

ANALISIS PREDIKSI DEBIT ALIRAN AIR LAUT MELALUI SELAT UNTUK KASUS DI LUAR INDONESIA DAN DI INDONESIA DENGAN BANTUAN TEORI HIDROLIK INTERNAL

Firda Rulifiangga, Tjipto Prastowo

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: firda.17030224022@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Posisi Indonesia adalah strategis karena berada di jalur aliran air laut dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia melalui beberapa selat di wilayah perairan Indonesia bagian timur yang dikenal sebagai Arus Lintas Indonesia (Arlindo). Transportasi air laut melewati selat penghubung kedua samudera tersebut bisa memengaruhi sirkulasi air laut dan iklim dalam skala lokal, regional, dan global. Dalam penelitian ini, Arlindo dipelajari melalui model *oceanic exchange flow* dengan bantuan teori hidrolis internal yang diterapkan untuk *two-layer exchange flow through a strait or over a sill*. Besaran fisis yang akan ditentukan adalah *volume transport* melalui selat sempit dengan penyempitan lateral atau vertikal dalam bentuk *normalised volume exchange* (bilangan tak berdimensi sebagai hasil bagi antara *observed volume* dan *maximal volume exchange* sebagai batas atas *volume transport*), di mana *volume transport* melewati selat dihitung dengan mempertimbangkan efek *mixing*. Data penelitian ini diambil dari laman <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/> dan <https://salinity.oceansciences.org/>. Kasus yang dibahas adalah beberapa selat terkenal di dunia dan selat Arlindo. Untuk seluruh kategori selat baik selat dengan kontrol hidrolis berupa *contraction* atau *sill*, *normalised volume exchange* ditemukan selalu kurang dari 0,87 (batas atas *volume exchange with mixing*). Reduksi *volume transport* juga diberikan oleh friksi sepanjang dasar selat dengan topografi kasar dan batimetri tak beraturan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *normalised transport* melalui Selat Gibraltar adalah 0,86 (tipikal *exchange flow with a small contribution of friction*), serupa dengan kasus selat Arlindo di Indonesia, di mana rata-rata *normalised transport* adalah 0,83. Hal ini membuktikan bahwa teori hidrolis internal bisa digunakan untuk prediksi *volume transport*.

Kata Kunci: Arlindo, teori hidrolis internal, exchange flow, mixing, volume transport

Abstract

Indonesia is strategic for its geographic position in water circulation pathway from Pacific to Indian Oceans through relatively narrow straits in eastern Indonesian provinces widely known as the Indonesian Throughflow (ITF). Water transport past the straits connecting the Oceans can modify ocean circulation and climate in local, regional and global scales. In this study, the ITF was examined using oceanic exchange flow in the light of internal hydraulic theory applied to two-layer exchange flow through a strait or over a sill. The study is aimed to determine volume transport past a strait with a simple topography, where the transport was calculated as normalised volume exchange (a non-dimensional number representing the ratio of observed volume transport and maximal volume exchange in the presence of mixing). The data included ocean depth from <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/> and ocean salinity and/or density acquired from <https://salinity.oceansciences.org/>. Cases discussed were the exchanges in ocean straits worldwide and in Indonesian waters. For all straits examined with hydraulic control either a contraction or a sill, the normalised exchange was found to be less than 0.87 (the upper bound for the exchange with mixing). Further transport reduction was due to friction along bottom boundary with rough topography and irregular bathymetry. The results showed that the exchange in the Gibraltar was found to be 0.86 (typical exchange flow with a small contribution of friction), similar to ITF where the mean transport was 0.83. These suggest that internal hydraulic theory is effective to predict volume transport.

Keywords: ITF, internal hydraulic theory, exchange flow, mixing, volume transport

PENDAHULUAN

Oceanic exchange flow bisa ditemui dalam berbagai situasi geofisik baik *ocean water transport through a strait or over a sill* dengan variasi kedalaman laut, beda salinitas, topografi laut, dan lokasi geografis dunia (Prastowo, 2008). Contoh transport volume air laut melalui selat dunia yang relatif sempit atau dangkal adalah *strait exchanges* melalui Selat Gibraltar, Spanyol (Sannino *et al.*, 2009; Riha and Peliz, 2013) dan Bosphorus, Turki (Sözer and Özsoy, 2017) atau *Panay sill overflow* di Filipina (Tessler *et al.*, 2010) dan *deep overflow* di Selat Denmark (Xu *et al.*, 2015). Dalam konteks selat-selat di perairan Indonesia timur,

dinamika *exchange flow in nature* seperti itu biasa dikenal sebagai *the Indonesian Throughflow* (ITF) (Feng *et al.*, 2018; Brackenridge *et al.*, 2020), di mana efek barotropik lokal ikut menentukan variabilitas fluks volume air laut melalui selat.

Dalam batas-batas di mana *the main driving force for the exchange* adalah beda densitas air laut yang dihubungkan oleh selat sehingga kondisi *steady baroclinic flow* tercapai, maka fluks volume maksimal yang mungkin dicapai dapat diprediksi melalui teori hidrolis internal (Hogg *et al.*, 2001; Ivey, 2004; Prastowo *et al.*, 2009). Teori ini menyatakan bahwa fluks volume maksimal melalui selat dapat dihitung dengan melibatkan parameter eksternal berupa kedalaman

selat atau posisi *sill* dari permukaan laut.

