

ABSTRAK

Sistem HVAC merupakan sarana penting pada industri farmasi untuk menunjang proses produksi sesuai standar yang berlaku. *Reciprocating compressor* yang digunakan pada sistem tersebut memiliki komponen mekanis kompleks, sehingga diperlukan metode perawatan yang mampu memprediksi kondisinya sebelum terjadi kegagalan. Penelitian ini merancang sistem *real-time predictive maintenance* yang mengintegrasikan *Physics-Informed Long Short-Term Memory* (PI-LSTM), estimasi indikator kesehatan berbasis fisika, dan antarmuka *Mixed Reality*, sekaligus mengkarakterisasi pengaruh penerapan konstrain fisika terhadap keakuratan prediksi. Data sebanyak 278.471 baris diakuisisi selama 45 hari melalui sistem IoT pada kompresor Bitzer 4HE-25Y-40P berefrigeran R407C. Model dilatih memprediksi tujuh parameter operasi dengan konstrain berupa Hukum Pertama dan Kedua Termodinamika, persamaan Clausius-Clapeyron, dan Hukum Joule. Empat varian penempatan konstrain dibandingkan pada arsitektur dan pembagian data identik, dengan replikasi lima *seed* dan pelaporan fraksi keaktifan konstrain. Model mencapai R^2 di atas 0,99 dengan MAE 0,29 satuan fisik. Konstrain pertidaksamaan pada batas fisibilitas aktif 0% sehingga menghasilkan model identik dengan tanpa konstrain, sedangkan pada jendela operasi aktif 95% namun meningkatkan galat 2,8 kali lipat. Konstrain residu neraca energi aktif 99% tanpa meningkatkan keakuratan. Ketiga varian berkonstrain memperlebar jurang galat antara kondisi *freezing* dan aman, dari 1,75 menjadi 1,93 hingga 9,07 kali, sehingga manfaat yang konsisten hanya berupa peningkatan reproduktibilitas pelatihan. Evaluasi antarmuka memperoleh skor SUS 78,00 serta nilai UEQ tertinggi pada stimulasi 2,27 dan terendah pada efisiensi 1,67. Penerapan konstrain fisika tidak dengan sendirinya meningkatkan keakuratan, dan efektivitasnya bergantung pada penempatan batas terhadap distribusi data operasi.

Kata kunci: *predictive maintenance, physics-informed neural network, LSTM, kompresor resiprokal, mixed reality*