

# Pembuatan Diesel Particulate Filter Ceramic Panjang 400 mm, Diameter 120 mm, Tebal 20 mm, dengan Perforasi Laser Ø0,5 mm dan Inner Core Stainless Steel

Sudirman Rizki Ariyanto<sup>1</sup>, Syamsul Hadi<sup>1\*</sup>, Warju<sup>2</sup>, Lailatus Sa'diyah Yuniar Arianti<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Optimasi Desain Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, 65141 Malang, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, 60231 Surabaya, Indonesia

**ABSTRAK** – Emisi gas buang mesin diesel mengandung partikel jelaga diesel yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan, sehingga diperlukan teknologi filtrasi yang mampu menahan partikel sebelum dilepaskan ke atmosfer. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis proses pembuatan *Diesel Particulate Filter* ceramic berbentuk silindris dari bahan ceramic padat dengan perforasi laser dan *inner core* stainless steel. Desain DPF ceramic memiliki panjang 400 mm, diameter luar 120 mm, ketebalan radial ceramic 20 mm, diameter lubang perforasi Ø0,50 mm, dan pitch antar pusat lubang 1,00 mm dengan pola *staggered/triangular*. Metode penelitian meliputi penyusunan spesifikasi desain, alur proses pembuatan, perhitungan luas area perforasi, jumlah lubang, waktu produksi, dan kapasitas produksi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa luas area perforasi sebesar 150.796 mm<sup>2</sup> dengan area efektif per lubang 0,866 mm<sup>2</sup>, sehingga jumlah lubang yang dibutuhkan mencapai 174.130 lubang. Dengan asumsi waktu pembentukan satu lubang sebesar 0,5 detik, waktu proses perforasi laser adalah 24,18 jam. Total waktu produksi satu unit DPF ceramic mencapai 31,18 jam, sehingga kapasitas produksi diperoleh sebesar 0,032 unit/jam. Kapasitas ini lebih rendah dibandingkan desain mesh sebelumnya sebesar 0,125 unit/jam karena ceramic padat memerlukan proses pembentukan lubang satu per satu. Meskipun demikian, DPF ceramic memiliki potensi dari sisi ketahanan temperatur, kestabilan struktur, dan keterukuran pola perforasi.

## HISTORI ARTIKEL

Diterima: 4 Mei 2026

Revisi: 19 Mei 2026

Disetujui: 22 Mei 2026

Diterbitkan: 22 Mei 2026

## KEYWORDS

DPF Ceramic,  
Partikel Jelaga Diesel,  
Perforasi Laser,  
Kapasitas Produksi,  
Ceramic Padat

## 1.0 PENDAHULUAN

Emisi gas buang mesin diesel menghasilkan partikel jelaga diesel, yaitu partikel halus yang terbentuk akibat pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna di dalam ruang bakar. Dalam literatur emisi, partikel jelaga diesel termasuk dalam kategori *particulate matter* (PM) atau *soot*. Paparan partikel jelaga diesel dalam jangka panjang dapat menyebabkan gangguan pernapasan, penyakit kardiovaskular, serta menurunkan kualitas udara di lingkungan sekitar. Kondisi tersebut menuntut penggunaan teknologi pengendalian emisi yang mampu menahan partikel jelaga diesel sebelum gas buang dilepaskan ke atmosfer. Pengendalian partikel jelaga diesel menjadi kebutuhan teknis karena mesin diesel masih banyak digunakan pada kendaraan, alat berat, generator, dan peralatan industri [1]. Teknologi *diesel particulate filter* (DPF) digunakan untuk menangkap partikel jelaga diesel dari gas buang mesin diesel. DPF bekerja sebagai filter mekanis yang menahan partikel jelaga diesel melalui media berpori atau berlubang. Gas buang diarahkan melewati media filter, kemudian partikel jelaga tertahan pada permukaan, dinding pori, atau jalur aliran di dalam filter. Efektivitas DPF dipengaruhi oleh material filter, struktur geometri, ukuran lubang, ketebalan media, dan distribusi aliran gas. Rancangan DPF harus mampu menangkap partikel jelaga diesel secara efektif tanpa menimbulkan hambatan aliran yang terlalu besar karena hambatan tersebut dapat meningkatkan *pressure drop* dan memengaruhi performa mesin [2].

Prinsip kerja DPF berkaitan erat dengan jalur aliran gas buang dan karakteristik media filter. DPF bekerja dengan prinsip memaksa aliran gas buang melewati media filter sehingga partikel jelaga diesel tertahan pada struktur pori, lubang, atau permukaan media. Struktur DPF umumnya berbentuk silindris dengan kanal atau jalur aliran internal yang dirancang untuk meningkatkan luas permukaan filtrasi, mengatur distribusi aliran gas, dan menurunkan emisi partikel jelaga diesel [3]. Dalam proses filtrasi, partikel jelaga diesel dapat tertangkap melalui penyaringan langsung, impaksi inersia, intersepsi, dan deposisi pada permukaan media. Mekanisme tersebut menunjukkan bahwa kemampuan DPF ditentukan oleh jenis material, bentuk geometri, ukuran lubang atau pori, ketebalan media, serta pola distribusi aliran gas buang.

Material ceramic digunakan dalam DPF karena memiliki ketahanan panas, kestabilan bentuk, dan ketahanan kimia pada lingkungan gas buang diesel. Selama bekerja, media filter menerima aliran gas panas, partikel jelaga diesel, sisa hidrokarbon, abu, serta perubahan temperatur yang terjadi berulang. Kondisi tersebut membutuhkan material yang tidak mudah berubah bentuk, tidak mudah teroksidasi, dan mampu mempertahankan struktur selama proses filtrasi. Ceramic memiliki sifat kaku, tahan temperatur tinggi, dan relatif inert terhadap gas buang. Karakteristik tersebut menjadikan ceramic sesuai sebagai media filter untuk menahan partikel jelaga diesel pada kondisi operasi yang menuntut ketahanan termal dan kestabilan struktur. Kemampuan ceramic dalam menangkap partikel jelaga diesel didasarkan pada interaksi antara partikel jelaga diesel dan permukaan media filter. Ketika gas buang melewati lubang mikro pada media ceramic, partikel jelaga diesel tidak selalu mengikuti aliran gas secara sempurna. Partikel jelaga diesel berukuran lebih besar dari celah aliran dapat tertahan secara langsung. Partikel jelaga diesel berukuran lebih kecil dapat menumbuk dinding lubang, menempel pada permukaan ceramic, atau mengalami deposisi selama melewati jalur filtrasi. Proses penangkapan tersebut terjadi melalui penyaringan langsung, impaksi inersia, intersepsi, dan deposisi. Dengan mekanisme tersebut, ceramic berfungsi sebagai media penahan sekaligus tempat akumulasi partikel jelaga diesel.

Penelitian ini mengembangkan DPF ceramic berbentuk silindris dengan media ceramic padat sebagai komponen utama filter. Media ceramic diberi perforasi mikro menggunakan laser untuk membentuk jalur filtrasi yang terukur dan rapat menyerupai mesh. Perforasi tersebut ditujukan untuk meningkatkan area kontak antara gas buang dan permukaan ceramic, sehingga peluang partikel jelaga diesel tertahan pada media filter menjadi lebih besar. Rancangan ini juga dilengkapi inner core stainless steel berperforasi yang berfungsi sebagai jalur aliran dan penopang internal. Kombinasi media ceramic berperforasi mikro dan inner core stainless steel diarahkan untuk menghasilkan DPF yang sederhana, kuat, dan dapat dianalisis dari sisi proses pembuatan. Penelitian DPF telah membahas distribusi aliran, deposisi partikel jelaga diesel, keandalan filter, temperatur operasi, dan regenerasi. Bao et al. [4] menunjukkan bahwa ukuran partikel jelaga diesel memengaruhi pola deposisi dalam kanal DPF. Ahmadbeigi et al. [5] menjelaskan bahwa kegagalan DPF berkaitan dengan faktor operasional dan kualitas material. Wang et al. [6] menunjukkan bahwa distribusi aliran dan temperatur yang tidak merata dapat merusak material filter. Li et al. [7] menjelaskan bahwa karakteristik partikel jelaga diesel berubah selama proses regenerasi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa performa DPF sangat dipengaruhi oleh material, geometri, aliran gas, dan kondisi operasi. Kajian terbaru mengenai DPF banyak diarahkan pada peningkatan efisiensi filtrasi dan penurunan *pressure drop* melalui simulasi numerik, optimasi parameter, dan analisis struktur pori [8], [9].

Penelitian lain menekankan pentingnya struktur pori terhadap stabilitas termal dan umur pakai filter selama proses regenerasi [10], [11]. Namun, pembahasan mengenai proses pembuatan DPF ceramic dari bahan ceramic padat dengan perforasi mikro laser masih terbatas. Pendekatan ini memiliki potensi karena pola lubang dapat dibuat seragam, terukur, dan dikendalikan berdasarkan kebutuhan desain. Keterbatasan kajian tersebut menjadi dasar pengembangan rancangan dan proses pembuatan DPF ceramic pada penelitian ini. Proses manufaktur menjadi bagian penting dalam pengembangan DPF ceramic karena desain filter harus dapat diwujudkan menjadi produk nyata. Struktur DPF yang terlalu kompleks dapat menyulitkan proses produksi, meningkatkan waktu pengerjaan, dan menambah kebutuhan kontrol manufaktur. Rekonstruksi struktur mikro DPF menunjukkan bahwa filter memiliki geometri internal yang rumit dan memerlukan analisis lanjutan untuk memahami performanya [12]. Kajian siklus hidup juga menunjukkan bahwa tahap produksi berkontribusi terhadap penggunaan sumber daya dan dampak lingkungan [13]. Karena itu, pembuatan DPF perlu mempertimbangkan desain, material, tahapan proses, waktu produksi, dan kapasitas pembuatan. Penggunaan media ceramic padat dengan perforasi laser memengaruhi waktu produksi karena lubang filtrasi harus dibuat melalui proses pembentukan satu per satu. Kondisi ini berbeda dengan material mesh yang sudah memiliki bukaan dari struktur awal material. Pada DPF ceramic, pola lubang, diameter lubang, pitch, luas area perforasi, dan jumlah lubang menentukan lama proses laser. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya membahas bentuk dan material DPF, tetapi juga memasukkan alur proses pembuatan sebagai dasar evaluasi manufaktur. Pembahasan kapasitas produksi diperlukan untuk mengetahui hubungan antara rancangan produk, waktu pengerjaan, dan kemampuan produksi per satuan waktu.

