

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tren global menuju pelabuhan ramah lingkungan (*green port*) mendorong berbagai otoritas pelabuhan di dunia untuk mengalihkan operasional peralatan bongkar muat dari penggunaan bahan bakar fosil menuju sistem bertenaga listrik. Salah satu wujud nyata dari kebijakan ini adalah elektrifikasi *Ship-to-Shore (STS) Crane*, yang merupakan salah satu langkah strategis yang kini diprioritaskan di berbagai negara, termasuk Indonesia. Penggunaan sistem elektrifikasi pada STS Crane terbukti mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan, mengurangi polusi suara di lingkungan dermaga, serta menekan biaya operasional hingga 60% dibandingkan dengan sistem penggerak berbasis mesin diesel, sehingga selaras dengan program nasional *green port* dan target *net zero emission* Indonesia.

Sebagai pelabuhan terbesar di Pulau Sumatera dan salah satu simpul utama perdagangan internasional Indonesia, Pelabuhan Belawan di Medan, Sumatera Utara, memiliki peran yang sangat penting dan strategis. Sejak berkembang menjadi terminal peti kemas modern pada tahun 1985, Pelabuhan Belawan kini mampu menangani arus peti kemas hingga dua juta TEUs per tahun. PT Pelindo, sebagai pengelola, menginisiasi program elektrifikasi peralatan bongkar muat, termasuk STS Crane, sebagai bagian dari implementasi konsep *green port* yang komprehensif. Keberhasilan program elektrifikasi ini secara langsung bergantung pada ketersediaan infrastruktur penyaluran kabel yang andal dan dapat dipasang pada kondisi dermaga yang sudah ada.

Dalam sistem elektrifikasi STS Crane, penyaluran energi listrik ke crane yang bergerak dilakukan melalui *sistem Cable Reeling*, yaitu mekanisme kabel berkapasitas besar pada gulungan yang mengikuti pergerakan crane secara dinamis sepanjang rel dermaga. Kabel daya, kabel kontrol, dan kabel data yang terintegrasi dalam sistem ini harus diproteksi dari berbagai risiko mekanis dan lingkungan sepanjang jalur pergerakannya. Perlindungan tersebut disediakan oleh komponen yang disebut *Trench Cable Guard (TCG)*, yaitu sistem pelindung kabel yang

berfungsi menahan beban operasional, melindungi kabel dari kerusakan fisik, dan memudahkan akses pemeliharaan tanpa mengganggu operasi terminal.

Permasalahan mendasar dalam implementasi elektrifikasi pada dermaga lama bukan semata-mata pada ketersediaan pasokan daya, melainkan pada keterbatasan infrastruktur sipil eksisting. Dermaga yang dibangun sebelum era elektrifikasi (umumnya sebelum tahun 2000) tidak dirancang untuk mengakomodasi sistem distribusi kabel berdaya besar bagi STS Crane listrik. Struktur beton dermaga tersebut telah mengalami degradasi akibat berbagai faktor, antara lain paparan lingkungan laut yang korosif dalam jangka panjang, *fatigue loading* akibat siklus beban crane yang berulang selama puluhan tahun operasi, serta penurunan kapasitas struktur akibat *settlement*, retak, dan korosi tulangan baja.

Pendekatan konvensional untuk menyediakan jalur distribusi kabel adalah dengan membangun *cable trench* di bawah atau di dalam permukaan lantai dermaga. Pada dermaga lama, metode ini menghadapi sejumlah risiko teknis yang perlu dipertimbangkan. Dari sisi struktural, proses pemotongan slab beton eksisting berisiko memotong tulangan utama slab, mengganggu *pile cap*, merusak balok dermaga, atau mengenai jaringan utilitas lama yang tidak terdokumentasi, sehingga dapat mengakibatkan penurunan kapasitas dukung lantai dermaga, risiko kegagalan struktur lokal, dan kebutuhan perkuatan struktural yang berbiaya tinggi. Dari sisi operasional, proses konstruksi trench menuntut penghentian atau pembatasan signifikan terhadap operasional terminal yang sedang berjalan, yang berdampak langsung pada produktivitas bongkar muat dan pendapatan pelabuhan. Dari sisi durabilitas, trench yang tertanam di lingkungan pelabuhan sangat rentan terhadap genangan air laut, infiltrasi, dan kerusakan akibat korosi jangka panjang, yang menambah beban biaya pemeliharaan. Pada dermaga dengan kondisi struktur yang sudah terdegradasi, ketiga permasalahan tersebut menjadikan pembuatan trench konvensional sebagai pilihan yang berisiko secara teknis dan tidak ekonomis.

Selain risiko teknis tersebut, keterbatasan ruang dan waktu akibat operasional terminal yang tetap berjalan selama proyek elektrifikasi menambah kompleksitas pelaksanaan. Jalur kendaraan terminal, sistem drainase eksisting, utilitas lama, dan

area pergerakan crane secara langsung membatasi ruang dan waktu konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan solusi pelindung kabel yang tidak memerlukan intervensi invasif pada struktur dermaga eksisting dan dapat dipasang dengan gangguan minimal terhadap operasional terminal.

