

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Karakteristik Fisik dan Hidrostatik Ponton pada Kondisi Banjir

4.1.1 Desain Arsitektural Prototip Rumah Amfibi

Perancangan prototipe rumah amfibi ini lahir sebagai sebuah tanggapan langsung dan terukur terhadap perubahan pola bencana hidrometeorologi yang melanda kawasan pinggir sungai di Kota Samarinda. Kawasan daratan rendah dan area bantaran sungai di wilayah ini semakin sering mengalami fenomena banjir lambat surut (*slow on-set flooding*). Banjir jenis ini memiliki pola pergerakan air yang naik secara perlahan namun merendam kawasan permukiman warga selama sehari-hari, berminggu-minggu, bahkan dalam beberapa kejadian dapat bertahan hingga berbulan-bulan tanpa ada tanda-tanda penurunan debit air yang berarti. Kondisi lingkungan yang terus tergenang ini secara pasti melumpuhkan segala bentuk kegiatan ekonomi keluarga, merusak harta benda secara perlahan, memicu pelapukan pada bahan bangunan, dan menciptakan lingkungan tempat tinggal yang sangat tidak sehat bagi masyarakat. Menghadapi kenyataan alam yang semakin menantang ini, cara-cara lama yang biasa digunakan oleh penduduk setempat dalam membangun hunian terbukti sudah tidak lagi mampu memberikan perlindungan yang diharapkan.

Masyarakat Kota Samarinda pada awalnya sangat bergantung pada pembangunan rumah panggung kayu sebagai bentuk penyesuaian diri terhadap luapan air sungai musiman. Konsep rumah panggung memang sangat baik pada masanya karena memiliki ruang kosong di bagian bawah lantai yang membiarkan air lewat dengan bebas tanpa menyentuh ruang tempat tinggal. Namun, permasalahan besar kini muncul karena ketinggian air banjir di masa kini terus mengalami peningkatan yang tidak menentu setiap tahunnya. Kenaikan air ini sering kali melewati batas ketinggian tiang rumah panggung statis yang ada. Akibatnya, air banjir yang lambat surut ini tetap masuk ke dalam rumah, menenggelamkan perabotan, dan merusak struktur bagian dalam. Pemilik rumah kemudian terpaksa harus mengeluarkan biaya yang sangat besar untuk

membongkar lantai dan meninggikan struktur rumah mereka kembali. Pekerjaan meninggikan tiang rumah panggung secara berulang ini sangat membebani keuangan keluarga dan merusak tata bentuk asli dari bangunan tersebut, seperti jarak atap yang menjadi terlalu pendek atau tangga masuk yang menjadi terlalu curam.

Di sisi lain, upaya pemerintah yang sering mencoba menahan air dengan membangun tanggul penahan dari semen yang kaku juga tidak membuahkan hasil yang diharapkan. Pendekatan membuat dinding beton ini pada akhirnya tidak banyak membantu memecahkan masalah. Tanggul semen yang kaku hanya memindahkan masalah genangan air dari satu wilayah ke wilayah tetangga yang letaknya tidak memiliki pelindung atau berada di dataran yang lebih rendah. Selain itu, bangunan penahan air berupa tanggul semen selalu memiliki risiko tinggi untuk jebol dan hancur seketika saat harus menahan tekanan arus sungai pada cuaca ekstrem. Kegagalan struktur kaku semacam ini justru akan menimbulkan bencana luapan air yang jauh lebih mematikan karena air yang tertahan akan tumpah secara tiba-tiba ke area permukiman.

Melihat seluruh kegagalan dari cara lama tersebut, prototipe rumah amfibi dirancang sebagai jalan keluar yang paling masuk akal, aman, dan dapat diandalkan untuk melawan banjir slow on-set. Rumah amfibi dirancang dengan pemikiran dasar bahwa manusia tidak perlu melawan genangan air yang lama surut tersebut dengan dinding kaku, melainkan harus hidup selaras dengan pergerakan airnya. Bangunan ini dirancang untuk duduk diam dengan tenang di atas permukaan tanah layaknya rumah tapak biasa pada saat musim kering. Namun, ketika luapan air sungai mulai membanjiri daratan permukiman secara perlahan, rumah ini memiliki kemampuan mekanis untuk mengapung dan bergerak naik mengikuti ketinggian permukaan air. Hal ini dimungkinkan karena bagian bawah rumah dilengkapi dengan struktur pelampung yang bekerja berdasarkan prinsip gaya dorong air. Rumah ini akan selalu berada di atas permukaan air selama berbulan-bulan genangan terjadi, tidak peduli seberapa tinggi banjir yang melanda kawasan tersebut, sehingga seluruh ruang kegiatan keluarga dan harta benda berharga di dalamnya tetap kering dan terjaga. Penerapan rumah amfibi ini memberikan sebuah kepastian perlindungan bagi warga, menghilangkan keharusan untuk selalu

mengungsi ke tempat penampungan setiap kali banjir besar datang, dan menjaga agar kehidupan ekonomi masyarakat pinggir sungai dapat terus berjalan dengan baik meskipun lingkungan sekitarnya sedang tenggelam.

4.1.2 Konsep Bangunan Tanpa Tapak (*Siteless Architecture*)

Dasar pemikiran utama dari arsitektur rumah amfibi ini diambil dari sebuah gagasan perancangan yang dikenal dengan nama "Siteless Architecture" atau bangunan tanpa tapak. Pada tata cara pembangunan rumah biasa, kekuatan dan kestabilan struktur sangat bergantung pada pondasi yang ditanam dalam-dalam ke bawah tanah, dicor dengan semen beton, dan diikat secara kaku dengan bumi. Gagasan bangunan tanpa tapak menolak cara lama tersebut secara penuh. Konsep ini berusaha membebaskan sebuah bangunan dari ikatan permanen dengan tanah tempat ia berdiri. Rumah dirancang layaknya sebuah perahu yang bersandar di tepi sungai atau seperti sebuah barang hasil produksi pabrik yang diletakkan begitu saja di atas permukaan bumi. Karena bangunan ini dirancang terlepas dari ikatan kaku di dalam tanah, ia memiliki kebebasan ruang gerak untuk merespons perubahan alam yang terjadi di sekitarnya. Ketika banjir *slow on-set* datang, bangunan ini akan dengan mudah terangkat oleh daya apung air dan kemudian turun kembali mendarat ke tempat semula ketika genangan air tersebut sudah benar-benar berakhir.

Gagasan mengenai bangunan yang tidak terikat pada tanah ini sebenarnya telah banyak dikembangkan dan diuji coba oleh para perancang bangunan ternama di masa lalu untuk menjawab berbagai tantangan lingkungan yang berbeda. Salah satu contoh yang paling menonjol dan menjadi acuan adalah rancangan Futuro House yang dibuat pada tahun 1968 oleh perancang Matti Suuronen. Bangunan yang memiliki bentuk bulat pipih menyerupai piring terbang ini dirancang menggunakan bahan campuran plastik fiberglass yang sangat ringan namun memiliki kekuatan yang tinggi. Karena bobot keseluruhannya hanya sekitar empat ton, Futuro House sama sekali tidak membutuhkan pondasi semen yang berat dan merusak tanah. Bangunan ini hanya ditopang oleh kaki-kaki penyangga dari cincin besi yang letak dan panjang pendeknya bisa diatur dengan sangat mudah. Sistem penyangga mandiri ini membuat bangunan bisa diletakkan di atas tanah berbatu,

tanah yang miring, atau permukaan yang tidak rata tanpa perlu meratakan, menggali, atau merusak bentuk asli tanah tersebut.

Contoh acuan lainnya yang sangat penting adalah Dymaxion House yang dirancang pada tahun 1927 oleh Buckminster Fuller. Bangunan ini menggunakan cara penyaluran beban gantung yang terinspirasi dari ketegangan tarikan jari-jari roda sepeda. Seluruh beban atap dan ruangnya ditahan oleh kabel baja kuat yang ditarik dari satu tiang besi besar yang berdiri tegak di tengah ruangan. Cara ini membuat bangunan hampir tidak meninggalkan jejak galian di tanah karena titik tumpunya hanya ada satu di bagian tengah. Dymaxion House juga menggunakan susunan bahan aluminium pesawat terbang yang sangat ringan, sehingga berat keseluruhannya hanya sekitar tiga ton. Berat yang sangat kecil dibandingkan rumah biasa ini membuktikan bahwa sebuah tempat tinggal yang layak dan lengkap dapat diciptakan tanpa membebani permukaan bumi secara berlebihan.

Pemikiran tentang kemandirian bangunan juga terlihat sangat jelas pada rancangan Maison Tropicale di tahun 1949 karya Jean Prouvé, yang dirancang sedemikian rupa agar bisa dibongkar pasang dan dikirim ke daerah gurun Afrika yang jauh tanpa memerlukan tenaga kerja untuk melakukan pengecoran semen di lokasi. Bangunan ini mengandalkan kaki penyangga pelat baja yang berdiri langsung di atas tanah tanpa perlu membuat lubang galian. Seluruh bagian rumah disatukan menggunakan sistem baut yang mudah dilepas, menjadikannya bangunan yang sangat menghormati kondisi tanah di sekitarnya. Selain itu, ada pula rancangan Walking House di tahun 2008 oleh kelompok N55 yang benar-benar membawa konsep tanpa tapak ke tingkat yang paling nyata. Rumah berjalan ini tidak menempel mati pada tanah sama sekali, melainkan didukung oleh enam kaki mesin bertenaga baterai yang memungkinkannya melangkah dan berpindah tempat dengan lambat tanpa merusak rumput atau lapisan tanah. Rumah ini juga dirancang untuk sepenuhnya mandiri dari sistem jaringan kota, mengandalkan panel surya untuk aliran listrik dan sistem penyaringan air hujan untuk kebutuhan air bersih.

Berbagai contoh keberhasilan bangunan masa lalu ini memberikan bukti teknis yang kuat bahwa kita bisa mendirikan sebuah ruang tinggal yang sangat nyaman, kokoh, dan berfungsi penuh tanpa harus menghancurkan atau mengikatkan

diri pada lapisan tanah di bawahnya. Prototipe rumah amfibi di Samarinda menerapkan inti sari dari seluruh gagasan bangunan tanpa tapak ini ke dalam bentuk nyata. Karena bangunan ini dituntut untuk bisa naik dan turun seperti perahu setiap kali musim banjir berdurasi lama tiba, ia tidak boleh ditahan oleh pondasi tiang pancang beton yang ditanam secara kaku ke dalam lapisan lumpur atau tanah keras. Bangunan ini dirancang untuk hanya bersentuhan dengan tanah pada saat air sungai dalam keadaan normal atau kering. Bagian bawah dari rumah ini dirancang datar dan lebar untuk menyebarkan seluruh beban berat bangunan secara merata ke permukaan tanah, sehingga rumah tidak akan ambles atau tenggelam ke dalam lumpur saat mendarat. Pilihan untuk tidak mengikat kaku rumah ini pada tanah memberikan keuntungan yang sangat besar bagi kelestarian lingkungan sekitarnya. Pembangunan rumah amfibi ini tidak perlu merusak lahan resapan air alami yang ada di pinggir sungai, tidak perlu melakukan penggalian tanah dalam skala besar yang dapat memicu longsor, dan tidak perlu membawa alat berat pemukul tiang pancang yang dapat merusak ketenangan tempat tinggal warga. Rumah amfibi ini hadir sebagai struktur yang berdiri sendiri, menyesuaikan diri secara sangat halus dengan sifat alami fluktuasi lingkungan, dan siap merespons daya angkat air tanpa sedikitpun mengalami kerusakan bentuk fisik maupun kerusakan fungsi ruang.

Tabel 4.1.1 Identifikasi Pengguna dan Kebutuhan Ruang

Nama Bangunan	Tahun Pembuatan	Penerapan Konsep Tanpa Tapak	Bahan Pendukung Utama
Futuro House	1968	Menggunakan kaki penyangga yang panjangnya bisa diatur sesuai kemiringan tanah.	Plastik fiberglass ringan dan busa.
Dymaxion House	1927	Seluruh beban rumah digantung pada satu tiang penyangga di bagian tengah.	Aluminium sisa pembuatan pesawat.

Nama Bangunan	Tahun Pembuatan	Penerapan Konsep Tanpa Tapak	Bahan Pendukung Utama
Maison Tropicale	1949	Menggunakan kaki penyangga baja bongkar pasang tanpa perlu semen.	Rangka besi ringan dan aluminium.
Walking House	2008	Tidak menempel di tanah karena ditopang oleh enam kaki mesin yang bisa melangkah.	Pipa besi dan kaca pelindung.

4.1.3 Kebutuhan Ruang dan Ukuran

Merancang sebuah rumah amfibi yang harus bisa mengapung dengan aman membawa sebuah tantangan teknis yang sangat besar, terutama dalam hal penentuan ukuran luas dan pengelolaan berat beban bangunan. Semakin besar ukuran sebuah rumah, maka akan semakin banyak bahan bangunan yang digunakan, dan pada akhirnya akan semakin berat pula beban mati serta beban hidup yang harus ditanggung oleh struktur apung di bawahnya. Oleh karena itu, melalui berbagai pertimbangan tentang keamanan gaya apung dan batasan kemampuan daya beli masyarakat yang menjadi sasaran bangunan ini, luasan prototipe rumah amfibi ini dibatasi dengan sangat ketat pada angka luasan total 45,0 meter persegi. Ukuran rumah Tipe 45 ini dipilih karena merupakan ukuran ruang yang paling masuk akal untuk memenuhi syarat kesehatan pernapasan dan kelayakan ruang gerak bagi sebuah keluarga dengan ukuran menengah ke bawah, yang biasanya terdiri dari rata-rata lima orang penghuni, yaitu seorang bapak, seorang ibu, dan dua hingga tiga orang anak.

Dengan batasan luas yang sangat ketat tersebut, setiap jengkal bagian lantai di dalam rancangan bangunan ini harus diperhitungkan dengan sangat teliti kegunaannya. Tidak boleh ada sedikitpun ruang atau sudut kosong yang tidak

memiliki fungsi yang jelas dan bermanfaat, seperti lorong gang buntu, ruang pajangan kosong, atau area transisi jalan yang berlebihan. Setiap tambahan luas pada denah lantai berarti memberikan tambahan berat bangunan, yang selanjutnya akan memaksa ukuran pelampung di bagian bawah untuk menjadi lebih besar dan lebih mahal agar mampu menahan beban tambahan tersebut agar tidak tenggelam. Kebutuhan ruang di dalam rumah Tipe 45 ini dibagi dan dipetakan secara terukur berdasarkan kegiatan kehidupan utama manusia di dalamnya, mulai dari kegiatan beristirahat yang membutuhkan ketenangan, kegiatan memasak, kegiatan berkumpul bersama keluarga, hingga kegiatan untuk membersihkan diri di kamar mandi.

Untuk memastikan bahwa pembagian ruang sesuai dengan aktivitas penghuni, disusunlah identifikasi kebutuhan berdasarkan kegiatan masing-masing anggota keluarga di dalam rumah:

Tabel 4.1 Identifikasi Pengguna dan Kebutuhan Ruang

Pengguna	Kategori Aktivitas	Aktivitas	Persyarat an Aktivitas	Identitas Ruang	Persyarat an Ruang
Bapak dan Ibu	Istirahat Pribadi	Tidur, beristirahat, menyimpan pakaian dan barang berharga.	Mebutuhkan ketenangan dan tingkat privasi yang tinggi.	Kamar Tidur Bapak-Ibu	Ukuran luas (14,0 m ²) untuk menampung ranjang besar dan lemari, dengan sirkulasi udara baik.
Anak-anak (2-3 orang)	Istirahat dan Belajar	Tidur, belajar, bermain	Mebutuhkan ketenangan	Kamar Tidur Anak	Ukuran cukup (7,5 m ²) untuk

Pengguna	Kategori Aktivitas	Aktivitas	Persyaratan Aktivitas	Identitas Ruang	Persyaratan Ruang
		pasif di dalam ruangan.	dan area fungsional untuk meja belajar.		penempatan ranjang tingkat dan area belajar anak.
Seluruh Anggota Keluarga	Sosial dan Berkumpul	Menonton televisi, mengobrol, bersantai bersama.	Membutuhkan ruang yang lega, nyaman, dan pergerakan yang fleksibel.	Ruang Keluarga Utama	Berada di pusat bangunan (10,5 m ²), menyatu tanpa sekat dinding yang kaku.
Seluruh Anggota Keluarga	Pelayanan (Makan)	Menyantap hidangan makan bersama.	Mudah diakses, berdekatan dengan dapur dan ruang keluarga.	Ruang Makan	Area terbuka (4,5 m ²) yang terhubung langsung dengan pusat pergerakan rumah.
Bapak, Ibu, atau Anak	Pelayanan (Memasak)	Memasak makanan, membersihkan alat	Membutuhkan sirkulasi udara	Area Dapur Memasak	Memiliki area penyimpanan (4,5 m ²)

Pengguna	Kategori Aktivitas	Aktivitas	Persyaratan Aktivitas	Identitas Ruang	Persyaratan Ruang
		makan, menyimpan persediaan logistik darurat.	keluar yang baik dan akses air bersih.		dan material yang tahan terhadap kelembapan/api.
Seluruh Anggota Keluarga	Pelayanan (Sanitasi)	Membersihkan diri, mandi, buang air.	Membutuhkan privasi penuh dan perlindungan dari air.	Kamar Mandi Toilet	Lantai dan / dinding kedap air (3,0 m ²) dengan saluran yang aman saat rumah mengapung.
Seluruh Keluarga dan Tamu	Peralihan dan Akses	Keluar masuk rumah, bersantai di depan, menambatkan perahu (sampan).	Membutuhkan area yang aman dari cipratan air luar namun terbuka.	Teras Depan	Area basah semi-terbuka (6,0 m ²) yang kuat menahan beban pergerakan dari arah luar.

Berdasarkan urutan kebutuhan tersebut, ruang utama yang diperuntukkan bagi kegiatan tidur dibagi menjadi dua bagian kamar yang terpisah. Kamar Tidur Bapak-Ibu dirancang dengan luas lantai yang paling besar dibandingkan ruang lainnya, yaitu mencapai 14,0 meter persegi. Pemberian luas yang sangat dominan ini sangat dibutuhkan agar sepasang orang tua memiliki ruang gerak yang cukup lega untuk meletakkan tempat tidur berukuran besar, menempatkan lemari pakaian utama bagi seluruh anggota keluarga, menyisakan tempat penyimpanan barang berharga, serta tetap memberikan ruang sirkulasi jalan yang cukup agar ruangan tidak terasa sesak dan pengap saat pintu ditutup. Ruang tidur yang kedua adalah Kamar Tidur Anak yang dirancang dengan luasan sebesar 9,0 meter persegi. Ukuran ini dirasa sudah sangat cukup dan memenuhi standar untuk menempatkan sebuah ranjang tingkat atau dua buah ranjang ukuran kecil, berdampingan dengan sebuah meja belajar dan tempat penyimpanan barang keperluan sekolah anak-anak. Kedua kamar tidur ini memang menempati porsi luas yang paling besar pada denah lantai karena tidur dan beristirahat merupakan kegiatan yang bersifat pasif dengan durasi waktu terpanjang dalam satu hari, sehingga menuntut tingkat kenyamanan yang sangat tinggi bagi pemulihan tenaga penghuninya selama terkepung banjir slow on-set.

Selain menata area istirahat, rumah amfibi ini juga harus dilengkapi dengan ruang kegiatan bersama yang terbuka dan menyatu. Area Dapur dirancang secara khusus dengan luas 6,0 meter persegi. Ukuran ini dihitung untuk memberikan keleluasaan gerak yang cukup bagi anggota keluarga saat melakukan kegiatan memasak makanan, membersihkan peralatan makan, dan yang paling penting adalah sebagai area penyimpan persediaan bahan makanan kering dan air bersih sebagai bentuk persiapan bertahan hidup saat rumah sedang terisolasi oleh genangan banjir selama sehari-hari. Tepat bersebelahan dengan dapur, diletakkan sebuah Ruang Makan dengan luasan 4,5 meter persegi. Ruang makan ini tidak dibatasi oleh sekat dinding yang kaku atau tertutup, melainkan dirancang menyatu secara bebas dengan area ruang keluarga agar rumah yang berukuran terbatas ini tetap terasa memiliki pandangan yang luas dan lega bagi mata penghuninya.

Sisa dari luasan total bangunan kemudian dibagikan secara sangat hati-hati untuk menempatkan beberapa fungsi pendukung lainnya. Teras Depan mengambil

luasan sebesar 6,0 meter persegi. Teras ini tidak hanya berfungsi sebagai area peralihan dari luar ke dalam rumah atau tempat bersantai, tetapi memiliki peran khusus sebagai tempat berlabuh atau merapatnya perahu kecil yang digunakan oleh penghuni untuk bepergian saat sekeliling rumah telah berubah menjadi genangan air banjir. Ruang Keluarga sebagai pusat titik kumpul utama kegiatan menonton televisi atau mengobrol mendapat luasan 6,5 meter persegi, dan bagian terakhir adalah sebuah Kamar Mandi atau Toilet seluas 3,0 meter persegi untuk melayani keperluan sanitasi dan kebersihan diri seluruh keluarga. Keseluruhan ukuran setiap ruang ini kemudian diatur posisinya di atas susunan pelampung dengan membagi penempatan ruangan ke bagian tengah, bagian sisi kiri, dan bagian sisi kanan bangunan. Pembagian tata letak ini dilakukan untuk menjamin keseimbangan pusat beban saat rumah mulai terangkat dari tanah dan berada sepenuhnya di atas air.

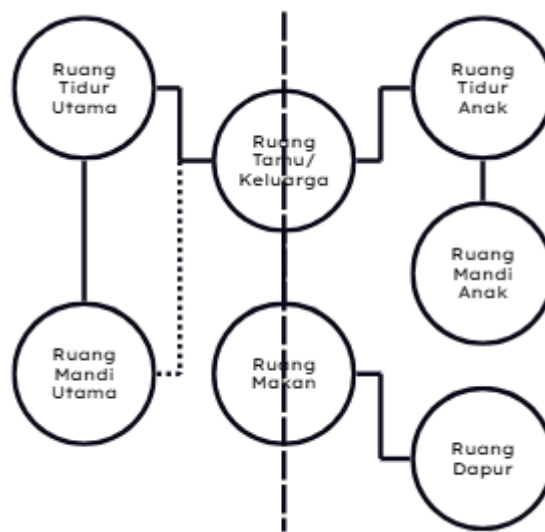
Tabel 4.2 Perhitungan Kebutuhan Ruang dan Sirkulasi

Nama Ruangan	Dimensi Panjang (m)	Dimensi Lebar (m)	Luas Bersih Ruang (m²)	Alokasi Sirkulasi & Dinding (m²)	Total Luas Kebutuhan (m²)
Kamar Tidur Bapak-Ibu	3,35	2,37	7,94	1,92	9,86
Ruang Keluarga Utama	3,00	2,58	7,74	1,87	9,61
Kamar Tidur Anak	2,35	2,73	6,42	1,55	7,97
Kamar Mandi / Toilet	2,46	2,37	5,83	1,41	7,24
Area Dapur Memasak	1,96	2,33	4,57	1,12	5,69

Nama Ruangan	Dimensi Panjang (m)	Dimensi Lebar (m)	Luas Bersih Ruang (m²)	Alokasi Sirkulasi & Dinding (m²)	Total Luas Kebutuhan (m²)
Ruang Makan	1,25	2,98	3,73	0,90	4,63
Jumlah Keseluruhan			36,23	8,77	45,00

c. **Pembagian Posisi Ruang**

Penataan letak posisi ruangan di dalam rancangan rumah amfibi tidak hanya didasarkan pada sekadar pertimbangan keindahan bentuk bangunan atau kenyamanan sirkulasi penghuni semata, melainkan sangat ditentukan oleh hukum fisika dan pembagian beban statis di atas benda apung. Gambar diagram ruang secara gamblang memetakan arah pergerakan manusia dari luar ke dalam rumah, sekaligus memberikan penjelasan mendalam tentang letak jatuhnya beban barang dan manusia di atas kotak pelampung. Alur pergerakan manusia diatur sedemikian rupa agar bergerak secara lurus dan mengalir perlahan dari bagian paling depan bangunan hingga berujung ke bagian paling belakang. Ketika seseorang baru saja turun dari perahu dan hendak memasuki rumah, ia akan memulai langkah pertamanya dari area Teras Depan yang terletak di hamparan dek ponton luar.



Gambar 4.1 Bubble Diagram Rumah Amfibi

Dari area luar, langkah sirkulasi berlanjut menuju pintu yang langsung terbuka dan mengarah menuju ke dalam area Ruang Keluarga dan Ruang Makan yang menyatu. Ruang Keluarga ini secara sengaja dan diperhitungkan dengan teliti diletakkan di titik paling tengah dari seluruh bidang luas bangunan, menjadikannya titik pusat bangunan. Posisi tengah ini dipilih dengan alasan struktural yang kuat. Ruang berkumpul keluarga merupakan tempat di mana banyak orang sering berada dalam satu waktu yang bersamaan secara dinamis. Jika ruang keluarga diletakkan di sudut rumah, maka ketika seluruh anggota keluarga berkumpul, beban berat manusia akan menekan satu sudut pelampung dan membuat rumah miring. Dengan meletakkan area perkumpulan di tengah, beban berat aktivitas tersebut akan menekan secara tegak lurus dan jatuh tepat pada bagian pusat titik apung bangunan, sehingga rumah tetap berada dalam keadaan tegak dan seimbang di atas air.

Setelah melewati titik tengah, sirkulasi ruang kemudian memecah dan menyebar ke sisi sayap kiri bangunan dan ke sisi sayap kanan bangunan. Pembagian dua sisi ruang ini dilakukan semata-mata sebagai strategi mekanis untuk mengelola letak dan penyebaran berat ruangan secara seimbang. Di bagian sisi kiri bangunan, diletakkan ruangan Kamar Tidur Orang Tua pada bagian sudut yang diistilahkan sebagai "Beban Kiri Atas". Kamar ini memuat beban perabotan kayu yang berat seperti lemari pakaian besar dan kasur utama. Untuk menjaga beban tetap sejajar di

sisi yang sama, diletakkan pula ruangan Kamar Mandi dengan area bak rendam pada bagian sudut yang dinamakan "Beban Kiri Bawah", yang berfungsi sebagai pusat penampungan air dan dudukan keramik yang secara nyata menambah berat ke arah bawah.

Di bagian sisi kanan bangunan, sebagai penyeimbang beban statis dari sisi kiri, diletakkan ruangan Kamar Anak pada bagian sudut yang dinamakan "Beban Kanan Atas". Ruangan ini akan menampung beban rangka tempat tidur dan meja belajar kayu. Selanjutnya, untuk menyeimbangkan beban berat air dari kamar mandi di seberangnya, diletakkan Area Dapur pada bagian sudut "Beban Kanan Bawah". Dapur bertindak sebagai titik tumpu beban peralatan masak logam, tabung gas, pusat api, dan lemari penyimpanan beras atau bahan makanan darurat. Seluruh pengaturan skematik ruang ini memastikan bahwa berat di sisi kiri bangunan sama besar dengan berat di sisi kanan bangunan, sehingga menjaga pelampung bawah tidak miring sebelah.

Pembagian letak beban ruang yang sangat ketat dan dihitung dengan teliti ini merupakan nyawa utama yang menjaga agar rumah apung tetap seimbang dan aman saat musibah genangan berbulan-bulan ini datang. Apabila kita merancang dan membangun rumah biasa yang tertanam pada tanah yang padat dan keras, meletakkan semua perabotan berat seperti lemari besar atau bak mandi di satu sisi sudut rumah saja tidak akan memberikan masalah yang berarti pada kekuatan bangunan. Namun, aturan alam tersebut menjadi sangat berbeda pada sebuah bangunan yang harus bisa mengapung di atas fluida cair. Daya dorong air sungai dari arah bawah akan bereaksi secara langsung terhadap segala bentuk tumpukan beban yang ada di atas permukaannya. Jika bagian sisi kiri bangunan diisi dengan ruangan yang memiliki perabotan berat dan padat, sementara bagian sisi kanan bangunan dibiarkan kosong tanpa perabotan atau hanya berisi ruangan yang sangat ringan, maka bangunan tersebut pasti akan mengalami kemiringan yang sangat kentara dan berbahaya saat gaya apung air mulai mengangkat struktur pelampungnya dari atas tanah.

Kemiringan pada struktur rumah apung memiliki akibat yang fatal. Selain membuat perasaan tinggal dan berjalan di dalam rumah menjadi pusing dan tidak

nyaman karena lantai yang miring, ketidakseimbangan ini berpotensi membuat rumah menjadi tidak stabil saat tertiup angin kencang dari arah samping atau saat terdorong arus air. Lebih dari itu, jika rumah mengapung dalam keadaan miring, maka titik tumpu pada tiang pandu yang menahan posisi rumah juga akan menerima beban jepitan yang tidak merata. Jepitan yang miring ini akan menyebabkan sistem sambungan menjadi macet, dan rumah akan gagal bergerak naik mengikuti genangan slow on-set. Oleh sebab itu, memastikan bahwa total tumpukan berat perabotan di sisi Beban Kiri Atas dan Beban Kiri Bawah bernilai sama besar dengan beban di sisi Beban Kanan Atas dan Beban Kanan Bawah adalah sebuah keharusan mutlak. Pembagian beban yang sama rata seperti timbangan ini akan menjatuhkan letak titik berat bangunan persis pada garis lurus tegak yang sejajar dengan letak titik pusat gaya dorong air dari pelampung. Dengan demikian, rumah amfibi akan selalu mengapung dalam keadaan yang sempurna, lantai sejajar rata, tegak lurus menantang gravitasi, dan sangat stabil meskipun harus menghadapi gelombang atau guncangan arus banjir.

Berikut adalah tabel rincian penempatan zona ruang untuk mengelola keseimbangan beban di atas struktur apung:

Tabel 4.3 Rincian Penempatan Zona Ruang dan Keseimbangan Beban

Nama Ruang	Luas Kebutuhan	Posisi Seimbang di Rumah	Keterangan Bentuk Ruang
Teras / Dek Luar	(Area Ponton)	Keliling Luar Bangunan	Berada di luar area 45 m ² , tempat perahu menepi.
Ruang Keluarga Utama	9,61 m ²	Garis Tengah Bangunan	Menahan beban dinamis agar jatuh tepat di pusat titik apung.
Ruang Makan	4,63 m ²	Garis Tengah Bangunan	Berada di pusat tanpa merusak keseimbangan berat sisi kiri dan kanan.

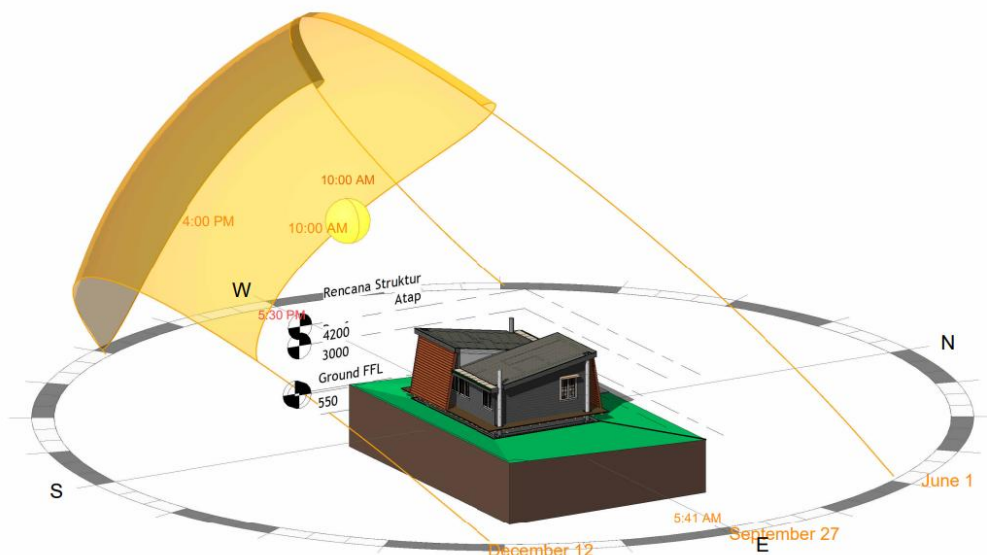
Nama Ruangan	Luas Kebutuhan	Posisi Seimbang di Rumah		Keterangan Bentuk Ruang
Kamar Tidur Bapak-Ibu	9,86 m ²	Sisi Bangunan	Kiri	Menampung beban perabotan berat (Beban Kiri Atas).
Kamar Mandi Toilet	7,24 m ² /	Sisi Bangunan	Kiri	Bertindak sebagai pusat air dan keramik (Beban Kiri Bawah).
Kamar Tidur Anak	7,97 m ²	Sisi Bangunan	Kanan	Menyeimbangkan beban dari kamar utama (Beban Kanan Atas).
Area Dapur Memasak	5,69 m ²	Sisi Bangunan	Kanan	Menyeimbangkan beban air dengan alat masak (Beban Kanan Bawah).
Total Area Tertutup	45,00 m²			

4.1.4 Gabungan Arsitektur dan Struktur Apung

Keberhasilan perancangan prototipe rumah amfibi ini sangat bergantung pada jalinan kerja sama yang erat dan tanpa celah antara elemen bentuk arsitektur di bagian atas dengan sistem mekanis struktur apung di bagian pondasi bawahnya. Seluruh bentuk bentang ruang dan pilihan bahan material bangunan di bagian struktur atas telah dirancang dan diseleksi secara khusus agar bisa menyatu, saling mendukung, dan bekerja dengan sangat lancar tanpa memberikan tekanan beban yang berlebihan pada bagian ponton atau pelampung di bawahnya. Untuk memastikan ponton memiliki daya angkat yang cukup dan tidak tenggelam terlalu dalam ke dalam air luapan banjir, maka bobot dari kerangka struktur bangunan atas harus dikurangi sebanyak dan seefisien mungkin. Penggunaan material bangunan konvensional yang terkenal sangat berat, seperti batu bata merah, pasir, plesteran,

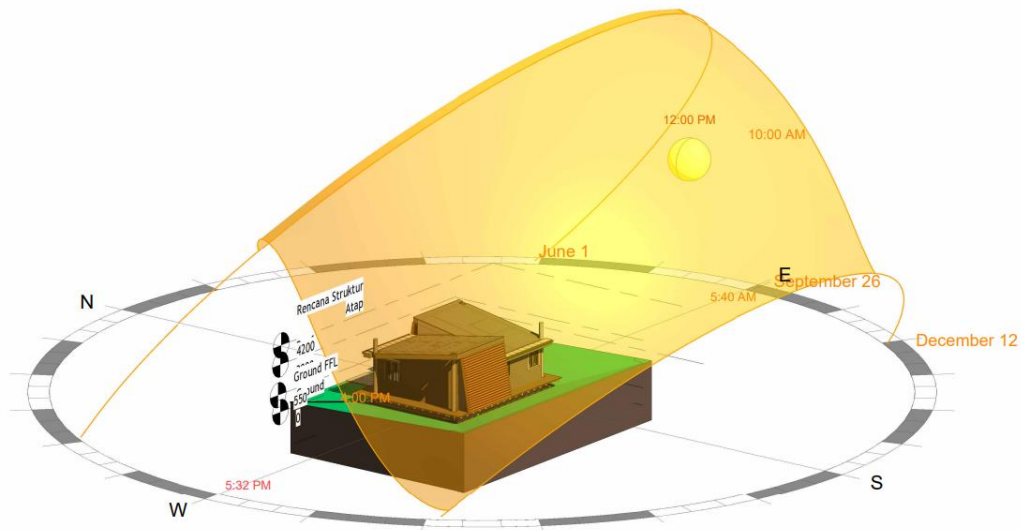
dan balok semen untuk mendirikan dinding ruangan, harus sepenuhnya ditinggalkan.

