

ANALISIS STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PERMUKAAN REM CAKRAM BESI COR KELABU HASIL PROSES *GREEN SAND CASTING*

Afif Hamka, Dr. Ir. Agus Yulianto, S.T., M.T.

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah
Surakarta

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik struktur mikro rem cakram berbahan besi cor kelabu hasil proses *green sand casting*, hubungan antara struktur mikro dengan kekerasan permukaan, serta membandingkan struktur mikro dan nilai kekerasan rem cakram hasil *green sand casting* dengan rem cakram original Honda Vario 125. Penelitian dilakukan melalui proses pengecoran menggunakan metode *green sand casting*, dilanjutkan dengan proses *machining*, preparasi spesimen, pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik, dan pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa rem cakram hasil *green sand casting* memiliki grafit berbentuk serpih (*flake graphite*) dengan matriks ferrite-pearlite yang merupakan karakteristik besi cor kelabu. Nilai kekerasan rata-rata rem cakram hasil *green sand casting* sebesar 90,08 HRB atau setara 183,61 HB, sedangkan rem cakram original Honda Vario 125 sebesar 38,66 HRC atau setara 358,73 HB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa struktur mikro memengaruhi nilai kekerasan material, di mana keberadaan pearlite berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan, sedangkan ferrite meningkatkan keuletan. Rem cakram original Honda Vario 125 memiliki struktur mikro yang lebih homogen dan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan rem cakram hasil *green sand casting*. Dengan demikian, proses *green sand casting* mampu menghasilkan rem cakram dengan karakteristik dasar besi cor kelabu, namun masih memerlukan optimasi proses untuk memperoleh sifat mekanik yang mendekati rem cakram original.

Kata Kunci: *green sand casting*, Besi Cor Kelabu, Rem Cakram, kekerasan, Rockwell, mikrostruktur, ferrite-pearlite.

Abstract

This study aimed to analyze the microstructural characteristics of gray cast iron brake discs produced by the green sand casting process, the relationship between microstructure and surface hardness, and to compare the microstructure and hardness of brake discs manufactured by green sand casting with the original Honda Vario 125 brake disc. The research involved brake disc casting using the green sand casting method, followed by machining, specimen preparation, microstructural observation using an optical microscope, and Rockwell hardness testing. The results showed that the brake disc produced by green sand casting consisted of flake graphite with a ferrite-pearlite matrix, which is characteristic of gray cast iron. The average hardness of the cast brake disc was 90.08 HRB (equivalent to 183.61 HB), while the original Honda Vario 125 brake disc exhibited an average hardness of 38.66 HRC (equivalent to 358.73 HB). The

findings indicate that the microstructure significantly influences hardness, where the pearlite phase contributes to higher hardness, while the ferrite phase improves ductility. The original Honda Vario 125 brake disc exhibited a more homogeneous microstructure and higher hardness than the brake disc produced by the green sand casting process. Therefore, the green sand casting process is capable of producing gray cast iron brake discs with appropriate basic characteristics, although further process optimization is required to achieve mechanical properties comparable to the original brake disc.

Keywords: green sand casting, gray cast iron, disc brake, hardness, Rockwell, microstructure, ferrite-pearlite.

1. PENDAHULUAN

Pengecoran logam merupakan salah satu teknik manufaktur yang sangat strategis dalam industri modern karena mampu menghasilkan komponen dengan geometri kompleks secara efisien. Proses ini diawali dengan melelehkan logam hingga mencapai fase cair, kemudian menuangkannya ke dalam cetakan agar membentuk produk sesuai desain yang diinginkan. Perkembangan teknologi turut mendorong penyempurnaan metode pengecoran, baik dari sisi rancangan cetakan, pengendalian parameter proses, maupun pemilihan material, sehingga kualitas produk cor semakin meningkat. Dalam industri otomotif, komponen seperti blok mesin, roda gigi, hingga sistem pengereman banyak diproduksi melalui teknik ini karena mampu memberikan presisi bentuk serta karakteristik mekanik yang sesuai kebutuhan operasional (Yulianto et al., 2020). Oleh sebab itu, mutu hasil pengecoran menjadi aspek krusial dalam menjamin kinerja dan keamanan komponen.

Salah satu teknik yang banyak diterapkan adalah *green sand casting*, yaitu metode pengecoran yang memanfaatkan campuran pasir silika, air, dan bahan pengikat dalam kondisi lembap sebagai media cetakan. Metode ini dikenal karena biaya produksinya relatif rendah, prosesnya sederhana, serta mampu menghasilkan berbagai variasi bentuk produk. Selain itu, material cetakan dapat digunakan kembali sehingga lebih ekonomis untuk produksi skala besar. Namun demikian, metode ini tidak terlepas dari keterbatasan, seperti kualitas permukaan yang cenderung kurang halus serta potensi munculnya cacat akibat distribusi pendinginan yang tidak merata (Yulianto et al., 2025). Kondisi tersebut menuntut adanya kajian lebih mendalam terkait kualitas material hasil pengecoran yang dihasilkan melalui metode ini.

Dalam praktiknya, salah satu material yang umum digunakan pada proses pengecoran, khususnya untuk komponen otomotif, adalah besi cor kelabu (*gray cast iron*). Material ini memiliki ciri khas berupa struktur mikro dengan grafit berbentuk serpihan yang tersebar dalam matriks ferrit dan perlit. Karakteristik tersebut memberikan sejumlah keunggulan, seperti kemampuan meredam getaran, konduktivitas panas yang baik, serta ketahanan terhadap keausan. Selain itu, material ini juga memiliki kemampuan cor yang baik serta biaya produksi yang relatif terjangkau, sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi teknik (Prasad et al., 2025). Meskipun demikian, performa mekaniknya sangat dipengaruhi oleh distribusi serta komposisi struktur mikro yang terbentuk selama proses pengecoran berlangsung.

Pemanfaatan besi cor kelabu secara luas dapat ditemukan pada komponen rem cakram (*disc brake*). Komponen ini berfungsi untuk mengurangi kecepatan atau menghentikan kendaraan melalui mekanisme gesekan antara cakram dan kampas rem. Dalam kondisi operasional, rem cakram mengalami beban termal dan mekanik yang cukup tinggi akibat gesekan yang terjadi secara berulang (Habibi et al., 2025). Oleh karena itu, material yang digunakan harus memiliki kekerasan tinggi, ketahanan aus yang baik, serta kemampuan menghantarkan panas secara efektif. Selain itu, kualitas material menjadi faktor yang sangat menentukan keselamatan, mengingat kegagalan pada sistem pengereman dapat meningkatkan risiko kecelakaan.

Di sisi lain, proses pengecoran sering kali menghadapi berbagai kendala yang berkaitan dengan kualitas produk, khususnya pada besi cor kelabu. Permasalahan yang kerap muncul antara lain ketidakteraturan struktur mikro, distribusi grafit yang tidak homogen, serta variasi nilai kekerasan pada permukaan material. Kondisi tersebut dapat menurunkan sifat mekanik dan ketahanan aus, sehingga berdampak pada performa serta umur pakai komponen rem cakram (Kutelu et al., 2024). Selain itu, ketidakhomogenan material juga berpotensi menimbulkan distribusi tegangan yang tidak merata saat komponen digunakan.

Permasalahan tersebut berkaitan erat dengan parameter proses pengecoran yang memengaruhi pembentukan struktur mikro. Faktor-faktor seperti laju pendinginan, jenis cetakan, serta ketebalan benda cor berperan dalam menentukan terbentuknya fase

ferrit dan perlit serta ukuran grafit (Alisir & Cevik, 2020). Pendinginan yang berlangsung cepat cenderung menghasilkan dominasi struktur perlit yang lebih keras, sedangkan pendinginan lambat lebih banyak menghasilkan fase ferrit yang bersifat lebih lunak. Dengan demikian, terdapat keterkaitan yang kuat antara struktur mikro dengan sifat mekanik material, khususnya kekerasan.

