

ANALISIS KEGAGALAN VALVE (KATUP MASUK) MOBIL KAPASITAS 1300 CC

***Fachri Maulana Putera**¹, **Sri Nugroho**², **Mohammad Tauviquirrahman**²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: fachrimaulana003@gmail.com

Abstrak

Katup juga dikenal sebagai engine valve, adalah komponen yang sangat penting pada mesin pembakaran dalam (mesin pembakaran dalam) karena berfungsi untuk membuka atau menutup aliran fluida untuk mengatur, mengontrol, dan mengarahkan laju aliran fluida. Kegagalan katup dapat disebabkan oleh pembebanan termal, peningkatan panas berlebih (overheat), dan kelelahan material, yang dapat menyebabkan retakan, patah, dan pengendapan deposit akibat panas yang tinggi, terutama di area di sekitar lapisan piringan katup. Komponen Katup Masuk yang mengalami bent valve dan timbulnya endapan karbon adalah subjek penelitian. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui mekanisme kegagalan katup masuk melalui pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, pengujian metalografi, pengujian kekerasan, dan simulasi numerik. Hasil pengamatan visual menunjukkan kegagalan yang dialami katup adalah terjadi bent valve dan timbulnya endapan karbon. Dari pengujian komposisi kimia, material katup masuk termasuk kedalam high alloy steel dengan komposisi paduan >8% dan memenuhi standar martensitic stainless steel X45CrSi9-3. Hasil dari pengujian metalografi, fasa katup masuk di daerah gagal dan jauh sama-sama menunjukkan fasa martensit. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai kekerasan 329 HV pada daerah gagal dan 346 HV pada daerah jauh. Hasil simulasi numerik dengan menggunakan Teori Tegangan Normal Maksimum menunjukkan tegangan normal melebihi kekuatan luluh material sehingga menyebabkan terjadinya kegagalan.

Kata Kunci: analisis kegagalan; *bent valve*; endapan karbon; katup masuk; tegangan normal

Abstract

Valves, also known as engine valves, are very important components in internal combustion engines (ICEs) as they function to open or close the fluid flow to regulate, control, and direct the fluid flow rate. Valve failure can be caused by thermal loading, overheating, and material fatigue, which can lead to cracks, fractures, and deposit deposition due to high heat, especially in the area around the valve disk lining. An Inlet Valve component that experienced a bent valve and the generation of carbon deposits was the subject of the study. The purpose of this study is to determine the failure mechanism of the intake valve through visual observation, chemical composition testing, metallographic testing, hardness testing, and numerical simulation. The results of visual observation show that the failure experienced by the valve is a bent valve and the onset of carbon deposits. From chemical composition testing, the valve material is included in high alloy steel with an alloy composition of >8% and meets the martensitic stainless steel X45CrSi9-3 standard. The results of metallographic testing, the phase of the inlet valve in the failed and distant areas both show the martensite phase. The hardness test results show a hardness value of 329 HV in the failed area and 346 HV in the area away from the failure. Numerical simulation results using the Maximum Normal Stress Theory show that the normal stress exceeds the yield strength of the material, causing failure.

Keywords: failure analysis; *bent valve*; carbon deposition; inlet valve; normalized stress

1. Pendahuluan

Dalam engineering materials, analisis kegagalan adalah proses untuk menemukan kegagalan yang tidak diinginkan karena berbagai alasan, seperti mengancam keselamatan manusia, kerugian keuangan, atau faktor lain yang memengaruhi ketersediaan produk atau layanan. Meskipun karakter dan kegagalan material biasanya dapat diprediksi, tidak ada yang dapat menjamin bahwa kesalahan akan terjadi dalam suatu situasi tertentu. Penggunaan material yang tidak sesuai, proses produksi dan desain yang tidak sesuai, dan penyalahgunaan produk adalah beberapa contoh masalah yang sering terjadi [1].

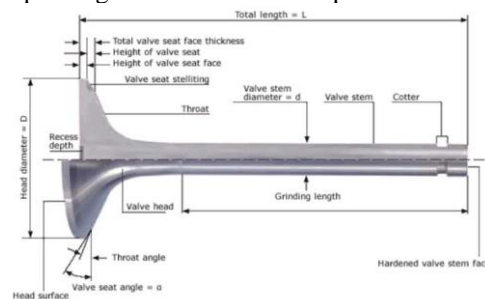
Katup atau engine valve salah satu komponen yang penting pada mesin pembakaran dalam (internal combustion engine) karena berfungsi untuk mengatur, mengontrol dan mengarahkan laju aliran fluida dengan cara membuka atau menutup aliran fluida. Ada beberapa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada katup seperti pembebanan termal, peningkatan panas berlebih (overheated) dan kelelahan material yang mengakibatkan patah, retakan serta pengendapan deposit akibat panas yang tinggi terutama di daerah lapisan piringan katup buang [2]. Pada tugas akhir ini diambil topik mengenai analisis kegagalan valve (katup masuk) yang mengalami bengkok (*bent valve*) dan terdapat endapan kerak karbon, dimana komponen ini berfungsi sebagai pengontrol masuknya campuran bahan bakar dan udara pada saat langkah

hisap pada mobil kapasitas 1300 cc. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui faktor penyebab kegagalan tersebut dan memberikan solusi bila terjadi kasus yang serupa pada komponen dengan material yang sama.