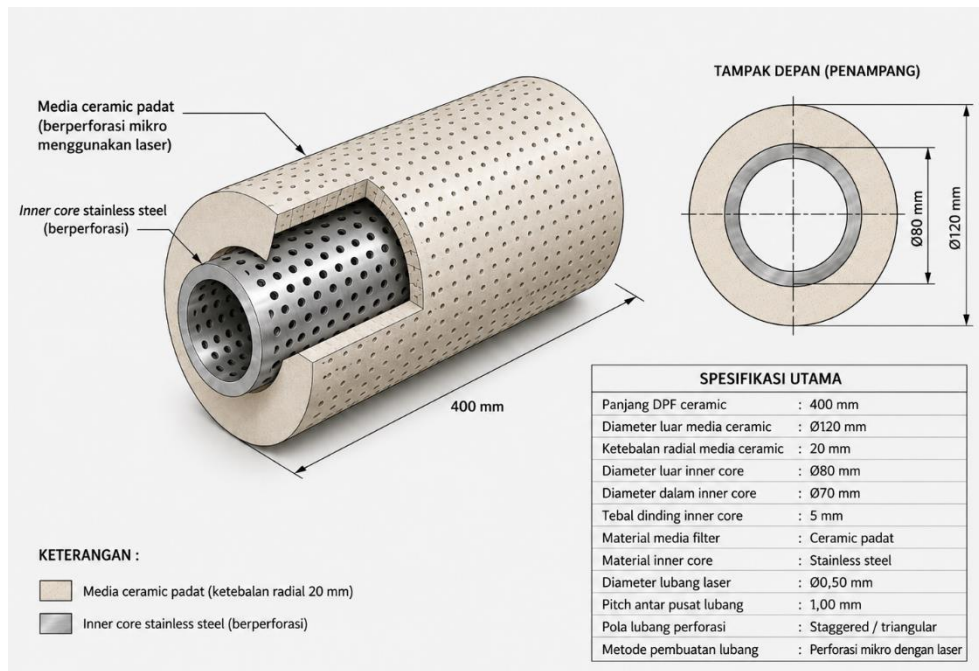
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada pembuatan *diesel particulate filter* ceramic berbentuk silindris dengan panjang 400 mm, diameter luar 120 mm, ketebalan ceramic 20 mm, perforasi laser  $\varnothing 0,5$  mm, dan inner core stainless steel. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis proses pembuatan DPF ceramic dari bahan ceramic padat hingga menjadi produk filter yang siap digunakan. Tahapan penelitian meliputi persiapan bahan, penyesuaian dimensi, perforasi mikro menggunakan laser, pembersihan dan inspeksi lubang, perakitan inner core, serta evaluasi akhir terhadap kesesuaian dimensi dan alur produksi. Hasil penelitian diharapkan mendukung pengembangan DPF ceramic yang aplikatif dan terukur.

## 2.0 METODE

### 2.1 Pendekatan Penelitian dan Perancangan Produk

Objek penelitian ini adalah DPF ceramic berbentuk silindris yang dirancang sebagai media penangkap partikel jelaga diesel pada gas buang mesin diesel [14]. DPF ceramic ini menggunakan media ceramic padat sebagai komponen utama filter dan *inner core* stainless steel sebagai jalur aliran gas di bagian dalam. Media ceramic berfungsi sebagai bagian yang

menerima proses perforasi mikro, sedangkan *inner core* berfungsi sebagai penopang internal sekaligus pengarah aliran gas setelah melewati media ceramic [1]. Desain DPF ceramic yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain isometrik DPF ceramic

Desain pada Gambar 1 menunjukkan susunan DPF ceramic yang terdiri dari media ceramic berbentuk silindris dan *inner core* stainless steel berperforasi. Media ceramic dirancang memiliki ketebalan radial 20 mm, sedangkan *inner core* ditempatkan pada bagian tengah sebagai saluran aliran gas. Desain ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan tahapan proses pembuatan, penentuan parameter perforasi laser, perhitungan luas area perforasi, estimasi jumlah lubang, waktu proses, dan kapasitas produksi [15]. Spesifikasi utama desain DPF ceramic yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1. Spesifikasi tersebut mencakup dimensi utama media ceramic, ukuran *inner core*, material yang digunakan, serta parameter perforasi laser. Data pada Tabel 1 menjadi acuan dalam proses perhitungan dan analisis pada tahap berikutnya.

Tabel 1 Spesifikasi desain DPF ceramic

No.	Parameter	Keterangan	No.	Parameter	Keterangan
1	Panjang DPF ceramic	400 mm	7	Material media filter	Ceramic padat
2	Diameter luar media ceramic	120 mm	8	Material inner core	Stainless steel
3	Ketebalan media ceramic	20 mm	9	Diameter luar inner core	80 mm
4	Diameter dalam inner core	70 mm	10	Pitch antar pusat lubang	1,00 mm
5	Tebal dinding inner core	5 mm	11	Pola lubang perforasi	Staggered
6	Diameter lubang perforasi laser	Ø0,5 mm	12	Metode pembuatan lubang	Perforasi mikro menggunakan laser

## 2.2 Alur Proses Pembuatan DPF Ceramic

Alur proses pembuatan DPF ceramic disusun untuk menjelaskan tahapan kerja dari bahan awal hingga menjadi produk filter yang siap digunakan. Proses pembuatan dimulai dari persiapan bahan ceramic padat, kemudian dilanjutkan dengan penyesuaian dimensi sesuai rancangan. Setelah dimensi media ceramic sesuai, proses berikutnya adalah pembuatan lubang mikro menggunakan laser. Tahap selanjutnya meliputi pembersihan dan inspeksi lubang, persiapan serta perakitan *inner core*, dan pemeriksaan akhir produk. Alur proses pembuatan DPF ceramic ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, tahap pertama adalah persiapan bahan ceramic padat sebagai media utama filter. Bahan ceramic padat disiapkan dalam bentuk silindris sesuai kebutuhan rancangan. Tahap kedua adalah penyesuaian dimensi, yaitu proses pembentukan atau pemesinan awal agar media ceramic memiliki ukuran yang sesuai dengan spesifikasi desain, meliputi panjang, diameter luar, dan ketebalan radial. Tahap ini penting karena kesesuaian dimensi akan memengaruhi proses perforasi, pemasangan *inner core*, serta bentuk akhir DPF ceramic. Tahap ketiga adalah perforasi mikro menggunakan laser. Pada tahap ini, media ceramic padat diberi lubang-lubang mikro dengan parameter yang telah ditentukan, yaitu diameter lubang Ø0,5 mm dan pitch antar pusat lubang 1,00 mm. Proses perforasi dilakukan untuk

membentuk jalur filtrasi pada media ceramic sehingga gas buang dapat melewati lubang-lubang tersebut dan partikel jelaga diesel dapat tertahan pada permukaan maupun dinding lubang. Tahap ini menjadi bagian penting karena jumlah lubang dan waktu pembentukan lubang akan memengaruhi total waktu produksi.



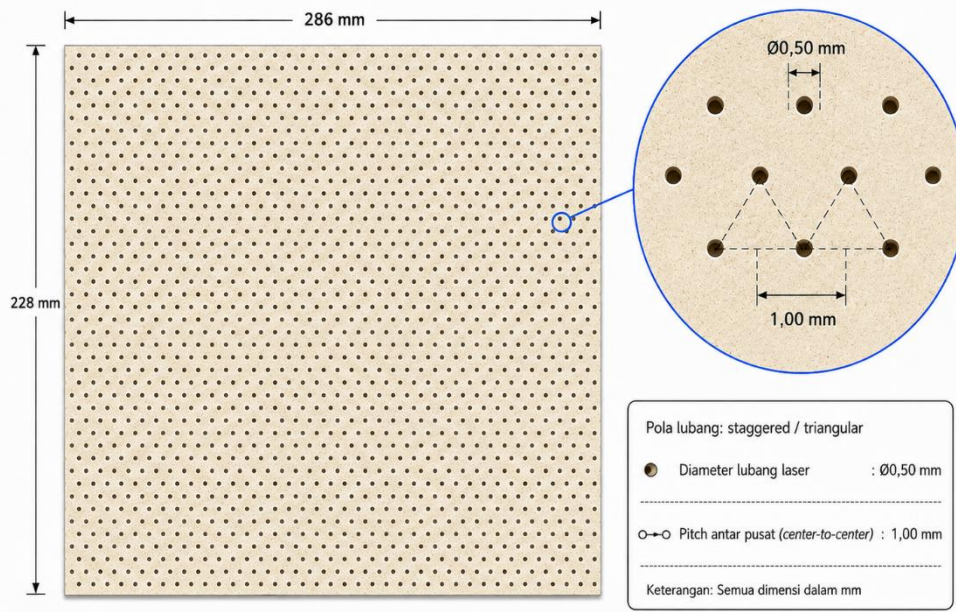
Gambar 2. Alur proses pembuatan DPF ceramic

Tahap keempat adalah pembersihan dan inspeksi lubang hasil perforasi. Pembersihan dilakukan untuk menghilangkan sisa material, debu, atau residu yang terbentuk selama proses laser. Inspeksi dilakukan untuk memastikan lubang terbentuk sesuai pola, ukuran, dan distribusi yang direncanakan. Tahap kelima adalah persiapan dan perakitan *inner core* stainless steel. *Inner core* dipasang pada bagian tengah media ceramic sebagai jalur aliran gas dan penopang internal filter. Setelah proses perakitan selesai, tahap terakhir adalah pemeriksaan akhir untuk memastikan dimensi, susunan komponen, dan kondisi produk telah sesuai dengan rancangan. Alur proses tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan komponen waktu pada perhitungan kapasitas produksi. Setiap tahapan memiliki kebutuhan waktu yang berbeda, mulai dari persiapan bahan, penyesuaian dimensi, proses laser, pembersihan, inspeksi, perakitan, hingga pemeriksaan akhir. Dengan menyusun alur proses secara sistematis, estimasi waktu produksi dapat dilakukan lebih terarah dan kapasitas produksi DPF ceramic dapat dihitung berdasarkan total waktu pembuatan satu unit produk.

