

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan secara komprehensif hasil pengujian dan analisis dari rancang bangun *drone washer* yang difungsikan untuk pembersihan fasad gedung. Fokus pembahasan pada penelitian ini dititikberatkan pada evaluasi kinerja sistem penyemprotan cairan bertekanan yang terintegrasi pada *frame quadcopter*, serta pengukuran tingkat keberhasilan pembersihan tersebut. Untuk memastikan validitas data hasil pembersihan secara objektif dan kuantitatif, penelitian ini mengimplementasikan metode pengujian berbasis *Artificial Intelligence* (AI). Pendekatan *hybrid* yang menggabungkan analisis piksel citra (*masking*) dengan model *Deep Learning* digunakan sebagai instrumen inspeksi kualitas (*Quality Control*) pasca-penyemprotan.

Secara sistematis, pemaparan pada bab ini dibagi ke dalam beberapa tahapan. Bagian awal membahas hasil integrasi fisik komponen mekanikal penyemprotan beserta spesifikasi statisnya. Bahasan dilanjutkan dengan analisis kinerja dinamis sistem saat *drone* beroperasi, pengembangan instrumen evaluasi AI, hingga pencapaian hasil akhir berupa persentase efisiensi pembersihan (*Cleaning Efficiency*). Pada bagian akhir, dilakukan pembahasan menyeluruh mengenai korelasi antara kinerja mekanik alat dengan hasil pembersihan, serta analisis kendala teknis yang ditemukan selama pengujian lapangan.

4.1 Hasil

4.1.1 Analisis Pembebanan dan Gaya Berat Sistem (*Total Weight*)

Untuk menjamin stabilitas penerbangan wahana *quadcopter* saat menjalankan misi penyemprotan fasad gedung, analisis pembebanan dan perhitungan gaya angkat (*thrust*) menjadi tahapan evaluasi struktural yang utama. Total gaya angkat ditentukan berdasarkan akumulasi berat keseluruhan (*Maximum Take Off Weight*) yang mencakup massa rangka utama (*frame*), sistem propulsi, baterai, sistem avionik dan kendali, serta beban (*payload*) berupa instalasi penyemprot dan selang fluida yang terhubung ke darat (tanpa menggunakan tangki penampung *on-board*). Pembebanan kumulatif wahana *quadcopter* ditetapkan sebesar 6 kg. Rincian distribusi massa komponen penyusun wahana dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Dengan mekanisme suplai fluida melalui selang, berat wahana bersifat dinamis bergantung pada ketinggian operasional. Pada konfigurasi ketinggian maksimal penyemprotan, pembebanan kumulatif wahana *quadcopter* ditetapkan sebesar 6 kg. Berdasarkan parameter MTOW tersebut, motor penggerak dikonfigurasi agar UAV *Quadcopter* memiliki cadangan daya dorong yang memadai. Daya ini sangat krusial dalam mempertahankan stabilitas posisi melayang (*hovering*), menahan gaya tarik gravitasi pada selang yang terangkat, serta mengkompensasi gaya tolak balik (*recoil*) dari pancaran air bertekanan tinggi. Dengan parameter rasio gaya angkat terhadap berat (*Thrust-to-Weight Ratio*) rancangan yang merujuk pada Persamaan 2.1 adalah sebesar 1,7:1.

Untuk gaya angkat minimum yang harus dihasilkan oleh UAV *Quadcopter* berdasarkan perhitungan pada Persamaan 3.3 adalah 10,2 Kg. Pada perhitungan Persamaan 3.5, diperoleh nilai perhitungan bahwa setiap motor harus menghasilkan gaya dorong (*thrust*) sebesar 1,37 kg (1370 gram) agar wahana dapat mengudara statis (*hovering*).

Guna memenuhi spesifikasi pembebanan mekanis tersebut, penelitian ini menggunakan aktuator propulsi berupa motor BLDC (*Brushless Direct Current*) Sunny Sky 4112s 400 KV yang dipadukan dengan *propeller* berukuran 16x6 inci dan ditenagai sistem baterai 6S. Pemilihan konfigurasi komponen ini didasarkan pada spesifikasi standar dari pabrikan, di mana setiap motor mampu memproduksi dorongan maksimal (*thrust range*) hingga 2,69 kg. Dengan demikian, kapasitas sistem propulsi yang dipilih dinilai sangat memadai karena kemampuannya jauh melampaui beban *hovering* yang disyaratkan, sekaligus secara kumulatif mampu memenuhi batas aman total gaya angkat minimum wahana.