Sebagai alternatif dari pembuatan cable trench konvensional yang bersifat invasif, penelitian ini mengembangkan konsep *Trench Cable Guard (TCG) modular yang dipasang di atas permukaan dermaga (surface-mounted)*. Konsep ini menempatkan pelindung kabel di atas lantai dermaga, di sisi luar jalur roda gantry crane pada bagian laut dermaga, tanpa memerlukan pembongkaran atau pemotongan struktur slab eksisting. Pendekatan *surface-mounted TCG* memungkinkan pelaksanaan program elektrifikasi tanpa menghentikan operasional terminal secara total, bersifat modular sehingga mudah dipasang dan dikonfigurasi ulang, serta tidak berdampak pada integritas struktural dermaga eksisting.

Lingkungan pelabuhan yang korosif menuntut material TCG yang mampu bertahan terhadap paparan air laut, fluktuasi suhu ekstrem, radiasi ultraviolet, serta beban mekanis dari pergerakan crane dan lalu lintas kendaraan terminal. Dari hasil kajian material, *High-Density Polyethylene (HDPE)* memenuhi semua persyaratan tersebut: ketahanan kimia dan korosi yang sangat baik di lingkungan laut tanpa mengalami korosi seperti logam, bobot yang ringan yang memudahkan instalasi modular, sifat mekanik yang memadai untuk menahan beban operasional dermaga (tegangan tarik 20–32 MPa; modulus lentur 0,8–1,5 GPa), serta kemampuan pengolahan yang sangat kompatibel dengan proses blow molding. Studi longitudinal pada aplikasi HDPE di infrastruktur maritim menunjukkan bahwa material ini mampu mempertahankan sekitar 85–90% kekuatan tarik awalnya setelah paparan jangka panjang di lingkungan pelabuhan (Park et al., 2023), yang mendukung target umur desain 15 tahun.

Pemilihan HDPE membuka peluang penggunaan proses blow molding sebagai metode produksi TCG. Namun, kebaruan penelitian ini bukan semata-mata pada pemilihan blow molding sebagai proses manufaktur, melainkan pada penerapan *Pendekatan Blow Mold Design* sebagai landasan perancangan produk secara

menyeluruh. Pendekatan ini, yang dikenal dalam literatur manufaktur sebagai *Design for Blow Molding (DfBM)*, menempatkan karakteristik, batasan, dan keunggulan proses blow molding sebagai parameter desain primer sejak tahap awal perancangan, bukan sebagai pertimbangan sekunder setelah desain produk selesai. Dalam pendekatan DfBM, seluruh parameter geometri TCG, yaitu ketebalan dinding, konfigurasi *rib* penguat, sudut draft, radius sudut dalam, penempatan *parting line*, dan fitur *locking* modular, semuanya dirancang secara terintegrasi dengan mempertimbangkan batasan dan keunggulan proses blow molding sejak awal. Pendekatan ini menghasilkan desain yang tidak hanya memenuhi persyaratan fungsional dan struktural, tetapi juga optimal dari sisi kemampuan diproduksi (*manufacturability*), efisiensi material, dan kesiapan untuk produksi massal. Dengan kata lain, proses blow molding bukan hanya dipilih untuk memproduksi desain yang sudah ada, melainkan menentukan desain itu sendiri dari tahap paling awal.

Untuk memverifikasi bahwa desain TCG yang dihasilkan melalui Pendekatan Blow Mold Design mampu memenuhi persyaratan kekuatan mekanik di lingkungan operasional dermaga, dilakukan evaluasi struktural menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Dalam penelitian ini, FEA berperan sebagai studi kasus evaluasi struktural dan alat validasi desain, bukan sebagai tujuan penelitian yang berdiri sendiri. FEA memungkinkan identifikasi distribusi tegangan von Mises, deformasi, dan faktor keamanan desain sebelum proses fabrikasi prototipe dilakukan, sehingga desain dapat dikonfirmasi atau diperbaiki secara iteratif tanpa membutuhkan komponen fisik terlebih dahulu.

Berdasarkan permasalahan yang telah dipaparkan, penelitian ini difokuskan pada perancangan Trench Cable Guard berbahan HDPE dengan menggunakan Pendekatan Blow Mold Design, sebagai solusi infrastruktur perlindungan kabel yang efektif, efisien, dan tidak merusak struktur dermaga eksisting untuk mendukung program elektrifikasi STS Crane pada dermaga lama di Pelabuhan Belawan. Penelitian ini berupaya menunjukkan bahwa Pendekatan Blow Mold Design menghasilkan TCG yang tidak hanya layak secara struktural, tetapi juga

optimal dari sisi kemampuan diproduksi dan siap untuk diimplementasikan di lapangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang Trench Cable Guard berbahan HDPE yang memenuhi persyaratan fungsional, struktural, dan ketahanan lingkungan untuk sistem elektrifikasi STS Crane di dermaga lama?
2. Bagaimana prinsip-prinsip Pendekatan *Blow Mold Design (Design for Blow Molding)* diterapkan dalam menentukan parameter geometri, ketebalan dinding, konfigurasi *rib*, dan fitur modular Trench Cable Guard?
3. Bagaimana performa struktural desain Trench Cable Guard yang dihasilkan terhadap beban operasional di lingkungan dermaga, berdasarkan evaluasi menggunakan simulasi *Finite Element Analysis (FEA)* sebagai studi kasus validasi desain?