2. Dasar Teori

2.1 Katup

Katup (Valve) merupakan salah satu komponen yang penting pada mesin pembakaran dalam (internal combustion engine) karena berfungsi untuk mengatur, mengontrol dan mengarahkan laju aliran fluida dengan cara membuka atau menutup aliran fluida. Katup terdiri dari dua jenis yaitu katup masuk dan katup buang. Katup masuk berfungsi untuk membuka saluran bahan bakar yang akan masuk pada ruang bakar, katup masuk bekerja atau membuka saat piston akhir langkah buang sampai pada saat piston awal langkah kompresi. Katup buang berfungsi untuk membuka saluran buang yang akan membuang sisa-sisa pembakaran, katup buang ini bekerja atau membuka pada saat piston akhir langkah kerja sampai pada saat piston awal langkah hisap [3]. Desain material katup buang lebih baik daripada katup masuk karena tekanan termal yang diterima oleh katup buang lebih besar dari katup masuk.



Gambar 1. Bagian-bagian katup [4]

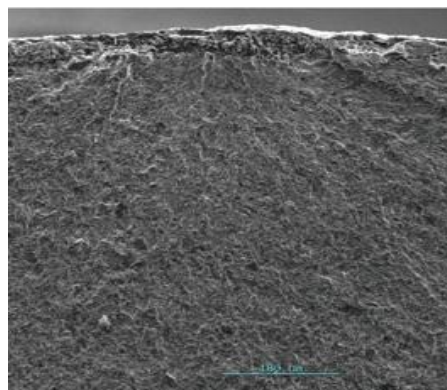
2.2 Material Katup

Pemilihan material dan konstruksi katup mesin tergantung pada operasi spesifik mesin, teknologi dan biaya. Katup masuk dan katup buang umumnya memiliki perbedaan material karena kondisi operasi yang berbeda. Pada katup buang menggunakan material yang lebih baik dibandingkan katup masuk karena pada katup buang dilalui oleh gas pembuangan yang memiliki temperatur tinggi sedangkan pada katup masuk dilalui bahan bakar dan udara yang temperaturnya relatif lebih rendah.

Pada katup masuk yang mengalami tegangan tinggi dan katup buang yang tidak mengalami banyak tegangan umumnya menggunakan baja CrSi paduan tinggi. Baja CrSi juga digunakan untuk batang katup bi-metal. Baja CrMoV dengan ketahanan aus yang luar biasa dan atribut geser untuk katup masuk dengan tegangan tinggi. Baja CrMnNi Austenitik dengan nitrogen tambahan untuk katup masuk dan buang yang mengalami tekanan mekanis dan termal tinggi pada mesin bensin dan diesel. Material ini juga digunakan sebagai bahan untuk kepala katup bi-metal. Baja CrMnNiNb Austenitik dengan ketahanan panas dan aus yang sangat baik. Katup standar untuk truk dengan dan tanpa kursi yang diperkuat. Juga digunakan untuk mobil penumpang turbodiesel [10].

2.3 Kegagalan karena Lelah (*Fatigue*)

Kegagalan karena lelah adalah kerusakan struktural material di bawah beban siklik. Ada dua kategori utama dari kegagalan karena lelah (*fatigue*) yaitu kegagalan mekanis dan kegagalan termal. Kegagalan mekanis terjadi karena tegangan yang berfluktuasi karena beban siklik pada temperatur tinggi sedangkan kegagalan termal karena perubahan siklik pada temperatur material komponen. Kegagalan karena lelah (*fatigue*) terjadi pada tegangan di bawah titik luluh material [9].



Gambar 2. Awal perambatan dari retak fatigue pada katup [5]

2.4 Kegagalan karena Temperatur Tinggi

Katup buang pada mesin bensin beroperasi pada suhu yang tinggi dan mengalami beban siklik. Katup buang umumnya gagal pada bagian batang karena suhu operasi pada katup buang sekitar 720 °C. Beberapa penyebab lain kegagalan katup karena temperatur tinggi adalah panas yang diterima katup melebihi temperatur saat katup dirancang. Hal tersebut akan menyebabkan kegagalan termal yang cepat pada katup masuk dan buang. Pada katup yang mengalami temperatur tinggi nilai kekerasan dari katup akan menurun dan oksidasi permukaan serta *fretting* pada batang katup. Katup yang mengalami kegagalan karena temperatur tinggi terdapat pada Gambar 3 dibawah. Terdapat dua belahan radial utama pada pelat, ada beberapa retakan melingkar kecil pada bidang tirus dari kedua sisi belahan dan banyak ditemukan kerak karbon pada permukaan pelat [6].



