

Optimasi *Water Jet* Berbasis *Plunger Pump* Menggunakan Metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada Studi Kasus PT X

Slamet Rio Hanggoro^{1,*}, Djoko Hari Praswanto¹, Gerald Adityo Pohan¹

¹ Program Studi Teknik Mesin S1 Institut Teknologi Nasional Malang, Jawa Timur, Indonesia

Kata kunci

Mesin *Water Jet*
Particle Swarm
Optimization (PSO)
Kekasaran Permukaan
Optimasi Kekasaran
Python

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter proses pada mesin *water jet* berbasis *plunger pump* dalam aplikasi pemotongan kaca di PT.X. Fokus utama menurunkan nilai kekasaran permukaan (R_a , R_z , R_q , R_t) hasil potongan memanfaatkan algoritma *particle swarm optimization* (PSO). Variabel bebas yang diuji meliputi tekanan air (800 bar, 1200bar, 1500 bar) dan kecepatan (100 mm/min, 200 mm/min, 300 mm/min) dengan suhu pengujian dijaga konstan pada 14°C dan ketebalan kaca 5 mm. pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh kombinasi parameter terhadap nilai kekasaran permukaan, kemudian hasil data optimasi menggunakan python melalui platform google colab dengan pendekatan interpolasi dan pembobotan skor kekasaran. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa parameter optimal berada di tekanan ± 1230 bar, dan kecepatan ± 105 mm/min, yang menghasilkan nilai kekasaran minimum. Visualisasi partikel dalam algoritma PSO dan grafik kontur menunjukkan konsistensi antara prediksi dan hasil pengamatan, membuktikan bahwa metode PSO efektif dalam menemukan parameter optimal. Dengan penerapan metode ini pemotongan kaca menjadi lebih efisiensi dan kualitas hasil potong meningkat secara signifikan.

* **Corresponding author:**
Slamet Rio Hanggoro (email: riohanggoro192@gmail.com)

Diterima: 19 Agustus 2025

Disetujui: 5 Februari 2026

Dipublikasikan: 31 Maret 2026

1 Pendahuluan

Industri pemotongan material presisi menghadapi tantangan besar untuk mempertahankan kualitas potongan konsisten dan efisiensi produksi. Permintaan pasar meningkat terhadap produk berdimensi presisi dan berpermukaan halus [1]. Kegagalan menjaga kualitas potongan menyebabkan retakan mikro, penurunan kekuatan mekanik, dan penurunan kualitas produk. Kondisi ini mendorong industri mengoptimalkan teknologi pemotongan guna menghasilkan produk berkualitas tinggi dengan biaya dan waktu efisien [2].

Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah *water jet cutting* yang memanfaatkan aliran air bertekanan tinggi untuk memotong berbagai jenis material. Teknologi ini memiliki keunggulan dibanding metode pemotongan panas, karena tidak menyebabkan distorsi termal pada material [3]. Namun, kualitas potongan pada *water jet* sangat dipengaruhi oleh parameter proses seperti tekanan air, kecepatan potong, jarak *standoff*, laju abrasif, dan ukuran *nozzle*. Hubungan parameter tersebut terhadap tingkat kekasaran permukaan (*surface roughness*) menjadi penting untuk material yang membutuhkan permukaan halus dan bebas retakan [4].

PT. X adalah perusahaan swasta yang didirikan pada tahun 2002 dan telah berkembang menjadi salah satu produsen utama *safety glass* di Indonesia. Berdasarkan pengalaman lebih dari sepuluh tahun dan keahlian dalam mengolah kaca, PT. X telah memenuhi Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk kaca pengaman. Perusahaan ini menggunakan mesin *water jet* berbasis *plunger pump* [5]. Mesin ini memiliki pengaturan tekanan secara manual dengan batas bawah 800 bar dan batas atas 2450 bar.

Teknologi *water jet* digunakan dalam industri untuk memotong kaca dengan aliran air bertekanan tinggi. Sistem ini menggunakan plunger pump yang menghasilkan aliran fluida bertekanan tinggi melalui *nozzle* untuk memotong material keras. Menurut Summer, teknologi ini diklasifikasikan berdasarkan tekanan operasi menjadi normal (± 350 bar), tinggi (345–2070 bar), dan ultra tinggi (> 2070 bar). *Plunger pump* bekerja mengubah laju aliran air untuk mendorong *plunger* sehingga mencapai tekanan di atas 1000 bar [6].

Pada industri kaca lembaran, kualitas potongan diukur dari dimensi yang presisi dan tingkat kekasaran permukaan (*surface roughness*). Parameter kekasaran, seperti Ra (rata-rata aritmatika), Rq (akar kuadrat rata-rata), atau Rz (tinggi rata-rata puncak-ke-lembah dan Rt (jarak total vertikal maksimum antara puncak tertinggi dan lembah terdalam) [7]. Kekasaran yang terlalu tinggi dapat menyebabkan retakan mikro, menurunkan kekuatan kaca, dan meningkatkan risiko kegagalan produk. Oleh karena itu, pengendalian parameter proses menjadi penting untuk memastikan kualitas permukaan yang optimal [8].

Penelitian ini difokuskan pada optimalisasi sistem *water jet* berbasis plunger pump, yang mampu menciptakan tekanan stabil dan ideal untuk memotong bahan keras dengan presisi tinggi. Namun, kajian optimasi parameter mesin *water jet* berbasis *plunger pump* menggunakan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yang secara khusus difokuskan pada industri kaca lembaran dengan mempertimbangkan hubungan parameter proses terhadap kekasaran permukaan dan ketepatan dimensi terbilang masih minim [8]. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan PSO untuk melacak dan menemukan titik optimal tekanan air yang dapat menghasilkan potongan kaca dengan kekasaran rendah dan tingkat keretakan minimal.

