

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Hingga saat ini, sebagian besar desain struktur banyak didasarkan pada prinsip tekan (*compression*). Pada umumnya, sebuah struktur dapat berdiri karena ada berat sendiri yang menekan ke bawah dan kontinuitas tegangan dalam bentuk *compression* yang terjadi pada elemen-elemennya (Bansod et al., 2014). Hal ini sedikit berbeda dengan yang terjadi di alam, di mana tekan diseimbangkan dengan keberadaan tarik, menciptakan sebuah harmoni di antara dua unsur tersebut (Juan & Mirats Tur, 2008). Manusia seringkali belajar dari alam dalam menciptakan terobosan-terobosan teknologi, dan konsep keseimbangan tekan-tarik yang terjadi di alam ini menjadi prinsip dasar dari konsep *tensegrity*.

Konsep *tensegrity* berasal dari dua kata, yaitu *tensional* dan *integrity*, pertama kali dicetuskan oleh Fuller (1962). Dalam patennya, Fuller menyebutkan *tensegrity* sebagai “*islands of compression inside an ocean of tension*”. Pugh (1976) menggabungkan usulan yang disebutkan dalam paten Fuller (1962), Emmerich (1963) dan Snelson (1965) menjadi definisi *tensegrity* yang banyak diterima saat ini, yaitu “*a tensegrity system is established when a set of discontinuous compression components interacts with a set of continuous tensile components to define a stable volume in space.*” Dari definisi ini, dapat disimpulkan bahwa sebuah sistem *tensegrity* adalah sistem yang stabil dan memiliki kekakuan di bawah interaksi komponen tekan dan tarik (Juan & Mirats Tur, 2008). Konsep inilah yang diadopsi oleh dunia struktur dan arsitektur menjadi struktur *tensegrity*. Contoh konsep *tensegrity* yang terdapat di alam adalah jaring laba-laba dan otot lengan manusia (Skelton & Oliveira, 2009).

Struktur *tensegrity* berbentuk mirip dengan rangka batang yang hanya menyalurkan beban dalam satu arah dan memiliki *joint* berupa sendi, namun kekakuannya berasal dari kondisi *self-stress* (Masic et al., 2006; Lee & Lee, 2016). Struktur ini terdiri atas dua jenis komponen, yaitu *struts* (komponen tekan) dan *cables* (komponen tarik). Struktur *tensegrity* disusun sedemikian rupa sehingga timbul interaksi antara gaya tarik dan tekan yang terjadi pada komponen-komponennya, kemudian menciptakan kondisi *self-equilibrium*, yaitu kondisi kesetimbangan struktur tanpa adanya gaya luar (Zhang & Ohsaki, 2015). Struktur *tensegrity* dinilai punya banyak kelebihan. Selain nilai estetikanya yang tinggi, struktur *tensegrity* juga efisien karena bisa mencapai kekuatan yang dibutuhkan hanya dengan massa yang kecil dengan memanfaatkan konfigurasinya (Skelton et al., 2001). Saat ini, struktur *tensegrity* sudah

diaplikasikan dalam berbagai jenis bangunan, mulai dari *tower*, *dome*, hingga atap stadium (Gilewski et al., 2015).

Analisis struktur *tensegrity* adalah tantangan tersendiri bagi para *structural engineers*, karena secara umum, struktur ini bersifat statis tak tentu dan kinematis tak tentu (Tran & Lee, 2011). Selain itu, struktur *tensegrity* juga memiliki perilaku material dan perilaku *load-displacement* yang non-linear (Toklu & Uzun, 2016). Sifat-sifat ini membuat struktur *tensegrity* berperilaku secara non-linear baik secara material maupun secara geometris, sehingga membuat proses analisis struktur menjadi lebih rumit. Misalnya, analisis struktur yang menggunakan metode elemen hingga. Pada analisis non-linear menggunakan metode elemen hingga, matriks kekakuan yang dihasilkan pun bersifat non-linear. Hal ini berarti matriks kekakuan akan bergantung kepada matriks gaya luar dan matriks perpindahan, sehingga proses analisis strukturnya menjadi lebih rumit. Metode untuk menyelesaikan masing-masing tipe struktur non-linear pun berbeda, dan tidak terdapat satu metode universal yang dapat menyelesaikan seluruh tipe non-linearitas (Temur et al., 2017).

