

## ANALISIS KEGAGALAN KATUP BUANG PADA SEPEDA MOTOR 4 LANGKAH KAPASITAS 155 CC

\***Riski Maulana<sup>1</sup>, Sri Nugroho<sup>2</sup>, Rifky Ismail<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: riskimaulana@students.undip.ac.id

### Abstrak

Katup adalah sebuah perangkat yang terpasang pada sistem penyaluran bahan bakar, yang berfungsi untuk mengatur, mengontrol dan mengarahkan laju aliran fluida dengan cara membuka atau menutup, dimana komponen ini mengalami kegagalan berupa timbulnya endapan kerak karbon dan terjadi *bent valve*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab kegagalan pada katup buang sepeda motor 4 langkah kapasitas 155 cc, yang mengalami deformasi plastis pada bagian leher katup. Metode analisis yang digunakan dengan melakukan pengamatan visual untuk mendapatkan hipotesis, pengujian spektrometri, pengujian metalografim dan pengujian kekerasan. Dari hasil pengamatan visual, didapatkan hipotesis katup mengalami kegagalan berupa adanya endapan kerak karbon pada kepala katup yang diakibatkan dari pembakaran yang tidak sempurna. Kemudian katup mengalami bengkok karena menerima beban yang berlebih sehingga terjadi deformasi plastis. Hasil uji spektrometri menunjukkan bahwa material katup buang dibuat dengan baja paduan tinggi jenis *stainless steel* 21-4N dengan kandungan Cr 20,8%, Mn 8,49%, dan Ni 3,36%. Sesuai dengan struktur mikronya, material ini memiliki fasa austenite yang didapatkan dari hasil pengujian metalografi. Dari hasil pengujian kekerasan dengan metode *Vickers* pada katup gagal menunjukkan nilai kekerasan 431 HV. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan katup gagal mengalami kegagalan akibat menerima beban berlebih. Hasil ini juga diperkuat dengan hasil hipotesis dari Riwayat pemakaian sepeda motor yang telah dimodifikasi dengan menaikkan kompresinya.

**Kata kunci** : 21-4N; analisis kegagalan; *bent valve*; katup buang; kerak karbon

### Abstract

*The valve is a device attached to the fuel delivery system, which functions to regulate, control and direct the fluid flow rate by opening or closing, where this component fails in the form of carbon deposits and bent valves. The purpose of this study was to determine the causes of exhaust valve failure on a 4-stroke motorcycle with a capacity of 155 cc, which experienced plastic deformation on the valve neck. The analytical method used is visual observation to obtain a hypothesis, spectrometric testing, metallographic testing and hardness testing. From the results of visual observations, it was found that the valve head had a failure hypothesis in the form of carbon scale deposits on the valve head resulting from incomplete combustion. Then the valve is bent because it receives an excessive load resulting in plastic deformation. The spectrometric test results showed that the exhaust valve material was made of high-alloy stainless steel type 21-4N with a content of 20.8% Cr, 8.49% Mn and 3.36% Ni. Following its microstructure, this material has an austenite phase obtained from metallographic testing results. From the results of hardness testing with the Vickers method on failed valves, it shows a hardness value of 431 HV. From the results of the study, it can be concluded that the valve failed to fail due to receiving an excess load. This result is also strengthened by the results of the hypothesis from the history of motorcycle use that has been modified by increasing the compression.*

**Keywords**: 21-4N; failure analysis; exhaust valve; carbon descaling; bent valve

## 1. Pendahuluan

Analisis Kegagalan adalah metode investigasi yang dilakukan secara sistematis yang bertujuan untuk mencari tahu penyebab terjadinya kegagalan pada suatu komponen atau peralatan. Hasil yang diharapkan dari analisis kegagalan adalah rekomendasi atau solusi untuk mengatasi kegagalan yang terjadi. Dalam mempelajari kegagalan komponen, harus mempertimbangkan sebab-sebab atau alasan terjadinya kegagalan secara luas. Analisis kegagalan dimulai dengan mengevaluasi semua bukti yang ada, kemudian membuat hipotesis atau kemungkinan yang menyebabkan kegagalan tersebut. Apabila kegagalan yang terjadi dapat diduplikasi pada simulasi terkontrol dalam laboratorium, kegagalan yang terjadi akan jauh lebih mudah dipelajari [1]. Kegagalan komponen banyak terjadi pada komponen yang bergerak secara terus-menerus dan dikenai beban.