Dalam praktek di alam dan skala laboratorium, semua aliran air melalui penyempitan lateral atau vertikal mengalami ketidakstabilan aliran yang dipicu *shear stress*. Fenomena tersebut adalah awal mula terjadinya turbulensi dan proses *mixing*. Dalam konteks teori hidrolik internal yang diterapkan untuk *steady two-layer exchange*, *mixing* bisa diabaikan dalam pengukuran transport volume air laut melalui kanal sempit. Namun, pengamatan dan pengukuran *strait exchange flows* langsung di lapangan (Tsimplis and Bryden, 2000; Gregg and Özsoy, 2002; Jarosz *et al.*, 2013), di laboratorium (Ivey, 2004; Prastowo *et al.*, 2009), dan melalui simulasi *exchange flow* (Winters and Seim, 2000; Hogg *et al.*, 2001; Stenström, 2003; Sannino *et al.*, 2017) berhasil menunjukkan bahwa *mixing* tidak dapat diabaikan. *Mixing* selalu terjadi dan mereduksi *water transport* dari nilai batas atas (*maximal exchange*).

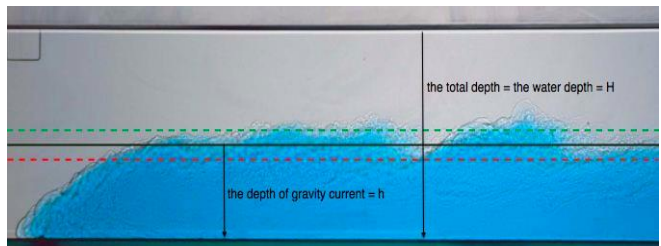
Prastowo *et al.* (2009) telah melaporkan hasil-hasil percobaan *laboratory exchange flows past a variety of lateral contractions and bottom sills* untuk menentukan pengaruh *mixing* terhadap *mass and volume transports between two connected adjacent ocean basins*. Secara teori, *mixing* diprediksi mereduksi *mass transport* sampai 17% dari *maximal mass exchange* dan *volume transport* sampai 13% dari *maximal volume exchange* (Prastowo *et al.*, 2009; Prastowo, 2013). Seluruh hasil-hasil percobaan dengan variasi geometri dan dimensi atau ukuran *constriction* serta beda densitas memberikan reduksi *mass transport* $\geq 18\%$ (Prastowo *et al.*, 2009). Faktor reduksi tambahan 1% atau lebih dalam *mass transport* berasal dari fenomena friksi, baik friksi sepanjang dasar tangki percobaan maupun friksi yang diberikan oleh dinding batas tangki percobaan. Reduksi *volume transport* sebesar maksimum 15% dari batas atas telah juga dilaporkan melalui simulasi numerik *exchange flow with simple sill and/or contraction* (Winters and Seim, 2000; Stenström, 2003).

Dalam konteks hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan *steady, hydraulically controlled exchanges with a simple constriction*, penelitian ini menerapkan teori hidrolik internal untuk estimasi debit aliran (fluks volume) air selat sempit penghubung antara dua laut atau lautan. Hasil estimasi dilaporkan sebagai bilangan tak berdimensi (sesudah dinormalisasi dengan *maximal volume exchange*). Bilangan tak berdimensi *volume exchange* masing-masing selat yang diteliti dibandingkan dengan batas atas prediksi *volume transport with mixing* untuk melihat tingkat akurasi prediksi *water transport* menurut teori hidrolik internal. Fokus perhatian adalah apakah reduksi *volume transport* bernilai $\geq 13\%$ atau tidak. Pertanyaan penelitian yang akan dijawab adalah akurasi estimasi debit aliran air laut melalui ‘kanal alam’ (selat dengan penyempitan lateral dan vertikal) menurut teori hidrolik internal yang diterapkan untuk *exchange flows with mixing*. Kasus yang dibahas adalah selat-selat dunia dan selat-selat di Indonesia yang

tergolong selat bagian dari Arus Lintas Indonesia (Arlindo) di wilayah perairan Indonesia bagian timur.

Gravity Current sebagai Model Aliran Selat

Gravity current adalah gerak fluida baik cair maupun gas yang dipicu oleh perbedaan densitas sebagai akibat dari perbedaan salinitas seperti dapat dilihat pada Gambar 1 atau partikulat padat yang berfungsi sebagai *internal driving force* (Simpson, 1997; Shin *et al.*, 2004; Necker *et al.*, 2005; Prastowo, 2010, Budianto dkk., 2013).



Gambar 1. Ilustrasi *gravity current* (biru) yang merambat sepanjang dasar tangki dengan garis putus-putus hijau adalah tinggi maksimum sedangkan garis putus-putus merah adalah tinggi minimum (sumber: Prastowo, 2010).

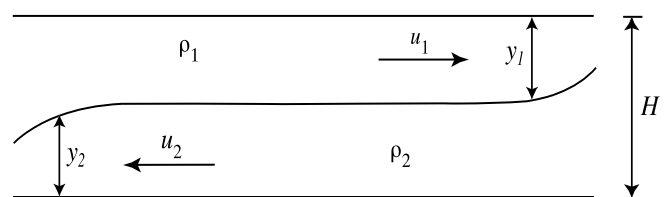
Kedalaman *gravity current* terhadap kedalaman total selalu memenuhi $h/H < 0,5$. Hal ini merupakan indikator sebagian energi mekanik yang hilang akibat friksi sepanjang dasar tangki dan peristiwa turbulensi (Shin *et al.*, 2004; Prastowo, 2010; 2014). Kecepatan *gravity current* mudah ditentukan dari pengamatan di laboratorium dan seringkali dilaporkan sebagai kecepatan tak-berdimensi yang harganya mendekati 0,5 (Shin *et al.*, 2004; Prastowo, 2010; 2014). Kecepatan *gravity current* (Benjamin, 1968; Simpson, 1997) secara teoritik adalah

$$u = 0,5\sqrt{g'H} \quad (1)$$

di mana g' adalah percepatan gravitasi Bumi tereduksi yang didefinisikan sebagai $g' = g\Delta\rho/\rho_0$ dengan g merupakan percepatan gravitasi Bumi ($9,8 \text{ m/s}^2$), $\Delta\rho$ adalah perbedaan densitas antara *gravity current* dan lingkungan, dan ρ_0 adalah densitas acuan. Kedua parameter tersebut dibutuhkan untuk menghitung *water transport in exchange flow*.