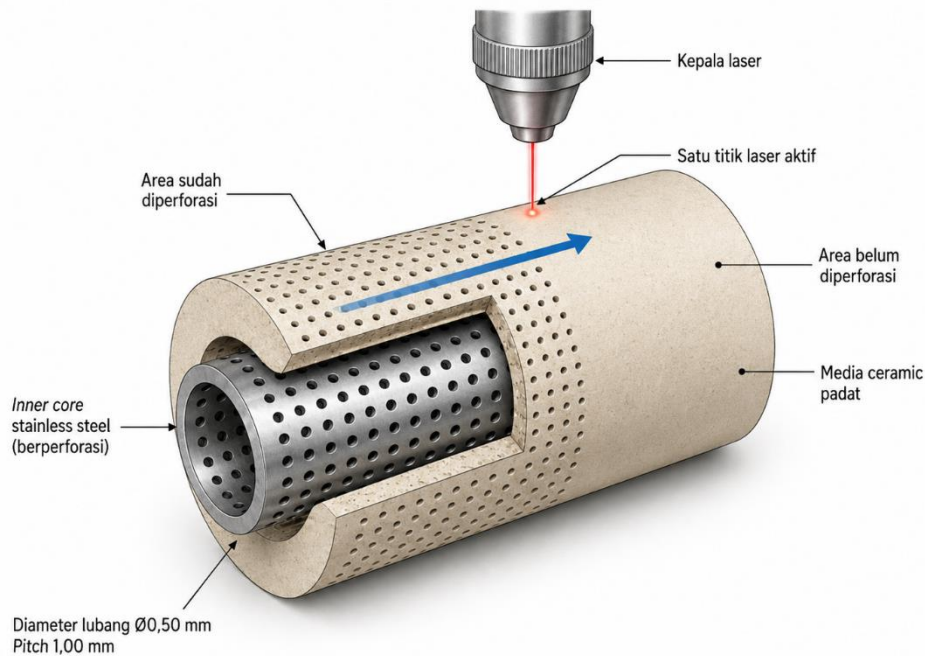
### 2.3 Parameter Perforasi Laser

Parameter perforasi laser ditetapkan untuk menentukan pola lubang pada media ceramic serta menjadi dasar dalam perhitungan jumlah lubang dan waktu proses laser. Pada penelitian ini, lubang perforasi dibuat pada permukaan media ceramic menggunakan proses laser dengan diameter lubang 0,50 mm dan pitch antar pusat lubang 1,00 mm. Pemilihan proses laser didasarkan pada kemampuannya membentuk lubang mikro pada material ceramic dengan pola yang dapat dikendalikan. Laser drilling telah banyak dikaji untuk pembuatan *micro-hole* pada material ceramic karena mampu menghasilkan lubang berukuran kecil dengan parameter proses yang dapat diatur, seperti energi pulsa, durasi pulsa, jumlah pulsa, dan strategi pemindaian [16]. Pola lubang yang digunakan adalah pola *staggered* atau *triangular*. Pola ini digunakan agar distribusi lubang pada permukaan media ceramic menjadi lebih rapat dan merata dibandingkan pola sejajar. Dengan susunan tersebut, area bukaan dan area kontak antara gas buang dengan permukaan ceramic dapat meningkat. Dalam konteks DPF ceramic, pola lubang yang rapat diperlukan agar gas buang memiliki lebih banyak jalur filtrasi ketika melewati media ceramic [17]. Ilustrasi pola perforasi laser pada ceramic ditunjukkan pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, lubang mikro disusun dengan diameter 0,50 mm dan pitch antar pusat lubang 1,00 mm. Diameter lubang menunjukkan ukuran bukaan yang dibentuk oleh proses laser, sedangkan pitch menunjukkan jarak antar pusat lubang. Kedua parameter tersebut digunakan untuk menentukan kerapatan lubang pada permukaan media ceramic. Kerapatan lubang kemudian menjadi dasar dalam perhitungan jumlah lubang perforasi. Pada proses laser drilling ceramic, parameter ukuran lubang, kualitas tepi lubang, taper, dan kondisi permukaan lubang dipengaruhi oleh parameter proses laser serta metode pembentukan lubang yang digunakan [18], [19]. Selain pola dan ukuran lubang, konsep satu titik laser aktif juga digunakan dalam penelitian ini. Pada konsep ini, laser membentuk satu lubang pada satu posisi, kemudian berpindah ke posisi berikutnya sesuai pitch yang telah ditentukan. Proses tersebut dilakukan secara bertahap sampai seluruh area perforasi selesai. Konsep satu titik laser aktif penting untuk perhitungan waktu proses karena total waktu perforasi bergantung pada jumlah lubang dan waktu pembentukan setiap lubang. Studi laser drilling pada ceramic juga menunjukkan bahwa waktu drilling dan energi proses dapat dianalisis berdasarkan kebutuhan pembentukan lubang tembus pada material ceramic [15].



Gambar 3. Tampak atas pola perforasi laser pada media ceramic



Gambar 4. Ilustrasi proses laser drilling pada media ceramic

Gambar 4 menunjukkan ilustrasi proses perforasi laser pada media ceramic. Bagian yang telah diproses memiliki lubang mikro, sedangkan bagian yang belum diproses masih berupa ceramic padat. Ilustrasi ini menggambarkan bahwa proses perforasi dilakukan secara bertahap dari satu area ke area berikutnya. Karena proses menggunakan satu titik laser aktif, jumlah lubang yang semakin besar akan meningkatkan waktu proses laser. Oleh karena itu, parameter diameter lubang, pitch, pola lubang, dan konsep satu titik laser aktif digunakan sebagai dasar dalam perhitungan jumlah lubang, waktu proses laser, dan kapasitas produksi DPF ceramic.

#### 2.4 Metode Perhitungan Jumlah Lubang Perforasi

Jumlah lubang perforasi dihitung untuk mengetahui banyaknya lubang mikro yang harus dibuat pada permukaan media ceramic. Perhitungan ini diperlukan karena proses perforasi laser dilakukan secara bertahap menggunakan satu titik laser aktif. Dengan demikian, jumlah lubang yang terbentuk akan berpengaruh langsung terhadap waktu proses laser dan kapasitas produksi DPF ceramic. Selain itu, jumlah lubang juga berkaitan dengan luas area bukaan pada media filter.

Penelitian mengenai perforated plate menunjukkan bahwa parameter geometri seperti porositas, ketebalan, pola lubang, dan jumlah bukaan dapat memengaruhi karakteristik aliran dan pressure drop pada pelat berlubang [20], [21]. Pada penelitian ini, lubang perforasi dibuat pada permukaan luar media ceramic berbentuk silindris. Oleh karena itu, luas area perforasi dihitung berdasarkan luas selimut tabung. Pendekatan ini digunakan karena area yang diberi lubang laser berada pada sisi luar media ceramic, bukan pada bidang penampang depan. Luas area perforasi dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$A = \pi \times D \times L \quad (1)$$

Keterangan:

A = luas area perforasi pada permukaan luar media ceramic (mm<sup>2</sup>)

D = diameter luar media ceramic (mm)

L = panjang media ceramic (mm)

Nilai diameter luar media ceramic dan panjang DPF diambil dari spesifikasi desain pada Tabel 3.1. Pada penelitian ini, diameter luar media ceramic sebesar 120 mm dan panjang media ceramic sebesar 400 mm digunakan sebagai data input perhitungan. Hasil numerik dari perhitungan luas area perforasi tidak disajikan pada subbab ini, tetapi dibahas pada Bab 4 sebagai bagian dari hasil perhitungan. Setelah luas area perforasi ditentukan, tahap berikutnya adalah menghitung area efektif untuk setiap lubang berdasarkan pola susunan lubang. Pada penelitian ini, pola lubang yang digunakan adalah pola *staggered* atau *triangular*. Pola ini menghasilkan susunan lubang berselang-seling sehingga jarak antar pusat lubang membentuk konfigurasi segitiga. Pola triangular banyak digunakan dalam analisis pelat berlubang karena dapat menghasilkan distribusi lubang yang rapat dan teratur. Kajian pada perforated plate dengan triangular hole pattern juga menunjukkan bahwa pola lubang dan ukuran lubang memengaruhi karakteristik efektif struktur pelat berlubang [22], [23]. Area efektif tiap lubang pada pola triangular dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$A_h = 0,866 \times p^2 \quad (2)$$

Keterangan:

A<sub>h</sub> = area efektif per lubang pada pola triangular (mm<sup>2</sup>)

p = pitch atau jarak antar pusat lubang (mm)

Konstanta 0,866 berasal dari pendekatan geometri pola triangular, yaitu  $\frac{\sqrt{3}}{2}$ . Nilai ini digunakan karena susunan lubang tidak berbentuk persegi, melainkan membentuk pola segitiga sama sisi antar pusat lubang. Pada penelitian ini, pitch antar pusat lubang ditetapkan sebesar 1,00 mm. Pitch tersebut digunakan untuk menentukan kerapatan posisi lubang pada permukaan media ceramic. Diameter lubang Ø0,50 mm digunakan sebagai ukuran bukaan perforasi, sedangkan pitch 1,00 mm digunakan dalam perhitungan jumlah posisi lubang. Jumlah lubang perforasi kemudian dihitung dengan membagi luas area perforasi terhadap area efektif per lubang. Perhitungan jumlah lubang ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$N = \frac{A}{A_h} \quad (3)$$

Keterangan:

N = jumlah lubang perforasi

A = luas area perforasi (mm<sup>2</sup>)

A<sub>h</sub> = area efektif per lubang (mm<sup>2</sup>)

Berdasarkan Persamaan (3), jumlah lubang perforasi dipengaruhi oleh luas permukaan luar media ceramic dan nilai pitch antar pusat lubang. Semakin besar luas area perforasi, semakin banyak lubang yang harus dibuat. Sebaliknya, semakin besar nilai pitch, jumlah lubang yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit karena jarak antar pusat lubang semakin renggang. Hubungan antara pola lubang, porositas, dan aliran juga menjadi perhatian dalam kajian perforated plate karena perubahan geometri perforasi dapat memengaruhi distribusi aliran dan kehilangan tekanan [20].

Nilai jumlah lubang yang diperoleh dari metode ini digunakan sebagai dasar untuk menghitung waktu proses laser pada subbab berikutnya. Hal ini disebabkan proses perforasi dilakukan secara berurutan dari satu lubang ke lubang lainnya menggunakan satu titik laser aktif. Oleh karena itu, jumlah lubang menjadi parameter penting dalam estimasi waktu produksi dan kapasitas pembuatan DPF ceramic. Semakin banyak jumlah lubang yang harus dibentuk, semakin besar waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan proses perforasi pada satu unit DPF ceramic.