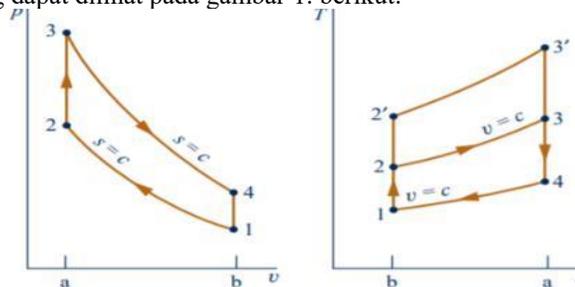
Pada Tugas Akhir ini diambil topik terkait analisis kegagalan katup buang yang mengalami bengkok (*bent valve*) dan terdapat endapan kerak karbon, dimana komponen ini berfungsi sebagai pengontrol aliran keluarnya hasil pembakaran pada sepeda motor 155 cc. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui faktor penyebab kegagalan, mekanisme kegagalan, dan memberikan solusi atau saran apabila terdapat kegagalan serupa pada komponen yang sama. Banyak hal yang dapat menyebabkan kegagalan katup. Pada umumnya kegagalan katup disebabkan oleh beban termal dan beban mekanik yang berlebihan, tegangan siklik longitudinal, cacat kondisi, cacat tempa, dan lain-lain. Kemungkinan modus kegagalan katup adalah kegagalan karena aus, kegagalan kelelahan, kegagalan karena temperatur tinggi, dan kegagalan karena korosi erosi.

## 2. Dasar Teori

### 2.1 Motor Bensin

Motor bakar atau lebih dikenal dengan istilah mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*) merupakan suatu tipe mesin yang bekerja dengan cara mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas, yang selanjutnya diubah menjadi energi mekanik atau gerakan dari motor tersebut. Sehingga, gas hasil pembakaran pada saat yang bersamaan berfungsi sebagai fluida kerja. [2]. Terdapat dua jenis motor bensin berdasarkan prinsip kerjanya, yaitu motor bensin 4 langkah dan motor bensin 2 langkah. Pada motor bensin 4 langkah, satu siklus kerja membutuhkan 4 gerakan torak atau dua kali putaran poros engkol, sementara pada motor bensin 2 langkah, satu siklus kerja hanya memerlukan 2 gerakan atau satu putaran poros engkol.

Pada analisis termodinamika untuk proses kerja motor bensin, dapat disederhanakan dengan menggunakan asumsi udara-standar yang berperan sebagai gas ideal. Oleh karena itu, siklus untuk kondisi aktual dimodifikasi menjadi sistem tertutup yang dikenal sebagai siklus Otto ideal. Pada diagram  $p-v$  (tekanan-volume) dan  $T-s$  (temperatur-entropi), terdapat skema dan pernyataan proses yang dapat dilihat pada gambar 1. berikut:

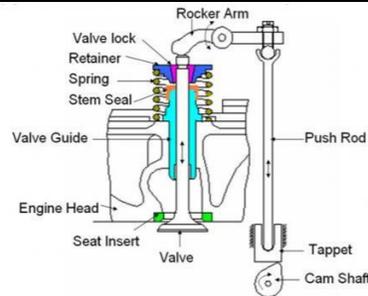


Gambar 1. Diagram  $p-v$  dan  $T-s$  siklus otto [3]

### 2.2 Katup (*valve*)

Katup atau *valve* merupakan sebuah perangkat yang dipasang pada sistem pengiriman bahan bakar, berfungsi untuk mengatur aliran fluida dengan membuka atau menutup jalur aliran. Selain itu, katup juga bertugas mengontrol dan mengarahkan laju aliran fluida. Setiap sistem katup terdiri dari beberapa komponen seperti katup inti, *valve guide*, *camshaft*, dan *tappets*. Fungsi utama katup adalah mengatur campuran udara dan bahan bakar di dalam silinder serta memastikan pembuangan sisa pembakaran pada saat yang tepat. Untuk menjalankan fungsi ini, beberapa sistem kontrol juga diperlukan untuk mengatur operasi katup [4].

