



Desain Kapal Keruk Perairan Dangkal Menggunakan Bucket Elevator

I Putu Sindhu Asmara ^{1*)}, Hartono Yudo ²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Sukolilo, Indonesia 60111

²⁾Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

diajukan pada : 22/08/19

direvisi pada : 05/09/19

diterima pada : 07/10/19

Abstrak

Pengerukan sungai di kota-kota besar biasanya dilakukan dengan menggunakan excavator yang dipasang di atas ponton. Metode ini memiliki kelemahan, yaitu: terbatasnya jarak jangkauan excavator untuk membuang material hasil pengerukan ke tepi sungai. Artikel ini berisikan desain kapal keruk sungai dengan metode pengerukan menggunakan kapal katamaran yang dilengkapi dengan kontainer penampung lumpur sehingga lebar sungai tidak lagi menjadi batasan. Kapal dilengkapi dengan bucket elevator pada bagian buritan kapal yang berfungsi untuk melakukan pengerukan dan berfungsi ganda sebagai propulsi kapal dengan memanfaatkan gaya dorong yang diakibatkan oleh sentakan antara bucket dan dasar perairan. Kebutuhan displacement kapal telah dihitung berdasarkan berat bucket elevator, berat kontainer dan berat konstruksi kapal. Perhitungan hidrostatis dan hambatan kapal dilakukan menggunakan Software MaxSurf dan divalidasi menggunakan pengujian tahanan kapal. Perhitungan bucket elevator divalidasi dengan uji coba pengerukan oleh prototipe kapal dengan skala 1:4. Kapal keruk katamaran ini memiliki displacement 6,972 ton dan mampu menampung muatan lumpur sampai dengan 2,668 ton dengan kecepatan laju hanya 1,7 knot untuk menjaga agar pengerukan terjadi secara merata. Kapal ini sangat sesuai digunakan sebagai kapal keruk sungai yang beroperasi secara rutin untuk memelihara tingkat kedalaman sungai.

Copyright © 2019, **KAPAL**, pISSN:1829-8370, eISSN : 2301-9069

Kata Kunci : Kapal keruk, Katamaran, Perairan dangkal, Bucket elevator

1. PENDAHULUAN

Sejak jaman kerajaan Majapahit sampai dengan masa pendudukan Belanda di Indonesia, sungai-sungai di beberapa kota di Indonesia difungsikan sebagai prasarana transportasi. Sayangnya, pada saat ini sungai-sungai tersebut menjadi sangat dangkal dan tidak lagi dapat dilalui kapal. Pendangkalan sungai menyebabkan aliran sungai tidak lancar dan daya tampung air menjadi sangat terbatas. Hal ini merupakan salah satu penyebab terjadinya banjir selain akibat semakin sempitnya hutan yang berfungsi untuk

menahan air.

Selama ini pengerukan sungai di perkotaan dilakukan dengan menggunakan alat berat excavator yang dipasang di atas ponton, seperti pada Gambar 1 [1]. Excavator dengan karakteristiknya yang berat memerlukan ponton yang relatif besar untuk mampu mendukung beratnya excavator. Selain itu, dalam operasionalnya olah gerak excavator di atas ponton sangat sulit sehingga jangkauan keruk sangat terbatas. Hasil kerukan excavator umumnya dibuang di pinggir sungai. Banyaknya kandungan air pada buangan hasil kerukan sangat mengganggu lingkungan di sekitar sungai. Daerah aliran sungai yang dipadati oleh pemukiman

*) Penulis Korespondensi :

Email : putusindhu@ppns.ac.id

menambah permasalahan, yaitu: semakin sulitnya melakukan pengerukan yang selama ini dilaksanakan dengan menggunakan *excavator*.

Terbatasnya kedalaman sungai dan berat jenis lumpur yang relatif besar merupakan dua faktor utama yang merupakan kendala dalam perancangan kapal keruk. Kapal keruk menggunakan *bucket* yang ada saat ini dibuat untuk melakukan pengerukan dengan kedalaman 8 m sampai 30 m [2], seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Proses pembongkaran hasil kerukan dari ruang muat memerlukan peralatan tambahan yang beratnya akan sangat berpengaruh pada besarnya kapal untuk menyediakan gaya apung yang memadai.

Sejauh ini informasi yang dihasilkan masih terbatas pada pemilihan alat keruk, alternatif metode bongkar muat dan stabilitas kapal. Banyak informasi yang masih belum tersedia untuk mewujudkan rancangan kapal keruk di perairan dangkal, seperti pemanfaatan serba guna kapal keruk dengan rancangan ruang muat dan alat keruk yang dapat dilepas, konstruksi kapal katamaran dengan material ringan, serta pengaruh arus yang terjadi akibat pengerukan terhadap gerakan kapal. Kapal keruk Kalimas dengan sarat 0,75 m dirancang dengan menggunakan *suction dredger* [3]. Hasil penelitian ini hanya bisa diterapkan untuk pengerukan pada bagian muara, karena kedalaman sungai Kalimas pada kondisi air surut berkisar antara 0,3 – 0,7 m.

Pada penelitian ini dilakukan desain, pembuatan dan uji coba prototipe kapal keruk untuk mengetahui apakah kapal keruk menggunakan *bucket elevator* dapat dioperasikan pada sungai dangkal.