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini adalah mengoptimalkan parameter tekanan air pada mesin *water jet* berbasis *plunger pump* menggunakan metode PSO untuk meningkatkan kualitas potongan kaca di PT. X. Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan PSO pada pemotongan kaca menggunakan plunger pump dengan fokus pada pengurangan kekasaran permukaan dan keretakan mikro yang diharapkan dapat menjadi referensi teknis bagi industri kaca dalam meningkatkan efisiensi dan kualitas produksi.

2 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan optimasi berbasis algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk menganalisis pengaruh parameter proses pemotongan *water jet* terhadap kualitas permukaan kaca. Rancangan penelitian dirancang untuk mengevaluasi kombinasi optimal antara tekanan air dan kecepatan pemotongan dalam menghasilkan nilai kekasaran permukaan terendah pada material kaca *float glass*.

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kaca *float glass* dengan ketebalan 5 mm yang diperoleh dari PT. X dan telah memenuhi standar SNI. Kaca dipotong dalam bentuk spesimen berukuran 50 mm $\times$ 50 mm dengan diameter titik tengah 20 mm sesuai dengan standar pengujian ISO 4287. Penelitian ini menggunakan mesin *water jet* berbasis *plunger pump* untuk memotong material kaca secara presisi tanpa mengubah struktur mikro kaca. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan *roughness tester* dengan metode kontak *stylus* untuk mengukur parameter Ra, Rz, Rq, dan Rt sesuai standar ISO 4287. Pengolahan data dan implementasi PSO dilakukan menggunakan laptop dengan *software Python* di *Google Colaboratory* untuk perhitungan numerik dan visualisasi hasil optimasi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1 (a) Laptop, (b) *Roughness Tester*, (c) Mesin *Water Jet*

Prosedur penelitian dimulai dengan tahap persiapan, yaitu studi literatur tentang teknologi *water jet*, karakteristik kaca, metode PSO, dan persiapan material dengan memotong kaca *float glass* menjadi spesimen standar dan membersihkan permukaannya. Selanjutnya, tahap pembuatan spesimen dilakukan di PT. X menggunakan mesin *water jet* sesuai rancangan eksperimen. Pada tahap pengujian, kekasaran permukaan diukur

menggunakan *roughness tester* yang dikalibrasi sesuai standar. Terakhir, pada tahap pengolahan data menggunakan PSO di *Google Colaboratory* dengan *Python* dan algoritma PSO diterapkan dengan pustaka *NumPy* untuk meminimalkan nilai Ra melalui simulasi partikel dalam ruang pencarian.

Pengumpulan data dilakukan melalui eksperimen terkontrol menggunakan rancangan faktorial penuh dengan variabel tekanan air (800, 1200, 1500 bar) dan kecepatan pemotongan (100, 200, 300 mm/min), menghasilkan 9 kombinasi parameter untuk mengamati pengaruhnya terhadap kualitas permukaan kaca. Data kekasaran permukaan diukur menggunakan *roughness tester* untuk parameter Ra, Rz, Rq, dan Rt pada setiap spesimen sebanyak tiga kali. Semua data dicatat secara sistematis dalam tabel digital untuk analisis lebih lanjut.

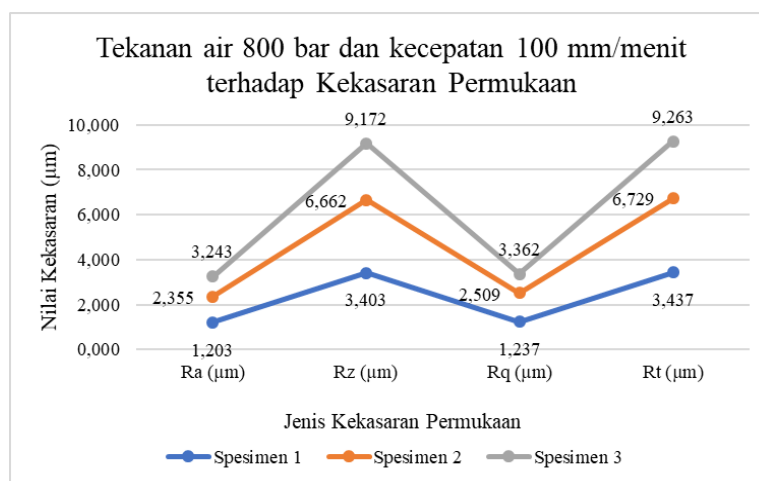
Analisis data dilakukan menggunakan beberapa pendekatan untuk memastikan validitas dan reliabilitas hasil penelitian. Analisis deskriptif digunakan untuk menggambarkan karakteristik data kekasaran permukaan pada setiap kombinasi parameter. Algoritma PSO diterapkan untuk menemukan kombinasi parameter optimal berdasarkan personal best dan global best, kemudian divalidasi dengan data eksperimen dan analisis sensitivitas untuk menentukan akurasi dan kualitas solusi.

3 Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian diperoleh dari sembilan spesimen kaca float glass setebal 5 mm yang dipotong menggunakan mesin water jet berbasis *plunger pump* di PT. X. Kekasaran permukaan diukur menggunakan *roughness tester* pada tiga titik berbeda per spesimen, kemudian nilai Ra, Rz, Rq, dan Rt dicatat. Hasil pengujian tersebut dianalisis dan dioptimasi menggunakan PSO di *Google Colaboratory* berbasis *Python* untuk menentukan kombinasi parameter optimal.