## 2.5 Metode Perhitungan Waktu dan Kapasitas Produksi

Waktu dan kapasitas produksi dihitung untuk mengetahui kemampuan proses pembuatan DPF ceramic dalam menghasilkan satu unit produk. Perhitungan ini penting karena rancangan DPF ceramic menggunakan media ceramic padat yang harus diberi lubang mikro melalui proses laser secara bertahap. Dalam sistem manufaktur, waktu proses atau *cycle time* digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan waktu pada setiap tahapan kerja, menentukan potensi bottleneck, serta menjadi dasar dalam perencanaan kapasitas produksi [24]. Pada penelitian ini, waktu produksi dihitung dari tahap persiapan bahan sampai pemeriksaan akhir produk. Waktu proses laser dihitung berdasarkan jumlah lubang perforasi dan waktu pembentukan satu lubang. Karena proses perforasi dilakukan menggunakan satu titik laser aktif, setiap lubang dibuat secara berurutan dari satu posisi ke posisi berikutnya. Dengan demikian, waktu proses laser berbanding lurus dengan jumlah lubang yang harus dibuat. Semakin banyak jumlah lubang perforasi, semakin besar waktu laser yang dibutuhkan. Hubungan antara jumlah lubang dan waktu pembentukan lubang ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$T_l = N \times t_h \quad (4)$$

Keterangan:

$T_l$  = waktu proses laser (jam)

$N$  = jumlah lubang perforasi

$t_h$  = waktu pembentukan satu lubang (jam/lubang)

Persamaan (4) digunakan karena proses perforasi laser pada penelitian ini dianggap berlangsung secara berurutan. Pendekatan ini sesuai dengan konsep perhitungan waktu operasi pada proses manufaktur, yaitu total waktu suatu operasi dapat diperoleh dari jumlah elemen kerja dikalikan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan setiap elemen kerja. Dalam proses laser drilling, produktivitas proses juga dipengaruhi oleh jumlah lubang, parameter laser, waktu pembentukan lubang, dan kualitas lubang yang dihasilkan [25]. Oleh karena itu, jumlah lubang menjadi parameter utama dalam estimasi waktu proses laser pada DPF ceramic.

Total waktu produksi tidak hanya ditentukan oleh proses laser, tetapi juga oleh tahapan lain dalam alur pembuatan DPF ceramic. Tahapan tersebut meliputi persiapan bahan ceramic padat, penyesuaian dimensi, proses perforasi laser, pembersihan dan inspeksi, perakitan *inner core*, serta pemeriksaan akhir. Setiap tahapan memiliki kontribusi waktu terhadap total waktu pembuatan satu unit produk. Total waktu produksi dihitung dengan menjumlahkan seluruh waktu proses, seperti ditunjukkan pada Persamaan (5).

$$T_t = T_p + T_s + T_l + T_i + T_a + T_f \quad (5)$$

Keterangan:

$T_t$  = total waktu produksi (jam/unit)

$T_p$  = waktu persiapan bahan (jam)

$T_s$  = waktu penyesuaian dimensi (jam)

$T_l$  = waktu proses laser (jam)

$T_i$  = waktu pembersihan dan inspeksi (jam)

$T_a$  = waktu perakitan inner core (jam)

$T_f$  = waktu pemeriksaan akhir (jam)

Persamaan (5) digunakan untuk mengetahui total waktu yang diperlukan dalam menghasilkan satu unit DPF ceramic. Pendekatan penjumlahan waktu proses ini sesuai dengan analisis waktu siklus manufaktur, karena setiap tahapan kerja dalam alur produksi memberikan kontribusi terhadap waktu penyelesaian produk [24]. Dengan mengetahui total waktu produksi, tahapan yang paling dominan terhadap durasi pembuatan dapat diidentifikasi. Pada rancangan DPF ceramic ini, proses perforasi laser diperkirakan menjadi tahapan dominan karena lubang mikro dibuat satu per satu pada permukaan ceramic padat. Kapasitas produksi dihitung setelah total waktu produksi per unit diperoleh. Kapasitas produksi menunjukkan jumlah unit yang dapat dibuat dalam satu satuan waktu. Dalam penelitian ini, kapasitas produksi dinyatakan dalam satuan unit per jam. Perhitungan kapasitas produksi dilakukan dengan membagi satu unit produk terhadap total waktu produksi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu unit DPF ceramic. Persamaan kapasitas produksi ditunjukkan pada Persamaan (6).

$$K = \frac{1}{T_t} \quad (6)$$

Keterangan:

K = kapasitas produksi (unit/jam)

$T_t$  = total waktu produksi per unit (jam/unit)

Persamaan (6) digunakan untuk menghubungkan waktu produksi dengan kemampuan pembuatan produk per satuan waktu. Jika total waktu produksi semakin besar, maka kapasitas produksi akan semakin kecil. Sebaliknya, jika total waktu produksi dapat dikurangi, maka kapasitas produksi akan meningkat. Hubungan antara *cycle time*, produktivitas, dan kapasitas produksi menjadi bagian penting dalam evaluasi proses manufaktur karena waktu proses menentukan kemampuan produksi dan efisiensi sistem kerja [24]. Oleh karena itu, perhitungan kapasitas produksi digunakan untuk menilai kelayakan proses pembuatan DPF ceramic dari sisi waktu produksi. Pada penelitian ini, data jumlah lubang perforasi diperoleh dari hasil perhitungan pada subbab sebelumnya, sedangkan waktu pembentukan satu lubang ditentukan berdasarkan asumsi proses laser yang digunakan. Data waktu untuk tahapan persiapan bahan, penyesuaian dimensi, pembersihan dan inspeksi, perakitan *inner core*, serta pemeriksaan akhir digunakan sebagai komponen total waktu produksi. Hasil numerik dari perhitungan waktu proses laser, total waktu produksi, dan kapasitas produksi tidak disajikan pada subbab ini, tetapi dibahas pada Bab 4 sebagai bagian dari hasil dan pembahasan.

### 3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Perhitungan Jumlah Lubang

Perhitungan jumlah lubang perforasi dilakukan berdasarkan dimensi media ceramic dan parameter pola lubang yang telah ditetapkan. Media ceramic memiliki diameter luar 120 mm dan panjang 400 mm, sedangkan pola lubang menggunakan susunan *triangular* atau *staggered* dengan pitch antar pusat lubang sebesar 1,00 mm. Diameter lubang perforasi yang digunakan adalah  $\varnothing 0,50$  mm dengan tujuan agar gas buang memiliki jalur aliran yang lebih memungkinkan dan tidak terlalu terhambat ketika melewati media ceramic. Perhitungan jumlah lubang diperlukan karena jumlah lubang menjadi dasar dalam menentukan waktu proses laser dan kapasitas produksi. Luas area perforasi dihitung berdasarkan luas permukaan luar media ceramic. Karena media ceramic berbentuk silindris dan lubang dibuat pada permukaan samping, maka luas area perforasi dihitung menggunakan luas selimut tabung. Perhitungan luas area perforasi ditunjukkan pada Persamaan (1). Berdasarkan Persamaan (1), luas area perforasi dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A &= 3,14 \times 120 \times 400 \\ A &= 150.796 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa permukaan luar media ceramic yang menjadi area perforasi memiliki luas sebesar 150.796 mm<sup>2</sup>. Luas ini cukup besar karena desain DPF ceramic memiliki panjang 400 mm dan diameter luar 120 mm. Semakin besar luas permukaan yang diberi perforasi, semakin banyak titik lubang yang harus dibuat oleh laser. Hal ini penting karena ceramic padat tidak memiliki bukaan awal seperti mesh, sehingga jalur aliran harus dibentuk melalui proses perforasi. Tahap berikutnya adalah menghitung area efektif per lubang berdasarkan pola *triangular*. Pola ini digunakan karena mampu menghasilkan susunan lubang yang rapat dan merata pada permukaan media ceramic. Pada media berlubang, parameter geometri seperti ukuran lubang, pitch, porositas, dan ketebalan berpengaruh terhadap karakteristik aliran serta kehilangan tekanan. Hal ini didukung oleh Li et al. [26] yang mengembangkan model kehilangan tekanan pada pelat berlubang berbentuk lingkaran untuk aliran laminar dan turbulen, serta Tanner et al. [27] yang membahas karakteristik hubungan antara aliran dan *pressure drop* pada pelat berlubang.

Area efektif per lubang pada pola *triangular* dihitung menggunakan Persamaan (2). Nilai 0,866 berasal dari pendekatan geometri pola segitiga, yaitu  $\frac{\sqrt{3}}{2}$ . Dengan pitch sebesar 1,00 mm, area efektif per lubang diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_h &= 0,866 \times 1,00^2 \\ A_h &= 0,866 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Setelah luas area perforasi dan area efektif per lubang diperoleh, jumlah lubang perforasi dihitung dengan membagi luas area perforasi terhadap area efektif per lubang. Perhitungan jumlah lubang ditunjukkan pada Persamaan (3). Jumlah lubang perforasi dihitung sebagai berikut:

$$N = \frac{150.796}{0,866} \quad (8)$$

$$N = 174.130 \text{ lubang}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa satu unit DPF ceramic membutuhkan sekitar 174.130 lubang perforasi. Jumlah ini menunjukkan bahwa proses perforasi merupakan tahap penting dalam pembuatan DPF ceramic. Jumlah lubang yang besar terjadi karena media ceramic memiliki luas permukaan yang cukup besar, sedangkan pitch yang digunakan masih rapat, yaitu 1,00 mm. Pada saat yang sama, penggunaan diameter lubang  $\varnothing 0,50$  mm memberikan bukaan yang lebih besar dibandingkan  $\varnothing 0,20$  mm, sehingga rancangan ini lebih memungkinkan dari sisi aliran gas buang.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Jumlah Lubang Perforasi

Komponen perhitungan	Nilai
Diameter luar media ceramic	120 mm
Panjang media ceramic	400 mm
Diameter lubang perforasi	$\varnothing 0,50$ mm
Pitch lubang	1,00 mm
Pola lubang	Triangular / staggered
Luas area perforasi	150.796 mm <sup>2</sup>
Area efektif per lubang	0,866 mm <sup>2</sup>
Jumlah lubang perforasi	174.130 lubang

Berdasarkan Tabel 2, jumlah lubang perforasi pada media ceramic masih tergolong besar meskipun diameter lubang telah diperbesar menjadi  $\varnothing 0,50$  mm. Hal ini menunjukkan bahwa luas area dan pitch menjadi faktor utama yang menentukan jumlah lubang. Dari sisi material, ceramic padat membutuhkan proses pembentukan lubang karena pada kondisi awal belum memiliki jalur aliran. Kondisi ini berbeda dengan mesh yang sudah memiliki bukaan dari struktur materialnya. Oleh karena itu, pada DPF ceramic, proses perforasi menjadi tahap yang menentukan terbentuknya jalur filtrasi dan berpengaruh langsung terhadap waktu proses laser.