. Motor bensin 4 langkah dilengkapi dengan sekelompok komponen katup yang berfungsi sebagai penopang kerja katup hisap dan buang. Peran katup sangat vital dalam menjaga kinerja mesin, karena kerusakan apapun dalam sistem katup dapat berdampak negatif pada komponen mesin lainnya dan mengakibatkan penurunan performa. Detail tentang rangkaian komponen katup dapat ditemukan pada Gambar 2. berikut.



**Gambar 1.** Rangkaian komponen katup [5]

### 2.3 *Fatigue Failure*

*Fatigue failure* pada katup hisap dan buang mesin pembakaran dalam terbagi menjadi dua kategori utama. Pertama, kegagalan mekanis disebabkan oleh fluktuasi tegangan akibat beban siklik pada suhu tinggi. Kedua, kelelahan termal terjadi karena perubahan siklik pada suhu material komponen. Kegagalan fatik biasanya terjadi ketika material mencapai titik luluh. Pada katup hisap dan buang, pembebanan siklik yang terjadi karena kondisi operasi mesin menyebabkan material mengalami kelelahan. Akibatnya, retakan kecil mulai muncul pada bagian tertentu dan secara bertahap membesar hingga menyebabkan kegagalan total.

Kegagalan mekanis katup yang disebabkan oleh kelelahan dapat terjadi karena katup yang dirancang tidak sesuai dengan spesifikasi pabrikan mesin untuk jenis mesin tertentu. Kondisi temperatur yang berlebihan juga dapat menyebabkan kelelahan pada material katup. Selain itu, kegagalan mekanis akibat kelelahan juga dapat terjadi karena penanganan yang tidak tepat pada katup, seperti adanya torehan pada area fillet atau radius selama proses regrind [6].

### 2.4 **Kegagalan Akibat Temperatur Tinggi**

Katup buang biasanya beroperasi pada suhu yang sangat tinggi, sering kali di atas 600°C, dan mengalami pembebanan siklik. Kegagalan pada permukaan kerucut atau area penyegelan katup disebabkan oleh deformasi elastis dan plastis. Batang katup buang sering mengalami kegagalan karena terpapar suhu yang berlebihan, khususnya saat temperatur katup buang mencapai sekitar 600°C. Pada permukaan fraktur batang katup, terbentuk lapisan kerak oksida hitam. Permukaan patahan pada daerah yang mengalami kelelahan halus dan dilapisi dengan oksida tebal atau endapan yang sulit dihilangkan secara sempurna. Kerusakan *fretting* juga terjadi pada bagian tengah batang katup. Selain itu, kegagalan katup juga bisa disebabkan oleh temperatur yang melebihi batas desain katup tersebut, yang menyebabkan kegagalan termal yang cepat pada katup hisap dan buang. Temperatur yang terlalu tinggi juga dapat menurunkan kekerasan material dan menyebabkan oksidasi permukaan serta *fretting/galling* pada batang katup. Hal ini merupakan penyebab beberapa retakan kelelahan yang muncul [6].

### 2.5 **Kegagalan Akibat Korosi-Erosi**

Kerak yang terbentuk pada katup dapat menyebabkan korosi terjadi pada permukaan katup. Selama penggunaan, material permukaan akan terkikis dan tererosi oleh partikel padat kecil yang bersentuhan dengan katup. Terutama dalam lingkungan dengan suhu tinggi, erosi pada permukaan juga disertai dengan korosi. Dalam salah satu uji coba, terbentuk lapisan oksida nikel dengan ketebalan 100 µm pada suhu 1000°C pada material nikel murni komersial.

Kegagalan katup pada mesin pembakaran internal sering disebabkan oleh erosi-korosi pada katup buang atau talang katup. Aliran gas panas yang keluar dari posisi katup yang berdekatan diarahkan ke area *fillet*, menyebabkan pengikisan material permukaan. Talang katup biasanya terbentuk karena aliran gas buang yang melintasi permukaan muka katup, membentuk saluran radial. Selain itu, faktor-faktor lain yang dapat menyebabkan kebocoran gas termasuk distorsi pada katup, pin muka yang tidak pas, dan degradasi endapan yang terbentuk di permukaan katup [6].