Gambar 1. Excavator – Ponton



Gambar 2. Bucket Dredger

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan dengan metodologi sebagai berikut:

- Merancang bentuk kapal menggunakan software Maxsurf, dilanjutkan dengan perhitungan hambatan dan hidrostatis
- Perhitungan hambatan dan kajian teoritis numerik (dengan teknik CFD) pemilihan bentuk katamaran (sebagai alternatif) dari bentuk *monohull* yang ada selama ini, disertai dengan analisis optimasi jarak lambung
- Membuat prototipe kapal dengan material GFRP (*glassfiber reinforced plastic*)
- Melakukan eksperimen fisik model kapal di kolam uji untuk mengetahui validasi perhitungan tahanan kapal dan besarnya daya penggerak kapal
- Merancang *bucket elevator* sebagai alat keruk dan penggerak prototipe kapal
- Membuat dan memasang *bucket elevator* pada prototipe kapal keruk
- Melakukan uji coba operasional prototipe kapal keruk dengan melakukan pengerukan di sungai.
- Melakukan pengukuran kecepatan kapal selama proses pengerukan.

2.1. Prototipe Kapal Keruk

Meskipun telah ada berbagai jenis kapal keruk, prototipe kapal keruk yang akan diteliti mempunyai beberapa kekhususan sebagai berikut:

- Rancangan kapal katamaran sebagai kapal keruk perairan dangkal merupakan pilihan yang logis untuk mendapatkan ruang muat yang maksimal.
- Penggunaan *bucket elevator* sebagai alat keruk memiliki keuntungan yaitu memberikan daya dorong tambahan pada gerakan kapal.
- Ruang muat yang ditempatkan di antara kedua lambung kapal memiliki keuntungan yaitu dapat dilepas sehingga mempercepat proses bongkar muatan.

Lambung kapal dirancang dengan tipe katamaran sehingga memungkinkan untuk menempatkan ruang muat *knock down*, *bucket elevator* dan *hopper* pada posisi *center line*. Ada sebuah ruang muat yang bisa dilepas dan dipasang kembali. Penggunaan sistem *knock down* ini memungkinkan untuk menggeser posisi ruang muat sehingga kondisi trim kapal dapat dikendalikan dengan cara menggeser posisi tersebut kearah memanjang kapal. Sistem ini juga memungkinkan untuk dilakukan penggantian

panjang elevator yang disesuaikan dengan kedalaman sungai tertentu.

2.2. Ukuran dan Kecepatan Bucket

Perancangan *bucket elevator* dimulai dari penentuan kapasitas pengerukan (Q). Kapasitas pengerukan dapat ditentukan dengan menetapkan berapa lama kapal tersebut membutuhkan waktu (t) untuk memenuhi volume ruangan muatnya (V).

$$Q = \frac{\rho V}{t} \quad (1)$$

dimana ρ adalah massa jenis lumpur.

Ukuran alat keruk adalah volume *bucket* (V_b) dan jarak *bucket* (*pitch*). Ukuran pengeruk tergantung dari kapasitas pengerukan (Q) dan kecepatan alat (v).

$$V_b = \frac{Qp}{\rho v \eta} \quad (2)$$

dimana: p adalah jarak *bucket* (m), η adalah persentase pengisian *bucket* (%), Q adalah kapasitas pengerukan (ton/jam), V_b adalah volume *bucket* (m^3), ρ adalah massa jenis lumpur (ton/m^3) dan v adalah kecepatan rantai (m/jam)

Agar material tidak terlempar tepat pada saat *bucket* mencapai ujung atas *elevator* maka kecepatan *bucket* (v) tidak boleh lebih dari v_0 , dimana v_0 adalah kecepatan lumpur pada saat terlempar dari *bucket*, yaitu sebagai berikut [4].

$$v_0 = \sqrt{gR_m} \quad (3)$$

$$S = v_0 t + 0,5gt^2 \quad (4)$$

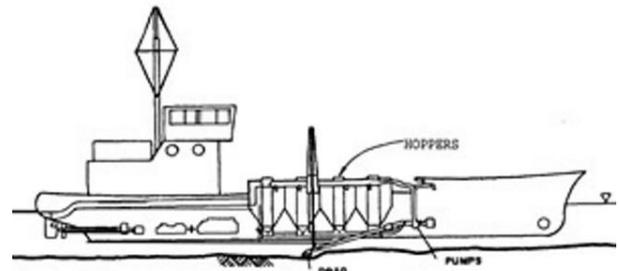
dimana: R_m adalah radius putar rata-rata *bucket* dalam meter, S adalah jarak lemparan lumpur, v_0 adalah kecepatan lumpur lepas dari *bucket* (m/s), t adalah waktu untuk mencapai penampungan (s) dan g adalah gravitasi bumi ($9,81 m/s^2$).

2.3. Lokasi Penelitian

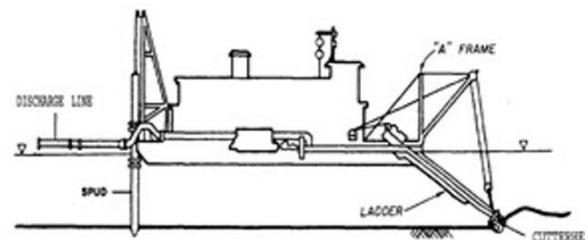
Prototipe kapal keruk direncanakan untuk dioperasikan di Kalimas Surabaya. Prototipe ini dirancang, dibuat dan diujicobakan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Proses perancangan dilaksanakan di Laboratorium CAD/CAM dengan menggunakan Software MaxSurf dan Ansys, pembuatan prototipe dilakukan di Bengkel Non Metal, sedangkan uji coba prototipe dilaksanakan di Kolam PPNS.