Mass Transport in Exchange Flow

Dinamika *gravity current* merupakan konsep dasar untuk memahami *water transport* melewati selat sempit penghubung dua laut atau lautan. Teori yang biasa digunakan untuk mendiskripsikan fenomena fisis tersebut adalah teori hidrolik internal (Hogg *et al.*, 2001; Ivey, 2004).



Gambar 2. Ilustrasi *a bidirectional two-layer exchange flow*. Prinsip teori ini adalah perbedaan densitas air laut antara

kedua lautan berfungsi sebagai *internal driving force* yang mendorong air laut yang pertama menuju ke arah tertentu dan air laut yang kedua menuju ke arah yang berlawanan (Gambar 2).

Dalam percobaan, *bidirectional gravity current flow* dibedakan menjadi *dense current* dengan densitas ρ_2 dan kecepatan u_2 merambat ke arah kiri sedangkan *less dense current* dengan densitas ρ_1 ($\rho_1 < \rho_2$) dan kecepatan u_1 merambat ke arah kanan. Dalam kondisi tanpa ada *mixing*, $u_1 = u_2 = 0,5\sqrt{g'H}$ dan $y_1 = y_2 = 0,5H$ akan digunakan untuk menurunkan nilai batas atas *exchange transport* atau *maximal mass exchange* (Hogg *et al.*, 2001; Ivey, 2004) melalui selat dengan lebar minimum b_0 sebagai berikut,

$$M_{\max} = \frac{1}{4}\Delta\rho b_0 (g')^{1/2} H^{3/2} \quad (2)$$

Dalam skala laboratorium, persamaan (2) telah digunakan untuk menghitung *mass transport* (dihitung dalam persen) dengan menyertakan kehadiran *mixing* (Stenström, 2003; Prastowo *et al.*, 2009; Prastowo, 2013).

Normalisasi Mass Transport

Observed mass transport yang terukur melalui selat tidak pernah mencapai nilai batas atas seperti terlihat pada persamaan (2). Hal ini bisa dipahami dalam konteks teori hidrolik internal yang membahas peran *mixing* dan friksi dalam *exchange flow*. Dengan mengikuti metodologi Prastowo *et al.* (2009), apabila *mass transport* diberi simbol M maka berlaku $M < M_{\max}$. Kemudian apabila reduksi aliran massa air laut melalui selat akibat turbulensi dan *mixing* diberi simbol M_{mix} sedangkan reduksi akibat friksi diberi simbol M_{fri} maka berlaku

$$M = M_{\max} - M_{\text{mix}} - M_{\text{fri}} \quad (3)$$

Normalisasi *mass transport* dilakukan dengan membagi semua ruas persamaan (3) dengan M_{\max} sehingga diperoleh bentuk berikut,

$$m = 1 - m_{\text{mix}} - m_{\text{fri}} \quad (4)$$

di mana m , m_{mix} dan m_{fri} adalah bilangan positif < 1 .

Dengan mengadopsi metodologi Hogg *et al.* (2001), maka $m_{\text{mix}} \approx 0,17$ sehingga persamaan (4) di atas berubah menjadi,

$$m = 0,83 - m_{\text{fri}} \quad (5)$$

Persamaan (5) menjadi basis untuk estimasi *mass transport* melalui selat penghubung kedua laut seperti dibahas dalam penelitian terdahulu (Helfrich, 1995; Prastowo *et al.*, 2009; Prastowo, 2013).

Normalisasi Volume Transport

Dalam banyak kasus, *exchange transport* dilaporkan sebagai besaran *volume transport* daripada *mass transport*. Oleh karena itu, normalisasi *mass transport* diubah menjadi normalisasi *volume transport*. Kesetaraan antara besaran massa dan volume berlaku untuk fluida inkompresibel. Dengan demikian, dalam konteks *volume transport* dapat

ditulisikan,

$$Q = Q_{\max} - Q_{\text{mix}} - Q_{\text{fri}} \quad (6)$$

di mana

$$Q_{\max} = \frac{1}{4} b_0 (g')^{1/2} H^{3/2} \quad (7)$$

merupakan *maximal volume exchange* atau batas atas debit aliran air laut yang mengalir melalui selat.

Normalisasi *volume transport* dilakukan dengan membagi semua ruas persamaan (6) dengan Q_{\max} sehingga diperoleh

$$q = 1 - q_{\text{mix}} - q_{\text{fri}} \quad (8)$$

di mana q , q_{mix} dan q_{fri} adalah bilangan positif < 1 . Dengan mengikuti metodologi Hogg *et al.* (2001), maka $q_{\text{mix}} \approx 0,13$ sehingga persamaan (8) berubah menjadi

$$q = 0,87 - q_{\text{fri}} \quad (9)$$

Persamaan (9) menjadi basis untuk estimasi *volume transport* (dalam persen) melalui selat penghubung antara kedua laut (Prastowo *et al.*, 2009; Prastowo, 2013). Apabila efek friksi diabaikan, $q_{\text{fri}} \approx 0$, maka *non-dimensional volume exchange* diprediksi sebesar 87% dari *maximal volume exchange* pada persamaan (7).