Gambar 3. Kegagalan katup karena temperatur tinggi [6]

2.5 Kegagalan karena Korosi-Erosi

Salah satu faktor kegagalan katup pada mesin pembakaran dalam adalah korosi-erosi pada katup buang (*valve guttering*). Gas buang mengalir melintasi permukaan katup menyebabkan terbentuknya radial saluran atau selokan. Distorsi katup, pin muka dan kerusakan degradasi endapan adalah penyebab kebocoran. Kebocoran terjadi ketika endapan yang terkumpul pada permukaan katup mengganggu kedudukan katup [6].



Gambar 4. Kegagalan karena korosi-erosi [6]

2.6 Kegagalan karena Aus

Kegagalan karena aus sering terjadi pada permukaan kedudukan katup dan bagian geser batang pada pemandu batang katup. Dua penyebab utama keausan adalah gaya tumbukan antara permukaan kedudukan katup dan sisipan kedudukan serta pergeseran katup melintasi sisipan kedudukan di bawah pengaruh tekanan pembakaran. Gesekan dan tumbukan menyebabkan keausan permukaan katup [6]. Mekanisme keausan yang umum terjadi adalah perekat, abrasif, *fretting*, erosi, kavitasi dan kelelahan rolling kontak.

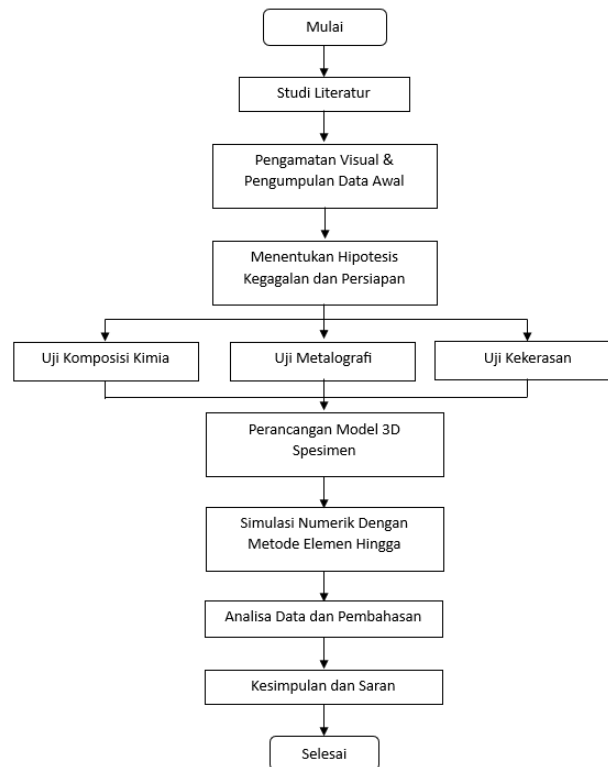


Gambar 5. Kegagalan karena aus [6]

3. Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian

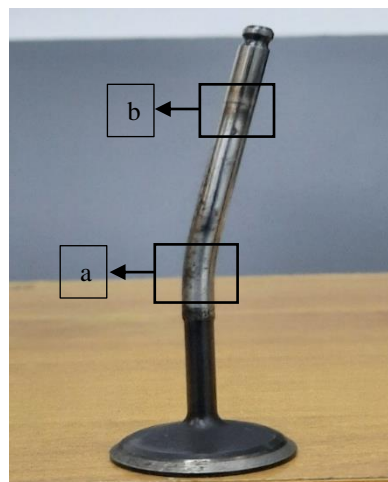
Pada penelitian ini dilakukan beberapa langkah-langkah pengujian untuk melakukan analisis terhadap katup masuk. Gambar 6 dibawah menunjukkan langkah-langkah dalam penelitian ini.