Jumlah lubang sebesar 174.130 juga menunjukkan hubungan antara desain geometri dan proses manufaktur. Pada DPF ceramic, lubang perforasi tidak hanya berfungsi sebagai bukaan aliran, tetapi juga sebagai area kontak antara gas buang dan permukaan ceramic. Yamamoto et al. [28] menjelaskan bahwa struktur pori pada DPF memengaruhi deposisi partikel jelaga diesel dan peningkatan *backpressure* ketika partikel semakin terakumulasi di dalam filter. Swanson et al. [29] juga menunjukkan bahwa pengujian DPF berbahan cordierite dan silicon carbide mempertimbangkan keterkaitan antara efisiensi filtrasi dan *pressure drop*. Oleh karena itu, jumlah lubang hasil perhitungan ini menjadi dasar penting untuk membahas waktu proses laser pada subbab berikutnya.

### 3.2 Hasil Perhitungan Waktu Produksi

Perhitungan waktu produksi dilakukan untuk mengetahui durasi yang diperlukan dalam membuat satu unit DPF ceramic. Waktu produksi terdiri dari waktu proses laser dan waktu proses pendukung lainnya, seperti persiapan bahan, penyesuaian dimensi, pembersihan, inspeksi, perakitan *inner core*, dan pemeriksaan akhir. Berdasarkan hasil perhitungan, jumlah lubang perforasi yang harus dibuat pada media ceramic adalah 174.130 lubang. Jumlah tersebut digunakan sebagai dasar dalam menghitung waktu proses laser karena proses perforasi dilakukan secara berurutan menggunakan satu titik laser aktif. Waktu proses laser dihitung berdasarkan jumlah lubang perforasi dan waktu pembentukan satu lubang. Pada penelitian ini, waktu pembentukan satu lubang diasumsikan sebesar 0,5 detik/lubang. Asumsi ini digunakan sebagai dasar estimasi awal untuk menunjukkan pengaruh jumlah lubang terhadap waktu produksi. Dalam proses laser machining pada ceramic, parameter proses dan sifat ceramic yang keras serta getas dapat memengaruhi laju pemesinan, kualitas lubang, dan waktu pengerjaan.

Samant dan Dahotre [30] menjelaskan bahwa ceramic memiliki ketahanan panas, kekerasan tinggi, dan kestabilan kimia, tetapi karakter tersebut membuat ceramic sulit diproses dengan metode konvensional, sehingga laser machining menjadi pendekatan yang relevan untuk pemrosesan ceramic. Waktu proses laser dihitung menggunakan Persamaan (4). Berdasarkan Persamaan (4), waktu proses laser dihitung sebagai berikut:

$$T_1 = 174.130 \times 0,5$$

$$T_1 = 87.065 \text{ detik}$$

$$T_1 = \frac{87.065}{3.600} \quad (9)$$

$$T_1 = 24,18 \text{ jam}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa waktu proses laser untuk satu unit DPF ceramic adalah 24,18 jam. Nilai ini menunjukkan bahwa perforasi laser menjadi tahap yang sangat dominan dalam proses pembuatan. Kondisi tersebut terjadi karena media ceramic padat harus dilubangi satu per satu agar memiliki jalur filtrasi. Laser drilling pada ceramic memang digunakan untuk menghasilkan lubang mikro, tetapi prosesnya dipengaruhi oleh parameter laser, mekanisme pelepasan material, dan kualitas lubang yang ingin dicapai. Kumar et al. [31] menjelaskan bahwa laser drilling pada structural ceramics melibatkan berbagai parameter dan kualitas hasil lubang, termasuk pengaruh jenis laser serta metode pemrosesan. Total waktu produksi dihitung dengan menjumlahkan seluruh tahapan proses pembuatan. Tahapan tersebut meliputi persiapan bahan ceramic padat, penyesuaian dimensi ceramic, setup laser dan *positioning*, perforasi laser, pembersihan dan inspeksi lubang, perakitan *inner core* stainless steel, serta pemeriksaan akhir. Total waktu produksi dihitung menggunakan Persamaan (5). Estimasi waktu setiap tahapan proses ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Estimasi Waktu Produksi DPF Ceramic

Tahapan proses	Waktu
Persiapan bahan ceramic padat	0,5 jam
Penyesuaian dimensi ceramic	1,5 jam
Setup laser dan positioning	1,0 jam
Perforasi laser	24,18 jam
Pembersihan dan inspeksi lubang	2,0 jam
Perakitan inner core stainless steel	1,0 jam
Pemeriksaan akhir	1,0 jam
<b>Total waktu produksi</b>	<b>31,18 jam</b>

Berdasarkan Tabel 3, total waktu produksi untuk membuat satu unit DPF ceramic adalah 31,18 jam. Tahapan yang paling dominan adalah proses perforasi laser dengan waktu 24,18 jam, sedangkan tahapan lain memiliki waktu yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa waktu produksi lebih banyak dipengaruhi oleh proses pembentukan lubang dibandingkan proses persiapan, perakitan, dan pemeriksaan akhir. Laser-based manufacturing pada ceramic memang menawarkan keunggulan berupa presisi tinggi, proses non-kontak, dan kemampuan membentuk geometri kompleks, tetapi optimasi parameter proses tetap diperlukan untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pemrosesan. Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa meskipun diameter lubang telah diperbesar menjadi  $\varnothing 0,50$  mm, waktu proses laser masih besar karena jumlah lubang tetap mencapai ratusan ribu. Kondisi ini berkaitan langsung dengan sifat bahan dan proses. Ceramic padat memiliki keunggulan dari sisi ketahanan panas dan kestabilan struktur, tetapi sifat padat tersebut menambah kebutuhan manufaktur karena jalur filtrasi belum tersedia dari struktur awal material. Oleh karena itu, waktu produksi DPF ceramic sangat dipengaruhi oleh kemampuan proses laser dalam membentuk lubang pada media ceramic. Proses laser menjadi faktor utama yang menentukan total waktu produksi dan akan berpengaruh langsung terhadap kapasitas produksi pada subbab berikutnya.

### 3.3 Hasil Kapasitas Produksi

Kapasitas produksi dihitung untuk mengetahui jumlah DPF ceramic yang dapat dibuat dalam satuan waktu berdasarkan total waktu produksi per unit. Pada penelitian ini, total waktu produksi yang digunakan berasal dari hasil perhitungan sebelumnya, yaitu sebesar 31,18 jam/unit. Nilai tersebut mencakup seluruh tahapan proses pembuatan, mulai dari persiapan bahan ceramic padat, penyesuaian dimensi, perforasi laser, pembersihan dan inspeksi, perakitan *inner core*, hingga pemeriksaan akhir. Dalam kajian manufaktur, pengurangan *cycle time* berhubungan dengan peningkatan efisiensi proses, pengurangan waktu produksi, dan peningkatan kinerja operasional [32].

Kapasitas produksi dihitung dengan membandingkan satu unit produk terhadap total waktu produksi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu unit DPF ceramic. Persamaan kapasitas produksi ditunjukkan pada Persamaan (6). Berdasarkan Persamaan (10), kapasitas produksi DPF ceramic dihitung sebagai berikut.

$$K = \frac{1}{31,18} \quad (10)$$

$$K = 0,032 \text{ unit/jam}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas produksi DPF ceramic adalah 0,032 unit/jam. Nilai ini berarti bahwa dalam satu jam proses produksi, jumlah produk yang dapat dihasilkan masih kurang dari satu unit. Jika dibalik, satu unit DPF ceramic membutuhkan waktu sekitar 31,18 jam untuk diselesaikan. Kapasitas produksi tersebut menunjukkan bahwa proses pembuatan DPF ceramic membutuhkan waktu cukup panjang, terutama karena adanya proses perforasi laser pada media ceramic padat. Pada proses laser drilling, produktivitas dipengaruhi oleh metode pemrosesan, kualitas lubang, konsumsi energi, dan laju pembentukan material yang terbuang [33].

Tabel 4 Hasil Kapasitas Produksi DPF Ceramic

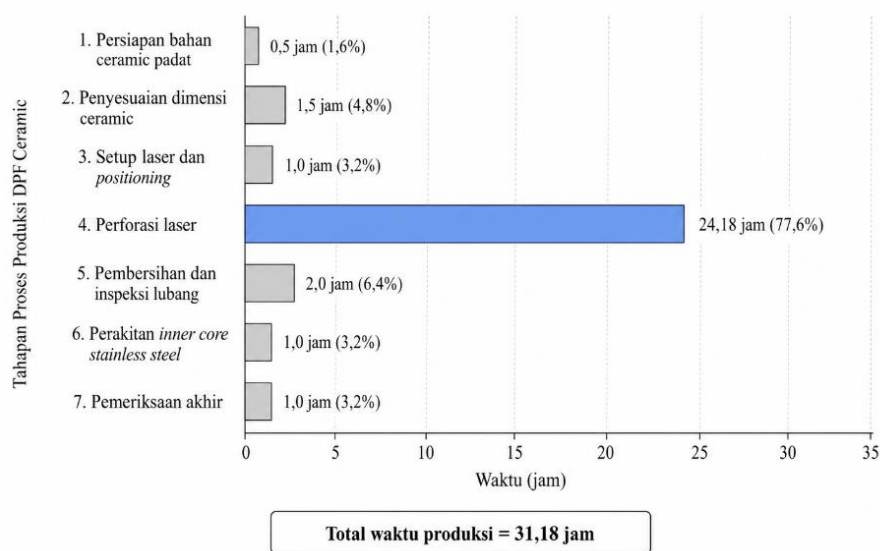
Parameter	Nilai
Total waktu produksi	31,18 jam/unit
Kapasitas produksi	0,032 unit/jam

Berdasarkan Tabel 4, kapasitas produksi DPF ceramic masih tergolong rendah karena proses pembuatan satu unit membutuhkan waktu lebih dari satu hari produksi penuh, atau sekitar empat hari kerja apabila menggunakan durasi kerja 8 jam per hari. Kondisi ini menunjukkan bahwa tahapan perforasi laser menjadi faktor utama yang membatasi kapasitas produksi. Walaupun tahapan persiapan bahan, penyesuaian dimensi, pembersihan, perakitan, dan pemeriksaan akhir tetap berkontribusi terhadap total waktu, pengaruhnya lebih kecil dibandingkan proses perforasi laser. Dengan demikian, peningkatan kapasitas produksi perlu diarahkan pada pengurangan waktu proses laser, optimasi jumlah lubang, atau penggunaan sistem laser dengan kemampuan pemrosesan lebih cepat. Kapasitas produksi dapat meningkat apabila waktu pembentukan satu lubang dapat dikurangi, jumlah lubang dapat dioptimalkan, atau proses perforasi dilakukan dengan sistem multi-titik. Namun, pengurangan jumlah lubang atau perubahan pitch tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan pertimbangan waktu produksi. Perubahan tersebut tetap harus mempertimbangkan fungsi filtrasi, luas bukaan, aliran gas buang, dan kemampuan media ceramic dalam menangkap partikel jelaga diesel. Dalam manajemen kapasitas manufaktur, pengaturan kapasitas berkaitan dengan kemampuan sistem produksi dalam memenuhi kebutuhan proses melalui penyesuaian sumber daya, strategi produksi, dan kemampuan proses [34].

