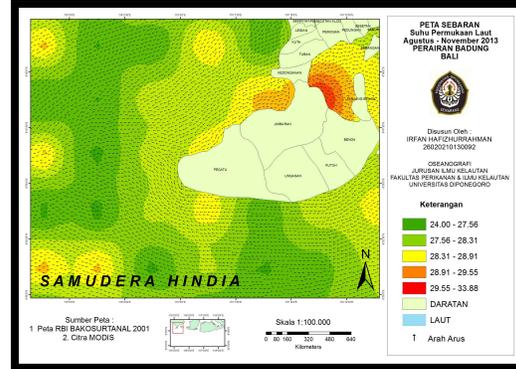
Gambar 3. Peta Sebaran Suhu Permukaan Laut Periode *Upwelling* Tahun 2010 Perairan Badung, Bali



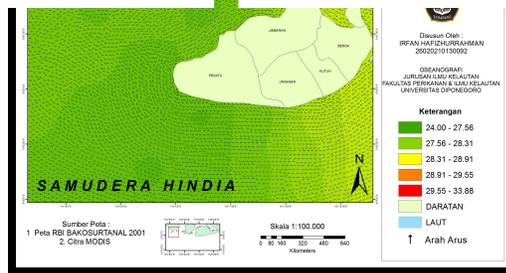
Gambar 4. Peta Sebaran Suhu Permukaan Laut Periode *Upwelling* Tahun 2011 Perairan Badung, Bali



Gambar 5. Peta Sebaran Suhu Permukaan Laut Periode *Upwelling* Tahun 2012 Perairan Badung, Bali



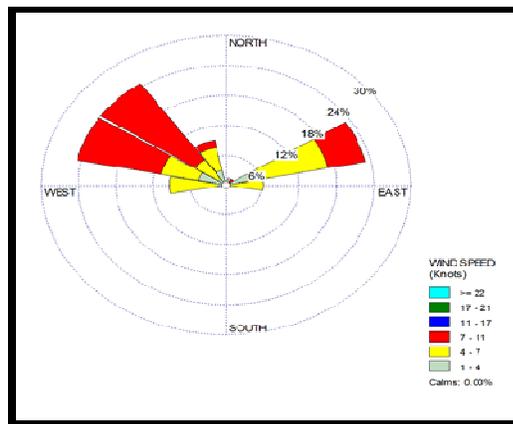
Gambar 6. Peta Sebaran Suhu Permukaan Laut Periode *Upwelling* Tahun 2013 Perairan Badung, Bali



Gambar 7. Peta Sebaran Suhu Permukaan Laut Periode *Upwelling* Tahun 2014 Perairan Badung, Bali

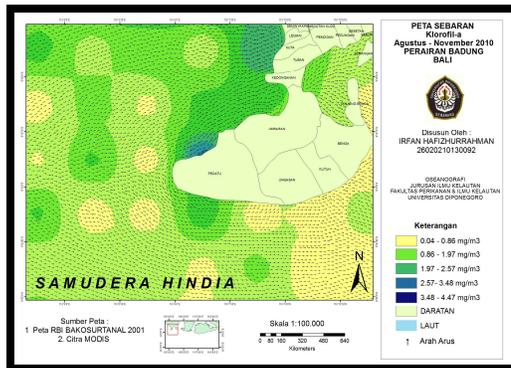
Pada gambar diatas ditemukan fenomena distribusi spasial yang berbeda antara perairan di selatan Bukit Badung dan sebelah utara Bukit Badung. Suhu permukaan Laut tampak lebih dingin di pantai perairan selatan Bukit Badung daripada di sebelah utara Bukit Badung. Di perairan Selatan Bukit Badung kisaran SPL di pantai didominasi berkisar 24-27°C, sedangkan di pantai utara Bukit Badung didominasi berkisar 26-33,88 °C.

Fenomena di atas bisa terjadi diduga berkaitan dengan adanya fenomena *upwelling* yang terjadi secara umum dari selatan Pulau Timor hingga Selatan Jawa, termasuk di perairan selatan Bukit Badung. Proses *upwelling* yang terjadi di wilayah ini dibangkitkan oleh angin tenggara yang bertiup dari wilayah Benua Australia ke arah barat laut. Diatas kepulauan Timor hingga Jawa angin ini cenderung bergerak sejajar garis pantai, kondisi ini membangkitkan transport Ekman yang menyebabkan massa air permukaan bergerak menjauhi garis pantai (Susanto *et al.*, 2001, Kunarso, *et al.*, 2005).