Gambar 6. Diagram alir penelitian

3.2 Pengujian Metalografi

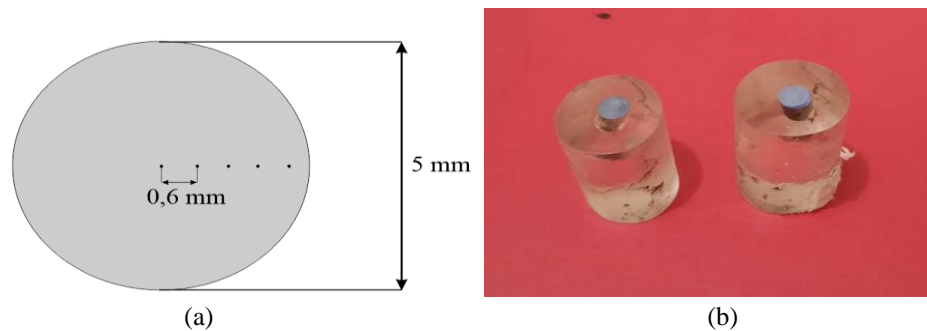
Pengujian Metalografi dilakukan untuk melihat struktur mikro yang terbentuk pada material benda uji. Pengujian ini dilakukan pada satu benda uji dengan dua titik berbeda, pada bagian yang mengalami kegagalan dan yang jauh dari kegagalan. Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Diponegoro dengan menggunakan mikroskop optik. Ada beberapa langkah preparasi benda uji yang dilakukan sebelum melakukan pengujian metalografi, langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut: (1) pemotongan komponen, (2) pembuatan mounting, (3) grinding dan polishing, (4) pengetsaan, dan (5) pengamatan struktur mikro.



Gambar 7. Area pemotongan spesimen katup masuk

3.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi nilai kekerasan pada katup masuk. Pada pengujian ini menggunakan metode Vickers. Pengujian dilakukan dengan pembebanan sebesar 1000 gF dalam waktu 15 dan indentasi dilakukan pada 5 titik, dengan jarak antar titik indentasi kurang lebih 0,6 mm. Penyiapan benda uji pada pengujian ini adalah sama dengan penyiapan benda uji struktur mikro, dimana diperlukan permukaan yang halus untuk mempermudah dalam pengambilan titik uji.



Gambar 8. (a) Titik indentasi pengujian kekerasan pada katup masuk
 (b) Benda uji metalografi dan kekerasan dengan *mounting*

3.4 Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan untuk mengetahui beban yang diterima oleh katup hingga terjadinya deformasi plastis. Simulasi dimulai dengan melakukan perancangan model 3D yang sesuai dengan dimensi katup masuk asli menggunakan software Solidwork 2019 dan melakukan analisis tegangan menggunakan Ansys 2020. Gambar perancangan model 3D dari katup masuk dapat dilihat pada gambar 9 berikut.



Gambar 9. Model 3D katup masuk

Diasumsikan katup masuk mengalami deformasi plastis (bent) yang disebabkan oleh beban tekan dari piston, sehingga gaya yang bekerja pada katup masuk adalah gaya inersia piston (Finersia). Diperoleh nilai gaya inersia piston (Finersia) yang bekerja pada katup masuk sebesar 18.645 N selanjutnya dilakukan analisis numerik menggunakan software Ansys Workbench 2020.

3.5 Spesifikasi Mesin

Untuk menghitung gaya yang bekerja pada katup masuk, dibutuhkan data-data spesifikasi dari mesin mobil. Data spesifikasi mesin mobil kapasitas 1300 cc dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

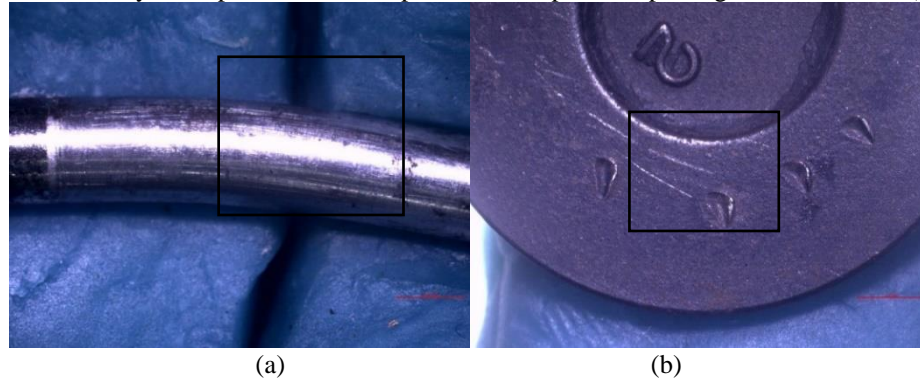
Tabel 1. Spesifikasi Mesin Mobil Kapasitas 1300 cc

Parameter	Besaran
Daya Maksimum	88 PS @ 6000 rpm
Torsi Maksimum	114 Nm @ 4400 rpm
Rasio Kompresi	10 : 1
Volume Silinder	1298 cc
Diameter x Langkah	72,0 mm x 79,7 mm

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Pengamatan Visual

Pengamatan visual yang telah dilakukan pada komponen katup masuk yang mengalami kegagalan dapat dilihat pada Gambar 10 dibawah. Berdasarkan gambar tersebut katup mengalami kegagalan bengkak (*bent valve*) pada bagian batang katup (a) dan timbulnya endapan karbon serta permukaan kepala katup mengalami kerusakan (b).



