Pengembangan Proses dan Analisis Teknoekonomi pada Produksi Sustainable Aviation Fuel (SAF) dari
Used Cooking Oil (UCO) di Indonesia
Amalia Khoirul Muthmainnah, Prof. Ir. Suryo Purwono. M.A.Sc., Ph.D., IPU, ASEAN Eng., ACPE; Ir. Muhammad Muf
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Salah satu tantangan dalam sektor penerbangan adalah penerapan prinsip berkelanjutan untuk mewujudkan *net zero emision* (NZE) tahun 2050. Solusi jangka pendek hingga menengah yang mampu menurunkan emisi pada sektor ini adalah penggunaan *sustainable aviation fuel* (SAF) yang merupakan bahan bakar *drop in*, sehingga mudah diaplikasikan langsung ke pesawat. Teknologi produksi SAF yang memiliki tingkat kematangan yang tinggi adalah *hydroprocessed esters and fatty acids* (HEFA) dengan bahan baku minyak nabati, salah satunya *used cooking oil* (UCO) yang berpotensi di Indonesia. Penelitian ini mengkaji proses produksi SAF dari UCO pada simulasi Aspen Plus dan dilakukan analisis teknoekonomi. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kondisi optimum reaktor dan mengetahui pengaruh variasi komposisi bahan baku terhadap distribusi produk serta kebutuhan utilitas. Selain itu, dilakukan analisis teknoekonomi pada berbagai komposisi bahan baku, sehingga diperoleh prediksi harga jual minumum SAF dan analisis kelayakan pendirian pabrik.

Optimasi kondisi operasi dilakukan menggunakan metode *response surface methodology* (RSM) dengan pendekatan Box-Benken Design (BBD). Hasil optimasi digunakan untuk menyimulasikan dua puluh sampel UCO. Untuk mengelompokkan sampel UCO, dilakukan analisis PCA dengan *K-Mean Clustering*. Penentuan jumlah kelompok dilakukan dengan metode *elbow*. Kualitas pengelompokkan diuji dengan *silhouette score* dan uji nonparametrik Kruskal-Walis untuk dilihat nilai H-statistik, *p-Value*, dan η_H^2. Nilai median pada masing-masing kelompok digunakan untuk basis perhitungan teknoekonomi guna mencari *minimum fuel selling price* (MFSP) pada produk SAF. Analisis kelayakan ekonomi berupa RoI, PoT, NPV, dan IRR dihitung. Indikator tambahan seperti BEP dan SDP dihitung, serta dikaji beberapa parameter untuk melihat sensitivitasnya terhadap IRR.

Validasi hasil simulasi dengan literatur diperoleh error sebesar 6,02%. Kondisi optimum pada reaktor *hydrocracking-isomerization* terjadi pada 500°C, tekanan 55,64 atm, serta rasio mol antara hidrogen dan alkana sebesar 0,6216. Dua puluh sampel dapat dikelompokkan menjadi tiga *cluster*, dengan *silhouette score* sebesar 0,47. Variabel yang paling signifikan dalam pengelompokkan adalah komposisi C18:1 dan C18:2, kebutuhan hidrogen, *work required,* serta kebutuhan *cold utility* dengan nilai H-statistik sebesar 14,50-15,79; *p-Value* sebesar 0,0004-0,0007; dan η_H^2 sebesar 0,74-0,81. Hasil perhitungan MFSP SAF pada median ketiga kelompok berada pada kisaran $1,60-1,68 per liter, dengan nilai RoI, IRR, dan PoT berturt-turt sebesar 39,00%, 27,22%, dan 2,17 tahun. Sementara itu, parameter yang sangat memengaruhi nilai IRR adalah kapasitas produksi dan harga produk. Dengan analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa pendirian pabrik SAF dari UCO dengan metode HEFA menarik.

Kata kunci: *Sustainable aviation fuel, hydroprocessed esters and fatty acids*, *used cooking oil*, analisis teknoekonomi, simulasi Aspen

Pengembangan Proses dan Analisis Teknoekonomi pada Produksi Sustainable Aviation Fuel (SAF) dari
Used Cooking Oil (UCO) di Indonesia
Amalia Khoirul Muthmainnah, Prof. Ir. Suryo Purwono. M.A.Sc., Ph.D., IPU, ASEAN Eng., ACPE; Ir. Muhammad Muf
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

One of the challenges in the aviation industry is implementing sustainable principles to reach net-zero emissions (NZE) by 2050. Short- to medium-term solutions that can reduce emissions in this sector include the use of sustainable aviation fuel (SAF), which is a drop-in fuel that can be directly applied to aircraft. The technology for SAF production, with a high level of maturity, uses hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA) derived from vegetable oil feedstocks, including used cooking oil (UCO), which has potential in Indonesia. This study examines the SAF production process from UCO using Aspen Plus simulation and performs a techno-economic analysis. The aim is to identify the optimal reactor conditions and explore how variations in feedstock composition affect product distribution and utility needs. Additionally, a techno-economic analysis was conducted on different raw material compositions, predicting product selling prices and assessing the feasibility of building a factory.

Optimization of operating conditions was performed using the response surface methodology (RSM) with the Box-Behnken Design (BBD). The results were applied to simulate twenty UCO samples. To classify the UCO samples, PCA analysis combined with K-Means Clustering was conducted. The optimal number of clusters was determined using the elbow method. Cluster quality was assessed through the silhouette score and the nonparametric Kruskal-Wallis test, evaluating the H-statistic, p-Value, and η_H^2 values. The median values within each cluster served as the basis for techno-economic calculations to determine the minimum fuel selling price (MFSP) for SAF products. An economic feasibility analysis was performed, including RoI, PoT, NPV, and IRR. Additional indicators such as BEP and SDP were also calculated, and several parameters were analyzed to assess their sensitivity to IRR.

Validation of simulation results against literature shows an error of 6.02%. The optimal conditions in the hydrocracking-isomerization reactor occur at 500°C, a pressure of 55.64 atm, and a molar ratio of hydrogen to alkanes of 0.6216. Twenty samples can be grouped into three clusters, with a silhouette score of 0.47. The most significant variables in the clustering are the compositions of C18:1 and C18:2, hydrogen demand, work required, and cold utility demand, with H-statistic values of 14.50–15.79; p-Values of 0.0004–0.0007; and η_H^2 values of 0.74–0.81. The calculated MFSP for SAF in the median of the three groups ranges from $1.60 to $1.68 per liter, with RoI, IRR, and PoT values of 39.00%, 27.22%, and 2.17 years, respectively. Meanwhile, the parameters that greatly influence the IRR are production capacity and product price. Based on this analysis, it can be concluded that establishing a SAF plant from UCO using the HEFA method is attractive.

Keywords: Sustainable aviation fuel, hydroprocessed esters and fatty acid, used cooking oil, technoeconomy analysis, Aspen simulation