3.1 Kekasaran Permukaan

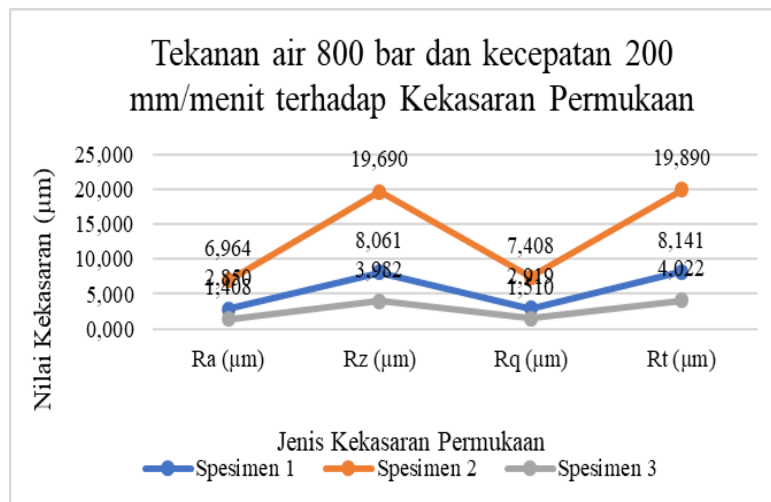
Setiap hasil pengujian kekasaran spesimen ditampilkan dalam gambar 4.1 hingga 4.9 sebelum divisualisasikan dalam grafik variasi kekasaran. Gambar 2 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 800 bar dan kecepatan 100 mm/menit.



Gambar 2 Tekanan air 800 bar dan kecepatan 100 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 2 menunjukkan variasi nilai kekasaran permukaan antara ketiga spesimen yang diuji. Spesimen 1 menghasilkan nilai kekasaran yang relatif stabil dengan puncak tertinggi pada parameter Rz sebesar 3,403 µm dan nilai terendah pada Ra sebesar 1,203 µm. Selanjutnya, spesimen 2 memperlihatkan karakteristik kekasaran yang berbeda dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan spesimen 1. Nilai tertinggi tercatat pada parameter Rz yaitu 6,662 µm sedangkan nilai terendah terdapat pada Ra sebesar 3,243 µm. Kurva spesimen 2 menunjukkan pola yang hampir sama dengan spesimen 1 namun dengan nilai yang konsisten lebih tinggi di semua parameter pengukuran. Terakhir, spesimen 3 menampilkan hasil yang paling ekstrem di antara ketiga spesimen dengan nilai kekasaran tertinggi pada semua parameter. Nilai puncak tercapai pada parameter Rt sebesar 9,263 µm yang merupakan nilai tertinggi dalam seluruh pengukuran. Parameter Ra pada spesimen 3 menunjukkan nilai 1,237 µm yang tidak jauh berbeda dengan spesimen 1.

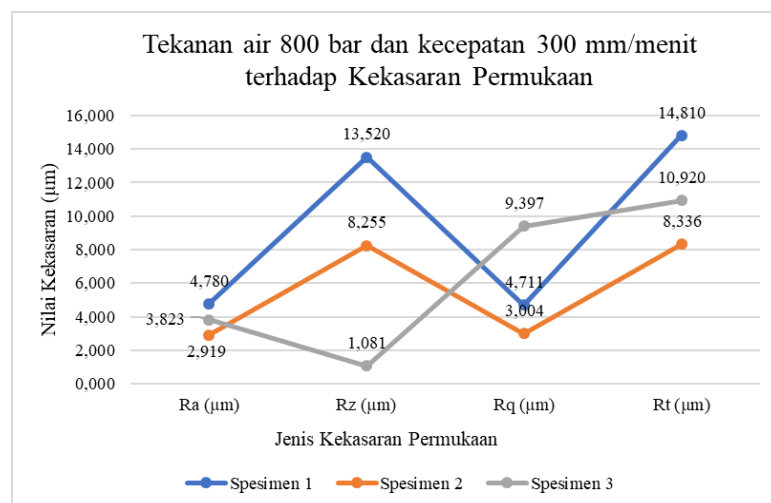
Gambar 3 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 800 bar dan kecepatan 200 mm/menit.



Gambar 3 Tekanan air 800 bar dan kecepatan 200 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 3 menunjukkan variasi pada nilai kekasaran permukaan dibandingkan dengan kondisi kecepatan 100 mm/menit, dimana ketiga spesimen mengalami kenaikan nilai pada semua parameter pengukuran. Spesimen 1 menghasilkan nilai tertinggi pada parameter Rt sebesar 8,141 µm dan terendah pada Ra sebesar 2,850 µm dengan pola kekasaran yang cenderung meningkat secara konsisten dari Ra hingga Rt. Spesimen 2 menunjukkan karakteristik kekasaran yang paling ekstrem dengan nilai puncak pada parameter Rz mencapai 19,690 µm dan Rt sebesar 19,890 µm, sedangkan nilai terendah terdapat pada Ra sebesar 6,964 µm yang menunjukkan peningkatan drastis dibandingkan kondisi kecepatan rendah. Spesimen 3 memperlihatkan pola yang relatif stabil dengan nilai tertinggi pada Rt sebesar 4,022 µm dan terendah pada Ra sebesar 1,308 µm.