METODE

Data dalam penelitian ini diperoleh secara bebas dari laman <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/> yang dikelola oleh National Geophysical Data Centre (NGDC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) dan <https://salinity.oceansciences.org/> yang dikelola oleh National Aeronautics and Space Administration (NASA), keduanya dikendalikan oleh the US government. Selain itu, data dalam penelitian ini juga diperoleh dari beberapa paper yang relevan.

Dengan mengikuti metodologi Prastowo *et al.* (2009), persamaan (7) diterapkan untuk estimasi debit maksimum (volume per detik) aliran air laut melewati selat-selat sempit di berbagai belahan dunia dan di wilayah perairan Indonesia bagian timur (Arlindo). Persamaan tersebut berfungsi sebagai batas atas volume pertukaran air laut antara dua laut yang terpisah oleh selat penghubung. Penerapan persamaan (7) dibatasi oleh sekurangnya 2 faktor. Faktor pertama adalah mengasumsikan bahwa selat memiliki topografi sederhana dengan kehadiran 1 titik kontrol hidrolik (Hogg *et al.*, 2001). Faktor kedua adalah kontribusi friksi terhadap reduksi *volume transport* tidak bisa ditentukan pasti karena kompleksitas geometri selat sangat beragam dengan variasi topografi dan batimetri. Berdasarkan faktor kedua ini, maka *normalised volume exchange* untuk semua selat-selat yang dipelajari dalam penelitian ini adalah $q \leq 0,87$.

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Dalam hal ini, variabel manipulasi adalah lebar selat b_0 , kedalaman selat H , dan perbedaan densitas air laut $\Delta\rho$ dari kedua laut atau lautan yang dihubungkan oleh selat sempit.

Semua parameter eksternal dan internal untuk estimasi *maximal volume exchange* Q_{max} ada pada persamaan (7). Variabel respons penelitian adalah hasil bagi antara debit aliran air laut melewati selat Q_{obs} (diberikan oleh beberapa paper yang relevan dan Q_{max}) yang dituliskan sebagai $q = Q_{obs}/Q_{max}$ dan disebut *normalised volume transport* pada persamaan (8) dan (9).

Dengan bantuan *spreadsheet*, analisis data dan plot yang relevan dilakukan untuk mendapatkan grafik yang mendeskripsikan korelasi antara nilai fluks volume air laut yang melewati selat q dan prediksi fluks volume berbasis teori hidrolik internal yang bisa dilihat pada persamaan (9).

Analisis hasil estimasi q untuk semua selat baik selat dunia maupun selat-selat di wilayah perairan Indonesia dilakukan dengan menghitung penyimpangan hasil estimasi q relatif terhadap 0,87 sebagai prediksi batas atas *volume exchange with mixing but no friction*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil-hasil penelitian dikelompokkan menjadi 2 tabel terpisah, masing-masing untuk selat-selat dunia (Tabel 1), selat-selat di wilayah Indonesia timur atau Arlindo (Tabel 2). Hal ini untuk memudahkan analisis hasil-hasil penelitian dengan teknik komparasi.

Tabel 1. Hasil hitung *maximal volume exchange* Q_{max} dan *normalised exchange* q untuk kasus selat dunia.

No	Nama Selat	Dimensi Selat		$\Delta\rho$ (kgm^{-3})	Q_{max} (10^6 m^3)	Q_{obs} (10^6 m^3)	q	kontrol hidrolik
		width b_o (km)	depth H (km)					
1	Gibraltar	14	1,0	13,8	1,192	1,025	0,86	S dan C
2	Bosphorus	3	0,1	14,6	0,006	0,005	0,76	S dan C
3	Dardanela	5	0,1	4,7	0,006	0,005	0,83	S dan C
4	Bab el Mandeb	25	0,2	2,0	0,073	0,050	0,69	S dan C
5	Bering	82	0,1	6,4	0,139	0,100	0,72	S
6	Denmark	290	0,7	10,2	12,846	9,800	0,76	S
7	Cook	22	0,8	3,5	0,730	0,610	0,84	C
8	Florida	150	1,8	10,0	28,375	23,800	0,84	C
9	Mozambique	430	3,0	2,1	80,204	60,000	0,75	C
10	Yucatan	70	2,8	6,0	20,013	17,000	0,85	S
11	Otranto	75	0,8	2,0	1,810	1,390	0,77	C

Catatan: C = *contraction* dan S = *sill* adalah bentuk penyempitan lateral dan vertikal suatu selat yang berfungsi sebagai kontrol hidrolik pertukaran air laut melalui selat.

Tabel 2. Hasil hitung *maximal volume exchange* Q_{max} dan *normalised exchange* q untuk kasus selat Arlindo.

No	Nama Selat	Dimensi Selat		$\Delta\rho$ (kgm^{-3})	Q_{max} (10^6 m^3)	Q_{obs} (10^6 m^3)	q	kontrol hidrolik
		width b_o (km)	depth H (km)					
1	*Makasar	50	2,0	4,8	7,849	6,400	0,83	S dan C
2	*Lombok	20	1,3	3,3	1,334	1,110	0,82	S
3	Lifamatola	20	1,94	4,8	2,933	2,500	0,85	S dan C
4	Ombai	30	3,35	1,7	5,941	5,000	0,84	C
5	Timor	85	1,55	1,7	5,277	4,300	0,81	S

*Selat Makasar adalah 'pintu masuk' (*inflow*) Arlindo yang membawa *surface water* dari Samudera Pasifik bagian barat menuju Samudera Hindia bagian timur melewati 'pintu keluar utama' (*outflow*) yaitu *Selat Lombok (Feng *et al.*, 2018).

