

Analisis Fluks Nutrien Berdasarkan Estimasi Difusi Vertikal Eddy (K_z) Di Selatan Dewakang Sill

Kaharuddin¹

¹Program Studi Ilmu Kelautan Sekolah Tinggi Pertanian Kutai Timur
Jl. Soekarno-Hatta, No.01, Sangatta, Kutai Timur, Kalimantan Timur, Kode Pos 75387

ABSTRACT

The main nutrients of oceans come from various sources, i.e. from the mainland, Nutrients supply from bottom water layer toward the surface layer is not as easy as with input from mainland and were swept away. Control of the pressure difference between the layers as activator factor of nutrients amount from bottom layer to the surface layer. method for analysis of nutrients movement between layers vertically by analyzing value of vertical eddy diffusion (K_z), where the coefficient of eddy diffusion by vertical its describe turbulence activity in water column that describes a mixing process, so the condition in which the mixing value in line with the increase coefficient value of diffusion. Data source currents, temperature and salinity are an expedition result of Baruna Jaya IV, on track in South Dewakang Sill, with 5 observation stations. The results showed overall K_z value (5 stations) in thermocline layer from 4 Stations, showing an avrage K_z value on thermocline at $1.40 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$. The highest value was found at Station 3 ($7,17 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$) and the lowest Station 4 with a value $1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$, so that it can be concluded that condition depends on pycnocline layer and halocline which is causing differences level of stability stasis throughout the station.

Keywords: *Nutrients flux, Vertical eddies difussion, Dewakang Sill*

ABSTRAK

Nutrien utama lautan berasal dari berbagai sumber, yaitu dari daratan, terbawah oleh arus laut global dan dari lapisan dalam lautan. Suplay nutrien dari lapisan dalam perairan menuju lapisan permukaan tidak semudah dengan masukan dari daratan dan yang terbawa arus. kontrol dari perbedaan tekanan dan kedalaman antar lapisan sebagai faktor penggerak jumlah nutrien dari dari lapisan dalam kepermukaan. Metode untuk analisis perpindahan nutrin antar lapisan secara vertikal dengan menganalisa nilai difusi vertikal eddy (K_z), dimana nilai koefisien difusi eddy secara vertikal menggambarkan aktivitas turbulensi dalam kolom perairan yg menjelaskan proses pencampuran, sehingga kondisi dimana nilai pencampuran sejalan dengan bertambahnya nilai koefisien difusi. Sumber data arus, suhu dan salinitas merupakan hasil ekspedisi Baruna Jaya IV, pada rute lintasan di Selatan Dewakang Sill, dengan 5 stasiun pengamatan. Hasil menunjukkan Nilai K_z keseluruhan (5 stasiun) di lapisan termoklin dari 4 Stasiun, menunjukkan nilai rata - rata K_z pada lapisan termoklin sebesar $1.40 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$. Nilai tertinggi ditemukan pada Stasiun 3 ($7.17 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$) dan terendah pada Stasiun 4 dengan nilai $1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$, sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi ini sangat tergantung dari lapisan *pycnocline* dan *halocline* yang menyebabkan adanya perbedaan tingkat stabilitas stasis sepanjang stasiun.

Kata kunci: Fluks nutrien, Difusi vertikal eddy, Dewakang Sill.

1 Pendahuluan

Proses pencampuran yang terjadi di laut dalam skala kecil dan besar secara umum dapat ditelaah dengan mempelajari dinamika dan karakteristik dari beberapa param oceanografi terkait. Pencampuran massa air terjadi akibat adanya perbedaan densitas yang dapat digambarkan oleh kondisi suhu, salinitas, dan kedalaman. Secara global suhu dan salinitas lautan mencirikan massa air pada perairan yang berbeda,

baik secara horizontal maupun secara vertikal. Korelasi antara suhu dan salinitas di suatu perairan dapat menjadi acuan dalam mengamati asal-usul, penyebarannya, terbentuknya pelapisan, dan proses pencampuran massa air secara temporal dan spasial.

Menurut Ross (1790) bahwa meningkatnya densitas suatu perairan merupakan akibat meningkatnya salinitas, tekanan, dan penurunan nilai suhu. Peranan suhu dan salinitas, membentuk stratifikasi densitas perairan yang disebut sebagai lapisan piknoklin, menunjukkan peningkatan densitas seiring bertambahnya kedalaman. Tiap lapisan bentukan dari stratifikasi suhu dan salinitas memiliki ketebalan densitas yang berbeda, oleh Wyrki (1960) mengatakan perbedaan ketebalan lapisan densitas perairan dipengaruhi proses dinamika perairan.

Keberadaan *sill* dengan kontur yang dangkal menunjukkan laju eksposur pergerakan arus yang sangat kuat, berdasarkan hasil analisa kesetimbangan nilai transportasi beberapa titik arus oleh Gordon *et al.* (2003) menunjukkan bahwa arus Dewakang *Sill* antara 7.3–10.7 Sv dengan kedalaman 680 m menyebabkan pasokan massa air ke laut Flores berkurang. Kedalaman suatu *sill* sangat efektif diamati berdasarkan dengan metode termodinamik dengan menggunakan perbandingan param suhu, salinitas dan konsentrasi oksigen pada kedua sisi pada punggung *sill*. Berdasarkan eksperimen numerik pada dua dimensi non hidrostatik pada Dewakang *Sill* menurut Hatayama (2004) menunjukkan bahwa gelombang internal dari komponen M2 pasang surut yang dominan di wilayah *sill* dengan amplitudo yang cukup besar menciptakan pencampuran vertikal yang kuat yang menyebabkan difusivitas vertikal maksimal mencapai nilai $6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Melalui eksperimen model Arlindo oleh Conkright *et al.* (1998) dan Gordon *et al.* (2003) mengamati proses pertukaran massa air vertikal antara lapisan terbuka permukaan dan massa air dalam kolom cekungan *sill* melalui mekanisme pencampuran vertikal dengan melibatkan pengaruh *sill*, dimana suhu potensial dan densitas dibuat lebih ringan di lapisan dalam dari intrusi massa air permukaan.