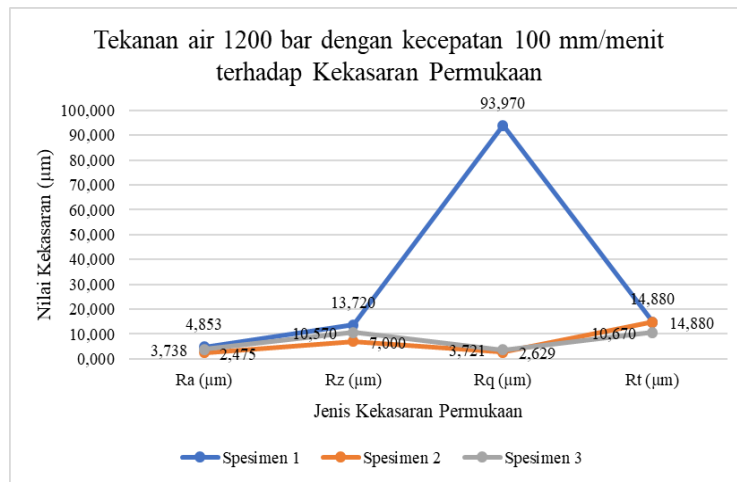
Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 800 bar dan kecepatan 300 mm/menit.



Gambar 4 Tekanan air 800 bar dan kecepatan 300 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 4 menunjukkan nilai kekasaran permukaan pada kecepatan 300 mm/menit dengan tekanan air 800 bar untuk tiga spesimen uji. Spesimen 1 mencatat nilai tertinggi pada parameter Rt sebesar 14,810 µm dan terendah pada Ra sebesar 4,780 µm, dengan pola peningkatan kekasaran yang konsisten dari Ra hingga Rt. Spesimen 2 memiliki nilai puncak pada Rz sebesar 8,255 µm dan Rt sebesar 10,920 µm, sedangkan nilai terendah terdapat pada Ra sebesar 2,919 µm, menunjukkan kenaikan yang moderat dibandingkan dua parameter lainnya. Spesimen 3 memperlihatkan pola berbeda dengan nilai tertinggi pada Rq sebesar 9,397 µm dan terendah pada Rz sebesar 1,081 µm, yang menandakan distribusi ketinggian permukaan yang tidak merata.

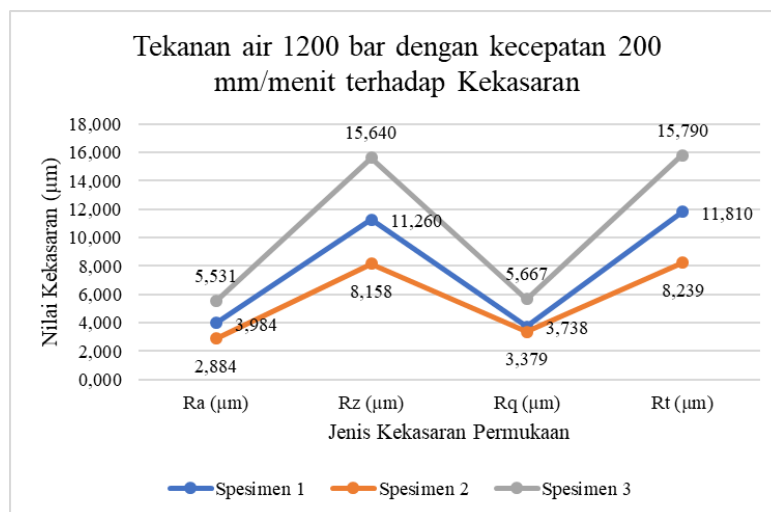
Gambar 5 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 1200 bar dan kecepatan 100 mm/menit.



Gambar 5 Tekanan air 1000 bar dan kecepatan 100 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 5 menunjukkan nilai kekasaran permukaan pada tekanan air 1200 bar dengan kecepatan 100 mm/menit untuk tiga spesimen uji. Spesimen 1 mencatat nilai kekasaran tertinggi pada hampir semua parameter, dengan Ra sebesar 4,853 µm, Rz sebesar 13,720 µm, dan Rt sebesar 14,880 µm, sedangkan nilai Rq tercatat sangat tinggi mencapai 93,970 µm yang mengindikasikan adanya variasi ketinggian permukaan yang ekstrem. Spesimen 2 memiliki nilai kekasaran terendah pada parameter Ra, Rz, dan Rq, masing-masing sebesar 2,475 µm, 7,000 µm, dan 2,629 µm, namun memiliki nilai Rt yang sama dengan Spesimen 1 yaitu 14,880 µm, yang menunjukkan adanya puncak atau lembah tajam pada titik tertentu. Spesimen 3 berada di antara kedua spesimen lainnya, dengan nilai Ra sebesar 3,738 µm, Rz sebesar 10,570 µm, Rq sebesar 3,721 µm, dan Rt sebesar 10,670 µm memperlihatkan pola kekasaran yang relatif seimbang tanpa lonjakan ekstrem pada salah satu parameter.

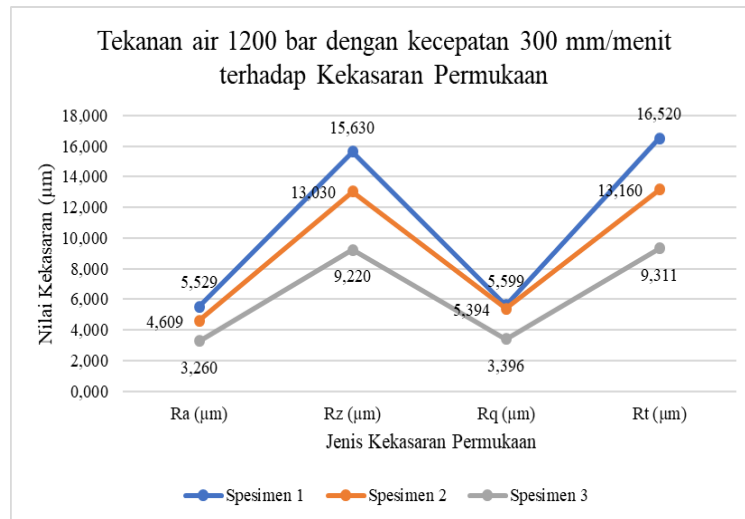
Gambar 6 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 1200 bar dan kecepatan 200 mm/menit.