Meskipun *exchange flow* di alam bisa saja dikontrol oleh faktor selain perbedaan densitas, misalnya yang terjadi pada Burlington Shipping Canal, *a man-made structure* dalam bentuk kanal penghubung antara Danau Ontario dan

Pelabuhan Hamilton di Canada, namun *buoyancy-driven exchange flow by temperature difference* tidak dibahas dalam penelitian ini karena pengaruh barotropik sulit dihilangkan. Selama musim panas di sana, perbedaan temperatur antara

kedua ‘sumber air’ tersebut (Danau Ontario dan Pelabuhan Hamilton) menjadi *driving force for the exchange through the Burlington Canal* (Prastowo, 2008; Jalili and Li, 2010; Millard, 2018). Alih-alih perbedaan temperatur, kasus yang dituliskan pada Tabel 1 adalah *hydraulically-controlled, density-driven exchange flows*. Kehadiran kontrol hidrolik bisa dilihat dari *lateral contraction* atau *bottom sill* atau kedua topografi tersebut dalam arah *mainstream* arus selat sebagai persyaratan keberlakuan teori hidrolik internal (Hogg *et al.*, 2001; Ivey, 2004, Prastowo, 2008).

Beberapa selat di wilayah perairan Indonesia barat sebetulnya juga merupakan tempat di mana *exchange flow* terjadi, misalnya Selat Sunda yang merupakan ‘kanal alam’ penghubung perairan Laut Jawa dan Samudera Hindia (Potemra *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018). Selat Karimata sebagai kanal penghubung antara Laut China Selatan dan Laut Jawa dibahas dalam konteks *its transport variability* (Anwar *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019). Selat-selat ini tidak dibahas dalam penelitian ini karena kehadiran titik kontrol hidrolik tidak teramati dan data yang tersedia tidak cocok diterapkan untuk teori hidrolik internal.

Untuk lebih memudahkan komparasi hasil estimasi *normalised volume transports* melewati selat-selat yang dipelajari dalam penelitian ini relatif dibandingkan dengan *theoretical prediction for the transports*, maka Tabel 3 memberikan ringkasan hasil dari Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 3. Komparasi *observed and predicted transports* untuk debit air laut melalui selat di dunia dan Arlindo.

No	Nama Selat	Obs. Vol. Transport q	Pre. Vol. Transport q^*	q_{fri}
1	Gibraltar	0,86	0,87	0,01
2	Bosphorus	0,76	0,87	0,11
3	Dardanela	0,83	0,87	0,04
4	Bab el Mandeb	0,69	0,87	0,18
5	Bering	0,72	0,87	0,15
6	Denmark	0,76	0,87	0,11
7	Cook	0,84	0,87	0,03
8	Florida	0,84	0,87	0,03
9	Mozambique	0,75	0,87	0,12
10	Yucatan	0,85	0,87	0,02
11	Otranto	0,77	0,87	0,10
12	Makasar	0,83	0,87	0,04
13	Lombok	0,82	0,87	0,05
14	Lifamatola	0,85	0,87	0,02
15	Ombai	0,84	0,87	0,03
16	Timor	0,81	0,87	0,06

Obs. Vol. Transport = Observed Volume Transport = q
 Pre. Vol. Transport = Predicted Volume Transport = q^*
 $q_{fri} = q^* - q$

Informasi utama dari Tabel 3 adalah 2 kelompok selat yang memiliki $0,81 \leq q \leq 0,86$ (selat dunia dan Arlindo) dan yang memiliki $q < 0,80$ (selat dunia). Kelompok yang pertama diasosiasikan dengan selat-selat, di mana kontribusi *bottom friction* dinyatakan oleh simbol q_{fri} dalam mereduksi *volume transport* adalah kecil. Reduksi *transport* oleh friksi sepanjang dasar selat pada kelompok pertama, $q_{fri} \leq 0,06$. Sedangkan kelompok yang kedua adalah selat-selat, di mana kontribusi *bottom friction* dalam reduksi *transport* adalah relatif besar, yaitu $q_{fri} = 0,10 - 0,18$. Secara efektif, reduksi *transport* pada kelompok ini adalah lebih besar dari 10% dari *total transport* melalui selat. Baik untuk selat yang dikategorikan kelompok pertama maupun kelompok kedua, reduksi *transport* oleh *mixing* adalah 13% (Prastowo, 2008; Prastowo *et al.*, 2009; Prastowo, 2013) seperti terlihat pada persamaan (9).

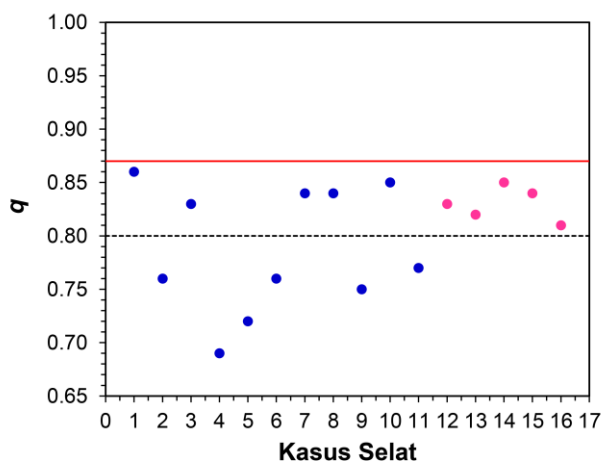
Dalam kasus selat dunia, Selat Gibraltar adalah selat di mana *mixing* mendominasi friksi yang diberikan oleh topografi dasar selat. Hal ini menjadi penyebab mengapa *normalised transport* pada selat ini, $q = 0,86$ hampir sama dengan *maximal exchange with mixing but no friction* 0,87 (lihat persamaan (9) bila $q_{fri} \approx 0$). Dominasi proses *mixing* pada Selat Gibraltar melalui temuan $q = 0,86$ ini konsisten dengan temuan penelitian terdahulu yang mengklaim bahwa *strong mixing is present in the Gibraltar* (Hogg *et al.*, 2001; Sannino *et al.*, 2009; Riha and Peliz, 2013). Proses *mixing* dan turbulensi yang kuat tidak saja dipicu oleh kehadiran *lateral contraction* atau *bottom sill* melainkan juga oleh keberadaan bentuk ‘cekungan atau tebing bawah laut’ seperti dalam kasus Selat Lifamatola di dekat perairan Laut Banda (van Aken *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2018; Giu *et al.*, 2020; Rahma *et al.*, 2020). Pada umumnya, variabilitas Arlindo dalam *annual, interannual, decadal to centennial time scales* (Fan *et al.*, 2018; Feng *et al.*, 2018) tidak memberikan efek yang signifikan terhadap *normalised transport* yang terukur, kelima selat Arlindo memberikan $0,80 < q < 0,86$. Hal ini berarti *turbulent mixing* mendominasi aliran air laut melalui selat Arlindo di perairan Indonesia timur yang topografi dan batimetrimya tidak terlalu kompleks relatif dibandingkan dengan misalnya Selat Bosphorus.