4.1.2 Analisis Gaya Aksi dan Reaksi Pada Permukaan Fasad

Paragraf ini membedah hasil kuantifikasi dan analisis mekanis terhadap interaksi gaya yang terjadi antara sistem penyemprotan wahana dengan permukaan dinding fasad gedung. Analisis dilakukan dengan meninjau fluida yang mengalir keluar dari ujung *nozzle* hingga menumbuk permukaan sasaran, menggunakan pendekatan hukum momentum linier dan prinsip aksi-reaksi.

Gaya aksi pancaran fluida (*acting force*) merupakan representasi dari besarnya energi mekanis pancaran air berkecepatan tinggi yang ditransmisikan secara langsung untuk menumbuk permukaan kontaminan pada fasad gedung. Nilai gaya aksi ini sangat bergantung pada karakteristik hidrolis sistem, yaitu debit aliran

volume pompa dan luas penampang lubang keluar *nozzle*. Berdasarkan pengujian debit hidrolik secara empiris, sistem pompa menghasilkan debit aliran konstan (Q) sebesar 5,3 liter/menit, yang jika dikonversi ke satuan standar internasional (SI) adalah:

$$Q = \frac{5,3 \text{ liter}}{60 \text{ detik}} = \frac{5,3}{60 \times 1000} = 8,833 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.1)$$

Sistem menggunakan penyemprot dengan diameter lubang keluaran (*nozzle orifice*) sebesar 1 mm ($d = 0,001 \text{ m}$). Luas penampang *nozzle* (A) dikalkulasikan melalui persamaan lingkaran dasar seperti pada Persamaan 2.10, sehingga nilai luas penampang dapat diketahui sebagai berikut

$$A = 7,854 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

Melalui korelasi kontinuitas aliran fluida, kecepatan linier semburan air (v) saat meninggalkan *nozzle* dapat ditentukan melalui pembagian debit terhadap luas penampang, seperti pada Persamaan 4.3 berikut:

$$v = Cd \sqrt{\frac{2 \times P}{\rho}} \quad (4.3)$$

Sehingga menghasilkan nilai v sebagai berikut:

$$v = 94,657 \text{ m/s} \quad (4.4)$$

Selanjutnya, laju aliran massa fluida ($\dot{m}$) yang mengalir kontinu per satuan detik dihitung dengan mengalikan massa jenis air ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) terhadap debit volume seperti pada persamaan 4.5 berikut:

$$\dot{m} = \rho \times Q \quad (4.5)$$

$$\dot{m} = 1000 \text{ kg/m}^3 \times (8,833 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}) = 0,08833 \text{ kg/s} \quad (4.6)$$

Berdasarkan Teorema Momentum Linier yang diterapkan pada analisis volume alir fluida, besaran gaya aksi mekanis (F_{acting}) yang dihasilkan oleh pancaran fluida saat menumbuk permukaan dinding fasad secara tegak lurus dapat dihitung dengan Persamaan 2.30, sehingga menghasilkan nilai sebagai berikut:

$$F_{acting} = 8,36 \text{ N} \quad (4.7)$$

Hasil kalkulasi di atas menunjukkan bahwa aliran fluida kontinu mampu menyalurkan gaya hantaman statis sebesar 12,73 Newton pada area target. Gaya mekanis sebesar 12,73 N inilah yang bertindak sebagai parameter utama pemicu perontokan (*shearing energy*) untuk mengikis partikel debu, jamur, maupun kotoran padat yang melekat pada fasad bangunan.

Kemunculan gaya aksi berupa ejeksi massa air berkecepatan tinggi ke arah depan secara mekanis memicu timbulnya gaya sekunder pada internal sistem penyemprotan. Mengacu pada Hukum III Newton mengenai kesetimbangan mekanis, setiap gaya aksi yang dilepaskan ke lingkungan akan memunculkan gaya reaksi yang sama besar namun berlawanan arah pada titik emisi gaya tersebut. Secara matematis, hubungan vektor antara gaya aksi dan gaya reaksi pada ujung *nozzle* dinyatakan pada Persamaan 2.32, sehingga gaya reaksinya adalah sebesar:

$$F_{reaction} = - 8,36 \text{ N} \quad (4.8)$$

Tanda negatif (–) pada hasil perhitungan di atas murni melambangkan arah orientasi vektor gaya yang berkebalikan 180° dari arah semburan air. Ketika sistem menyembrotkan air maju menuju dinding fasad, air memberikan gaya dorong balik konstan sebesar 8,36 Newton mundur menekan ujung *rod* penyemprot.