Gambar 6 Tekanan air 1000 bar dan kecepatan 200 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 6 menunjukkan nilai kekasaran permukaan pada tekanan air 1200 bar dengan kecepatan 200 mm/menit untuk tiga spesimen uji. Spesimen 1 memiliki nilai kekasaran yang relatif moderat dengan Ra sebesar 3,984 µm, Rz sebesar 11,260 µm, Rq sebesar 3,738 µm, dan Rt sebesar 11,810 µm, memperlihatkan pola distribusi ketinggian permukaan yang seimbang tanpa lonjakan ekstrem. Spesimen 2 mencatat nilai terendah pada hampir semua parameter, yaitu Ra sebesar 2,884 µm, Rz sebesar 8,158 µm, Rq sebesar 3,379 µm, dan Rt sebesar 8,239 µm, yang menunjukkan permukaan paling halus di antara ketiga spesimen. Sebaliknya, Spesimen 3 menghasilkan nilai kekasaran tertinggi pada semua parameter, dengan Ra sebesar 5,531 µm, Rz sebesar 15,640 µm, Rq sebesar 5,667 µm, dan Rt sebesar 15,790 µm, yang mengindikasikan adanya puncak dan lembah yang lebih tajam serta distribusi ketinggian permukaan yang tidak merata.

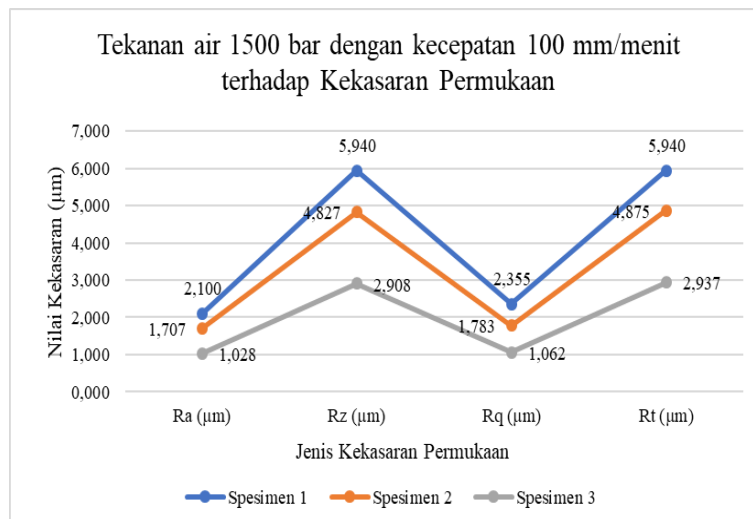
Gambar 7 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 1200 bar dan kecepatan 300 mm/menit.



Gambar 7 Tekanan air 1000 bar dan kecepatan 300 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 7 menunjukkan nilai kekasaran permukaan pada tekanan air 1200 bar dengan kecepatan 300 mm/menit untuk tiga spesimen uji. Spesimen 1 mencatat nilai kekasaran tertinggi pada hampir semua parameter, yaitu Ra sebesar 5,529 µm, Rz sebesar 15,630 µm, Rq sebesar 5,599 µm, dan Rt sebesar 16,520 µm, yang menandakan adanya puncak-lembah tajam akibat interaksi pemotongan yang semakin agresif pada kecepatan tinggi. Spesimen 2 menempati posisi kedua dengan Ra sebesar 4,609 µm, Rz sebesar 13,030 µm, Rq sebesar 5,394 µm, dan Rt sebesar 13,160 µm, menunjukkan permukaan yang cukup kasar namun lebih terkendali dibanding Spesimen 1. Sementara itu, Spesimen 3 memiliki nilai kekasaran terendah di antara ketiganya, dengan Ra sebesar 3,260 µm, Rz sebesar 9,220 µm, Rq sebesar 3,396 µm, dan Rt sebesar 9,311 µm, yang mengindikasikan kualitas permukaan yang lebih halus dan stabil.

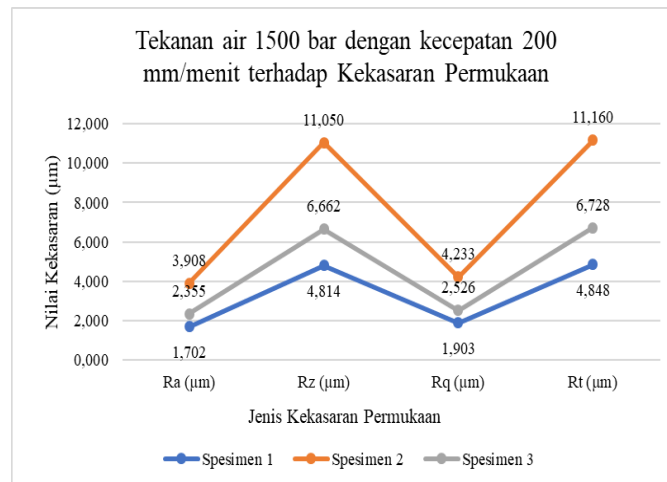
Gambar 8 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 1500 bar dan kecepatan 100 mm/menit.