Gambar 10. Hasil pengamatan visual terhadap katup masuk (a) katup mengalami bengkak (*bent valve*) (b) terdapat endapan karbon dan bagian rusak pada permukaan katup

Dari hasil pengamatan visual endapan karbon pada permukaan katup masuk menunjukkan bahwa terjadi pembakaran yang tidak sempurna pada siklus pembakaran. Endapan karbon berpengaruh dalam peningkatan rasio kompresi, menyebabkan rasio kompresi meningkat dan temperatur pada ruang bakar akan naik. Selain itu endapan karbon menyebabkan kemampuan mesin bermasalah, konsumsi bahan bakar meningkat dan mengurangi daya tahan pada material [8]. Selain itu faktor penyebab terjadinya kontak antara piston dengan katup adalah endapan karbon. Pelumas yang kotor dapat masuk ke celah antara batang katup (*valve stem*) dan *guide stem*, yang kemudian mengendap. Akibatnya, katup menjadi lengket dan tidak tertutup dengan baik.

4.2 Hasil Pengujian Komposisi Kimia (Spektrometri)

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi dan unsur yang terkandung dalam material benda uji. Berdasarkan hasil uji diketahui unsur-unsur yang terkandung material dan dapat mengetahui karakteristik dari Katup Masuk seperti, kekerasan (*hardness*), kekuatan (*strength*), keuletan (*ductility*) dan ketangguhan (*toughness*). Bagian yang diuji pada katup masuk adalah bagian permukaan kepala katup. Berikut adalah hasil pengujian komposisi kimia dan standar komposisi kimia dari katup masuk mobil kapasitas 1300 CC.

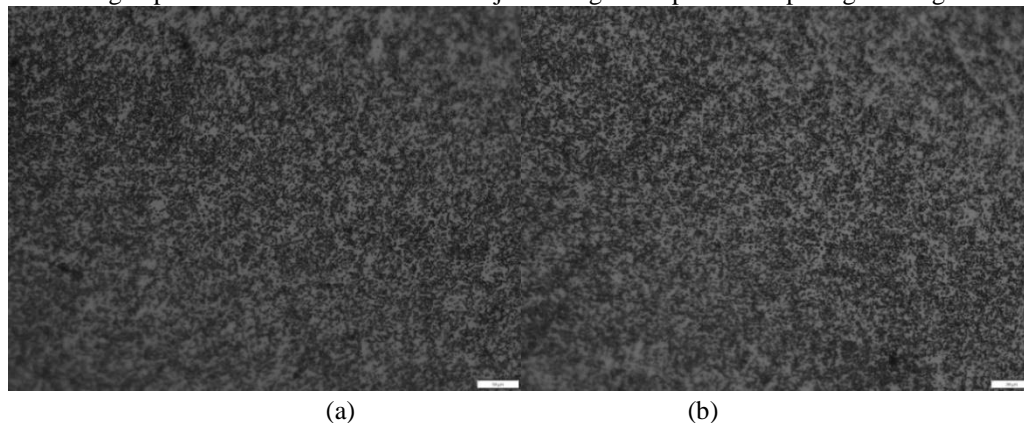
Tabel 2. Hasil Pengujian Komposisi Kimia (Spektrometri)

Unsur	Kandungan (%)	
	UNS S65007 / X45CrSi9-3	Spesimen Katup Masuk
Fe	<i>Balance</i>	88,6
C	0,45-0,55	0,453
Si	1-2	1,92
Mn	Max 0,6	0,506
P	Max 0,04	0,0451
S	Max 0,03	<0,0030
Cr	7,5-9,5	7,51
Mo	-	0,149
Ni	Max 0,5	0,181
Cu	Max 0,3	0,0931
Al	-	<0,0020
Co	-	0,0158
Nb	-	0,0040
Ti	-	0,0013
V	-	0,0457
W	-	<0,010
B	-	<0,001
Sn	-	0,0068

Dari tabel data hasil pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan berdasarkan kandungan paduan material memiliki unsur paduan >8%. Hasil ini dapat diketahui jenis material adalah *high alloy steel*. Hasil pengujian spektrometri di atas menunjukkan bahwa komposisi kimia logam yang digunakan untuk katup masuk diklasifikasikan sebagai UNS S65007 (*Unified Numbering System*). UNS menggunakan enam digit untuk menggambarkan logam dalam hal komposisi kimia, proses pembuatan, dan perlakuan panas. Digit pertama terdiri dari huruf yang menunjukkan jenis logam, seperti S untuk baja tahan karat (*stainless steel*). Dalam penamaan lain UNS S65007 memiliki komposisi kimia yang sama dengan DIN (*Deutsches Institut für Normung*) X45CrSi9-3. Baja jenis UNS S65007/ X45CrSi9-3 digunakan untuk material pembuatan katup masuk (*valve steel*) [7].