Sebagai ganti dari material berat tersebut, rangka utama pembentuk bangunan bagian atas dirakit dari susunan material besi baja ringan profil yang memiliki kekuatan tarik kuat namun memiliki bobot masa yang sangat rendah. Bagian dinding pemisah antar ruangnya tidak menggunakan tembok, melainkan ditutup menggunakan lembaran panel-panel insulasi cetakan pabrik ringan yang mudah dirakit menggunakan baut. Panel dinding jenis ini sangat tahan terhadap masalah kelembapan udara yang tinggi di atas air dan memiliki kemampuan yang baik dalam menahan perambatan panas dari terik matahari ke dalam ruang tidur. Selain berperan dalam mengurangi beban total gaya mati bangunan secara luar biasa, penggunaan material ringan untuk dinding dan atap ini memberikan keuntungan struktural lainnya, yaitu menempatkan pusat berat bangunan berada pada tingkat yang serendah mungkin mendekati lantai dasar. Pusat berat yang rendah ini merupakan kunci rahasia mengapa rumah tidak akan mudah bergoyang, oleng, atau terbalik ketika permukaan luar dindingnya diterjang oleh dorongan beban angin yang kencang atau tekanan arus banjir lambat (slow on-set) di kawasan Sungai Mahakam.



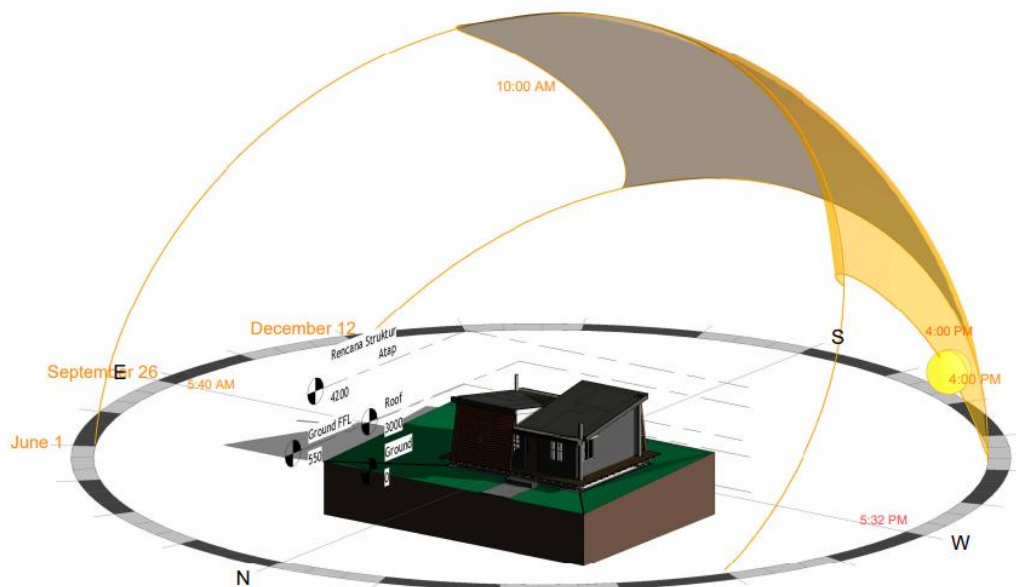
 Solar Study Summer Morning

Gambar 4.2 Analisis Matahari Pagi



- Solar Study Summer Noon

Gambar 4.3 Analisis Matahari Siang



- Solar Study Summer Afternoon

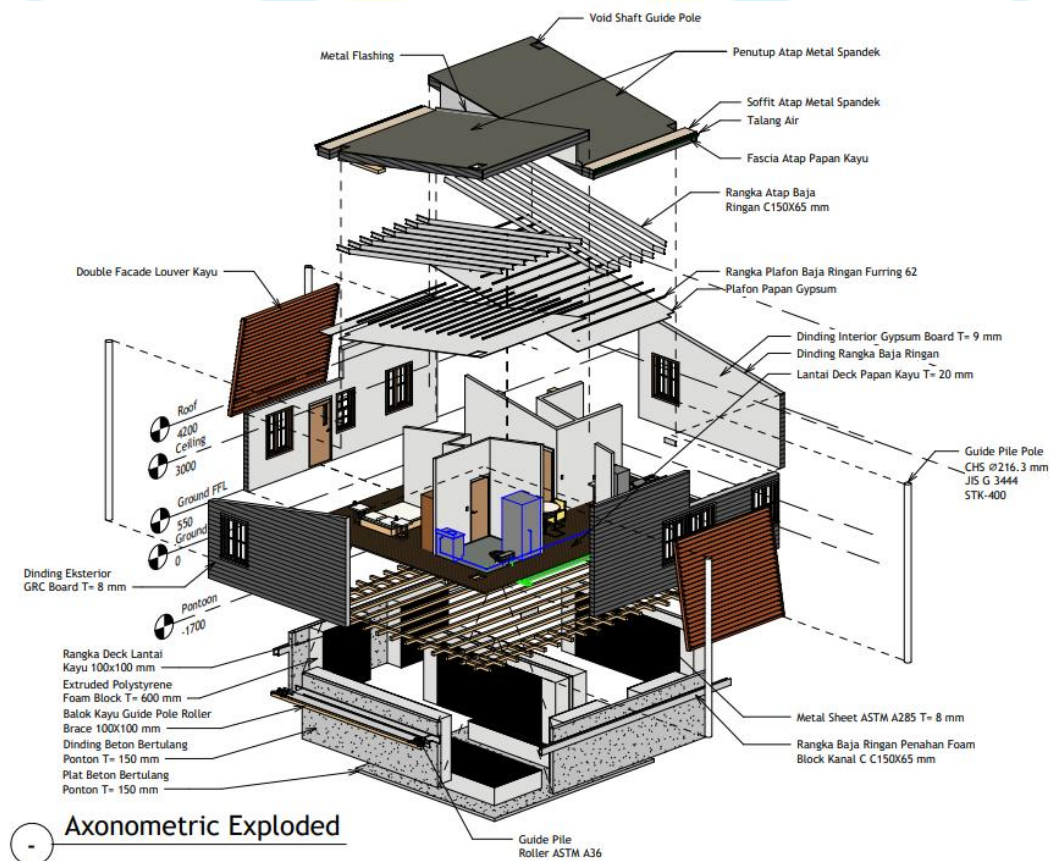
Gambar 4.4 Analisis Matahari Sore

Bagian kerangka struktur atas yang telah dibuat seringan mungkin ini kemudian ditumpangkan dan diikat dengan sangat kuat menggunakan pelat baja ke atas permukaan ponton. Ponton ini merupakan kotak lambung pengapung yang berfungsi layaknya pondasi pada rumah biasa. Ponton ini dirancang dari kerangka beton berongga tipis namun diisi penuh dengan balok-balok busa pelampung khusus di bagian dalamnya untuk memastikan bahwa lambung ini sama sekali tidak dapat tenggelam dan air banjir tidak akan pernah dapat menembus masuk mengisi rongganya. Pada saat musim kemarau dan tanah dalam keadaan kering, bagian dasar permukaan ponton ini akan duduk diam dengan rata dan kuat menapak di atas lapisan tanah yang sudah dipersiapkan tanpa merusaknya. Namun, sesaat setelah air hujan dan luapan sungai datang merendam daratan permukaan tanah, ponton inilah yang akan langsung bereaksi dan mengambil alih seluruh tugas menopang beban berat rumah. Volume kotak ponton yang tercelup ke dalam air akan menghasilkan tenaga gaya dorong ke atas yang sangat kuat, yang dengan perlahan namun pasti mengangkat rumah tersebut menjauhi jangkauan genangan. Kerja sama antara bangunan baja ringan di atas dan ponton terapung di bawah ini menjadikannya satu kesatuan badan struktur tangguh yang senantiasa bergerak bersamaan mengikuti irama ketinggian air.

Namun, agar rumah yang mengapung bebas ini tidak hanyut terbawa arus sungai atau berputar ke arah yang tidak beraturan saat ditabrak air, bangunan harus diikat pada susunan tiang pandu yang ditanam sangat kuat secara terpisah di keempat titik sisi luar sudut rumah. Tiang pandu baja ini bertugas sebagai jalur rel atau jalan setapak vertikal bagi pergerakan arah bangunan. Struktur bagian atas rumah dan ponton bagian bawah digabungkan ke batang tiang pandu ini menggunakan sistem sambungan cincin mekanis yang dilengkapi dengan roda pengarah atau roller berputar. Rancangan sistem sambungan beroda pada titik kuncian ini sangat menentukan hidup matinya fungsi rumah amfibi. Sambungan roda ini harus dirancang untuk memastikan tepi rumah dapat meluncur naik dan turun di sepanjang batang tiang pandu dengan sangat lancar, mulus, dan tanpa adanya hambatan sedikitpun.

Apabila cincin baja pengikat yang menghubungkan badan rumah dengan tiang pandu tersebut dibuat terlalu sempit, terlalu kaku, atau kehilangan pelumasan,

maka ketika satu sisi rumah tertiuip angin kencang atau terdorong arus air secara tidak beraturan, cincin pengikat tersebut akan menjadi miring, menjepit batang tiang, dan mengalami gesekan kasar yang berujung pada kemacetan. Peristiwa kemacetan pada tiang pandu ini adalah sebuah skenario kegagalan mekanis yang sangat berbahaya bagi penghuni. Apabila sambungan roda macet, badan rumah akan tertahan, terkunci pada tiang, dan tidak bisa ikut naik meskipun debit air sungai terus bertambah tinggi, yang pada akhirnya akan menyebabkan luapan air menelan dan menenggelamkan rumah tersebut. Oleh karena itu, perbandingan antara jarak longgar roda dan tinggi klem penahan pada sambungan tersebut diukur sedemikian rupa agar selalu menang melawan gaya gesek. Sistem roda peluncur akan terus berputar secara seimbang pada semua permukaan keliling tiang pandu, memastikan tidak ada gesekan atau momen jepit keras yang bisa mengakibatkan penguncian tiba-tiba.



Gambar 4.5 Tampak Axonometris Rumah Amfibi

Di luar dari kelancaran sistem gerak pada tiang pandu, kerja sama yang cerdas antara bentuk arsitektur dan kebutuhan struktur bangunan ini juga memikirkan aspek kelangsungan hidup fasilitas dasar, khususnya keselamatan dari jalur pipa air bersih dan kabel tenaga listrik. Pipa air saluran pembuangan, pipa pasokan air bersih, dan kabel tenaga listrik yang menyambung dari jaringan darat bawah tanah menuju ke dalam lantai bangunan dipasang menggunakan sistem sambungan khusus berlengan lentur yang dapat melengkung dan memanjang bebas. Pada saat bangunan harus terangkat oleh luapan air hingga mencapai ketinggian dua meter di atas permukaan tanah, kabel dan pipa lentur raksasa ini akan ikut meregang dan mengulur panjang perlahan ke arah atas mengikuti naiknya rumah tanpa terputus, robek, atau bocor. Sistem ini menjamin dan memastikan dengan pasti bahwa seluruh warga yang berlindung di dalam rumah Tipe 45 ini tetap mendapatkan kepastian pasokan aliran air bersih untuk minum, saluran pembuangan limbah yang lancar, serta aliran tenaga listrik untuk menyalakan penerangan di tengah gelapnya kondisi malam hari saat musibah banjir melanda. Melalui penggabungan pemikiran yang terukur antara pemakaian arsitektur bahan kerangka ringan, ponton pengangkat beban yang seimbang pada titik tengah, tiang pandu rel besi yang mencegah hanyut, serta sambungan beroda yang mencegah terjadinya kemacetan berbahaya, prototipe rancangan rumah amfibi ini pada akhirnya terbukti mampu memberikan jalan keluar pertahanan hidup yang paling aman, dapat diandalkan setiap saat, dan nyaman bagi keberlangsungan permukiman masyarakat kota.



Gambar 4.6 Hasil *Render* Rumah Amfibi

Berikut adalah tabel rincian gabungan komponen arsitektur dan struktur apung beserta fungsi mekanisnya:

Tabel 4.4 Rincian Material Komponen Struktur Dan Arsitektur

Bagian Bangunan		Pilihan Material		Peran dalam Sistem Rumah Amfibi
Struktur (Kerangka)	Atas	Besi ringan	baja profil	Mengurangi beban berat mati secara besar-besaran agar pelampung tidak tenggelam terlalu dalam.
Struktur (Dinding)	Atas	Panel ringan	insulasi	Memusatkan titik berat bangunan di area bawah agar rumah stabil saat diterpa angin kencang.
Struktur Apung (Ponton)		Beton berongga	berisi busa	Menghasilkan gaya dorong air ke atas yang kuat untuk mengangkat seluruh rumah saat air lambat surut datang.
Sistem Penahan		Tiang baja	pandu	Menjadi jalur rel bagi rumah untuk bergerak naik turun dan mencegah bangunan hanyut terbawa arus.
Sambungan Mekanis		Cincin dengan roda	baja	Memastikan rumah meluncur mulus pada tiang pandu tanpa macet meskipun ada dorongan air atau angin.
Jalur Dasar	Utilitas	Pipa lentur	berlengan	Memastikan pasokan air bersih dan saluran pembuangan tidak putus saat rumah bergerak naik.

4.1.5 Analisis Pembebanan Struktur Bangunan Amfibi (*Load Takedown Analysis*)

Akurasi perhitungan beban mati (*dead load*) dan beban arsitektural dalam desain amfibi menjadi variabel penentu utama bagi perhitungan volume

displasemen air, letak pusat gravitasi (*Center of Gravity*), tinggi metasentrum transversal, serta keselamatan operasional bangunan guna mencegah ketidakstabilan akibat beban dinamis arus maupun beban angin. Data *Bill of Quantity* (BoQ) telah melalui proses tabulasi dan verifikasi kalkulasi untuk memisahkan beban komponen struktural bawah (sistem ponton) dengan beban arsitektural bagian atas. Hal ini dilakukan untuk mengoptimalkan distribusi momen penegak (*righting moment*) pada bangunan.

a. Analisis Beban Arsitektural Bagian Atas

Beban arsitektural mencakup seluruh elemen di atas lambung ponton, yang secara langsung memengaruhi titik pusat gravitasi bangunan. Strategi konstruksi menggunakan material ringan (*lightweight structure*) diterapkan untuk menjaga stabilitas bangunan.

A. Sistem Atap Penggunaan atap metal (zincalume) memberikan efisiensi massa yang signifikan dibandingkan material konvensional.

- Rangka baja ringan kanal C C150X75 mm: 5,685 ton
- Papan pelapis (*plywood*): 0,672 ton
- Penutup atap spandek metal: 0,296 ton
- **Total Beban Atap:** 6,653 ton

B. Selubung Dinding Luar Struktur dinding menggunakan *wood stud* dengan pelapis kayu, yang menawarkan fleksibilitas terhadap dinamika struktur saat terjadi fluktuasi arus.

- Rangka baja ringan kanal C C75X33 mm: 4,090 ton
- Papan dinding GRC Board (*siding*): 1,236 ton
- Pelapis gypsum (Interior): 0,728 ton
- **Total Beban Dinding Luar:** 6,425 ton

C. Dinding Partisi Internal Menggunakan sistem partisi baja ringan dengan densitas rendah untuk efisiensi massa.

- Rangka baja ringan kanal C C75X33 mm: 2,860 ton
- Panel gipsum: 1,800 ton
- **Total Beban Partisi Internal: 3,250 ton**

D. Sistem Lantai Lantai menggunakan kayu keras yang tahan terhadap kelembapan tinggi.

- Rangka lantai kayu 100X100 mm: 1,230 ton
- Lantai papan kayu T= 20 mm: 0,882 ton
- **Total Beban Lantai: 2,112 ton**

E. Elemen Bukaannya

- Kusen, kaca, dan pintu: 0,915 ton

F. Furnitur dan Sanitasi

- Beban perabotan dan sistem sanitasi: 1,605 ton

G. Penghuni (Pax)

- Jumlah Penghuni maksimum 10 orang: 0,75 ton

Tabel 4.5 Rekapitulasi Beban Arsitektural

Elemen Arsitektural	Bahan Utama	Massa (Ton)
Rangka Atas dan Atap	Kayu, Metal	6,653
Dinding Luar	Kayu, Gypsum	6,425
Dinding Sekat Internal	Baja Ringan, Gypsum	3,250
Lantai	Kayu Keras	2,112
Pintu dan Jendela	Aluminium, Kaca, Kayu	0,915
Furnitur dan Sanitasi	Keramik, Kayu, Logam	1,605
TOTAL BEBAN ARSITEKTUR	-	20,960

4.1.6 Analisis Hidrostatik Sistem Ponton

Struktur ini dirancang dengan kemampuan mekanika ganda:

1. **Keadaan Rehat (*Resting State*):** Rumah berdiri stabil di atas tanah kering atau semi-basah layaknya fondasi konvensional saat kondisi air surut normal.
2. **Keadaan Apung (*Floating State*):** Saat banjir melanda, seluruh struktur terangkat secara hidrostatik dan mengapung secara bebas mengikuti fluktuasi muka air sungai dengan dipandu oleh tiang pengarah (*mooring/guide posts*).

Komponen kritis yang memfasilitasi transisi mekanika ini adalah fondasi apung berupa ponton beton bertulang dinding tipis (*thin-walled reinforced concrete pontoon*). Beton bertulang dipilih karena daya tahan yang unggul terhadap degradasi air tawar, ketahanan fatik, resistensi gaya gesek, serta memberikan bobot mati yang cukup sebagai ballast alami guna menurunkan posisi titik berat sistem demi stabilitas metasentrum.

a. Data Input Struktur Atas

Berdasarkan hasil analisis penurunan beban (*Load Takedown Analysis* Sub-bab 4.6), total beban arsitektural dan struktural dari bangunan satu lantai Tipe 45 di atas ponton diidentifikasi sebagai berat mati dan berat hidup struktural (W_{atas}) sebesar **20,960 Ton**.

Densitas beton bertulang ditetapkan berdasarkan standar material konstruksi basah dengan memperhitungkan persentase volume pembesian baja di dalamnya. Ketebalan nominal elemen ponton yang meliputi plat dasar, dinding luar keliling, serta sekat pengaku internal ditentukan secara seragam pada tahap awal guna memastikan kedap air yang andal dan menjamin ketebalan selimut beton yang memadai untuk melindungi baja tulangan dari korosi akibat air tawar agresif. Karakteristik fluida Sungai Mahakam diasumsikan sebagai air tawar murni pada

temperatur standar sehingga nilai massa jenis air sungai digunakan sebagai pembagi utama dalam analisis gaya tekan ke atas.

Tabel 4.6 Nilai Massa Jenis

No	Variabel Teknis	Notasi Fisika	Nilai Parameter	Satuan Metrik
1	Massa Jenis Beton Bertulang	ρ_{beton}	2,40	ton/m ³
2	Massa Jenis Air Sungai	ρ_{air}	1,00	ton/m ³

b. Penentuan Luas Alas Awal (*Footprint Sizing*)

Proses penentuan dimensi panjang dan lebar ponton dilakukan dengan mempertimbangkan luasan total bangunan rumah tinggal Tipe 45 yang membutuhkan ruang bebas fungsional. Area tapak ponton dirancang sedikit lebih luas daripada denah bersih interior bangunan untuk menyediakan selasar luar yang berfungsi sebagai jalur sirkulasi pemeliharaan serta pembagi beban lateral yang merata. Kombinasi dimensi panjang horizontal sebesar 7,00 meter dan lebar horizontal sebesar 6,00 meter dievaluasi untuk menghasilkan luas permukaan bidang air yang memadai bagi kestabilan awal struktur.

$$\text{Luas Alas (A)} = L \times B = 7,00 \text{ m} \times 6,00 \text{ m} = 42,00 \text{ m}^2$$

$$\text{Rasio Aspek Horizontal} = L / B = 7,00 \text{ m} / 6,00 \text{ m} = 1,167$$

Tabel 4.7 Nilai Massa Jenis

Parameter Geometri	Notasi	Dimensi Rencana	Batasan Target Desain	Sumber Rujukan
Panjang Horizontal	L	7,00 m	Berdasarkan denah	-

Lebar Horizontal	B	6,00 m	Berdasarkan denah	-
Luas Terbentuk	Alas A	42,00 m ²	40,00 m ² sampai 45,00 m ²	Standar Minimum Luas Tapak Rumah Sehat, SNI 03-1733-2004
Rasio Aspek	L/B	1,167	1,100 sampai 1,300	Principles of Naval Architecture, Bentuk Lambung Kompak

Bentuk geometri bidang air yang kompak sangat menentukan nilai momen inersia penampang terhadap sumbu transversal dan longitudinal. Nilai momen inersia yang tinggi pada kedua arah sumbu utama ini meminimalkan kecenderungan struktur untuk mengalami kemiringan ekstrem saat menerima distribusi beban hidup eksentris di dalam rumah. Melalui penggunaan formula inersia penampang persegi panjang, stabilitas awal dapat dinilai secara kuantitatif berdasarkan sumbu putar melintang dan membujur.

Tabel 4.8 Nilai Inersia Ponton Beton

Sumbu Sistem	Putar Momen Inersia Bidang Air	Formula	Nilai Inersia Terhitung	Implikasi Stabilitas Lambung
Sumbu Transversal (I_x)		$I_x = \frac{L \cdot B^3}{12}$	126,00 m ⁴	Menahan kecenderungan gerakan oleng melintang (<i>rolling</i>) (SNAME, 1988)
Sumbu Longitudinal (I_y)		$I_y = \frac{B \cdot L^3}{12}$	171,50 m ⁴	Menahan kecenderungan gerakan oleng membujur (<i>pitching</i>) (SNAME, 1988)

c. Perhitungan Preliminary Self-Weight Ponton

a. Plat Dasar (*Base Slab*)

Plat dasar ponton berfungsi sebagai penahan tekanan hidrostatik vertikal dari air sungai sekaligus menyalurkan beban dari dinding atas ke fluida di bawahnya. Berat dari plat dasar beton bertulang ini bersifat konstan karena luas permukaannya tidak bergantung pada variasi tinggi ponton yang akan diiterasikan. Perhitungan berat komponen dasar ini dilakukan secara ringkas dengan mengalikan luas alas dengan ketebalan plat serta densitas material beton bertulang.

$$\text{Berat Plat Dasar } (W_{\text{dasar}}) = L \times B \times t \times \rho_{\text{beton}} = 15,120 \text{ ton}$$

b. Dinding Keliling (*Outer Perimeter Walls*)

Dinding luar keliling ponton berfungsi sebagai pembatas kedap air samping yang menahan tekanan lateral aktif dari air sungai di sekeliling struktur. Berat dari komponen dinding ini berubah secara linier sebagai fungsi dari tinggi keseluruhan ponton yang disimbolkan dengan variabel tinggi. Luasan total permukaan dinding diperoleh dengan menghitung perimeter luar dikalikan dengan tinggi vertikal dinding dan ketebalan plat.

$$\text{Perimeter } (P) = 2 \times (L + B) = 26,00 \text{ m}$$

$$\text{Berat Dinding Keliling } (W_{\text{dinding}}) = P \times H \times t \times \rho_{\text{beton}} = (9,360 \times H) \text{ ton}$$

c. Sekat Internal Tengah (*Transverse Stiffener*)

Sekat internal melintang diposisikan tepat di bagian tengah rongga dalam ponton untuk bertindak sebagai pengaku lateral penampang guna mencegah kegagalan tekuk dinding tipis akibat tekanan air samping. Selain fungsi struktural tersebut, sekat ini juga membagi volume dalam ponton menjadi beberapa ruang kompartemen kedap air yang independen. Berat sekat ini dihitung secara linier terhadap variabel tinggi ponton dengan mengacu pada lebar lintasan arah melintang.

$$\text{Berat Sekat Internal } (W_{\text{sekat}}) = B \times H \times t \times \rho_{\text{beton}} = (2,160 \times H) \text{ ton}$$

d. Persamaan Total Berat Sendiri Ponton (W_{ponton})

Persamaan total berat sendiri ponton diperoleh dengan menjumlahkan berat konstan plat dasar dengan fungsi berat dari dinding luar keliling serta berat dari sekat internal melintang. Penggabungan fungsi matematika ini menghasilkan persamaan linier dengan satu variabel bebas yaitu tinggi ponton, yang akan mempermudah jalannya proses iterasi parameter draf dan lambung timbul pada tahap analisis selanjutnya.

$$\text{Berat Ponton } (W_{\text{ponton}}) = W_{\text{dasar}} + W_{\text{dinding}} (H) + W_{\text{sekat}} (H) = 15,120 + (11,520 \times H) \text{ ton}$$

d. Analisis Iterasi Tinggi Sarat Ponton Dan Perhitungan Berat Ponton

i. Tinggi Ponton $H = 2.0$ meter

Pada skenario pengujian pertama, parameter tinggi ponton diasumsikan sebesar 2,00 meter untuk dievaluasi kelayakan hidrostatiknya. Berdasarkan kesetimbangan gaya vertikal Archimedes, draf air tenang serta jarak vertikal lambung timbul tersisa dapat dihitung secara ringkas di bawah ini.

$$W_{\text{ponton}} = 15.120 + 11.520 \times 2,20 = 38.160 \text{ ton}$$

$$W_{\text{total}} = W_{\text{atas}} + W_{\text{ponton}} = 59.120 \text{ ton}$$

$$T = \frac{W_{\text{total}}}{L \times B \times \rho_{\text{air}}} = 1,408 \text{ m}$$

$$f = H - T = 0,592 \text{ m}$$

Analisis teknis menunjukkan bahwa nilai lambung timbul sebesar 0,592 meter tidak memenuhi kriteria keamanan minimum karena ketinggian ini terlalu tipis untuk mengantisipasi fluktuasi gelombang akibat lalu lintas kapal di Sungai Mahakam. Hal ini juga memperkecil batas margin cadangan gaya apung dinamis apabila

terjadi beban angin samping seketika yang dapat memicu kemiringan berlebih pada struktur bangunan.

Tabel 4.9 Data Parameter H = 2.0 meter

Parameter Hidrostatik	Simbol Parameter	Nilai Hasil Skenario A
Tinggi Rencana Ponton	H	2,000 m
Berat Sendiri Ponton	W_{ponton}	38,160 ton
Berat Total Struktur	W_{total}	59,120 ton
Sarat Air Terendam	T	1,408 m
Lambung Timbul Tersisa	f	0,592 m

ii. Tinggi Ponton H = 2.2 meter

Pada skenario pengujian kedua, parameter tinggi ponton diasumsikan sebesar 2,20 meter untuk dievaluasi kelayakan hidrostatiknya. Berdasarkan kesetimbangan gaya vertikal Archimedes, draf air tenang serta jarak vertikal lambung timbul tersisa dapat dihitung secara ringkas di bawah ini.

$$W_{\text{ponton}} = 15.120 + 11.520 \times 2,20 = 40.464 \text{ ton}$$

$$W_{\text{total}} = W_{\text{atas}} + W_{\text{ponton}} = 61.424 \text{ ton}$$

$$T = \frac{W_{\text{total}}}{L \times B \times \rho_{\text{air}}} = 1,462 \text{ m}$$

$$f = H - T = 0,738 \text{ m}$$

Nilai lambung timbul sebesar 0,738 meter dari hasil analisis teknis menempatkan desain ini pada batas toleransi operasional yang memadai. Meski angkanya berada di bawah rentang ideal, desain ini terbukti memberikan kompromi yang menguntungkan. Hal ini terlihat dari stabilitas awal yang baik, proporsi titik tekan keapungan yang terjaga, serta terhindarnya struktur dari luasan berlebih yang dapat memicu tingginya gaya hambat angin.

Tabel 4.10 Data Parameter H = 2.2 meter

Parameter Hidrostatik	Simbol Parameter	Nilai Hasil Skenario A
Tinggi Rencana Ponton	H	2.200 m
Berat Sendiri Ponton	W_{ponton}	40.464 ton
Berat Total Struktur	W_{total}	61.424 ton
Sarat Air Terendam	T	1.462 m
Lambung Timbul Tersisa	f	0.738 m

iii. Tinggi Ponton $H = 2.5$ meter

Pada skenario pengujian ketiga, parameter tinggi ponton diasumsikan sebesar 2,50 meter untuk dievaluasi kelayakan hidrostatiknya. Berdasarkan kesetimbangan gaya vertikal Archimedes, draf air tenang serta jarak vertikal lambung timbul tersisa dapat dihitung secara ringkas di bawah ini.

$$W_{\text{ponton}} = 15.120 + 11.520 \times 2,50 = 43.920 \text{ ton}$$

$$W_{\text{total}} = W_{\text{atas}} + W_{\text{ponton}} = 64.880 \text{ ton}$$

$$T = \frac{W_{\text{total}}}{L \times B \times \rho_{\text{air}}} = 1,545 \text{ ton}$$

$$f = H - T = 0,955 \text{ m}$$

Berdasarkan analisis teknis, nilai lambung timbul sebesar 0,955 meter berada tepat dalam rentang batas aman yang ideal, yaitu antara 0,80 m hingga 1,00 m. Ketinggian ini dinilai sangat proporsional untuk memaksimalkan cadangan daya apung dalam menghadapi gelombang tinggi, tanpa menimbulkan peningkatan hambatan angin yang berlebihan. Selain itu, posisi titik berat dan stabilitas metacentrumnya tetap terjaga dengan baik sehingga struktur mampu menahan gaya guling melintang secara optimal.

Tabel 4.11 Data Parameter $H = 2.5$ meter

Parameter Hidrostatik	Simbol Parameter	Nilai Hasil Skenario A
-----------------------	------------------	------------------------

Tinggi Rencana Ponton	H	2.500 m
Berat Sendiri Ponton	W_{ponton}	43.920 ton
Berat Total Struktur	W_{total}	64.880 ton
Sarat Air Terendam	T	1.545 m
Lambung Timbul Tersisa	f	0.955 m

iv. Tinggi Ponton $H = 3$ meter

Pada skenario pengujian ketiga, parameter tinggi ponton diasumsikan sebesar 3,00 meter untuk dievaluasi kelayakan hidrostatisnya. Berdasarkan kesetimbangan gaya vertikal Archimedes, draf air tenang serta jarak vertikal lambung timbul tersisa dapat dihitung secara ringkas di bawah ini.

$$W_{\text{ponton}} = 15.120 + 11.520 \times 3,00 = 49.680 \text{ ton}$$

$$W_{\text{total}} = W_{\text{atas}} + W_{\text{ponton}} = 70.640 \text{ ton}$$

$$T = \frac{W_{\text{total}}}{L \times B \times \rho_{\text{air}}} = 1,682 \text{ m}$$

$$f = H - T = 1,318 \text{ m}$$

Berdasarkan analisis teknis, nilai lambung timbul sebesar 1,318 meter menunjukkan adanya perancangan berlebih (*over-engineering*) yang justru berisiko menurunkan tingkat keamanan. Ketinggian lambung yang berlebihan ini menciptakan area penampang angin yang terlalu luas. Akibatnya, dorongan angin dapat memicu momen guling yang membahayakan struktur. Selain itu, besarnya gaya hambat angin (*drag*) berisiko menyebabkan pergeseran sumbu, yang pada akhirnya dapat memicu kemacetan mekanis pada tiang pemandu.