Gambar 8 Tekanan air 1500 bar dan kecepatan 100 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 8 menunjukkan nilai kekasaran permukaan pada tekanan air 1500 bar dengan kecepatan 100 mm/menit untuk tiga spesimen uji. Spesimen 1 memiliki nilai kekasaran tertinggi pada semua parameter, dengan Ra sebesar 2,100 µm, Rz sebesar 5,940 µm, Rq sebesar 2,355 µm, dan Rt sebesar 5,940 µm, yang menunjukkan permukaan cukup kasar meskipun pada kecepatan rendah. Spesimen 2 berada di posisi menengah dengan Ra sebesar 1,707 µm, Rz sebesar 4,827 µm, Rq sebesar 1,783 µm, dan Rt sebesar 4,875 µm, mencerminkan permukaan yang lebih halus dibanding Spesimen 1. Sementara itu, Spesimen 3 mencatat nilai terendah pada semua parameter, yaitu Ra sebesar 1,028 µm, Rz sebesar 2,908 µm, Rq sebesar 1,062 µm, dan Rt sebesar 2,937 µm, mengindikasikan kualitas permukaan paling halus dan stabil di antara ketiganya.

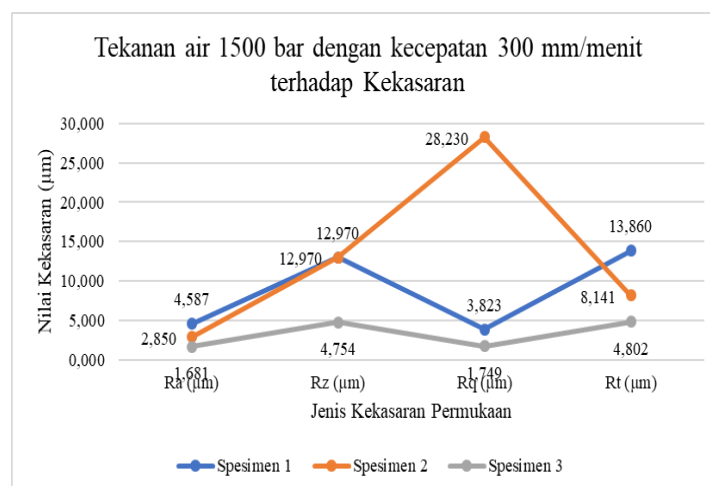
Gambar 9 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 1500 bar dan kecepatan 200 mm/menit.



Gambar 9 Tekanan air 1500 bar dan kecepatan 200 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 9 menunjukkan data kekasaran permukaan pada tekanan 1500 bar dan kecepatan 200 mm/menit. Spesimen 1 mencatat Ra 1,702 μm , Rz 4,814 μm , Rq 1,903 μm , dan Rt 4,848 μm yang menandakan permukaan relatif halus dan distribusi ketinggian yang terkendali, Spesimen 2 menunjukkan kenaikan kekasaran paling tajam dengan Ra 3,908 μm , Rz 11,05 μm , Rq 4,233 μm , dan Rt 11,16 μm yang mengindikasikan puncak-lembah ekstrem, sedangkan Spesimen 3 berada di posisi menengah dengan Ra 2,355 μm , Rz 6,662 μm , Rq 2,526 μm , dan Rt 6,728 μm yang menunjukkan permukaan lebih kasar dari Spesimen 1 namun lebih baik dari Spesimen 2.

Gambar 10 menunjukkan perbandingan nilai kekasaran permukaan pada tiga spesimen uji dengan tekanan air 1500 bar dan kecepatan 300 mm/menit.



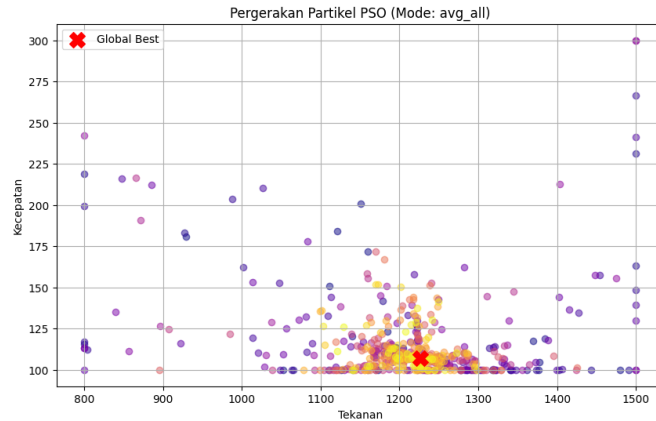
Gambar 10 Tekanan air 1500 bar dan kecepatan 300 mm/menit terhadap Kekasaran Permukaan

Gambar 4.9 menunjukkan nilai kekasaran permukaan pada tekanan 1500 bar dan kecepatan 300 mm/menit. Spesimen 1 memiliki Ra 4,587 μm , Rz 12,97 μm , Rq 3,823 μm , dan Rt 13,86 μm yang menunjukkan adanya kenaikan signifikan pada puncak-lembah permukaan dibanding kecepatan lebih rendah. Spesimen 2 memiliki Ra 2,850 μm , Rz 12,97 μm , Rq 28,23 μm , dan Rt 8,141 μm dengan nilai Rq yang sangat tinggi sehingga mengindikasikan distribusi ketinggian yang tidak merata. Spesimen 3 memiliki Ra 1,681 μm , Rz 4,754 μm , Rq 1,749 μm , dan Rt 4,802 μm yang mencerminkan permukaan paling halus di antara ketiga spesimen.