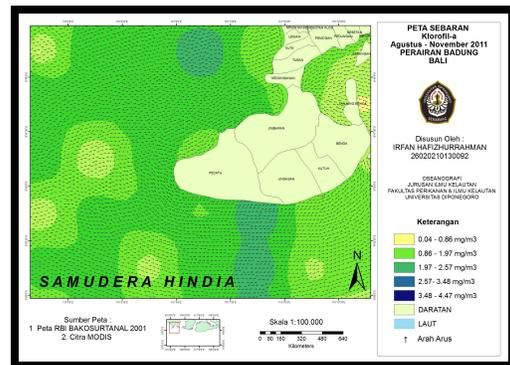


Gambar 8. Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Oktober Tahun 2014 di Perairan sekitar Bukit Badung Bali

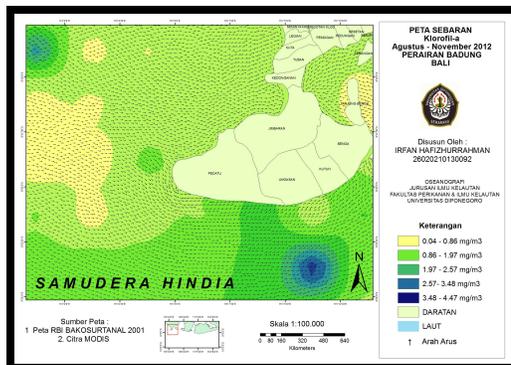
Berdasarkan data angin di wilayah riset yaitu perairan sekitar Bukit Badung, menunjukkan dominasi angin pada bulan oktober cenderung ke arah barat laut (Gambar 8). Kondisi arah angin yang cenderung sejajar dengan pantai selatan Bukit Badung, menyebabkan massa air permukaan di selatan Bukit Badung bergerak ke arah kiri menjauhi pantai. Hal ini mengakibatkan kekosongan massa air di permukaan, yang kemudian diisi oleh massa air dari bawah maka terjadilah proses *upwelling*, proses ini sesuai dengan yang dijelaskan dalam Thurman (1991) dan Steward (2006). Proses *upwelling* tersebut mengangkat massa air yang lebih dingin di lapisan bawah ke permukaan perairan. Oleh karena itulah SPL di perairan pantai selatan Bukit Badung cenderung lebih dingin daripada di pantai sebelah utara Bukit Badung (Gambar 3-7).



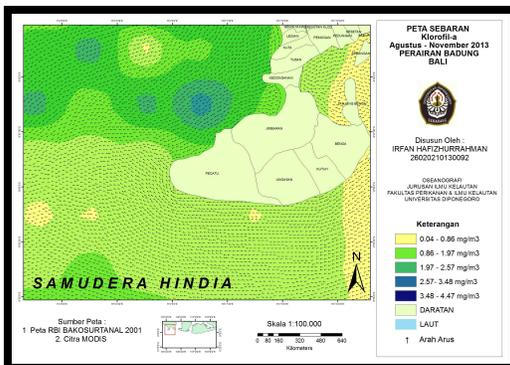
Gambar 9. Peta Sebaran Klorofil-a Periode *Upwelling* Tahun 2010 Perairan Badung, Bali



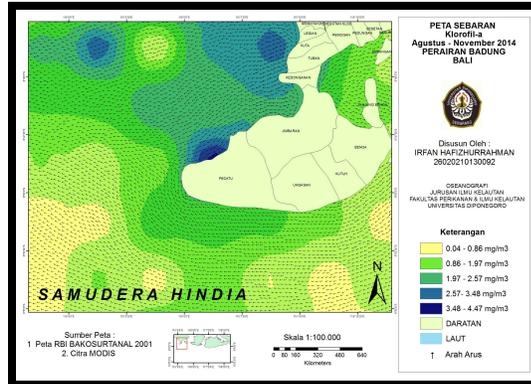
Gambar 10. Peta Sebaran Klorofil-a Periode *Upwelling* Tahun 2011 Perairan Badung, Bali



Gambar 11. Peta Sebaran Klorofil-a Periode *Upwelling* Tahun 2012 Perairan Badung, Bali



Gambar 12. Peta Sebaran Klorofil-a Periode *Upwelling* Tahun 2013 Perairan Badung, Bali