2.4. Metode Pengerukan

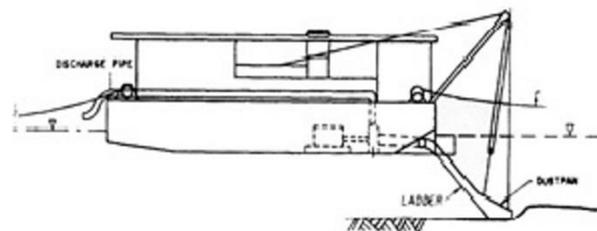
Beberapa metode pengerukan yang ada pada literatur umumnya tidak digunakan pada aliran sungai dangkal, seperti ditunjukkan Gambar 3 sampai dengan Gambar 7 [2,5]. Kapal keruk pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 5 menggunakan mekanisma hidrolika dengan pompa penyedot material dasar perairan, sedangkan kapal keruk pada Gambar 6 dan 7 masing-masing menggunakan mekanisme mekanik dengan *backhoe* dan *grab*. Pada Gambar 1, lumpur dihisap dan ditampung pada *container*, sedangkan pada Gambar 4 dan 5 material dihisap dan dialirkan melalui *discharge*. Pada Gambar 4 material memerlukan penghancuran menggunakan *cutter head* untuk menghancurkan material sedangkan pada Gambar 5 tidak memerlukan *cutter head*.



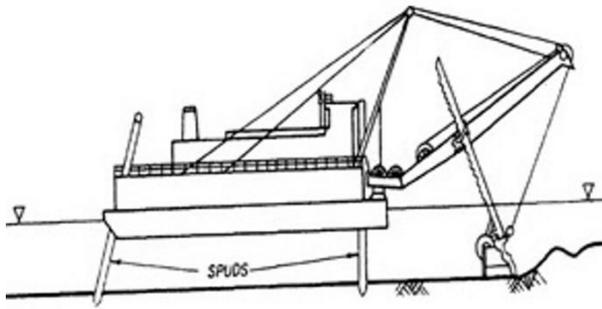
Gambar 3. Kapal Keruk Pompa dengan Propeler



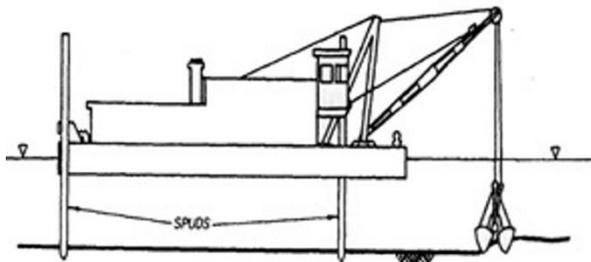
Gambar 4. Kapal Keruk Pompa dengan Spud



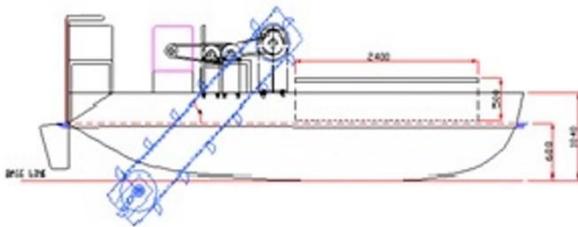
Gambar 5. Kapal Keruk Pompa dengan Tali



Gambar 6. Kapal Keruk *Backhoe* dengan *Spud*



Gambar 7. Kapal Keruk *Grab* dengan *Spud*



Gambar 8. Kapal Keruk *Bucket Elevator*

Kelima jenis kapal keruk tersebut juga dapat dibedakan dari penggunaan propeler dan *spud* untuk memindahkan posisi lambung kapal. Metode pengerukan yang disampaikan pada artikel ini adalah menggunakan *bucket elevator* seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Kapal ini tidak menggunakan propeler maupun *spud* karena kapal sudah dipastikan mampu bergerak dengan memanfaatkan gaya dorong yang dihasilkan oleh sentakan *bucket* dengan dasar sungai. Kapal keruk menggunakan *bucket elevator* bukan merupakan desain baru. Kapal jenis ini sudah pernah diterapkan [2]. Pada artikel ini diangkat kembali dan disesuaikan untuk diterapkan pada sungai dangkal. Kapal ini juga sudah dikembangkan dan dipatenkan dengan penambahan sirip pada *bucket* untuk melakukan gerakan ke arah berlawanan [6].

2.5. Alat dan Bahan

Prototipe kapal keruk katamaran dibuat dengan skala ukuran 1:4 dan panjang prototipe adalah 1,5 m. Bahan yang digunakan untuk pembangunan lambung prototipe kapal ini adalah *glassfiber reinforced plastic* (GFRP). *Bucket*

terbuat dari material baja SS 400 yang terpasang pada rantai dan digerakkan oleh motor bakar 0,32 kW.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Survei pada aliran sungai dan muara pelabuhan dilaksanakan pada musim kemarau di sungai Kalimas Surabaya. Survei dilakukan untuk mengetahui kedalaman sungai mulai dari dermaga kapal wisata sampai dengan pelabuhan pelayaran rakyat di muara sungai. Kondisi sungai terdangkal sebesar 0,3 m diukur pada jembatan di sekitar pelabuhan pelayaran rakyat di muara sungai. Pada Gambar 9 terlihat perahu yang sedang mengangkut air tawar untuk kebutuhan kapal pelayaran rakyat yang sedang tambat di muara sungai. Kondisi sungai yang paling dalam diukur pada jembatan dekat dermaga wisata sebesar 0,7 m. Pada Gambar 10 dapat dilihat kapal wisata yang sedang beroperasi di sekitar dermaga wisata. Kondisi sungai seperti tersebut tidak memungkinkan *excavator* untuk melakukan pengerukan menggunakan ponton di tengah sungai, melainkan hanya mampu dilakukan dari bantaran sungai.