Sejumlah kajian sebelumnya telah membahas hubungan antara struktur mikro dan sifat mekanik pada besi cor. Saikaew & Harnsopa (2023) menegaskan bahwa variasi komposisi material serta perbedaan kondisi pendinginan terbukti memengaruhi distribusi grafit dan tingkat kekerasan. Selain itu, Kutelu et al. (2024) menyatakan bahwa perubahan parameter proses pengecoran juga dapat meningkatkan homogenitas struktur mikro sekaligus memperbaiki sifat mekanik material. Hal ini menegaskan bahwa struktur mikro memiliki peranan penting dalam menentukan kualitas akhir material hasil pengecoran.

Namun demikian, sebagian besar kajian terdahulu masih berfokus pada aspek komposisi material atau perlakuan panas, dan belum banyak yang secara spesifik membahas hubungan antara struktur mikro dengan kekerasan permukaan pada komponen rem cakram yang diproduksi menggunakan metode *green sand casting*. Selain itu, penelitian yang menghubungkan secara langsung antara proses pengecoran, pembentukan struktur mikro, dan sifat mekanik dalam konteks aplikasi nyata masih tergolong terbatas, sehingga menunjukkan adanya celah kajian yang perlu dikaji lebih lanjut.

Berdasarkan kondisi tersebut, kajian ini menjadi relevan untuk dilakukan guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara struktur mikro dan kekerasan permukaan pada rem cakram berbahan besi cor kelabu hasil proses *green sand casting*. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya peningkatan kualitas material hasil pengecoran sekaligus menjadi dasar dalam pengembangan proses manufaktur yang lebih optimal. Selain itu, kajian ini juga diharapkan dapat memperkaya khazanah keilmuan di bidang teknik mesin, khususnya dalam ranah metalurgi dan proses pengecoran logam.

Berdasarkan uraian tersebut, dilakukan suatu kajian untuk menganalisis struktur mikro serta kekerasan permukaan pada rem cakram berbahan besi cor kelabu yang

diproduksi melalui proses *green sand casting*. Kajian ini difokuskan untuk memahami karakteristik struktur mikro yang terbentuk serta hubungannya dengan nilai kekerasan permukaan material sebagai indikator kualitas hasil pengecoran. Untuk memperoleh gambaran mengenai kualitas material hasil proses *green sand casting*, penelitian ini juga menggunakan rem cakram original Honda Vario 125 sebagai spesimen pembandingan dalam analisis struktur mikro dan kekerasan. Dengan demikian, penelitian ini dirumuskan dengan judul “*Analisis Struktur Mikro Dan Kekerasan Permukaan Rem Cakram Besi Cor Kelabu Hasil Proses Green Sand Casting.*”

2. METODE

2.1 Studi Pustaka dan Lapangan

Studi Pustaka dan lapangan ini, dilakukan untuk mencari referensi berupa landasan teori sebagai pendukung penelitian dan hal-hal yang lainnya. Tahapan-tahapan yang dilakukan yaitu sebagai berikut:

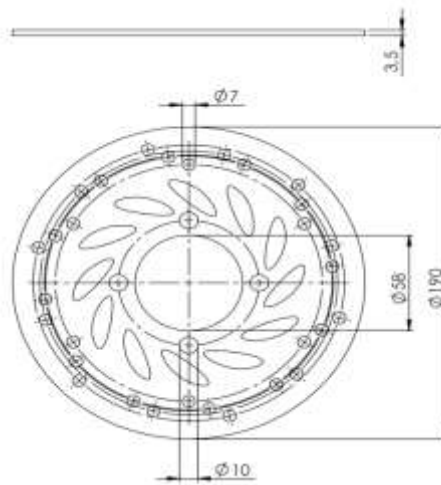
1. Mencari dan mempelajari jurnal-jurnal terdahulu untuk dijadikan referensi dalam penelitian ini.
2. Lokasi proses pembuatan pola cetakan rem cakram dilakukan di workshop Bp. Dr. Agus Yulianto, S.T., M.T., Desa Ngowo, Ceper, Kabupaten Klaten.
3. Lokasi Pembuatan cetakan *green sand* dan pengecoran besi cor kelabu dilakukan di CV. JALIGUNA STEEL Plant 2, Kab.Klaten, Jawa Tengah
4. Proses pengujian struktur mikro dan kekerasan permukaan spesimen dilakukan di Labratorium Politeknik Manufaktur Ceper.
5. Lokasi proses *machining* dilakukan di Tohudan, Jl. Adi Sumarmo, Tohudan, Kec. Colomadu, Kabupaten Karanganyar, Jawa Tengah.

2.2 Bahan dan Alat

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan beberapa bahan dan alat dalam proses *green sand casting* sampai pengujian specimen.

2.2.1 Diameter Awal Rem Cakram

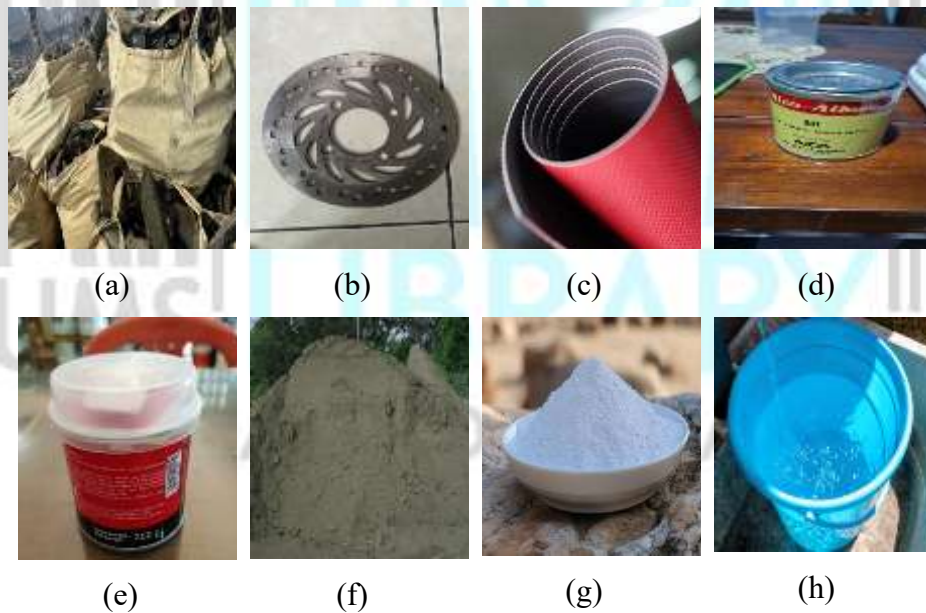
Berikut merupakan diameter awal rem cakram yang akan dibuat pola cetakan sesuai ukuran yang diinginkan



Gambar 1. Diameter Awal Rem Cakram

2.2.2 Bahan Penelitian

Berikut merupakan bahan yang akan digunakan pada penelitian ini:



Gambar 2. Bahan Penelitian

Keterangan gambar:

- a. Besi cor kelabu
- b. Rem cakram
- c. Karpet talang

- d. Lem aibon
- e. Dempul besi
- f. Pasir *Green Sand*
- g. Kalsium Karbonat
- h. Air

2.2.3 Alat Penelitian

Berikut merupakan alat yang akan digunakan pada penelitian ini:



Gambar 3. Alat Penelitian

- a. Meteran
- b. Jangka sorong
- c. *Cutter*
- d. Amplas
- e. Penumbuk

- f. Bingkai cetakan
- g. Ember
- h. Tungku peleburan
- i. *Ladle* pengecoran
- j. Mikroskop optik
- k. *Rockwell hardness testing machine*
- l. Gerinda

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Proses Pembuatan Pola Cetakan

Adapun langkah-langkah proses pembuatan pola cetakan untuk proses pengecoran *Green Sand Casting* yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan rem cakram dan karpet talang.
2. Menggambar pola rem cakram pada karpet talang.
3. Memotong karpet talang sesuai pola yang telah digambar.
4. Melapisi rem cakram dengan lem aibon dan merekatkan karpet talang pada rem cakram hingga beberapa lapisan.
5. Melapisi dempul untuk lapisan terluar agar permukaan mudah untuk dihaluskan.
6. Menggunakan amplas untuk menghaluskan dempul supaya permukaan halus dan rata saat pembuatan cetakan dilakukan.