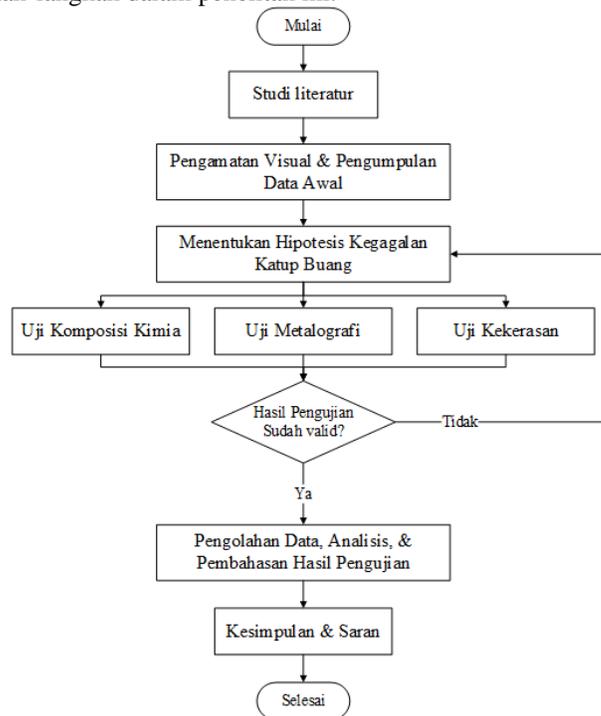
### 2.6 **Kegagalan Akibat Aus**

Kegagalan akibat keausan biasanya terjadi pada permukaan dudukan katup dan batang katup di area yang mengalami kontak saat pergerakan. Keausan terjadi karena adanya dua faktor utama, pertama adalah gaya benturan antara permukaan dudukan katup dan dudukannya, dan kedua adalah gesekan antara katup dan dudukan selama proses pembakaran. Gesekan dan benturan ini menyebabkan ausnya permukaan katup. Beberapa mekanisme keausan yang umum meliputi perekat, abrasif, *fretting*, erosi, kavitasi, dan kelelahan kontak bergulir [6].

### 3 Metodologi Penelitian

#### 3.1 Flow Chart Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa langkah-langkah pengujian untuk melakukan analisis terhadap Katup Buang. Gambar 3. menunjukkan langkah-langkah dalam penelitian ini.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

#### 3.2 Pengujian Metalografi

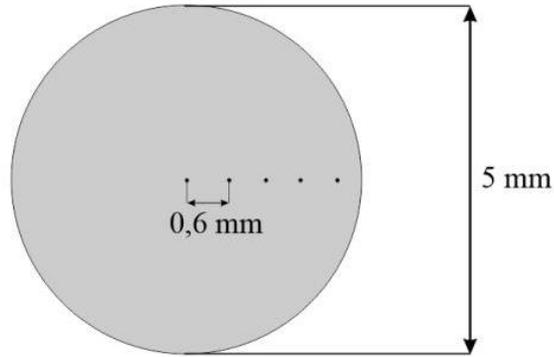
Pengujian metalografi dilakukan untuk melihat struktur mikro yang terdapat pada material benda uji. Pengujian ini dilakukan pada dua benda uji, yaitu katup buang gagal dan katup buang baru. Pengujian metalografi dilakukan di Laboratorium Material Teknik Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro dengan menggunakan mikroskop optik. Ada beberapa langkah preparasi benda uji yang dilakukan sebelum melakukan pengujian metalografi, seperti (1) pemotongan komponen, (2) pembuatan *mounting*, (3) *grinding* dan *polishing*, (4) pengetsaan, dan (5) pengamatan struktur mikro.



Gambar 4. Area pemotongan

#### 3.3 Pengujian Kekerasan (Micro Hardness Vicker)

Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada katup buang. Metode pengujian yang digunakan adalah metode *Vickers*. Pengujian dilakukan dengan pembebanan sebesar 1000 gf dalam waktu 15 detik. Indentasi dilakukan pada 5 titik, dengan jarak antar titik indentasi kurang lebih 0.6 mm. Pengujian ini dilakukan sesuai dengan Standar ASTM E92. Skema dari pengujian yang dilakukan ditunjukkan oleh Gambar 5. berikut.



