

ANALISIS KEGAGALAN VALVE IN (KATUP MASUK) PADA MOTOR KAPASITAS 155 CC

*Vinder Harapan Pardosi¹, Sri Nugroho², Gunawan Dwi Haryadi²

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: vinderharapanpardosi@students.undip.ac.id

Abstrak

Kegagalan material terjadi ketika komponen logam mengalami kerusakan akibat tekanan mekanis yang berulang, perubahan suhu yang ekstrem, atau paparan lingkungan yang korosif. Ini bisa menyebabkan keausan, retak, atau kerusakan total pada komponen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penyebab kegagalan pada katup masuk (*valve in*) motor 4 tak berkapasitas 155 cc yang bengkok. Dalam hal ini, dilakukan evaluasi untuk memahami faktor-faktor penyebab kegagalan, dampak panas berlebih, dan pemeliharaan yang tidak teratur. Evaluasi yang dilakukan menggunakan pengujian komposisi kimia dan metalografi, untuk melihat struktur material dan sifat mekanis katup. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa katup yang terbuat dari baja tahan karat X40CrSiMo10-2, sudah melalui proses pengerasan (*hardening*) dan tempering, sehingga memiliki struktur yang keras dan sesuai standar. Simulasi menggunakan metode elemen juga menunjukkan tegangan maksimum sebesar 746,68 MPa, melebihi kekuatan luluh material sebesar 560 MPa, sehingga menyebabkan katup berubah bentuk secara permanen. Pengujian buckling menyebabkan batang katup mengalami kegagalan pada beban sebesar 29.361,7 N. Hal ini mengindikasikan bahwa kerusakan pada katup masuk diakibatkan karena adanya benturan dengan piston serta keausan pada batang katup, bukan karena cacat material, sehingga dibutuhkan pemeliharaan yang teratur dan pemilihan material yang sesuai untuk menjaga performa dan keandalan katup dalam mesin.

Kata kunci: *buckling*; deformasi plastis; katup masuk; kegagalan material; simulasi numerik

Abstract

Material failure occurs when metal components are damaged due to repeated mechanical stress, extreme temperature changes, or exposure to corrosive environments. This can lead to wear, cracks, or complete breakdown of the component. This study aims to determine the causes of failure in the intake valve of a 155 cc four-stroke engine, which has become bent. An evaluation was conducted to understand the contributing factors, the effects of excessive heat, and irregular maintenance. The evaluation involved chemical composition and metallographic testing to analyze the material structure and mechanical properties of the valve. The results showed that the valve, made of stainless steel X40CrSiMo10-2, had undergone hardening and tempering processes, giving it a hard structure that meets the standards. Numerical simulations using the finite element method indicated a maximum stress of 746.68 MPa, exceeding the material's yield strength of 560 MPa, causing the valve to permanently deform. Buckling tests revealed that the valve stem failed under a load of 29,361.7 N. This indicates that damage to the intake valve is caused by impact with the piston and wear on the valve stem, not due to material defects. As a result, regular maintenance and appropriate material selection are necessary to maintain the valve's performance and reliability in the engine.

Keywords: *buckling*; intake valve; material failure; numerical simulation; plastic deformation

1. Pendahuluan

Kegagalan material terjadi ketika material atau logam pada suatu komponen mengalami degradasi yang disebabkan oleh beberapa faktor, seperti tekanan mekanis berulang, perubahan suhu ekstrem, atau paparan lingkungan yang korosif. Akibatnya, komponen dapat mengalami keausan, kelelahan, retak, bahkan kerusakan total. Untuk mengidentifikasi penyebab utama kegagalan material secara akurat, diperlukan proses analisis kegagalan [1]. Analisis ini bertujuan untuk memastikan komponen dapat beroperasi dengan efisien dan aman selama masa pakainya, serta menjadi dasar dalam pengambilan keputusan terkait perawatan, pemilihan material, dan desain komponen agar kegagalan operasional yang berkelanjutan dapat dihindari di masa mendatang.