Dari sisi kelayakan proses, kapasitas produksi sebesar 0,032 unit/jam menunjukkan bahwa rancangan DPF ceramic masih memerlukan optimasi apabila diarahkan untuk produksi dalam jumlah besar. Namun, kapasitas tersebut masih dapat diterima untuk tahap awal pengembangan produk, pembuatan prototipe, atau penelitian skala laboratorium. Pada tahap ini, tujuan utama bukan menghasilkan jumlah produk yang besar, melainkan membuktikan bahwa media ceramic padat dapat dibuat menjadi DPF melalui proses perforasi laser dan perakitan *inner core* stainless steel. Oleh karena itu, hasil kapasitas produksi ini menjadi dasar untuk mengevaluasi proses manufaktur dan menentukan bagian proses yang perlu ditingkatkan pada pengembangan berikutnya.

### 3.4 Pembahasan Pengaruh Proses Laser terhadap Kapasitas Produksi

Diagram Kontribusi Waktu Setiap Proses Produksi



Perforasi laser merupakan tahapan yang paling dominan terhadap total waktu produksi.

Gambar 5 Diagram kontribusi waktu setiap proses produksi

Berdasarkan hasil perhitungan waktu produksi, proses perforasi laser memberikan kontribusi terbesar terhadap total waktu pembuatan DPF ceramic. Total waktu produksi satu unit DPF ceramic adalah 31,18 jam, dengan waktu perforasi laser sebesar 24,18 jam. Artinya, sebagian besar waktu produksi digunakan untuk membentuk lubang pada media ceramic. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses laser menjadi *bottleneck* dalam alur produksi. Dalam sistem manufaktur, *bottleneck* merupakan tahapan yang membatasi produktivitas keseluruhan karena waktu prosesnya lebih dominan dibandingkan tahapan lain [35]. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas produksi DPF ceramic perlu diarahkan pada pengurangan waktu proses laser atau peningkatan kemampuan pemrosesan pada tahap perforasi.

Gambar 5 menyajikan diagram batang kontribusi waktu setiap tahapan proses pembuatan DPF ceramic. Diagram tersebut menunjukkan bahwa perforasi laser merupakan tahapan paling dominan, yaitu 24,18 jam atau 77,6% dari total waktu produksi 31,18 jam. Dengan demikian, visualisasi pada Gambar 5 memperkuat bahwa kapasitas produksi rendah bukan disebabkan oleh seluruh tahapan proses, melainkan oleh dominasi waktu pembentukan lubang pada media ceramic. Pengaruh besar proses laser terhadap kapasitas produksi terjadi karena media ceramic yang digunakan masih berbentuk padat. Ceramic padat tidak memiliki jalur aliran seperti material mesh, sehingga jalur filtrasi harus dibentuk melalui proses perforasi. Pada desain ini, jumlah lubang yang harus dibuat mencapai 174.130 lubang. Karena proses dilakukan menggunakan satu titik laser aktif, setiap lubang memerlukan waktu pembentukan tersendiri sebelum laser berpindah ke posisi berikutnya. Akibatnya, waktu laser berbanding lurus dengan jumlah lubang. Semakin banyak lubang yang dibentuk, semakin besar waktu produksi yang dibutuhkan. Hal ini berbeda dengan desain berbasis mesh, karena bukaan aliran pada mesh sudah terbentuk dari struktur awal material.

Dari sisi material, ceramic memiliki keunggulan berupa ketahanan panas, kekakuan struktur, dan kestabilan bentuk pada lingkungan gas buang diesel. Namun, ceramic juga memiliki sifat keras dan getas, sehingga proses pembentukan lubang harus dilakukan secara terkendali. Proses laser pada ceramic melibatkan pemanasan lokal, pelelehan atau penguapan material, serta kemungkinan timbulnya tegangan termal pada area sekitar lubang. Modest [36] menunjukkan bahwa proses laser pada ceramic dapat menghasilkan distribusi temperatur dan tegangan termal lokal selama pembentukan lubang. Temuan tersebut memperkuat bahwa proses perforasi ceramic tidak hanya ditentukan oleh jumlah lubang, tetapi juga oleh respons termal material terhadap energi laser. Ketebalan ceramic sebesar 20 mm dipertahankan untuk menjaga kekuatan struktur media filter. Ketebalan ini diperlukan karena DPF ceramic harus menahan tekanan gas buang, getaran, dan perubahan temperatur selama operasi. Namun, ketebalan tersebut juga membuat proses pembentukan lubang menjadi lebih menantang karena lintasan lubang yang harus ditembus laser menjadi lebih panjang. Pada lubang berdiameter  $\varnothing 0,50$  mm, rasio ketebalan terhadap diameter lubang adalah 20 mm : 0,50 mm, atau 40:1. Rasio ini menunjukkan bahwa lubang memiliki lintasan yang panjang dibandingkan diameternya, sehingga dapat memengaruhi waktu proses, kualitas lubang, dan potensi hambatan aliran.

Pemilihan diameter lubang  $\varnothing 0,50$  mm merupakan kompromi antara kebutuhan aliran gas, potensi penangkapan partikel jelaga diesel, dan kelayakan proses manufaktur. Diameter ini lebih realistis dibandingkan rancangan awal  $\varnothing 0,20$  mm karena bukaan aliran menjadi lebih besar dan jumlah lubang dapat dikurangi. Jika diameter lubang tetap  $\varnothing 0,20$  mm dengan pitch lebih kecil, jumlah lubang dan waktu proses laser akan meningkat secara signifikan. Sebaliknya, diameter lubang yang terlalu besar dapat menurunkan peluang kontak awal antara partikel jelaga diesel dan permukaan ceramic. Oleh karena itu,  $\varnothing 0,50$  mm digunakan sebagai ukuran kompromi untuk menjaga jalur aliran tetap memungkinkan, tetapi media tetap memiliki area kontak yang cukup banyak. Pitch sebesar 1,00 mm juga dipilih sebagai kompromi antara kerapatan lubang dan waktu produksi. Pitch ini masih menghasilkan susunan lubang yang rapat, tetapi jumlah lubang jauh lebih rendah dibandingkan apabila digunakan pitch 0,40 mm. Dengan pitch 1,00 mm, jumlah lubang hasil perhitungan adalah 174.130 lubang, sedangkan pitch yang lebih kecil akan meningkatkan jumlah titik perforasi dan memperpanjang waktu laser. Pada media berlubang, perubahan ukuran lubang dan jarak antar lubang berpengaruh terhadap porositas, distribusi aliran, dan kehilangan tekanan. Oleh karena itu, pengurangan jumlah lubang atau pembesaran pitch tidak dapat dilakukan hanya untuk mempercepat produksi, tetapi harus tetap mempertimbangkan fungsi filtrasi.

Jika dibandingkan dengan penelitian DPF sebelumnya, sebagian besar kajian lebih menekankan hubungan antara struktur pori, deposisi partikel jelaga diesel, efisiensi filtrasi, *pressure drop*, dan regenerasi. Yamamoto dan Yagasaki [38] mensimulasikan aliran bermuatan partikel dan pembentukan lapisan jelaga pada filter berpori, kemudian menunjukkan bahwa akumulasi jelaga dapat meningkatkan *pressure drop* pada DPF. Zhang et al. [39] juga menunjukkan bahwa kondisi DPF yang telah terisi jelaga memengaruhi *backpressure*, distribusi ukuran partikel, dan karakteristik regenerasi. Kedua penelitian tersebut memperkuat pentingnya struktur jalur aliran dan deposisi partikel jelaga diesel terhadap performa DPF. Namun, penelitian ini memiliki fokus yang berbeda dari penelitian sebelumnya. Jika penelitian sebelumnya lebih banyak membahas performa filtrasi, deposisi jelaga, *pressure drop*, dan regenerasi, penelitian ini menekankan hubungan antara desain DPF ceramic, proses perforasi laser, waktu produksi, dan kapasitas produksi. Dengan kata lain, penelitian sebelumnya menjelaskan bagaimana DPF bekerja selama operasi, sedangkan penelitian ini menjelaskan bagaimana media ceramic padat dapat dibuat menjadi DPF melalui proses manufaktur yang terukur. Perbedaan fokus ini penting karena desain DPF tidak hanya harus berfungsi secara teknis, tetapi juga harus dapat diproduksi dengan alur proses yang jelas.

Berdasarkan pembahasan tersebut, kapasitas produksi sebesar 0,032 unit/jam terutama dipengaruhi oleh proses perforasi laser. Nilai ini bukan menunjukkan bahwa seluruh tahapan proses pembuatan berjalan lambat, melainkan bahwa proses pembentukan lubang menjadi tahap paling dominan dalam alur produksi. Peningkatan kapasitas produksi dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan, seperti mengurangi waktu pembentukan satu lubang, mengoptimalkan pitch dan diameter lubang, memperbaiki strategi lintasan laser, atau menggunakan sistem laser dengan beberapa titik pemrosesan. Namun, optimasi tersebut harus tetap mempertimbangkan sifat ceramic, kekuatan struktur, kelancaran aliran gas buang,

dan kemampuan media dalam menangkap partikel jelaga diesel. Dengan demikian, proses laser memiliki pengaruh langsung terhadap kapasitas produksi DPF ceramic karena menjadi tahap yang paling banyak menyerap waktu. Pemilihan diameter lubang  $\varnothing 0,50$  mm, pitch 1,00 mm, dan ketebalan ceramic 20 mm merupakan rancangan kompromi antara kebutuhan filtrasi, kekuatan struktur, dan kelayakan manufaktur. Dibandingkan penelitian sebelumnya yang menekankan performa DPF saat digunakan, pembahasan ini memberikan kontribusi pada sisi proses pembuatan, terutama dalam menjelaskan konsekuensi waktu produksi akibat penggunaan media ceramic padat yang harus diperforasi secara bertahap.