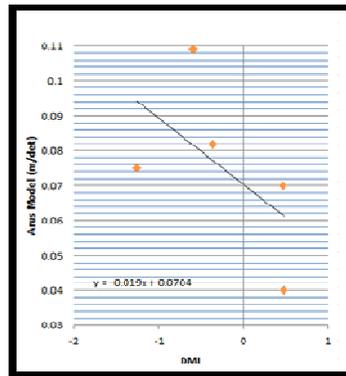


Gambar 13. Peta Sebaran Klorofil-a Periode *Upwelling* Tahun 2014 Perairan Badung, Bali

Kadar klorofil-a secara spasial juga menunjukkan fenomena yang menarik, pada tahun 2011 dan 2012 konsentrasi klorofil-a tinggi (berkisar 0,8577-3,4792  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) tampak terjadi di sebelah selatan Bukit Badung dan dominasi kadar klorofil-a rendah (berkisar 0,0427-0,19684  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) terjadi di utara Bukit Badung (Gambar 9-11). Fenomena ini bisa terjadi diduga berkaitan dengan terjadinya IOD positif, pada periode tersebut kisaran DMI (indek IOD) positif dengan nilai berkisar 0,1675-0,72. Nilai DMI positif ini menyebabkan peningkatan intensitas proses *upwelling* di perairan Selatan Jawa hingga Timor (Kunarso, 2014), tentu saja termasuk di perairan selatan Bukit Badung. Peningkatan proses *upwelling* akan meningkatkan kadar nutrisi yang lebih tinggi di bagian selatan Bukit Badung daripada di sebelah utara yang tidak terjadi proses *upwelling*. Meningkatnya kadar nutrisi di wilayah *upwelling* selatan Bukit Badung memicu peningkatan pertumbuhan dan perkembangan fitoplankton sekaligus kadar klorofil-a di perairan tersebut. Klorofil-a merupakan pigmen hijau yang terkandung dalam fitoplankton. Sehingga peningkatan kadar fitoplankton berarti juga peningkatan kadar klorofil-a. Karena proses inilah sehingga kadar klorofil-a di perairan selatan Bukit Badung pada tahun 2011-2012 lebih tinggi daripada di sebelah utaranya.

Pada tahun 2010, 2013 dan 2014 kondisi sebaliknya terjadi, dimana kadar klorofil-a tinggi (berkisar 0,8577-4,4810  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) terjadi di utara Bukit Badung, dan rendah (berkisar 0,0427-0,19684  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) di sebelah selatannya (Gambar 9, 12 dan 13). Fenomena ini bisa terjadi diduga berkaitan dengan terjadinya IOD yang dominan negatif, pada periode tersebut kisaran DMI (indek IOD) dominan negatif dengan nilai tahun 2010 berkisar (-)0,9180-(-)0,2020; tahun 2013 bernilai (-)0,1825- 0,317; dan tahun 2014 bernilai (-)0,505-0,282 (Gambar 2). Nilai DMI yang cenderung negatif ini merupakan indikasi tekanan udara rendah terjadi di Samudera Hindia bagian timur (tentu termasuk juga di atas wilayah Bali). Sehingga angin yang kuat dari samudera Hindia bagian barat dengan membawa uap air mengalir ke Samudera Hindia Bagian timur termasuk di wilayah Indonesia, yang mengakibatkan curah hujan meningkat di wilayah Indonesia (Marsac and Le Blanc, 1998). Meningkatnya curah hujan di atas Bali, menyebabkan meningkatnya *run off* sungai yang diduga lebih tinggi di sebelah utara Bukit Badung daripada di sebelah selatannya, karena perairan di sebelah utara lebih banyak berbatasan dengan daratan. Meningkatnya *run off* sungai di perairan sebelah utara bukit Badung akan meningkatkan kadar nutrisi di perairan, yang memicu meningkatnya kadar fitoplankton. Peningkatan kadar fitoplankton berarti juga peningkatan kadar klorofil-a. Karena proses inilah maka kadar klorofil-a di perairan utara Bukit Badung pada tahun 2010, 2013 dan 2014 lebih tinggi daripada di sebelah selatannya.

Keterkaitan antara pola arus yang dimodelkan dengan SMS dengan pola distribusi SPL dan klorofil-a, meskipun tidak begitu konsisten namun masih tampak ada berkaitan. Model arus dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi mendekati 65%, tampak memiliki pola yang hampir sama dengan distribusi SPL dan klorofil-a pada bulan Oktober tahun 2014. Tampak SPL di perairan selatan Bukit Badung terbawa arus ke arah barat, kemudian memutar ke arah utara (Gambar 7). Pada Gambar 13, tampak klorofil-a terdistribusi ke arah barat, kemudian memutar ke arah utara sesuai dengan arah arus. Di pantai sebelah utara Pecatu klorofil-a konsentrasi tinggi terdistribusi ke arah timur sesuai dengan arah arus.