2.3.2 Proses Pembuatan Cetakan *Green Sand*

Adapun langkah-langkah proses pembuatan cetakan *Green Sand* yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan pasir *Green sand* yang akan digunakan untuk pembuatan cetakan.
2. Memasukkan pasir *Green sand* yang sudah dicampur sedikit air atau dalam keadaan lembab kedalam bingkai cetakan untuk membuat bagian *drag* cetakan atau bagian bawah, kemudian pasir ditumbuk agar memadat.
3. Memberikan bubuk kalsium karbonat sebagai lapisan anti air diantara bagian *cope* dan *drag* cetakan.

4. Meletakkan pola cetakan yang telah dibuat pada pasir *Green sand*, sambil terus dipadatkan sehingga permukaan pola cetakan tenggelam setengahnya di dalam pasir *Green sand*.
5. Setelah benar-benar padat lalu menambahkan pasir *Green sand* lagi untuk membuat bagian *cope* cetakan atau bagian atas, dan membuat dua saluran masuk vertikal pada bagian sudut *cope* cetakan.
6. Melepas bagian *drag* cetakan dengan hati-hati untuk mengeluarkan pola cetakan.
7. Membuat saluran horizontal untuk menghubungkan saluran tuang dan rongga cetakan. Lalu menggabungkan kembali *drag* cetakan di atas *cope* cetakan, serta melepas bingkai cetakan sehingga menjadi satu cetakan *Green sand* yang utuh.

2.3.3 Proses Pengecoran *Green Sand Casting* Besi Cor Kelabu

Adapun Proses Pengecoran Besi Cor Kelabu Menggunakan Metode *Green Sand Casting* dilakukan adalah sebagai berikut: Menyiapkan besi cor kelabu yang akan dilebur.

1. Melakukan peleburan besi cor kelabu.
2. Melakukan penuangan logam cair pada *ladle* besi tuang.
3. Menuang logam cair pada cetakan.
4. Mendinginkan logam pada cetakan dengan menunggu sekitar 30-60 menit.
5. Melakukan pembongkaran cetakan dan produk rem cakram dikeluarkan dari cetakan.
6. Membersihkan sisa pasir cetakan yang ada pada hasil pengecoran rem cakram.
7. Melakukan pembubutan rem cakram agar sesuai spesifikasi yang diinginkan.
8. Produk rem cakram sudah jadi dan siap untuk penelitian.

2.3.4 Proses Pengujian Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik (*optical microscope*). Adapun langkah-langkah pengujiannya sebagai berikut:

1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji.
2. Spesimen yang telah dipreparasi diletakkan pada meja preparat mikroskop.
3. Sumber cahaya diatur agar pencahayaan merata pada permukaan spesimen.
4. Pengamatan dilakukan dengan variasi pembesaran ($50\times$, $100\times$ dan $200\times$).
5. Mengatur fokus menggunakan pengatur kasar dan halus hingga diperoleh citra yang jelas.
6. Struktur mikro yang terlihat diamati dan didokumentasikan menggunakan kamera mikroskop.
7. Menyimpan gambar sesuai *file* yang diinginkan.

2.3.5 Proses Pengujian Kekerasan *Rockwell Hardness Testing Machine*

Pengujian kekerasan *Rockwell* mengukur kedalaman penetrasi indenter ke dalam material. Berikut langkah-langkahnya:

1. Membersihkan permukaan spesimen.
2. Mengukur indenter dengan mikroskop sekrup, dalam hal ini indenter dari bola baja atau kerucut intan cukup diambil saja.
3. Memasang indenter pada pemegang indenter, dan dipasang pada mesin.
4. Meletakkan spesimen pada meja mesin.
5. Menaikkan meja mesin dengan memutar *handwheel* sehingga indenter mengadakan penetrasi pada spesimen. Kemudian menentukan besarnya pembebanan pada spesimen, kemudian skala besar dibaca (pembacaan pada beban awal).
6. Memutar *handle* sehingga terjadi penetrasi pembebasan penuh.
7. Setelah jarum pada skala besar tidak bergerak lagi, skala dibaca

- (pembacaan pada beban penuh).
8. *Handle* dikembalikan ke posisi semula kemudian skala dibaca (pembacaan pada beban penuh).
 9. Setelah pengujian selesai kemudian mencatat data uji sebagai data pengujian.

2.4 Jadwal Penelitian

Tabel 1. Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan					
		Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr
1	<i>Literature review</i>						
2	Penyusunan proposal penelitian						
3	Persiapan alat dan bahan untuk pengujian						
4	Pengujian dan analisa						
5	Penyusunan laporan Tugas Akhir						
6	Ujian Tugas Akhir						

2.5 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua jenis spesimen, yaitu rem cakram hasil proses green sand casting dan rem cakram original Honda Vario 125. Variabel penelitian terdiri atas variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

2.5.1 Variabel Bebas

Variabel bebas penelitian ini adalah jenis spesimen yang digunakan, yaitu:

1. Rem cakram hasil green sand casting.

2. Rem cakram original Honda Vario 125.

2.5.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan parameter yang diamati selama penelitian, yaitu:

1. Struktur mikro material.
2. Nilai kekerasan material.

2.5.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol pada penelitian ini meliputi:

1. Material dasar berupa besi cor kelabu.
2. Lokasi pengujian dilakukan pada Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper.
3. Jumlah titik pengujian sebanyak lima titik pada setiap spesimen.
4. Prosedur preparasi struktur mikro mengikuti standar laboratorium.
5. Pengujian dilakukan menggunakan mesin Rockwell Hardness Testing Machine yang telah dikalibrasi.

2.6 Rancangan Analisis Data

Rancangan analisis data merupakan tahapan yang dilakukan untuk mengolah dan menginterpretasikan hasil pengujian struktur mikro serta kekerasan pada rem cakram hasil proses *green sand casting* dan rem cakram original Honda Vario 125 sebagai spesimen pembandingan. Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan karakteristik struktur mikro dan nilai kekerasan kedua spesimen.

2.6.1 Analisis Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada lima titik pengujian untuk setiap spesimen. Rem cakram hasil *green sand casting* diuji menggunakan metode Rockwell skala B (HRB), sedangkan rem cakram original Honda Vario 125 diuji menggunakan metode Rockwell skala C (HRC) sesuai rekomendasi Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper berdasarkan karakteristik material masing-masing.