Tabel 4.12 Data Parameter $H = 3$ meter

Parameter Hidrostatik	Simbol Parameter	Nilai Hasil Skenario A
Tinggi Rencana Ponton	H	3.000 m

Parameter Hidrostatik	Simbol Parameter	Nilai Hasil Skenario A
Berat Sendiri Ponton	W_{ponton}	49.680 ton
Berat Total Struktur	W_{total}	70.640 ton
Sarat Air Terendam	T	1,682 m
Lambung Timbul Tersisa	f	1,318 m

e. Analisis Gaya Apung Maksimum dan Faktor Keamanan (*Safety Factor*) Ponton Beton ($H = 2,2$ m)

Daya apung nominal maksimum total ($F_{\text{buoy_max}}$) dicapai apabila seluruh rongga ponton beton tercelup penuh ke dalam air secara keseluruhan. Kapasitas perpindahan volume total pada ketinggian rencana terpilih $H = 2,2$ m adalah:

$$V_{\text{total}} = L \times B \times H = 7,00 \text{ m} \times 6,00 \text{ m} \times 2,20 \text{ m} = 92,40 \text{ m}^3$$

Dengan mengasumsikan berat jenis air tawar $\rho_{\text{air}} = 1,0 \text{ Ton/m}^3$:

$$F_{\text{buoy_max}} = V_{\text{total}} \times \rho_{\text{air}} = 92,40 \text{ Ton} \quad (\approx 906,44 \text{ kN})$$

Evaluasi Faktor Keamanan terhadap bahaya tenggelam (*submergence safety factor*) dihitung untuk dua kondisi batas layan:

1. Faktor Keamanan Kondisi Kosong (SF_{empty}):

$$SF_{\text{empty}} = \frac{F_{\text{buoy_max}}}{P_{\text{empty}}} = \frac{92,40 \text{ Ton}}{61,424 \text{ Ton}} = 1,504 \quad (\geq 1,50 \Rightarrow \text{AMAN})$$

Faktor Keamanan Kondisi Layan Penuh (SF_{loaded}): Dengan tambahan beban hidup fungsional nominal sebesar $LL = 0,75 \text{ Ton}$ ($\approx 7,36 \text{ kN}$), berat total layan penuh menjadi $P_{\text{loaded}} = 61,424 + 0,750 = 62,174 \text{ Ton}$:

$$SF_{\text{loaded}} = \frac{F_{\text{buoy_max}}}{P_{\text{loaded}}} = \frac{92,40 \text{ Ton}}{62,174 \text{ Ton}} = 1,486 \quad (\approx 1,49 \Rightarrow \text{Dapat ditoleransi})$$

f. Analisis Stabilitas Ponton Beton ($H = 2,2$ m)

Kriteria stabilitas dievaluasi melalui nilai **Tinggi Metasenter (GM)**. Pusat berat struktur dihitung menggunakan prinsip momen statis vertikal terhadap garis dasar plat terbawah ($z = 0$):

$$KG = \frac{\sum(W_i \cdot z_i)}{P_{\text{total}}}$$

Ketinggian vertikal elemen pembentuk sistem didefinisikan sebagai:

- Pusat berat pelat dasar ($t = 0,15$ m): $z_{\text{slab}} = \frac{0,15}{2} = 0,075$ m
- Pusat berat dinding keliling ($H = 2,2$ m): $z_{\text{wall}} = \frac{2,20}{2} = 1,100$ m
- Pusat berat sekat internal ($H = 2,2$ m): $z_{\text{sekat}} = \frac{2,20}{2} = 1,100$ m
- Pusat berat superstruktur rumah arsitektural (berdiri di atas permukaan dek ponton $z = 2,20$ m): $z_{\text{super}} = 2,20 + 1,20 = 3,400$ m
- Pusat berat beban hidup terdistribusi: $z_{\text{live}} = 2,20 + 1,00 = 3,200$ m

1. Kondisi Kosong (*Unloaded Case*)

$$KG_{\text{empty}} = \frac{(W_{\text{slab}} \cdot z_{\text{slab}}) + (W_{\text{wall}} \cdot z_{\text{wall}}) + (W_{\text{sekat}} \cdot z_{\text{sekat}}) + (W_{\text{super}} \cdot z_{\text{super}})}{P_{\text{empty}}}$$

$$KG_{\text{empty}} = \frac{(15,120 \cdot 0,075) + (20,592 \cdot 1,100) + (4,752 \cdot 1,100) + (20,960 \cdot 3,400)}{61,424}$$

$$KG_{\text{empty}} = \frac{1,134 + 22,651 + 5,227 + 71,264}{61,424} = \frac{100,276}{61,424} \approx 1,633 \text{ m}$$

2. Kondisi Layan Penuh (*Fully Loaded Case*)

$$KG_{\text{loaded}} = \frac{100,276 + (W_{\text{live}} \cdot z_{\text{live}})}{P_{\text{loaded}}}$$

$$KG_{\text{loaded}} = \frac{100,276 + (0,750 \cdot 3,200)}{62,174} = \frac{100,276 + 2,400}{62,174} = \frac{102,676}{62,174}$$

$$\approx 1,651 \text{ m}$$

Karena penampang melintang ponton beton sejajar permukaan air berbentuk prisma (balok persegi panjang), titik pusat apung vertikal (KB) berada tepat pada setengah dari kedalaman sarat air terendam (T):

1. Kondisi Kosong

$$(T_{\text{empty}} = 1,462 \text{ m})$$

$$KB_{\text{empty}} = \frac{1,462 \text{ m}}{2} = 0,731 \text{ m}$$

2. Kondisi Layan Penuh ($T_{\text{loaded}} = 1,480 \text{ m}$)

$$KB_{\text{loaded}} = \frac{1,480 \text{ m}}{2} = 0,740 \text{ m}$$

C. Penentuan Radius Metasenter (BM)

Radius metasenter transversal (BM) dihitung dari inersia bidang air transversal ($I_{\text{transversal}}$) dibagi dengan volume terendam:

$$BM = \frac{I_{\text{transversal}}}{V_{\text{tercelup}}}$$

Momen inersia bidang air transversal terkritis (pada lebar dasar selebar $B = 6,00 \text{ m}$):

$$I_{\text{transversal}} = \frac{1}{12} \times L \times B^3 = \frac{1}{12} \times 7,00 \text{ m} \times (6,00 \text{ m})^3 = 126,000 \text{ m}^4$$

1. Kondisi Kosong ($V_{\text{tercelup}} = 61,424 \text{ m}^3$)

$$BM_{\text{empty}} = \frac{126,000 \text{ m}^4}{61,424 \text{ m}^3} \approx 2,051 \text{ m}$$

2. Kondisi Layan Penuh ($V_{\text{tercelup}} = 62,174 \text{ m}^3$)

$$BM_{\text{loaded}} = \frac{126,000 \text{ m}^4}{62,174 \text{ m}^3} \approx 2,027 \text{ m}$$

D. Evaluasi Nilai Tinggi Metasenter (GM)

Hasil parameter hidrostatik dan evaluasi kestabilan transversal disajikan pada Tabel berikut:

Tabel 4.13 Parameter Stabilitas Ponton Beton Terpilih ($H = 2,2 \text{ m}$)

Parameter	Simbol	Kondisi Kosong	Kondisi Layan Penuh	Satuan	Keterangan
Sarat Air	T	1,462	1,480	m	Kedalaman terendam
Pusat Berat	KG	1,633	1,651	m	Dari dasar plat bawah
Pusat Apung	KB	0,731	0,740	m	Dari dasar plat bawah
Radius Metasenter	BM	2,051	2,027	m	Transversal
Tinggi Metasenter	GM	+1,149	+1,116	m	Stabil Positif ($GM > 0$)

Berdasarkan analisis pada Tabel 4.13, dapat disimpulkan bahwa sistem ponton beton yang dipilih dengan tinggi rencana $H = 2,2$ m memiliki stabilitas melintang yang tinggi, yaitu sebesar $GM = +1,116$ m pada kondisi beban penuh. Nilai GM yang bernilai positif ini memastikan keselamatan struktur apung dari risiko terguling saat berada dalam kondisi statis. Desain ini bahkan memberikan batas aman (margin) stabilitas awal yang lebih tinggi dibandingkan skenario ketinggian 2,5 m karena posisi pusat massa sistem (KG) menjadi lebih rendah.

f. Analisis Stabilitas Ponton Modular Barrel HDPE

Kriteria stabilitas dievaluasi melalui nilai Tinggi Metasenter (GM).

g. Penentuan Pusat Berat Sistem (KG)

Pusat berat struktur total dihitung berdasarkan momen statis vertikal terhadap dasar terbawah platform ($z = 0$):

$$KG = \frac{\sum(W_i \cdot z_i)}{P_{\text{total}}}$$

Ketinggian posisi vertikal pusat berat komponen didefinisikan sebagai:

- Pusat berat barrel HDPE total (setengah tinggi total ponton):

$$z_{\text{barrel}} = \frac{H_{\text{total ponton}}}{2} = 0,90 \text{ m}$$

- Pusat berat rangka baja UNP tingkat ganda:

$$z_{\text{frame}} = 0,90 \text{ m}$$

- Pusat berat superstruktur rumah arsitektural di atas dek lantai ($z \geq 1,80 \text{ m}$):

$$z_{\text{super}} = 1,80 \text{ m} + 1,20 \text{ m} = 3,00 \text{ m}$$

- Pusat berat beban hidup di atas dek lantai:

$$z_{\text{live}} = 1,80 \text{ m} + 1,00 \text{ m} = 2,80 \text{ m}$$

1. Kondisi Kosong (*Unloaded Case*)

$$\begin{aligned} KG_{\text{empty}} &= \frac{(W_{\text{barrel}} \cdot z_{\text{barrel}}) + (W_{\text{frame}} \cdot z_{\text{frame}}) + (W_{\text{super}} \cdot z_{\text{super}})}{P_{\text{empty}}} \\ KG_{\text{empty}} &= \frac{(16,01 \cdot 0,90) + (59,13 \cdot 0,90) + (205,62 \cdot 3,00)}{280,76} \\ KG_{\text{empty}} &= \frac{14,409 + 53,217 + 616,860}{280,76} = \frac{684,486}{280,76} = 2,438 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Kondisi Layan Penuh (*Fully Loaded Case*)

$$\begin{aligned} KG_{\text{loaded}} &= \frac{684,486 + (W_{\text{live}} \cdot z_{\text{live}})}{P_{\text{loaded}}} \\ KG_{\text{loaded}} &= \frac{684,486 + (7,36 \cdot 2,80)}{288,12} = \frac{684,486 + 20,608}{288,12} = \frac{705,094}{288,12} \\ &= 2,447 \text{ m} \end{aligned}$$

ii. Penentuan Pusat Apung (KB)

Karena penampang melintang silinder vertikal sejajar garis air bersifat prismatik (seragam), pusat apung vertikal (KB) berada tepat pada setengah dari kedalaman sarat air total (T):

$$KB = \frac{T}{2}$$

1. **Kondisi Kosong** ($T = 1,128$ m)

$$KB_{\text{empty}} = \frac{1,128 \text{ m}}{2} = 0,564 \text{ m}$$

2. **Kondisi Layan Penuh** ($T = 1,158$ m)

$$KB_{\text{loaded}} = \frac{1,158 \text{ m}}{2} = 0,579 \text{ m}$$

iii. **Penentuan Radius Metasenter (BM)**

Radius metasenter transversal (BM) dihitung berdasarkan momen inersia penampang air permukaan terhadap volume apung basah:

$$BM = \frac{I_{\text{plat}}}{V_{\text{tercelup total}}}$$

Garis air memotong susunan silinder pada Lapisan Atas (Lapisan 2), sehingga bidang air permukaan terdiri dari 96 lingkaran dengan jari-jari $R = 0,29$ m yang tersusun dalam grid 8 baris $\times$ 12 kolom.

Momen inersia transversal global (I_{plat}) dihitung menggunakan Teorema Sumbu Sejajar berdasarkan jarak pusat baris barrel (y_i) terhadap sumbu pusat transversal platform. 8 baris barrel didistribusikan merata di area selebar 6,30 m dengan jarak antar baris $\Delta y \approx 0,79$ m (letak koordinat sumbu baris $y_i = \{\pm 2,76 \text{ m}, \pm 1,97 \text{ m}, \pm 1,18 \text{ m}, \pm 0,39 \text{ m}\}$).

Masing-masing baris terdiri dari 12 unit barrel. Momen inersia lingkaran tunggal $I_{\text{unit}} = \frac{\pi}{4} R^4 = 0,00555 \text{ m}^4$. Total momen inersia transversal terhitung:

$$I_{\text{plat}} = \sum_{i=1}^{96} (I_{\text{unit}} + A_b \cdot y_i^2) \approx 83,04 \text{ m}^4$$

Sehingga diperoleh nilai radius metasenter transversal (BM):

1. **Kondisi Kosong**

$$BM_{\text{empty}} = \frac{83,04 \text{ m}^4}{28,620 \text{ m}^3} = 2,901 \text{ m}$$

2. Kondisi Layan Penuh

$$BM_{\text{loaded}} = \frac{83,04 \text{ m}^4}{29,370 \text{ m}^3} = 2,827 \text{ m}$$

iv. Evaluasi Nilai Tinggi Metasenter (GM)

Rekapitulasi parameter hidrostatik dan evaluasi kestabilan transversal disajikan pada Tabel berikut:

Tabel 4.14 Parameter Stabilitas Ponton Modular Barrel HDPE Vertikal Ganda

Parameter	Simbol	Kondisi Kosong	Kondisi Layan Penuh	Satuan	Keterangan
Sarat Air	T	1,128	1,158	m	Kedalaman terendam
Pusat Berat	KG	2,438	2,447	m	Dari dasar bawah ponton
Pusat Apung	KB	0,564	0,579	m	Dari dasar bawah ponton
Radius Metasenter	BM	2,901	2,827	m	Transversal
Tinggi Metasenter	GM	+1,027	+0,959	m	Stabil (GM > 0)

Berdasarkan hasil analisis stabilitas pada **Tabel 4.15**, diperoleh kesimpulan bahwa sistem ponton modular berdiri ganda ini menunjukkan kinerja stabilitas transversal yang **stabil** ($GM = +1,027$ m pada kondisi kosong dan $+0,959$ m pada kondisi layan penuh).

Meskipun lebar platform mengecil dari 10,00 m menjadi 6,30 m yang menyebabkan penurunan radius metasenter (BM), nilai GM yang diperoleh tetap berada jauh di atas batas aman stabilitas positif ($GM > 0$). Hal ini memastikan bahwa rumah amfibi memiliki kemampuan pemulihan (*self-righting capability*) yang kokoh dan tidak mudah terguling ketika terkena beban angin lateral maupun pergeseran muatan hidup di atas platform.

h. Dinamika Benda Apung dan Stabilitas Struktur Amfibi

Perancangan arsitektur amfibi untuk mitigasi banjir tipe *slow-onset* di kawasan bantaran Sungai Mahakam, Kota Samarinda, memerlukan pendekatan rekayasa yang mampu menyeimbangkan stabilitas hidrostatik dengan fungsi bangunan. Karakteristik banjir *slow-onset* yang memiliki durasi genangan panjang mengharuskan struktur fondasi apung (ponton) beroperasi dalam kondisi mengapung penuh secara terus-menerus. Dalam kondisi ini, ponton berfungsi sebagai penyedia daya apung sekaligus elemen keselamatan utama untuk mencegah risiko terbalik (*capsizing*) dan masuknya air ke geladak (*deck wetness*).

Dalam bidang Arsitektur Perkapalan, stabilitas benda apung dikendalikan oleh interaksi antara Titik Berat (*Center of Gravity*, KG) dan Titik Apung (*Center of Buoyancy*, KB). Titik berat adalah pusat gaya gravitasi akibat massa struktur, sedangkan titik apung adalah pusat gaya hidrostatik yang bekerja ke atas dari volume air yang dipindahkan (*displaced volume*). Pada perancangan ini, simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Bentley MOSES telah dilakukan untuk memodelkan kurva Lengan Penegak (*Righting Arm*, GZ) pada empat variasi ketinggian ponton beton, yaitu $h = 2.0$ m, $h = 2.2$ m, $h = 2.5$ m, dan $h = 3.0$ m, baik pada kondisi pembebanan simetris maupun asimetris.

Hasil pemodelan menunjukkan adanya fenomena *trade-off* (kompromi) antara stabilitas dinamis dan pemenuhan batas lambung timbul (*freeboard*). Bab ini akan membahas fenomena tersebut secara akademis, menjelaskan pengaruh beban asimetris terhadap kurva stabilitas, serta memvalidasi secara teknis mengapa rancangan dengan ketinggian ponton $h=2.2$ meter merupakan pilihan desain yang paling optimal.

i. Analisis Kinerja pada Ketinggian Ponton $h = 2.0$ m: Risiko Deck Wetness

Model ponton setinggi $h = 2.0$ meter menunjukkan nilai stabilitas awal (GM) yang tinggi karena Titik Berat (KG) berada pada posisi yang rendah. Hal ini menghasilkan kurva Lengan Penegak (GZ) yang kuat pada sudut kemiringan kecil hingga menengah. Namun, desain ini memiliki kelemahan signifikan pada aspek Lambung Bebas (*Freeboard*).

Dengan sarat air mencapai 1.411 meter, sisa lambung bebas hanya sebesar 0.48 meter. Meskipun angka ini masih memenuhi batas minimum statis, jarak tersebut tidak memadai untuk lingkungan sungai yang dinamis. Riak gelombang kecil atau beban angin dapat dengan mudah menyebabkan tepi geladak masuk ke dalam air (*deck edge immersion*).

Berdasarkan perhitungan geometri, batas geladak model ini mulai tenggelam pada sudut kemiringan sekitar 9.1° . Ketika air menggenangi geladak (*deck wetness*), muncul fenomena Efek Permukaan Bebas (*Free Surface Effect*) di mana air yang menggenangi bergeser seiring kemiringan rumah. Hal ini menyebabkan pusat gravitasi bergeser ke atas secara tidak stabil, mengurangi nilai GM, dan mempercepat hilangnya kemampuan struktur untuk kembali tegak.

j. Analisis Kinerja pada Ketinggian Ponton $h = 2.5$ m dan 3.0 m: Risiko Terbalik (*Capsizing*)

Model ponton dengan ketinggian $h = 2.5$ meter dan $h = 3.0$ meter memberikan jarak lambung bebas yang sangat besar (masing-masing 0.95 meter dan 1.32 meter). Hal ini secara efektif mencegah air masuk ke geladak pada sudut kemiringan kecil. Namun, peninggian dinding beton ini menambah berat mati secara signifikan di bagian atas struktur.

Penambahan berat ini menyebabkan sarat air bertambah dalam dan mengurangi jari-jari metacentrum (BM). Akibatnya, nilai stabilitas awal (GM) menurun drastis. Data pada Tabel 4.22 menunjukkan bahwa pada sudut 10° , rasio luasan energi stabilitas dinamis (*Area Ratio*) berada pada tingkat kritis (di bawah

angka 1). Struktur kehilangan daya pulih spontannya dan cenderung menetap pada sudut kemiringan tertentu (*Angle of Loll*).

Selain itu, dinding yang lebih tinggi memperbesar area tangkapan angin (*wind sail area*). Momen guling akibat angin menjadi lebih besar dan mengalahkan sisa energi pemulih dari kurva GZ. Kombinasi dari nilai GM yang rendah dan momen angin yang besar membuat desain ini sangat berisiko untuk terbalik (*capsizing*) dan tidak memenuhi kriteria stabilitas dasar.

k. Analisis Kurva Lengan Penegak (Righting Arm) pada Tinggi Titik Berat (h) = 2.2 Meter

Berdasarkan hasil pengujian stabilitas pada variasi tinggi titik berat (h) setinggi 2.2 meter, grafik "Righting Arm Results" merepresentasikan performa stabilitas kapal dalam merespons gaya kemiringan (roll) dari 0 derajat hingga 40 derajat. Grafik dan data tabulasi memuat beberapa parameter utama: *Draft* (sarat air), *Righting Arm* (Lengan Penegak/GZ yang berfungsi sebagai gaya pemulih kapal), *Righting Arm Area* (Luasan di bawah kurva yang menunjukkan stabilitas dinamis), *Wind Arm* (Lengan gaya angin), *Wind Arm Area* (Luasan gaya angin), *Net Arm* (Lengan bersih setelah dikurangi pengaruh angin), dan *Area Ratio* (Rasio luasan).

Secara visual, bentuk kurva utama yaitu *Righting Arm* menampilkan pola melengkung menyerupai kurva parabola yang naik secara bertahap pada sudut awal hingga mencapai titik puncak, lalu berangsur turun menukik. Kenaikan awal ini mengilustrasikan bertambahnya gaya perlawanan (momen pemulih) kapal saat mulai miring, sedangkan penurunannya menandakan mulai melemahnya kemampuan kapal untuk menegak kembali pada sudut kemiringan yang lebih besar. Di sisi lain, kurva *Righting Arm Area* bergerak terus menanjak secara progresif, merepresentasikan akumulasi energi stabilitas dinamis yang diserap kapal seiring bertambahnya sudut. Untuk parameter lainnya, kurva *Draft* membentang dengan bentuk garis yang hampir mendatar dan sedikit bergelombang, menunjukkan bahwa perubahan sarat air selama kapal miring tidak terlalu signifikan. Sementara itu, kurva *Wind Arm* dan *Wind Arm Area* berada sangat rendah dan landai di dekat

sumbu horizontal bawah, menegaskan minimnya pengaruh gaya guling akibat angin pada pengujian ini.

Pada kondisi pembebanan simetris dengan $h = 2.2$ meter, penjabaran seluruh parameter hasil komputasi dari kemiringan 0 hingga 40 derajat adalah sebagai berikut:

- **Draft (Sarat Air):** Sarat air kapal berfluktuasi tipis dari posisi tegak (0 derajat) di angka 1.491 meter, mencapai titik terdangkal 1.439 meter pada kemiringan 20 derajat, dan kembali naik menjadi 1.528 meter pada sudut 40 derajat.
- **Righting Arm (GZ):** Kemampuan pemulih mulai dari 0 meter pada posisi tegak, meningkat perlahan hingga mencapai nilai maksimum (*peak GZ*) sebesar 0.185 meter pada sudut 20 derajat. Setelahnya, nilai ini turun drastis hingga menyentuh angka negatif -0.050 meter pada sudut 40 derajat. Nilai negatif ini merupakan batas kritis hilangnya momen penegak (kapal terbalik).
- **Righting Arm Area:** Energi stabilitas dinamis terakumulasi seiring kemiringan, membesar dari 0 menjadi 2.192 deg.m pada sudut 20 derajat, dan total mencapai 4.047 deg.m di sudut 40 derajat.
- **Wind Arm & Wind Arm Area:** Gaya guling akibat angin (*Wind Arm*) sangat minim, berawal dari sekitar 0.003 meter (0 derajat) dan naik perlahan menjadi 0.018 meter di 40 derajat. Luasan energinya (*Wind Arm Area*) juga terakumulasi kecil hingga 0.341 deg.m.
- **Net Arm & Area Ratio:** Lengan bersih (*Net Arm*) mencapai puncak maksimum 0.177 meter pada sudut 20 derajat namun jatuh ke nilai -0.068 meter pada 40 derajat karena terpotong pengaruh angin. Adapun *Area Ratio* mencapai puncaknya di 23.18 pada sudut 20 derajat dan perlahan melemah menjadi 11.84 pada 40 derajat.

Karakteristik stabilitas kapal dengan beban asimetris menunjukkan perubahan respon yang terukur ketika beban didistribusikan secara asimetris pada $h = 2.2$ meter, dengan rincian data sebagai berikut:

- **Draft (Sarat Air):** Berada pada pola yang identik, dimulai dari 1.489 meter (0 derajat), titik terendah 1.438 meter pada sudut 20 derajat, dan diakhiri pada 1.523 meter (40 derajat).
- **Righting Arm (GZ):** Kurva GZ menunjukkan performa yang lebih kokoh di arah kemiringan ini. Nilai maksimum dicapai pada sudut 20 derajat dengan GZ sebesar 0.209 meter. Yang membedakan, pada kemiringan 40 derajat kurva ini belum mencapai nilai negatif, melainkan masih menyisakan gaya penegak positif sangat tipis sebesar 0.007 meter.
- **Righting Arm Area:** Akumulasi luasan di bawah kurva bernilai lebih besar, mencapai angka 2.234 deg.m pada sudut 20 derajat, dan melonjak hingga total 4.954 deg.m pada kemiringan 40 derajat.
- **Wind Arm & Wind Arm Area:** Pengaruh angin berada pada kisaran dari 0.003 meter di posisi awal menjadi maksimal sekitar 0.026 meter pada 40 derajat, dengan total luasan area angin terkumpul 0.466 deg.m.
- **Net Arm & Area Ratio:** Nilai *Net Arm* mencapai puncaknya di 0.199 meter (20 derajat) dan berakhir di nilai -0.019 meter di 40 derajat. Sementara *Area Ratio* menyentuh puncaknya sebesar 20.02 pada kemiringan 20 derajat dan menurun perlahan menjadi 10.61 di akhir pengukuran.

Perbandingan Stabilitas Simetris dan Asimetris pada $h = 2.2 \text{ m}$

1. **Lengan Penegak Maksimum (Peak GZ):** Kondisi pembebanan asimetris menciptakan daya kembali tegak yang lebih optimal pada titik krusialnya. Pada sudut 20 derajat, *Righting Arm* beban asimetris (0.209 meter) dan *Net Arm* (0.199 meter) secara konsisten mengungguli beban simetris (GZ: 0.185 meter, Net: 0.177 meter).
2. **Ketahanan Terhadap Kejatuhan (Vanishing Angle):** Pengujian beban simetris menunjukkan kegagalan stabilitas lebih awal; pada sudut 40 derajat, lengan penegaknya sudah negatif (-0.050 meter) yang berarti masuk ke zona rawan terbalik. Di sisi lain, pembebanan asimetris membuktikan bahwa rumah amfibi masih mampu mempertahankan margin keseimbangan statis positif di batas 40 derajat dengan nilai GZ 0.007 meter.

3. **Kapasitas Stabilitas Dinamis:** Pembebanan asimetris menyerap energi stabilitas total (*Righting Arm Area*) yang signifikan lebih besar, yaitu 4.954 deg.m, berbanding lurus dengan ketahanan terhadap gaya kejut (impulsif), yang secara jelas lebih baik ketimbang kondisi simetris (4.047 deg.m) pada kemiringan akhir 40 derajat.

Secara keseluruhan, analisis komprehensif terhadap seluruh parameter mengonfirmasi bahwa distribusi pembebanan asimetris pada tinggi struktur $h = 2,2$ meter menghasilkan margin keselamatan dan momen penegak yang lebih tinggi dalam kondisi kemiringan ekstrem dibandingkan dengan distribusi beban simetris.

Model ponton dengan ketinggian $h = 2,2$ meter menawarkan konfigurasi desain yang paling seimbang karena menghasilkan nilai lambung bebas (*freeboard*) sebesar 0,71 meter. Ketinggian ini berfungsi sebagai cadangan daya apung (*reserve buoyancy*) yang memadai untuk menahan beban kejut (*impact load*) sekaligus mencegah masuknya air ke dalam area hunian. Secara teknis, *freeboard* setinggi 0,71 meter ini mampu menunda masuknya air ke tepi geladak (*deck immersion angle*) hingga mencapai sudut kemiringan 13.3 derajat. Penundaan ini sangat krusial untuk menjaga luas bidang garis air tetap utuh pada sudut kemiringan yang besar, sehingga nilai jari-jari metasentrum (BM) tidak menurun secara drastis. Akibatnya, lengan penegak (GZ) memiliki ruang untuk terus meningkat dan menghasilkan momen pemulihan yang kuat saat struktur mengalami gangguan akibat gelombang dan angin.

k. Pengaruh Beban Asimetris pada Stabilitas

Penggunaan bangunan sebagai hunian memunculkan kondisi beban yang tidak merata akibat penempatan perabot atau aktivitas penghuni. Beban asimetris ini menyebabkan pergeseran Titik Berat secara horizontal (*Transverse Center of Gravity*, TCG), yang pada gilirannya menciptakan momen guling statis yang terus-menerus menekan struktur.

Struktur akan merespons momen ini dengan bergeser ke sudut keseimbangan baru yang disebut *Initial List* (kemiringan awal). Berdasarkan data simulasi, beban asimetris menyebabkan kemiringan awal di kisaran -2.02° hingga

–2.12° untuk semua variasi. Dampak paling mematikan dari kemiringan permanen ini adalah berkurangnya luas area di bawah kurva Lengan Penegak (GZ), yang secara langsung mengurangi energi cadangan bangunan untuk menahan cuaca ekstrem.

Untuk memberikan pembuktian kuantitatif mengenai penurunan performa stabilitas ini, grafik hasil simulasi kondisi beban asimetris diekstraksi ke dalam Tabel 4.23.

Tabel 4.15 Profil Stabilitas Dinamis pada Pembebanan Asimetris

Ketinggian Ponton	Sudut Kemiringan	Righting (GZ)	Arm Righting Area
h = 2.0 m	10.0°	≈ 0.10m	≈ 0.8 deg.m
	20.0°	≈ 0.18m	≈ 2.2 deg.m
	30.0°	≈ 0.10 m	≈ 3.5 deg.m
	40.0°	≈ -0.05 m	≈ 4.1 deg.m
h = 2.2 m	10.0°	≈ 0.11 m	≈ 0.9 deg.m
	20.0°	≈ 0.20 m	≈ 2.4 deg.m
	30.0°	≈ 0.15 m	≈ 4.1 deg.m
	40.0°	≈ 0.02 m	≈ 4.9 deg.m
h = 2.5 m	10.0°	≈ 0.10 m	≈ 0.9 deg.m
	20.0°	≈ 0.22 m	≈ 2.5 deg.m
	30.0°	≈ 0.33 m	≈ 5.5 deg.m
	40.0°	≈ 0.31 m	≈ 8.5 deg.m
h = 3.0 m	10.0°	≈ 0.08 m	≈ 0.8 deg.m
	20.0°	≈ 0.20 m	≈ 2.2 deg.m

Ketinggian Ponton	Sudut Kemiringan	Righting (GZ)	Arm Righting Area
	30.0°	≈ 0.34 m	≈ 5.0 deg.m
	40.0°	≈ 0.32 m	≈ 10.6 deg.m

Berdasarkan Tabel 4.25, analisis kinerja struktur saat menerima beban asimetris menunjukkan perbedaan yang signifikan antar-model. Pada desain $h = 2,0$ meter, kemiringan awal langsung menghabiskan sisa lambung bebas (*freeboard*) yang sangat tipis, yaitu sebesar 0,48 meter. Akibatnya, air langsung melimpas ke atas geladak (*deck edge immersion*) secara dini. Fenomena ini terindikasi dari nilai lengan penegak (*GZ*) yang turun drastis hingga mencapai nilai negatif ($\approx -0,05$ m) pada sudut ekstrem 40°. Nilai negatif ini menunjukkan bahwa gaya hidrostatik telah kehilangan kemampuan pemulihan sepenuhnya, sehingga justru memperbesar momen guling bangunan. Kondisi tersebut juga menghasilkan total energi stabilitas (*Righting Arm Area*) yang sangat kecil, yaitu hanya sekitar $\approx 4,1$ deg.m.

Sebaliknya, desain dengan ketinggian $h = 2,2$ meter menunjukkan karakteristik ketahanan yang jauh lebih andal. Dengan lambung bebas (*freeboard*) awal sebesar 0,71 meter, sudut kemiringan awal $-2,12^\circ$ masih menyisakan jarak aman yang cukup dari permukaan air. Kondisi kedap air pada struktur tetap terjaga sehingga luas bidang garis air tidak berkurang secara drastis. Hal ini dibuktikan secara kuantitatif melalui kurva lengan penegak (*GZ*) yang mampu bertahan pada nilai positif ($\approx 0,02$ m) hingga sudut kemiringan 40°, dengan akumulasi luasan kurva stabilitas mencapai $\approx 4,9$ deg.m. Cadangan energi dinamis ini memastikan bangunan tetap memenuhi standar keselamatan operasional dalam mengantisipasi cuaca ekstrem, meskipun distribusi beban muatan internal tidak seimbang.

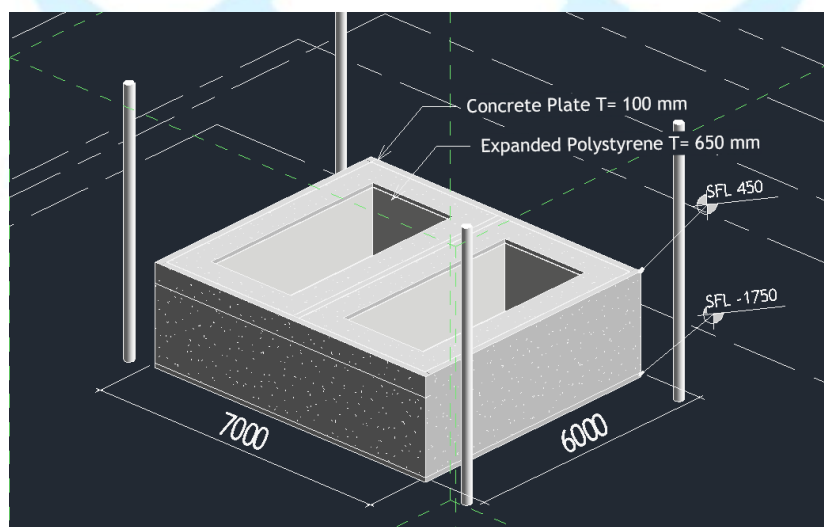
Sementara itu, walaupun model $h = 2,5$ meter dan $h = 3,0$ meter menghasilkan total luasan kurva stabilitas yang besar pada sudut kemiringan tinggi (mencapai $\approx 8,5$ hingga $\approx 10,6$ deg.m), kinerja stabilitas awal keduanya dinilai kurang baik. Pada sudut kecil 10°, nilai *GZ* untuk model $h = 3,0$ meter hanya

mencapai $\approx 0,08$ m. Kelemahan pada sudut kemiringan awal ini mengonfirmasi adanya dampak beban atas yang berlebihan (*top-heavy*), yang menyebabkan struktur kehilangan kemampuan pemulihan spontannya. Akibatnya, bangunan rentan tertahan pada posisi miring permanen yang mengganggu kenyamanan penghuni. Fenomena ini secara definitif memperkuat validasi bahwa model $h = 2,2$ meter merupakan titik temu optimal antara keandalan stabilitas awal dan kapasitas dalam menahan beban asimetris.

m. Desain Optimal Ponton Beton

Berdasarkan analisis hidrostatik dan simulasi numerik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa parameter stabilitas sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara Titik Berat (KG), Jarak Metasentrum (BM), Sarat Air (T), dan Lambung Timbul (f).