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjaga fokus dan kedalaman kajian, ditetapkan batasan penelitian sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada perancangan mekanik Trench Cable Guard dengan menggunakan Pendekatan *Blow Mold Design (Design for Blow Molding/DfBM)* sebagai inti metodologi.
2. Proses blow molding yang dikaji kemampuan produksinya adalah *Extrusion Blow Molding (EBM)*, yang relevan untuk komponen berukuran besar dengan volume produksi menengah hingga tinggi.
3. Material yang digunakan pada desain dan analisis adalah *HDPE grade blow molding* dengan *UV stabilizer*, mengacu pada parameter material PE High Density yang tersedia pada SolidWorks Simulation.

4. Analisis kekuatan mekanik dibatasi pada pembebanan vertikal statis yang meliputi berat sendiri *Trench Cable Guard*, beban kabel sekitar 500 kg per modul, dan beban hidup pada permukaan TCG.
5. Simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) digunakan sebagai studi kasus evaluasi struktural dan alat validasi desain, bukan sebagai tujuan atau fokus utama penelitian.
6. Penelitian tidak mencakup proses fabrikasi fisik prototipe, pengujian material secara eksperimental, implementasi instalasi di lapangan, maupun perancangan sistem kelistrikan dan distribusi daya STS Crane.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang *Trench Cable Guard* berbahan HDPE yang optimal guna mendukung program elektrifikasi STS Crane pada dermaga lama. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

- Merancang *Trench Cable Guard* berbahan HDPE yang memenuhi persyaratan fungsional, struktural, dan ketahanan lingkungan untuk sistem elektrifikasi STS Crane di dermaga lama, berdasarkan analisis kebutuhan operasional dan karakteristik lingkungan pelabuhan.
- Menerapkan Pendekatan *Blow Mold Design* (Design for Blow Molding) secara terintegrasi dalam seluruh tahap perancangan *Trench Cable Guard*, yang mencakup penetapan parameter geometri, ketebalan dinding, konfigurasi rib, fitur sudut draft, dan sistem locking modular, sehingga menghasilkan desain yang optimal dari sisi fungsi, kekuatan, dan kemampuan diproduksi melalui proses blow molding.
- Mengevaluasi performa struktural desain *Trench Cable Guard* menggunakan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) sebagai studi kasus validasi, untuk mengidentifikasi distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan, serta mengkonfirmasi kelaikan desain hasil Pendekatan *Blow Mold Design* sebelum dilakukan fabrikasi prototipe.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat pada dua dimensi, yaitu manfaat teoritis/akademis dan manfaat aplikatif/praktis.

1) Manfaat Teoritis/Akademis

- Menambah referensi akademik tentang penerapan pendekatan Design for Blow Molding (DfBM) pada perancangan komponen infrastruktur berstruktur berongga (hollow section) dalam konteks lingkungan kelautan dan pelabuhan. Kajian sejenis masih sangat terbatas dalam literatur teknik mesin.
- Menyediakan kerangka metodologis integrasi antara Pendekatan DfBM, analisis kekuatan mekanik, dan simulasi FEA sebagai studi kasus validasi dalam perancangan komponen polimer untuk infrastruktur teknik, yang dapat diadopsi dalam penelitian sejenis.
- Memperkaya literatur tentang pemanfaatan HDPE blow molding pada komponen infrastruktur maritim sebagai alternatif terhadap komponen logam konvensional, dengan mempertimbangkan aspek kekuatan, ketahanan lingkungan, dan kemampuan manufaktur secara bersamaan.

2) Manfaat Aplikatif/Praktis

- Menghasilkan desain Trench Cable Guard yang tahan korosi, ringan, modular, dan efisien untuk diproduksi massal melalui proses blow molding, sehingga mendukung implementasi program elektrifikasi STS Crane pada dermaga lama tanpa intervensi struktural yang invasif terhadap lantai dermaga eksisting.
- Menyediakan dasar teknis bagi operator pelabuhan dan produsen komponen infrastruktur untuk mengadopsi solusi pelindung kabel berbasis polimer HDPE sebagai alternatif terhadap sistem logam konvensional, dengan keunggulan pada ketahanan korosi dan biaya perawatan jangka panjang yang lebih rendah.

- Memberikan kontribusi pada upaya pengurangan emisi dan efisiensi energi operasional pelabuhan melalui fasilitasi elektrifikasi peralatan bongkar muat pada infrastruktur dermaga eksisting.
- Menjadi prototipe desain dan panduan metodologis untuk pengembangan komponen infrastruktur pelabuhan serupa menggunakan Pendekatan Design for Blow Molding pada industri maritim.