Besaran gaya reaksi 8,36 N yang setara dengan tekanan seberat $\pm 0,85$ kg ini merepresentasikan profil beban mekanis translatif horizontal yang wajib dipertahankan kestabilannya oleh sistem propulsi UAV. Identifikasi nilai gaya reaksi ini menjadi parameter krusial untuk mengukur batasan beban yang dihasilkan oleh spesifikasi kombinasi pompa dan *nozzle* terpilih.

Kuantifikasi gaya aksi sebesar 8,36 Newton ini menjadi landasan fisis untuk mengevaluasi tingkat efisiensi pembersihan sistem. Semburan fluida kontinu dengan besaran gaya tersebut diarahkan pada target fasad yang mengalami polusi kontaminan. Evaluasi objektif mengenai seberapa efektif resultan gaya mekanis ini dalam membersihkan permukaan dinding tidak diuji secara subjektif, melainkan divalidasi secara digital melalui sistem pengolahan citra hibrida.

Perubahan kondisi fisik permukaan fasad akibat hantaman gaya aksi fluida ini direkam melalui perbandingan citra sebelum (*before*) dan sesudah (*after*) proses penyemprotan. Algoritma *Otsu Thresholding* bertugas menghitung penyusutan area piksel noda hitam, sementara model *Convolutional Neural Network* (CNN) bertarsitektur EfficientNetB0 bertindak sebagai wasit pengambil keputusan untuk memvalidasi status kebersihan akhir.

4.1.3 Analisi Uji Eksperimental Pompa

Penggunaan pompa *jet cleaner* untuk mencuci kendaraan memiliki batasan pada *head* pompa, sehingga apabila diimplementasikan pada ketinggian tertentu untuk melakukan penyemprotan terdapat *pressure drop* atau *losses* pada tekanan pompa. Pada saat dilakukan pengujian menggunakan *load cell* tekanan yang menghantam permukaan dinding gedung, sesuai dengan perhitungan kebutuhan gaya tekan untuk membersihkan kotoran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1

berikut:



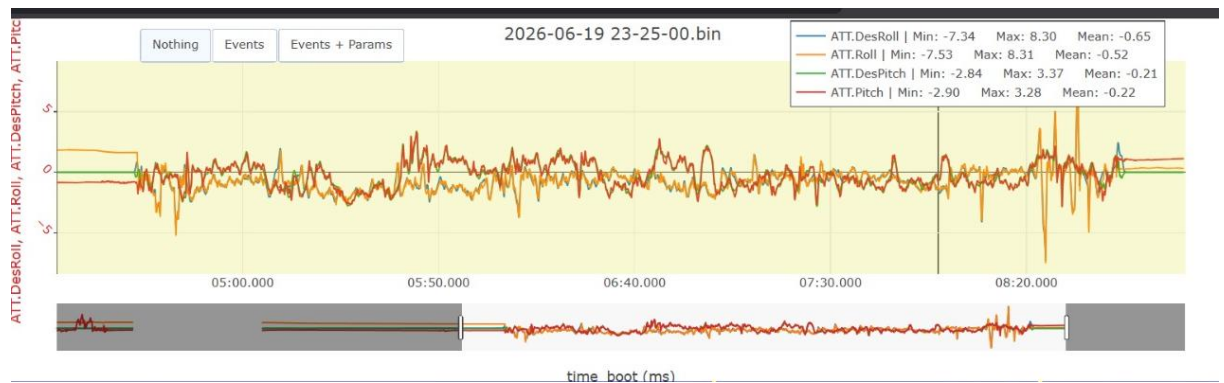
Gambar 4. 1 Pengujian Load Cell

Pada uji eksperimental yang telah dilakukan, pada Gambar 4.1 diatas pengujian menunjukkan gaya tekan yang terjadi pada tekanan pompa 18 Mpa adalah 1,3 Kg atau setara dengan 12,74 N. Gaya tekan yang dihasilkan sudah sesuai dengan kebutuhan minimum untuk meluruhkan kotoran yang terdapat pada permukaan fasad gedung.