### 3.5 Perbandingan dengan Desain Sebelumnya

Perbandingan dengan desain sebelumnya dilakukan untuk mengetahui perubahan kapasitas produksi akibat perubahan material, dimensi, dan metode pembentukan jalur filtrasi. Desain sebelumnya menggunakan media berbasis mesh dengan kapasitas produksi sebesar 0,125 unit/jam, sedangkan desain DPF ceramic pada penelitian ini memiliki kapasitas produksi sebesar 0,032 unit/jam. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa desain DPF ceramic membutuhkan waktu produksi lebih lama dibandingkan desain berbasis mesh. Perbandingan kedua desain ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Perbandingan Kapasitas Produksi Desain Sebelumnya dan DPF Ceramic

Parameter	Desain sebelumnya	DPF ceramic baru
Media utama	Mesh	Ceramic padat
Dimensi utama	130 mm $\times$ $\varnothing 60$ mm	400 mm $\times$ $\varnothing 120$ mm
Jalur filtrasi	Sudah tersedia dari struktur mesh	Dibentuk melalui perforasi laser
Diameter lubang	Mengikuti ukuran mesh	$\varnothing 0,50$ mm
Pitch lubang	Mengikuti susunan mesh	1,00 mm
Kapasitas produksi	0,125 unit/jam	0,032 unit/jam

Berdasarkan Tabel 5, kapasitas produksi DPF ceramic lebih rendah dibandingkan desain sebelumnya. Penurunan kapasitas ini terjadi karena jalur filtrasi pada kedua desain terbentuk melalui mekanisme yang berbeda. Pada desain berbasis mesh, bukaan filter sudah tersedia dari struktur material awal, sehingga proses produksi lebih banyak berupa pemotongan, pembentukan, dan perakitan. Kondisi tersebut sejalan dengan penelitian mengenai *stacked wire mesh monoliths* yang menunjukkan bahwa struktur wire mesh dapat membentuk jalur aliran dan struktur berliku untuk filtrasi, serta memiliki permeabilitas yang cukup baik untuk menghindari *pressure drop* berlebih apabila digunakan sebagai kandidat filter partikulat diesel [40]. Pada desain DPF ceramic, media filter berasal dari ceramic padat sehingga jalur filtrasi belum tersedia pada kondisi awal material. Jalur aliran harus dibentuk melalui perforasi laser satu per satu pada permukaan media ceramic. Akibatnya, waktu produksi meningkat karena setiap lubang membutuhkan waktu pembentukan tersendiri. Selain itu, dimensi DPF ceramic lebih besar dibandingkan desain sebelumnya. Desain lama memiliki panjang 130 mm dan diameter 60 mm, sedangkan desain baru memiliki panjang 400 mm dan diameter 120 mm. Peningkatan dimensi tersebut memperbesar luas area yang harus diproses, sehingga jumlah lubang dan waktu perforasi laser ikut meningkat.

Perbedaan material juga menjadi penyebab utama perubahan kapasitas produksi. Media mesh memiliki keunggulan dari sisi kemudahan proses karena bukaan sudah terbentuk dari susunan kawat. Penelitian Nakamura et al. [41] menunjukkan bahwa mesh stainless steel dapat digunakan sebagai substrat filter untuk komponen pengurang partikulat karbon, khususnya ketika dikombinasikan dengan lapisan katalis. Hal ini memperkuat bahwa mesh memiliki potensi sebagai media filter yang relatif mudah dibentuk dan dimodifikasi. Namun, desain berbasis mesh juga memiliki keterbatasan karena ketahanan termal, kekakuan struktur, dan stabilitas bentuknya bergantung pada jenis logam, ukuran mesh, serta kondisi operasi gas buang. Sebaliknya, DPF ceramic memiliki keunggulan dari sisi ketahanan temperatur, kestabilan bentuk, dan potensi penggunaan pada lingkungan gas buang diesel yang bersuhu tinggi. Ceramic banyak digunakan sebagai material DPF karena mampu mempertahankan struktur pada kondisi termal yang lebih berat dibandingkan material berbasis mesh. Penelitian mengenai cordierite DPF menunjukkan bahwa karakteristik struktur pori dan sifat termal material berpengaruh terhadap performa serta ketahanan filter selama kondisi operasi dan regenerasi [10]. Dengan demikian, meskipun proses pembuatan DPF ceramic lebih lama, material ceramic memiliki keunggulan teknis yang relevan untuk aplikasi filter gas buang diesel.

Jika dibandingkan dengan penelitian DPF ceramic konvensional, sebagian besar proses pembuatan ceramic DPF dilakukan melalui pembentukan material berpori atau honeycomb sejak tahap awal, misalnya melalui proses ekstrusi, penggunaan *binder*, dan *pore former*. Huang et al. [42] menunjukkan bahwa DPF cordierite dapat dibuat menggunakan serbuk cordierite, bahan pengikat, dan *pore former* melalui teknik ekstrusi, dengan parameter proses yang memengaruhi performa akhir filter. Berbeda dengan pendekatan tersebut, penelitian ini menggunakan ceramic padat sebagai bahan awal, kemudian membentuk jalur filtrasi melalui perforasi laser. Perbedaan pendekatan ini membuat penelitian ini lebih menekankan hubungan antara desain geometri, proses perforasi, waktu produksi, dan kapasitas produksi. Dari sisi kapasitas produksi, desain DPF ceramic baru memang lebih rendah dibandingkan desain mesh sebelumnya. Kapasitas turun dari 0,125 unit/jam menjadi 0,032 unit/jam. Penurunan tersebut tidak menunjukkan bahwa desain ceramic tidak layak, tetapi menunjukkan bahwa proses manufakturnya lebih kompleks. Pada desain mesh, jalur filtrasi sudah tersedia

dari material awal. Pada desain ceramic, jalur filtrasi harus dibuat melalui proses laser, sehingga waktu produksi sangat dipengaruhi oleh jumlah lubang, diameter lubang, pitch, dan waktu pembentukan satu lubang. Oleh karena itu, kapasitas produksi DPF ceramic lebih rendah terutama karena adanya tahap perforasi laser sebagai proses tambahan.

Meskipun kapasitas produksi lebih rendah, desain DPF ceramic memiliki keunggulan dari sisi keterukuran geometri. Diameter lubang  $\varnothing 0,50$  mm dan pitch 1,00 mm dapat ditetapkan secara terukur sehingga pola perforasi lebih mudah dikendalikan. Pada desain mesh, ukuran bukaan mengikuti spesifikasi mesh yang tersedia, sedangkan pada desain ceramic berperforasi laser, diameter lubang dan jarak antar lubang dapat disesuaikan dengan kebutuhan rancangan. Keunggulan ini penting karena parameter lubang berhubungan dengan luas bukaan, distribusi aliran, potensi penangkapan partikel jelaga diesel, dan estimasi waktu produksi. Dengan demikian, perbandingan ini menunjukkan bahwa desain DPF ceramic memiliki konsekuensi manufaktur yang lebih besar, tetapi menawarkan potensi teknis dari sisi ketahanan material dan keterukuran pola perforasi. Desain sebelumnya lebih unggul dari sisi kapasitas produksi karena menggunakan mesh yang sudah memiliki bukaan, sedangkan desain ceramic lebih unggul dari sisi stabilitas termal dan pengendalian geometri lubang. Makna perbandingan ini terhadap tujuan penelitian adalah bahwa pembuatan DPF ceramic dari bahan padat dapat dilakukan secara terstruktur, tetapi proses produksinya perlu dioptimalkan agar kapasitas produksi dapat ditingkatkan. Optimasi dapat diarahkan pada pengurangan waktu laser, penggunaan sistem laser multi-titik, pengaturan ulang pitch, atau penyesuaian area perforasi tanpa mengabaikan fungsi filtrasi.

#### 4.0 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, DPF ceramic berbentuk silindris dengan media ceramic padat dan *inner core* stainless steel dapat dirancang dan dianalisis proses pembuatannya secara sistematis. Media ceramic padat memerlukan proses perforasi laser untuk membentuk jalur filtrasi karena pada kondisi awal belum memiliki bukaan seperti material mesh. Dengan dimensi panjang 400 mm, diameter luar 120 mm, ketebalan ceramic 20 mm, diameter lubang  $\varnothing 0,50$  mm, dan pitch 1,00 mm, diperoleh luas area perforasi sebesar 150.796 mm<sup>2</sup> dan jumlah lubang sebanyak 174.130 lubang. Berdasarkan asumsi waktu pembentukan satu lubang sebesar 0,5 detik, waktu proses perforasi laser mencapai 24,18 jam, sedangkan total waktu produksi satu unit DPF ceramic adalah 31,18 jam. Kapasitas produksi yang diperoleh sebesar 0,032 unit/jam, lebih rendah dibandingkan desain sebelumnya berbasis mesh sebesar 0,125 unit/jam. Penurunan kapasitas tersebut terutama disebabkan oleh proses pembentukan lubang pada ceramic padat yang dilakukan secara bertahap menggunakan laser. Meskipun demikian, DPF ceramic memiliki keunggulan dari sisi ketahanan temperatur, kestabilan struktur, dan keterukuran pola perforasi, sehingga tetap berpotensi dikembangkan sebagai filter partikel jelaga diesel dengan optimasi lebih lanjut pada proses manufakturnya.