Gambar 14. *Scatter Plot* Hubungan korelasi Permodelan Arus Laut dengan DMI

Hubungan DMI dengan kecepatan arus laut menunjukkan keterkaitan yang sedang dengan nilai  $r = -0,57$ , hubungannya menunjukkan berbanding terbalik. Ketika DMI positif tinggi maka kecepatan arus lambat, sebaliknya ketika DMI negatif maka kecepatan arus lebih cepat. Hal ini bisa terjadi diduga berkaitan dengan ketinggian slope muka air (Marsac and Le Blanc, 1998).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kejadian IOD pada periode *upwelling* mempengaruhi variabilitas temporal maupun spasial SPL dan klorofil-a antar tahunan. Secara temporal ketika IOD positif, maka nilai SPL di perairan sekitar Bukit Badung lebih rendah daripada saat IOD negatif. Secara spasial pada saat IOD positif, klorofil-a yang lebih tinggi terjadi di perairan sebelah selatan Bukit Badung, sebaliknya pada saat IOD negatif klorofil-a tinggi terjadi di sebelah utara Bukit Badung. Berdasarkan analisis korelasi menunjukkan keterkaitan IOD dengan SPL lebih kuat daripada dengan klorofil-a karena klorofil-a juga dipengaruhi peningkatan nutrisi dari *run off* sungai akibat curah hujan. Keterkaitan arus laut dengan IOD menunjukkan tingkat yang cukup erat dengan nilai  $r = -0,57$ , ketika IOD positif kecepatan arus di perairan sekitar Bukit Badung menurun, sebaliknya pada saat IOD negatif, kecepatan arus di wilayah tersebut meningkat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Djarwanto, P.S. 1990. Pokok-Pokok Metode Riset dan Bimbingan Teknis Penulisan Skripsi. Liberty, Yogyakarta.
- Hadi, S. 2002. Arus Laut. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Hendiarti, N., H. Siegel dan Thomas. 2004. Investigation of Different Coastal Processes in Indonesian Waters Using SeaWiFS Data. Deep Sea Research Part II, 51:81-97.
- Kunarso, N.S. Ningsih dan A. Supangat. 2005. Karakteristik Upwelling di Sepanjang Perairan Selatan NTT hingga Barat Sumatera. Ilmu Kelautan, 10(1):17-23.
- , S. Hadi, N.S. Ningsih dan M.S. Baskoro. 2011. Variabilitas Suhu dan Klorofil-a di Daerah Upwelling Pada Variasi Kejadian ENSO dan IOD di Perairan Jawa Sampai Timor. Ilmu Kelautan, 16(3): 171-180.
- , 2014. Pengaruh Monsun, *El Niño-Southern Oscillation* dan *Indian Ocean Dipole* Terhadap Waktu dan Daerah Penangkapan Ikan Tuna di Samudra India Bagian Timur. [Disertasi], Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Lalli, C.M. dan T.R. Parson. 1994. Biological Oceanography: An Introduction. Pergamon, BPC Wheatons Ltd, British, 301p.
- Martono, Halimurrahman, R. Komarudin, Syarif, S. Priyanto dan D. Nugraha. 2008. Studi Variabilitas Lapisan Atas Perairan Samudera Hindia Berbasis Model Laut. LAPAN. Jakarta.

- Marsac, F. and J. Le Blanc. 1998. Dynamics of ENSO events in the Indian Ocean, to What Extend would Recruitment and Catch-ability of Tropical Tuna be Affected. IOTC Proceedings, 3: 89-101.
- Steward, H. R. 2006. Introduction To Physical Oceanography. Department of Oceanography. A & M University, Texas.
- Sugiyono. 2013. Statistika Untuk Penelitian. Alfabeta, Bandung, 233 hlm.
- Suryabrata, S. 1998. Metodologi Penelitian. Rajawali Press, Jakarta, 165 hlm.
- Susanto, D., A.L. Gordon dan Q. Zheng. 2001. Upwelling along the coast of java and Sumatera and its relation to ENSO. Geophys. Res. Lett., 28(8):1599 - 1602.
- Thurman, H.V. 1991. Introductory Oceanography, Sixth Edition, Macmillan Publishing Company, New York, 526 p.