4.1.4 Analisis Pengaruh Beban Penyemprotan Terhadap Stabilitas Kendali

Sub-bab ini menguraikan evaluasi stabilitas dinamika terbang wahana *quadcopter* saat dihadapkan pada gangguan mekanis eksternal selama proses pembersihan fasad gedung berlangsung. Selama operasi penyemprotan, sistem kendali UAV *Quadcopter* harus mengkompensasi dua variabel beban parasitik utama secara bersamaan, fluktuasi massa dinamis dari selang air (*tethered hose*) yang menggantung bebas, serta gaya tolak balik (*recoil*) hidrolik sebesar 12,73 N yang dipicu oleh ejeksi fluida bertekanan tinggi. Dalam mempertahankan operasionalnya pada saat kondisi mengambang statis (*hovering*), *flight controller* dituntut untuk secara aktif dan berkesinambungan mengoreksi sikap (*attitude*) wahana, khususnya pada sumbu *pitch* dan *roll*. Oleh karena itu, analisis pada bagian

ini difokuskan untuk membedah seberapa responsif algoritma kendali parameter *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dalam meredam anomali gaya tersebut, dengan memvalidasi perbandingan antara target komando navigasi (*desired attitude*) dan eksekusi mekanis aktual wahana berdasarkan ekstraksi log telemetri penerbangan (TLog).



Gambar 4.2 Grafik Log Telemetri Penerbangan

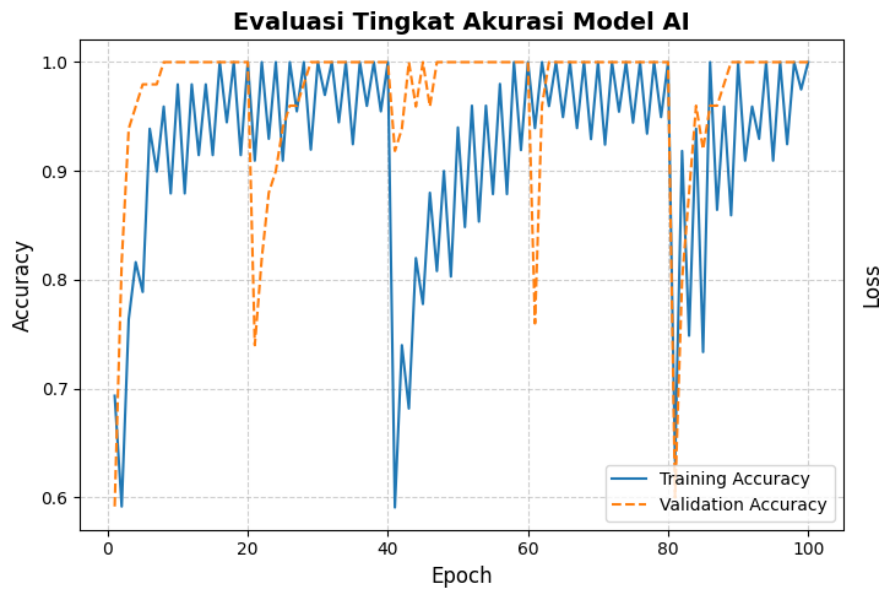
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.2 rentang pergerakan *Pitch* berada di angka -2.90° hingga 3.28° dengan nilai rata-rata (*mean*) -0.22° . Nilai negatif pada *Pitch* menunjukkan manuver *pitch down* (menunduk). Pergerakan agresif pada grafik *Actual Pitch* (garis merah) ini adalah respons langsung *flight controller* untuk menahan gaya *recoil* sebesar 8,36 Newton yang mengakibatkan UAV *Quadcopter* bergerak ke belakang saat semburan fluida terjadi.

Pada sumbu *roll* terdapat fluktuasi yang tampak lebih lebar dengan rentang antara $-7,53^{\circ}$ hingga $8,31^{\circ}$. Osilasi lateral ini merupakan karakteristik wajar dari sistem *tethered UAV*. Ayunan selang air yang menjuntai dari pompa darat ke atas *drone* menciptakan gaya pendulum (*Fluid-Structure Interaction*) yang menarik titik pusat massa (CoG) UAV ke arah samping. Hal tersebut menunjukkan bahwa parameter PID hasil AutoTune masih dapat menjaga kestabilan dasar UAV, tetapi performanya mulai menurun akibat bertambahnya beban yang berasal dari sistem penyemprotan.