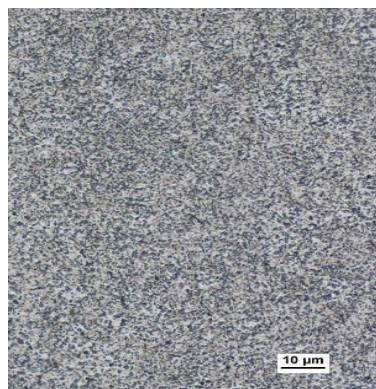
4.3 Hasil Pengujian Metalografi

Dalam pengujian metalografi, dilakukan pengamatan struktur mikro terhadap spesimen yang di uji menggunakan mikroskop mikro dengan perbesaran tertentu. Hasil dari uji metalografi dapat dilihat pada gambar-gambar dibawah ini.



Gambar 11. Katup masuk (a) yang mengalami kegagalan (bent valve)
 (b) tidak mengalami kegagalan perbesaran 1000x

Berdasarkan hasil pengujian metalografi di atas struktur mikro katup masuk yang mengalami kegagalan (bent valve) dan yang tidak mengalami kegagalan memiliki struktur mikro dengan fasa yang sama yaitu martensit. Hasil fasa martensit juga sesuai dengan proses produksi material yang mengalami proses heat treatment berupa hardening dan tempering untuk meningkatkan sifat mekanik dari material. Struktur mikro ini dapat dibandingkan dengan baja X45CrSi9-3, yang juga mengalami heat treatment hardening dan tempering dengan bentuk fasa yang sama, martensit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.

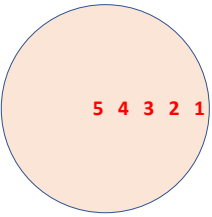


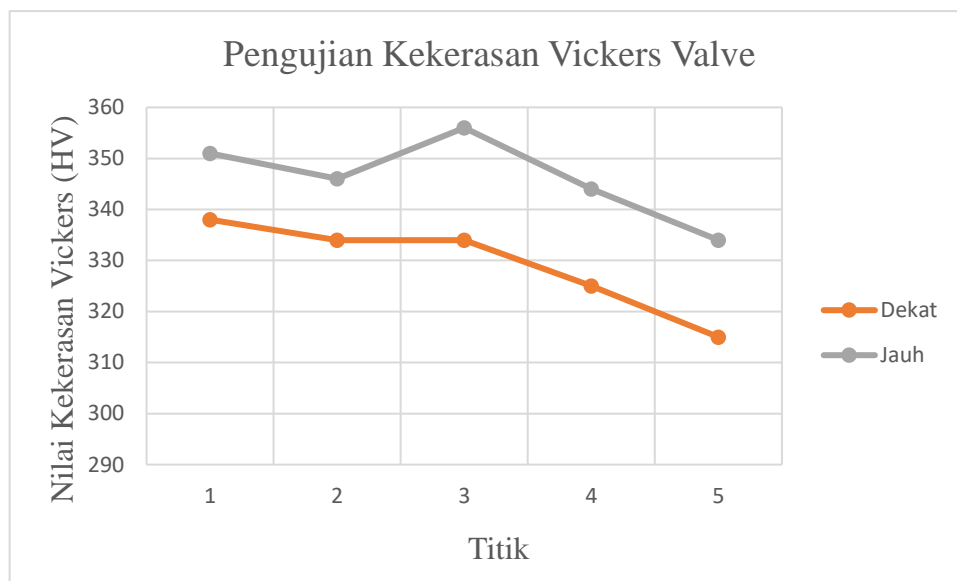
Gambar 12. Struktur mikro X45CrSi9-3 [7]

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan (Vickers)

Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan dengan menggunakan Micro Hardness Vickers Tester pada katup masuk yang mengalami kegagalan dan bagian yang tidak. Pada masing-masing spesimen, pengujian kekerasan dengan metode Vickers dilakukan di lima titik terpisah dengan pembebanan 100 gf dan waktu indentasi 15 detik. Hasil pengujian kekerasan disajikan pada Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Kekerasan (*Vickers*)

Area	Kode Titik	Variasi Spesimen (HV)	
		(a) Gagal	(b) Tidak Gagal
	1	338	351
	2	334	346
	3	334	356
	4	325	344
	5	315	334