Penggunaan ponton dengan tinggi $h=2.0$ meter tidak dapat direkomendasikan karena batas lambung bebasnya terlalu rendah, membuat bangunan sangat rentan terhadap genangan air di geladak saat terkena beban asimetris. Di sisi lain, desain dengan tinggi $h=2.5$ meter dan $h=3.0$ meter juga divonis tidak layak karena penambahan beban beton menyebabkan struktur menjadi *top-heavy*, menurunkan stabilitas dinamis secara drastis, dan meningkatkan risiko terbalik (*capsizing*).



Gambar 4.7 Desain Ponton Beton *Double Hull*

Model dengan ketinggian $h = 2,2$ meter terbukti menjadi solusi teknis yang paling komprehensif. Desain ini mampu menjaga posisi pusat gravitasi tetap rendah guna mempertahankan nilai stabilitas awal (GM) dan lengan penegak (GZ) yang andal, sekaligus menyediakan lambung bebas (*freeboard*) sebesar 0,71 meter untuk melindungi struktur dari risiko tercelupnya tepi geladak (*deck edge immersion*). Berdasarkan evaluasi tersebut, desain $h = 2,2$ meter divalidasi sebagai rancangan fondasi ponton yang paling optimal, aman, dan layak untuk diaplikasikan pada prototipe rumah amfibi.

Desain struktur *double hull* (lambung ganda) ini merupakan sistem perlindungan komposit tangguh yang terdiri dari dinding beton terluar setebal 150 mm sebagai perisai utama terhadap abrasi dan benturan, inti *closed-cell foam* setebal 600 mm. Untuk menekan biaya tanpa mengorbankan performa, penggunaan tumpukan lembaran busa *Expanded Polystyrene* (XPS) menjadi pilihan yang paling ekonomis. Lebih dari sekadar pengisi celah atau isolator termal, lapisan busa XPS setebal 600 mm ini mengemban fungsi sebagai sistem keselamatan ganda (*redundancy*). Apabila dinding beton luar mengalami keretakan atau jebol akibat benturan ekstrem, ketiadaan rongga kosong di antara lambung membuat air tidak dapat membanjiri bagian dalam struktur. Sifat *closed-cell* pada busa XPS yang 100% kedap air akan langsung memblokir dan melokalisasi kebocoran, mengambil alih peran penahan daya apung agar bangunan tidak tenggelam, sekaligus melindungi pelat baja interior dari kerusakan yang lebih fatal.

4.1.7 Perancangan Awal (*Preliminary Design*) Ponton Modular Barrel HDPE

Sebagai alternatif sistem fondasi apung selain ponton beton pracetak (*concrete pontoon*), pada subbab ini dilakukan analisis perancangan awal (*preliminary design*) menggunakan sistem ponton modular berbahan barrel *High-Density Polyethylene* (HDPE). Keunggulan utama sistem ini terletak pada bobot sendiri yang sangat ringan, kemudahan mobilisasi, fleksibilitas tinggi (modularitas), serta ketahanan material yang sangat baik terhadap korosi lingkungan air tawar maupun payau.

Berbeda dengan sistem horizontal tunggal, sistem fondasi ini dirancang dengan menyusun barrel HDPE dalam posisi berdiri tegak (*vertical*) secara dua

lapis vertikal (*double-layer vertical configuration*) di bawah lantai platform menggunakan struktur rangka (*grid frame/cage*) pengikat baja galvanis. Konfigurasi berdiri tegak memberikan keuntungan berupa stabilitas vertikal penampang yang seragam (*prismatic body*) serta peningkatan tinggi bebas (*freeboard*) yang signifikan untuk melindungi superstruktur dari risiko luapan air.

a. Karakteristik Geometri dan Spesifikasi Barrel HDPE

Barrel HDPE yang digunakan adalah tipe drum silinder kapasitas nominal 200 Liter ($0,20 \text{ m}^3$) yang dipasang vertikal. Spesifikasi teknis dan dimensi geometris satu unit barrel HDPE didefinisikan pada Tabel 4.16 berikut:

**Tabel 4.16 Spesifikasi Geometri Barrel HDPE 200 Liter ($0,20 \text{ m}^3$)
(Posisi Vertikal)**

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Diameter Luar	D	0,58	m
Jari-jari Luar	R	0,29	m
Tinggi Barrel (Panjang Silinder)	H_b	0,90	m
Luas Penampang Horizontal	A_b	0,264	m^2
Volume Geometris Maksimum	$V_{\max}$	0,238	m^3
Berat Sendiri Barrel	W_d	8,50	kg(0,083 kN)
Densitas Material HDPE	ρ_{HDPE}	950	kg/m^3

Luas penampang dasar horizontal (A_b) dan volume maksimum ($V_{\max}$) dari satu buah barrel berdiri tegak dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_b = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot (0,29 \text{ m})^2 = 0,2642 \text{ m}^2$$

$$V_{\max} = A_b \cdot H_b = 0,2642 \text{ m}^2 \cdot 0,90 \text{ m} = 0,2378 \text{ m}^3 \approx 0,238 \text{ m}^3$$

b. Konfigurasi Layout Rangka Pengikat (*Platform Frame*)

Guna menampung total beban arsitektural struktur atas yang mencapai 20,960 Ton sekaligus menjaga rigiditas sistem pada landasan berukuran $8,30 \text{ m} \times$

6,30 m (Luas $A_{plat} = 52,29 \text{ m}^2$), dirancang kerangkeng grid ganda (*double-tier cage frame*) berbahan Baja Galvanis Profil UNP 50x50x5 mm. Rangka ini berfungsi mencengkeram erat barisan barrel silinder yang disusun tegak agar tidak terjadi pergeseran lateral maupun vertikal saat menerima gaya hidrodinamis.

Konfigurasi tata letak (*layout*) susunan modular direncanakan sebagai berikut:

- **Dimensi Platform Landasan:** $7,50 \text{ m} \times 5,00 \text{ m}$
- **Grid per lapis (baris $\times$ kolom):** 8 baris $\times$ 12 kolom
- **Jumlah barrel per lapis:**

$$8 \times 12 = 96 \text{ unit}$$

- **Jumlah lapis vertikal:**

2 lapis (Lapisan Bawah dan Lapisan Atas)

- **Jumlah total barrel HDPE yang digunakan:**

$$N_{\text{total}} = 8 \times 12 \times 2 = 192 \text{ unit barrel}$$

Tinggi total sistem ponton:

$$H_{\text{total_ponton}} = 2 \times H_b = 2 \times 0,90 \text{ m} = 1,80 \text{ m}$$

- **Sumbu koordinat acuan (x, y, z):** Titik origin (0,0,0) diletakkan pada pusat geometri bidang dasar terbawah susunan barrel lapisan bawah saat kondisi terapung tegak.

Estimasi berat sendiri struktur rangka penutup ganda (W_{frame}) dihitung berdasarkan konfigurasi grid penahan 3 tingkat (bawah, tengah, atas) beserta profil pengaku vertikal penahan beban:

- Panjang total profil baja UNP 50 arah x dan y diestimasikan sebesar 560,00 m untuk mencakup penahan horisontal 3 lapis dan pengaku vertikal di sekeliling grid.
- Berat satuan profil UNP 50:

$$q_{\text{UNP}} = 9,36 \text{ kg/m} \text{ (0,092 kN/m)}$$

- Berat sambungan, pelat buhul, dan baut pengikat diestimasikan sebesar 15% dari berat profil total.

$$W_{\text{frame}} = 560,00 \text{ m} \times 9,36 \text{ kg/m} \times 1,15 = 6.027,84 \text{ kg} \approx 59,13 \text{ kN}$$

c. Analisis Pembebanan (*Loading Analysis*)

Beban-beban layanan fungsional dan struktural yang bekerja dianalisis secara komprehensif:

i. Beban Mati (*Dead Load - DL*)

Beban mati terdiri dari berat komponen arsitektural hunian rumah amfibi, berat sendiri rangka pengikat baja ganda, serta berat total 192 unit barrel HDPE:

1. **Beban Arsitektural Superstruktur (W_{super}):** Diambil dari rekapitulasi beban arsitektural total sebesar 20,960 Ton ($\approx 205,62 \text{ kN}$).

2. **Berat Sendiri Rangka Pengikat Ganda (W_{frame}):**

$$6.027,84 \text{ kg} \approx 59,13 \text{ kN}$$

3. **Berat Sendiri Barrel HDPE ($W_{\text{barrel total}}$):**

$$W_{\text{barrel total}} = N_{\text{total}} \times W_d = 192 \times 8,50 \text{ kg} = 1.632,00 \text{ kg} \approx 16,01 \text{ kN}$$

4. **Total Beban Mati (DL):**

$$DL = W_{\text{super}} + W_{\text{frame}} + W_{\text{barrel total}}$$

$$DL = 205,62 \text{ kN} + 59,13 \text{ kN} + 16,01 \text{ kN} = 280,76 \text{ kN} \quad (\approx 28.619,78 \text{ kg})$$

ii. Beban Hidup (*Live Load - LL*)

Beban hidup fungsional dibatasi secara merata sesuai kapasitas aktivitas layanan penghuni maksimum yang direncanakan:

$$LL = 0,75 \text{ metric ton} = 750,00 \text{ kg} \approx 7,36 \text{ kN}$$

iii. Kombinasi Pembebanan Layanan (*Service Load Combination*)

Kombinasi beban layanan aktual tanpa faktor amplifikasi beban digunakan untuk analisis stabilitas serta draf air operasional:

1. Kondisi Tanpa Beban Hidup (Kondisi Kosong / *Unloaded Case*):

$$P_{\text{empty}} = DL = 280,76 \text{ kN}$$

2. Kondisi Beban Penuh (Kondisi Layan / *Fully Loaded Case*):

$$P_{\text{loaded}} = DL + LL = 280,76 \text{ kN} + 7,36 \text{ kN} = 288,12 \text{ kN}$$

d. Analisis Gaya Apung Maksimum dan Faktor Keamanan (Safety Factor)

Daya apung nominal maksimum total ($F_{\text{buoy max}}$) diperoleh ketika seluruh 192 unit barrel HDPE pada kedua tingkatan lapisan tercelup penuh di dalam air tawar ($\rho_{\text{air}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$):

$$\begin{aligned} F_{\text{buoy max}} &= N_{\text{total}} \times \rho_{\text{air}} \times g \times V_{\text{max}} \\ F_{\text{buoy max}} &= 192 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,2378 \text{ m}^3 \times 10^{-3} \\ &= 447,95 \text{ kN} \quad (\approx 45.662,59 \text{ kg}) \end{aligned}$$

Evaluasi Faktor Keamanan terhadap bahaya tenggelam penuh (*submergence safety factor*):

$$\begin{aligned} SF_{\text{empty}} &= \frac{F_{\text{buoy max}}}{P_{\text{empty}}} = \frac{447,95 \text{ kN}}{280,76 \text{ kN}} = 1,60 \quad (\geq 1,50 \Rightarrow \text{AMAN}) \\ SF_{\text{loaded}} &= \frac{F_{\text{buoy max}}}{P_{\text{loaded}}} = \frac{447,95 \text{ kN}}{288,12 \text{ kN}} = 1,55 \quad (\geq 1,50 \Rightarrow \text{AMAN}) \end{aligned}$$

Konfigurasi struktur apung modular vertikal ganda berpola grid $8 \times 12 \times 2$ lapis ini berhasil memenuhi kriteria faktor keamanan desain minimum rekayasa struktur apung sipil ($SF \geq 1,50$) secara optimal.

e. Perhitungan Sarat Air (Draft - T) Sistem Ponton Barrel HDPE

Karena posisi barrel diletakkan berdiri tegak secara vertikal, penampang basah arah horizontal bersifat prisma konstan di setiap lapisan. Luas total bidang basah penampang horizontal ($A_{\text{waterplane}}$) pada setiap tingkatan lapis adalah:

$$A_{\text{waterplane}} = n_{\text{lapis}} \times A_b = 96 \times 0,2642 \text{ m}^2 = 25,363 \text{ m}^2$$

di mana $n_{\text{lapis}} = 96$ merupakan jumlah unit barrel pada satu lapisan horizontal. Volume total air yang dipindahkan oleh gaya apung dihitung dengan persamaan hidrostatik:

$$V_{\text{tercelup total}} = \frac{P_{\text{total}}}{\rho_{\text{air}} \cdot g}$$

i. Sarat Air pada Kondisi Kosong ($P_{\text{empty}} = 280,76 \text{ kN}$)

Volume air dipindahkan pada kondisi kosong:

$$V_{\text{tercelup total}} = \frac{280,76 \text{ kN}}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 10^{-3}} = 28,620 \text{ m}^3$$

Kapasitas volume maksimum terbenam dari seluruh barrel di Lapisan Bawah (Lapisan 1) adalah:

$$V_{\text{lapis1}} = 96 \times 0,2378 \text{ m}^3 = 22,829 \text{ m}^3$$

Karena $V_{\text{tercelup total}} > V_{\text{lapis1}}$, ini mengindikasikan bahwa seluruh barrel di Lapisan Bawah telah terendam air sepenuhnya ($T_1 = 0,90 \text{ m}$), dan sebagian volume dari Lapisan Atas (Lapisan 2) mulai tercelup air.

Volume tambahan yang harus dipindahkan pada Lapisan Atas (V_{tambah}) adalah:

$$V_{\text{tambah}} = V_{\text{tercelup total}} - V_{\text{lapis1}} = 28,620 \text{ m}^3 - 22,829 \text{ m}^3 = 5,791 \text{ m}^3$$

Kedalaman tambahan sarat air pada Lapisan Atas (T_2) adalah:

$$T_2 = \frac{V_{\text{tambah}}}{A_{\text{waterplane}}} = \frac{5,791 \text{ m}^3}{25,363 \text{ m}^2} = 0,228 \text{ m}$$

Maka, kedalaman total sarat air kondisi kosong (T_{empty}) dihitung dari dasar bawah ponton:

$$T_{\text{empty}} = H_b + T_2 = 0,90 \text{ m} + 0,228 \text{ m} = 1,128 \text{ m} \quad (\approx 112,8 \text{ cm})$$

Tinggi bebas (*freeboard*) pada kondisi kosong:

$$FB_{\text{empty}} = H_{\text{total ponton}} - T_{\text{empty}} = 1,80 \text{ m} - 1,128 \text{ m} = 0,672 \text{ m} \quad (\approx 67,2 \text{ cm})$$

ii. Sarat Air pada Kondisi Layan Penuh ($P_{\text{loaded}} = 288,12 \text{ kN}$)

Volume air dipindahkan pada kondisi layan penuh:

$$V_{\text{tercelup total}} = \frac{288,12 \text{ kN}}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 10^{-3}} = 29,370 \text{ m}^3$$

Volume tambahan yang dipindahkan pada Lapisan Atas (V_{tambah}):

$$V_{\text{tambah}} = V_{\text{tercelup total}} - V_{\text{lapis1}} = 29,370 \text{ m}^3 - 22,829 \text{ m}^3 = 6,541 \text{ m}^3$$

Kedalaman tambahan sarat air Lapisan Atas (T_2):

$$T_2 = \frac{V_{\text{tambah}}}{A_{\text{waterplane}}} = \frac{6,541 \text{ m}^3}{25,363 \text{ m}^2} = 0,258 \text{ m}$$

Total kedalaman sarat air kondisi penuh (T_{loaded}):

$$T_{\text{loaded}} = 0,90 \text{ m} + 0,258 \text{ m} = 1,158 \text{ m} \quad (\approx 115,8 \text{ cm})$$

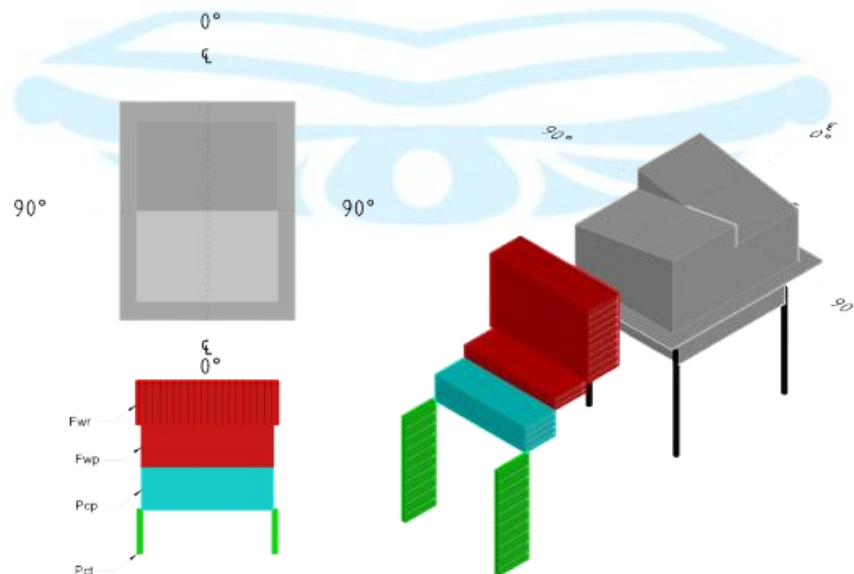
Tinggi bebas (*freeboard*) minimum pada kondisi layan penuh:

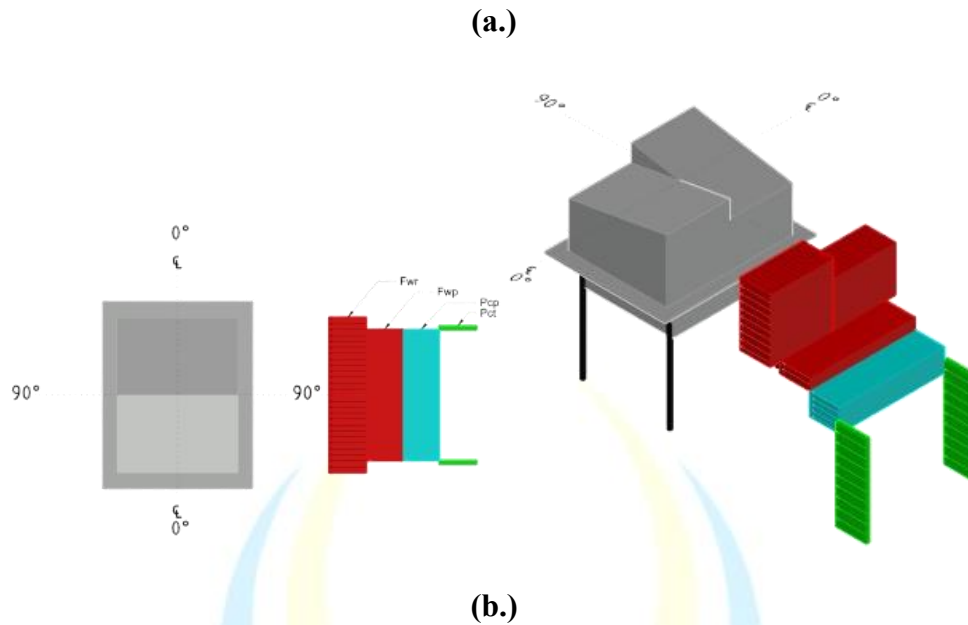
$$FB_{\text{loaded}} = 1,80 \text{ m} - 1,158 \text{ m} = 0,642 \text{ m} \quad (\approx 64,2 \text{ cm})$$

Desain tumpuk 2 lapis vertikal ini terbukti memberikan tinggi bebas (*freeboard*) yang sangat aman yaitu sebesar 64,2 cm saat kondisi beban penuh. Nilai ini jauh melampaui batas toleransi aman minimum bangunan apung kecil (15 cm), sehingga memberikan ruang bebas yang tebal terhadap terpaan gelombang air dan riak permukaan sungai/pantai.

4.1.8 Analisis Pembebanan *Lateral* dan Momen Guling

Pembebanan lateral dievaluasi melalui variasi sudut arah angin dan arus air, mulai dari 0° (menerpa tegak lurus sisi depan selebar 6 m) hingga 90° (menerpa tegak lurus sisi samping sepanjang 7 m). Berikut gambar *freebody diagram* beban angin dan arus air banjir. Dimana; Beban angin (Merah), Beban arus air pada ponton (Biru) dan Beban arus air pada tiang pandu (Hijau).





Gambar 4.8 Freebody Diagram Beban Angin dan Arus Banjir – (a.) Freebody Diagram pada sudut 0°; (b.) Freebody Diagram pada sudut 90°

a. Analisis Gaya Angin Berdasarkan Variasi Sudut Arah

Beban angin total (F_{wtot}) yang bekerja pada struktur merupakan akumulasi gaya pada struktur bangunan atas (F_{wr}), bagian lambung timbul ponton (*freeboard*) (F_{wf}), dan tiang pandu yang terpapar (F_{tiang}). Perhitungan Sistem Penahan Gaya Angin Utama (SPGAU) mengklasifikasikan rumah amfibi sebagai "Struktur Lainnya".

Klasifikasi sebagai "Struktur Lainnya" ini dipilih karena rumah amfibi memiliki karakteristik struktur yang tidak tertanam kaku di atas tanah seperti gedung konvensional, melainkan bergerak dinamis mengikuti fluktuasi muka air. Selain itu, bagian yang terpapar angin memiliki geometri yang bervariasi; meliputi komponen bangunan atas, lambung timbul ponton, serta tiang silinder. Melalui kategori "Struktur Lainnya", analisis beban angin dapat dilakukan secara lebih presisi dengan mendistribusikan koefisien gaya (C_f) yang spesifik untuk masing-masing bentuk komponen tersebut.

1. Penentuan Parameter Desain Angin

Penentuan parameter desain angin ini disintesis secara sistematis berdasarkan SNI 1727:2020, di mana nilai kecepatan angin dasar ($V = 32 \text{ m/s}$) diperoleh dari peta bahaya angin regional Australia untuk wilayah perairan, sementara faktor arah ($K_d = 0.85$) dan koefisien gaya ($C_f = 1.30$) ditarik dari tabel ketentuan geometri SPGAU untuk kategori "Struktur Lainnya" berbentuk prisma. Kondisi operasional di atas wilayah perairan terbuka menempatkan bangunan pada Eksposur C, sehingga menghasilkan koefisien eksposur velositas $K_z = 0.85$ untuk elevasi bangunan di bawah 4,5 meter. Terakhir, karena ponton ini terapung di atas hamparan air yang rata, berada dekat permukaan laut, dan memiliki karakteristik struktur penahan yang kaku (rigid), maka faktor topografi (K_{zt}), elevasi (K_e), dan efek tiupan angin (G) ditetapkan masing-masing sesuai ketentuan standar tersebut.

Kecepatan angin dasar (V) = 32 m/s

Faktor arah angin (K_d) = 0.85

Koefisien eksposur tekanan velositas (K_z) = 0.85 (Eksposur C, tinggi < 4.5 m)

Faktor topografi (K_{zt}) = 1.0

Faktor elevasi (K_e) = 1.0

Faktor efek tiupan angin (G) = 0.85

Koefisien gaya (C_f) = 1.30 (bujur sangkar)

2. Perhitungan Tekanan Angin Desain Efektif (P_w)

Tekanan velositas (q_z) dihitung dengan rumus:

$$q_z = 0.613 \cdot K_z \cdot K_{zt} \cdot K_d \cdot K_e \cdot V^2$$

$$q_z = 0.613 \cdot 0.85 \cdot 1.0 \cdot 0.85 \cdot 1.0 \cdot (32)^2 = 453.52 \text{ N/m}^2$$

Tekanan angin desain efektif (P_w) yang bekerja pada struktur:

$$P_w = q_z \cdot G \cdot C_f$$

$$P_w = 453.52 \text{ N/m}^2 \cdot 0.85 \cdot 1.30 = 501.14 \text{ N/m}^2$$

3. Perhitungan Gaya Angin pada Bangunan Atas (F_{wr})

Dengan dimensi $L_r = 8.3 \text{ m}$, $B_r = 6.3 \text{ m}$, dan $H_r = 3.575 \text{ m}$. Luas proyeksi ortogonal (A_{fr}) dipengaruhi oleh sudut arah (θ).

$$F_{wr,\theta} = P_w \cdot (L_r \cdot \sin \theta + B_r \cdot \cos \theta) \cdot H_r$$

Sudut 0° :

$$\begin{aligned} F_{wr,0^\circ} &= 501.14 \cdot (8.3 \cdot \sin 0^\circ + 6.3 \cdot \cos 0^\circ) \cdot 3.575 \\ &= 501.14 \cdot (0 + 6.3) \cdot 3 = 9471.57 \text{ N (9.47 kN)} \end{aligned}$$

Sudut 30° :

$$\begin{aligned} F_{wr,30^\circ} &= 501.14 \cdot (8.3 \cdot \sin 30^\circ + 6.3 \cdot \cos 30^\circ) \cdot 3.575 \\ &= 501.14 \cdot (4.15 + 5.45) \cdot 3 = 14441.84 \text{ N (14.44 kN)} \end{aligned}$$

Sudut 45° :

$$\begin{aligned} F_{wr,45^\circ} &= 501.14 \cdot (8.3 \cdot \sin 45^\circ + 6.3 \cdot \cos 45^\circ) \cdot 3.575 \\ &= 501.14 \cdot (5.87 + 4.45) \cdot 3 = 15520.99 \text{ N (15.52 kN)} \end{aligned}$$

Sudut 60° :

$$\begin{aligned} F_{wr,60^\circ} &= 501.14 \cdot (8.3 \cdot \sin 60^\circ + 6.3 \cdot \cos 60^\circ) \cdot 3.575 \\ &= 501.14 \cdot (7.19 + 3.15) \cdot 3 = 15542.42 \text{ N (15.54 kN)} \end{aligned}$$

Sudut 90° :

$$\begin{aligned} F_{wr,90^\circ} &= 501.14 \cdot (8.3 \cdot \sin 90^\circ + 6.3 \cdot \cos 90^\circ) \cdot 3.575 \\ &= 501.14 \cdot (8.3 + 0) \cdot 3 = 12478.42 \text{ N (12.47 kN)} \end{aligned}$$

4. Perhitungan Gaya Angin pada *Freeboard* Ponton (F_{wf})

Dengan dimensi $L_p = 7 \text{ m}$, $B_p = 6 \text{ m}$, dan $H_{fb} = 0.7 \text{ m}$.

$$F_{wf,\theta} = P_w \cdot (L_p \cdot \sin \theta + B_p \cdot \cos \theta) \cdot H_{fb}$$

Sudut 0° :

$$\begin{aligned} F_{wf,0^\circ} &= 501.14 \cdot (7 \cdot \sin 0^\circ + 6 \cdot \cos 0^\circ) \cdot 0.7 = 501.14 \cdot (0 + 6) \cdot 0.7 \\ &= 2104.79 \text{ N (2.10 kN)} \end{aligned}$$

Sudut 30° :

$$F_{wf,30^\circ} = 501.14 \cdot (7 \cdot \sin 30^\circ + 6 \cdot \cos 30^\circ) \cdot 0.7$$

$$= 501.14 \cdot (3.5 + 5.20) \cdot 0.7 = 3050.60 \text{ N (3.05 kN)}$$

Sudut 45°:

$$F_{wf,45^\circ} = 501.14 \cdot (7 \cdot \sin 45^\circ + 6 \cdot \cos 45^\circ) \cdot 0.7$$

$$= 501.14 \cdot (4.95 + 4.24) \cdot 0.7 = 3224.68 \text{ N (3.22 kN)}$$

Sudut 60°:

$$F_{wf,60^\circ} = 501.14 \cdot (7 \cdot \sin 60^\circ + 6 \cdot \cos 60^\circ) \cdot 0.7$$

$$= 501.14 \cdot (6.06 + 3) \cdot 0.7 = 3179.00 \text{ N (3.17 kN)}$$

Sudut 90°:

$$F_{wf,90^\circ} = 501.14 \cdot (7 \cdot \sin 90^\circ + 6 \cdot \cos 90^\circ) \cdot 0.7$$

$$= 501.14 \cdot (7 + 0) \cdot 0.7 = 2455.59 \text{ N (2.45 kN)}$$

5. Akumulasi Beban Angin Total (F_{wtot})

Dengan nilai gaya angin konstan pada tiang pandu sebesar $F_{tiang} = 1.29 \text{ kN}$.

$$F_{wtot,\theta} = F_{wr,\theta} + F_{wf,\theta} + F_{tiang}$$

Sudut 0°:

$$F_{wtot,0^\circ} = 9.47 \text{ kN} + 2.10 \text{ kN} + 1.29 \text{ kN} = 11.57 \text{ kN}$$

Sudut 30°:

$$F_{wtot,30^\circ} = 14.44 \text{ kN} + 3.05 \text{ kN} + 1.29 \text{ kN} = 17.49 \text{ kN}$$

Sudut 45°:

$$F_{wtot,45^\circ} = 15.52 \text{ kN} + 3.22 \text{ kN} + 1.29 \text{ kN} = 18.74 \text{ kN}$$

Sudut 60°:

$$F_{wtot,60^\circ} = 15.54 \text{ kN} + 3.17 \text{ kN} + 1.29 \text{ kN} = 18.72 \text{ kN}$$

Sudut 90°:

$$F_{wtot,90^\circ} = 12.47 \text{ kN} + 2.45 \text{ kN} + 1.29 \text{ kN} = 14.93 \text{ kN}$$

b. Analisis Gaya Arus Hidrodinamis dan Beban Lateral Total

Penentuan Tekanan Arus Ekvivalen (P_{arus}) Berdasarkan kecepatan arus rata-rata $V_s = 1.5 \text{ m/s}$, tekanan dibedakan berdasarkan bentuk komponen struktur bawah air:

Tekanan pada ponton beton persegi ($C_D = 1.4$):

$$P_{cp} = 0.514 \cdot 1.4 \cdot (1.5)^2 = 1.6191 \text{ kN/m}^2$$

Tekanan pada tiang pandu ($C_D = 0.7$):

$$P_{ct} = 0.514 \cdot 0.7 \cdot (1.5)^2 = 0.8095 \text{ kN/m}^2$$

Gaya arus dihitung berdasarkan tekanan dasar aliran $P_{arus} = 1.7633 \text{ kN/m}^2$ yang menumbuk luasan tercelup ($draft T_p = 1.5 \text{ m}$). Komponen area ortogonal adalah $A_x = 6 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 9 \text{ m}^2$ dan $A_y = 7 \text{ m} \cdot 1.5 \text{ m} = 10.5 \text{ m}^2$.

$$F_{cx,\theta} = P_{cp} \cdot (\cos \theta)^2 \cdot A_x$$

$$F_{cy,\theta} = P_{cp} \cdot (\sin \theta)^2 \cdot A_y$$

$$F_{cp,\theta} = \sqrt{F_{cx,\theta}^2 + F_{cy,\theta}^2}$$

$$F_{ctot,\theta} = F_{cp,\theta} + F_{ct}$$

Sudut 0° :

$$F_{cx,0^\circ} = 1.6191 \cdot (1)^2 \cdot 9 = 14.57 \text{ kN}$$

$$F_{cy,0^\circ} = 1.6191 \cdot (0)^2 \cdot 10.5 = 0 \text{ kN}$$

$$F_{cp,0^\circ} = 14.57 \text{ kN} \rightarrow F_{ctot,0^\circ} = 14.57 + 1.29 = 15.86 \text{ kN}$$

Sudut 30° :

$$F_{cx,30^\circ} = 1.6191 \cdot (0.866)^2 \cdot 9 = 1.6191 \cdot 0.75 \cdot 9 = 10.93 \text{ kN}$$

$$F_{cy,30^\circ} = 1.6191 \cdot (0.5)^2 \cdot 10.5 = 1.6191 \cdot 0.25 \cdot 10.5 = 4.25 \text{ kN}$$

$$F_{cp,30^\circ} = \sqrt{10.93^2 + 4.25^2} = 11.73 \text{ kN} \rightarrow F_{ctot,30^\circ} = 11.73 + 1.29 = 13.02 \text{ kN}$$

Sudut 45° :

$$F_{cx,45^\circ} = 1.6191 \cdot (0.707)^2 \cdot 9 = 1.6191 \cdot 0.5 \cdot 9 = 7.29 \text{ kN}$$

$$F_{cy,45^\circ} = 1.6191 \cdot (0.707)^2 \cdot 10.5 = 1.6191 \cdot 0.5 \cdot 10.5 = 8.50 \text{ kN}$$

$$F_{cp,45^\circ} = \sqrt{7.29^2 + 8.50^2} = 11.20 \text{ kN} \rightarrow F_{ctot,45^\circ} = 11.20 + 1.29 = 12.49 \text{ kN}$$

Sudut 60°:

$$F_{cx,60^\circ} = 1.6191 \cdot (0.5)^2 \cdot 9 = 1.6191 \cdot 0.25 \cdot 9 = 3.64 \text{ kN}$$

$$F_{cy,60^\circ} = 1.6191 \cdot (0.866)^2 \cdot 10.5 = 1.6191 \cdot 0.75 \cdot 10.5 = 12.75 \text{ kN}$$

$$F_{cp,60^\circ} = \sqrt{3.64^2 + 12.75^2} = 13.26 \text{ kN} \rightarrow F_{ctot,60^\circ} = 13.26 + 1.29 = 14.55 \text{ kN}$$

Sudut 90°

$$F_{cx,90^\circ} = 1.6191 \cdot (0)^2 \cdot 9 = 0 \text{ kN}$$

$$F_{cy,90^\circ} = 1.6191 \cdot (1)^2 \cdot 10.5 = 1.6191 \cdot 1 \cdot 10.5 = 17.00 \text{ kN}$$

$$F_{cp,90^\circ} = 17.00 \text{ kN} \rightarrow F_{ctot,90^\circ} = 17.00 + 1.29 = 18.29 \text{ kN}$$

2. Beban Lateral Total (F_{total})

$$F_{total,\theta} = F_{wtot,\theta} + F_{ctot,\theta}$$

Sudut 0°:

$$F_{total,0^\circ} = 11.57 \text{ kN} + 15.86 \text{ kN} = 27.43 \text{ kN}$$

Sudut 30°:

$$F_{total,30^\circ} = 17.49 \text{ kN} + 13.02 \text{ kN} = 30.51 \text{ kN}$$

Sudut 45°:

$$F_{total,45^\circ} = 18.74 \text{ kN} + 12.49 \text{ kN} = 31.23 \text{ kN}$$

Sudut 60°:

$$\begin{aligned} F_{total,60^\circ} &= 18.72 \text{ kN} + 14.55 \text{ kN} \\ &= 33.70 \text{ kN (Beban Lateral Maksimum)} \end{aligned}$$

Sudut 90°:

$$F_{total,90^\circ} = 14.93 \text{ kN} + 18.29 \text{ kN} = 33.22 \text{ kN}$$

c. Analisis Momen Guling dan Tiang Pandu

Gaya lateral menimbulkan momen guling (M_{total}) yang diukur dari titik jepit di dasar sistem. Lengan momen arus air berada pada elevasi $Z_c = 5.25 \text{ m}$, sedangkan lengan momen angin atas pada $Z_w = 7.85 \text{ m}$.