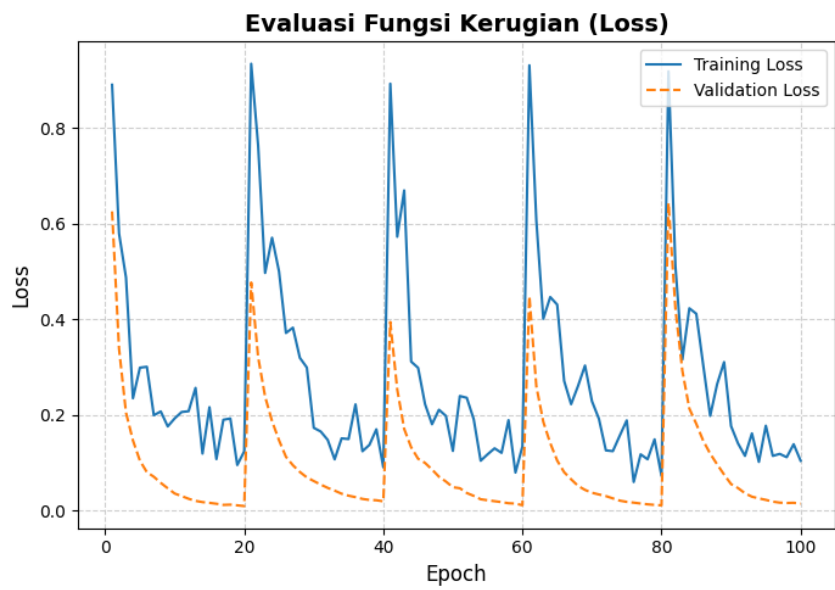
Selain performanya menurun karena bertambahnya beban dari sistem penyemprotan, kondisi angin yang lumayan besar juga sangat mempengaruhi *holding* posisi dari UAV. Selain itu, pengetesan dengan altitude yang hanya 3 m akan menyebabkan *ground effect* atau *propwash*. Fenomena ini adalah aliran udara yang dimanfaatkan oleh *propeller* terpantul kembali ke *propeller* sehingga mempengaruhi kestabilan pada saat *hovering* dan *control altitude*.

4.1.5 Hasil Pelatihan Model

Berikut adalah uraian hasil dari proses pelatihan model komputasi visual berbasis arsitektur EfficientNetB0 yang difungsikan untuk mendeteksi kontaminan pada fasad bangunan. Evaluasi dilakukan secara kuantitatif melalui analisis metrik pembelajaran mesin, serta secara kualitatif melalui inspeksi visual hasil segmentasi.



Gambar 4.3 Grafik Evaluasi Tingkat Akurasi Model



Gambar 4.4 Grafik Evaluasi Fungsi Kerugian

Untuk meninjau dinamika pembelajaran algoritma visi komputer yang digunakan, proses pelatihan dievaluasi melalui pencatatan metrik akurasi dan fungsi kerugian (*loss*) yang divisualisasikan pada Gambar 4.4. Grafik ini

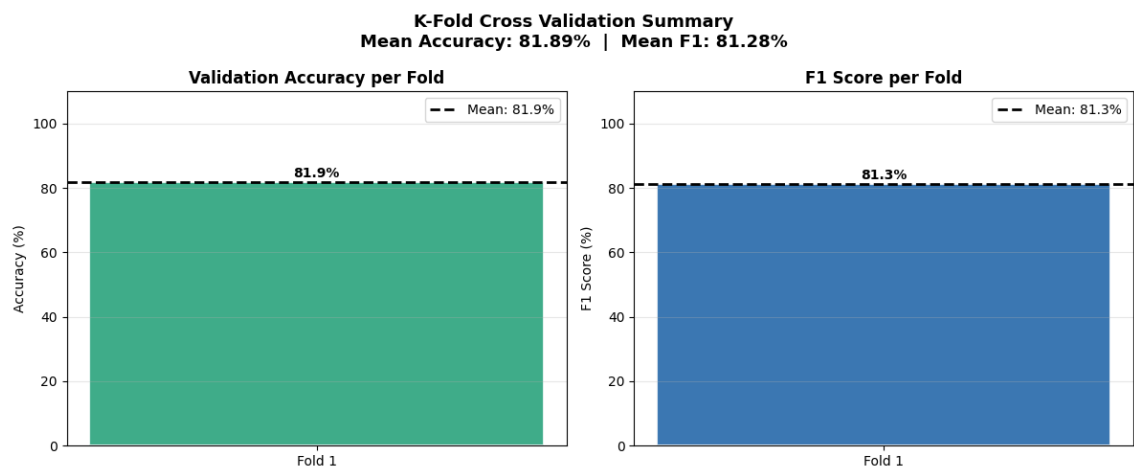
memetakan performa model selama total 100 iterasi (*epochs*) yang dieksekusi menggunakan skema validasi silang lima lipatan (*5-Fold Cross Validation*).