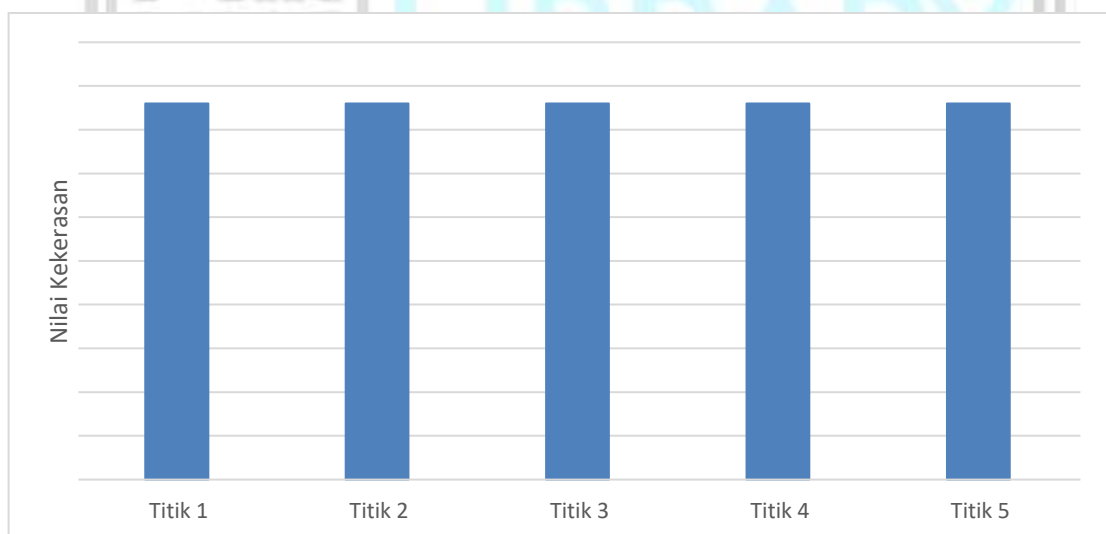
Hasil pengujian kemudian dihitung nilai rata-rata dan standar deviasinya untuk mengetahui tingkat homogenitas material. Selanjutnya nilai kekerasan dikonversi ke satuan Brinell Hardness (HB) sebagaimana

tercantum pada laporan pengujian laboratorium sehingga kedua spesimen dapat dibandingkan menggunakan satuan yang sama.

Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai kekerasan rata-rata, standar deviasi, serta hubungan antara hasil pengamatan struktur mikro terhadap nilai kekerasan pada masing-masing specimen.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kekerasan

Spesimen	Nilai Kekerasan					Rata-rata	Standart Deviasi	Konversi (HB)
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5			
<i>Green Sand Casting</i>								
Rem Cakram Original								



Gambar 4. Diagram Hasil Pengujian Kekerasan

Perbedaan penggunaan skala Rockwell (HRB dan HRC) tidak memengaruhi analisis komparatif karena hasil pengujian dari kedua spesimen dikonversi ke satuan Brinell Hardness (HB) berdasarkan laporan resmi Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper, sehingga nilai kekerasan dapat dibandingkan dalam satu sistem satuan yang sama.

2.6.2 Analisis Struktur Mikro

Analisis struktur mikro dilakukan menggunakan hasil pengamatan mikroskop optik. Pengamatan bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik mikrostruktur pada masing-masing spesimen yang meliputi:

1. Bentuk grafit.
2. Distribusi grafit.
3. Matriks penyusun material (ferrite dan pearlite).
4. Homogenitas struktur mikro.

Hasil pengamatan kemudian dibandingkan untuk mengetahui perbedaan karakteristik struktur mikro antara rem cakram hasil *green sand casting* dengan rem cakram original Honda Vario 125. Selanjutnya dilakukan analisis hubungan antara struktur mikro dengan sifat mekanik material, khususnya nilai kekerasan.

2.6.3 Analisis Perbandingan

Setelah diperoleh hasil pengujian struktur mikro dan kekerasan, dilakukan analisis perbandingan antara rem cakram hasil *green sand casting* dengan rem cakram original Honda Vario 125.

Analisis perbandingan bertujuan untuk mengetahui sejauh mana karakteristik struktur mikro dan sifat mekanik rem cakram hasil proses *green sand casting* mendekati karakteristik rem cakram original yang diproduksi secara industri. Hasil analisis kemudian digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kualitas material hasil pengecoran serta memberikan pembahasan mengenai pengaruh struktur mikro terhadap nilai kekerasan material.

2.7 Hasil Pengecoran

2.7.1 Hasil Pengecoran Sebelum *Machining*

Berikut merupakan spesimen hasil pengecoran rem cakram besi cor kelabu dengan menggunakan metode *green sand casting* sebelum melalui proses *machining*.



Gambar 5. Hasil pengecoran sebelum *machining*

2.7.2 Hasil Pengecoran Sesudah *Machining*

Berikut merupakan spesimen hasil pengecoran rem cakram besi cor kelabu dengan menggunakan metode *green sand casting* setelah melalui proses *machining*. diperoleh ketebalan 3,24 mm, diameter dalam 59,38 mm, dan diameter luar 190 mm.

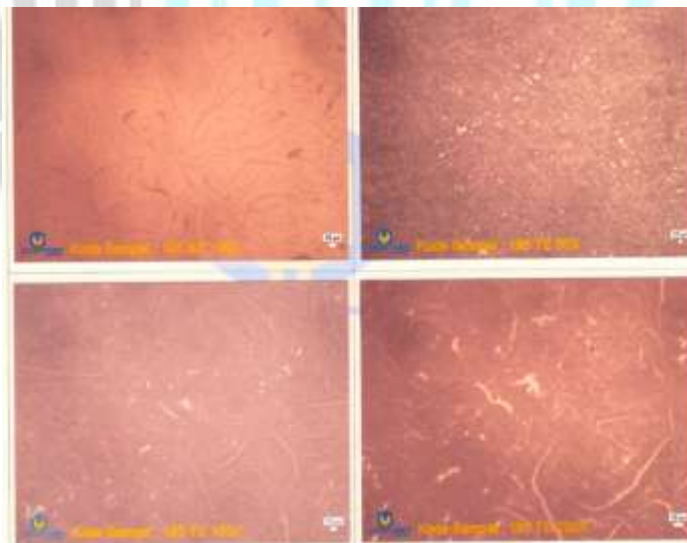


Gambar 6. Hasil *machining* rem cakram besi cor kelabu

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Struktur Mikro Rem Cakram Hasil *Green Sand Casting*

Pengujian struktur mikro bertujuan untuk mengetahui karakteristik mikrostruktur pada material rem cakram berbahan besi cor kelabu hasil proses *green sand casting*. Melalui pengujian ini dapat diamati bentuk, ukuran, dan distribusi grafit serta fasa penyusun matriks seperti ferrit dan perlit yang berpengaruh terhadap sifat mekanik material, khususnya kekerasan. Alat yang digunakan dalam pengujian adalah mikroskop optik dengan variasi pembesaran ($50\times$, $100\times$ dan $200\times$). Dalam penelitian ini pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper. Hasil pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik pada spesimen rem cakram besi cor kelabu hasil *green sand casting* disajikan dalam gambar berikut:



Gambar 7. Hasil Pengamatan Struktur Mikro *Green Sand Casting*

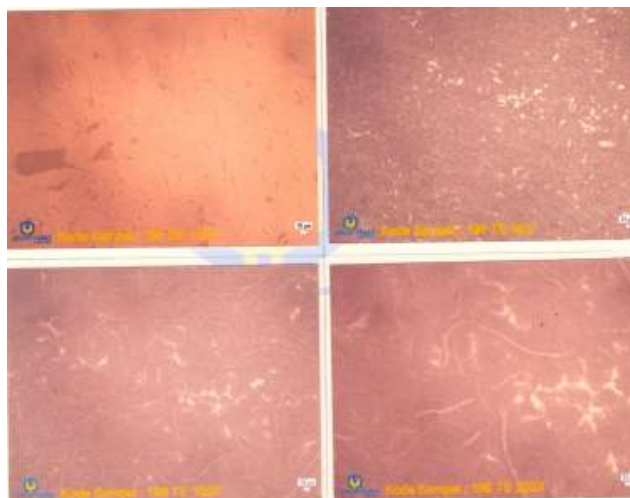
Pada gambar 7 merupakan hasil pengamatan uji struktur mikro pada spesimen rem cakram besi cor kelabu hasil *green sand casting*. Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro besi cor kelabu pada berbagai pembesaran, terlihat bahwa material didominasi oleh grafit berbentuk serpih (*flake graphite*) yang tersebar dalam matriks ferit dan perlit, di mana grafit tampak

sebagai fase gelap dan matriks sebagai fase terang-gelap. Struktur ini merupakan karakteristik khas besi cor kelabu akibat proses grafitisasi selama solidifikasi (William D. Callister Jr., 2018; ASM International, 1990). Perbandingan antar sampel menunjukkan bahwa 195 TE memiliki grafit yang lebih halus dan merata dibandingkan 195 BE yang lebih kasar, yang mengindikasikan perbedaan laju pendinginan selama proses pengecoran, fenomena ini juga didukung oleh penelitian Doru Michael Stefanescu (2009) yang menyatakan bahwa kecepatan pendinginan sangat mempengaruhi ukuran dan distribusi grafit.