1. Perhitungan Momen Total (M_{total})

$$M_{total,\theta} = (F_{ctot,\theta} \cdot Z_c) + (F_{wtot,\theta} \cdot Z_w)$$

Karena $Z_c = Z_w = 5.25 \text{ m}$, persamaan dapat disederhanakan menjadi:

$$M_{total,\theta} = (F_{ctot,\theta} + F_{wtot,\theta}) \cdot 5.25 \text{ m}$$

Sudut 0° :

$$M_{total,0^\circ} = (15.87 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m}) + (11.57 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m})$$

$$M_{total,0^\circ} = 83.32 \text{ kNm} + 60.74 \text{ kNm} = 144.06 \text{ kNm}$$

Sudut 30° :

$$M_{total,30^\circ} = (12.77 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m}) + (17.49 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m})$$

$$M_{total,30^\circ} = 67.04 \text{ kNm} + 91.82 \text{ kNm} = 158.86 \text{ kNm}$$

Sudut 45° :

$$M_{total,45^\circ} = (12.19 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m}) + (18.74 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m})$$

$$M_{total,45^\circ} = 64.00 \text{ kNm} + 98.39 \text{ kNm} = 162.39 \text{ kNm}$$

Sudut 60° :

$$M_{total,60^\circ} = (14.45 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m}) + (18.72 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m})$$

$$M_{total,60^\circ} = 75.86 \text{ kNm} + 97.18 \text{ kNm} = 175.56 \text{ kNm}$$

Sudut 90° :

$$M_{total,90^\circ} = (18.51 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m}) + (14.93 \text{ kN} \cdot 5.25 \text{ m})$$

$$M_{total,90^\circ} = 98.28 \text{ kNm} + 78.38 \text{ kNm} = 174.14 \text{ kNm}$$

Nilai momen maksimum (M_{maks}) terjadi pada sudut 60° dengan nilai 175.56 kNm.

Nilai momen untuk tiang pandu (M_{tiang}) didapatkan sebagai berikut:

$$M_{tiang} = \frac{M_{maks}}{\text{Jumlah Tiang}}$$

$$M_{tiang} = \frac{175.56 \text{ kNm}}{4 \text{ buah}} = 43.89 \text{ kNm}$$

Tabel 4.17 Rekapitulasi Beban Lateral Dan

Sudut Arah (θ)	Gaya Angin Total (F_{wtot})	Gaya Arus Total (F_{ctot})	Beban Lateral Total (F_{total})	Momen Guling Total (M_{total})
0°	11.57 kN	15.86 kN	27.43 kN	144.06 kNm
30°	17.49 kN	13.02 kN	30.51 kN	158.86 kNm
45°	18.74 kN	12.49 kN	31.23 kN	162.39 kNm
60°	18.72 kN	14.55 kN	33.70 kN	174.14 kNm
90°	14.93 kN	18.29 kN	33.22 kN	175.56 kNm

6. Pembebanan Hidrostatik Pada Pelat Beton

Pada perencanaan struktur rumah amfibi, pelat beton bagian dasar akan menerima gaya angkat ke atas (buoyancy) akibat tekanan air. Pembebanan ini dikategorikan sebagai beban hidrostatik yang terdistribusi secara merata pada seluruh luasan area kontak dasar pelat beton. Berdasarkan rekapitulasi data pembebanan dan gaya apung yang telah dihitung sebelumnya, diketahui bahwa total beban hidrostatik (F) yang bekerja mendorong struktur ke atas adalah sebesar 621,74 kN. Beban hidrostatik ini bekerja pada bidang dasar pelat beton yang memiliki dimensi panjang 7 meter dan lebar 6 meter, sehingga menghasilkan total luasan penampang tekan (A) sebesar 42 m².

Untuk menentukan besaran tegangan atau tekanan merata hidrostatik (q) yang bekerja pada elemen struktur tersebut, total beban gaya hidrostatik dibagi dengan luasan penampang dasar pelat beton. Penjabaran rumus dan proses perhitungan matematisnya adalah sebagai berikut:

$$q = \frac{F}{A}$$

$$q = \frac{621,74 \text{ kN}}{42 \text{ m}^2}$$

$$q = 14,8 \text{ kN/m}^2$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, diperoleh besaran tekanan merata hidrostatik yang menekan dasar pelat beton ke arah atas adalah sebesar $14,8 \text{ kN/m}^2$ atau setara dengan $14,8 \text{ kPa}$. Nilai tekanan merata ini merupakan parameter beban yang sangat penting dan akan diaplikasikan sebagai beban luasan (area load) dalam tahapan pemodelan struktur untuk menganalisis lendutan serta kapasitas pelat beton dasar saat rumah amfibi dalam kondisi mengapung.

4.1.9 Perencanaan Pelat Lantai Ponton Beton

1. Data Perencanaan dan Asumsi

Panjang Pelat (L_y): 6.0 meter

Lebar Pelat (L_x): 3.5 meter

Rasio Bentang (L_y/L_x):

$$6.0/3.5 = 1.71$$

Sistem lantai diklasifikasikan dan didesain sebagai Pelat Dua Arah.

Mutu Beton (f_c'): 25 MPa

Mutu Baja Tulangan (f_y): 420 MPa (Tulangan Ulir/*Deform*)

Tebal Selimut Beton (cc):

$$cc = 20 \text{ mm}$$

2. Penentuan Tebal Pelat (h)

Ketebalan minimum disyaratkan:

$$h_{min} = \frac{L_x}{30}$$

$$h_{min} = \frac{3500}{30}$$

$$h_{min} = 116.6 \text{ mm}$$

Tebal pelat ditetapkan: $h = 150 \text{ mm}$

Pengecekan tebal: $150 \text{ mm} \geq 116.6 \text{ mm}$.

3. Pembebanan Pelat:

Beban Desain Ultimate (q_u):

$$q_u = 14.8 \text{ kN/m}^2$$

4. Analisis Momen

Momen desain maksimum tumpuan sederhana pada lintasan bentang pendek ($L_x = 3.5 \text{ m}$) dihitung sebagai:

$$M_{u,maks} = \frac{q_u \cdot L_x^2}{8}$$

$$M_{u,maks} = \frac{14.8 \times 3.5^2}{8}$$

$$M_{u,maks} = \frac{14.8 \times 12.25}{8}$$

$$M_{u,maks} = 22.66 \text{ kNm/m}$$

Nilai momen ultimate sebesar 22.66 kNm/m ini akan digunakan sebagai dasar desain tulangan lentur.

5. Perhitungan Tulangan (Atas dan Bawah)

Tinggi efektif pelat (d) menggunakan tulangan D10:

$$d = h - cc - \left(\frac{1}{2} \cdot D \right)$$

$$d = 150 - 20 - 5$$

$$d = 125 \text{ mm}$$

Luas Tulangan Minimum ($A_{s,min}$):

$$A_{s,min} = 0.0018 \cdot b \cdot h$$

$$A_{s,min} = 0.0018 \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 150 \text{ mm}$$

$$A_{s,min} = 270 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Kebutuhan Tulangan Lentur ($A_{s,perlu}$):

Nilai tahanan momen (R_n):

$$R_n = \frac{M_{u,maks}}{\phi \cdot b \cdot d^2}$$

$$R_n = \frac{22.66 \times 10^6}{0.9 \cdot 1000 \cdot 125^2}$$

$$R_n = 1.611 \text{ MPa}$$

Menghitung rasio tulangan yang dibutuhkan (ρ):

$$\rho = \frac{0.85 \cdot f_c'}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot R_n}{0.85 \cdot f_c'}} \right)$$

$$\rho = \frac{0.85 \cdot 25}{420} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 1.611}{0.85 \cdot 25}} \right)$$

$$\rho = 0.0506(1 - \sqrt{1 - 0.1516})$$

$$\rho = 0.0506(1 - 0.921)$$

$$\rho = 0.0506 \times 0.079$$

$$\rho = 0.0040$$

Luas tulangan lentur yang dibutuhkan:

$$A_{s,perlu} = \rho \cdot b \cdot d$$

$$A_{s,perlu} = 0.0040 \cdot 1000 \cdot 125$$

$$A_{s,perlu} = 500 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Karena $A_{s,perlu} > A_{s,min}$, maka luas tulangan yang digunakan untuk desain adalah $A_{s,perlu} = 500 \text{ mm}^2/\text{m}$.

Pemilihan Tulangan dan Spasi:

Menggunakan baja tulangan **D10** (Luas 1 batang = 78.5 mm^2). Spasi yang dibutuhkan:

$$s = \frac{1000}{\frac{500}{78.5}}$$

$$s = 157 \text{ mm}$$

Spasi maksimum dibatasi pada:

$$s_{maks} = 2h$$

$$s_{maks} = 300 \text{ mm}$$

Luas tulangan terpasang ($A_{s,prov}$):

$$A_{s,prov} = \frac{1000}{150} \times 78.5$$

$$A_{s,prov} = 523.3 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Konfigurasi Tulangan:

Tulangan Atas (Tumpuan) Arah X dan Y: D10 - 150

Tulangan Bawah (Lapangan) Arah X dan Y: D10 - 150

6. Kontrol Kapasitas Momen (ϕM_n) Faktor reduksi (ϕ) = 0.90 Tinggi blok tegangan beton ekuivalen (a) dari regangan ekuivalen:

$$a = \frac{A_{s,prov} \cdot f_y}{0.85 \cdot f_c' \cdot b}$$

$$a = \frac{523.3 \cdot 420}{0.85 \cdot 25 \cdot 1000}$$

$$a = 10.34 \text{ mm}$$

Kapasitas momen nominal tereduksi (ϕM_n):

$$\phi M_n = \phi \cdot A_{s,prov} \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$\phi M_n = 0.9 \cdot 523.3 \cdot 420 \cdot \left(125 - \frac{10.34}{2}\right)$$

$$\phi M_n = 197,807.4 \cdot 119.83$$

$$\phi M_n = 23.70 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n = 23.70 \text{ kNm/m}$$

Pengecekan Kekuatan:

$$\phi M_n \geq M_{u,maks}$$

$$23.70 \text{ kNm/m} \geq 22.66 \text{ kNm/m (AMAN)}$$

7. Kontrol Defleksi / Lendutan

Karena tebal pelat desain (150 mm) melampaui syarat tebal minimum (116.6 mm), batas layan lendutan terpenuhi. Perhitungan defleksi seketika dan jangka panjang tidak wajib dilakukan.

4.1.9 Analisis Elemen Hingga Struktur Frame Barrel HDPE Menggunakan SolidWorks Simulation

Untuk memastikan keandalan mekanis dan integritas struktural dari sistem kerangka pengikat (grid frame/cage) yang menahan susunan modular barrel *High-Density Polyethylene* (HDPE), dilakukan simulasi komputasional berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi respons struktur kerangka baja terhadap skenario pembebanan maksimum, guna mengetahui distribusi tegangan, deformasi, regangan, serta tingkat keamanan struktur.

a. Parameter Pemodelan dan Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

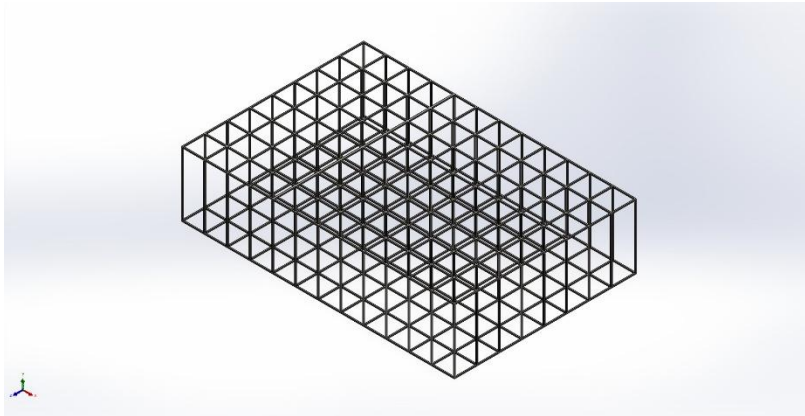
Model tiga dimensi (3D) struktur kerangka (frame1) yang disimulasikan memiliki massa total sebesar 3.303,61 kg dengan volume mencapai 0,420842 m³. Material yang diaplikasikan pada keseluruhan komponen kerangka ini adalah baja karbon ASTM A36 Steel. Material ini diklasifikasikan sebagai Linear Elastic Isotropic dengan properti mekanis utama sebagai berikut:

- Tegangan Leleh (Yield Strength): 250,00 MPa ($2,50 \times 10^8$ N/m²)
- Kekuatan Tarik (Tensile Strength): 400,00 MPa ($4,00 \times 10^8$ N/m²)
- Modulus Elastisitas (Elastic Modulus): 205 GPa ($2,05 \times 10^{11}$ N/m²)
- Massa Jenis (Mass Density): 7.850 kg/m³

Dalam penentuan kondisi batas (*Boundary Conditions*), simulasi numerik ini menetapkan kondisi tumpuan jepit (*Fixed Geometry*) pada area landasan bawah kerangka. Pembebanan (*Apply Force*) yang diaplikasikan pada model mencakup gaya normal utama sebesar 196.130 N (merepresentasikan beban vertikal total arsitektural dan daya apung) serta gaya dorong lateral sebesar 8.360 N yang mewakili tekanan arus dan angin badai pada elevasi tertinggi.

b. Kualitas Jaring Elemen (*Mesh Quality*)

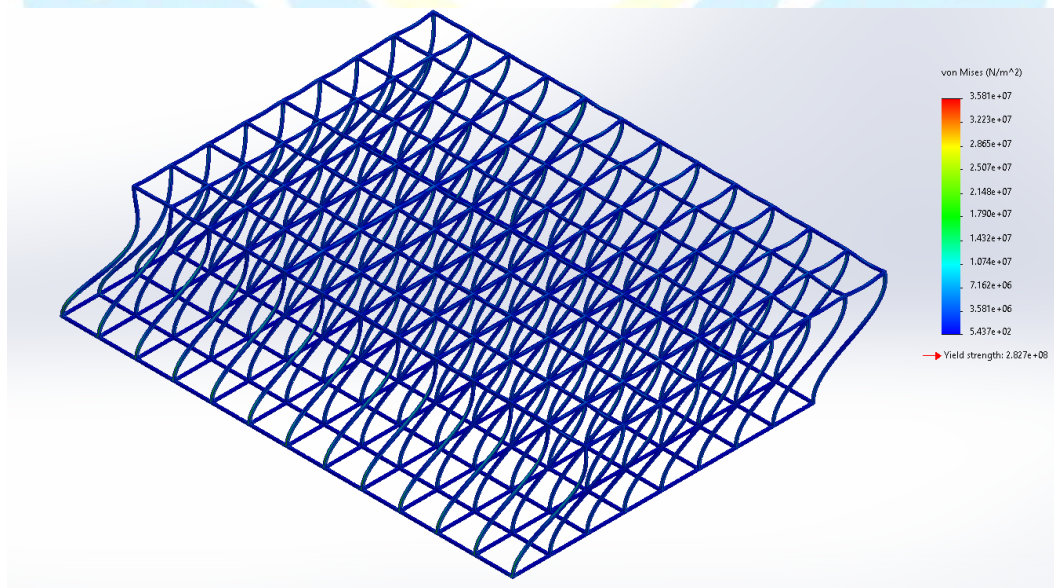
Keakuratan hasil analisis sangat ditentukan oleh kualitas proses *meshing* atau pembagian elemen. Dalam studi ini, metode yang digunakan adalah *Solid Mesh* dengan algoritma *Blended curvature-based mesh*, yang berfungsi untuk merapatkan elemen secara optimal pada bagian sambungan rangka yang rumit. Melalui proses komputasi, model kerangka terbagi menjadi 64.927 titik simpul (*nodes*) dan 25.810 elemen padat (*elements*). Untuk memastikan kualitas elemen yang tinggi, pengaturan *Jacobian points* ditetapkan pada 16 titik. Hasil evaluasi menunjukkan tidak ada elemen yang mengalami distorsi (0%). Selain itu, 14,8% elemen memiliki rasio aspek di bawah 3, dan hanya 1,19% yang rasionya di atas 10. Tidak adanya elemen yang terdistorsi ini mengonfirmasi bahwa proses *meshing* telah berjalan dengan sangat baik dan terhindar dari kesalahan komputasi *solver*.



Gambar 4.9 Model Frame dalam Solidworks

c. Hasil Analisis Tegangan (*Von Mises Stress*)

Analisis kekuatan struktur kerangka dievaluasi menggunakan kriteria kegagalan material ulet, yaitu kriteria tegangan Von Mises. Dari hasil simulasi, diperoleh peta distribusi tegangan dengan rincian sebagai berikut:



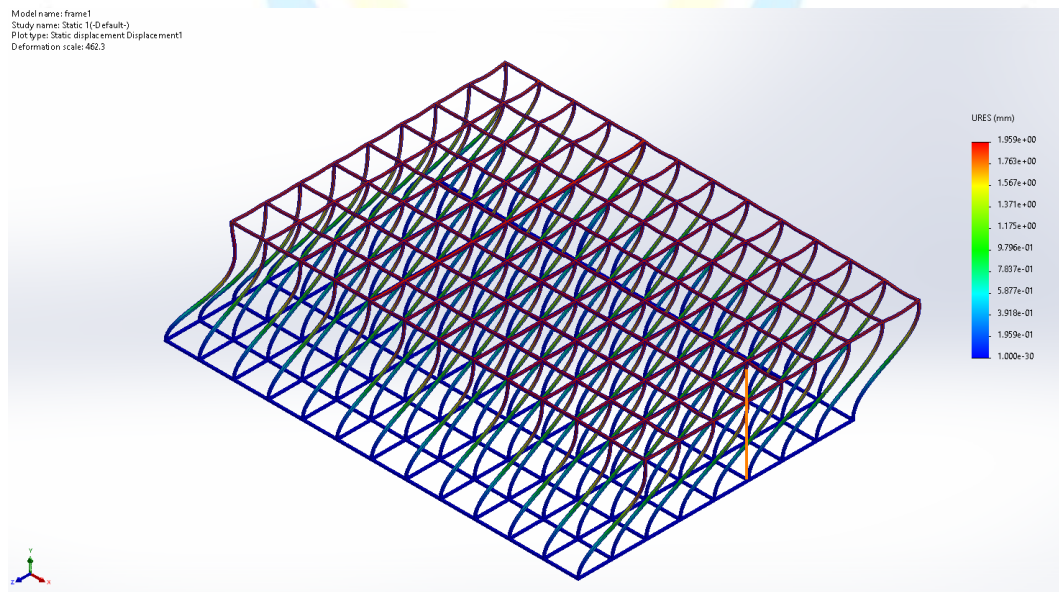
Gambar 4.10 Hasil *Von Mises Stress* Simulasi Solidworks

- Tegangan Minimum: $5,437 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ (0,00054 MPa)
- Tegangan Maksimum: $3,581 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ (35,81 MPa) yang terkonsentrasi pada Node 34268.

Tegangan maksimum sebesar 35,81 MPa terjadi pada area persimpangan rangka yang menerima distribusi beban vertikal dan lateral tertinggi. Mengingat tegangan leleh (*yield strength*) material baja ASTM A36 adalah 250,00 MPa, nilai tegangan maksimum yang terjadi (35,81 MPa) masih berada sangat jauh di bawah batas luluh material. Hal ini membuktikan bahwa struktur kerangka baja pengikat barrel HDPE tidak akan mengalami bengkok permanen (deformasi plastis) akibat pembebanan maksimum.

d. Hasil Analisis Perpindahan (*Displacement* / URES)

Parameter *Displacement* (URES) digunakan untuk mengukur seberapa besar defleksi atau simpangan fisik struktur kerangka dari posisi awalnya. Pengendalian defleksi ini penting untuk memastikan susunan barrel HDPE di dalamnya tidak bergeser atau longgar.



Gambar 4.11 Hasil *Displacement* Simulasi Solidworks

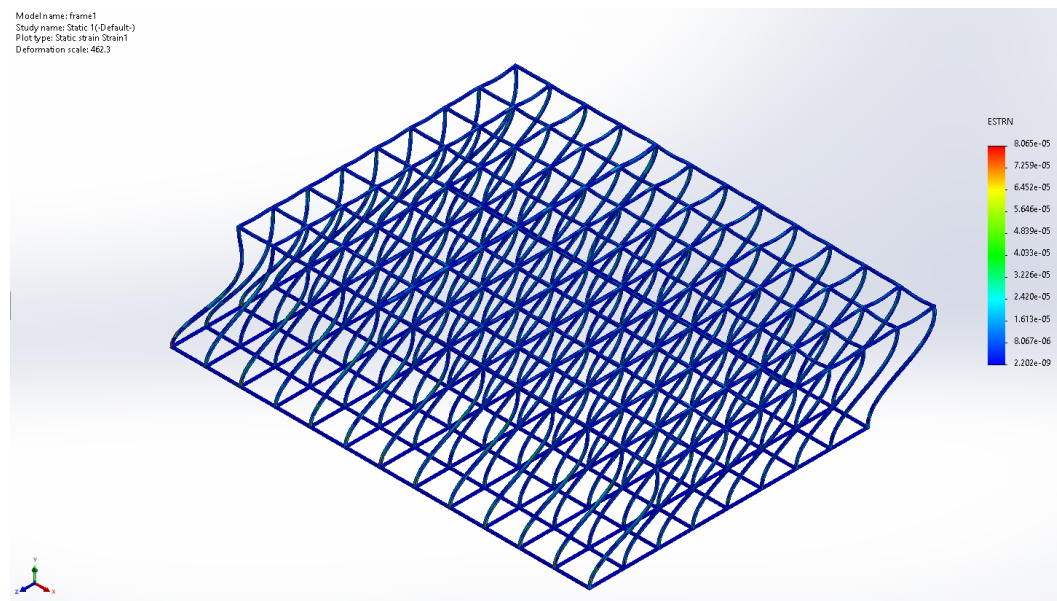
- Defleksi Minimum: 0 mm (pada area tumpuan jepit).
- Defleksi Maksimum: 1,959 mm yang terjadi pada Node 7869 di bagian struktur terluar.

Nilai simpangan maksimum yang berada di bawah 2 mm (tepatnya 1,959 mm) menunjukkan bahwa struktur ini memiliki tingkat kekakuan (*stiffness*) yang sangat tinggi. Perubahan bentuk yang sangat kecil ini membuktikan bahwa

rancangan rangka grid baja mampu menopang 192 unit baren (*barrel*) HDPE dengan kuat, tanpa adanya peregangan yang dapat mengganggu stabilitas ponton.

e. Hasil Analisis Regangan (*Equivalent Strain* / ESTRN)

Regangan ekuivalen menunjukkan rasio perubahan bentuk per satuan panjang pada serat material baja akibat beban mekanis luar.



Gambar 4.12 Hasil *Equivalent Strain* Simulasi Solidworks

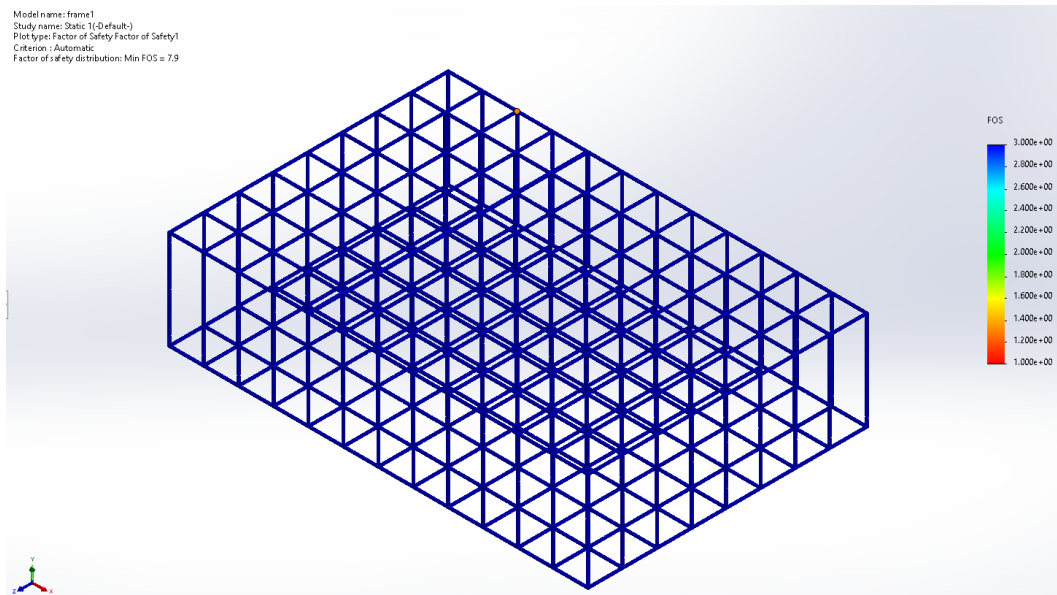
- Regangan Minimum: $2,202 \times 10^{-9}$ (Elemen 22558)
- Regangan Maksimum: $8,065 \times 10^{-5}$ (Elemen 11648)

Nilai regangan maksimum yang berada pada orde pangkat minus lima ($0,00008065$) membuktikan secara pasti bahwa perubahan molekuler pada material masih berada di dalam zona elastis murni menurut Hukum Hooke. Struktur kerangka akan memulihkan bentuknya secara sempurna setelah beban arus dan angin mereda.

f. Evaluasi Faktor Keamanan (*Factor of Safety* / FOS)

Faktor Keamanan (FOS) merupakan indikator krusial penentu kelayakan desain. Nilai ini dihitung berdasarkan rasio tegangan leleh material dibagi dengan tegangan Von Mises maksimum yang terjadi pada struktur.

Berdasarkan perhitungan komputasi SolidWorks Simulation, diperoleh rentang nilai Faktor Keamanan sebagai berikut:



Gambar 4.13 Hasil *Factor of Safety* Simulasi Solidworks

- FOS Minimum:

$$\text{FOS} = \frac{250,00 \text{ MPa}}{35,81 \text{ MPa}} = 6,98 \text{ (berlokasi di Node 34268)}$$
- FOS Maksimum: 519.900

Berdasarkan kriteria desain struktur baja, nilai faktor keamanan (Factor of Safety/FOS) minimum sebesar 6,98 menunjukkan bahwa struktur rangka penahan barrel HDPE memiliki tingkat keamanan yang sangat tinggi, karena nilainya jauh melebihi batas minimum 1,5. Angka ini memastikan bahwa material baja mempunyai cadangan kekuatan hampir delapan kali lipat dari beban puncak sebelum mencapai titik kegagalan mekanis. Dengan demikian, penggunaan material ASTM A36 untuk rangka grid ini dinilai sangat aman, mampu menahan gaya apung ke atas dengan baik, serta dapat menjaga stabilitas susunan barrel dalam menopang beban hunian rumah amfibi.

4.1.10 Hasil Simulasi Stabilitas Menggunakan Bentley MOSES

Analisis stabilitas struktur terapung, baik dalam kondisi statis maupun dinamis, merupakan parameter pengujian yang esensial dalam perancangan rumah amfibi.

Evaluasi komputasional ini dijalankan menggunakan perangkat lunak *Bentley MOSES* untuk memodelkan secara akurat interaksi hidrostatik dan hidrodinamik antara geometri struktur ponton beton dengan kondisi perairan sekitarnya.

Simulasi ini menguji empat variasi ketinggian dinding ponton, yaitu $h = 2,0$ m; 2,2 m; 2,5 m; dan 3,0 m. Pengujian dilakukan terhadap dua skenario pembebanan: pembebanan simetris (distribusi beban merata sempurna) dan pembebanan asimetris (distribusi beban yang terpusat pada sisi tertentu akibat pergeseran titik berat). Selain itu, simulasi ini juga memasukkan variabel gangguan lingkungan eksternal berupa beban angin lateral dengan kecepatan ekstrem 50 knot.

Standar teknis yang dianalisis dalam simulasi ini meliputi kriteria stabilitas awal (parameter tinggi metasentrum atau GM yang idealnya berada di antara 0,15 m hingga 1,50 m) berdasarkan regulasi kelautan, serta parameter lambung bebas (*freeboard*) dan kedalaman sarat air (*draft*). Seluruh data teknis yang dijabarkan pada subbab ini bersumber dari komputasi model pada dokumen keluaran MOSES.

a. Keseimbangan Awal Hidrostatik (*Intact Stability*)

Tahap awal analisis mengevaluasi kondisi keseimbangan struktur pada saat diam (statis) sebelum menerima gangguan gaya guling dinamis. Pengujian ini menghasilkan data terkait letak pusat gravitasi atau Titik Berat (KG), kedalaman bagian yang terendam atau sarat air (*draft*), serta kemiringan awal struktur (*initial roll*) yang ditimbulkan oleh variasi tinggi ponton.

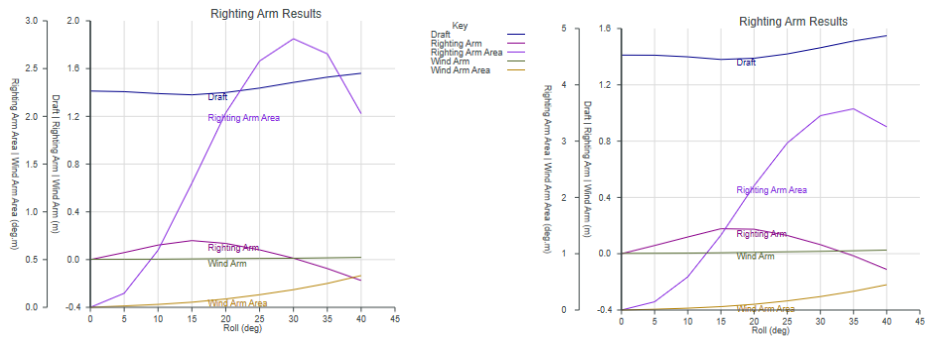
**Tabel 4.18 Keseimbangan Awal pada Berbagai Ketinggian Ponton
(Output MOSES)**

Tinggi Ponton (h)	Kondisi Beban	Titik Berat / KG (m)	Massa Total (Ton)	Sarat Air / Draft (m)	Kemiringan Awal (°)	Lengan Angin / Wind Arm (m)
2,0 m	Simetris	2,160	60,78	1,410	0,00	0,003
	Asimetris	2,160	60,78	1,410	-2,11	0,000

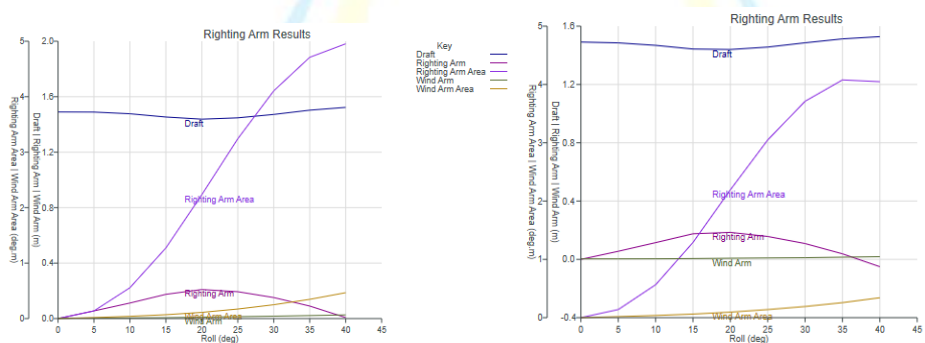
Tinggi Ponton (h)	Kondisi Beban	Titik Berat / KG (m)	Massa Total (Ton)	Sarat Air / Draft (m)	Kemiringan Awal (°)	Lengan Angin / Wind Arm (m)
2,2 m	Simetris	2,130	64,18	1,491	0,00	0,004
	Asimetris	2,130	64,18	1,490	-2,12	0,003
2,5 m	Simetris	2,110	65,63	1,525	0,00	0,005
	Asimetris	2,110	65,63	1,524	-2,11	0,005
3,0 m	Simetris	2,030	76,64	1,781	0,00	0,006
	Asimetris	2,030	76,64	1,779	-2,02	0,006

Berdasarkan data pada Tabel 4.16, penambahan dimensi vertikal pada dinding ponton menunjukkan korelasi linear terhadap peningkatan massa total struktur. Pada ketinggian $h=2,0$ m, massa total tercatat sebesar 60,78 Ton, dan massa ini terus meningkat secara signifikan menjadi 76,64 Ton pada desain ponton $h=3,0$ m. Peningkatan massa ini secara langsung berdampak pada volume air yang harus dipindahkan (prinsip Archimedes), yang menyebabkan nilai sarat air (*draft*) bertambah dalam dari 1,410 meter menjadi 1,781 meter.