Pada kedua grafik tersebut, terlihat jelas adanya pola fluktuasi drastis yang terjadi secara periodik setiap kelipatan 20 *epoch*, yakni pada iterasi ke-21, 41, 61, dan 81. Pola repetitif ini bukanlah indikasi kegagalan model (*error*), melainkan representasi visual dari transisi pergantian dataset lipatan (*fold*) pada siklus validasi silang. Setiap kali siklus 20 *epoch* baru dimulai dengan kombinasi data latih dan data uji yang berbeda, jaringan saraf tiruan (*neural network*) harus kembali menyesuaikan bobot parameter dari awal, yang secara logis menyebabkan akurasi sesaat menurun dan *loss* melonjak.

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.4, dapat diobservasi bahwa pada setiap lipatan (*fold*), model menunjukkan kurva pembelajaran yang sangat responsif. Tingkat akurasi validasi (*Validation Accuracy* – garis putus-putus oranye) selalu berhasil merangkak naik secara cepat sejak awal iterasi dan mencapai titik konvergensi yang stabil di kisaran angka 0,95 hingga 1,0 (95% - 100%) pada setiap akhir siklus 20 *epoch*. Tingginya tingkat akurasi ini membuktikan bahwa arsitektur model memiliki kapasitas generalisasi yang tangguh untuk membedakan tekstur kotoran dari dinding fasad di berbagai variasi data acak.

Analisis yang selaras juga ditunjukkan pada Gambar 4.4. Kurva kerugian validasi (*Validation Loss*) secara konsisten menurun mendekati angka 0 seiring berjalannya iterasi pada masing-masing lipatan. Kurva validasi yang terus membayangi dan turun bersama kurva pelatihan (*Training Loss*) ini merupakan indikator krusial bahwa model terhindar dari fenomena memori berlebih terhadap data latih (*overfitting*).

Secara keseluruhan, stabilitas konvergensi di setiap lipatan *cross-validation* ini memberikan justifikasi komputasional bahwa model siap diintegrasikan pada sistem *mini-computer* wahana. Algoritma terbukti andal dalam mendeteksi kontaminan tanpa mengalami bias terhadap sampel citra tertentu, sehingga dapat menjamin aktuasi penyemprotan yang akurat di lapangan.



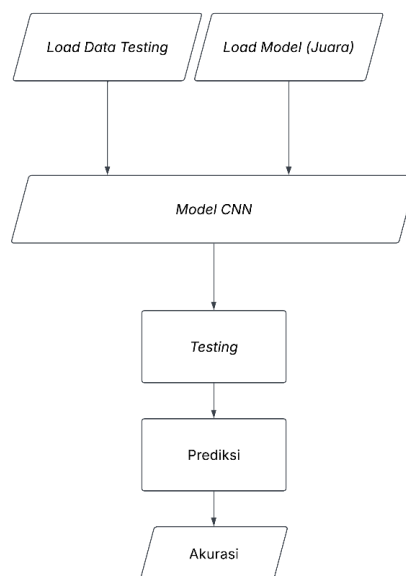
Gambar 4.5 Metrik Evaluasi

Selain kurva *loss* pada fase pelatihan, kinerja arsitektur klasifikasi juga divalidasi menggunakan pengukuran metrik statistik secara komprehensif. Gambar 4.5 menyajikan ringkasan visual dari evaluasi kinerja model akhir terhadap data validasi, dengan fokus pada dua metrik utama: Akurasi (*Accuracy*) dan *F1-Score*.

Berdasarkan grafik di sebelah kiri, performa model mencatatkan nilai rata-rata akurasi (*Mean Accuracy*) sebesar 81,89%. Pencapaian tingkat akurasi ini mengonfirmasi bahwa secara keseluruhan, model komputasi visual mampu mengklasifikasikan kondisi fasad bangunan (kotor maupun bersih) dengan probabilitas tebakan benar yang sangat memadai untuk kelas purwarupa.