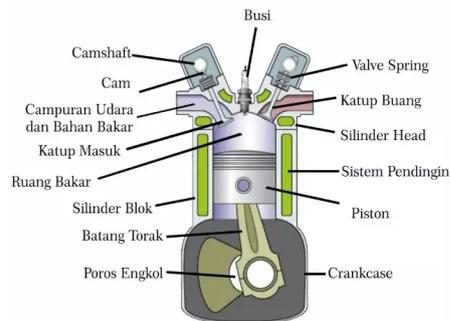
Salah satu komponen penting dalam mesin pembakaran dalam adalah katup, yang berfungsi mengontrol aliran fluida, baik udara maupun gas buang. Pada mesin 4 tak, terdapat dua jenis katup, yaitu katup masuk dan katup buang. Katup masuk mengatur aliran udara ke dalam silinder, sementara katup buang mengeluarkan gas sisa pembakaran. Katup

masuk sering mengalami kegagalan akibat pembebanan termal, peningkatan panas, serta kelelahan material. Untuk mengatasi masalah ini, studi kasus pada Tugas Akhir ini menganalisis kegagalan katup masuk pada motor 4 tak 155 cc, khususnya batang katup yang bengkok, guna mengetahui penyebab kegagalan dan mencari solusi yang tepat.

2. Dasar Teori

2.1 Katup (*valve*)

Katup (*valve*) adalah salah satu komponen utama dalam sistem pembakaran internal mesin yang berperan dalam mengatur aliran udara serta gas hasil pembakaran masuk dan keluar dari ruang bakar. Katup terbuat dari logam yang tahan terhadap suhu tinggi dan terpasang pada kepala silinder mesin. Secara umum, katup terbagi menjadi dua jenis utama yaitu katup masuk dan katup buang [2]. Katup masuk berfungsi mengatur aliran udara atau campuran udara dan bahan bakar ke dalam silinder mesin dengan cara membuka pada saat langkah hisap dan menutup pada langkah kompresi. Katup buang bertujuan untuk mengontrol pengeluaran gas hasil pembakaran dari dalam silinder ke sistem pembuangan dengan cara membuka pada langkah buang dan menutup saluran pembuangan dari dalam ruang bakar.



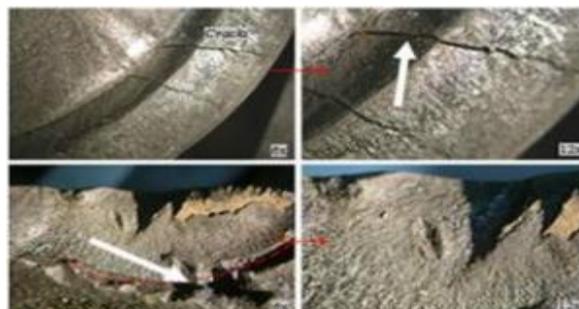
Gambar 1. Komponen mesin 4 tak (Merriam-Webster, Inc., 2006)

2.2 Material Katup

Baja tahan karat digunakan sebagai material utama dalam pembuatan katup motor dan mobil karena mengandung kromium dan ferrit, yang memberikan sifat tahan noda pada permukaan oksida. Baja tahan karat memiliki kemampuan untuk menahan korosi atau karat berkat lapisan oksida yang terbentuk dipermukaannya. Unsur utama yang memberikan sifat tahan karat ini adalah kromium, yang ketika teroksidasi membentuk lapisan oksida keras dan padat di permukaan baja, berfungsi sebagai pelindung dari korosi. Baja tahan karat juga mengandung ferrit, fase dalam struktur kristal baja dengan kandungan atom besi tinggi yang tersusun secara teratur, mempengaruhi sifat mekanik dan ketahanan korosi baja. Fase ferrit muncul pada baja dengan sedikit karbon, berperan dalam menentukan sifat fisik seperti kekuatan, kekerasan, dan kemampuan deformasi. Kromium bereaksi dengan oksigen untuk membentuk lapisan oksida tipis dan stabil, sementara kombinasi dengan ferrit menghasilkan lapisan oksida yang stabil dan homogen, sangat tahan terhadap korosi dan melindungi baja dari oksidasi lebih lanjut.