Gambar 5. Titik indentasi pengujian kekerasan pada permukaan katup buang

### 3.4 Spesifikasi Mesin

Spesifikasi mesin pada kendaraan mempengaruhi performa dari kendaraan itu sendiri. Informasi tentang daya, torsi, dan konfigurasi mesin dapat memberikan gambaran tentang seberapa kuat, dan cepat kendaraan dapat berakselerasi. Berikut data dari spesifikasi mesin sepeda motor 4 langkah kapasitas 155 cc yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Mesin Sepeda Motor 4 Langkah Kapasitas 155 cc

Parameter	Besaran	
	Ori	Modifikasi
Daya Maksimum	15,4 PS (11,6 kW) @ 8000 rpm	...
Torsi Rasio	13,8 Nm @ 6250 rpm	...
Volume Silinder	155 cc	238 cc
Diameter x Langkah	58 mm x 58,7 mm	...
Rasio Kompresi	10,5 : 1	13,5 : 1

## 4 Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Hasil Pengamatan Visual

Gambar 6. menunjukkan pengamatan visual terhadap katup buang yang gagal. Berdasarkan gambar tersebut terlihat kegagalan berupa timbulnya kerak karbon yang berwarna kehitaman pada bagian *head* hingga leher katup (no.1) dan terjadi bengkok pada katup (*bent valve*) (no.2).



Gambar 6. Hasil pengamatan visual terhadap katup buang gagal

Dari hasil pengamatan visual terhadap katup buang sepeda motor, dapat dibuat sebuah hipotesis bahwa adanya kerak karbon pada katup buang tersebut menunjukkan bahwa terdapat pembakaran yang tidak sempurna pada siklus pembakaran. Pembakaran yang tidak sempurna ini dapat menghasilkan residu berupa kerak karbon yang menempel pada katup buang, serta dapat mempengaruhi kinerja mesin dan emisi gas buang. Kerak karbon tersebut dapat menghambat aliran udara dan gas buang di dalam sistem, sehingga dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran bahan bakar dan meningkatkan emisi gas buang. Oleh karena itu, penghapusan kerak karbon pada katup buang dapat membantu meningkatkan kinerja mesin dan mengurangi emisi gas buang yang berbahaya [7].

Ketika kendaraan melakukan *overrevving*, yaitu saat mesin bekerja pada putaran yang melebihi batas maksimum yang dianjurkan, maka terdapat kemungkinan terjadinya *floating valve* atau katup memantul yang dapat menimbulkan kerusakan serius pada mesin. Floating valve terjadi saat katup kehilangan kontrol dan tidak kembali ke posisi tertutup saat berada pada posisi terbuka, sehingga dapat memantul ke arah piston dan menyebabkan kontak langsung antara katup dan piston. Akibatnya, tidak hanya kerusakan pada piston yang dapat terjadi, tetapi juga katup dapat bengkok dan bahkan patah. [8]. Endapan kerak karbon pada batang katup (*valve stem*) juga dapat menjadi salah satu faktor penyebab terjadinya kontak antara piston dengan katup. Pelumas yang kotor dapat memasuki celah antara batang katup (*valve stem*) dan stem guide kemudian mengendap sehingga menyebabkan katup menjadi lengket dan tidak tertutup dengan baik

#### 4.2 Hasil Pengujian Komposisi Kimia (Spektrometri)

Berikut adalah hasil pengujian komposisi kimia (spektrometri) pada material katup buang yang dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Semarang. Hasil pengujian spektrometri dapat dilihat pada Tabel 2. Berikut

Tabel 2. Hasil pengujian Spektrometri

Unsur	Kandungan (%)	
	<i>Exhaust Valve</i>	21-4N
Fe	65,9	...
C	0,469	0,48-0,58
Mn	8,49	8,00-10,00
P max	0,0360	0,045
S max	<0,0030	0,03
Si	0,0112	0,25 max
Cr	20,8	20,00-22,00
Mo	0,0915	...
Ni	3,36	3,25-4,50
Al	0,0170	...
Co	0,0558	...
Cu	0,139	...
Nb	0,0306	...
Ti	0,0042	...
V	0,0776	...
W	<0,0100	...
Pb	0,0174	...
Sn	0,0024	...
B	0,0021	...
Zr	0,0171	...
N	0,510	0,35-0,50
Se	<0,0100	...
Sb	<0,0050	...