Fenomena pencampuran massa air secara vertikal mengakibatkan adanya fluks nutrien dari lapisan dalam ke lapisan permukaan (eufotik). Kondisi ini menjadi implikasi penting terhadap biokimia biologi perairan di wilayah *slope* dan *sill* dengan profil topografi yang berbeda. Konsentrasi nutrien di permukaan sangat sedikit dan akan meningkat pada lapisan termoklin dan lapisan bawahnya. Menurut Matsura *et al.* (1979) dalam Tubalawony (2007) mengatakan bahwa sebaran konsentrasi klorofil-a pada bagian atas lapisan permukaan tercampur sangat sedikit dan mulai meningkat dengan menuju bagian bawah dari lapisan permukaan tercampur dan mulai menurun secara drastis pada lapisan termoklin hingga tidak ada lagi klorofil-a pada lapisan di

bawah termoklin. Selanjutnya menurut Menzel dan Ryther (1960); Eppley dan Peterson (1979); Bahamon *et al.* (2003) mengatakan bahwa penyebaran nitrogen ke atas diatur oleh densitas air dan konsentrasi nitrat berkontribusi dalam mengontrol distribusi spasial dari fitoplankton.

2 Metode Penelitian

2.1 Lokasi dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus, 2010, dengan menggunakan kapal riset Baruna Jaya IV. Data dari pelayaran difokuskan pada perairan Dewakang Sill selatan Selat Makassar Sulawesi Selatan, dikarenakan kondisi pasang surut internal yang sangat energik. Pengambilan dan pengukuran sampel yang dilakukan di perairan Selatan Selat Makassar dengan menempatkan lima Stasiun serta mencakup dua kanal utama yang menjadi jalur Arlindo, salah satunya kanal Dewakang Sill. Tiap Stasiun secara umum akan dilihat profil CTD/SACDP dan berdasarkan pada data peta rupa bumi (RBI) tahun 2009, dengan data batimetri dari satelit etopo2 berupa estimasi dan pengukuran topografi dasar laut.

2.1 Alat dan Bahan

Beberapa instrumen alat yang digunakan dalam pengambilan/pengukuran sampel di lapangan bersama dengan BARUNA JAYA IV, di antaranya;

- a. CTD (*Conductivity, Temperature, and Depth*) digunakan alat untuk mengukur param oseanografi berupa suhu, salinitas, densitas, dan oksigen. Instrumen dengan tipe *Sea-Bird Electronics (SBE) 911 Plus*.
- b. SADCP (*Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler*) tipe RDI 150 Khz. Alat mengukur arus perairan (vertikal dan horinzontal). Alat ini sangat baik digunakan untuk mengukur kecepatan dan arah arus pada perairan yang sempit dan berada di lintang equator.
- c. *Bottle Rosette Sampler* tipe Models 1015-12 and 1015-24 Rosette®, digunakan untuk pengambilan sampel air untuk pengukuran konsentrasi dan distribusi nutrien juga kandungan klorofil-a.

2.3 Difusi Eddy Vertikal (Kz)

Penghitungan data konsentrasi dan nilai fluks dari nutrien dari kolom perairan dalam kelapisan atas dengan menggunakan data nutrien (Nitrat). Data yang disajikan dalam bentuk grafik sebaran menegak, melintang, kemudian dilakukan analisa mengenai sebaran konsentrasi nutrien dan faktor-faktor pendukung keberadaanya.

Kemudian beberapa titik pengambilan dilakukan perbandingan konsentrasi nutrisi. Dari data tersebut juga diamati distribusi per lapisan, baik pada lapisan permukaan tercampur, lapisan termoklin maupun lapisan terdalam di bawah termoklin. Untuk memperkirakan difusi fluks dengan param difusivitas turbulen eddy vertikal menurut Osborn (1980) dalam Bahamon (2003).

$$K_z = \Gamma \frac{\epsilon(z)}{N^2(z)} \dots\dots\dots (1)$$

- $N^2(z)$ = frekuensi apung (Brunt-Vaisala)
- $\epsilon(z)$ = nilai turbulen energi kinetik (TKE) disipasi pada kedalaman tertentu
- Γ = efisiensi pencampuran (0.2)

2.4 Fluks Nutrien

Untuk melihat proses pengangkutan dan distribusi nutrisi dari perairan dalam ke lapisan termoklin dan lapisan permukaan tercampur dengan melihat pengaruh param fisik dan proses pencampuran massa air. Fluks vertikal nutrisi karena difusi turbulen *nitracline* adalah produk dari gradien nutrisi dan koefisien difusi, yang dihitung dengan metode Law *et al.*, (2003) di gunakan melihat profil dan estimasi nutrisi fluks ($\text{mmol N m}^{-2}\text{s}^{-2}$) pada lapisan *pycnocline* sebagai berikut ;

$$\text{Flux Nutrien} = K_z \left(\frac{\Delta \text{nut}_z}{\Delta z} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Dimana: Δnut_z adalah perbedaan konsentrasi nutrisi pada selang kedalaman z (m) berdasarkan kedalaman standar pengukuran nutrisi.

Estimasi fluks vertikal nutrisi dengan nilai difusien eddy vertikal (K_z) pada persamaan 9, digunakan sebagai estimasi nilai fluks menggunakan kontribusi nilai *shear* arus (S^2).