2.3 Kegagalan karena Lelah (*Failure due to Fatigue*)

Kegagalan karena lelah adalah fenomena yang terjadi pada material ketika mengalami kerusakan struktural akibat beban yang bersifat siklik atau berulang. Kerusakan struktural yang terjadi pada kegagalan karena lelah disebabkan oleh akumulasi regangan plastis mikroskopis di dalam material. Ketika material menerima beban siklik, seperti pada kondisi beban yang berubah-ubah atau beban yang berulang, membuat daerah kelemahan mikroskopis dalam material mengalami deformasi plastis [3]. Akumulasi regangan plastis ini pada akhirnya menyebabkan terbentuknya retakan mikroskopis, yang kemudian dapat berkembang menjadi retakan makroskopis atau retakan yang lebih besar. Retakan ini akan terus berkembang seiring dengan berlangsungnya siklus beban, hingga akhirnya menyebabkan kegagalan struktural pada material [4].



Gambar 2. Retak pada katup akibat dari kelelahan (Ridwan Usman, 2016)

2.4 Kegagalan karena Temperatur Tinggi

Pada saat mesin beroperasi, suhu di sekitar katup buang dapat mencapai sekitar 720°C atau bahkan lebih tinggi tergantung pada kondisi operasional dan performa mesin. Suhu tinggi dapat menyebabkan berbagai fenomena yang berpotensi menyebabkan kegagalan pada katup buang. Salah satu titik kegagalan yang umum terjadi pada katup buang adalah pada bagian batangnya. Suhu tinggi juga dapat menyebabkan peningkatan laju difusi atom dalam material, yang pada gilirannya dapat menyebabkan perubahan struktur mikro dalam material katup buang. Ketika katup terpapar pada suhu yang tinggi di luar batas toleransi, berbagai fenomena dapat terjadi dalam struktur material yang dapat menyebabkan keretakan dan akhirnya kegagalan. Penyebab awal adalah suhu yang tinggi dapat meningkatkan laju reaksi kimia dalam material. Hal ini dapat menyebabkan perubahan struktur mikro dan makro dalam material, termasuk perubahan dalam kekerasan, kekuatan, dan ketahanan terhadap tegangan.

2.5 Kegagalan karena Korosi-Erosi

Korosi-erosi yang terjadi pada katup buang, juga dikenal sebagai *valve guttering*. Fenomena ini terjadi ketika gas buang mengalir melintasi permukaan katup, menyebabkan terbentuknya saluran atau selokan radial pada permukaan katup. Distorsi pada katup, kerusakan pada permukaan pin, dan degradasi akibat endapan adalah penyebab utama terjadinya kebocoran pada katup. Kebocoran ini terjadi ketika endapan yang terkumpul pada permukaan katup mengganggu kedudukan katup, sehingga menghalangi penutupan yang sempurna dan menyebabkan kebocoran gas buang. Kerak yang terbentuk pada katup dapat menyebabkan terjadinya korosi pada permukaan katup. Korosi ini terjadi ketika kerak tersebut bereaksi dengan bahan kimia yang terdapat dalam lingkungan operasional mesin, terutama ketika katup terkena uap air atau gas-gas korosif[5].