#### 5.0 DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Bao *et al.*, "Overview of technological development challenges of diesel particulate filters adapting to future emission regulations," *Chem. Eng. J.*, vol. 506, p. 159982, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.159982.
- [2] X. Zhao *et al.*, "A review on heat enhancement in thermal energy conversion and management using Field Synergy Principle," *Appl. Energy*, vol. 257, p. 113995, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113995.
- [3] X. Wang, Y. Deng, and Y. Liu, "Two-dimensional numerical studies of particle motion and deposition in the channel of diesel particulate filters," *R. Soc. Open Sci.*, vol. 8, no. 10, Oct. 2021, doi: 10.1098/rsos.211162.
- [4] G. Bao, C. He, T. Zi, J. Li, and X. Liu, "Analysis of gas flow and PM movement characteristics inside diesel particulate filter channel," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 186, pp. 1134–1148, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.04.054.
- [5] S. Ahmadbeigi, M. A. Ehteram, and A. Naeimi, "Weibull Analysis of DPF Failure Events and Reliability of Diesel Particulate Filters Utilizing After-Sales Maintenance Data," *Emiss. Control Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 175–186, Dec. 2024, doi: 10.1007/s40825-024-00246-3.
- [6] Z. Wang *et al.*, "Experimental Study on Gas Flow Uniformity in a Diesel Particulate Filter Carrier," *Fluid Dyn. Mater. Process.*, vol. 20, no. 1, pp. 193–204, 2024, doi: 10.32604/fdmp.2023.030561.
- [7] Y. Luo *et al.*, "Study on the Evolution of Physicochemical Properties of Carbon Black at Different Regeneration Stages of Diesel Particulate Filters Regenerated by Non-Thermal Plasma," *Processes*, vol. 12, no. 6, p. 1113, May 2024, doi: 10.3390/pr12061113.
- [8] M. Nian, R. Dong, W. Zhong, Y. Zhang, and D. Lou, "Multi-Objective Optimization Study on Capture Performance of Diesel Particulate Filter Based on the GRA-MLR-WOA Hybrid Method," *Sustainability*, vol. 17, no. 19, p. 8777, Sep. 2025, doi: 10.3390/su17198777.
- [9] Z. Meng, J. Zhang, Z. Bao, W. Wang, H. Deng, and Y. Hu, "Numerical simulation of diesel particulate filter performance optimization through pore structure analysis," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 177, pp. 1072–1084, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.07.041.
- [10] K. Lee, S. Kim, and K. C. Oh, "The Effect of Pore Structure on Thermal Characteristics of a Cordierite Diesel Particulate Filter for Heavy Duty Diesel Vehicle," *Int. J. Automot. Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 243–251, Feb. 2021, doi: 10.1007/s12239-021-0024-4.
- [11] L. Wu, J. Hong, Q. Zhang, B.-Y. Chen, J. Wang, and Z. Dong, "Deciphering highly resistant characteristics to different pHs of oxygen vacancy-rich Fe<sub>2</sub>Co<sub>1</sub>-LDH/PS system for bisphenol A degradation," *Chem. Eng. J.*, vol. 385, p. 123620, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.123620.

- [12] Y. Xi *et al.*, “Biomimetic bioactive multifunctional poly(citrate-siloxane)-based nanofibrous scaffolds enable efficient multidrug-resistant bacterial treatment/non-invasive tracking in vitro/in vivo,” *Chem. Eng. J.*, vol. 383, p. 123078, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2019.123078.
- [13] A. Yoshimura, K. Mori, V. Dan, T. Kanazawa, M. Yoshimoto, and Y. Matsuno, “Evaluation of the effect of remanufacturing diesel particulate filters to minimize environmental impacts,” *Atmos. Environ. X*, vol. 22, p. 100269, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.aeaoa.2024.100269.
- [14] Z. Zhang, R. Dong, G. Lan, T. Yuan, and D. Tan, “Diesel particulate filter regeneration mechanism of modern automobile engines and methods of reducing PM emissions: a review,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 14, pp. 39338–39376, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-25579-4.
- [15] Y. Zhang, Y. Zhang, L. Fang, D. Lou, P. Tan, and Z. Hu, “A unified pore-scale multiphysics model for the integrated soot transport-deposition-oxidation in catalytic diesel particulate filters,” *Phys. Fluids*, vol. 38, no. 3, Mar. 2026, doi: 10.1063/5.0321009.
- [16] X. Jia, Y. Chen, L. Liu, C. Wang, and J. Duan, “Advances in Laser Drilling of Structural Ceramics,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 2, p. 230, Jan. 2022, doi: 10.3390/nano12020230.
- [17] G. Gavrilov, A. Kurkin, E. Rusin, and E. Bazhenov, “Laser Drilling in Alumina Ceramics Using a Combination of Laser Pulses in the Free-Running and Q-Switched Modes,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 9, p. 3457, Apr. 2023, doi: 10.3390/ma16093457.
- [18] Q. Ma *et al.*, “An Investigation into Picosecond Laser Micro-Trepanning of Alumina Ceramics Employing a Semi-Water-Immersed Scheme,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 11, p. 1812, Jun. 2019, doi: 10.3390/ma12111812.
- [19] C. Liang, Z. Li, C. Wang, K. Li, Y. Xiang, and X. Jia, “Laser drilling of alumina ceramic substrates: A review,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 167, p. 109828, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.optlastec.2023.109828.
- [20] N. Celik, Y. Bayazit, E. Turgut, and E. Sparrow, “Design analysis of fluid-flow through perforated plates,” *Therm. Sci.*, vol. 22, no. 6 Part B, pp. 3091–3098, 2018, doi: 10.2298/TSCI160106019C.
- [21] K. Śmierciew, D. Butrymowicz, J. Karwacki, and J. Gagan, “Numerical Prediction of Homogeneity of Gas Flow through Perforated Plates,” *Processes*, vol. 9, no. 10, p. 1770, Oct. 2021, doi: 10.3390/pr9101770.
- [22] K.-H. Jeong, J. M. Kim, and K.-H. Ahn, “Extraction of effective elastic constants of perforated plates with triangular hole pattern using modal analysis,” *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 57, no. 10, p. 103663, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.net.2025.103663.
- [23] T. Slot and W. J. O’Donnell, “Effective Elastic Constants for Thick Perforated Plates With Square and Triangular Penetration Patterns,” *J. Eng. Ind.*, vol. 93, no. 4, pp. 935–942, Nov. 1971, doi: 10.1115/1.3428087.
- [24] J. R. Jovanovic, D. D. Milanovic, and R. D. Djukic, “Manufacturing Cycle Time Analysis and Scheduling to Optimize Its Duration,” *Strojnicki Vestn. – J. Mech. Eng.*, vol. 60, no. 7–8, pp. 514–524, Jul. 2014, doi: 10.5545/sv-jme.2013.1523.
- [25] S. Sarfraz, E. Shehab, K. Salontitis, W. Suder, M. Niamat, and M. Jamil, “An integrated analysis of productivity, hole quality and cost estimation of single-pulse laser drilling process,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 235, no. 14, pp. 2273–2287, Dec. 2021, doi: 10.1177/0954405420968161.
- [26] S. Li, L. Davidson, and S.-H. Peng, “A pressure-loss model for flow-through round-hole perforated plates of moderate porosity and thickness in laminar and turbulent flow regimes,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 226, p. 125490, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125490.
- [27] P. Tanner, J. Gorman, and E. Sparrow, “Flow–pressure drop characteristics of perforated plates,” *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, vol. 29, no. 11, pp. 4310–4333, Nov. 2019, doi: 10.1108/HFF-01-2019-0065.
- [28] K. Yamamoto and T. Sakai, “Effect of Pore Structure on Soot Deposition in Diesel Particulate Filter,” *Computation*, vol. 4, no. 4, p. 46, Dec. 2016, doi: 10.3390/computation4040046.
- [29] J. Swanson, W. Watts, D. Kittelson, R. Newman, and R. Ziebarth, “Filtration Efficiency and Pressure Drop of Miniature Diesel Particulate Filters,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 452–461, Apr. 2013, doi: 10.1080/02786826.2012.763087.
- [30] A. N. Samant and N. B. Dahotre, “Laser machining of structural ceramics—A review,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 29, no. 6, pp. 969–993, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.11.010.
- [31] H. Wang, H. Lin, C. Wang, L. Zheng, and X. Hu, “Laser drilling of structural ceramics—A review,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 4, pp. 1157–1173, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.10.031.
- [32] A. Goyal, D. C. Vaish, R. Agrawal, S. Choudhary, and R. Nayak, “Sustainable Manufacturing through Systematic Reduction in Cycle Time,” *Sustainability*, vol. 14, no. 24, p. 16473, Dec. 2022, doi: 10.3390/su142416473.
- [33] S. Sarfraz, E. Shehab, K. Salontitis, and W. Suder, “Experimental Investigation of Productivity, Specific Energy Consumption, and Hole Quality in Single-Pulse, Percussion, and Trepanning Drilling of IN 718 Superalloy,” *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4610, Dec. 2019, doi: 10.3390/en12244610.
- [34] E. Sabet, B. Yazdani, R. Kian, and K. Galanakis, “A strategic and global manufacturing capacity management optimisation model: A Scenario-based multi-stage stochastic programming approach,” *Omega*, vol. 93, p. 102026, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.omega.2019.01.004.
- [35] E. Mahmoodi, M. Fathi, and M. Ghobakhloo, “The impact of Industry 4.0 on bottleneck analysis in production and manufacturing: Current trends and future perspectives,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 174, p. 108801, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108801.
- [36] M. F. Modest, “Transient Elastic and Viscoelastic Thermal Stresses During Laser Drilling of Ceramics,” *J. Heat Transfer*, vol. 120, no. 4, pp. 892–898, Nov. 1998, doi: 10.1115/1.2825908.
- [37] M. Wawzyniak and J. Seyed-Yagoobi, “Experimental Study of Electrohydrodynamically Augmented Condensation Heat Transfer on a Smooth and an Enhanced Tube,” *J. Heat Transfer*, vol. 118, no. 2, pp. 499–502, May 1996, doi: 10.1115/1.2825878.
- [38] K. Yamamoto and S. Yagasaki, “Numerical Simulation of Particle-Laden Flow and Soot Layer Formation in Porous Filter,” *Solids*, vol. 3, no. 2, pp. 282–294, May 2022, doi: 10.3390/solids3020020.
- [39] Y. Zhang, Y. Zhang, Y. Lin, L. Fang, and D. Lou, “Particle filter performance of soot-loaded diesel particulate filter and the

- effect of its regeneration on the particle number and size distribution,” *J. Clean. Prod.*, vol. 461, p. 142651, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142651.
- [40] M. Godoy, E. Banús, O. Sanz, M. Montes, E. Miró, and V. Milt, “Stacked Wire Mesh Monoliths for the Simultaneous Abatement of VOCs and Diesel Soot,” *Catalysts*, vol. 8, no. 1, p. 16, Jan. 2018, doi: 10.3390/catal8010016.
- [41] M. Nakamura, T. Minami, and M. Ozawa, “Fabrication and Evaluation of Particulate Matter Purification Filter Using Plasma-Sprayed Catalyst Film on SUS316 Mesh,” *Mater. Trans.*, vol. 65, no. 12, p. MT-Y2024007, Dec. 2024, doi: 10.2320/matertrans.MT-Y2024007.
- [42] X. Huang, N. Wei, F. Wang, and X. Zhang, “Multi-Objective Optimization of Extrusion Parameters for High-Performance Honeycomb Cordierite Ceramics via Orthogonal Design,” *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 24, p. 5550, Dec. 2025, doi: 10.3390/ma18245550.