Berbeda dengan Selat Gibraltar atau selat yang lain dengan $0,81 \leq q \leq 0,86$ misalnya Selat Dardanela (Jarosz *et al.*, 2012, 2013) dan Selat Cook (Hadfield and Steven, 2020), Selat Bosphorus di Turki merupakan selat yang geometrinya panjang dan berliku sehingga friksi sepanjang aliran air laut melalui Bosphorus adalah relatif besar (Hogg *et al.*, 2001; Oguz, 2005; Jarosz *et al.*, 2011a, b; Sözer and Özsoy, 2017). Temuan penelitian ini di mana $q = 0,76$ di Selat Bosphorus memberi tafsiran bahwa reduksi *transport* oleh friksi (11%) sebanding dengan reduksi *transport* oleh *mixing* (13%). Situasi yang sama terjadi pada Selat Denmark (Xu *et al.*, 2015) dan hampir sama dengan situasi Selat Bering di mana friksi 15% dan *mixing* 13% serta Selat Mozambique (Swart *et al.*, 2010) di mana friksi 12% dan *mixing* 13%.

Selat Bab el Mandeb dengan $q \approx 0,7$ pada Tabel 3 adalah contoh yang baik, di mana menurut Smeed (2004) berdasarkan data oseanografi lapangan tidak terdapat bukti kontrol hidrolik. Alih-alih, peran pasang-surut terekam saat pengukuran arus pada selat tersebut. Oleh karena pasang-surut air laut dan *surface wind stress* dikategorikan sebagai *atmospheric controls* yang merupakan bagian integral dari *barotropic flow* (John and Sofianos, 2012, Xie *et al.*, 2019), maka prediksi *transport* berdasarkan teori hidrolik internal melenceng jauh dari hasil ukur di lapangan.

Fakta bahwa *strait exchange* adalah sistem terbuka di mana interaksi laut dan udara mustahil dihindarkan selain faktor alam yang lain, misalnya efek gravitasi bulan-matahari cukup merepotkan dalam proses pengambilan data sampel selat yang aliran airnya bisa dikategorikan sebagai *steady baroclinic flow* sebagai syarat keberlakuan teori hidrolik internal (Hogg *et al.*, 2001; Ivey, 2004; Prastowo *et al.*, 2009). Setidaknya, teori hidrolik internal berhasil dengan baik digunakan untuk memprediksi nilai batas atas *volume transport* melewati selat dengan kontrol hidrolik, yaitu tidak akan melebihi 87% *maximal exchange* pada persamaan (7). Alasan rasional untuk hal ini adalah proses turbulensi aliran air selat yang menghasilkan *mixing* tidak mungkin bisa dihindari (Tsimplis and Bryden, 2000; Winters and Seim, 2000; Hogg *et al.*, 2001; Stenström, 2003; Ivey, 2004; Prastowo *et al.*, 2009; Jarosz *et al.*, 2013; Sannino *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2019).

Gambar 3 di bawah ini menunjukkan distribusi prediksi aliran air laut melalui selat di dunia dan Arlindo, di mana seluruh selat yang dipelajari dalam penelitian ini mengalirkan air laut dengan debit yang diukur oleh besaran *normalised volume transport*, $q < 0,87$ (lihat Tabel 3).



Gambar 3. Data *normalised transport* q untuk 11 selat dunia (biru) dan 5 selat Arlindo (pink). Garis horisontal merah ($q = 0,87$) adalah nilai batas atas *volume exchange with mixing but no friction* (prediksi teori hidrolik internal). Garis horisontal hitam putus-putus ($q = 0,80$) adalah batas antara selat-selat dengan efek *bottom friction* yang relatif kecil termasuk selat Arlindo dan selat-selat lain, di mana efek tersebut sebanding dengan *mixing*.