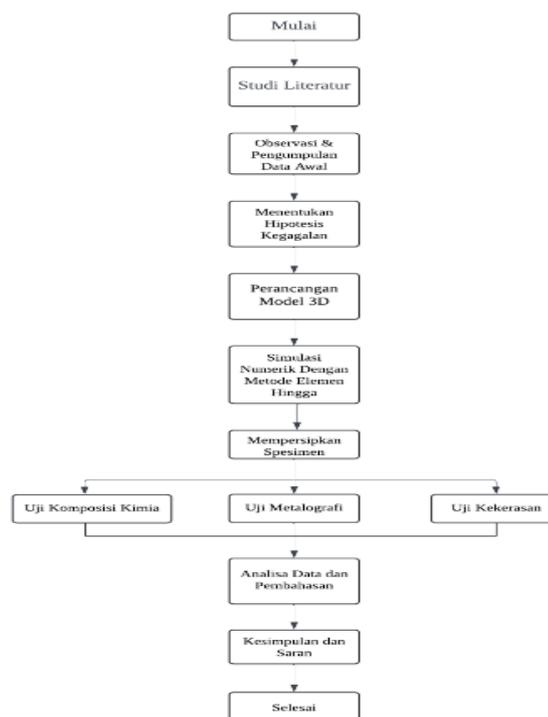
2.6 Kegagalan karena Aus

Kegagalan akibat keausan biasanya terjadi pada permukaan dudukan katup dan batang katup, khususnya di area yang mengalami kontak selama pergerakan katup. Dua faktor utama yang menyebabkan keausan adalah gaya benturan antara permukaan dudukan katup dan dudukannya, serta gesekan antara katup dan dudukan selama proses pembakaran. Gaya benturan terjadi setiap kali katup menutup terhadap dudukannya, menyebabkan tekanan tinggi pada titik kontak yang dapat merusak permukaan material. Benturan berulang ini mengakibatkan material permukaan menjadi aus, mengurangi kemampuan katup untuk menutup rapat dan mengakibatkan kebocoran gas. Gesekan terus-menerus ini mengikis material permukaan katup, menyebabkan permukaan menjadi kasar dan tidak rata. Beberapa mekanisme keausan yang umum terjadi meliputi perekat, abrasif, fretting, erosi, kavitasi, dan kelelahan rolling kontak.

3. Metodologi Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa langkah pengujian yang harus dilakukan untuk menganalisis katup. Langkah-langkah pengujian dalam menganalisis katup dapat dilihat pada diagram alir Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

3.2 Uji Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia menggunakan spektrometer yang bertujuan untuk menguji komposisi kimia dan menentukan kandungan unsur-unsur dalam sebuah material, yang dilakukan di Laboratorium Material Teknik Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Unsur-unsur ini berpengaruh pada sifat atau karakteristik material tersebut, seperti kekerasan (*hardness*), kekuatan (*strength*), keuletan (*ductility*), kelelahan (*fatigue*), dan ketangguhan (*toughness*). Melalui pemahaman komposisi kimia suatu material, dapat diketahui sifat atau karakteristiknya.

3.3 Uji Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Material Teknik Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro untuk mempelajari struktur mikro dari material yang diuji. Pengujian metalografi dimulai dengan mengampelas dan memoles sampel uji, kemudian mengetsa dengan larutan kimia yang sesuai untuk setiap material [6]. Setelah proses etsa, butir-butir material akan terlihat. Pada awalnya, etsa memperlihatkan batas butir, namun lebih lanjut etsa akan menunjukkan bayangan yang berbeda antara butir yang satu dengan yang lain.

3.4 Uji Kekerasan

Dalam proses pengujian, metode yang digunakan adalah metode Vickers (HV), tujuannya untuk menentukan nilai distribusi kekerasan dari suatu komponen. Metode Vickers merupakan salah satu teknik yang digunakan dengan cara mendorong sebuah penetrator berpola berbentuk piramida ke permukaan bahan dengan gaya yang ditentukan, dan kemudian mengukur lebar bekas penetrasi. Selain itu, metode ini digunakan untuk mengukur kekuatan dan ketahanan bahan terhadap deformasi atau kerusakan yang mungkin terjadi pada komponen kemudian dilakukan evaluasi kualitas dan performa komponen serta memastikan kepatuhan terhadap standar yang berlaku [7].

3.5 Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisis tegangan dan mode buckling yang terjadi pada katup masuk. Metode numerik merupakan pendekatan matematis yang memecahkan masalah melalui operasi hitungan. Dalam praktiknya, metode ini melibatkan banyak operasi hitungan yang diulang-ulang, sehingga diperlukan bantuan komputer untuk mengeksekusi perhitungan tersebut. Simulasi dimulai dengan perancangan model 3D dengan aplikasi Solidworks 2020 dan analisis tegangan menggunakan Ansys 2020.

3.6 Spesifikasi Katup Motor Kapasitas 155 CC

Pada pengujian katup masuk yang digunakan dalam motor berkapasitas mesin sebesar 155 CC. Dalam penelitian ini, bahan uji yang digunakan adalah katup masuk yang mengalami kegagalan pada bagian batangnya. Berikut ini spesifikasi mengenai katup masuk motor kapasitas 155 CC dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Katup Masuk Motor Kapasitas 155 CC

<i>Name</i>	<i>Intake Valve</i>
OEM Number	BK6-E2111-00
Head Diameter (mm)	20,50
Stem Diameter (mm)	5,00

3.7 Spesifikasi Mesin Motor

Dalam penelitian ini spesifikasi mesin telah mengalami perubahan atau modifikasi. Hal ini juga akan berpengaruh terhadap performa dan usia pakai komponen pada mesin. Berikut spesifikasi mesin dan perbandingan dari mesin standard ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Mesin Motor