Gambar 9. Kedangkalan di Muara Kali Mas

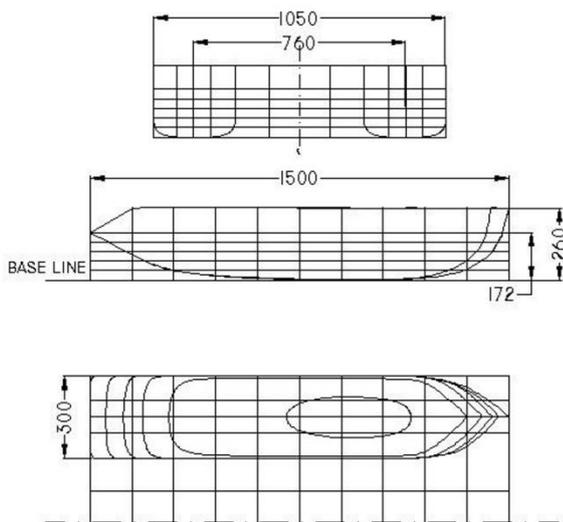


Gambar 10. Kapal Wisata Kali Mas

3.1. Lambung Katamaran

Dengan dasar pemikiran bahwa pengerukan direncanakan berawal dari daerah yang paling dalam dalam menuju daerah yang paling dangkal, maka kapal keruk direncanakan memiliki sarat maksimum sebesar 0,7 m. Untuk mendapatkan *displacement* kapal yang maksimum dan luasan

geladak yang besar sebagai peletakan alat keruk *bucket elevator* dan peletakan ruang muat, maka bentuk kapal yang direncanakan adalah kapal katamaran. Melalui perencanaan dengan menggunakan MaxSurf [7], diperoleh bentuk kapal katamaran dengan ukuran utama kapal sebagai berikut: panjang (L_{pp}) adalah 6 m, lebar lambung (B) adalah 1,2 m, lebar keseluruhan (BOA) adalah 4,2 m, sarat (T) adalah 0,688 m dan koefisien blok (C_b) adalah 0,728.



Gambar 11. Rencana Garis Kapal

Tabel 1. Karakter Hidrostatik

No	Item Hidrostatik	Nilai
1	Displacement kg	109
2	Heel degrees	0°
3	Draft at FP m	0.172
4	Draft at AP m	0.172
5	Draft at LCF m	0.172
6	Trim m	0.000
7	WL Length m	1.475
8	WL Beam m	1.050
9	Wetted Area m ²	1.485
10	Waterpl. Area m ²	0.812
11	Prismatic Coeff.	0.767
12	Block Coeff.	0.728
13	Midship Area Coeff.	0.950
14	Waterpl. Area Coeff.	0.933
15	LCB to Amidsh. m	0.001 Aft
16	LCF to Amidsh. m	0.055 Aft
17	KB m	0.097
18	KG m	0.172
19	BMT m	1.089
20	BML m	1.174
21	GMT m	1.014
22	GML m	1.099
23	KMt m	1.186
24	KML m	1.271
25	TPc Tonne/cm	0.008
26	MTC Tonne.m	0.001

Pada Gambar 11 dapat dilihat bentuk garis potongan melintang (*body plan*), gambar bentuk irisan vertikal kearah memanjang (*buttock lines*) dan gambar garis air (*water lines*) prototipe kapal dengan ukuran utama sebagai berikut: LOA=1,5 m, BOA=1,05 m, H=0,26m, dan $C_b=0.728$. Displacement kapal tersebut adalah 109 kg dengan berbagai karakteristik hidrostatis pada sarat penuh 0,172 m, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Displacement prototipe sebesar 109 kg mewakili displacement kapal yang sebenarnya sebesar 6,972 ton, yaitu sebesar 4³ atau 64 kali displacement prototipe. Sarat prototipe sebesar 0,172 m mewakili sarat kapal sebesar 0,688 m, yaitu 4 kali sarat prototipe dan luas garis air, *waterplane area* (WPA) sebesar 0,812 m² mewakili 4² atau 16 kali WPA prototipe.

3.2. Tahanan Kapal

Hasil perhitungan hambatan dan daya penggerak kapal menggunakan Hullspeed menunjukkan bahwa prototipe tersebut membutuhkan daya sebesar 0,2 HP (150 watt) pada kecepatan 3 knot (1,5 m/s). Hasil perhitungan ini menunjukkan nilai yang tidak berubah meskipun jarak antar lambung kapal divariasikan. Hal ini menunjukkan bahwa Hullspeed tidak memperhitungkan efek aliran diantara kedua lambung kapal.

Mengingat kompleksnya aliran disekitar lambung kapal, maka total hambatan kapal sangat sulit untuk diprediksikan hanya dengan menggunakan metoda teoritis. Percobaan model masih merupakan data yang paling akurat untuk menentukan performansi kapal. Ciri khas dari hidrodinamika kapal katamaran adalah adanya interaksi aliran diantara kedua lambung. Total hambatan kapal dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut [8].

$$R = 0,5 C_T \rho v_m^2 S_w \quad (5)$$

dimana: C_T adalah koefisien hambatan total, ρ adalah masa jenis fluida, v_m adalah kecepatan kapal dan S_w adalah luasan permukaan basah kapal.

Untuk mengetahui validitas hasil hambatan seperti di atas, maka dilakukan pembuatan model kapal katamaran tersebut yang selanjutnya diuji pada *towing tank* di Laboratorium Hidrodinamika ITS. Pada tahap pengujian prototipe ini kami memvariasikan nilai perbandingan jarak lambung dengan panjang kapal (S/L), yaitu: 20% , 30% dan 40%. Model kapal ditunjukkan apda Gambar 12

dan data hasil pengujian adalah seperti terlihat pada Tabel 2.