Setelah dilakukan pengujian komposisi kimia, ditemukan bahwa material katup termasuk dalam jenis *high-alloy steel* dengan kandungan paduan lebih >8% dan hampir sama dengan standar komposisi UNS 21-4N pada *stainless steel* [9]. Jenis UNS 21-4N adalah *austenitic stainless steel* (ASS) yang terkenal karena memiliki ketahanan yang sangat baik pada suhu tinggi, ketahanan terhadap korosi, oksidasi, kelelahan dan memiliki koefisien ekspansi termal yang rendah.

Bahan ini sangat cocok digunakan sebagai bahan katup pembuangan pada mesin dengan performa tinggi karena ketahanannya yang baik pada kondisi ekstrem. Dengan kandungan paduan yang tinggi, material katup ini memiliki kekuatan yang lebih tinggi dan tahan terhadap deformasi plastik pada suhu tinggi. Tidak hanya itu, bahan ini juga mampu menahan korosi yang disebabkan oleh lingkungan yang berbahaya dan memiliki ketahanan terhadap kelelahan yang tinggi.

#### 4.3 Sifat Mekanik Material

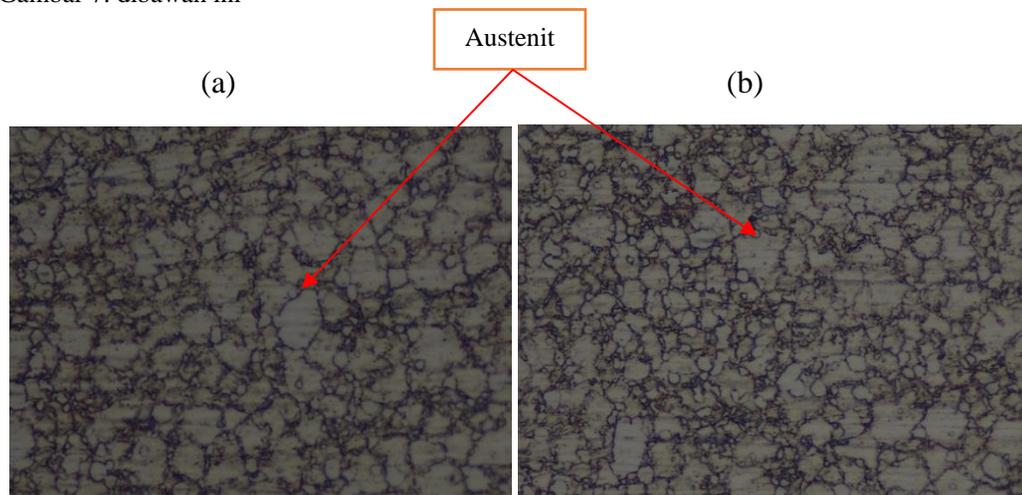
Sifat mekanik material merujuk pada respons dan perilaku material terhadap gaya, beban atau stress yang diterapkan. Data sifat mekanik material katup buang (*autenitic stainless steel 21-4N*) didapatkan dari sumber atau referensi dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.** Sifat mekanik material *autenitic stainless steel 21-4N*

<i>Tensile Strength</i>	1200 MPa
<i>Yield Strength</i>	580 MPa
<i>Shear Modulus</i>	88550 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0.31
<i>Elastic Modulus</i>	232 GPa

#### 4.4 Hasil Pengujian Metalografi

Dalam pengujian metalografi, dilakukan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik *Olympus BX41M* ditunjukkan pada Gambar 7. dibawah ini



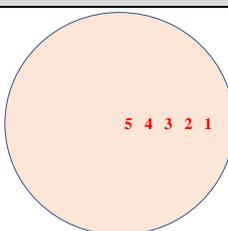
**Gambar 7.** Katup buang perbesaran 1000x bagian (a) jauh, (b) gagal.

Dari gambar 7. dapat dilihat bahwa kedua fasa yang terbentuk pada katup buang (*exhaust valve*) yaitu austenit, dimana material mempunyai ketahanan pada suhu atau temperatur tinggi dan juga tahan akan korosi atau karat. Hasil ini juga sesuai dengan klasifikasi material berdasarkan pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan sebelumnya.