Secara keseluruhan, struktur mikro yang lebih halus pada sampel 195 TE menunjukkan potensi kekuatan dan kekerasan yang lebih baik, sedangkan grafit kasar pada 195 BE cenderung menurunkan performa material, sehingga dapat disimpulkan bahwa kualitas struktur mikro sangat dipengaruhi oleh kondisi pendinginan dan parameter proses pengecoran.

3.2 Hasil Pengujian Struktur Mikro Rem Cakram Original Honda Vario 125

Sebagai pembanding terhadap hasil pengecoran, dilakukan pengujian struktur mikro pada rem cakram original Honda Vario 125. Pengujian dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan variasi pembesaran (50×, 100× dan 200×) di Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper.



Gambar 8. Hasil Pengamatan Struktur Mikro Rem Cakram Original

Berdasarkan hasil pengamatan, rem cakram original memiliki grafit berdasarkan klasifikasi ASTM A247 dengan Bentuk VII, Tipe C, dan ukuran grafit 4. Matriks penyusun material terdiri atas ferrite dan pearlite. Struktur tersebut menunjukkan bahwa material rem cakram original masih termasuk ke dalam kelompok besi cor kelabu yang umum digunakan sebagai material sistem pengereman kendaraan bermotor.

Grafit pada rem cakram original tampak memiliki distribusi yang relatif merata dengan matriks ferrite-pearlite yang homogen. Struktur mikro tersebut menunjukkan bahwa proses manufaktur industri mampu menghasilkan pengendalian mikrostruktur yang baik sehingga sifat mekanik material menjadi lebih stabil.

Keberadaan pearlite dalam jumlah yang lebih dominan dibandingkan ferrite diperkirakan memberikan kontribusi terhadap tingginya nilai kekerasan rem cakram original. Selain itu, proses produksi industri yang menerapkan pengendalian komposisi kimia dan parameter manufaktur secara ketat turut berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikro yang lebih seragam.

3.3 Perbandingan Struktur Mikro

Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro, baik rem cakram hasil proses *green sand casting* maupun rem cakram original Honda Vario 125 sama-sama memiliki matriks ferrite dan pearlite yang merupakan karakteristik umum besi cor kelabu. Akan tetapi, terdapat perbedaan pada karakteristik grafit dan homogenitas mikrostruktur.

Pada rem cakram hasil *green sand casting*, distribusi grafit dipengaruhi oleh kondisi solidifikasi selama proses pengecoran menggunakan cetakan pasir. Variasi laju pendinginan menyebabkan ukuran dan penyebaran grafit belum sepenuhnya seragam. Sebaliknya, rem cakram original menunjukkan distribusi grafit yang lebih homogen dengan klasifikasi ASTM A247 Bentuk VII Tipe C ukuran 4.

Selain dipengaruhi oleh proses pengecoran, perbedaan struktur mikro tersebut juga dipengaruhi oleh proses manufaktur industri yang memiliki pengendalian

komposisi kimia, temperatur peleburan, dan laju pendinginan yang lebih terkendali dibandingkan proses pengecoran skala laboratorium.

Secara umum, kedua spesimen masih menunjukkan karakteristik besi cor kelabu yang ditandai dengan keberadaan grafit serta matriks ferrite–pearlite. Namun demikian, rem cakram original memiliki mikrostruktur yang lebih homogen sehingga berpotensi menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik.

3.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan deformasi plastis akibat pembebanan. Pengujian dilakukan di Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper terhadap dua jenis spesimen, yaitu rem cakram hasil proses *green sand casting* dan rem cakram original Honda Vario 125.

Pengujian rem cakram hasil *green sand casting* menggunakan metode *Rockwell* skala B (HRB), sedangkan rem cakram original Honda Vario 125 menggunakan metode *Rockwell* skala C (HRC). Perbedaan metode pengujian dilakukan berdasarkan rekomendasi laboratorium dengan mempertimbangkan karakteristik material masing-masing spesimen. Untuk mempermudah proses analisis dan perbandingan, seluruh hasil pengujian dikonversi ke satuan *Brinell Hardness* (HB), disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kekerasan

Spesimen	Nilai Kekerasan					Rata-rata	Standart Deviasi	Konversi (HB)
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5			
<i>Green Sand Casting</i>	90,00	90,30	90,00	90,10	90,00	90,08 (HRB)	0,13	183,61
Rem Cakram Original	38,80	38,70	38,50	38,80	38,50	38,66 (HRC)	0,15	358,73

3.4.1 Hasil Pengujian Kekerasan Rem Cakram Hasil Green Sand Casting

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan metode *Rockwell B* yang dilakukan pada 5 titik yang berbeda, diperoleh nilai rata-rata sebesar 90,08 HRB atau setara dengan 183,61 HB, dengan standar deviasi 0,13. Nilai ini menunjukkan bahwa material memiliki kekerasan dalam kategori sedang dan tingkat variasi data yang sangat kecil. Secara teoritis, baja karbon dalam kondisi *as-cast* memiliki kekerasan pada kisaran 140–220 HB, sehingga hasil penelitian ini masih berada dalam rentang yang sesuai dengan literatur (Callister & Rethwisch, 2018; ASM International, 1990). Nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa material memiliki homogenitas yang baik. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa nilai kekerasan yang seragam mencerminkan struktur mikro yang merata dan proses manufaktur yang stabil (ASM International, 1990). Secara mikrostruktur, nilai kekerasan yang diperoleh mengindikasikan dominasi struktur *ferrite-pearlite*. Fasa *ferrite* memberikan sifat ulet, sedangkan *pearlite* meningkatkan kekerasan dan kekuatan. Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa peningkatan fraksi *pearlite* akan meningkatkan kekerasan material (Kováč et al., 2021). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan nilai kekerasan relatif tinggi dalam rentang *ferrite-pearlite*.

Selain itu, keseragaman nilai kekerasan menunjukkan bahwa hasil pengujian memiliki variasi yang rendah antar titik pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi sifat mekanik pada spesimen relatif homogen. Dengan demikian, stabilitas hasil pengujian menunjukkan bahwa proses *green sand casting* yang digunakan mampu menghasilkan rem cakram dengan distribusi kekerasan yang seragam.

3.4.2 Hasil Pengujian Kekerasan Rem Cakram Original Honda Vario 125

Pengujian kekerasan rem cakram original Honda Vario 125 dilakukan pada lima titik pengujian menggunakan metode *Rockwell* skala C (HRC).

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh nilai rata-rata sebesar 38,66 HRC atau setara dengan 358,73 HB, dengan standar deviasi sebesar 0,15.

Standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa rem cakram original memiliki distribusi kekerasan yang sangat homogen. Hal ini menunjukkan bahwa proses manufaktur industri menghasilkan kualitas material yang seragam sehingga sifat mekanik pada seluruh permukaan rem cakram relatif stabil.