Gambar 12. Model Uji Tahanan Kapal

Tabel 2. Hasil Uji Tahanan Kapal

S/L	Kecepatan, v (m/dt)	Tahanan, R (kg)
20%	0.43062	0.0143
	0.56108	0.0684
	0.68803	0.1779
30%	0.19816	0.0381
	0.39801	0.2193
	0.61715	0.5219
40%	0.18510	0.0348
	0.58098	0.1291
	0.84512	0.4080

Dari ketiga variasi S/L tersebut diatas nilai kebutuhan daya dorong yang paling mendekati hasil perhitungan menggunakan Hullspeed adalah kebutuhan daya pada S/L=0,2 sebesar 186,48 watt dan terdapat perbedaan hasil perhitungan sebesar 19,56%.

Dengan menggunakan persamaan Dubrovsky, maka besarnya koefisien hambatan total model kapal tersebut adalah 2,95E-03, 1.64E-02, dan 8,67E-03 masing masing pada rasio jarak lambung 20%, 30% dan 40%. Rata-rata koefisien hambatan total adalah 9,34E-03. Penelitian mengenai koefisien hambatan total kapal katamaran [9], menunjukkan nilai yang mendekati, yaitu 8E-03.

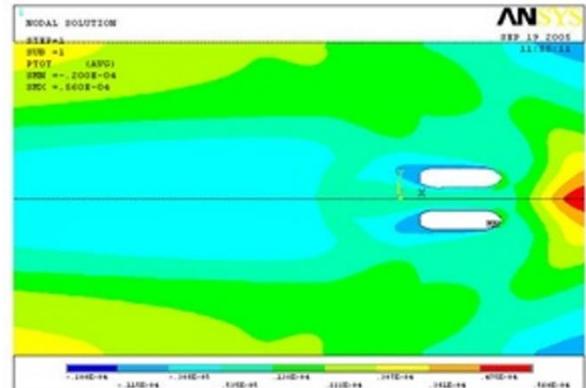
Analisis CFD dilakukan dengan analisis ditekankan terhadap garis air pada posisi sarat air penuh. Pemodelan dilakukan pada badan kapal format katamaran (S/L) = 20%, 030% dan 40% sesuai dengan jarak pisah pada uji eksperimental model. Hasil-hasil analisis diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis CFD

S/L	Tahanan Gesek	Tahanan Total
20%	0.060	0.096
30%	0.059	0.081
40%	0.058	0.075

Seperti halnya dengan uji model kapal maka tampak dengan jelas (secara kualitatif) telah terjadi pengurangan gaya hambatan seiring dengan meningkatnya jarak antara lambung kapal.

Jarak terjauh (S/L=40%) memperlihatkan suatu kondisi dimana interaksi gelombang antara lambung praktis tidak ada, seperti terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Distribusi tekanan pada S/L=40%

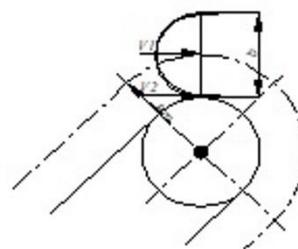
3.3. Bucket Elevator

Massa jenis lumpur diukur dengan cara menimbang lumpur yang telah dimasukkan ke dalam kemasan. Data berat lumpur tersebut adalah sebagai berikut:

1. Massa sampel I : 852 gram
2. Massa sampel II : 818 gram
3. Massa sampel III : 830 gram
4. Massa sampel IV : 846 gram
5. Massa sampel V : 846 gram

Rata-rata berat jenis lumpur tersebut adalah sebagai berikut:

- Massa rata-rata = 0,8384 kg
- Volume kemasan = 0,6 liter
- Massa jenis (ρ) = 1,39 ton/m³



Gambar 14. Model Bucket Elevator

Agar lumpur terlempar tepat pada saat bucket berada pada posisi puncak elevator seperti terlihat pada Gambar 14, maka besarnya gaya sentrifugal haruslah sama dengan berat lumpur pada bucket, sehingga dapat dituliskan dengan persamaan sbb:

$$mg = \frac{mv_1^2}{R_m} \quad (6)$$

Dengan demikian maka kecepatan *bucket* dapat dihitung dengan persamaan sbb:

$$v_1 = \sqrt{gR_m} \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{R_s}{R_m} v_1 \quad (8)$$

dimana : R_m adalah jarak dari sumbu putar ke pusat lumpur , g dalah percepatan gravitasi dan R_s adalah jari-jari *sproacket*.

Prototipe ini direncanakan menggunakan *sproacket* dengan jari-jari 0,065 m, dengan lebar *bucket* adalah b . maka persamaan di atas menjadi, sebagai berikut.

$$v_1 = \sqrt{g(0,065 + b/2)} \quad (9)$$

$$v_2 = \frac{0,065}{R_m} v_1 \quad (10)$$

Sehingga jumlah putaran *sprocket* per menit (N) adalah sebagai berikut.

$$N = \frac{60v_2}{2R_s} \quad (11)$$

Daya yang diperlukan untuk memutar *sproacket* dapat dibedakan menjadi 2 (dua) keadaan, yaitu: *bucket* berada pada posisi di dalam air dan pada posisi mengeruk lumpur.

Daya yang diperlukan oleh *bucket elevator* pada posisi tidak mengeruk adalah:

$$P = \frac{2\pi NT}{60} \quad (12)$$

dimana: N adalah jumlah putaran per menit sesuai dengan persamaan 11, dan torsi (T adalah sebagai berikut.

$$T = \left\{ 0,065W_1 + \left(0,065 + \frac{b}{2} \right) (W_2 + W_3) \right\} \sin(\alpha) \quad (13)$$

dimana: W_1 adalah gaya akibat berat rantai (N), W_2 adalah gaya akibat berat *bucket* (N), W_3 adalah gaya akibat berat air pada *bucket* (N) dan α adalah kemiringan *bucket elevator*.