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Koefisien Difusivitas Eddy Vertikal (K_z)

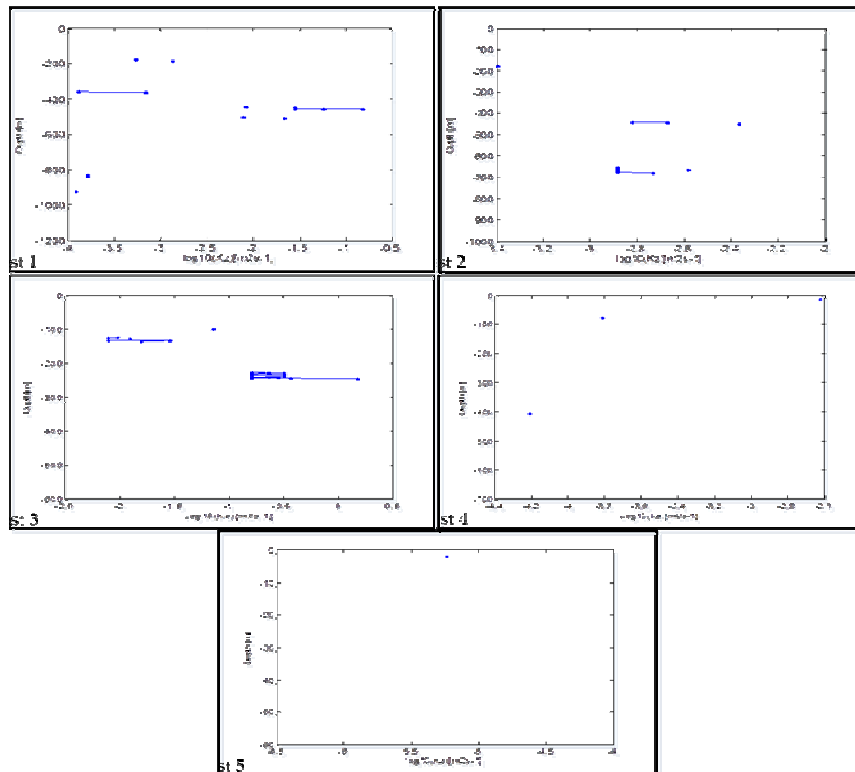
Koefisien difusi eddy vertikal (K_z) secara melintang merupakan asumsi dari parameter bilangan Richardson (Ri). Nilai koefisien difusi eddy secara vertikal menggambarkan aktivitas turbulensi dalam kolom perairan yg menjelaskan proses pencampuran, sehingga kondisi dimana nilai pencampuran sejalan dengan bertambahnya nilai koefisien difusi. Kondisi fluida mengalami turbulensi dengan melemahnya nilai bilangan Richardson, sehingga nilai tersebut akan berbanding terbalik dengan nilai koefisien difusi eddy secara vertikal.

Rata-rata Nilai difusivitas vertikal eddy dari 5 stasiun dengan perataan 50 m, yang didasarkan dengan kedalaman dari stasiun 5 yang hanya memiliki kedalaman

hingga 50 m, selanjutnya nilai dari *displacement* (d). Dari nilai K_z dominan tinggi ditemukan pada tiap Stasiun (1 - 4) di lapisan dalam, tetapi fluktuasi dari aktivitas K_z sangat kecil di stasiun 4, dikarenakan nilai-nilai *displacement* yang terbentuk rendah dan tidak memenuhi kriteria dari metode *Galbraith and Kelley* (dGK). Tinggi rendahnya nilai K_z sebagai indikasi dari aktivitas gelombang internal sepanjang Stasiun. Indikasi dari aktivitas pasang surut internal yang menghasilkan gelombang internal pada waktu pengukuran di Stasiun tersebut berpengaruh terhadap tahap perhitungan besar kecilnya nilai difusivitas vertikal eddy pada tiap lapisan kolom perairan melalui kalkulasi nilai *displacement*, skala Thorpe, dan energi kinetik disipasi turbulen eddy (ϵ).

Nilai K_z dengan nilai frekuensi apung dari data densitas (σ_θ) pada Gambar 1, menunjukkan nilai aktivitas difusivitas vertikal eddy pada tiap lapisan yang sangat variatif terhadap tekanan sepanjang profil melintang pengamatan (Stasiun 1-5). Lapisan permukaan dari Stasiun 1-4 tidak ditemukan nilai difusivitas vertikal eddy dengan nilai $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dikarenakan kondisi densitas yang statis. Nilai K_z keseluruhan di lapisan termoklin dari 4 Stasiun, menunjukkan nilai rata - rata K_z pada lapisan termoklin sebesar $1.40 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$. Nilai tertinggi ditemukan pada Stasiun 3 ($7.17 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$) dan terendah pada Stasiun 4 dengan nilai $1.54 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$, dimana kondisi ini sangat tergantung dari lapisan *pycnocline* dan *halocline* yang menyebabkan adanya perbedaan tingkat stabilitas stasis sepanjang Stasiun.

Aktivitas dengan nilai rata-rata vertikal K_z (Tabel 1) menunjukkan energi fluks yang tinggi di lapisan termoklin yang diindikasikan sebagai hasil dari aktivitas gelombang internal berpengaruh besar dikarenakan energi disipasi kinetik turbulen yang kuat dari nilai energi fluks itu sendiri. Menurut Hatayama (2004) yang menemukan nilai difusi vertikal eddy sebesar $6,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ dengan mempertimbangkan faktor komponen pasut M2, jika dibandingkan dengan nilai K_z di Dewakang *Sill* dari keseluruhan stasiun pada lapisan termoklin $7.37 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Hal ini di karenakan adanya fluktuasi gradien densitas pada lapisan termoklin yang mmenyebabkan terbentuknya percampuran turbulensi meskipun lapisan tersebut umumnya dalam kondisi stabilitas statis. Sesuai hasil pemodelan oleh Green *et al.* (2008) di Laut Celtic dengan menggunakan teori pertubasi pada kedalaman 200 m dan model sirkulasi non-hidrostatik 2 dimensi, menunjukkan bahwa energi fluks dari perbedaan baroklinik di lapisan termokline musiman dan besaran tekanan baroklinik, sehingga gelombang internal yang terbentuk di cekungan dasar tidak menjadi pemicu terjadinya percampuran.