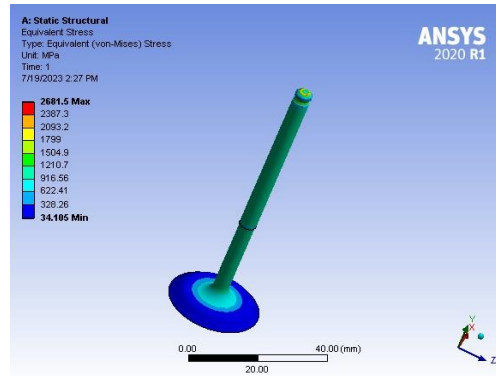
Gambar 13. Grafik nilai kekerasan katup masuk

Dari grafik di atas, terdapat nilai perbedaan pada nilai kekerasan pada daerah yang mengalami kegagalan dan yang tidak mengalami kegagalan meskipun perbedaan tidak signifikan. Pada operasi mesin bensin, terdapat perbedaan temperatur operasi antara bagian yang mengalami kegagalan dengan yang tidak mengalami kegagalan, hal itu yang menyebabkan terjadi penurunan nilai kekerasan pada bagian yang mengalami kegagalan. Kekerasan standar X45CrSi9-3 baja tahan karat berkisar antara 25 dan 35 HRC, atau 266 hingga 360 HV. Pada katup masuk yang diuji, nilai kekerasan rata-rata 329,2 HV untuk katup masuk yang mengalami kegagalan dan 346,2 HV untuk katup masuk yang tidak mengalami kegagalan. Nilai kekerasan kedua katup ini tetap dalam rentang standar material baja tahan karat X45CrSi9-3.

Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa material yang dipilih dan prosedur pembuatan komponen katup masuk sesuai dengan standar. Untuk mengetahui penyebab spesifik kegagalan katup masuk, simulasi numerik dengan metode elemen hingga perlu dilakukan.

4.5 Hasil Simulasi Numerik Metode Elemen Hingga

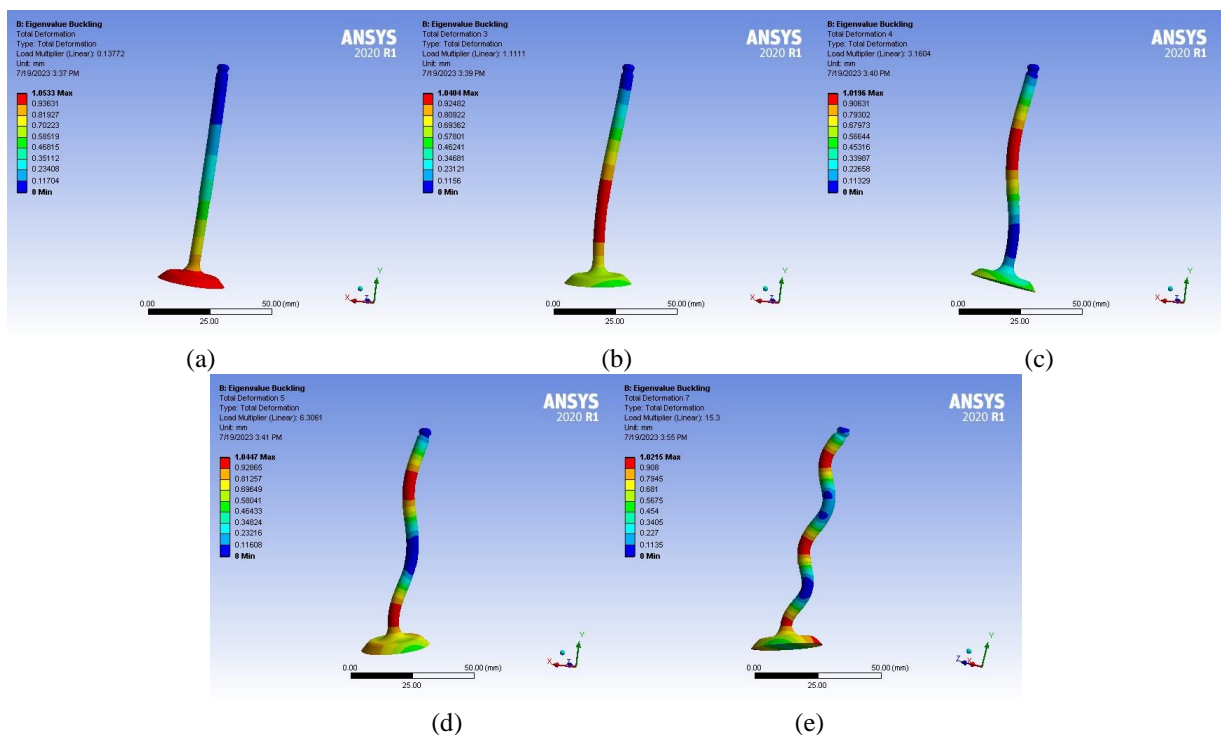
Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisis tegangan yang terjadi pada katup masuk dan mode buckling yang terjadi. Langkah awal yang dilakukan pada simulasi numerik yaitu melakukan meshing terhadap model 3D yang telah ada.