Daya di atas dipergunakan oleh *bucket elevator* untuk mengangkat air di dalam *bucket*. Pada saat *bucket* masuk ke dalam air akan terjadi momentum sebesar:

$$M = mv \quad (14)$$

dimana : m adalah massa air yang dipindahkan, vadalah kecepatan air saat terlempar, seperti dihitung dengan persamaan 3.

Massa air yang dipindahkan dalam satu kali ayunan *bucket* adalah:

$$m = \rho_a b l s \quad (15)$$

dimana: b adalah lebar *bucket*, l adalah panjang *bucket*, $s = \pi(0,13+b)/2$, yaitu lintasan *bucket* dalam satu kali putaran *sproacket* dan ρ_a adalah masa jenis air.

Karena waktu yang diperlukan untuk satu putaran *sproacket* adalah jarak lintasan dibagi kecepatan maka:

$$t = \frac{\pi(0,13+b)}{v} \quad (16)$$

Dengan demikian daya yang digunakan untuk memindahkan air di dalam n jumlah *bucket* adalah:

$$P_1 = \frac{nmv^2}{t} \quad (17)$$

$$P_1 = n\rho_a b l v^3 \quad (18)$$

Jadi daya yang diperlukan pada posisi tidak mengeruk, yaitu posisi dimana *bucket elevator* hanya melewati air adalah:

$$P_2 = \frac{2\pi N \left\{ 0,065W_1 + \left(0,065 + \frac{b}{2} \right) (W_2 + W_3) \right\} \sin(\alpha)}{60} + n\rho_a b l v^3 \quad (19)$$

Bucket elevator direncanakan mempunyai panjang 0,84 m, sehingga alat ini akan melakukan pengerukan pada kemiringan 27° sampai dengan kemiringan 45° .

Pada saat *bucket elevator* melakukan pengerukan maka daya yang dibutuhkan lebih besar dari pada posisi *bucket* berada di dalam air saja. Daya tambahan yang dibutuhkan adalah daya untuk mengeruk lumpur dan mengangkat lumpur, sehingga Persamaan-13 menjadi sebagai berikut:

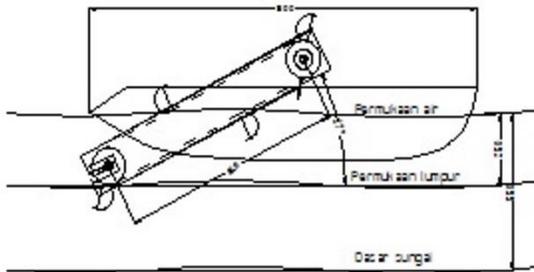
$$P_2 = \frac{2\pi N \left\{ 0,065W_1 + \left(0,065 + \frac{b}{2} \right) (W_2 + W_4) \right\} \sin(\alpha)}{60} + n\rho_l b l v^3 \quad (20)$$

dimana: W_4 adalah gaya akibat berat yang diangkut dan ρ_l adalah berat jenis lumpur (N/m³).

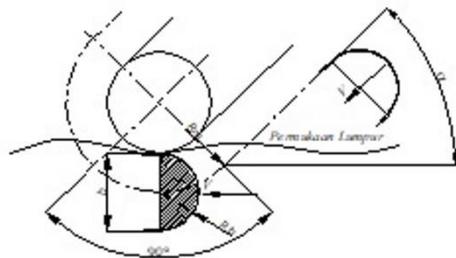
Daya yang dihitung pada persamaan 20 merupakan daya minimal, sehingga daya di atas perlu ditambahkan sebesar 25 %, sebagai daya yang diasumsikan hilang pada bearing dan rantai.

Pada saat pengerukan *bucket elevator* harus dijaga agar selalu berada pada posisi seperti pada Gambar 14.

Seperti terlihat pada Gambar 15, sudut kontak antara *bucket* dengan lumpur adalah 90° . Dengan demikian waktu yang dibutuhkan untuk sekali pengerukan (t_k) adalah seperempat dari waktu untuk satu putaran *sprocket*.



Gambar 14. Kemiringan *Bucket* Saat Pengerukan



Gambar 15. Posisi *Bucket* Saat Pengerukan

Jarak horisontal yang dikeruk dalam satu kali kerukan adalah:

$$S_k = 2(0,65 + b) \sin(45^\circ) \quad (21)$$

Pada saat yang sama *bucket* di dalam air juga mengayuh air. Daya ini juga memberikan efek gerakan kapal ke arah horisontal, sehingga total daya yang mengakibatkan gerakan kapal kedepan adalah:

$$P_k = 0,5n(\rho_a + \rho_l)blv^3 \cos(\alpha) \quad (22)$$

Jika kecepatan kapal pada daya dorong P_k adalah c (m/s), maka agar efektifitas pengerukan menjadi optimal (100%), maka kecepatan c haruslah sebesar:

$$c = \frac{4vS_k}{\pi(0,13+b)} \quad (23)$$

dan jarak antara *bucket* adalah:

$$S_b = \frac{0,13\pi}{4} = 0,102 \text{ m} \quad (24)$$

Panjang *bucket elevator*, l adalah 0,84 m, panjang keliling rantai adalah 2,5 m dan jumlah *bucket*, n adalah 12 buah. Bentuk penampakan lintang *bucket* adalah setengah lingkaran dengan diameter b , sehingga kapasitas pengerukan dari *bucket elevator* adalah:

$$Q = 3600 \frac{0,25n\pi b^2 v}{2,5} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (25)$$

$$Q = 360 n\pi b^2 v \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (26)$$