3.5 Perbandingan Kekerasan

Perbandingan hasil pengujian kekerasan antara rem cakram hasil proses *green sand casting* dengan rem cakram original Honda Vario 125 disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Nilai Kekerasan Rem Cakram Hasil *Green Sand Casting* dan Rem Cakram *Original* Honda Vario 125

Parameter	<i>Green Sand Casting</i>	Rem Cakram <i>Original</i> Honda Vario 125
Metode Pengujian	<i>Rockwell</i>	<i>Rockwell</i>
Skala Pengujian	HRB	HRC
Beban Pengujian	981 N	1471,5 N
Jenis Indentor	Bola Baja Ø 1/16"	<i>Diamond Cone 120°</i>
Jumlah Titik Pengujian	5	5
Nilai Rata-rata	90,08 HRB	38,66 HRC
Nilai Pembanding (HB)	183,61 HB	358,73 HB
Standar Deviasi	0,13	0,15

Berdasarkan Tabel 4. terlihat bahwa rem cakram *original* Honda Vario 125 memiliki nilai kekerasan sebesar 358,73 HB, sedangkan rem cakram hasil proses *green sand casting* memiliki nilai kekerasan sebesar 183,61 HB. Perbandingan dilakukan menggunakan satuan *Brinell Hardness* (HB) karena kedua spesimen diuji menggunakan skala *Rockwell* yang berbeda sesuai rekomendasi Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rem cakram

original memiliki tingkat kekerasan sekitar 95,38% lebih tinggi dibandingkan rem cakram hasil *green sand casting*. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh proses manufaktur industri yang lebih terkendali, meliputi pengendalian komposisi kimia, proses peleburan, laju pendinginan, dan parameter pengecoran, sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih homogen (Davis, 1996).

3.6 Hubungan Struktur Mikro Dengan Kekerasan

Hasil pengujian struktur mikro dan kekerasan menunjukkan hubungan yang erat antara karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik material.

1. Grafit serpih (*flake graphite*) berfungsi sebagai pelumas padat dan meningkatkan kemampuan peredaman getaran, tetapi juga dapat menjadi titik konsentrasi tegangan.
2. Perlit meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus.
3. Ferit memberikan sifat ulet dan menurunkan kecenderungan material menjadi getas.

Distribusi grafit yang merata dan matriks ferit-perlit yang homogen menghasilkan nilai kekerasan yang stabil pada seluruh titik pengujian. Berdasarkan analisis mikrostruktur, material rem cakram berbahan besi cor kelabu diperkirakan didominasi oleh fasa *ferrite-pearlite* dengan grafit berbentuk serpih (*flake graphite*). Fasa *ferrite* memiliki sifat lunak dan ulet, sedangkan *pearlite* memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekerasan dan kekuatan material. Oleh karena itu, semakin besar fraksi *pearlite* dalam struktur mikro, maka nilai kekerasan material cenderung meningkat (Callister & Rethwisch, 2018).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa proses manufaktur berperan penting dalam menentukan karakteristik struktur mikro yang pada akhirnya memengaruhi nilai kekerasan rem cakram. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa rem cakram hasil *green sand casting* telah memiliki karakteristik mikrostruktur yang sesuai sebagai besi cor kelabu, namun masih memerlukan pengembangan proses manufaktur agar diperoleh sifat mekanik yang lebih mendekati rem cakram *original* Honda Vario 125.

3.7 Pembahasan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis struktur mikro dan kekerasan permukaan rem cakram hasil proses *green sand casting* serta membandingkannya dengan rem cakram *original* Honda Vario 125 sebagai spesimen pembanding. Berdasarkan hasil pengujian, kedua spesimen sama-sama menunjukkan karakteristik besi cor kelabu (*gray cast iron*) yang ditandai dengan keberadaan grafit serta matriks *ferrite-pearlite*. Besi cor kelabu merupakan material yang banyak digunakan sebagai bahan rem cakram karena memiliki konduktivitas termal yang baik, kemampuan meredam getaran (*damping capacity*) yang tinggi, serta ketahanan aus yang baik (Davis, 1996).

Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa rem cakram hasil *green sand casting* memiliki matriks ferrite dan pearlite yang terbentuk selama proses solidifikasi di dalam cetakan pasir. *Ferrite* merupakan fasa yang bersifat lunak dan ulet sehingga meningkatkan keuletan material, sedangkan *pearlite* memiliki kekerasan lebih tinggi karena tersusun atas lamela *ferrite* dan sementit. Oleh karena itu, peningkatan fraksi *pearlite* akan meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus besi cor kelabu (Davis, 1996).

Pada rem cakram *original* Honda Vario 125 diperoleh struktur mikro berupa grafit ASTM A247 Bentuk VII Tipe C ukuran 4 dengan matriks *ferrite-pearlite*. ASTM A247 mengklasifikasikan bentuk, distribusi, dan ukuran grafit pada besi cor sebagai dasar evaluasi mikrostruktur, sedangkan matriks *ferrite-pearlite* merupakan mikrostruktur yang umum dijumpai pada komponen otomotif berbahan besi cor kelabu (ASTM, 2017; Davis, 1996).

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa rem cakram hasil *green sand casting* memiliki nilai rata-rata sebesar 90,08 HRB atau setara dengan 183,61 HB, sedangkan rem cakram *original* Honda Vario 125 memiliki nilai rata-rata sebesar 38,66 HRC atau setara dengan 358,73 HB. Perbandingan dilakukan menggunakan satuan *Brinell Hardness* (HB) karena kedua spesimen diuji menggunakan skala *Rockwell* yang berbeda sesuai rekomendasi Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper.

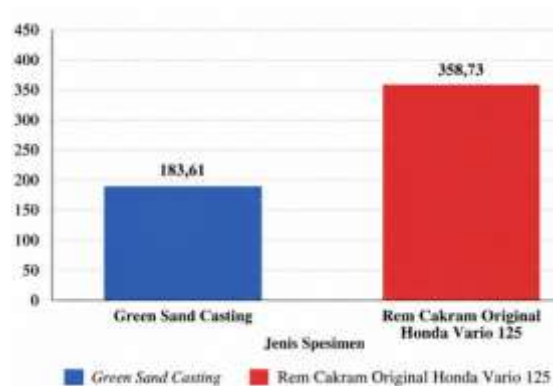
Perbedaan nilai kekerasan tersebut menunjukkan bahwa rem cakram original memiliki ketahanan terhadap deformasi plastis yang lebih tinggi dibandingkan rem cakram hasil *green sand casting*. Perbedaan tersebut diduga berkaitan dengan pengendalian proses manufaktur industri, seperti komposisi kimia, proses peleburan, inokulasi, laju pendinginan, dan parameter pengecoran yang lebih terkendali sehingga menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen (Davis, 1996).

Selain proses manufaktur, laju pendinginan selama solidifikasi juga memengaruhi pembentukan mikrostruktur. Pendinginan yang lebih lambat cenderung menghasilkan pembentukan ferrite yang lebih dominan, sedangkan pendinginan yang lebih terkontrol akan meningkatkan pembentukan *pearlite* sehingga kekerasan material meningkat (Davis, 1996; Holmgren *et al.*, 2008).

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Cueva *et al.* (2003), yang menyatakan bahwa rem cakram berbahan besi cor kelabu dengan matriks yang didominasi *pearlite* memiliki ketahanan aus dan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan matriks dengan kandungan *ferrite* yang lebih tinggi. Selain itu, penelitian tersebut menjelaskan bahwa material rem cakram otomotif umumnya menggunakan besi cor kelabu kelas 250 dengan matriks yang didominasi *pearlite* untuk memperoleh kombinasi kekerasan, konduktivitas panas, dan ketahanan aus yang optimal.

Walaupun nilai kekerasan rem cakram hasil *green sand casting* masih lebih rendah dibandingkan rem cakram original, nilai standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa distribusi kekerasan pada setiap titik pengujian relatif homogen. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pengecoran menggunakan metode *green sand casting* mampu menghasilkan produk cor dengan kualitas yang cukup seragam. Oleh karena itu, metode *green sand casting* masih memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai alternatif proses manufaktur rem cakram berbahan besi cor kelabu melalui optimasi komposisi material dan parameter pengecoran.