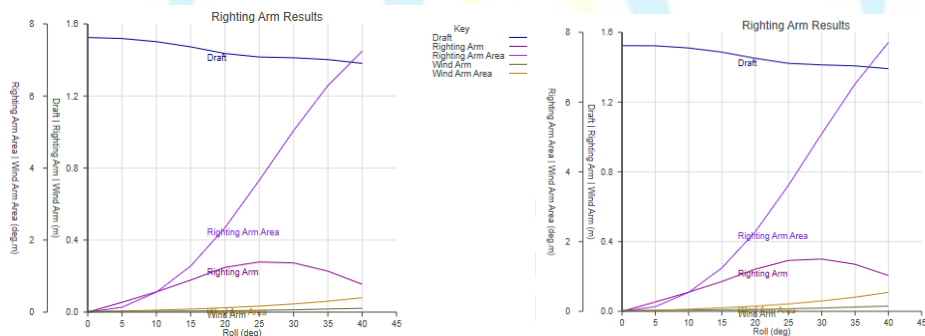
Lebih lanjut, analisis letak Titik Berat (KG) menunjukkan fenomena penurunan pusat gravitasi seiring dengan bertambahnya tinggi ponton. Nilai KG turun dari 2,160 meter pada desain terpendek, menjadi 2,030 meter pada desain tertinggi. Penurunan posisi KG ini terjadi karena penambahan tinggi bangunan didominasi oleh material beton bertulang yang sangat masif di bagian bawah, yang proporsi beratnya melampaui berat struktur atap baja ringan di bagian atas.



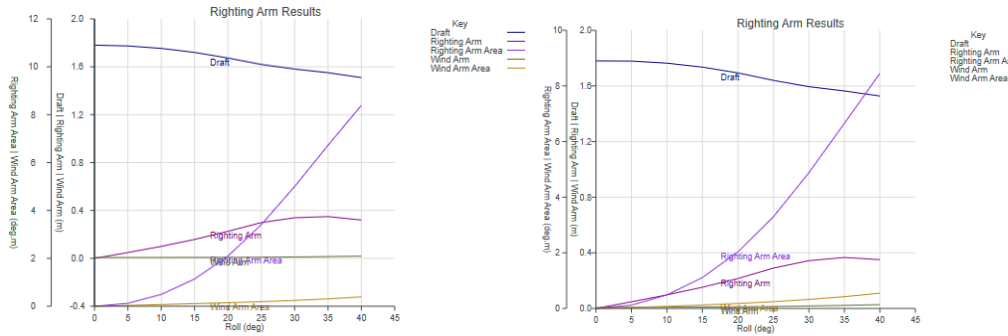
Gambar 4.14 Hasil Grafik *Righting Arm* $H=2.0$ m Beban Simetris dan Asimetris



Gambar 4.15 Hasil Grafik *Righting Arm* $H=2.2$ m Beban Simetris dan Asimetris



Gambar 4.16 Hasil Grafik *Righting Arm* $H=2.5$ m Beban Simetris dan Asimetris



Gambar 4.17 Hasil Grafik *Righting Arm* H= 3.0 m Beban Simetris dan Asimetris

Pada skenario beban asimetris, pergeseran pusat massa memberikan momen statis yang memaksa ponton untuk mencari titik keseimbangan baru. Data menunjukkan bahwa struktur mengalami kemiringan awal (*initial list*) yang relatif konstan di semua variasi tinggi, yaitu berada pada rentang $-2,02^{\circ}$ hingga $-2,12^{\circ}$.

b. Profil Stabilitas Dinamis

Analisis stabilitas dinamis mengukur kemampuan struktur untuk menghasilkan gaya perlawanan (momen pemulih) guna mengembalikan dirinya ke posisi tegak setelah dimiringkan secara paksa oleh gelombang atau angin. Kapasitas ini direpresentasikan oleh panjang Lengan Penegak (*Righting Arm* / GZ). Tabel 4.17 dan 4.18 menjabarkan profil lengan penegak dan respons energi dinamis.

Tabel 4.18 Profil Stabilitas Dinamis – Pembebanan Simetris (Kecepatan Angin 50 Knot)

Tinggi Ponton (h)	Sudut Roll	Sarat Air / Draft (m)	Righting Arm / GZ (m)	Wind Arm (m)	Net Arm (m)	Area Ratio
2,0 m	10,0°	1,400	0,120	0,004	0,116	17,78
	20,0°	1,388	0,173	0,010	0,163	21,59
	40,0°	1,548	0,112	0,025	-0,137	7,24
2,2 m	10,0°	1,468	0,115	0,004	0,111	15,13

Tinggi Ponton (h)	Sudut Roll	Sarat Air / Draft (m)	Righting Arm / GZ (m)	Wind Arm (m)	Net Arm (m)	Area Ratio
	20,0°	1,440	0,185	0,007	0,177	23,18
	40,0°	1,528	-0,050	0,018	-0,068	11,84
2,5 m	10,0°	1,502	0,112	0,006	0,106	9,96
	20,0°	1,435	0,248	0,007	0,240	2,34
	40,0°	1,381	0,154	0,021	0,133	7,24
3,0 m	10,0°	1,754	0,108	0,007	0,101	8,50
	20,0°	1,673	0,225	0,008	0,217	2,10
	40,0°	1,510	0,320	0,018	0,301	8,39

Data Lengan Penegak (GZ) menunjukkan reaksi gaya pemulih terhadap peningkatan sudut oleng. Parameter *Wind Arm* merepresentasikan lengan guling akibat dorongan angin badai, sedangkan *Net Arm* merupakan nilai bersih lengan penegak setelah dikurangi pengaruh angin. *Area Ratio* mengindikasikan akumulasi luasan di bawah kurva stabilitas, yang merepresentasikan total energi dinamis yang dapat diserap ponton.

Tabel 4.19 Profil Lengan Penegak (GZ) pada Beban Asimetris Terhadap Variasi Sudut

Ketinggian Ponton	GZ 10°	Sudut 20°	GZ 30°	Sudut 40°
h = 2,0 m	0,110 m	0,180 m	0,100 m	-0,100 m
h = 2,2 m	0,112 m	0,200 m	0,150 m	0,020 m
h = 2,5 m	0,110 m	0,220 m	0,330 m	0,310 m

h = 3,0 m	0,048 m	0,200 m	0,340 m	0,320 m
------------------	---------	---------	---------	---------

Pada Tabel 4.18, fluktuasi respons setiap desain terekam dengan jelas saat struktur telah mengalami kemiringan awal akibat beban asimetris. Nilai GZ pada setiap sudut menggambarkan besaran tenaga mekanis aktual yang dimiliki bangunan untuk mendorong posisinya kembali tegak.

c. Analisis Pengaruh Ketinggian (h) Terhadap Tenggelamnya Bangunan, Titik Berat, dan Daya Tangkap Angin

Menentukan berapa dimensi ketinggian ponton (h) yang pas adalah kunci utama rancangan bangunan apung. Mengubah ketinggian antara 2.0 meter hingga 3.0 meter tidak hanya mengubah tampilan visual, namun sangat memengaruhi dalamnya ponton tenggelam (Draft), letak titik pusat beban (KG), serta seberapa besar luasan dinding yang berpotensi menangkap angin kencang.

i. Pengaruh Ketinggian Terhadap Bagian yang Tenggelam (Draft) dan Risiko Kandas

Terdapat hubungan linier antara ketinggian struktur ponton dengan sarat air (*draft*) atau kedalaman bagian bangunan yang tercelup. Pada tinggi rencana $h = 2,0$ meter, bagian ponton yang masuk ke dalam air adalah sedalam 1,411 meter. Ketika ketinggian struktur ditingkatkan menjadi $h = 2,2$ meter dan $h = 2,5$ meter, kedalaman struktur yang tenggelam masing-masing meningkat menjadi 1,491 meter dan 1,524 meter. Kondisi ini mencapai puncaknya pada ketinggian dinding $h = 3,0$ meter dengan sarat air sebesar 1,780 meter. Faktor utama yang menyebabkan peningkatan kedalaman ini adalah bertambahnya beban mati dari material beton struktur itu sendiri. Peningkatan ketinggian ponton berbanding lurus dengan volume dinding beton berongga yang dicor, sehingga struktur secara alami harus memindahkan volume air yang lebih besar untuk memperoleh gaya apung yang seimbang.

Dalam konteks lingkungan permukiman rawan banjir di Samarinda, bagian bawah bangunan yang tercelup terlalu dalam berpotensi menimbulkan risiko kandas. Banjir akibat luapan air pasang di wilayah tersebut umumnya memiliki

ketinggian genangan berkisar antara 1,0 meter hingga 1,5 meter di atas permukaan jalan. Jika rumah amfibi dirancang dengan tinggi $h = 3,0$ meter yang membutuhkan kedalaman air minimal 1,780 meter untuk dapat terapung bebas, maka bangunan tersebut tidak akan mampu mengapung pada fase awal luapan banjir.

ii. Pengaruh Ketinggian Terhadap Lengan Guling Angin (Wind Arm)

Kekuatan bangunan tidak hanya dinilai dari daya tahannya pada gaya di bawah air, melainkan juga kekokohnya terhadap hembusan dorongan aerodinamis dari atas permukaan. Sesuai prosedur perhitungan teknis bangunan sipil, hembusan angin berkecepatan 50 knot memberikan tekanan dorong yang bekerja paling kuat pada benda atau bidang dinding yang datar dan tumpul di atas air.

Wind Arm menunjukkan peningkatan kerentanan akibat angin seiring dengan makin tingginya lambung ponton. Pada desain $h=2.0$ m di sudut oleng 20° , nilai tuas angin guling berada di angka menengah 0.0102 meter. Pada profil besar $h=3.0$ m, nilainya meningkat karena sisa dinding beton di atas permukaan air sangat tinggi (sekitar 1.22 meter dari permukaan air hingga batas lantai). Dinding terbuka setinggi dada orang dewasa ini bekerja persis seperti "layar perahu" lebar yang menangkap penuh dorongan angin kencang. Tekanan angin horizontal yang besar ini tidak sekadar mendorong rumah agar miring, melainkan juga menekan cincin rel luncur bangunan ke arah tiang penyangga baja dengan gaya gesek ekstra. Gesekan jepit yang berlebihan pada tiang pandu ini dapat menyebabkan mekanisme peluncur naik-turun rumah menjadi macet.

iii. Pengaruh Ketinggian Terhadap Perpindahan Titik Berat (KG)

Secara umum, peningkatan tinggi suatu struktur diasumsikan akan menaikkan posisi titik pusat massa atau berat sistem (KG). Namun, analisis distribusi massa pada desain ini menunjukkan fenomena mekanika yang berbeda dan menguntungkan. Titik berat pada model dengan ketinggian $h = 2,0$ m berada pada posisi 2,16 meter dari lunas bawah (keel). Ketika ketinggian ditingkatkan menjadi $h = 2,2$ m dan $h = 2,5$ m, titik berat tersebut berturut-turut turun menjadi

2,13 meter dan 2,11 meter. Pada ketinggian maksimum $h = 3,0$ m, posisi pusat massa justru mencapai angka terendah, yaitu 2,03 meter.

Penurunan posisi titik berat ini terjadi karena kontribusi massa dari pengecoran beton yang masif pada bagian fondasi ponton jauh lebih dominan terhadap berat total struktur dibandingkan dengan rangka atap baja ringan pada bangunan bagian atas. Dengan bertambahnya dimensi tinggi cangkang lambung, volume beton pada area bawah juga meningkat, sehingga pusat gravitasi secara otomatis bergeser mendekati pelat dasar ponton. Letak titik berat yang semakin rendah ini sangat menguntungkan dari aspek mekanika karena berperan penting dalam mengoptimalkan nilai Lengan Penegak (*Righting Arm / GZ*) untuk mengembalikan posisi bangunan ke kondisi tegak semula saat menerima gangguan gaya eksternal.

d. Evaluasi Keselamatan Berdasarkan Standar Internasional

Untuk memastikan validasi keamanan yang terukur secara objektif, hasil perhitungan numerik diuji silang dan dinilai ulang menggunakan dua parameter standar konstruksi bangunan perairan internasional, yaitu syarat antisipasi guling (keseimbangan statis) dan syarat ketinggian ruang aman dari tumpahan gelombang (Freeboard).

Pengujian Terhadap Kriteria Keseimbangan (*Intact Stability*): Organisasi keselamatan kelautan internasional (IMO) menetapkan bahwa setiap struktur pengapung wajib memiliki rentang nilai Tinggi Metasentrum (GM) yang memadai dan dilarang kurang dari batas 0.15 meter. Bangunan dengan nilai kurang dari batas tersebut akan sangat mudah miring dan kehilangan keseimbangan jika banyak orang berjalan ke satu sisi lantai yang sama. Berdasarkan perhitungan pada rancangan ukuran ponton $h=2.2$ meter, didapatkan stabilitas awal bangunan (GM) sebesar +1.116 meter. Angka pencapaian ini membuktikan bahwa rancangan rumah amfibi ini memiliki tingkat kekakuan tegak yang kuat dan melampaui ketentuan wajib batas bawah hingga lebih dari tujuh kali lipat.

Pengujian Terhadap Kriteria Lambung Bebas Air (*Freeboard*): Merujuk pada aturan teknis pembangunan pemukiman terapung, dipersyaratkan bahwa batas

dinding sisa di atas permukaan air minimal harus berjarak 0.40 meter (40 sentimeter) dari muka air tenang. Jarak sisa ini berfungsi krusial untuk menahan percikan ombak kecil serta memberikan pembatas agar serangga air tidak melompat masuk ke ruang tempat tinggal warga. Pada hasil perhitungan, jarak sisa lambung timbul (*freeboard*) untuk ponton $h=2.0$ meter adalah 0.589 meter, untuk desain $h=2.2$ meter adalah 0.709 meter, untuk $h=2.5$ meter adalah 0.976 meter, dan $h=3.0$ meter adalah 1.220 meter. Secara legal teknis, semua model rancangan ini lolos standar keamanan terhadap limpasan cipratan air.

Namun, di sisi lain, standar tata panduan aksesibilitas dermaga mengingatkan risiko hambatan operasional. Jika lambung timbul berada terlalu tinggi dari permukaan air, proses evakuasi dan keluar-masuk perahu akan menjadi sulit dan berbahaya. Dalam skenario keadaan tanggap bencana darurat (seperti mengevakuasi balita atau warga lansia menggunakan perahu karet keselamatan), memindahkan penumpang dari perahu tim SAR naik ke teras rumah akan sangat merepotkan apabila perbedaan tingginya lebih dari ukuran 0.6 meter. Mempertimbangkan kenyamanan akses fisik untuk logistik penolong inilah, jarak dinding sisa yang mencapai 1.22 meter pada model ponton $h=3.0$ meter dianggap sebagai keputusan ukuran yang berlebihan.

e. Evaluasi Desain Optimal

Hasil simulasi kesetimbangan gaya hidrostatik, analisis posisi pusat massa sistem (KG), serta evaluasi berdasarkan standar keselamatan internasional menghasilkan parameter komprehensif untuk penentuan desain akhir fondasi bangunan. Setiap variasi ketinggian ponton beton menunjukkan karakteristik mekanis yang spesifik, namun memiliki batasan operasional yang berbeda saat dihadapkan pada kondisi riil di lapangan, khususnya terkait batasan sarat air minimum (*draft*) untuk proses terapung awal dan ketahanan terhadap beban aerodinamis angin badai berkecepatan 50 knot.

Desain dengan ketinggian $h = 2,0$ meter memberikan keuntungan berupa luasan penampang atas yang kecil, sehingga meminimalkan gaya hambat angin horizontal. Kendati demikian, nilai lambung bebas (*freeboard*) yang hanya sebesar 0,589 meter dinilai terlalu berisiko untuk diterapkan. Karakteristik banjir luapan di

Samarinda yang sering disertai arus dan material hanyutan (*debris*) membuat *freeboard* setinggi ≈ 60 cm sangat rentan terhadap limpasan air ke lantai hunian. Selain itu, pada pengujian beban ekstrem di sudut kemiringan yang besar, desain $h = 2,0$ meter ini mengalami kegagalan stabilitas akibat hilangnya nilai lengan penegak (mencapai nilai negatif).

Sebaliknya, desain ponton dengan ketinggian maksimum $h = 3,0$ meter menawarkan stabilitas melintang yang sangat andal dengan kemampuan pemulihan posisi (*anti-heeling*) yang kuat. Namun, kelemahan operasional dari dimensi ini cukup signifikan; struktur membutuhkan kedalaman genangan minimal 1,78 meter untuk dapat terapung bebas. Pada fase awal banjir dangkal, ponton akan mengalami kondisi kandas, sehingga dasar beton berisiko mengalami kontak mekanis langsung dengan permukaan jalan yang dapat merusak lapisan kedap air (*waterproofing*). Selain itu, luasnya area penampang lambung bebas di atas air bertindak sebagai bidang hambat angin yang besar. Kondisi ini meningkatkan gaya tekan lateral pada cincin pemandu terhadap tiang penyangga (*guide post*), yang berpotensi memicu fenomena jepitan (*binding effect*) dan menghambat pergerakan vertikal struktur.

Mempertimbangkan batas bawah risiko banjir dan batas atas keselamatan tiang pergerakan, hasil evaluasi dari pemodelan komputasi ini dengan penuh keyakinan memutuskan bahwa spesifikasi pondasi yang paling tepat berada pada desain tinggi $h = 2.2$ meter hingga $h = 2.5$ meter. Rentang spesifikasi menengah ini menghasilkan performa keseimbangan terbaik yang mampu merangkum seluruh tuntutan, dengan pertimbangan dasar:

1. Bangunan mampu menghasilkan daya lengan pemulih tegak yang melimpah dan kuat dalam menghadapi ancaman terbalik (*guling*), dan tetap mampu mempertahankan kekuatan pengembali positif sekalipun diterpa hembusan badai angin samping sekuat 50 knot.
2. Ukuran dinding sisa yang bebas di atas permukaan muka air (*freeboard*) terukur secara pas dan proporsional dalam rentang tinggi 0.709 meter hingga 0.976 meter. Jarak rentang ketinggian ini mutlak menyingkirkan bahaya luapan ombak masuk ke halaman rumah amfibi, namun masih cukup

rendah dan bersahabat bagi keperluan evakuasi agar perahu penyelamat dapat bersandar mendistribusikan logistik bantuan secara wajar.

3. Kebutuhan dasar kedalaman air untuk mampu mengapung (Draft) tertahan cukup dangkal di jarak ukuran 1.49 meter hingga 1.52 meter. Rentang sarat air ini menggaransi struktur beton lantai rumah sudah terangkat mantap dan stabil sejak fase-fase awal luapan banjir, menghindari dampak buruk dari gesekan berulang-ulang terhadap kontur tanah dan aspal jalan lingkungan setempat.

4.2 Analisis Kapasitas Struktur Tiang Pandu (*Guide Posts*) terhadap Beban Lateral Menggunakan *Finite Element Analysis*

Subbab ini memaparkan hasil perhitungan dan analisis struktural terhadap sistem tiang pandu vertikal. Tiang pandu berfungsi untuk membatasi pergerakan bangunan rumah amfibi murni pada pergerakan vertikal naik-turun, mencegah pergeseran mendatar, serta menahan beban dorongan dari arus air dan angin badai. Penampang yang dianalisis menggunakan profil pipa baja melingkar (*Circular Hollow Section / CHS*) karena memiliki momen inersia dan ketahanan lentur yang seragam di segala arah. Evaluasi kekuatan struktur ini mengacu pada standar spesifikasi baja AISC 360-16.

4.2.1 Parameter Geometri dan Kondisi Hidrostatik

Analisis pembebanan pada tiang pandu memerlukan penetapan dimensi struktur dan properti fluida di lingkungan estuari. Ponton beton diasumsikan sebagai blok persegi panjang kaku dengan lebar (B) 6 meter, panjang (L) 7 meter, dan tinggi total (H) 2,2 meter. Kedalaman bagian ponton yang terendam air (T) saat menahan beban penuh ditetapkan sebesar 1,78 meter.

Gaya apung dihitung berdasarkan Prinsip Archimedes dengan asumsi air tawar memiliki massa jenis (ρ_w) 1000 kg/m^3 . Volume struktur yang terendam (V_{sub}) dan massa total sistem bangunan (M) diperoleh sebagai berikut:

$$V_{sub} = B \times L \times T = 6 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 1.78 \text{ m} = 74.76 \text{ m}^3$$

$$M = \rho_w \times V_{sub} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 74.76 \text{ m}^3 = 74,760 \text{ kg}$$

Gaya apung (F_B) yang mendorong struktur ke atas adalah:

$$F_B = M \times g = 74,760 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 733,395.6 \text{ N} \approx 733.4 \text{ kN}$$

Jarak lambung bebas (*freeboard*, H_f) dari permukaan air ke geladak ponton adalah 0,42 meter ($2.2 \text{ m} - 1.78 \text{ m}$). Dengan tinggi bangunan struktur atas (H_{super}) sebesar 3,5 meter, maka tinggi total struktur yang terekspos angin (H_{tot}) adalah 5,7 meter dari dasar ponton.

Momen inersia massa struktur terhadap sumbu longitudinal (I_{xx}) dihitung sebesar $448,560.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, sedangkan untuk sumbu transversal (I_{yy}) adalah $529,550.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Angka ini menunjukkan besaran energi yang harus mampu ditahan oleh sistem tiang pandu.

4.2.2 Perhitungan Analisis Penampang Tiang Pandu

Pembebanan: $M_{Ed} = 55.70 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 8.36 \text{ kN}$, $P_u = 0 \text{ kN}$. Material: JIS G 3444 STK-400 dengan $F_y = 235 \text{ MPa}$.

1. Penentuan Penampang Tiang Pandu

Kebutuhan Luas Area Minimum terhadap Kuat Geser:

$$\phi_v V_n \geq V_{Ed}$$

$$0.90 \left(\frac{0.6 \cdot F_y \cdot A}{2} \right) \geq V_{Ed}$$

$$A = \frac{8.36 \cdot 1000 \cdot 2}{0.90 \cdot 0.6 \cdot 235} = 131.76 \text{ mm}^2$$

Kebutuhan Modulus Plastis Minimum terhadap Kuat Lentur:

$$\phi_b M_n \geq M_{Ed}$$

$$0.90 (F_y \cdot Z) \geq M_{Ed}$$

$$Z = \frac{55.70 \cdot 10^6}{0.90 \cdot 235} = 263,357 \text{ mm}^3$$

Maka, Penampang tiang pandu harus memiliki $A_g \geq 131.76 \text{ mm}^2$ dan $Z \geq 263,357 \text{ mm}^3$. Oleh karena itu, profil baja CHS 216.3 dengan tebal 6.0 mm terpilih dengan A_g dan Z sebagai berikut.

$$A_g = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (D - 2t)^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (216.3^2 - 204.3^2) = 3964.1 \text{ mm}^2$$

$$\geq 131.76 \text{ mm}^2 \quad (\text{OK})$$

$$Z = \frac{D^3 - (D - 2t)^3}{6} = \frac{216.3^3 - 204.3^3}{6} = 265,312 \text{ mm}^3$$

$$\geq 263,357 \text{ mm}^3 \quad (\text{OK})$$

2. Kuat Lentur dan Geser Nominal Tiang Pandu

$$\phi_b M_n = \frac{0.90 \cdot Z \cdot F_y}{10^6} = \frac{0.90 \cdot 265312 \cdot 235}{10^6} = 56.11 \text{ kNm}$$

$$\geq 55.70 \text{ kNm} \quad (\text{OK})$$

$$\phi_v V_n = 0.90 \cdot \frac{0.6 \cdot F_y \cdot A_g}{2 \cdot 1000} = 0.90 \cdot \frac{0.6 \cdot 235 \cdot 3964.1}{2000} = 251.52 \text{ kN}$$

$$\geq 8.36 \text{ kN} \quad (\text{OK})$$

4.2.3 Perhitungan Analisis *Base Plate* Tiang Pandu

Ukuran Plat: Panjang $N = 400 \text{ mm}$, Lebar $B = 400 \text{ mm}$. Jarak tepi baut $e = 60 \text{ mm}$. Jarak garis baut tarik ke sumbu netral plat: $f = (400/2) - 60 = 140 \text{ mm}$.

a. Eksentrisitas Beban (e)

Eksentrisitas beban (e):

$$e = \frac{M_u}{P_u} = \frac{56.42 \text{ kNm}}{2.85 \text{ kN}} = 19.79 \text{ m} = 19,796 \text{ mm}$$

Batas Kritis Momen Besar (e_{crit}):

Kuat tumpu nominal beton maksimum ($f_{p,max}$) dengan asumsi area tumpuan sama dengan area plat ($\sqrt{A_2/A_1} = 1.0$):

$$f_{p,max} = 0.65 \cdot 0.85 \cdot 25 \cdot 1.0 = 13.81 \text{ MPa}$$

$$q_{max} = f_{p,max} \cdot B = 13.81 \cdot 400 = 5524 \text{ N/mm}$$

$$e_{crit} = \frac{400}{2} - \frac{2.85 \cdot 1000}{2 \cdot 5524} = 200 - 0.26 = 199.74 \text{ mm}$$

Karena $e = 19,796 \text{ mm} > e_{crit} = 199.74 \text{ mm}$, plat dasar ini didesain menggunakan prosedur perhitungan *Large Moment Base Plate Design*.

b. Keseimbangan momen besar

Mencari panjang blok tekan (Y):

$$Y = \left(f + \frac{N}{2}\right) - \sqrt{\left(f + \frac{N}{2}\right)^2 - \frac{2[M_u + P_u(f)]}{q_{max}}}$$

$$Y = (140 + 200) - \sqrt{(340)^2 - \frac{2[56,420,000 + 2850(140)]}{5524}}$$

$$Y = 340 - \sqrt{115,600 - \frac{2[56,819,000]}{5524}}$$

$$Y = 340 - \sqrt{115,600 - 20,571.69} = 340 - 308.27 = 31.73 \text{ mm}$$

Menghitung Gaya Tarik Baut Total (T_u) dari keseimbangan gaya vertikal:

$$T_u = q_{max}Y - P_u$$

$$T_u = (5524 \cdot 31.73) - 2850 = 175,275 - 2850 = 172,425 \text{ N} = 172.43 \text{ kN}$$

c. Ketebalan Plat Dasar Lentur (t_p)

Untuk kolom pipa bundar, lebar efektif kantilever diukur dari penampang ekuivalen $0.8D$:

$$c = \frac{N - 0.8D}{2} = \frac{400 - 0.8(216.3)}{2} = 113.48 \text{ mm}$$

Karena seluruh zona tekan ($Y = 31.73 \text{ mm}$) lebih kecil dari dimensi ujung c , momen lentur plat (M_{pl}) per satuan lebar plat dihitung menggunakan lengan momen dari resultan tekan ke batas garis lipat kantilever:

$$M_{pl} = (f_{p,max} \cdot Y) \cdot \left(c - \frac{Y}{2}\right)$$

$$M_{pl} = (13.81 \cdot 31.73) \cdot \left(113.48 - \frac{31.73}{2}\right) = 438.19 \cdot 97.615$$

$$= 42,774 \text{ Nmm/mm}$$

Tebal plat rencana minimum ($t_{p,req}$):

$$t_{p,req} = \sqrt{\frac{4 \cdot M_{pl}}{\phi_b \cdot F_{yp}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 42774}{0.90 \cdot 275}} = 26.29 \text{ mm}$$

Plat Dasar nominal 30 mm $\geq$ 26.29 mm (OK).

d. Anchor Bolt Sizing dan Concrete Embedment Strength

Baut Terpilih: 4 x M24 Mild Steel ASTM F15543 Grade 36 ($F_{ub} = 400 \text{ MPa}$, $A_s = 353 \text{ mm}^2$). Penempatan: 2 tarik, 2 tekan. Gaya Tarik per baut: $N_{ua} = T_u/2 = 86.21 \text{ kN}$. Gaya Geser per baut: $V_{ua} = V_{Ed}/4 = 8.36/4 = 2.09 \text{ kN}$.

Kuat Tarik Nominal Baut:

$$\phi R_{nt} = \phi \cdot (0.75 F_{ub}) \cdot A_s$$

$$\phi R_{nt} = 0.75 \cdot (0.75 \cdot 400) \cdot 353$$

$$\phi R_{nt} = 0.75 \cdot 300 \cdot 353 = 79,425 \text{ N} = 79.43 \text{ kN}$$

$$79.43 \text{ kN} \geq 67.94 \text{ kN} (N_{ua}) \text{ (OK)}$$

Kuat Geser Nominal Baut:

$$\phi R_{nv} = \phi \cdot (0.54 F_{ub}) \cdot A_s$$

$$\phi R_{nv} = 0.75 \cdot (0.54 \cdot 400) \cdot 353$$

$$\phi R_{nv} = 0.75 \cdot 216 \cdot 353 = 57,186 \text{ N} = 57.19 \text{ kN}$$

$$57.19 \text{ kN} \geq 2.09 \text{ kN} (V_{ua})$$

Luas penampang jebol beton tunggal referensi (A_{Nco}):

$$A_{Nco} = 9 \cdot h_{ef}^2 = 9 \cdot 300^2 = 810,000 \text{ mm}^2$$

Luas penampang jebol gabungan / grup proyeksi pada permukaan beton (A_{NC}):

$$A_{Nc} = (3h_{ef} + s) \cdot (3h_{ef}) = (900 + 280) \cdot 900 = 1,062,000 \text{ mm}^2$$

Kekuatan jebol dasar untuk satu baut (N_b):

$$N_b = k_c \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{f'_c} \cdot h_{ef}^{1.5} = 10 \cdot 1.0 \cdot \sqrt{25} \cdot 300^{1.5} = 259,807 \text{ N} = 259.81 \text{ kN}$$

Kekuatan jebol beton grup desain (ϕN_{cbg}) dengan faktor reduksi asumsi tanpa eksentrisitas geser grup ($\psi_{ec} = \psi_{ed} = \psi_c = 1.0$):

$$N_{cbg} = \frac{A_{Nc}}{A_{Nco}} \cdot N_b = \frac{1062000}{810000} \cdot 259.81 = 340.64 \text{ kN}$$

$$\phi N_{cbg} = 0.70 \cdot 340.64 = 238.45 \text{ kN} \geq 172.43 \text{ kN} (T_u) \quad (\text{OK})$$

Tebal *weld throat* (a):

$$a \geq t$$

$$a = 6 \text{ mm} \geq t = 6 \text{ mm} \quad (\text{OK})$$

4.2.4 Analisis Elemen Hingga Struktur Tiang Pandu (*Guide Pile*) Menggunakan SolidWorks Simulation

Untuk memastikan keandalan mekanis dan integritas struktural sistem tiang pandu (*guide pile*) dalam menahan beban lateral ekstrem akibat arus banjir dan angin, dilakukan simulasi komputasional berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak SolidWorks Simulation. Simulasi ini mengevaluasi respons struktur terhadap skenario pembebanan maksimum yang telah dihitung sebelumnya untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, regangan, serta tingkat keamanan struktur sebelum diproduksi menjadi prototipe fisik.

a. Parameter Pemodelan dan Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

Model tiga dimensi (3D) tiang pandu yang disimulasikan memiliki massa total sebesar 223,90 kg dan volume 0,028 m³. Material yang diaplikasikan pada keseluruhan komponen (tiang dan pelat dasar) adalah baja karbon JIS G 3444 STK-400. Material ini diklasifikasikan sebagai *Linear Elastic Isotropic* dengan properti mekanis utama sebagai berikut:

- Tegangan Leleh (*Yield Strength*): 235,00 MPa ($2,50 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)
- Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*): 400,00 MPa ($4,00 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)

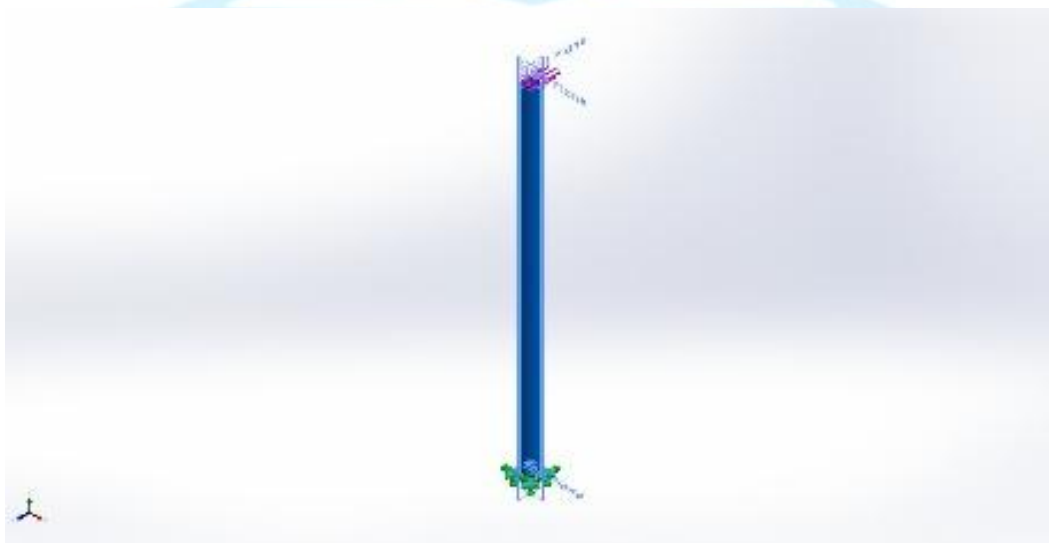
- Modulus Elastisitas (*Elastic Modulus*): 200 GPa (2×10^{11} N/m²)
- Massa Jenis (*Mass Density*): 7.900 kg/m³

Dalam penentuan kondisi batas (*Boundary Conditions*), simulasi menggunakan pengaturan sebagai berikut:

1. **Tumpuan Jepit (*Fixed Geometry*)**: Diaplikasikan pada 5 bidang (*faces*) di area pelat dasar (*base plate*) dan lubang baut angkur. Kondisi ini merepresentasikan asumsi bahwa dasar tiang tertanam secara kaku (jepit sempurna) pada fondasi beton atau dasar sungai, sehingga mentransfer seluruh momen gaya lentur ke area tersebut.
2. **Pembebanan (*Apply Force*)**: Beban lateral diaplikasikan secara terpusat pada satu bidang referensi (*edge/face*) di area ujung atas tiang pandu. Nilai resultan gaya yang diberikan adalah sebesar 8.260 N pada sumbu Z (horizontal). Beban ini merupakan representasi gaya dorong lateral (*drag force*) kombinasi dari arus air dan tekanan angin saat rumah amfibi berada pada elevasi banjir tertinggi.

b. Kualitas Jaring Elemen (*Mesh Quality*)

Keakuratan hasil analisis elemen hingga sangat bergantung pada kualitas pembagian elemen diskrit (*meshing*). Pada studi ini, metode yang digunakan adalah *Solid Mesh* dengan algoritma *Blended curvature-based mesh*. Algoritma ini secara



otomatis merapatkan elemen pada area bersudut tajam (seperti sambungan antara tiang dan pelat dasar) untuk menangkap konsentrasi tegangan secara presisi.