Parameter	Besaran	
	Standar Pabrik	Modifikasi
Volume Silinder	155,09 cc	182,89 cc
Rasio Kompresi	11,6: 1	12,8: 1
Diameter x Langkah	58 mm x 58,7 mm	63 mm x 58,7 mm
Daya Maksimum	11,3 kW / 8000 rpm	
Torsi Rasio	13,9 Nm / 6500 rpm	

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Pengamatan Visual

Pengamatan visual terhadap komponen katup masuk yang dilihat adalah hasil ketika komponen katup masuk mengalami kegagalan, yang terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4. Katup mengalami bengkok (*bent valve*)

Berdasarkan Gambar 4 kegagalan katup masuk mengakibatkan dua hal yakni (a) batang katup mengalami deformasi atau pembengkokan, yang disebut sebagai "*bent valve*". Batang katup telah melengkung atau berubah bentuk, yang disebabkan oleh tekanan berlebihan atau benturan saat operasional.

4.2 Hasil Pengujian Komposisi Kimia (Spektrometri)

Proses pengujian komposisi kimia dilakukan untuk menentukan unsur-unsur kimia yang menyusun spesimen yang sedang diuji. Selain itu, tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh data mengenai komposisi material spesimen dan kemudian membandingkannya dengan standar yang telah ditetapkan. Dengan melakukan perbandingan ini, dapat diketahui apakah spesimen tersebut memenuhi standar kualitas yang diperlukan atau tidak. Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Material Teknik, Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro. Hasil dari pengujian ini, termasuk komposisi kimia dari katup masuk motor dengan kapasitas mesin 155 CC serta standar komposisi yang harus dipenuhi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Komposisi Kimia (Spektrometri)

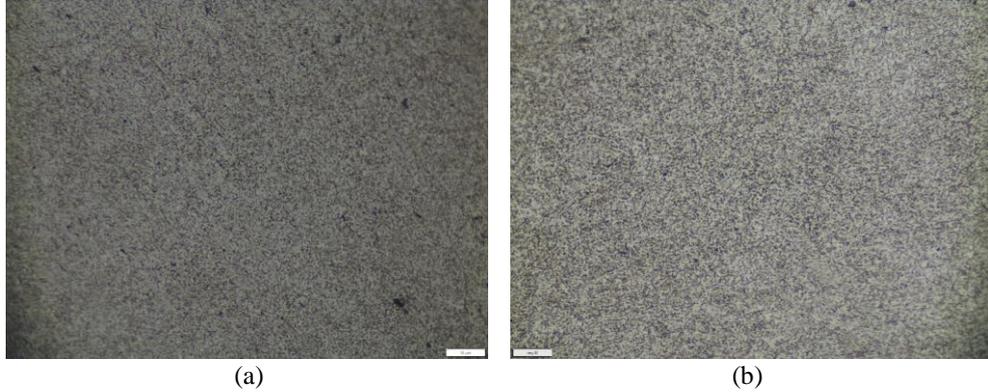
Unsur	Kandungan (%)	
	X40crSiMo10-2	Spesimen Katup Masuk
Fe		90,6
C	0,35- 0,45	0,575
Si	1,8- 2,5	1,99
Mn	≤0,6	0,535
P	≤0,03	0,0344
S	≤0,03	0,0113
Cr	9- 11	>5,50
Mo	0,8- 1,3	0,204
Ni		0,252
Al		0,0047
Co		0,0198
Cu	≤0,3	0,120
Nb		0,0414
Ti		0,0056
V		0,0501
W		0,0156
Pb		0,0033
Sn		0,0124
B		0,0018
Zr		0,0063
Zn		0,0239
Bi		0,0017

Pernyataan ini menjelaskan secara rinci hasil pengujian komposisi kimia dari material katup masuk, yang menunjukkan bahwa material tersebut tergolong dalam kategori "*high alloy steel*" karena material katup masuk memiliki unsur paduan lebih dari 8% dan kandungan karbon pada material katup masuk sebesar 0,575% menunjukkan bahwa material ini termasuk dalam kategori *medium carbon steel*, Baja karbon sedang ini dapat meningkatkan sifat mekaniknya melalui proses perlakuan panas seperti austenitizing, quenching, dan tempering, yang mengubah struktur mikro baja menjadi martensit, membuatnya lebih kuat dibandingkan baja karbon rendah. Baja dengan klasifikasi ini sering digunakan

untuk pembuatan komponen yang memerlukan ketahanan tinggi, seperti katup (*valve steel*), menunjukkan kesesuaian material ini untuk aplikasi teknis yang menuntut ketahanan dan kekuatan.