Lebih lanjut, evaluasi ketangguhan model ditinjau melalui grafik *F1-Score* di sebelah kanan yang mencapai angka rata-rata 81,28%. Metrik *F1-Score* merupakan representasi rata-rata harmonik antara presisi (*precision*) dan sensitivitas (*recall*), nilai di atas 80% ini memberikan signifikansi analitis yang sangat krusial. Hal ini menjadi indikator valid bahwa model memiliki keseimbangan yang baik, algoritma tidak hanya tangguh dalam menemukan noda (sensitivitas tinggi), tetapi juga memiliki tingkat kesalahan prediksi positif palsu atau *false positive* yang minimal. Dalam konteks operasional mekanis wahana, tingginya *F1-Score* ini menjamin bahwa aktuator penyemprot tidak akan membuang daya baterai dan cairan pembersih secara sia-sia pada area dinding yang sebenarnya sudah bersih.

Model yang sudah terlatih dan memiliki nilai akurasi tinggi dilakukan pengujian dengan gambar *testing* ataupun gambar pada kondisi fasad. Berikut adalah alur pengujian model:

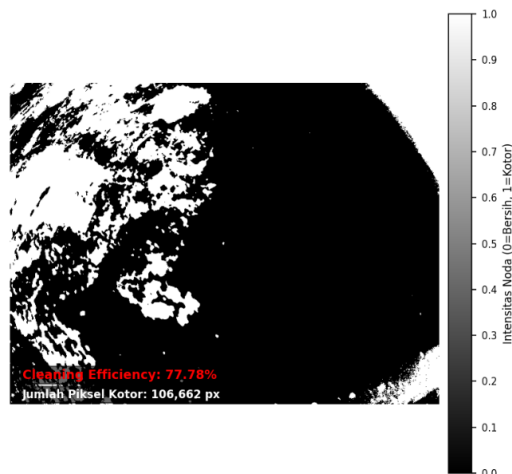


Gambar 4.6 Alur Pengujian Model

Berdasarkan Gambar 4.6 diatas, tujuan dari pengujian dengan gambar *testing* yang berasal dari foto kondisi fasad gedung adalah untuk menilai nilai akurasi dari model EfficientB0 yang sudah dilakukan *training*. Hasil dari pengujian dapat kita tinjau pada Gambar 4.5 dan 4.6 berikut:



Gambar 4.7 Kondisi Fasad Kotor



Gambar 4.8 Hasil Pembacaan

Analisis komparatif antara citra asli pada Gambar 4.7 dan hasil segmentasi pada Gambar 4.8 memvalidasi keandalan sistem visual wahana. Perbandingan tersebut membuktikan bahwa model tidak sekadar mampu mengenali kondisi dinding, melainkan juga berhasil melokalisasi dan mengekstraksi sebaran kontaminan pada tingkat piksel. Kemampuan pelokalan spasial yang presisi ini menjadi indikator krusial bahwa luaran model dapat diandalkan sebagai matriks masukan untuk menghitung variabel luas noda pada Persamaan 2.33.

4.1.6 Hasil Evaluasi Pembersihan

Evaluasi kinerja pembersihan wahana terbang dianalisis menggunakan pendekatan evaluasi statis berbasis citra (*Image-Based Static Evaluation*). Pengujian ini difokuskan untuk mengkuantifikasi korelasi antara parameter operasional penyemprotan yakni tekanan fluida (*Pressure*) dan jarak penyemprotan (*Distance*) terhadap besar gaya tumbuk di permukaan fasad (*Acting Force*) serta efisiensi pembersihan visualnya.

Besaran gaya aksi atau gaya tumbuk fluida yang mengenai permukaan dinding sangat bergantung pada variasi tekanan pompa dan jarak *nozzle* terhadap fasad. Sesuai dengan prinsip hidrodinamika, gaya tumbuk akan meningkat seiring dengan penambahan tekanan (Bar), namun akan mengalami disipasi atau penurunan seiring dengan bertambahnya jarak semprot akibat pengaruh hambatan udara (*air drag*) dan pecahnya formasi tetesan air (*droplet breakup*).

Tabel 4.1 berikut adalah data hasil perhitungan matematis menggunakan rumus Persamaan pada variasi tekanan 70 bar:

Tabel 4. 1 Gaya Tekan Variasi Tekanan 180 bar

Jarak	Gaya Tumbuk (F)
0,5 m	11,52 N
1,0 m	8,56 N
1,5 m	1,56 N

Berikut adalah untuk variasi pada tekanan 200 bar yang di sajikan pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4. 2 Gaya Tekan Variasi Tekanan 200 bar

Jarak	Gaya Tumbuk (F)
0,5 m	12,80 N
1,0 m	9,40 N
1,5 m	1,60 N

Tabel 4.3 berikut menyajikan data korelasi antara jarak, tekanan, gaya tekan terhadap efisiensi pembersihan.