3.2 Optimasi Algoritma Partical Swarm Optimization

Pada penelitian ini, partikel-partikel PSO direpresentasikan oleh titik-titik berwarna yang tersebar dalam grafik dua dimensi dengan sumbu tekanan (x) dan kecepatan (y). Implementasi metode PSO dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python melalui *platform Google Colab* untuk pengolahan data dan visualisasi dilakukan secara efisien dan interaktif. Pada Gambar berikut, terlihat bahwa seiring bertambahnya iterasi, partikel-partikel mulai terkonsentrasi menuju satu titik yang dianggap sebagai solusi terbaik secara

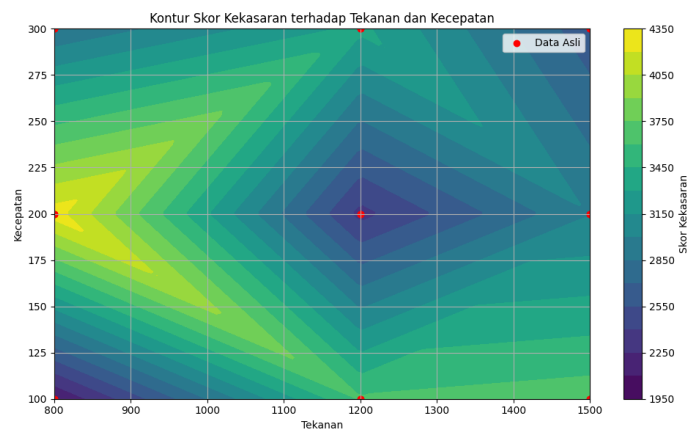
global. Titik tersebut ditandai dengan simbol silang besar berwarna merah (X) yang merepresentasikan posisi *Global Best* yakni kombinasi tekanan dan kecepatan yang menghasilkan skor kekasaran minimum.



Gambar 11 Grafik pergerakan Partikel PSO dan Titik Global Best

Berdasarkan gambar 11, metode PSO berhasil mengidentifikasi parameter optimal pada nilai tekanan sekitar 1230 Bar dan kecepatan sekitar 105 mm/min dimana nilai kekasaran permukaan berada pada titik minimum. Hal ini ditunjukkan oleh konsentrasi warna partikel yang cenderung mengarah ke satu area padat di sekitar titik *global best*. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma PSO dalam proses pencarian parameter optimum cukup efektif. Proses optimasi berlangsung secara iteratif dengan mengombinasikan pengalaman individu partikel (*personal best*) dan pengalaman kolektif (*global best*), sehingga pada akhirnya partikel-partikel terkonsentrasi di satu area optimum. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi tekanan dan kecepatan yang ditemukan mampu memberikan kualitas permukaan yang lebih baik.

Kemudian dilakukan analisis kontur untuk memvisualisasikan hubungan antara variabel proses, yaitu tekanan dan kecepatan, terhadap skor kekasaran permukaan guna mendukung hasil optimasi yang diperoleh dari metode PSO. Grafik kontur berikut memberikan gambaran topografi dari nilai kekasaran berdasarkan kombinasi parameter proses.



Gambar 12 Tekanan dan Kecepatan terhadap Kontur Skor Kekasaran

Berdasarkan gambar kontur di atas, terlihat bahwa area dengan nilai kekasaran rendah yang ditunjukkan dengan warna yang lebih gelap yaitu berada di sekitar kombinasi tekanan 1200 dan kecepatan 200. Warna pada grafik mengikuti skala warna (color bar) di sisi kanan gambar, dimana semakin gelap warnanya menunjukkan nilai kekasaran yang semakin rendah. Sebaliknya, warna yang lebih terang menunjukkan nilai kekasaran yang lebih tinggi. Titik-titik berwarna merah pada grafik menunjukkan posisi data asli atau titik pengamatan yang digunakan dalam proses interpolasi untuk menghasilkan peta kontur. Titik tengah dari kontur, yang terletak pada kombinasi tekanan ± 1200 dan kecepatan ± 200 , menunjukkan lokasi dimana nilai kekasaran minimum tercapai berdasarkan hasil simulasi dan interpolasi data.

3.3 Pembahasan

Hasil pengujian kekasaran permukaan menunjukkan bahwa kombinasi tekanan air dan kecepatan pemotongan memberikan pengaruh terhadap kualitas permukaan kaca *float glass*. Pada tekanan 800 bar,

peningkatan kecepatan dari 100 mm/menit hingga 300 mm/menit cenderung meningkatkan nilai kekasaran. Spesimen dengan struktur mikro lebih homogen menunjukkan permukaan lebih halus dan stabil, sedangkan spesimen dengan ketahanan mekanik rendah menghasilkan permukaan kasar dan tidak merata. Pada tekanan lebih tinggi, seperti 1200 dan 1500 bar, hasil menunjukkan bahwa tekanan tinggi mampu memperbaiki kualitas pemotongan dan menurunkan kekasaran permukaan secara signifikan pada kecepatan rendah hingga sedang. Namun, peningkatan kecepatan terlalu tinggi (300 mm/menit) menurunkan stabilitas hasil pemotongan, menimbulkan fluktuasi nilai R_a , R_z , R_q , dan R_t yang cukup ekstrem pada beberapa spesimen.

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya, seperti Çaydaş dan Hasçalık yang menunjukkan bahwa karakteristik mikrostruktur material memengaruhi distribusi permukaan hasil potong dalam proses *abrasive water jet* [9]. Selvan, dkk juga menekankan bahwa parameter tekanan dan kecepatan sangat memengaruhi kekasaran permukaan, namun respons tiap material bisa berbeda, sehingga optimalisasi pemotongan harus mempertimbangkan sifat spesifik material [10]. Selain itu, Alsoufi menegaskan bahwa *traverse speed* peningkatan kecepatan tanpa penyesuaian parameter lain dapat meningkatkan fluktuasi nilai kekasaran dan menurunkan stabilitas pemotongan [3].