Gambar 1. Profil koefisien difusi vertikal eddy (K_z) dari nilai N^2 CTD perairan Selatan Selat Makassar

Estimasi nilai difusivitas vertikal eddy berdasarkan densitas kedalaman juga dilakukan estimasi nilai difusivitas vertikal eddy menggunakan nilai *shear* vertikal dari vektor arus (u dan v). Komponen arus sebelumnya dilakukan pengkoreksian komponen pasut sehingga pengaruh pasang surut pada aliran tidak mempengaruhi perhitungan *shear* arus vertikal. Profil seperti disajikan pada Gambar 2, menjelaskan sebaran koefisien difusi eddy vertikal (K_z) sepanjang stasiun (1-5) pada interval kedalaman bin terukur antara 12.79 m-208.79 m. Difusi eddy vertikal (K_z) secara melintang yang merupakan asumsi dari param bilangan *shear* arus. Nilai difusi eddy secara vertikal menggambarkan aktivitas turbulensi dalam kolom perairan yg menjelaskan proses pencampuran, sehingga kondisi dimana nilai pencampuran sejalan dengan bertambahnya nilai koefisien difusi. Kondisi fluida mengalami turbulensi dengan meningkatnya nilai bilangan Richardson, sehingga nilai tersebut akan berbanding terbalik dengan nilai koefisien difusi eddy secara vertikal. Peningkatan nilai dari Ri berbanding terbalik dengan *shear*, yang berkontribusi terhadap tinggi rendahnya pencampuran yang dapat menyebabkan perairan mengalami turbulen.

Kisaran rata - rata difusi pada stasiun 1 dan 5, $4.67 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2 (\pm 1.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ dapat diartikan estimasi dari K_z dengan *shear* arus vertikal menunjukkan bahwa lemahnya pencampuran yang terbentuk secara vertikal. Nilai K_z tertinggi ditemukan pada lapisan permukaan di stasiun 2 sebesar ($9.60 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$) dan lapisan termoklin

pada stasiun 4 ($7.68 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$). Kedua lapisan pada stasiun 1 sendiri menunjukkan nilai tertinggi pada lapisan permukaan ($1.50 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$) dan lapisan termoklin ($1.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$) jika dibandingkan dengan Stasiun lain pada kedua lapisan tersebut dengan nilai K_z rendah dengan kisaran antara $3.00 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$ - $7.65 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$. Tabulasi rata-rata estimasi K_z berdasarkan nilai *shear* arus vertikal seperti ditunjukkan pada Tabel 2, terlihat bahwa nilai K_z tertinggi pada lapisan permukaan $1.70 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$ ($\pm 2.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$). Kondisi ini menunjukkan bahwa pada lapisan permukaan di stasiun 2 mengalami pencampuran yang lebih kuat dibandingkan dengan lapisan lainnya, dimana dipengaruhi oleh aktivitas arus yang kuat pada lapisan permukaan dan pengadukan angin. Selain itu nilai disipasi (ε) dan skala Osmidov (L_o) yang rendah sejalan dengan lemahnya nilai *shear* arus vertikal berpengaruh terhadap nilai K_z terhadap kedalaman.

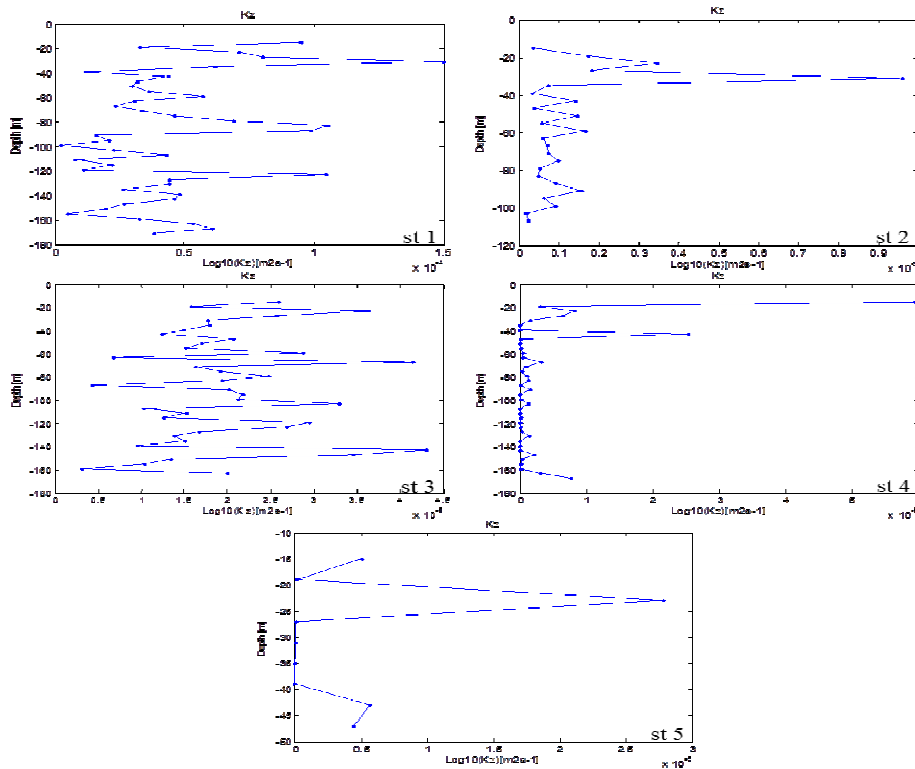
Tabel 1. Nilai rata-rata difusi vertikal eddy (K_z) dengan N^2 dari densitas (σ_o)

Stasiun	Rata - rata K_z [m^2s^{-2}]			Standar deviasi		
	Permukaan	Thermoklin	Dalam	Permukaan	Thermoklin	Dalam
1		5.87×10^{-3}	1.59×10^{-1}	$\pm 3.60 \times 10^{-3}$		$\pm 2.58 \times 10^{-1}$
2		4.03×10^{-4}	1.76×10^{-3}	$\pm 4.03 \times 10^{-4}$		$\pm 8.25 \times 10^{-4}$
3		2.19×10^{-2}	3.35×10^{-1}	$\pm 2.31 \times 10^{-2}$		$\pm 3.54 \times 10^{-1}$
4		1.26×10^{-3}	6.16×10^{-5}	$\pm 1.56 \times 10^{-3}$		$\pm 6.16 \times 10^{-5}$
5	1.02×10^{-1}			$\pm 4.40 \times 10^{-2}$		