Tabel 4. 3 Efisiensi Pembersihan

Jarak Semprot (m)	Tekanan Pompa (Bar)	Kecepatan Aliran Awal (m/s)	Gaya Tekan Aktual (N)	Jumlah Piksel Noda Awal (px)	Jumlah Piksel Noda Sisa (px)	Efisiensi Pembersihan (%)
0,5	180	151,80	11,52	194.077	91.876	52,66
0,5	200	160,00	12,80	194.077	50.587	73,93
1,0	180	151,80	8,56	194.077	51.363	73,53
1,0	200	160,00	9,40	194.077	23.835	87,72
1,5	180	151,80	4,56	194.077	109.090	43,79
1,5	200	160,00	4,60	194.077	99.720	48,62

4.2 Pembahasan

Data kuantitatif yang disajikan pada Tabel 4.2 memberikan representasi empiris mengenai interaksi antara dinamika parameter fluida, posisi jarak operasional, dan kualitas pembersihan fasad berbasis ekstraksi citra. Secara garis besar, fluktuasi tekanan pompa dan jarak penyemprotan memberikan implikasi mekanis secara langsung terhadap besaran gaya tekan (*acting force*) yang bermuara pada persentase efisiensi peluruhan noda.

Analisis data menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kerja pompa dari 180 Bar menjadi 200 Bar secara konsisten menghasilkan tren positif terhadap persentase efisiensi pembersihan pada seluruh variasi jarak operasional. Peningkatan tekanan ini secara proporsional mengeskalasi kecepatan aliran awal fluida dari 151,8 m/s menjadi 160 m/s. Peningkatan kecepatan ini secara langsung melipatgandakan momentum massa air, yang terbukti krusial dalam memperbesar energi kinetik tumbukan untuk memutus ikatan adhesi kotoran pada pori-pori dinding.

Tinjauan pada jarak penyemprotan terdekat (0,5 meter) menunjukkan sebuah fenomena hidrodinamis yang spesifik. Meskipun posisi ini secara matematis menghasilkan gaya tekan aktual terbesar (mencapai 12,80 N pada tekanan 75 Bar), tingkat efisiensi pembersihannya tidak mencapai titik maksimal dan hanya tertahan di rentang 52,66% hingga 73,93%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa gaya tumbuk yang terlalu masif dan terpusat pada jarak dekat justru memicu efek percikan balik (*splashing effect*) dan saturasi berlebih. Akibatnya, luasan sebaran pancaran (*spray footprint*) menjadi sangat sempit, sehingga area kontaminan di bagian tepi luar semburan gagal tersapu dengan baik.

Performa pembersihan visual mencapai titik ekuilibrium paling optimal ketika jarak operasional wahana diset pada 1,0 meter. Pada titik jarak ini, terjadi keseimbangan teknis (*trade-off*) yang sempurna antara retensi gaya tekan) dengan persebaran butiran fluida (*uniform spray distribution*) yang melebar ideal di permukaan fasad. Tingkat efisiensi melonjak signifikan hingga menyentuh persentase tertinggi sebesar 87,72% (pada tekanan 200 Bar). Sisa gaya kinetik pada jarak ini terbukti cukup kuat untuk mengikis kerak noda persisten, sekaligus mampu menutupi luasan area target secara merata dan presisi.

Sebaliknya, manuver operasional pada jarak 1,5 meter mengakibatkan degradasi kinerja pembersihan yang sangat ekstrim. Persentase efisiensi anjlok secara drastis ke level terendah, yakni berada di kisaran 43,79% hingga 48,62%. Penurunan efisiensi yang masif ini merupakan manifestasi dari hilangnya momentum kinetik fluida akibat pengaruh hambat udara (*aerodynamic drag*) dan pecahnya formasi tetesan air (*droplet breakup*) secara berlebihan. Gaya tekan aktual yang tersisa saat menumbuk fasad hanya berkisar di 1,56 N hingga 1,60 N, sebuah residu gaya mekanis yang terlampau lemah untuk bisa menghasilkan gaya kikis terhadap partikel kotoran.

Melalui sintesis parameter interaktif di atas, dapat dikonklusikan bahwa konfigurasi operasional terbaik untuk *drone washer* ini adalah manuver penyemprotan pada jarak konstan 1,0 meter dengan tekanan pompa 200 Bar. Titik kerja (*operating point*) ini menghasilkan rasio kebersihan paling superior tanpa harus mengorbankan kualitas luas cakupan semburan air di lapangan.