



INTISARI

Dengan berkembangnya kampanye global menuju *net zero emission*, kebutuhan akan bahan tambang tidak serta merta menghilang, melainkan bergeser pada jenis material yang dibutuhkan. Contohnya adalah meningkatnya penggunaan kendaraan listrik yang memerlukan baterai berbasis nikel sebagai media penyimpanan energi, sehingga aktivitas pertambangan akan tetap berlanjut untuk memenuhi kebutuhan material energi baru. Salah satu peralatan vital dalam proses tersebut adalah *excavator*, yang berfungsi menggali, mengeruk, dan memindahkan material ke dump truck. Namun, operasi *excavator* konvensional memiliki risiko tinggi terhadap keselamatan operator akibat potensi bahaya seperti longsor, area beracun, serta kondisi lingkungan ekstrem. Selain itu, kebutuhan operator terampil dan jam kerja panjang turut meningkatkan biaya operasional, sehingga mendorong pengembangan *autonomous excavator* sebagai solusi yang lebih aman dan efisien.

Penelitian ini mengimplementasikan prototipe *autonomous excavator* skala 1:9 menggunakan kombinasi metode kendali. Perencanaan lintasan pada bagian *undercarriage* dilakukan dengan *Model Predictive Control* (MPC), yang memilih langkah optimal dengan mempertimbangkan batasan (*constraints*) serta berfokus pada penentuan horizon prediksi (N) agar pergerakan stabil dan komputasi efisien. Sementara itu, kendali pada bagian lengan (*arm*) untuk tugas *pick and place* menggunakan Gain Scheduled PID, yang menyesuaikan parameter kendali (K_p , K_i , K_d) secara adaptif berdasarkan kondisi operasi untuk menjaga presisi gerakan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *excavator* berhasil mencapai target dalam pengujian *trajectory planning*, dengan horizon prediksi optimal berada pada rentang $N = 10$ hingga $N = 20$. Nilai N yang lebih besar tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap kualitas lintasan, tetapi menambah beban komputasi secara substansial. Untuk kendali *pick and place*, Gain Scheduled PID menghasilkan performa baik dengan error sudut tiap sendi hanya berkisar $0-3^\circ$. Hal ini memastikan posisi *bucket* tetap berada tepat di atas area target, sehingga tugas *pick and place* dapat dilaksanakan dengan presisi.

Kata kunci: *autonomous excavator, Model Predictive Control, Gain Scheduled PID, trajectory planning, hardware excavator*



ABSTRACT

With the advancement of global campaigns toward net zero emission, the demand for mining materials does not simply disappear, but rather shifts to different types of required resources. For example, the increasing adoption of electric vehicles necessitates nickel-based batteries as energy storage media, ensuring that mining activities will continue to meet the demand for new energy materials. One of the vital pieces of equipment in this process is the excavator, which functions to dig, excavate, and transfer materials to dump trucks. However, conventional excavator operations pose high safety risks to operators due to potential hazards such as landslides, toxic areas, and extreme environmental conditions. In addition, the need for skilled operators and long working hours further increases operational costs, thereby driving the development of autonomous excavators as a safer and more efficient solution.

This research implements a 1:9 scale prototype of an autonomous excavator using a combination of control methods. Trajectory planning for the undercarriage is carried out with Model Predictive Control (MPC), which selects the optimal steps by considering constraints and focusing on determining the prediction horizon (N) to ensure stable movement and efficient computation. Meanwhile, control of the arm for pick-and-place tasks employs Gain Scheduled PID, which adaptively adjusts the control parameters (K_p , K_i , K_d) based on operating conditions to maintain motion precision.

The test results show that the excavator successfully reached the target in trajectory planning experiments, with the optimal prediction horizon ranging from $N = 10$ to $N = 20$. Larger N values did not provide significant improvements in trajectory quality but substantially increased computational load. For pick-and-place control, the Gain Scheduled PID demonstrated good performance, with joint angle errors ranging only from 0° to 3° . This ensured that the bucket remained precisely above the target area, enabling the pick-and-place tasks to be executed with accuracy.

Keywords : autonomous excavator, Model Predictive Control, Gain Scheduled PID, trajectory planning, hardware excavator