4.3 Hasil Pengujian Metalografi

Dalam pengujian metalografi, struktur mikro dari material yang diuji diamati menggunakan mikroskop dengan tingkat perbesaran tertentu.



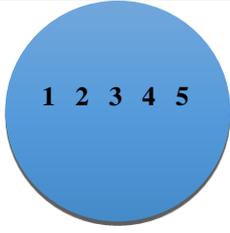
Gambar 5 Katup masuk yang mengalami kegagalan (*bent valve*) dengan perbesaran 1000x
 (b) Katup masuk tidak mengalami kegagalan dengan perbesaran 1000x

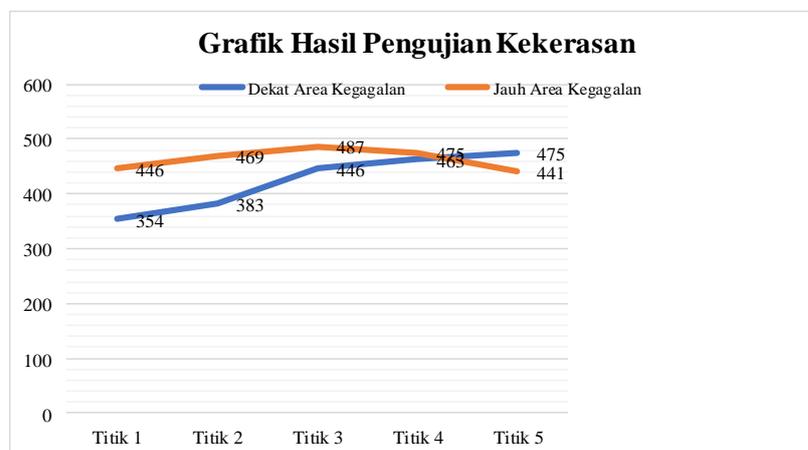
Berdasarkan hasil pengujian metalografi yang terdapat pada Gambar 5 didapatkan bahwa katup masuk yang mengalami kegagalan (*bent valve*) maupun yang tidak mengalami kegagalan memiliki struktur mikro yang sama, yaitu fasa martensit.

4.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada katup masuk yang mengalami kegagalan serta pada bagian katup yang tidak mengalami kegagalan, menggunakan alat Micro Hardness Vickers Tester. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kekerasan material katup dengan cara mengindentsikan permukaan spesimen menggunakan beban 100 *gram-forces* (gf) selama 15 detik. Setiap spesimen diuji pada lima titik yang berbeda untuk mendapatkan data yang lebih representatif mengenai distribusi kekerasan di seluruh permukaan katup. Hasil dari pengujian ini kemudian disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Area	Kode Titik	Variasi Spesimen (HV)	
		Dekat Area Kegagalan	Jauh Area Kegagalan
	1	354	446
	2	383	469
	3	446	487
	4	463	475
	5	475	441



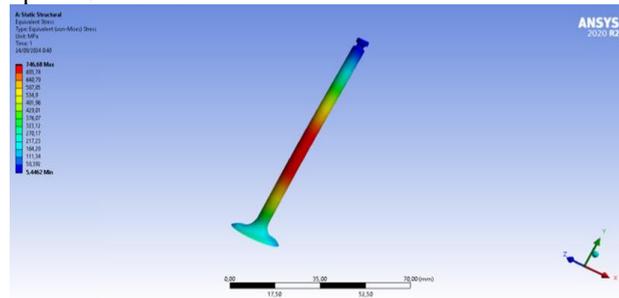
Gambar 6. Grafik nilai kekerasan katup masuk