Gambar 14. Hasil simulasi Finite Elements Methods katup masuk

Dari gambar 14 diatas hasil simulasi diketahui bahwa nilai tegangan maksimum yang terjadi pada katup masuk jika diberi Finersia = 18645 N adalah 2681 MPa dan terjadi pada ujung katup masuk, sedangkan pada batang katup masuk tegangan yang terjadi antara 917 – 1210 MPa. Yield strength (S_y) dari komponen material adalah 700 MPa. Sehingga berdasarkan teori tegangan maksimum pada komponen ini dapat terjadi kegagalan karena tegangan normal maksimum melebihi kekuatan luluh dari material.

Pada analisis buckling, beberapa mode dari kegagalan katup masuk diamati. Berikut merupakan hasil analisis dari beberapa mode kegagalan yang terjadi dapat dilihat pada gambar-gambar dibawah ini.



Gambar 15. Beberapa hasil analisis *buckling* pada katup masuk

Dari hasil analisis eigenvalue buckling, kegagalan dari katup masuk. Hasil analisis pada gambar (b), buckling yang terjadi pada mode 2 ini lebih menyerupai kegagalan katup masuk yang terjadi di lapangan. Kegagalan terjadi pada bagian batang katup masuk, dimana nilai beban buckling sebesar 20.717 N atau 1,11 kali lebih besar dari pembebanan awal sebesar 18.645 N.

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian, diketahui bahwa komposisi material komponen katup masuk memiliki kandungan karbon 0,453% termasuk ke dalam baja karbon sedang (medium carbon steel). Katup masuk memiliki unsur paduan >8% sehingga katup masuk termasuk high alloy steel. Material katup masuk diklasifikasikan sebagai baja X45CrSi9-3. Dimana struktur mikro yang terbentuk yaitu fasa martensit, dikarenakan material mengalami proses perlakuan panas (heat

treatment) berupa hardening dan tempering. Nilai distribusi kekerasan dari material katup masuk sekitar 330-360 HV. Berdasarkan hasil pengujian diatas kegagalan yang terjadi pada katup masuk bukan disebabkan oleh kesalahan material. Mekanisme kegagalan katup masuk yang mengalami deformasi plastis dikarenakan beban tekan piston yang diterima oleh katup masuk menyebabkan tegangan yang terjadi melebihi kekuatan luluh (yield strength) katup masuk. Pada penelitian ini endapan karbon pada batang katup (valve stem) dapat menjadi salah satu faktor penyebab terjadinya kontak antara piston dengan katup.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASM, M. H. (2002). *Failure Analysis and Prevention-vol.11*. ASM International Materials Park, Ohio, USA.
- [2] Usman, R. (2016) “Analisis Kegagalan Katup Buang pada Mesin Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)”, *STRING*, 1: 97-106.
- [3] Hertharia, M. (2012) “Analisa Pengaruh Kapasitas Udara Untuk Campuran Bahan Bakar Terhadap Prestasi Mesin Diesel”, *ARIKA*, 1: 19-26.
- [4] Narayana, K. V., Rao, K., & Shekar, D. (2015) “Failure Analysis of IC Engine Valve by Using FEA”, *Research Scholar*, Department Of Thermal Engineering, Kits, Peddapuram(M) Tirupathi Village, India. Divili 533-433, Eg Dt,AP.
- [5] Voorwald, H. J. C., Coisse, R. C., & Cioffi, M. O. H. (2011) “Fatigue Strength of X45CrSi93 Stainless Steel As Internal Combustion Engine Valves”, *Procedia Engineering*, 10: 1256-1261.
- [6] Lavhale, Y. K., & Salunke, P. J. (2014) “Overview of Failure Trend of Inlet & Exhaust Valve”, *IJMET (Internasional Journal of Mechanical Engineering and Technology)*, 5(3), 104–113.
- [7] Tomaszewski, S., Grygier, D., & Dziubek, M. (2023) “Assessment of engine valve materials”, *Combustion Engines*, X, 0–3.
- [8] Stępień, Z. (2014) “Intake valve and combustion chamber deposits formation – the engine and fuel related factors that impacts their growth”, *Nafta-Gaz*, 70(4), 236–242.
- [9] Kazymyrovych, V. (2009). *Very High Cycle Fatigue of Engineering Materials*. www.kau.se
- [10] Mahle Original. (2015). *Technical Information Valves*. <https://www.techtips.ie/MAHLE/engine-valves---fitting-recommendations-and-technical-terms.pdf>