Pada lapisan isopiknal di atas lapisan piknoklin menunjukkan pencampuran dengan instabilitas fluida dari fluks difusi massa, dimana lapisan massa air berdensitas ringan berada di atas lapisan berdensitas berat. Nilai fluks vertikal antara 1.50×10^{-4} - $4.14 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$ yang terlihat sampai ke permukaan. Kondisi ini di jelaskan oleh Staquet (2007) bahwa adanya pengaruh gelombang gravitasi internal yang menembus instabilitas dinamis (daya apung). Selanjutnya Ledwell *et al.* (1998) dalam Martin *et al.* (2010) menjelaskan bahwa difusivitas turbulen biasanya $10^2 \text{ m}^2/\text{s}^{-2}$ atau lebih di lapisan campuran tapi beberapa kali lipat lebih kecil di lapisan dalam. Hal ini mencerminkan kontribusi utama dari pendinginan atmosfer dan tekanan angin mendorong pencampuran turbulen di lapisan permukaan serta interaksi topografi dengan gelombang internal.

Variasi sebaran nilai difusi eddy vertikal menunjukkan pola gradien fluktuasi terhadap kedalaman. Variasi koefisien difusi eddy vertikal menunjukkan adanya variasi nilai, kondisi ini sangat dipengaruhi tekanan atmosfer (pergerakan angin) yang mengaduk lapisan permukaan sampai kedalaman 200 m dan pengaruh *upwelling* dan *downwelling* serta pergerakan *shear* arus sepanjang punggung *seamount* dan *sill*. Variasi nilai koefisien difusi eddy vertikal sepanjang Stasiun sangat berbeda, sehingga

terlihat pelapisan dengan kisaran nilai yang sama di beberapa kedalaman dan stasiun berbeda.



Gambar 2. Profil Koefisien Difusivitas Eddy Vertikal (K_z) berdasarkan nilai *shear* (S^2) arus perairan Dewakang *Sill*

Analisis param turbulen yang menciptakan pencampuran vertikal dalam kolom perairan menurut Kawabe (2008) menjelaskan bahwa dengan difusivitas vertikal eddy (K_z) merupakan param kunci untuk konservasi densitas air, suhu, salinitas, dan konsentrasi bahan. Param ini memainkan peranan penting dalam pembentukan dan konversi massa air dan penentuan struktur sirkulasi vertikal dalam lautan. Pencampuran vertikal sendiri dalam lautan berfungsi sebagai kontrol stratifikasi dalam kolom perairan. Fungsi mekanisme menekan fluks vertikal nutrisi dan mempertahankan klorofil maksimum di zona eufotik.

Tabel 2. Rata-rata K_z berdasarkan nilai shear arus vertikal (S^2)

Stasiun	Rata - rata K_z [m^2/s^2]		Standar deviasi	
	Permukaan	Termoklin	Permukaan	Termoklin
1	5.20×10^{-5}	3.64×10^{-5}	$\pm 3.63 \times 10^{-5}$	$\pm 2.33 \times 10^{-5}$
2	1.70×10^{-4}	6.43×10^{-5}	$\pm 2.34 \times 10^{-4}$	$\pm 3.77 \times 10^{-5}$
3	2.09×10^{-5}	1.87×10^{-5}	$\pm 8.44 \times 10^{-6}$	$\pm 1.04 \times 10^{-5}$
4	6.21×10^{-6}	3.71×10^{-5}	$\pm 1.46 \times 10^{-5}$	$\pm 1.68 \times 10^{-4}$
5	4.80×10^{-6}		$\pm 8.93 \times 10^{-6}$	

Nilai fluks vertikal yang tinggi dari lapisan dalam yang terlihat pada kedalaman bin (206 m) sampai ke lapisan permukaan di atas lintasan pengamatan, menunjukkan adanya profil aliran fluks yang sama pada kedua sisi dengan nilai yang sama jika dibandingkan dengan bagian tengah. Tingginya difusi vertikal sebagai estimasi fluks di lapisan isopiknal di atas lapisan termoklin pada perairan yang relatif dangkal dan menjadi gambaran karakteristik aktivitas pencampuran vertikal di bagian utara dan selatan Dewakang *Sill*. Karakter aliran dengan *shear* arus yang kuat bagian utara dibandingkan dengan bagian Selatan berkontribusi terhadap disipasi energi secara vertikal. Energi disipasi merupakan perubahan bentuk energi dari *shear* arus dengan gradien vertikal, sebagai hasilnya berkontribusi terhadap jumlah nilai fluks vertikal. Perbedaan pencampuran pada berbagai bagian di atas topografi menurut Aucan *et al.* (2008) akibat aktivitas gelombang pasut internal di sisi elevasi *slope (ridge)*, dimana aktivitas gelombang semidiurnal yang kurang energik di bagian Utara dibanding bagian Selatan berdasarkan *shear* arus horizontal dan vertikal yang menyebabkan perbedaan aktivitas pencampuran. Perbedaan ini disebabkan oleh adanya interval pemisah yang sangat dalam antara lapisan propagasi gelombang internal dengan lapisan dalam.