Berdasarkan Gambar 6 mengenai grafik nilai kekerasan, terdapat perbedaan antara nilai kekerasan daerah katup masuk yang mengalami kegagalan dengan nilai kekerasan daerah katup masuk yang tidak mengalami kegagalan, meskipun perbedaan nilai tersebut tidak begitu signifikan. Hal ini dapat dilihat pada perbedaan suhu operasi mesin bensin antara bagian yang gagal dan yang tidak gagal, yang menyebabkan penurunan kekerasan pada bagian yang mengalami kegagalan. Untuk material baja tahan karat X40crSiMo10-2 standar kekerasan berkisar antara 230 HB sampai 450 HB atau sekitar 218 HV sampai 427 HV [8]

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekerasan rata-rata katup masuk yang mengalami kegagalan adalah 424,2 HV, sementara katup masuk yang tidak mengalami kegagalan memiliki kekerasan rata-rata 453,6 HV. Meskipun terdapat perbedaan nilai kekerasan, kedua nilai tersebut tetap berada dalam rentang standar kekerasan untuk material baja tahan karat X40crSiMo10-2.

4.5 Hasil Simulasi Numerik Metode Elemen Hingga

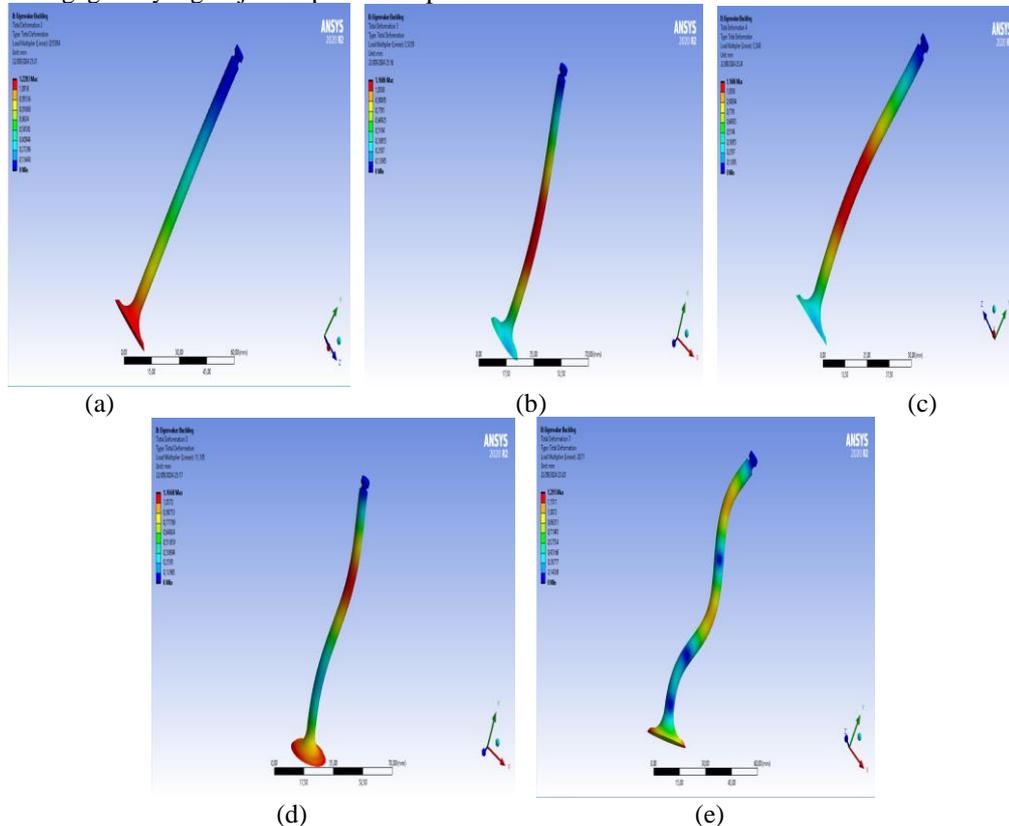
Dari hasil simulasi von-Mises, tegangan yang terjadi pada katup masuk setelah diberi gaya inersia piston sebesar $F_{inersia}=2625,1$ N dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil simulasi *finite elemen methods* katup masuk

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada katup masuk yaitu 746,68 MPa berada diatas titik luluh material (yield strength) sebesar 560 Mpa. Hasil tersebut menyebabkan komponen katup masuk mengalami deformasi plastis [9]