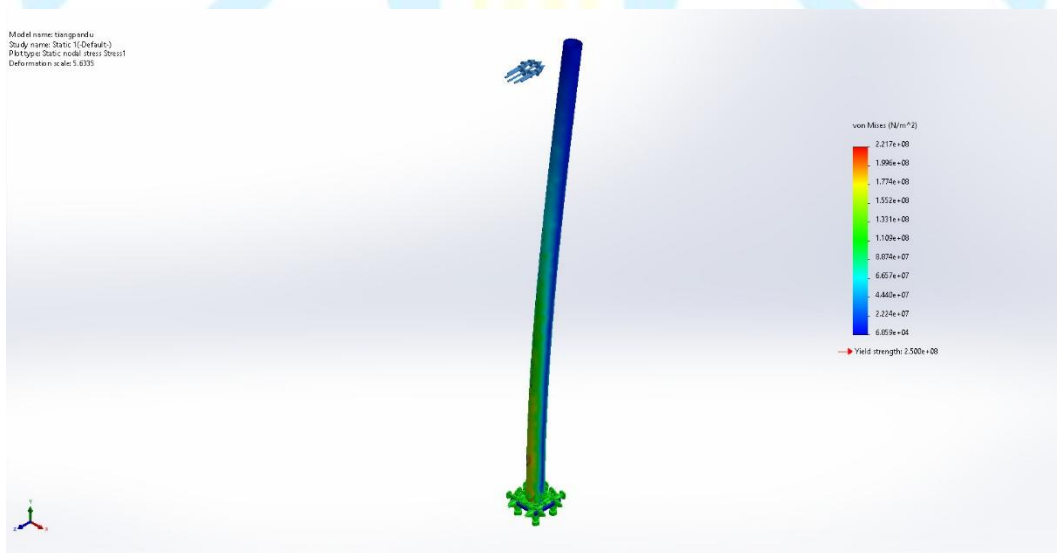
Gambar 4.18 Model Solidworks Tiang Pandu

Model didiskritisasi menjadi 13.084 titik (*Nodes*) dan 6.918 elemen solid. Parameter *Jacobian points* diatur pada 16 titik untuk menghasilkan elemen berkualitas tinggi (*High Quality*). Hasil evaluasi *mesh* menunjukkan bahwa tidak ada elemen yang terdistorsi (*0% distorted elements*), yang berarti jaringan elemen bekerja secara sempurna tanpa menghasilkan kesalahan matematis (*error*) selama proses iterasi komputasi solver.

c. Hasil Analisis Tegangan (Von Mises Stress)

Analisis tegangan menggunakan kriteria kegagalan material ulet (*ductile material*), yaitu kriteria tegangan *Von Mises*. Kriteria ini memprediksi bahwa material akan mengalami kelelahan atau kerusakan (*plastisitas*) apabila tegangan *Von Mises* melampaui tegangan leleh (*yield strength*) material tersebut.

Dari hasil simulasi, diperoleh peta distribusi tegangan sebagai berikut:



Gambar 4.19 Hasil *Von Mises Stress* Simulasi Solidworks

- **Tegangan Minimum:** $4.8 \times 10^2 \text{ N/m}^2$ (0,00048 MPa) pada ujung atas tiang.

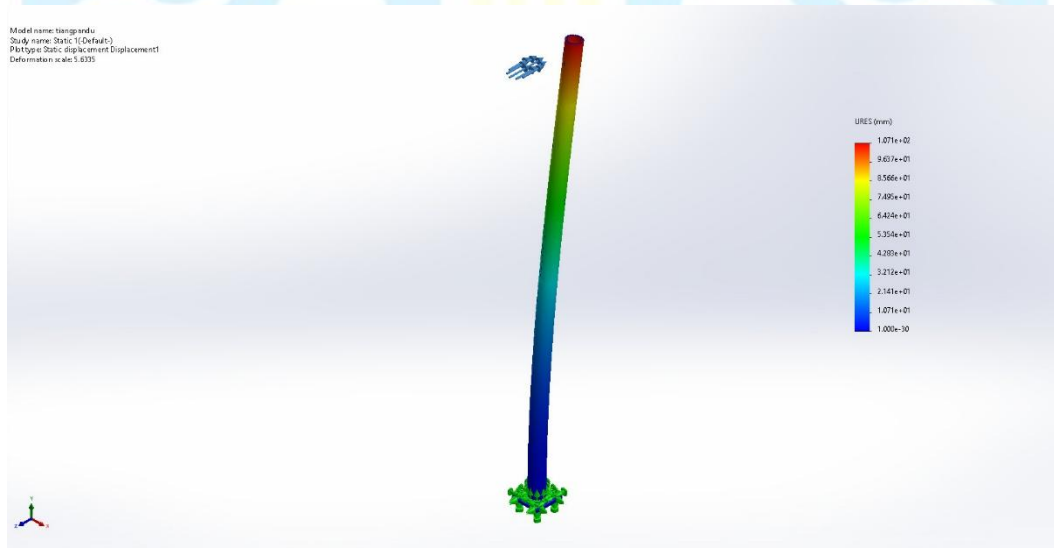
- **Tegangan Maksimum:** $2.217 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ (221,7 MPa) yang berlokasi pada *Node* 646.

Tegangan maksimum sebesar 221,7 MPa terjadi tepat di pangkal tiang, yaitu pada titik pertemuan sambungan las antara silinder tiang baja dan pelat dasar jepit (*fixed support*). Hal ini sangat wajar terjadi pada struktur kantilever yang menerima gaya horizontal di ujung bebasnya, karena momen lentur terbesar selalu berada di tumpuan.

Mengingat tegangan leleh material pipa baja JIS G 3444 STK-400 adalah 235,00 MPa, tegangan maksimum yang terjadi (221,7 MPa) masih berada di bawah batas luluh material tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa material tiang pandu masih bekerja dalam batas elastisnya di bawah skenario pembebanan yang diberikan.

d. Hasil Analisis Perpindahan (*Displacement* / URES)

Parameter *Displacement* (URES) mengukur nilai simpangan atau defleksi struktur dari posisi vertikal tegak lurusnya akibat pembebanan.



Gambar 4.20 Hasil *Displacement* Simulasi Solidworks

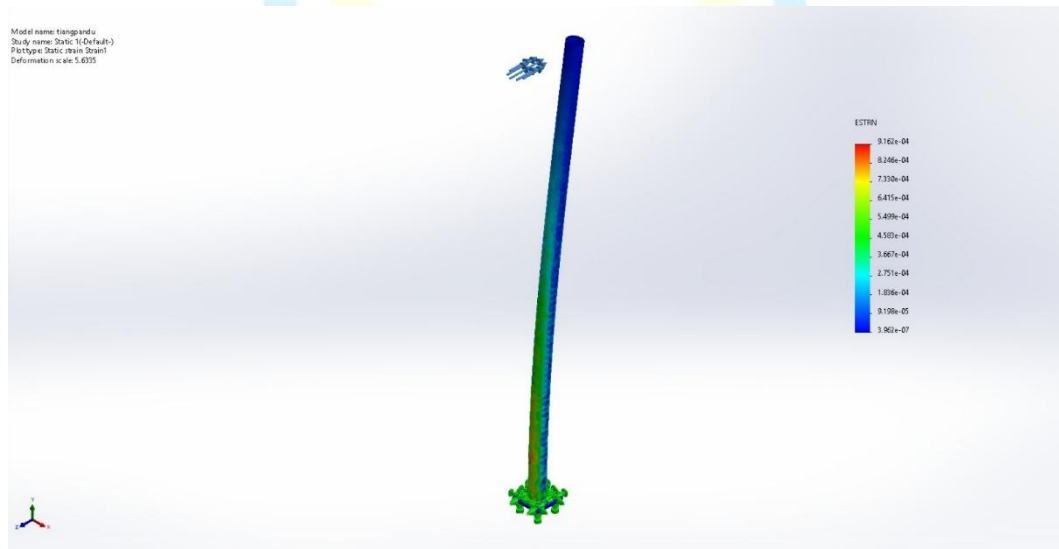
- **Defleksi Minimum:** 0 mm, terdeteksi pada Node 1 di pelat dasar (karena kondisi jepit sempurna).

- **Defleksi Maksimum:** 107,1 mm ($1,071 \times 10^2$ mm), terjadi pada Node 27 di bagian paling ujung atas silinder tiang.

Simpangan maksimum sebesar 107,1 mm pada ujung bebas tiang merupakan tingkat kelendutan elastis struktur saat menahan dorongan arus dan angin. Defleksi horizontal ini penting untuk diakomodasi dalam perancangan cincin *roller* pada struktur badan rumah amfibi. PIANC (World Association for Waterborne Transport Infrastructure) menetapkan defleksi *guide pile wajib*

e. Hasil Analisis Regangan (*Equivalent Strain* / ESTRN)

Regangan ekuivalen menunjukkan rasio perubahan bentuk (deformasi per satuan panjang) pada material.



Gambar 4.21 Hasil *Equivalent Strain* Simulasi Solidworks

- **Regangan Maksimum:** $9,163 \times 10^{-4}$ yang terjadi pada Elemen 1627 (berada di titik tumpuan dasar).

Nilai regangan pada (0,000916) membuktikan bahwa pemanjangan atau pengerutan serat-serat material baja masih sepenuhnya bekerja di dalam zona linier elastis menurut Hukum Hooke. Struktur akan langsung kembali tegak sempurna tanpa cacat struktur apabila debit arus banjir surut dan angin badai telah reda.

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E}$$

$$\epsilon_{y(STK400)} = \frac{235 \text{ MPa}}{200.000 \text{ MPa}} = 0,001175$$

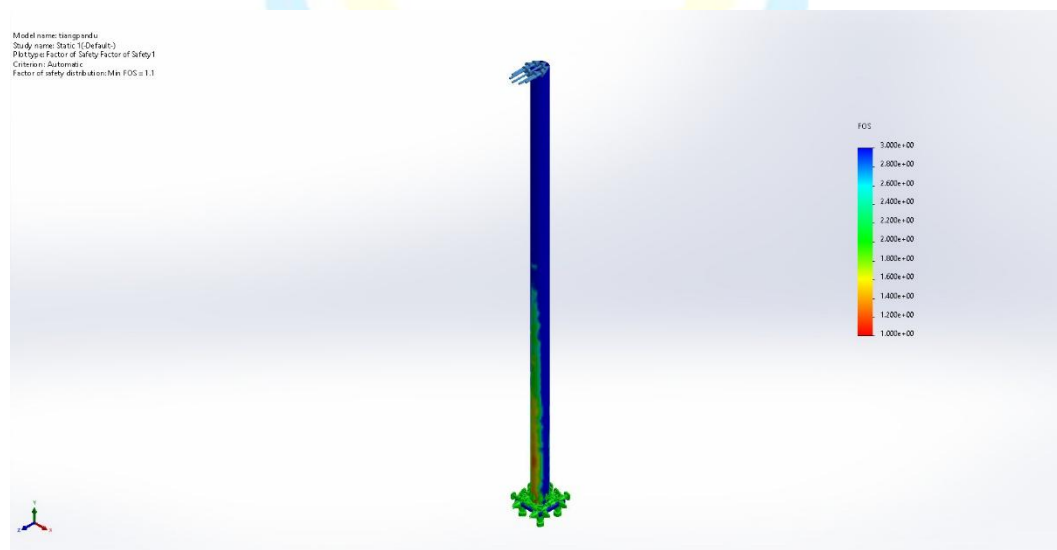
$$\epsilon < \epsilon_y$$

$$0,000916 < 0,001175 \text{ (OK)}$$

f. Evaluasi Faktor Keamanan (Factor of Safety / FOS)

Faktor keamanan (*Factor of Safety* / FOS) minimum struktur terjadi pada titik di mana tegangan *Von Mises* mencapai nilai maksimum. Secara analitis, FOS dihitung berdasarkan rasio tegangan leleh material (*Yield Strength*) dibagi dengan tegangan *Von Mises* maksimum yang terjadi pada struktur kritis.

Berdasarkan data material dan hasil simulasi pembebanan, diperoleh parameter sebagai berikut:



Gambar 4.22 Hasil *Factor Of Safety* Simulasi Solidworks

- Tegangan Leleh (σ_y) baja JIS G 3444 STK-400 = 235,00 MPa
- Tegangan Von Mises Maksimum ($\sigma_{\max}$) = 221,70 MPa (berlokasi pada tumpuan dasar/*Node* 646)

Perhitungan manual untuk FOS minimum pada struktur sambungan tiang pandu diuraikan melalui persamaan berikut:

$$\text{FOS}_{\min} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}}$$

$$FOS_{\min} = \frac{235,00 \text{ MPa}}{221,70 \text{ MPa}} = 1,060$$

Hasil perhitungan manual matematis ini konsisten dengan output otomatis yang dihasilkan oleh peranti lunak SolidWorks Simulation:

- **FOS Minimum:** 1,060, berlokasi di daerah tumpuan bawah tiang sambungan las (*Node 646*).

Struktur tiang pandu dinyatakan **aman** secara teoritis karena nilai $FOS > 1,0$ (memiliki margin keselamatan sebesar 6%). Namun, dikarenakan margin keselamatan yang cukup ketat, disarankan untuk melakukan pengawasan ketat pada kualitas pengelasan di area sambungan pelat dasar (*fixed support*) untuk memastikan kekuatan sambungan di lapangan sesuai dengan hasil pemodelan komputasi.

4.3 Analisis Elemen Hingga Roller Pile Guide Menggunakan SolidWorks Simulation

Untuk memastikan keandalan mekanis dan integritas struktural sistem pemandu rol (roller pile guide) dalam menahan beban lateral ekstrem akibat arus banjir dan angin, dilakukan simulasi komputasional berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. Simulasi ini mengevaluasi respons struktur terhadap skenario pembebanan maksimum yang telah dihitung sebelumnya untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, regangan, serta tingkat keamanan struktur sebelum diproduksi menjadi prototipe fisik.

Dalam sistem pemandu ini, terdapat dua skenario operasional kritis yang disimulasikan secara terpisah untuk mewakili perilaku riil di lapangan. Skenario pertama mengasumsikan beban lateral didistribusikan secara merata dan ditahan secara simetris oleh **2 roller** secara bersamaan. Skenario kedua mensimulasikan kondisi kegagalan atau kemiringan ekstrem (*pitching* atau *rolling*) di mana beban lateral secara tidak merata hanya ditahan oleh **1 roller** saja, yang bertindak sebagai tumpuan tunggal penahan beban.

4.3.1 Parameter Pemodelan dan Kondisi Batas (Boundary Conditions)

Model tiga dimensi (3D) *roller pile guide* yang disimulasikan memiliki massa total sebesar 40,9004 kg dan volume sebesar 0,00521024 m³. Geometri pembuat struktur ini dimodelkan secara presisi menggunakan skala aktual guna merepresentasikan distribusi massa riil dari sistem pemandu mekanis rumah amfibi. Keberadaan massa dan volume yang ringkas namun kokoh ini memberikan kontribusi langsung terhadap reduksi beban mati total (*dead load*) sistem ponton, sehingga penentuan geometri dalam ruang simulasi tiga dimensi harus representatif terhadap kondisi riil fabrikasi agar diperoleh parameter inersia yang akurat.

Material yang diaplikasikan pada keseluruhan komponen *roller pile guide*, yang meliputi silinder rol (*roller*), poros transmisi (*shaft*), serta rangka penumpu (*housing*), adalah baja karbon menengah tipe ASTM A36. Pemilihan material ini didasarkan pada karakteristik mekanisnya, memiliki kekuatan dan keuletan (*ductility*, serta kemudahan dalam proses pengelasan (*weldability*) dan permesinan yang dibutuhkan dalam fabrikasi prototipe. Material ini diklasifikasikan sebagai *Linear Elastic Isotropic* dengan properti mekanis utama yang didefinisikan secara matematis sebagai berikut:

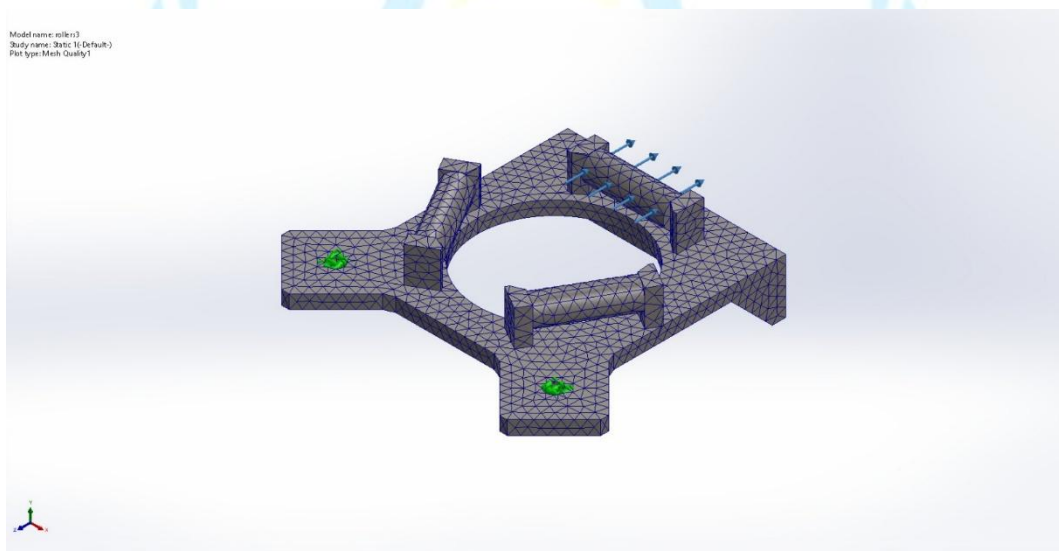
- Tegangan Leleh (*Yield Strength*): $\sigma_y = 250,00 \text{ MPa}$ ($2,50 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)
- Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*): $\sigma_{uts} = 400,00 \text{ MPa}$ ($4,00 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)
- Modulus Elastisitas (*Elastic Modulus*): $E = 200 \text{ GPa}$ ($2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$)
- Massa Jenis (*Mass Density*): $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$

Dalam penentuan kondisi batas (*Boundary Conditions*), simulasi numerik ini mengintegrasikan dua parameter utama yaitu tumpuan (*fixture*) dan gaya luar (*loads*). Kondisi tumpuan jepit (*Fixed Geometry*) diaplikasikan secara kaku pada bagian belakang pelat landasan rangka pemandu yang menempel langsung pada dinding struktur baja ponton utama rumah amfibi. Kondisi jepit sempurna ini mengasumsikan tidak adanya defleksi linear maupun angular pada sumbu X, Y, maupun Z, sehingga seluruh transfer gaya horizontal disalurkan langsung menuju struktur utama ponton tanpa mengalami pergeseran atau slip.

Skenario pembebanan lateral (*Apply Force*) berupa gaya dorong total sebesar 8.362 N diaplikasikan secara horizontal pada sumbu Z. Pada skenario pertama, gaya tersebut didistribusikan secara merata ke dua permukaan roller masing-masing sebesar 4.181 N. Sedangkan pada skenario kedua, gaya sebesar 8.362 N diaplikasikan sepenuhnya secara terpusat pada satu permukaan silinder rol penumpu untuk merepresentasikan kondisi kontak tunggal yang ekstrem akibat ketidakseimbangan ponton.

4.3.2 Kualitas Jaring Elemen (*Mesh Quality*)

Keakuratan hasil analisis elemen hingga sangat bergantung pada kualitas pembagian elemen diskrit (*meshing*) pada model solid 3D. Proses diskretisasi mengubah geometri kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung di titik simpul (*nodes*), di mana persamaan diferensial mekanika diselesaikan secara numerik. Pada studi ini, metode jaring elemen yang digunakan adalah *Solid Mesh* dengan algoritma *Blended curvature-based mesh*. Algoritma ini dipilih karena memiliki keunggulan dalam melakukan perapatan jaring (*mesh refinement*) secara otomatis pada area transisi geometri yang kompleks, seperti lekukan poros, sudut siku, dan area kontak silindris, guna meminimalkan galat (*error*) akibat efek konsentrasi tegangan.



Gambar 4.23 Gambar *Meshing Roller Model* Solidworks

Melalui proses komputasi diskretisasi, model *roller pile guide* berhasil dibagi menjadi 18.106 titik simpul (*Nodes*) dan 10.063 elemen padat (*Solid Elements*). Parameter kualitas elemen dikontrol secara ketat dengan mengatur *Jacobian points* pada level 16 titik untuk menghasilkan elemen parabolik berorde tinggi (*High Quality Elements*). Evaluasi kualitas geometri elemen menunjukkan rasio aspek maksimum (*maximum aspect ratio*) sebesar 9,931, dengan persentase elemen yang memiliki rasio aspek di bawah 3 mencapai 99%. Kerapatan elemen yang merata ini menjamin bahwa fluktuasi medan tegangan lokal dapat ditangkap dengan tingkat presisi yang tinggi selama iterasi berlangsung.

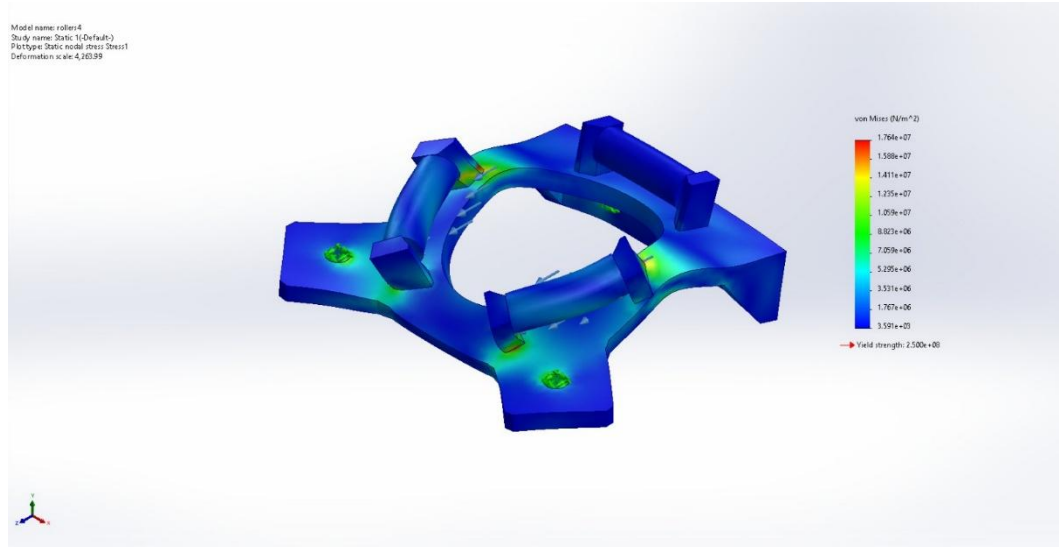
Hasil evaluasi akhir jaring menunjukkan tidak adanya elemen yang terdistorsi sama sekali, atau sebesar 0% *distorted elements*, yang berarti jaring elemen bekerja secara sempurna tanpa menghasilkan anomali matematis (*singularity error*) selama proses kalkulasi *solver*. Ketiadaan elemen terdistorsi ini membuktikan bahwa pembagian jaring elemen telah memenuhi standar konvergensi FEA yang ketat. Dengan demikian, hasil analisis tegangan, regangan, dan perpindahan yang dihasilkan dari model mesh ini dapat dinyatakan valid, stabil, dan bebas dari bias numerik akibat geometri elemen yang buruk.

4.3.3 Hasil Analisis Tegangan (Von Mises Stress)

Analisis kekuatan struktur *roller pile guide* dievaluasi berdasarkan kriteria kegagalan material ulet (*ductile material*), yaitu teori energi distorsi atau kriteria tegangan *Von Mises*. Kriteria ini memprediksi bahwa kegagalan mekanis berupa luluh plastis akan terjadi apabila nilai tegangan ekuivalen *Von Mises* lokal melampaui batas tegangan leleh (*yield strength*) dari material penyusunnya.

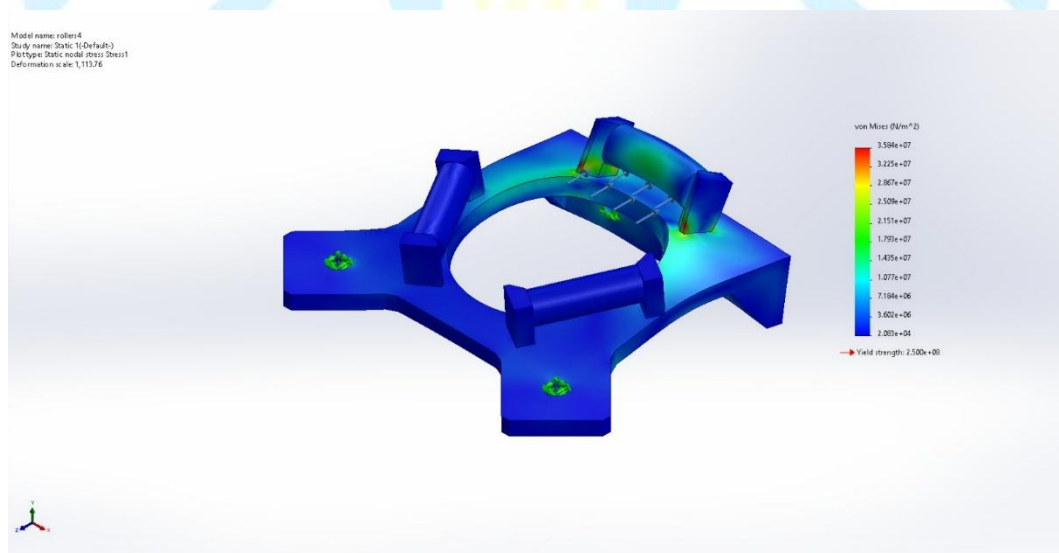
Dari hasil simulasi numerik menggunakan *SolidWorks Simulation* pada kedua skenario pembebanan, diperoleh visualisasi sebaran tegangan (*stress contour*) dengan parameter kuantitatif sebagai berikut:

- Skenario 2 *Roller* (Kondisi Beban Terbagi Rata):



Gambar 4.24 Hasil *Von Mises Stress 2 Roller* Simulasi Solidworks

- Tegangan Minimum: $\sigma_{min,1} = 3.591 \times 10^3 N/m^2$ (0,003591 MPa).
- Tegangan Maksimum: $\sigma_{max,1} = 1.764 \times 10^7 N/m^2$ (17,64 MPa) yang terkonsentrasi di area pangkal pin poros rol.
- Skenario 1 *Roller* (Kondisi Beban Terpusat Tunggal):



Gambar 4.25 Hasil *Von Mises Stress 1 Roller* Simulasi Solidworks

- Tegangan Minimum: $\sigma_{min,2} = 2,083 \times 10^4 N/m^2$ (0,0208 MPa).

- Tegangan Maksimum: $\sigma_{max,2} = 3,584 \times 10^7 N/m^2$ (35,84 MPa) yang terlokalisasi di leher sambungan poros rol aktif yang menerima beban penuh.

Tegangan maksimum pada kedua skenario pembebanan terjadi pada area leher poros atau bidang kontak sambungan poros *roller* dengan pelat penahan. Secara fisis mekanis, konsentrasi tegangan di area ini disebabkan oleh momen lentur lokal dan gaya geser horizontal yang ditransmisikan dari tiang pandu ke struktur pemandu rol.

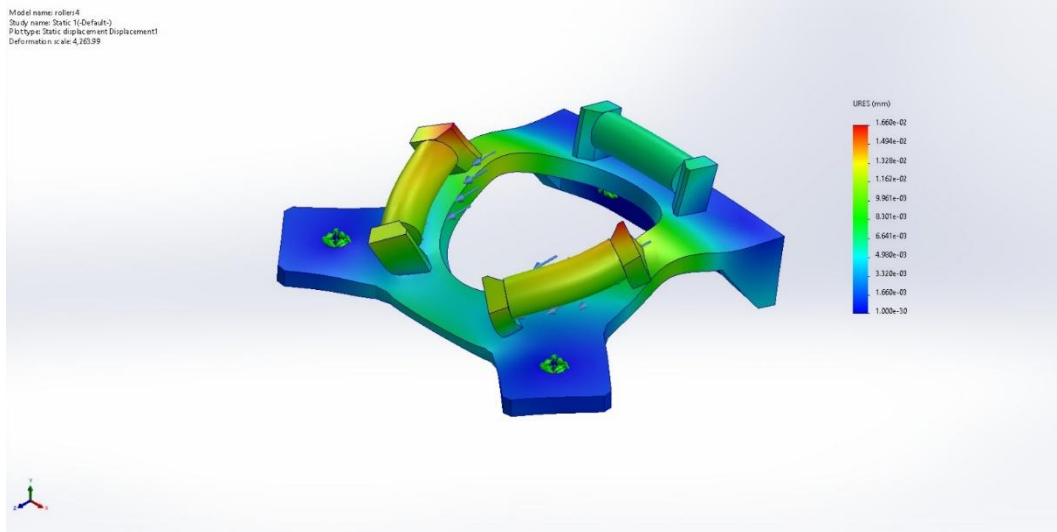
Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kedua kondisi pengujian struktural *roller pile guide* berada dalam kondisi kerja elastis murni dan terbebas dari risiko kegagalan luluh (*yield failure*).

4.3.4 Hasil Analisis Perpindahan (Displacement / URES)

Parameter perpindahan atau *Displacement* (URES) digunakan untuk mengukur seberapa besar simpangan (defleksi) fisik komponen dari koordinat awalnya akibat pengaruh gaya luar yang bekerja pada sistem pemandu rol. Pengendalian nilai simpangan sangat penting pada komponen mekanis bergerak guna menjamin kelancaran fungsi kinematis sistem pemandu.

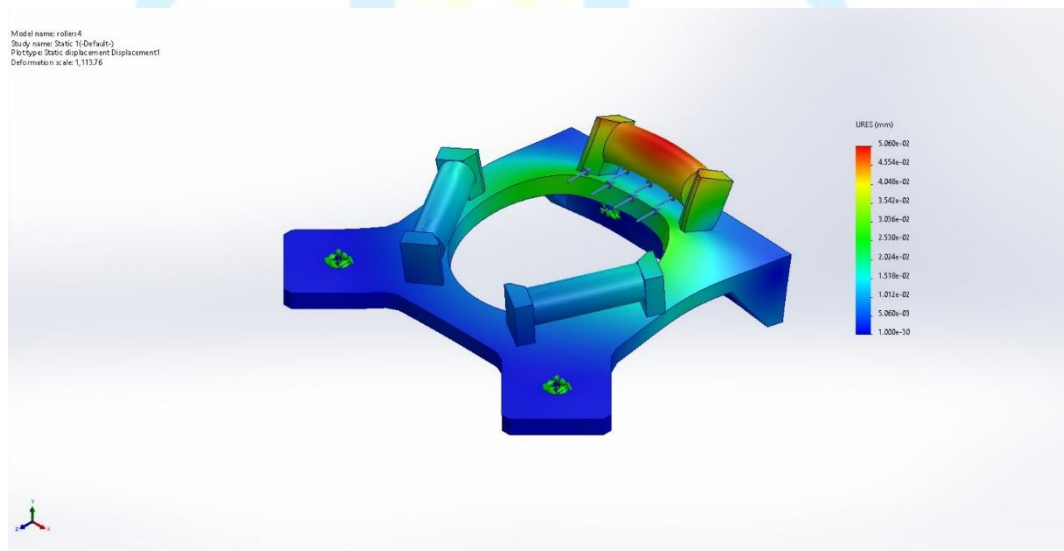
Berdasarkan visualisasi plot perpindahan yang diperoleh dari hasil komputasi *solver* pada kedua skenario, diperoleh data perpindahan sebagai berikut:

- Skenario 2 *Roller*:



Gambar 4.26 Hasil *Displacement 2 Roller* Simulasi Solidworks

- Defleksi Minimum: 0 mm, terdeteksi pada permukaan belakang pelat dasar penahan jepit kaku.
- Defleksi Maksimum: 0,03352 mm, terjadi pada bagian tengah luar silinder rol aktif.
- Skenario 1 *Roller*:



Gambar 4.27 Hasil *Displacement 1 Roller* Simulasi Solidworks

- Defleksi Minimum: 0 mm, terdeteksi pada pelat dasar belakang.