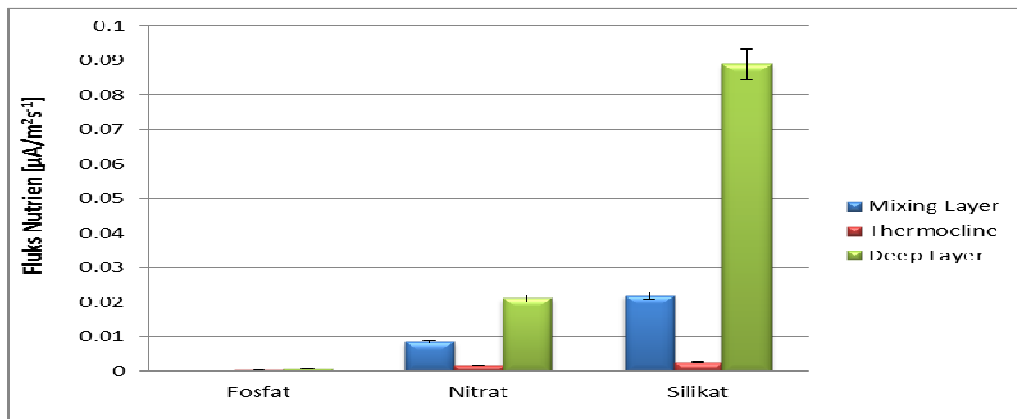
3.2 Variasi Turbulensi Fluks Nutrien

Nilai koefisien difusi eddy vertikal digunakan sebagai param turbulen untuk menjelaskan fluks nutrien (nitrat, fosfat, dan silikat) pada lapisan fluida, sehingga besaran nilai pencampuran oleh aktivitas turbulensi memberi kontribusi yang sama terhadap konsentrasi nutrien secara vertikal. Variasi fluks nitrat berbanding lurus seiring dengan fluktuasi koefisien difusi eddy vertikal, dimana kondisi terlihat jelas dengan bertambahnya tekanan.

Variasi turbulensi fluks nutrien secara diagram seperti pada Gambar 3, menunjukkan kisaran konsentrasi nutrien secara vertikal yang ditentukan oleh besaran nilai koefisien difusi eddy vertikal (K_z). Fluks nutrien dibagi ke dalam 3 lapisan utama sesuai dengan kedalaman lapisan densitas (permukaan tercampur, termoklin, dan lapisan dalam) dari 5 stasiun. Pada grafik tersebut terdapat kisaran nilai fluks masing-masing nutrien yang didasarkan pada standar deviasi dengan interval yang terbentuk merupakan penanda dengan semakin tinggi *error bars* maka kisaran nilai fluks akan semakin lebar. Kisaran nilai difusi vertikal sepanjang Stasiun di lapisan permukaan tergantung dari nilai difusi vertikal eddy (K_z) dengan kisaran nilai fluks hampir dominan $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ pada kedalaman fluks dan rendahnya nilai nutrien lapisan permukaan pada kedalaman standar nutrien. Secara keseluruhan nilai fluks nutrien, nilai fosfat paling

rendah ($4.70 \times 10^{-5} \mu A/m^2/s^{-2}$), selanjutnya nilai nitrat ($8.49 \times 10^{-3} \mu A/m^2/s^{-2}$) dan tertinggi pada fluks silikat ($2.19 \times 10^{-2} \mu A/m^2/s^{-2}$).

Besaran nilai fluks nutrisi mendominasi dengan kedalaman lapisan permukaan berbeda pada setiap Stasiun, meskipun masih ditemukan pada lapisan permukaan pada stasiun 4 dan 5 terlihat nilai fluks $2.54 \times 10^{-2} \mu A/m^2/s^{-2}$. Besaran fluks nutrisi di lapisan permukaan tidak bervariasi pada nilai fluks dari unsur nitrat, fosfat, dan silikat, hal ini dikarenakan nilai K_z pada kedalaman tersebut $0 \mu A/m^2/s^{-2}$. Fluks nitrat pada lapisan permukaan ditemukan pada Stasiun 4 untuk nitrat ($1.14 \times 10^{-4} \mu A/m^2/s^{-2}$), fosfat ($9.40 \times 10^{-5} \mu A/m^2/s^{-2}$), dan silikat ($7.89 \times 10^{-4} \mu A/m^2/s^{-2}$). Pada stasiun 5 besaran pada kedalaman yang dangkal (50 m) dengan aktifitas pencampuran K_z sejalan dengan konsentrasi nutrisi pada kedalaman tersebut, sehingga fluks nutrisi yang tinggi, dimana nilai fosfat ($1.41 \times 10^{-4} \mu A/m^2/s^{-2}$), nitrat ($4.23 \times 10^{-2} \mu A/m^2/s^{-2}$), dan silikat ($1.09 \times 10^{-1} \mu A/m^2/s^{-2}$).



Gambar 3. Grafik fluks nitrat vertikal ($\mu A/m^2/s^{-2}$) berdasarkan difusi vertikal eddy (K_z) dari densitas (σ)

Pada lapisan termoklin ditemukan nilai fluks nutrisi vertikal yang tinggi yang sejalan dengan aktivitas pencampuran di lapisan tersebut. Jika dibandingkan dengan lapisan permukaan dan lapisan dalam, menunjukkan nilai fluks lebih rendah, meskipun konsentrasi nutrisi di lapisan termoklin lebih tinggi dengan besaran kirsan fluks yang sempit. Secara berturut-turut nilai fluks ketiga unsur tertinggi mulai dari fluks fosfat sebesar $2.62 \times 10^{-3} \mu A/m^2/s^{-2}$, kemudian nitrat $1.73 \times 10^{-3} \mu A/m^2/s^{-2}$, selanjutnya silikat $5.89 \times 10^{-4} \mu A/m^2/s^{-2}$. Pada lapisan dalam menunjukkan nilai fluks nutrisi vertikal yang tinggi, terutama pada konsentrasi unsur silikat kemudian unsur nitrat selanjutnya fosfat. Besaran fluks silikat tertinggi mencapai $8.90 \times 10^{-2} \mu A/m^2/s^{-2}$, diikuti fluks nitrat $2.11 \times 10^{-2} \mu A/m^2/s^{-2}$, kemudian fosfat $6.92 \times 10^{-2} \mu A/m^2/s^{-2}$. Nilai fluks silikat secara vertikal terlihat tinggi pada lapisan dalam jika dibandingkan dengan permukaan dan lapisan termoklin, kondisi ini menjelaskan konsentrasi unsur silikat yang terabsorpsi dalam

kolom perairan. Senyawa organik terlarut silikat dalam kolom perairan merupakan sisa-sisa dan peluruhan jasad renik fitoplankton dari kelompok diatom, dimana komunitas ini merupakan jenis fitoplankton yang mendominasi perairan terbuka.