Selanjutnya dilakukan analisis buckling untuk mendapatkan hasil kegagalan yang sama dengan kejadian aktual. Pada analisis buckling, beberapa mode dari kegagalan katup masuk diamati [10]. Berikut merupakan hasil analisis dari beberapa mode kegagalan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Beberapa hasil analisis buckling pada katup masuk

Dari hasil analisis eigenvalue buckling, kegagalan dari katup masuk. Hasil analisis pada Gambar 8 (d) *buckling* yang terjadi pada mode 4 ini lebih menyerupai kegagalan katup masuk yang terjadi di lapangan. Kegagalan terjadi pada bagian batang katup masuk, dimana nilai beban buckling sebesar 29.361,7 N atau 11,185 kali dari pembebanan awal sebesar 2625,1 N.

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian ditemukan bahwa material katup masuk merupakan baja tahan karat dengan kandungan karbon sedang. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa material ini cukup keras dengan nilai antara 354–487 HV (Vickers Hardness). Berdasarkan hal ini, masalah atau kegagalan yang dialami katup tersebut bukan karena cacat material, melainkan karena faktor lain, seperti pemakaian dan faktor modifikasi mesin.

Katup masuk mengalami deformasi plastis (perubahan bentuk yang permanen) akibat tabrakan dari piston. Tegangan yang dihasilkan dari tabrakan tersebut melebihi kekuatan luluh material katup, yaitu batas material tidak bisa kembali ke bentuk semula setelah diberi beban. Akibatnya, batang katup menjadi bengkok.

6. Daftar Pustaka

- [1] A. L. Karimah, M. I. Mawarda, W. Pauru', Y. Ramadhan, and Y. Amalia, "Analisis Kegagalan Material pada Sayap Pesawat Terbang (Review)," Jul. 2022, doi: <http://dx.doi.org/10.28989/jumantara.v1i1.1266>.
- [2] R. Maulana, S. Nugroho, and R. Ismail, "Analisis Kegagalan Katup Buang Pada Sepeda Motor 4 Langkah Kapasitas 155 CC," *Jurnal Teknik Mesin S-1 Universitas Diponegoro*, vol. 11, no. 2, pp. 163–170, Apr. 2023, doi: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm>.
- [3] N. K. Raghuvanshi, A. Pandey, and R. K. Mandloi, "Failure Analysis of Internal Combustion Engine Valves: A Review," 2012. [Online]. Available: www.ijirset.com
- [4] R. Usman, "Analisis Kerusakan Katup pada Mesin Diesel 9 L21/31 Internal Combustion Engine," *Jurnal Seminar Nasional TEKNOKA*, vol. 1, 2016, [Online]. Available: <https://journal.uhamka.ac.id/index.php/teknoka/article/view/894>
- [5] Y. K. Lavhale and J. Salunke, "Overview of Failure Trend of Inlet & Exhaust Valve," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 5, no. 3, pp. 104–113, Mar. 2014, doi: www.iaeme.com/ijmet.asp.
- [6] R. Sapura and R. Reza Darmawan, "Analisa Perbandingan Kualitas Katup Original, Katup Original Ex-Pakai dan Katup Imitasi Sepeda Motor YJZ 110CC," *Jurnal Tera*, vol. 1, no. 1, pp. 84–97, Mar. 2021, doi: <http://jurnal.undira.ac.id/index.php/tera/>.
- [7] X. Salahudin, H. Setiawan, and K. Suharno, "Pengaruh Variasi Kuat Arus Listrik pada Proses Anodizing terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Permukaan Aluminium," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 2, Sep. 2019, doi: <http://jurnal.untidar.ac.id/index.php/mechanical/index>.
- [8] "Chemical composition % of The Ladle Analysis of Grade X40CrSiMo10-2." [Online]. Available: <https://www.steelsg.com/grades/Stainless-Steels-Special-Steel/31/6264/X40CrSiMo10-2.html>
- [9] S. S. Murugan, "Mechanical Properties of Materials: Definition, Testing and Application," *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME)*, vol. 6, no. 2, pp. 28–38, 2020, doi: 10.20431/2454-9711.0602003.
- [10] "SUH3 - SteelJIS - Datasheet, Chemical composition, Standards and Properties." [Online]. Available: http://steeljis.com/jis_steel_datasheet.php?name_id=218