Dari persamaan-persamaan yang telah dijabarkan diatas, dapat disimulasikan beberapa ukuran *bucket*. Untuk mendapatkan daya dorong sebesar 150 watt maka lebar *bucket* adalah 60 mm dan panjang *bucket* 250 mm. Bila faktor hambatan pada bearing dan rantai diperhitungkan sebesar 25% maka daya yang dibutuhkan oleh *bucket elevator* tersebut adalah 323 watt. Jadi dari daya pengerukan sebesar 323 watt, 150 watt diantaranya digunakan untuk mendorong kapal. Kecepatan pengerukan ke arah horisontal pada daya dorong 150 watt adalah 1,14 m/s. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan Hullspeed, dengan daya dorong 150 watt, kapal akan bergerak dengan kecepatan 3 knot (1,5 m/s).

Dengan menggunakan persamaan-persamaan tersebut di atas, dapat dihitung waktu yang dibutuhkan oleh satu kali kerukan *bucket* adalah 0,15 s. Dengan kecepatan 1,5 m/s maka jarak yang ditempuh oleh kapal adalah 0,23 m. Jarak horisontal yang dilalui *bucket* pada saat mengeruk lumpur adalah 0,18 m. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa efektifitas alat keruk ini adalah $0,18:0,23 = 76\%$. Artinya, kalau kapal berjalan 100 m maka total bagian yang terkeruk sepanjang 76 m. Sedangkan kapasitas pengerukan prototipe *bucket elevator* tersebut adalah 11,79 m^3/h .

3.4. Uji Coba Prototipe

Untuk mengetahui validasi perhitungan efek daya dorong kapal yang diakibatkan oleh alat keruk maka dilakukan percobaan pengerukan. Gambar 16 menunjukkan prototipe kapal yang sedang diuji coba.

Hasil uji coba seperti pada Tabel 4 menunjukkan adanya perbedaan kecepatan kapal antara uji coba dengan perhitungan. Pada saat tidak mengeruk, kecepatan uji coba hanya 34% dari kecepatan perhitungan. Sedangkan pada saat mengeruk kecepatan uji coba hanya 14% dari kecepatan yang diperhitungkan.



Gambar 16. Uji Coba Pengerukan

Tabel 4. Hasil Uji Coba

RPM	Kemiringan	Kecepatan Rata-Rata (m/s)
97	15 ⁰	0.49
97	45 ⁰	0.20
50	15 ⁰	0.36

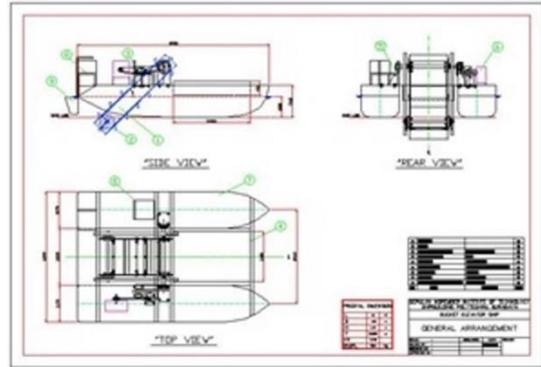
Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa efisiensi penggerak kapal menggunakan kayuhan bucket pada saat tidak mengeruk mencapai 34%, sedangkan pada saat mengeruk hanya mencapai 14%. Meskipun efisiensi tersebut relatif kecil jika dibandingkan dengan efisiensi propeler, tetapi hal ini hanyalah efek samping dari fungsi utamanya sebagai alat keruk.

Dari hasil perhitungan dengan ukuran kapal yang sebenarnya didapatkan bahwa pada kemiringan pengerukan 45°, dibutuhkan daya untuk pengerukan sekitar 11,29 kW. Dengan daya tersebut pengerukan berlangsung dengan lintasan keruk 1,93 meter per detik. Sedangkan efek daya dorong kapal akibat pengerukan adalah sekitar 7,13 kW. Daya dorong tersebut akan menyebabkan kapal bergerak dengan kecepatan sekitar 5 knots (2,5 m/s). Berdasarkan uji coba prototipe, kecepatan kapal hanya 34% dari 2,55 m/s, yaitu sebesar 0,85 m/s. Karena kecepatan kapal lebih kecil dari kecepatan lintasan pengerukan maka dapat disimpulkan bahwa pengerukan akan berlangsung tanpa adanya lokasi dasar sungai yang tidak terjangkau oleh *bucket elevator*.

3.5. Kapasitas Muatan

Bak lumpur direncanakan dapat dipasang dan dilepas sehingga pada saat pembuangan lumpur bak tersebut ikut terangkat ke dalam truk. Hal ini dimaksudkan untuk mempercepat proses bongkar muat. Dengan mempertimbangkan hal tersebut maka bak tersebut direncanakan dibuat dari material baja, sedangkan badan kapal terbuat dari

fiberglass agar dapat memperkecil berat kapal kosong (LWT). Agar kapal tidak mengalami trim yang berlebih maka bak tersebut dipasang pada bagian depan kapal dan sebagai pengimbanginya bucket elevator dan kursi operator diletakkan pada bagian belakang kapal, seperti ditampilkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Rencana Umum Kapal

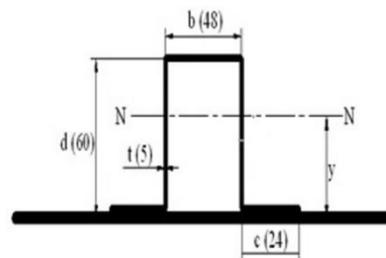
Berdasarkan Lloyd Register of Shipping [10], bila rasio kecepatan dan panjang kapal adalah 2,04, maka:

- Jarak gading adalah 380 mm (direncanakan jarak gading 300 mm)
- Berat laminasi kulit sisi adalah: 2,15 kg/m²
- Berat laminasi geladak adalah: 1,85 kg/m²
- Berat laminasi kulit alas adalah: 2,65 kg/m²
- Modulus gading adalah 15 cm³

Balok geladak direncanakan menggunakan profil baja dengan perhitungan pada kondisi bak terpenuhi oleh lumpur adalah sebagai berikut:

- Berat lumpur adalah: 2668,80 kg
- Berat bak lumpur dari pelat adalah: 688 kg
- Momen lentur maksimum yang diterima oleh balok geladak adalah: 302 kg.m
- Momen lentur tersebut ditahan oleh pipa kotak dengan ukuran 120x60x4 mm, dengan berat 285 kg dan tegangan 85,6 N/mm²

Gading kapal direncanakan dengan ukuran seperti pada Gambar 18. Modulus gading tersebut sebesar 18,92 cm³.



Gambar 18. Ukuran Gading

Semua bagian konstruksi tersebut di atas direncanakan menggunakan lapisan *glassfiber reinforced plastic* (GFRP) seperti pada Tabel 5.

Mat dipilih karena sifatnya yang lebih homogen, sedangkan pemilihan woven roving karena membentuk ketebalan laminat yang lebih cepat dan kekuatan serta kekakuan lebih bagus daripada mat [11].

Tabel 5. Layer GFRP

Nama Lapisan	Berat (g/m ²)	Tebal (mm)
Choped Strand Mat	450	0,9
Choped Strand Mat	450	0,9
Woven Roving	600	0,734
Woven Roving	600	0,734
Choped Strand Mat	450	0,9
Choped Strand Mat	450	0,9
Total	3000	5,068

Tabel 6. Berat Kapal

No.	Item	Berat (kg)
1	Kulit sisi	181,48
2	Kulit geladak	68,25
3	Gading	128,52
4	Balok geladak	285,16
5	Kursi	20,00
6	Bucket Elevator	1690,09
7	Kemudi	100,00
8	Bak lumpur	687,66
9	Lumpur	2668,80
10	Operator	150,00
11	Ballast	992,04
	Total	6.972,00

Berat konstruksi dan komponen kapal keruk adalah seperti pada Tabel 6. Kapasitas muatan pada kapal tersebut sekitar 2,7 ton atau sekitar 38% dari displacement kapal.

4. KESIMPULAN

Bucket dredger bisa diaplikasikan untuk perairan dangkal. Desain kapal keruk katamaran menggunakan *bucket elevator* dapat dioperasikan tidak hanya untuk kedalaman 8 m sampai 30 m, tetapi dapat dirancang khusus untuk pengerukan sungai dengan kedalaman 0,7 m. Kapal keruk katamaran dengan panjang 6 m dan *displacement* 6,972 ton memiliki kapasitas muatan sebesar 38% dari displacement kapal. Berat kapal kosong hanya 4,3 ton dan sistem konstruksi yang *knock down* sangat memungkinkan bagi kapal untuk beroperasi di lingkungan sungai perkotaan. Selain itu, kapal keruk katamaran lebih mudah untuk dimobilisasi bila dibandingkan dengan penggunaan *excavator* dan ponton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DIKTI atas dukungan dana penelitian, mulai dari program Hibah Bersaing, Hi-Link dan CPPBT

sampai dengan dikeluarkannya Paten Kapal Keruk Katamaran Menggunakan *Bucket Elevator* Bersirip oleh Kemenkumham.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <https://news.detik.com/berita-jawa-timur/d-3663897/lumpur-hasil-pengerukan-sungai-dan-saluran-digunakan-nguruk-fasum/komentar>. [Diakses 19 Agustus 2019]
- [2] W.J.Vlasblom, Design Dredging Equipment, Chapter 6 Bucket (Ladder) Dredger, 2004.
- [3] Herijono, B dan Prayitno M.M.E., "Perencanaan Dredger Ship untuk Normalisasi Hilir Sungai Kalimas," *Seminar Master*, PPNS, 2017.
- [4] Renold, Conveyor Chain, Chapter 4 Conveyor Chain Designer Guide, 2014.
- [5] US Army Corps of Engineers, Engineering and Design; Dredging and Dredged Material Management, EM 1110-2-5025, Department of the Army, 2015.
- [6] Asmara, I.P.S. dan Utama, I.K.A.P., 2017. Kapal Keruk Katamaran yang Dilengkapi dengan Bucket Elevator Bersirip. Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia Republik Indonesia. Paten. Nomor IDP000045824.
- [7] Maxsurf, Maxsurf Pro 7.16 User Manual, Formating Design Pty Ltd, 2002.
- [8] V. Dubrovsky and A. Lyakhovitsky, Multi-Hull Ships, Backbone Publishing Company, USA, 2001.
- [9] M. Haase, G. Thomas, G. Davidson, and J. R. Binns, "Apractical Design Approach including Resistace Prediction for medium Speed Catamarans", Ship Technology Research, 2013 [Online]. DOI:10.1179/str.2013.60.1.001 [Diakses 19 Agustus 2019]
- [10] Lloyd Register of Shiping, (1983), Rules and Regulation for Classification of Yatches and Small Craft, London.
- [11] Scott, Robert M., (1996), Fiberglass Boat Design and Construction, 2nd edition, SNAME, New Jersey.O. M. Faltinsen, Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicle, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.