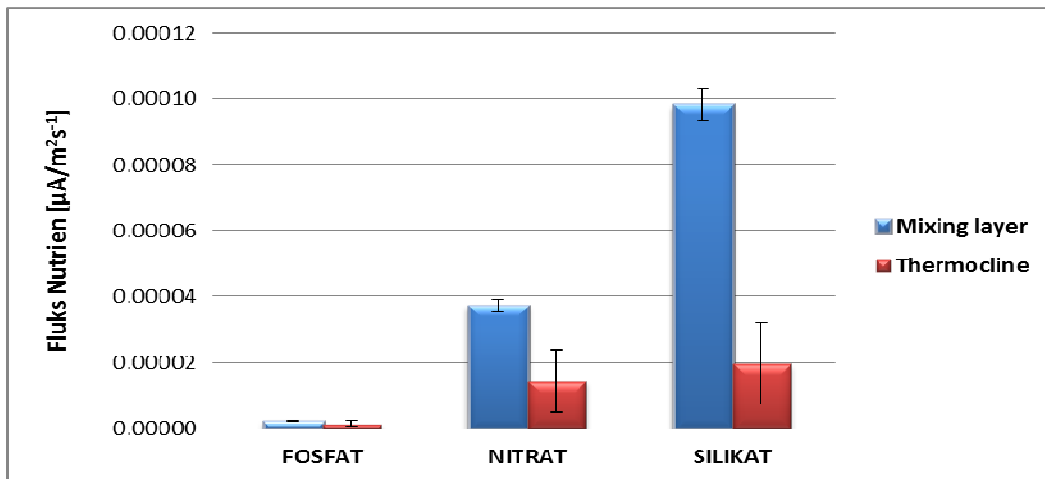
Adanya peningkatan kembali dengan gradien 0.01 terhadap tekanan sebagai akibat adanya melemahnya difusi di lapisan dalam dengan nilai terendah penyebab kondisi secara umum adanya fluktuasi gradien penurunan konsentrasi fosfat dari lapisan permukaan hingga di bawah lapisan termoklin, diakibatkan oleh penyerapan alga dalam fotosintesis. Gradien fluks kembali meningkat diakibatkan adanya konsentrasi oleh dekomposisi organisme tersebut.

Fluks vertikal silikat menunjukkan nilai konsentrasi fluks relatif sama dengan nilai fluks fosfat dan memiliki kisaran tertinggi setelah fluks nitrat. Profil melintang menunjukkan adanya dominasi kisaran yang relatif sama dengan tampilan pada profil melintang fluks fosfat. Fluktuasi gradien fluks silikat kembali meningkat di lapisan dalam dengan gradien 0.01-0.05, dimana kondisi ini konsentrasi merupakan ciri bahwa nilai silikat meningkat pada lapisan dalam di atas dasar perairan. Estimasi difusivitas vertikal yang tinggi di lapisan dalam dan melemah di lapisan termoklin hingga permukaan dengan skala kedalaman yang signifikan pada lapisan kritis secara vertikal.

Estimasi fluks nutrisi dengan menggunakan nilai difusi vertikal eddy (K_z) dari *shear* arus vertikal (S^2) seperti pada grafik Gambar 4. Nilai fluks vertikal nutrisi berdasarkan kedalaman K_z dari vektor arus pada kedalaman bin 12.79 m–208.79 m. Nilai difusi vertikal eddy (K_z) fluks vertikal nutrisi mewakili kedalaman standar nutrisi sampai kedalaman 208.79 m. Besaran nilai fluks nutrisi sangat tergantung pada kuatnya K_z pada interval kedalaman dan konsentrasi nutrisi itu sendiri. Fluks nutrisi secara vertikal dibagi kedalam 2 lapisan utama (lapisan permukaan tercampur dan termoklin) dengan ketebalan lapisan permukaan bervariasi pada setiap Stasiun. Secara detail fluks nutrisi dengan K_z dari interval kedalaman *shear* vertikal arus, dan interval besaran fluks nutrisi dengan error bars dari konsentrasi nutrisi ditunjukkan juga berdasarkan interval kedalaman *shear* vertikal arus.

Secara keseluruhan rata-rata nilai fluks nutrisi pada lapisan permukaan tercampur dari stasiun 1-5 dengan interval 12.79-99.79 m. Pada lapisan ini menunjukkan besaran nilai fluks nutrisi $4.6 \times 10^{-5} \mu\text{A}/\text{m}^2\text{s}^{-2}$ dari 3 unsur dengan fluks tertinggi dimulai dari unsur silikat ($9.8 \times 10^{-5} \mu\text{A}/\text{m}^2\text{s}^{-2}$) kemudian nitrat ($3.7 \times 10^{-5} \mu\text{A}/\text{m}^2\text{s}^{-2}$) dan fosfat ($2.2 \times 10^{-6} \mu\text{A}/\text{m}^2\text{s}^{-2}$). Kondisi lapisan termoklin yang relatif stabil terlihat kisaran fluks yang lebar dengan nilai fluks tinggi kedua meskipun lebih rendah dari lapisan permukaan tercampur. Secara keseluruhan rata-rata fluks nutrisi di

lapisan termoklin tertinggi dari unsur silikat ($2.0 \times 10^{-5} \mu\text{A}/\text{m}^2/\text{s}^{-2}$) kemudian nitrat ($1.4 \times 10^{-5} \mu\text{A}/\text{m}^2/\text{s}^{-2}$) dan terendah fosfat ($1.5 \times 10^{-6} \mu\text{A}/\text{m}^2/\text{s}^{-2}$). Besaran nilai fluks di lapisan termoklin dengan fluida yang stabil dengan kontribusi *shear* arus dengan rendahnya gradien densitas menyebabkan aktivitas pencampuran vertikal. Semakin besarnya gradien densitas terhadap tekanan antar fluida di lapisan termoklin sebagai pemicu terbentuknya *shear* fluida, dimana densitas di lapisan termoklin menekan pencampuran vertikal di lapisan tersebut.