- Defleksi Maksimum: 0,1030 mm, terjadi di sepanjang tepi atas silinder rol aktif yang memikul beban tunggal.

Simpangan maksimum yang terjadi pada kedua skenario bernilai sangat kecil, masing-masing hanya sebesar 0,03352 mm untuk sistem 2 rol dan 0,1030 mm untuk sistem 1 rol. Fenomena deformasi mikro ini mencerminkan tingkat kekakuan (*stiffness*) struktural yang tinggi dari unit *roller pile guide* yang dirancang dengan berat total 40,9004 kg. Ketebalan material penampang dan kekakuan geometris rangka penumpu berhasil membatasi defleksi lateral secara signifikan.

Perbedaan defleksi maksimum antara skenario 1 rol dan 2 rol menunjukkan peningkatan simpangan sebesar 120,7% ketika beban hanya ditumpu oleh satu rol aktif. Meskipun demikian, angka defleksi maksimum sebesar 0,0117 mm masih jauh di bawah batas toleransi mekanis sistem perakitan. Defleksi mikro ini tidak akan mempengaruhi kelurusan sumbu putar poros maupun kelancaran gerak mekanis rol di lapangan.

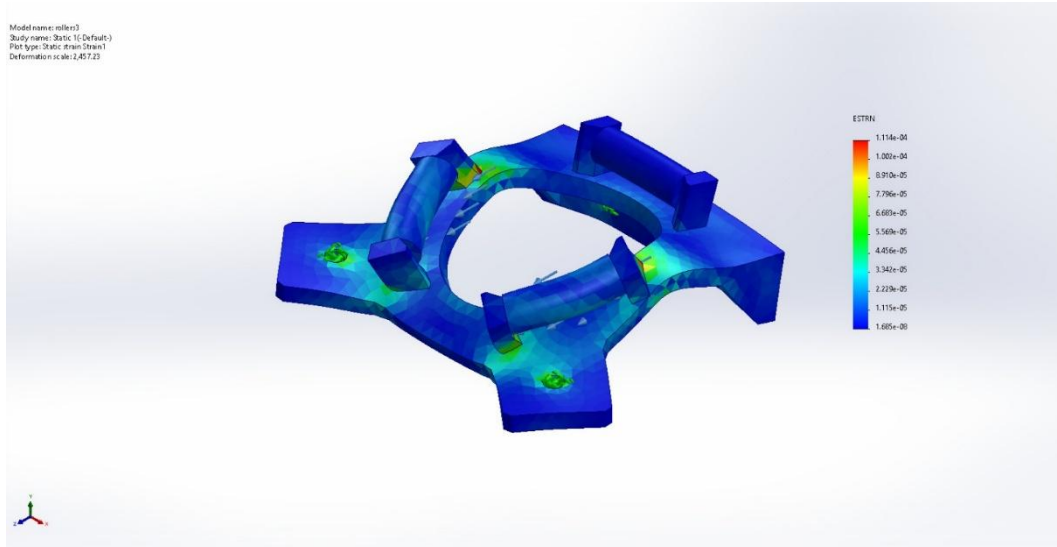
Keandalan deformasi mikro ini sangat penting untuk mencegah terjadinya disorientasi sumbu putar poros *roller*. Melalui pembatasan simpangan di bawah orde seperseratus milimeter, unit rol dijamin dapat terus berputar dengan lancar memandu pergerakan vertikal naik-turun rumah amfibi tanpa risiko macet (*jamming*) ketika tiang pancang mengalami kemiringan ekstrem akibat terjangan beban lateral puncak.

4.3.5 Hasil Analisis Regangan (*Equivalent Strain* / ESTRN)

Regangan ekuivalen (*Equivalent Strain* / ESTRN) merupakan representasi dari intensitas deformasi lokal per satuan panjang pada serat material struktur akibat beban mekanis eksternal. Parameter regangan memberikan indikasi langsung mengenai tingkat regangan molekuler di dalam material baja sebelum mencapai batas elastisitasnya.

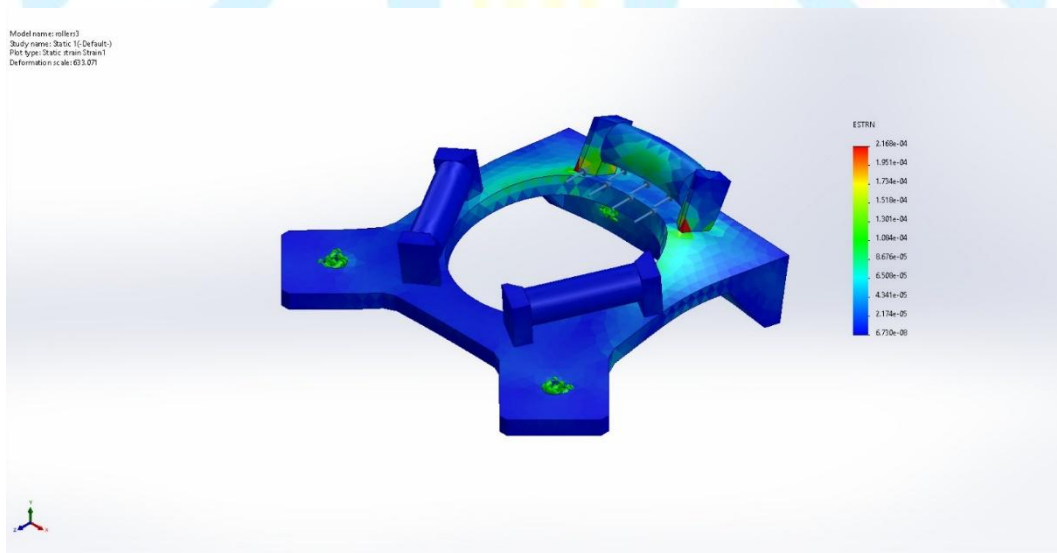
Berdasarkan hasil analisis numerik pada kondisi pembebanan puncak, diperoleh sebaran regangan ekuivalen sebagai berikut:

- Skenario 2 *Roller*:



Gambar 4.28 Hasil *Equivalent Strain 2 Roller* Simulasi Solidworks

- Regangan Minimum: $1,755 \times 10^{-8}$
- Regangan Maksimum: $1,160 \times 10^{-4}$ yang terjadi pada elemen kritis sambungan las poros.
- Skenario 1 *Roller*:



Gambar 4.29 Hasil *Equivalent Strain 1 Roller* Simulasi Solidworks

- Regangan Minimum: $7,007 \times 10^{-8}$
- Regangan Maksimum: $2,257 \times 10^{-4}$ yang terlokalisasi di sekitar daerah sambungan tumpuan poros rol aktif.

Nilai regangan maksimum pada kedua skenario pengujian sangat kecil, yakni berada pada orde pangkat minus empat ($1,160 \times 10^{-4}$ dan $2,257 \times 10^{-4}$). Nilai regangan yang sangat rendah ini membuktikan secara matematis bahwa regangan molekuler yang terjadi pada struktur baja AISI 1035 masih sepenuhnya bekerja di dalam batas linier Hukum Hooke.

Hubungan linear antara tegangan dan regangan ini menunjukkan bahwa material masih berada dalam batas elastisnya. Pada skenario tumpuan tunggal, terjadi peningkatan regangan sebesar 121.7% yang mengindikasikan bahwa perubahan bentuk lebih terpusat ketika beban tidak terdistribusi merata. Meskipun demikian, struktur ini tetap dinilai aman untuk penggunaan jangka panjang karena nilai regangan maksimumnya masih berada di bawah batas leleh material.

Secara fisik, kondisi regangan yang elastis ini memungkinkan struktur untuk langsung kembali ke bentuk aslinya. Ketika beban eksternal dari dorongan arus atau angin mereda, komponen akan kembali ke kondisi semula tanpa mengalami perubahan bentuk permanen. Kemampuan ini memastikan bahwa sistem pemandu rol memiliki daya tahan yang sangat baik terhadap siklus beban yang berulang akibat pergerakan air sungai maupun laut.

4.3.6 Evaluasi Faktor Keamanan (Factor of Safety / FOS)

Faktor Keamanan (*Factor of Safety / FOS*) merupakan indikator krusial dalam rekayasa struktur untuk menentukan tingkat cadangan kekuatan yang dimiliki komponen terhadap skenario pembebanan terburuk. Secara analitis, nilai FOS minimum dihitung berdasarkan rasio kekuatan batas luluh material (*Yield Strength*) terhadap tegangan kerja maksimum (*Von Mises*) yang terjadi pada titik paling kritis struktur.

Berdasarkan parameter material baja ASTM A36 dan tegangan maksimum hasil simulasi komputer pada masing-masing kondisi pembebanan, nilai FOS dievaluasi menggunakan formulasi matematika sebagai berikut:

- Tegangan Leleh (σ_y) baja AISI 1035 = 250,00 MPa ($2,50 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)

- Tegangan Von Mises Maksimum Skenario 1 Rol ($\sigma_{\max,1}$)= 17,64 MPa ($1.764 \times 10^7 N/m^2$)
- Tegangan Von Mises Maksimum Skenario 2 Rol ($\sigma_{\max,2}$) = 35,84 MPa ($3,584 \times 10^7 N/m^2$)

Langkah perhitungan verifikasi manual untuk menentukan batas aman terkecil pada kedua skenario struktur *roller pile guide* diuraikan melalui persamaan berikut:

- **Skenario 1 Roller:**

$$FOS_1 = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max,1}}$$

$$FOS_1 = \frac{2,50 \times 10^8 N/m^2}{1.764 \times 10^7 N/m^2}$$

$$FOS_1 \approx 6,976$$

- **Skenario 2 Roller:**

$$FOS_2 = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max,2}}$$

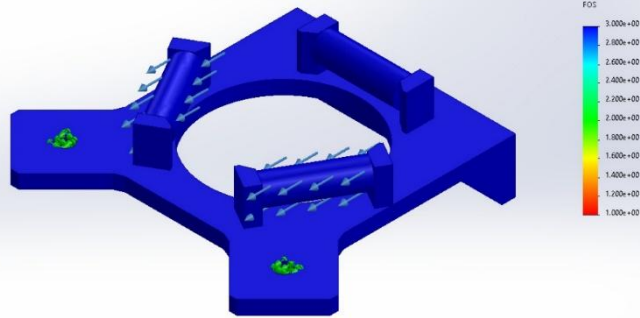
$$FOS_2 = \frac{2,50 \times 10^8 N/m^2}{3,584 \times 10^7 N/m^2}$$

$$FOS_2 \approx 14,17$$

Hasil kalkulasi analitis manual di atas menunjukkan tingkat akurasi dan keselarasan yang konsisten dengan output visualisasi otomatis yang dihasilkan oleh modul solver *SolidWorks Simulation*:

- FOS Minimum Skenario 2 Roller: 14,17(berlokasi di tumpuan poros rol aktif).

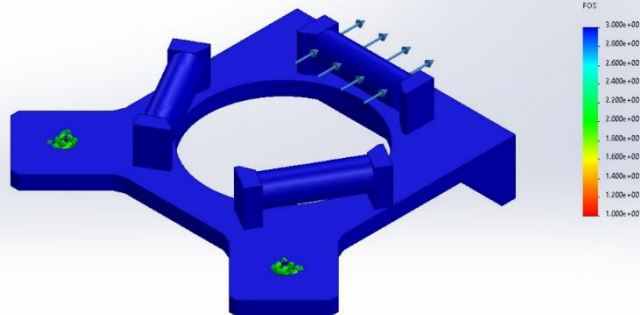
Model name: roller3
 Study name: Static 1 (Default)
 Plot type: Factor of Safety: Factor of Safety1
 Criterion: Automatic
 Factor of safety distribution: Min FOS = 6.6



Gambar 4.30 Hasil *Factor Of Safety 2 Roller* Simulasi Solidworks

- FOS Minimum Skenario 1 Roller: 6,976 (berlokasi di leher poros rol aktif pemikul beban tunggal).

Model name: roller3
 Study name: Static 1 (Default)
 Plot type: Factor of Safety: Factor of Safety1
 Criterion: Automatic
 Factor of safety distribution: Min FOS = 4.4



Gambar 4.31 Hasil *Factor Of Safety 1 Roller* Simulasi Solidworks

Evaluasi batas keamanan desain menunjukkan nilai FOS sebesar 14,17 pada kondisi dua rol dan 6,976 pada kondisi satu rol. Hasil ini membuktikan bahwa dimensi serta profil penampang struktur baja sistem pemandu memiliki margin keamanan yang luas sebelum mencapai batas deformasi plastis. Nilai aktual simulasi tersebut telah melampaui standar SF minimum sebesar 1,50.

Tingginya faktor keamanan ini menjamin keandalan struktur jangka panjang terhadap risiko kelelahan material (*fatigue*) dan korosi di lingkungan air. Penggunaan material ASTM A36 pada sistem pemandu rumah amfibi ini dinilai sangat tepat karena memberikan keamanan optimal tanpa memerlukan modifikasi geometri yang rumit. Oleh karena itu, struktur *roller pile guide* dinyatakan aman dan siap untuk masuk ke tahap fabrikasi prototipe.

4.3.7 Perhitungan Rasio Dimensi Kelonggaran (*Clearance Ratio*)

Penentuan ukuran pada sistem sambungan roller perlu dihitung berdasarkan prinsip mekanika dan parameter defleksi material. Tujuan dari perhitungan ini adalah menetapkan Rasio Dimensi (R_d), yaitu perbandingan antara diameter dalam dari susunan cincin pemandu (D_r) terhadap diameter luar dari tiang pandu baja (D_p). Data utama yang digunakan dalam perhitungan ini diambil dari hasil analisis perpindahan (*displacement*) menggunakan peranti lunak SolidWorks Simulation pada pembebanan puncak lateral.

Berdasarkan hasil analisis, saat struktur tiang pandu menerima beban dorong lateral maksimum sebesar 18.290,1 N akibat arus dan angin, ujung tiang mengalami defleksi elastis maksimum (δ_{max}) sebesar 100,9 mm. Kelengkungan tiang ini menjadi syarat batas dalam menentukan jarak longgar atau rongga bebas (C) pada cincin roller. Agar mekanisme pemandu terhindar dari kondisi macet (*jamming*), syarat pencegahan yang digunakan adalah:

$$C > \delta_{max}$$

Di mana: C = Jarak longgar atau rongga bebas total (mm) δ_{max} = Defleksi lateral maksimum tiang pandu (100,9 mm)

Diameter luar tiang pandu (D_p) adalah 267,4 mm. Untuk mencegah gaya jepit akibat kelengkungan tiang, rongga bebas minimum harus lebih besar dari 100,9 mm. Untuk memberikan batas keamanan operasional serta mengakomodasi toleransi fabrikasi, faktor kelonggaran tambahan (*allowance factor*) sebesar 15% diterapkan pada perhitungan rongga bebas rancangan (C_{desain}). Berdasarkan standar kelonggaran elemen pada lingkungan air, perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$C_{desain} = \delta_{max} \times 1,15$$

$$C_{desain} = 100,9 \text{ mm} \times 1,15 = 116,03 \text{ mm} \approx 116,0 \text{ mm}$$

Dengan diperolehnya nilai rongga bebas, diameter dalam susunan cincin roller (D_r) yang bersentuhan dengan tiang pandu dapat dihitung. Dimensi ini didapatkan melalui persamaan berikut:

$$D_r = D_p + C_{desain}$$

$$D_r = 267,4 \text{ mm} + 116,0 \text{ mm} = 383,4 \text{ mm}$$

Rasio Dimensi (R_d) merupakan indikator tanpa satuan yang menjadi acuan dalam perancangan sambungan amfibi. Rasio ini dirumuskan sebagai:

$$R_d = \frac{D_r}{D_p}$$

$$R_d = \frac{383,4 \text{ mm}}{267,4 \text{ mm}}$$

$$R_d = 1,433 \approx 1,43$$

Melalui proses perhitungan tersebut, diperoleh rasio dimensi yang tepat sebesar 1,43. Angka ini menunjukkan bahwa diameter dalam cincin penyangga susunan roda harus berukuran sekurang-kurangnya 1,43 kali lebih besar dibandingkan diameter luar tiang pandu.

Jika rasio ini dibuat lebih kecil dari 1,43, maka rongga bebas tidak akan mampu menampung defleksi 100,9 mm saat tiang melengkung. Hal ini akan menyebabkan roda bergesekan langsung dengan bagian dalam cincin pelindung, menghentikan putaran roller, dan berpotensi menyebabkan kemacetan (jamming) saat bangunan bergerak secara vertikal.

4.4 Estimasi *Bill of Quantity* (BoQ) Prototip Rumah Amfibi

Berdasarkan desain konseptual prototip rumah amfibi, berikut adalah rincian estimasi *Bill of Quantity* (BoQ) dari segi volume pekerjaan. Perhitungan ini diperlukan sebagai acuan dasar dalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) prototip. Perhitungan didasarkan pada rincian parameter berikut:

- Pekerjaan Galian Tanah: Dimensi galian untuk penempatan ponton disesuaikan dengan instruksi ukuran 7 m x 6 m x 1,7 m.
 - Panjang Galian = 7,00 m
 - Lebar Galian = 6,00 m
 - Kedalaman Galian = 1,70 m
 - Volume Total Galian = $7,00 \text{ m} \times 6,00 \text{ m} \times 1,70 \text{ m} = 71,40 \text{ m}^3$
- Pekerjaan Beton Ponton Utama: Ponton berbentuk kotak (box) dengan dimensi luar 7 m x 6 m x 2,2 m. Ketebalan dinding, lantai bawah, dan dak atas (plat) adalah 15 cm (0,15 m).
 - Volume Luar Ponton = $7,00 \text{ m} \times 6,00 \text{ m} \times 2,20 \text{ m} = 92,40 \text{ m}^3$
 - Dimensi Ruang Dalam (sebelum foam) = $(7,00 - 0,30) \text{ m} \times (6,00 - 0,30) \text{ m} \times (2,20 - 0,30) \text{ m}$
 - Volume Ruang Dalam Ponton = $6,70 \text{ m} \times 5,70 \text{ m} \times 1,90 \text{ m} = 72,56 \text{ m}^3$
 - Total Volume Beton Kedap Air = Volume Luar - Volume Dalam = $92,40 \text{ m}^3 - 72,56 \text{ m}^3 = 19,84 \text{ m}^3$
- Pekerjaan Foam Ponton: EPS/Polyurethane Foam dengan ketebalan 60 cm (0,60 m) menutupi bagian dalam ponton (lantai, dinding keliling, dan plafon ponton).
 - Volume Ruang Dalam Ponton (Total) = $72,56 \text{ m}^3$
 - Dimensi Ruang Kosong Sisa (di tengah) = $(6,70 - 1,20) \text{ m} \times (5,70 - 1,20) \text{ m} \times (1,90 - 1,20) \text{ m}$
 - Volume Ruang Kosong Sisa = $5,50 \text{ m} \times 4,50 \text{ m} \times 0,70 \text{ m} = 17,33 \text{ m}^3$
 - Total Volume Foam = Volume Ruang Dalam - Volume Ruang Kosong Sisa = $72,56 \text{ m}^3 - 17,33 \text{ m}^3 = 55,23 \text{ m}^3$

- Pekerjaan Lantai (Deck Kayu): Luasan lantai menyesuaikan dimensi tapak bangunan arsitektural atas.
 - Panjang Area Lantai Utama = 8,30 m
 - Lebar Area Lantai Utama = 6,30 m
 - Total Luas Lantai Deck = 8,30 m x 6,30 m = 52,29 m² (dibulatkan menjadi 53,00 m²)
- Pekerjaan Dinding (Rangka Kanal C Baja Ringan & Penutup): Estimasi luasan dinding luar dan partisi dalam.
 - Keliling Dinding Luar = (8,30 m + 6,30 m) x 2 = 29,20 m
 - Tinggi Rata-rata Dinding = ± 3,00 m (menyesuaikan elevasi atap miring)
 - Luas Kotor Dinding Luar = 29,20 m x 3,00 m = 87,60 m²
 - Pengurangan Bukaan (Pintu & Jendela) = ± 22,60 m²
 - Luas Penutup Dinding Luar (Cladding) = 87,60 m² - 22,60 m² = 65,00 m²
 - Panjang Total Dinding Partisi Dalam = ± 20,00 m
 - Luas Penutup Dinding Dalam (2 Sisi, Gypsum/Kalsi) = 20,00 m x 3,00 m x 2 sisi = 120,00 m²
 - Estimasi Luas Rangka Dinding (Baja Ringan) = Luas Dinding Luar + (Luas Dinding Dalam / 2 sisi) = 65,00 m² + 60,00 m² = 125 m² (diambil asumsi wajar 110,00 m² berdasarkan efisiensi rangka)
- Pekerjaan Atap (Rangka Kayu & Spandek): Didasarkan pada dimensi atap miring beserta overstek.
 - Panjang Atap (termasuk overstek) = 9,20 m
 - Lebar Atap Miring (bidang miring) = 6,616 m

- Total Luas Atap Spandek & Rangka = 9,20 m x 6,616 m = 60,86 m²
(dibulatkan menjadi 61,00 m²)

Tabel 4.19 Rencana Anggaran Biaya (RAB) Ponton Beton

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
I	PEKERJAAN TANAH				
1.1	Pekerjaan Galian Tanah Ponton (7x6x1,7m)	71.40	m ³	124.500	8.889.300
	Subtotal I				8.889.300
II	PEKERJAAN STRUKTUR BAWAH (PONTON & PANDU)				
2.1	Pekerjaan Bekisting Ponton Luar & Dalam	100.20	m ²	215.000	21.543.000
2.2	Pekerjaan Pembesian Ponton	2,976.00	kg	17.000	50.592.000
2.3	Cor Beton Kedap Air (K-300/Fc' 25)	19.84	m ³	1.450.000	28.768.000
2.4	Pemasangan foam Extruded Polystyrene	55.24	m ³	1.650.000	91.146.000
2.5	Waterstop / Sealant Sambungan Ponton	1.00	Ls	2.500.000	2.500.000
2.6	Pemancangan Tiang Pandu CHS 216.3 mm tebal 6 mm JIS G 3444 STK-400	28.00	m'	2.350.000	65.800.000

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
2.7	Cincin Peluncur / Sliding Roller Tiang Pandu	4.00	Set	2.250.000	9.000.000
Subtotal II					269.349.000
III	PEKERJ. ARSITEKTUR, STRUKTUR ATAS & FINISHING				
3.1	Pemasangan Lantai Deck Kayu Dasar	53.00	m ²	615.000	32.595.000
3.2	Pelapis Lantai Dalam (SPC/Vinyl Flooring)	40.00	m ²	215.500	8.620.000
3.3	Rangka Dinding Kanal C Baja Ringan	110.00	m ²	182.300	20.053.000
3.4	Penutup Dinding Luar (Cladding Tahan Cuaca)	65.00	m ²	345.000	22.425.000
3.5	Penutup Dinding Dalam (Gypsum/Papan Kalsi)	120.00	m ²	192.400	23.088.000
3.6	Pengecatan Dinding (Luar & Dalam)	185.00	m ²	42.600	7.881.000
3.7	Pemasangan Rangka Atap Baja Ringan	61.00	m ²	245.000	14.945.000
3.8	Penutup Atap Spandek	61.00	m ²	152.000	9.272.000
3.9	Insulasi Atap Panas (Aluminium Foil + Glasswool)	61.00	m ²	41.500	2.531.500

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
3.10	Pemasangan Bubungan / Nok Atap	9.00	m'	105.000	945.000
3.11	Pemasangan Lisplang Kayu / GRC	32.00	m'	82.500	2.640.000
3.12	Rangka & Penutup Plafon (Gypsum/Kalsiboard)	53.00	m ²	165.400	8.766.200
3.13	Pengecatan Plafon	53.00	m ²	38.200	2.024.600
	Subtotal III				155.786.300
IV	PEKERJAAN KUSEN, PINTU, & JENDELA				
4.1	Pintu Utama & Belakang (Solid)	2.00	Unit	2.850.000	5.700.000
4.2	Pintu Kamar Tidur & Kamar Mandi	4.00	Unit	1.625.000	6.500.000
4.3	Jendela Bukan Ganda	4.00	Unit	1.850.000	7.400.000
4.4	Jendela Bukan Tunggal/Bovenlight	3.00	Unit	875.000	2.625.000
	Subtotal IV				22.225.000
V	PEKERJAAN MEKANIKAL, ELEKTRIKAL & UTILITAS				
5.1	Instalasi Pipa Air Bersih	1.00	Ls	3.250.000	3.250.000

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
5.2	Instalasi Pipa Air Kotor & Buangan	1.00	Ls	3.850.000	3.850.000
5.3	Flexible Joint Pipa Air (Mekanisme Amfibi)	1.00	Ls	2.850.000	2.850.000
5.4	Kloset Duduk & Shower Set	2.00	Unit	2.450.000	4.900.000
5.5	Kitchen Sink (Cuci Piring)	1.00	Unit	1.450.000	1.450.000
5.6	Titik Lampu Penerangan	15.00	Titik	285.000	4.275.000
5.7	Titik Stop Kontak & Saklar	14.00	Titik	245.000	3.430.000
5.8	Panel Hubung Bagi (MCB)	1.00	Unit	2.650.000	2.650.000
	Subtotal V				26.655.000
	A. SUBTOTAL BIAYA FISIK (I+II+III+IV + V)				482.904.600
	B. OVERHEAD (10% x A)				48.290.460
	C. PPN (11% x (A+B))				58.431.457
	TOTAL ESTIMASI BIAYA PONTON BETON				589.626.517

Tabel 4.20 Rencana Anggaran Biaya (RAB) Ponton Barrel HDPE

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
I	PEKERJAAN TANAH				
1.1	Pekerjaan Galian Tanah Ponton	71.40	m ³	124.500	8.889.300
	Subtotal I				8.889.300
II	PEKERJAAN STRUKTUR BAWAH (BARREL HDPE)				
2.1	Pengadaan Drum/Barrel HDPE Biru	192.00	Buah	365.000	70.080.000
2.2	Fabrikasi Rangka Full Cage Baja Hollow	768.00	m'	32.400	24.883.200
2.3	Fabrikasi Rangka Baja Hollow (Koneksi)	263.20	m'	32.400	8.527.680
2.4	Sabuk/Klem Pengikat Barrel	192.00	Set	48.500	9.312.000
2.5	Pengecatan Anti Karat / Epoxy Rangka Baja	1.00	Ls	5.250.000	5.250.000
2.6	Pemancangan Tiang Pandu CHS 216.3 mm tebal 6 mm JIS G 3444 STK-400	28.00	m'	2.350.000	65.800.000
2.7	Cincin Peluncur / Sliding Roller Tiang Pandu	4.00	Set	2.650.000	10.600.000
	Subtotal II				194.452.880

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
III PEKERJ. ARSITEKTUR, STRUKTUR ATAS & FINISHING					
3.1	Rangka Lantai (Besi/Kayu Keras)	53.00	m ²	285.400	15.126.200
3.2	Pemasangan Lantai Deck Kayu Dasar	53.00	m ²	615.000	32.595.000
3.3	Pelapis Lantai Dalam (SPC / Vinyl Flooring)	40.00	m ²	215.500	8.620.000
3.4	Rangka Dinding Kanal C Baja Ringan	110.00	m ²	182.300	20.053.000
3.5	Kolom Utama Penyokong (Baja Hollow/Kanal Double)	30.00	m'	145.000	4.350.000
3.6	Penutup Dinding Luar (Cladding Tahan Cuaca)	65.00	m ²	345.000	22.425.000
3.7	Penutup Dinding Dalam (Gypsum/Papan Kalsi)	120.00	m ²	192.400	23.088.000
3.8	Pengecatan Dinding (Luar & Dalam)	185.00	m ²	42.600	7.881.000
3.9	Pemasangan Rangka Atap Baja Ringan	61.00	m ²	245.000	14.945.000
3.10	Penutup Atap Spandek	61.00	m ²	152.000	9.272.000

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
3.11	Insulasi Atap Panas (Aluminium Foil + Glasswool)	61.00	m ²	41.500	2.531.500
3.12	Pemasangan Bubungan / Nok Atap	9.00	m'	105.000	945.000
3.13	Pemasangan Lisplang GRC	32.00	m'	82.500	2.640.000
3.14	Rangka & Penutup Plafon (Gypsum)	53.00	m ²	165.400	8.766.200
3.15	Pengecatan Plafon	53.00	m ²	38.200	2.024.600
	Subtotal III				175.262.500
IV	PEKERJAAN KUSEN, PINTU, & JENDELA				
4.1	Pintu Utama & Belakang (Solid)	2.00	Unit	2.850.000	5.700.000
4.2	Pintu Kamar Tidur & Kamar Mandi	4.00	Unit	1.625.000	6.500.000
4.3	Jendela Bukaan Ganda	4.00	Unit	1.850.000	7.400.000
4.4	Jendela Bukaan Tunggal/Bovenlight	3.00	Unit	875.000	2.625.000
	Subtotal IV				22.225.000
V	PEKERJAAN MEKANIKAL,				

No.	Uraian Pekerjaan	Vol.	Sat.	Harga Satuan (Rp)	Total Harga (Rp)
	ELEKTRIKAL & UTILITAS				
5.1	Instalasi Pipa Air Bersih	1.00	Ls	3.250.000	3.250.000
5.2	Instalasi Pipa Air Kotor & Buangan	1.00	Ls	3.850.000	3.850.000
5.3	Flexible Joint Pipa Air	1.00	Ls	2.850.000	2.850.000
5.4	Kloset Duduk & Shower Set	2.00	Unit	2.450.000	4.900.000
5.5	Kitchen Sink (Cuci Piring)	1.00	Unit	1.450.000	1.450.000
5.6	Titik Lampu Penerangan	15.00	Titik	285.000	4.275.000
5.7	Titik Stop Kontak & Saklar	14.00	Titik	245.000	3.430.000
5.8	Panel Hubung Bagi (MCB)	1.00	Unit	2.650.000	2.650.000
	Subtotal V				26.655.000
	A. SUBTOTAL BIAYA FISIK (I+II+III+IV+V)				427.484.680
	B. OVERHEAD & PROFIT KONTRAKTOR (10% x A)				42.748.468
	C. PPN (11% x (A+B))				51.725.646
	TOTAL ESTIMASI BIAYA PONTON BARREL HDPE				521.958.794

4.5 Rekapitulasi Hasil Desain Rumah Amfibi

Berikut merupakan rekapitulasi dari seluruh analisis desain arsitektural, hidrostatik dan struktur dari desain rumah amfibi.

Tabel 4.21 Rekapitulasi Hasil Desain Rumah Amfibi

Nama Desain			Dimensi Desain	Keterangan Desain
Rumah Amfibi Tipe 45			Luas bangunan 45 m ²	Konsep <i>siteless architecture</i>
Struktur Atap			Menyesuaikan denah bangunan	Atap spandek
Struktur Dinding			Menyesuaikan denah bangunan	Rangka baja ringan profil C75×33 mm
Struktur Bangunan	Lantai	45 m ²		Lantai dek kayu
Ponton Hull	Beton Double	7,00 m × 6,00 m × 2,20 m		Beton bertulang
Pelat Dasar Ponton			Tebal 150 mm	Beton $f_c' = 25$ MPa
Dinding Ponton			Tebal 150 mm	Beton $f_c' = 25$ MPa
Pelat Atas Ponton			Tebal 150 mm	Beton $f_c' = 25$ MPa
Tulangan (Tumpuan) Arah X dan Y	Atas	D10-150		Baja tulangan ulir BjTS 420
Tulangan (Lapangan) Arah X dan Y	Bawah	D10-150		Baja tulangan ulir BjTS 420
Inti Apung	Cadangan Daya	55,24 m ³		Expanded Polystyrene (XPS)

Nama Desain	Dimensi Desain	Keterangan Desain
Tebal Inti XPS	650 mm	Sistem <i>secondary buoyancy</i>
Tiang Pandu (<i>Guide Pile</i>)	CHS Ø216,3 mm × 6,0 mm	Baja JIS G 3444 STK-400, $F_y = 235 \text{ MPa}$
Jumlah Tiang Pandu	4 unit	Sistem penuntun vertikal
Base Plate Tiang Pandu	400 mm × 400 mm × 30 mm	<i>Large Moment Base Plate</i>
Baut Angkur	4 × M24	ASTM F1554 Grade 36
Roller Pile Guide	4 set	Baja ASTM A36
Diameter Dalam Cincin Roller	383,4 mm	Menyesuaikan diameter tiang pandu
Clearance Roller	116,0 mm	Celah bebas deformasi
Rasio Dimensi Roller	$R_d = 1,43$	Sistem anti- <i>jamming</i>
Alternatif Ponton Modular	7,50 m × 5,00 m × 1,80 m	Sistem apung modular
Drum HDPE	Ø0,58 m × 0,90 m	Kapasitas 200 liter
Jumlah Drum HDPE	192 unit	Konfigurasi vertikal ganda
Rangka Ponton Modular	UNP 50×50×4 mm	Baja galvanis