Berdasarkan hasil yang diperoleh, algoritma PSO berhasil mengidentifikasi parameter optimal pada tekanan sekitar 1230 bar dan kecepatan sekitar 105 mm/menit, dimana nilai kekasaran permukaan berada pada titik minimum. Keberhasilan ini ditunjukkan oleh konsentrasi partikel yang mengarah ke satu area padat di sekitar titik *global best*, mencerminkan kestabilan algoritma dalam menemukan solusi optimum melalui perpaduan pengalaman *personal best* dan *global best* secara iteratif. Analisis kontur menunjukkan bahwa kombinasi tekanan ± 1200 bar dan kecepatan ± 200 mm/menit menghasilkan nilai kekasaran permukaan terendah. Hasil ini menegaskan bahwa kombinasi parameter yang ditemukan melalui PSO mampu memberikan kualitas permukaan terbaik dibandingkan variasi lainnya.

Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa studi sebelumnya yang membuktikan efektivitas algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) dalam mengoptimalkan parameter proses untuk meningkatkan kualitas permukaan. Penelitian Moghaddam dan Kolahan, yang berhasil meminimalkan kekasaran permukaan material AISI1045 melalui konvergensi solusi yang stabil [11]. Penelitian Alshannaq dkk, menggunakan PSO untuk mengoptimalkan parameter pencetakan 3D dengan memanfaatkan sinergi *personal best* dan *global best* Sehingga mampu menelusuri ruang solusi secara luas dan melakukan eksploitasi efektif [12].

Perbandingan antara rata-rata kekasaran permukaan dengan hasil optimasi melalui metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) menunjukkan kesesuaian yang kuat dimana parameter optimal berada pada tekanan sekitar 1230 bar dan kecepatan 105 mm/menit yang dekat dengan area grafik kekasaran yang memperlihatkan nilai R_a dan R_q terendah. Hasil ini membuktikan bahwa PSO mampu menelusuri ruang solusi secara efektif dan stabil, yang ditunjukkan oleh konvergensi partikel menuju titik *global best*. Validasi lebih lanjut tampak pada grafik kontur, dimana area warna gelap yang menunjukkan kekasaran rendah berada pada kisaran tekanan 1200 bar dan kecepatan 100–200 mm/menit, selaras dengan hasil PSO. Keselarasan antara titik minimum grafik kontur dan keluaran PSO menguatkan bahwa metode ini dapat diandalkan untuk meningkatkan kualitas permukaan dalam proses pemotongan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan penerapan metode PSO dapat disimpulkan bahwa variasi tekanan dan kecepatan pemotongan memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas permukaan kaca *float glass*. Nilai kekasaran R_a berkisar antara 1,028 μm hingga 6,964 μm dan nilai R_z serta R_t yang tinggi menunjukkan adanya puncak dan lembah ekstrem akibat ketidakstabilan proses, sehingga pengaturan parameter yang tepat sangat penting untuk memperoleh permukaan halus dan konsisten. Selain itu, metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) berhasil menemukan kombinasi optimal tekanan ± 1230 bar dan kecepatan ± 105 mm/menit yang menghasilkan permukaan paling halus, karena PSO mampu menggabungkan pencarian global dan lokal sehingga konfigurasi terbaik dapat dicapai secara konsisten baik secara matematis maupun visual.

5 Referensi

- [1] H. Zongrui, L. Chao, R. Wanglong, W. Yue, H. Zhili, and L. Gang, "Optimization design of water jet propulsion pump blade based on improved PSO algorithm," *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, vol. 38, no. 6, 2020.
- [2] D. J. Whitehouse, *Handbook of Surface Metrology*. Milton: CRC Press LLC, 1994.
- [3] M. S. Alsoufi, "State-of-the-Art in Abrasive Water Jet Cutting Technology and the Promise for Micro- and Nano-Machining," *IJMEA*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2017, doi: 10.11648/j.ijmea.20170501.11.

- [4] U. Aich, S. Banerjee, A. Bandyopadhyay, and P. K. Das, “Multi-objective optimisation of abrasive water jet machining responses by simulated annealing and particle swarm,” *IJMMS*, vol. 7, no. 1, p. 38, 2014, doi: 10.1504/ijmms.2014.062763.
- [5] N. L. Velikanov, V. A. Naumov, and S. I. Koryagin, “Characteristics of Plunger Pumps,” *Russ. Engin. Res.*, vol. 38, no. 6, pp. 428–430, Jun. 2018, doi: 10.3103/S1068798X18060175.
- [6] Z.-M. Liu, X.-G. Gao, Y. Pan, and B. Jiang, “Multi-Objective Parameter Optimization of Submersible Well Pumps Based on RBF Neural Network and Particle Swarm Optimization,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 15, p. 8772, Jul. 2023, doi: 10.3390/app13158772.
- [7] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, and H. H. Soliman, “Roughness parameters,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, no. 1, pp. 133–145, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
- [8] J. Kennedy’ and R. Eberhart, “Particle Swarm Optimization,” 1995.
- [9] U. Çaydaş and A. Hasçalık, “A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 202, no. 1–3, pp. 574–582, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.024.
- [10] M. C. P. Selvan, N. Mohana Sundara Raju, and H. K. Sachidananda, “Effects of process parameters on surface roughness in abrasive waterjet cutting of aluminium,” *Front. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 439–444, Dec. 2012, doi: 10.1007/s11465-012-0337-0.
- [11] M. A. Moghaddam and F. Kolahan, “Application of orthogonal array technique and particle swarm optimization approach in surface roughness modification when face milling AISI1045 steel parts,” *J Ind Eng Int*, vol. 12, no. 2, pp. 199–209, Jun. 2016, doi: 10.1007/s40092-015-0137-3.
- [12] O. Alshannaq *et al.*, “Particle Swarm Optimization Algorithm To Enhance The Roughness Of Thin Film In Tin Coatings,” vol. 17, no. 2, 2022.