Gambar 4. Grafik fluks nitrat vertikal ($\mu\text{A}/\text{m}^2/\text{s}^{-2}$) berdasarkan difusi vertikal eddy (K_z) dari *shear* arus (S^2)

Penggunaan param konsentrasi nitrat menjadi variabel utama dalam estimasi fluks turbulen nutrien dalam kolom perairan dikarenakan menurut Martin *et al.* (2010) bahwa nilai nitrat memiliki korelasi yang baik dengan laju serapan unsur hara oleh fitoplankton dalam produktivitas dan memiliki hasil pengukuran yang simultan dalam penyerapan nitrat. Selanjutnya jika dikaitkan antara presentase pencampuran turbulen vertikal dengan laju serapan nitrat hanya sepertiga dari jumlah serapan pada wilayah perairan Khatulistiwa dan nilai tersebut diabaikan pada lintang tinggi dari pengamatan sebelumnya oleh Carr *et al.* (1995) dalam Martin *et al.* (2010). Jika dibandingkan dengan pengamatan Ledwell *et al.* (2008) pada zona eufotik Sargasso dengan memodelkan dinamika eddy permukaan, dimana kecepatan vertikal fluks nutrien oleh difusi turbulensi eddy berkontribusi 4 kali lebih rendah jika dibandingkan dengan pengaruh energi fluks difusi apung (*diffusive buoyancy flux*) dan sejauh mana serapan sinar matahari oleh fitoplankton.

Nilai fluks nitrat di bawah lapisan eufotik sangat dipengaruhi oleh gradien densitas dan besaran nilai difusi turbulen vertikal. Besaran energi pencampuran turbulen vertikal tidak menjadi penentu ketebalan konsentrasi klorofil-a hingga batas bawah termoklin dimana fluktuasi densitas yang tidak stabil. Ketebalan dan gradien fluktuasi densitas di lapisan tengah menekan laju fluks nitrat vertikal. Fluks nitrat

vertikal di bawah zona eufotik berdasarkan Bahamon, Velasquez, dan Cruzado (2003) yang memodelkan fluks nitrat, menjelaskan bahwa perkiraan fluks nitrat itu sendiri lebih dipengaruhi oleh gradien nitrat daripada gradien densitas itu sendiri. Ditambahkan lagi bahwa jumlah radiasi menentukan kedalaman maksimum klorofil-a dan pada lapisan tengah dipengaruhi oleh lapisan termoklin.

Hasil yang berbeda pada perairan dengan pelapisan bertingkat, dimana konsentrasi klorofil-a ditemukan pada lapisan termoklin pada kedalaman 30 m dengan suhu 25 °C di Laut Iris. Selanjutnya dikatakan bahwa implikasi dari perbedaan antara *dyapicnal* fluks dan fluks nitrat adalah sebagian besar nitrat menjadi tercampur ke dalam zona eufotik adalah nitrat dalam air yang merupakan sisa dari produktivitas bentik di musim dingin sebelumnya (Rippeth *et al.*, 2009).

4 Kesimpulan

Fluks nitrat akibat proses pencampuran vertikal turbulen dengan menggunakan estimasi koefisien difusian vertikal (K_z) dan rasio frekuensi apung menunjukkan bahwa nilai energi fluks oleh difusi vertikal berkontribusi kecil pada perpindahan nilai konsentrasi nutrien (nutrien) dari lapisan dalam ke lapisan permukaan (zona eufotik)

Daftar Pustaka

- Aucan J, and Merrifield, M. (2008). Boundary mixing associated with tidal and near-inertial internal waves. *Physical Oceanography* 38: 1238 – 1252.
- Bahamon, N, Velasquez, Z. and Cruzado, A. (2003). Chlorophyll-a and Nitrogen Flux in the Tropical North Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research I*. 50:1189–1203.
- Gordon, A. L., Giulivi, C. F., dan Ilahude A. G. (2003). Deep topographic barriers within the Indonesian seas. *Deep-Sea Res II*. 50:2205–2228.
- Hatayama, T. (2004). Transformation of the Indonesian throughflow water by vertical mixing and its relation to tidally generated internal waves. *Oceanogr* 60: 569-585.
- Kawabe, M. (2008). Vertical and horizontal eddy diffusivities and oxygen dissipation rate in the subtropical Northwest Pacific. *Deep-Sea Research I*. 55:247-260.
- Ledwell, J. R., McGillicuddy Jr., D. J., and Anderson, L. A. (2008). Nutrient flux into an intense deep chlorophyll-a layer in Mode-Water Eddy. *Deep-Sea Research II*. 55:1139-1160.
- Law, C. S., Abraham, E. R., Watson, A. J., and Liddicoat, M. I. (2003). Vertical eddy diffusion and nutrient supply to the surface mixed layer of the Antarctic circumpolar current. *Geophys Research* 108:28.1-28.14.

- Matsuura, M., Sigimoto, T., Nakai, M., and Tsuji, S. (1997). Oceanographic conditions near the spawning ground of southern Bluefin Tuna; Northeastern Indian Ocean. *Oceanography* 53:421-433.
- Martin, A. P., M. Lucas, S. C. Painter, Pidcock, R., Prandke, H., and Stinchcombe, M. C. (2010). The supply of nutrients due to vertical turbulent mixing: A study at the porcupine abyssal plain study site in the Northeast Atlantic. *Deep-Sea Res II*. 57:1293–1302.
- Ross, D. A. (1790). Introduction to oceanography. Appleton-Century-Croft. Meredith Corporation. New York, NY.
- Rippeth, T. P., PhilWiles, Palmer, Harples, M. R., J., and Tweddle, J. (2009). The Diapycnal Nutrient flux and shear-induced diapycnal mixing in the seasonally stratified Western Irish Sea. *Cont Shelf Research* 29:1580–1587.
- Tubalawony, S. (2007). Kajian klorofil-a dan nutrisi serta interlasinya dengan dinamika massa air di perairan barat Sumatera dan Selatan Jawa-Sumbawa. Sekolah Pascasarjana. [Disertasi]. IPB. Bogor.