3.8 Histogram Hasil Pengujian Kekerasan



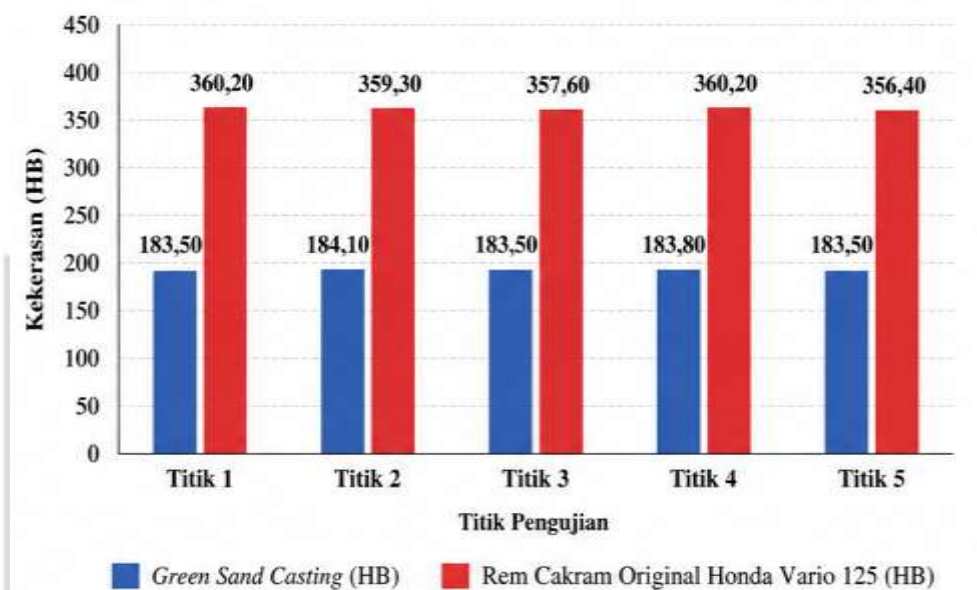
Gambar 9. Grafik Perbandingan Kekerasan Rata-Rata

Berdasarkan Gambar diatas, terlihat bahwa rem cakram original Honda Vario 125 memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 358,73 HB, sedangkan rem cakram hasil proses *green sand casting* memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 183,61 HB. Perbandingan dilakukan menggunakan satuan *Brinell Hardness* (HB) karena kedua spesimen diuji menggunakan skala Rockwell yang berbeda, yaitu HRC untuk rem cakram original Honda Vario 125, sesuai rekomendasi Laboratorium Politeknik Manufaktur Ceper. Dengan menggunakan satuan HB, kedua spesimen dapat dibandingkan secara langsung.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa rem cakram original Honda Vario 125 memiliki nilai kekerasan sekitar 95,38% lebih tinggi dibandingkan rem cakram hasil *green sand casting*. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa rem cakram original memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi plastis dan keausan permukaan. Menurut Davis (1996), peningkatan kekerasan pada besi cor kelabu dipengaruhi oleh karakteristik mikrostruktur, terutama proporsi pearlite, distribusi grafit, serta homogenitas matriks penyusun material. Material yang memiliki fraksi pearlite lebih tinggi umumnya menunjukkan nilai kekerasan dan ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan material dengan kandungan ferrite yang dominan (Davis, 1996).

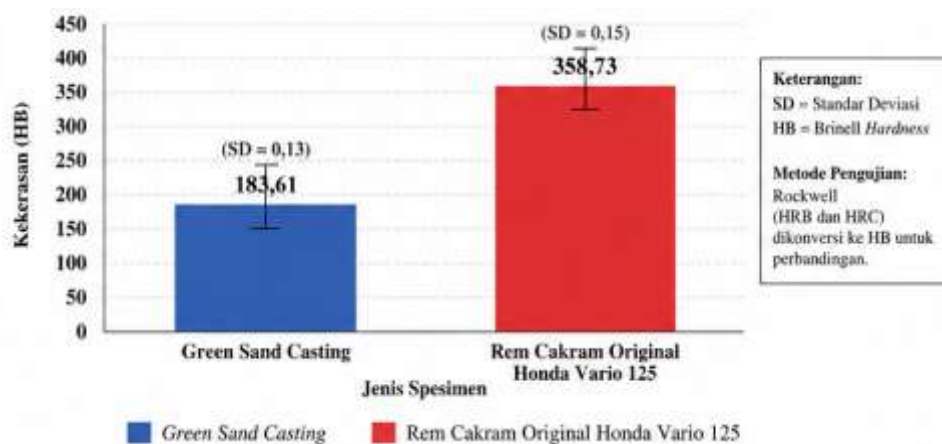
Selain faktor mikrostruktur, perbedaan nilai kekerasan juga diduga dipengaruhi oleh proses manufaktur. Rem cakram original diproduksi melalui

proses industri yang menerapkan pengendalian komposisi kimia, temperatur peleburan, proses inokulasi, laju pendinginan, serta parameter pengecoran secara lebih ketat dibandingkan proses *green sand casting* skala laboratorium. Pengendalian parameter tersebut berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikro yang lebih homogen sehingga menghasilkan sifat mekanik yang lebih baik (Stefanescu, 2009). Oleh karena itu, nilai kekerasan rem cakram original lebih tinggi dibandingkan rem cakram hasil penelitian.



Gambar 10 Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Pada Tiap Titik Kekerasan

Berdasarkan Grafik 10, nilai kekerasan pada setiap titik pengujian menunjukkan bahwa kedua spesimen memiliki variasi yang relatif kecil. Rem cakram hasil *green sand casting* memiliki rentang nilai kekerasan yang hampir seragam pada seluruh titik pengujian, demikian pula rem cakram *original* Honda Vario 125. Keseragaman nilai tersebut menunjukkan bahwa distribusi sifat mekanik pada kedua spesimen cukup homogen. Menurut Callister dan Rethwisch (2020), distribusi nilai kekerasan yang relatif seragam menunjukkan bahwa struktur mikro material terbentuk secara konsisten selama proses manufaktur sehingga menghasilkan sifat mekanik yang stabil.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Rata-Rata dengan *Error Bar*

Berdasarkan Grafik 11, standar deviasi rem cakram hasil *green sand casting* sebesar 0,13, sedangkan rem cakram *original* Honda Vario 125 sebesar 0,15. Nilai standar deviasi yang rendah pada kedua spesimen menunjukkan bahwa hasil pengujian kekerasan memiliki tingkat penyebaran data yang kecil, sehingga hasil pengujian dapat dianggap konsisten dan memiliki tingkat kepercayaan yang baik. Menurut Montgomery (2019), standar deviasi yang rendah menunjukkan bahwa variasi data terhadap nilai rata-rata relatif kecil, sehingga hasil pengukuran dapat mewakili karakteristik material yang diuji.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil penelitian mengenai analisis struktur mikro dan kekerasan permukaan rem cakram besi cor kelabu hasil *green sand casting* maka dapat diambil beberapa Kesimpulan sebagai berikut:

1. Rem cakram berbahan besi cor kelabu hasil proses *green sand casting* memiliki karakteristik struktur mikro yang didominasi oleh fasa *ferrite-pearlite* dengan grafit berbentuk serpih (*flake graphite*) yang tersebar relatif merata. Struktur mikro yang terbentuk menunjukkan bahwa proses pengecoran berlangsung dengan baik dan menghasilkan material yang

homogen, meskipun tingkat homogenitasnya masih lebih rendah dibandingkan rem cakram original Honda Vario 125.

2. Hubungan antara struktur mikro dan kekerasan menunjukkan bahwa keberadaan fasa *pearlite* memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai kekerasan, sedangkan *ferrite* dan grafit serpih memberikan sifat keuletan pada material. Hasil pengujian kekerasan diperoleh nilai rata-rata sebesar 90,08 HRB atau setara dengan 183,61 HB, yang menunjukkan bahwa material memiliki kekerasan sedang dengan distribusi sifat mekanik yang stabil dan merata, namun masih memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan rem cakram original.
3. Perbandingan struktur mikro dan nilai kekerasan menunjukkan bahwa rem cakram hasil proses *green sand casting* dan rem cakram original Honda Vario 125 sama-sama memiliki matriks *ferrite-pearlite*, namun rem cakram original memiliki klasifikasi grafit berdasarkan ASTM A247 Bentuk VII, Tipe C, Ukuran 4 dengan mikrostruktur yang lebih homogen. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa rem cakram original memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 38,66 HRC atau setara dengan 358,73 HB, sedangkan rem cakram hasil *green sand casting* sebesar 183,61 HB. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa rem cakram original memiliki sifat mekanik yang lebih baik, yang menunjukkan bahwa pengendalian proses manufaktur menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen dibandingkan proses *green sand casting* skala laboratorium.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan perlakuan panas (*heat treatment*) seperti *quenching* atau *tempering* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai kekerasan dan struktur mikro material.
2. Perlu dilakukan variasi parameter pengecoran, seperti temperatur penuangan dan laju pendinginan, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kualitas hasil cor.