Gambar 3 mendiskripsikan dengan jelas kelompok pertama dengan *normalised transport* $0,81 \leq q \leq 0,86$ dan kelompok kedua dengan *normalised transport* $q < 0,80$ (termasuk Bab el Mandeb di mana *barotropic flow* sangat mendominasi). Untuk kelompok pertama di mana alirannya masih dapat dikategorikan sebagai *baroclinic flow*, *mixing* mendominasi friksi dengan reduksi *volume transport* oleh *mixing* sebesar 13% dan reduksi *transport* berikutnya oleh friksi sebesar 6% (maksimum). Hasil ini konsisten dengan temuan penelitian terdahulu (Winters and Seim, 2000; Stenström, 2003; Prastowo *et al.*, 2009) yang menemukan *total transport reduction* berkisar 16-18%. Dalam hal ini, sangat sulit untuk menyimpulkan apakah faktor keberadaan 2 titik kontrol hidrolik ikut memperbesar atau memperkecil *transport reduction*.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini menerapkan teori hidrolik internal untuk mengestimasi fluks volume air laut yang melewati selat. Kehadiran titik kontrol hidrolik berupa penyempitan lateral (*contraction*) atau penyempitan vertikal (*sill*) bisa menjamin keberlakuan teori tersebut. Acuan yang digunakan adalah hasil penelitian terdahulu di mana reduksi *volume transport* oleh turbulensi dan *mixing* adalah 13% (Prastowo, 2008; Prastowo *et al.*, 2009; Prastowo, 2013). Dengan total kasus sebanyak 16 selat, seluruh *normalised transport* memenuhi $q < 0,87$ sesuai prediksi teori dengan rincian 10 dari 16 selat (termasuk Arlindo) memenuhi $0,81 \leq q \leq 0,86$ sedangkan sisanya memiliki $q < 0,80$ akibat efek friksi dasar laut atau *atmospheric forcing* yang sebanding dengan efek *mixing*. Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa fluks volume air laut yang melewati Selat Arlindo bisa diprediksi dengan teori hidrolik internal.

Saran

Kesulitan utama penelitian ini adalah pengumpulan data lebar minimum dan kedalaman selat. Meskipun tersedia 2 laman kredibel dan beberapa referensi berkualitas sebagai pembanding, namun seringkali kedua parameter eksternal itu hanya tersedia dalam jangkauan harga. Kesulitan lain adalah variabilitas *water transport* melalui selat dipengaruhi oleh durasi waktu dan parameter atmosfer atau cuaca lokal saat pengukuran dilakukan. Oleh karena itu, apabila penelitian ini dilaksanakan dengan bantuan simulasi numerik di mana kedua kesulitan tersebut bisa dikontrol, maka hasil-hasil penelitian akan bisa menggambarkan situasi sesungguhnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada badan National Geophysical Data Centre (NGDC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) melalui akses <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/> dan National Aeronautics and Space Administration (NASA)

melalui akses <https://salinity.oceansciences.org/> untuk mengunduh data sekunder penelitian. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada 2 *reviewers* yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, I. P., Putri, M. R. and Setiawan, A. 2018. Ocean numerical model experiment on estimating the variation of volume and heat transport in Karimata strait. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 162, No. 012001.
- Benjamin, T. B. 1968. Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 31, pp. 209-48.
- Brackenridge, R. E., Nicholson, U., Sapiie, B., Stow, D. and Tappin, D. R. 2020. Indonesian Throughflow as a preconditioning mechanism for submarine landslides in the Makassar Strait. *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 500, pp. 195–217.
- Budianto, W. E., Suchahyo, I., Prastowo, I. dan Rahmawati, E. 2013. Perambatan *gravity current* dalam skala laboratorium sebagai pemodelan lahar dingin dan intrusi air laut. *Jurnal Sains dan Matematika*, Vol. 1, No. 2, pp. 64-68.
- Fan, W., Jian, Z., Chu, Z., Dang, H., Wang, Y., Bassinot, F., Han, X. and Bian, Y. 2018. Variability of the Indonesian Throughflow in the Makassar Strait over the Last 30ka. *Nature Scientific Reports*, Vol. 8:5678.
- Feng, M., Zhang, N., Liu, Q. and Wijfels, S. 2018. The Indonesian throughflow, its variability and centennial change. *Geoscience Letters*, Vol. 5, Issue 3, pp. 1-10.
- Giu, L. O. M. G., Atmadipoera, A. S., Naulita, Y. dan Nugroho, D. 2020. Struktur vertical dan variabilitas Arlindo yang masuk ke tepi barat Laut Banda. *Jurnal Ilmu dan Kelautan Tropis*, Vol. 12, No. 2, pp. 457-471.
- Gregg, M. C. and Özsoy, E. 2002. Flow, water mass changes, and hydraulics in the Bosphorus. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. C3.
- Hadfield, M. G. and Stevens, C. L. 2020. A modelling synthesis of the volume flux through Cook Strait. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, Vol. 55, Issue 1, pp. 65-93.
- Helfrich, K. R. 1995. Time-dependent two-layer exchange flows. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 25, pp. 359-373.
- Hogg, A. M., Ivey, G. N., Winters, K. N. 2001. Hydraulics and mixing in controlled exchange flows. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. C1, pp. 959-972.
- Ivey, G. N. 2004. Stratification and mixing in sea straits. *Deep-Sea Research II*, Vol. 51, pp. 441-453.
- Jalili, A. and Li, S. S. 2010. Two-layer hydraulic exchange flow through the Burlington Ship Canal. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 37, No. 12, pp. 1631-1640.
- Jarosz, E., Teague, W. J., Book, J. W. and Beşiktepe, Ş. 2011a. Observed volume fluxes in the Bosphorus Strait. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L21608.
- Jarosz, E., Teague, W. J., Book, J. W. and Beşiktepe, Ş. 2011b. On flow variability in the Bosphorus Strait. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, C308038.
- Jarosz, E., Teague, W. J., Book, J. W. and Beşiktepe, Ş. 2012. Observations on the characteristics of the exchange flow in the Dardanelles Strait. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, C11012.
- Jarosz, E., Teague, W. J., Book, J. W. and Beşiktepe, Ş. 2013. Observed volume fluxes and mixing in the Dardanelles Strait. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 118, pp. 5007-5021.
- John, W. E. and Sofianos, S. S. 2012. Atmospherically-forced exchange through the Bab el Mandeb Strait. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 42, Issue 7, pp. 1143-1157.
- Li, S., Wei, Z., Susanto, R. D. Zhu, Y., Setiawan, A. Xu, T., Fan, B., Agustiadi, T., Trenggono, M. and Fang, G. 2018. Observations of intraseasonal variability in the Sunda Strait throughflow. *Journal of Oceanography*, Vol. 74, No. 5, pp. 541-547.
- Millard, R. 2018. Building the Burlington bay canal: the staples thesis and harbour development in upper Canada, 1823-1854. *Ontario History*, Vol. 110, No. 1, pp. 59-87.
- Necker, F., Härtel, C., Kleiser, L. and Meiburg, E. 2005. Mixing and dissipation in particle-driven *gravity currents*. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 545, pp. 339-372.
- Oguz, T. 2005. Hydraulic adjustment of the Bosphorus exchange flow. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L06604.
- Potemra, J. T., Hacker, P. W., Melnichenko, O. and Maximenko, N. 2016. Satellite estimate of freshwater exchange between the Indonesian Seas and the Indian Ocean via the Sunda Strait. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 121, pp. 5098-5111.
- Prastowo, T. 2008. *Mixing in buoyancy-driven exchange flows*. Canberra: ANU Press, Australia. pp. 1-138.
- Prastowo, T., Griffiths, R. W., Hughes, G. O. and Hogg, A. M. 2009. Effects of topography on the cumulative mixing efficiency in exchange flows. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, C08008.
- Prastowo, T. 2010. On the nature of *gravity currents*. *Jurnal Matematika dan Sains*, Vol. 14, No. 3, pp. 76-80.
- Prastowo, T. 2013. Mass transport in exchange flow through a constricted channel in a long tank. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (SNF), Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI, Serpong, September 2013, ISSN: 2088-4176*.
- Prastowo, T. On the dynamics of open-channel flows in the laboratory for educational use of hazard mitigation and science teaching. *Proceeding of Celebes International Conference on Earth Sciences (CICES)*, Kendari,