Toklu (2004) mengusulkan sebuah metode yang melakukan analisis struktur non-linear menggunakan prinsip energi potensial dan memanfaatkan metode metaheuristik untuk melakukan iterasi, yaitu *total potential energy optimization with metaheuristic methods* (TPO/MA). Metode ini didasarkan pada prinsip energi minimum. Metode ini pertama kali diaplikasikan untuk melakukan analisis non-linear pada struktur rangka batang (Toklu, 2004; Toklu, 2013; Temur et al., 2017), dan telah diteliti lebih lanjut untuk analisis non-linear pada struktur-struktur lainnya yang lebih kompleks, seperti *plane stress* dan *plane strain system* (Kayabekir et al., 2020; Toklu et al., 2020; Toklu et al., 2021) hingga struktur kabel (Temur et al., 2014; Toklu et al., 2017). TPO/MA merupakan metode universal yang dapat digunakan pada analisis linear maupun non-linear tipe apapun (Temur et al., 2017).

Pada studi-studi sebelumnya, tiap algoritma metaheuristik yang digunakan dalam TPO/MA memiliki performa yang bervariasi pada setiap tipe struktur dan studi kasus yang diteliti (Toklu et al., 2021). Meski hampir seluruh algoritma terutama algoritma generasi baru dapat menyelesaikan permasalahan yang diteliti, beberapa algoritma yang memiliki efisiensi dan akurasi yang lebih baik dibandingkan algoritma lainnya. Beberapa di antaranya adalah *teaching-learning-based optimization* atau TLBO (Rao et al., 2011) dan *harmony search* atau HS (Geem et al., 2001) (Bekdas et al., 2019; Kayabekir et al. 2020, Toklu et al., 2021).

TPO/MA baru dua kali digunakan untuk menganalisis struktur *tensegrity*, yaitu oleh Uzun & Toklu (2014) dan Toklu & Uzun (2016). Pada studi tersebut, TPO/MA juga digunakan

untuk menunjukkan perbedaan perilaku rangka batang dan struktur *tensegrity*. Studi tersebut hanya menggunakan satu jenis algoritma, yaitu *genetic algorithm* (GA). Selain itu, studi tentang analisis struktur *tensegrity* lainnya sebagian besar belum memanfaatkan metode metaheuristik, misalnya Kebiche et al. (1999) menggunakan formulasi elemen hingga dari Bathe untuk analisis non-linear geometri. Ben Kahla & Kebiche (2000) menggunakan formulasi Lagrangian dan Newton-Raphson untuk analisis non-linear geometri dan material. Murakami (2001a; 2001b) mengaplikasikan formulasi Eulerian dan Lagrangian, dan Nuhoglu & Korkmaz (2011) mengajukan pendekatan praktikal berbasis iterasi. Apabila dibandingkan dengan TPO/MA, metode-metode yang digunakan penelitian-penelitian terdahulu ini memiliki proses perhitungan yang jauh lebih rumit. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk melakukan analisis non-linear pada struktur *tensegrity* dengan proses perhitungan yang lebih sederhana menggunakan TPO/MA dan memanfaatkan lebih banyak lagi algoritma metaheuristik untuk menemukan algoritma yang paling sesuai.

Penelitian ini akan menggunakan TPO/MA dengan tiga metode metaheuristik untuk melakukan analisis non-linear pada struktur *tensegrity*. Dua algoritma di antaranya adalah TLBO dan HS yang telah terbukti memiliki efisiensi dan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan algoritma lainnya. Algoritma ketiga adalah *symbiotic organisms search* atau SOS (Cheng & Prayogo, 2014) yang belum pernah digunakan sebelumnya dalam TPO/MA. Penggunaan tiga algoritma metaheuristik ini diharapkan dapat memperluas hasil studi metode TPO/MA dalam analisis non-linear struktur *tensegrity*.

## **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana kinerja metode TPO/MA dalam analisis non-linear struktur *tensegrity*?
2. Bagaimana kinerja algoritma TLBO, HS dan SOS dalam analisis non-linear struktur *tensegrity* dengan metode TPO/MA?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Mengevaluasi TPO/MA sebagai metode analisis non-linear yang universal pada struktur *tensegrity*.
2. Mengevaluasi algoritma yang efektif dan efisien dalam melakukan analisis non-linear struktur *tensegrity*.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

1. Bagi peneliti selanjutnya, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah terkait penggunaan metode TPO/MA dalam analisis non-linear struktur *tensegrity*.

#### **1.5 Ruang Lingkup Penelitian**

1. Penelitian ini menggunakan 5 studi kasus berupa struktur *tensegrity* 2 dan 3 dimensi berdasarkan penelitian terdahulu oleh Ben Kahla & Kebiche (2000), Nuhoglu & Korkmaz (2011), Uzun & Toklu (2014), dan Toklu & Uzun (2016).

2. Struktur bersifat non-linear secara geometri (*geometry non-linearity*) saja atau non-linear secara geometri dan material (*material non-linearity*).

3. Beban yang digunakan adalah beban statis.

4. Proses analisis non-linear struktur menggunakan prinsip energi potential minimum, tidak termasuk *form-finding problem*.