3. Pengujian sifat mekanik lainnya seperti uji tarik, uji impact, dan uji keausan perlu dilakukan untuk memperoleh karakteristik material yang lebih lengkap.
4. Penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan jumlah spesimen yang lebih banyak agar data yang diperoleh lebih akurat dan representatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Alisir, S., & Cevik, S. (2020). The effects of foundry sand components on the cast iron. *Research on Engineering Structures and Materials*, 6(2), 127–140. <https://doi.org/10.17515/resm2019.148ma0911>
- Almadani, M. I., & Siswanto, R. (2020). Proses Manufaktur Mesin Poles Dan Ampelas Untuk Proses Metalografi. *Jtam Rotary*, 2(1), 15. https://doi.org/10.20527/jtam_rotary.v2i1.2001
- Arif, S., & Koswara. (2020). Karakterisasi Pisau Dari Bahan Wire Rope Tempa Manual. *JTTM Jurnal Terapan Teknik Mesin*, 1(2), 85–95. <https://doi.org/10.37373/msn.v1i2.36>
- ASM International, 1990. *ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Materials Park, OH: ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.9781627081610>
- Atmoko, N. T., Chamim, M., Subiyati, S., & Priyambodo, B. H. (2021). Efek Perlakuan Panas (Heat Treatment) Pada Besi Cor Kelabu Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro. *Creative Research in Engineering (Cerie)*, 1(2), 67. <https://doi.org/10.30595/serie.v1i2.10847>
- Callister, W.D. & Rethwisch, D.G., 2018. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 9781119405498.
- Cholewa, M., Wróbel, T., Baron, C., & Morys, M. (2021). Surface Phenomena at the Interface Between Silicon Carbide and Iron Alloy. *Materials*, 14(22), 6762. <https://doi.org/10.3390/ma14226762>
- Davis, J.R., 2001. *Cast Irons*. Materials Park, OH: ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ci.t51290001>
- Gusniar, I. N., Juhri, A., & Noubnome, V. (2021). Pengaruh Variasi Arus Dan Posisi Pengelasan SMAW Terhadap Sifat Mekanik Baja ST 37. *Jurnal Teknik Mesin*, 14(2), 134–139. <https://doi.org/10.30630/jtm.14.2.591>

- Habibi, A. W., Sinarep, S., & Triadi, A. A. A. (2025). Hardness and Microstructure Characteristics in Iron Sand Casting from Ampenan Beach with Used Canned Aluminum Alloy. *Journal of Business Social and Technology*, 6(2), 85–92. <https://doi.org/10.59261/jbt.v6i2.550>
- Hossain, M. S. (2020). *Archives of Foundry Engineering*. <https://doi.org/10.24425/afe.2021.136106>
- Ilham, A., Adzima, M. F. F., Heryanto, O. D., Ferdinand, F. A., & Azmy, I. (2023). Pengaruh Variasi Proses Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Baja Aisi 1018. *Sigma Teknika*, 6(1), 137–144. <https://doi.org/10.33373/sigmateknika.v6i1.5120>
- Kováč, F., Zlámalová, M., Skočovský, P. & Žitňanský, M., 2021. ‘Prediction of Microstructure Constituents’ Hardness after the Isothermal Decomposition of Austenite’, *Metals*, 11(2), p. 180. <https://doi.org/10.3390/met11020180>
- Kutelu, B. J., Oluyori, R. T., & Omoyeni, D. O. (2024). Microstructure characteristics and mechanical properties of grey cast iron at varied ferrosilicon addition. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*, 7(2), 290–296. <https://doi.org/10.53982/ajerd.2024.0702.28-j>
- Lelawati, L. (2022). Pengaruh Pemanasan Dan Quenching Dengan Air Laut Terhadap Struktur Mikro Baja Karbon Sedang. *Jurnal Redoks*, 7(1), 62–72. <https://doi.org/10.31851/redoks.v7i1.8148>
- Mnati, A. A., Resan, K. K., & Omaraa, E. (2022). Structural Characterization and Mechanical Properties of Ductile Iron - Enhanced Alloyed Ductile Iron. *Key Engineering Materials*, 924, 37–46. <https://doi.org/10.4028/p-oko587>
- Prasad, B., Kumar, A., & Gupta, N. (2025). Characteristics of Bimetallic Castings with Varying Thickness of Liquid High Carbon Grey Cast Iron and Solid High Chromium Stainless Steel 304 Produced by Green Sand Mold Casting. *International Journal of Metalcasting*. <https://doi.org/10.1007/s40962-025-01832-z>
- Saikaew, C., & Harnsopa, S. (2023). Influence of component proportions in casting process on hardness and the quality of cast iron. *Archives of Foundry Engineering*. <https://doi.org/10.24425/afe.2023.144293>
- Silalahi, Y. N., & Tamjidilllah, M. (2021). Pengaruh Variasi Suhu Dan Media Pendingin Pada Proses Pack Nitriding Material Sus 630 Terhadap Nilai Kekerasan Dan Strukur Mikro. *Jtam Rotary*, 3(1), 119. https://doi.org/10.20527/jtam_rotary.v3i1.3429

Smallman, R.E. & Bishop, R.J., 1999. *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. 6th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-075064564-5/50001-0>

Smith, W.F. & Hashemi, J., 2011. *Foundations of Materials Science and Engineering*. 5th ed. New York: McGraw-Hill. ISBN: 9780071311144.

Wang, B., Han, X., Barber, G. C., & Pan, Y. (2019). Wear Behavior of Austempered and Quenched and Tempered Gray Cast Irons under Similar Hardness. *Metals*, 9(12), 1329. <https://doi.org/10.3390/met9121329>

Yulianto, A., Anggono, A. D., Partono, P., & Ngafwan. (2025). Investigation of Thickness Effects on Cooling Rate and Hardness of Gray Cast Iron in Metal and Sand Molds. *Engineering Proceedings*, 84, 73. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084073>

Yulianto, A., Darmawan, A. S., Mustika, A. C., Febriantoko, B. W., & Partono, P. (2024). Characterization of Gray Cast Iron With the Addition of 3 Wt.% FeMn in the Casting Process With Metal Molds and Sand Molds. *Advances in Science and Technology*, 141, 27–35. <https://doi.org/10.4028/p-rt48g1>

Yulianto, A., Soenoko, R., Suprpto, W., & Sonief, A. A. (2021). Effect of Cooling Rate on Microstructure and Hardness in Gray Cast Iron Casting Process. *Acta Metallurgica Slovaca*, 27(3), 127–132. <https://doi.org/10.36547/ams.27.3.996>

Yulianto, A., Soenoko, R., Suprpto, W., Sonief, A. A., Darmawan, A. S., & Setiawan, M. D. (2020). Microstructure and hardness of gray cast iron as a product of solidification in permanent mold. In *Materials Science Forum* (Vol. 991, pp. 37–43). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.991.37>

Zayadi, A., Sungkono, S., Masyhudi, & T, E. S. (2022). Pengaruh Waktu Tempering Terhadap Karakter Baja S45c Pasca Quenching Pada 950oc Dan Tempering 500 C. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 7(1). <https://doi.org/10.35894/jtk.v7i1.53>