- Jurusan Fisika, Universitas Halu Oleo (UHO), November 10, 2014.
- Rahma, A., Atmadipoera, A. S. and Naulita, Y. 2020. Water mass along eastern pathway of Indonesia Throughflow from a CTD Argo Float. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 429, No. 012003.
- Riha, S. and Peliz, A. 2013. A two-layer primitive equation model of an idealized Strait of Gibraltar connected to an eastern basin. *Ocean Dynamics*, Vol. 63, pp. 615-631.
- Sannino G., Pratt, W. and Carillo, A. 2009. Hydraulic criticality of the exchange flow through the Strait of Gibraltar. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 39, pp. 2779-2799.
- Sannino, G., Sözer, A. and Özsoy, E. 2017. A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System. *Ocean Dynamics*, Vol. 67, pp. 397-432.
- Shin, J. O., Dalziel S. B. and Linden, P. F. 2004. Gravity currents produced by lock exchange. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 521, pp. 1-34.
- Simpson, J. E. 1997. *Gravity currents in the environment and the laboratory*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, UK. pp. 1-244.
- Sözer, A. and Özsoy, E. 2017. Modeling of the Bosphorus exchange flow dynamic. *Ocean Dynamics*, Vol. 67, pp. 321-343.
- Smeed, D. 2004. Exchange through the Bab el Mandab. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Vol. 51, Issue 4-5, pp. 455-474.
- Stenström, P. 2003. Mixing and recirculation in two-layer exchange flows. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. C8, 3256.
- Swart, N. C., Lutjeharms, J. R. E., Ridderinkhof, H. and de Ruijter, W. P. M. 2010. Observed characteristics of Mozambique Channel eddies. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, C09006.
- Tessler, Z. D. and Gordon, A. L. 2010. Transport and dynamics of the Panay Sill overflow in the Philippine Seas. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 40, pp. 2679-2695.
- Tsimplis, M. N. and Bryden, H. L. 2000. Estimation of the transports through the Strait of Gibraltar. *Deep-Sea Research Part I*, Vol. 47, pp. 2219-2242.
- van Aken, H. M., Brodjonegoro, I. S. and Jaya, I. 2009. The deep-water motion through the Lifamatola Passage and its contribution to the Indonesian throughflow. *Deep-Sea Research I*, Vol. 56, pp. 1203-1216.
- Wang, Y., Xu, T., Li, S., Susanto, R.D., Agustiadi, T., Trenggono, M., Tan, W. and Wei, Z. 2019. Seasonal variation of water transport through the Karimata Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, Vol. 38, No. 4, pp. 47-57.
- Winters, K. B. and Seim, H. E. 2000. The role of dissipation and mixing in exchange flow through a contracting channel. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 407, pp. 265-290.
- Xie, J., Krokos, G., Sofianos, S. and Hoteit, I. 2019. Interannual variability of the exchange flow through the Strait of Bab-al-Mandeb. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 124.
- Xu, X., Rhines, P. B., Chassignet, E. P. and Schmidt Jr., W. J. 2015. Spreading of Denmark Strait overflow water in the western Subpolar North Atlantic: insights from eddy-resolving simulations with a passive tracer. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 45, pp. 2913-2932.
- Yuan, D., Li, X., Wang., Z., Li., Y., Wang., J., Yang, Y., Hu, X., Tan, S., Zhou, H., Wardana, A. K., Surinati, D., Purwandana, A., Ismail, M. F. A., Avianto, P., Dirhamsyah, D., Arifin, Z. and von Storch, J-S. 2018. Observed transport variations in the Maluku channel of the Indonesian Seas associated with Western Boundary Current changes. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 48, pp. 1803-1813.