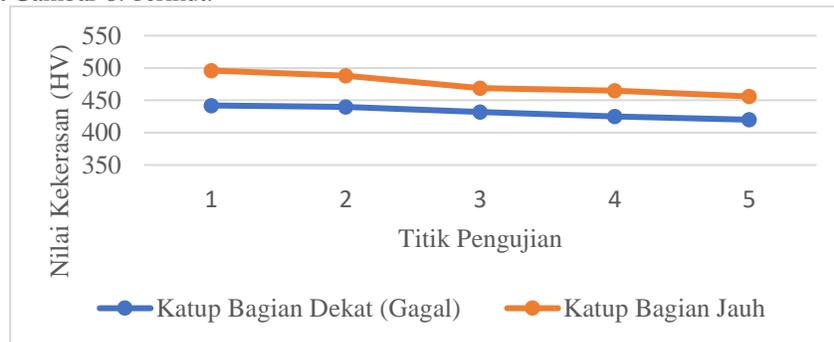
#### 4.5 Hasil Pengujian Kekerasan (*Micro Hardness Vickers*)

Pengujian kekerasan dengan metode *vickers* dilakukan pada dua sampel berbeda yaitu di sekitar daerah yang mengalami kegagalan tekuk dan daerah yang jauh dari kegagalan tersebut. Variasi pengujian kekerasan dilakukan dari titik pusat diameter leher katup hingga permukaan terluar. Hasil pengujian kekerasan dapat dilihat pada Tabel 4. berikut:

**Tabel 4.** Hasil Pengujian Kekerasan *Micro Vicker*

Area	Kode Titik	Variasi Spesimen (HV)	
		Gagal ( <i>Bending</i> )	Jauh
	1	442	496
	2	440	488
	3	432	469
	4	425	465
	5	420	456

Dari Tabel 4. diatas terlihat ada sedikit perbedaan nilai hasil uji kekerasan antara katup buang yang gagal (dekat) dengan katup buang yang bagian jauh dari kegagalan. Perbedaan hasil pengujian kekerasan tersebut akan lebih jelas terlihat perbandingannya pada Gambar 8. berikut.



**Gambar 8.** Grafik perbandingan hasil uji kekerasan katup buang gagal (dekat) dengan bagian katup buang jauh.

Dari Gambar 4.4 bisa dilihat perbandingan hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan katup buang dibagian jauh lebih besar daripada nilai kekerasan dibagian katup buang gagal. Hal ini dapat terjadi karena pengaruh dari proses *heat treatment* saat pembuatan katup buang (*exhaust valve*) yang menyebabkan perbedaan nilai kekerasan [9].

Namun secara umum untuk sampel 1 dan sampel 2 tidak terjadi nilai distribusi kekerasan yang signifikan. Karena pada *stainless steel* 21-4N memiliki nilai standar kekerasan 350 – 490 HV [10]. Pada katup buang gagal yang telah diuji memiliki nilai kekerasan rata-rata 431 HV dan 474 HV pada katup buang bagian jauh. Nilai kekerasan pada sampel 1 dan sampel 2 tersebut masih pada rentang standar material *stainless steel* 21-4N. Pada proses manufaktur *stainless steel* dilakukan *heat treatment* yaitu *annealing*.

## 5 Kesimpulan

Dari beberapa pengujian yang telah dilakukan, material katup buang Gagal sesuai standar *austenitic stainless steel* 21-4N dengan kandungan Cr 20,8 %, Ni 3,36 %, dan Mn 8,49 % serta berfasa austenit. Dengan kandungan tersebut material komponen dapat dikategorikan *High-Alloy Steel* yang memiliki kandungan paduan > 8%. Kegagalan yang terjadi pada katup buang bukan disebabkan oleh kesalahan material. Kegagalan yang terjadi pada katup buang adalah jenis kegagalan yang disebabkan piston yang menekan katup menimbulkan tegangan yang melebihi kekuatan luluh (*yield strength*) katup sehingga terjadi deformasi plastis. Penyebabnya yaitu karena dilakukannya modifikasi pada volume silinder yang mengakibatkan naiknya kapasitas kendaraan dari 155 cc menjadi 238 cc serta naiknya kompresi dari 10,5 menjadi 13,5 sehingga terjadi peningkatan tekanan dan daya yang berlebih.

## Daftar Pustaka

- [1] Wulpi, D. J. (1999) “*Understanding How Components Fail*”. ASM International Materials Park, Ohio, USA
- [2] Kumar, A. (2010) “*Manufacturing Process of Engine Valve*” Hi-Tech Institute of Engineering & Technology, Ghaziabad
- [3] Moran, M. J., dkk. (2011) “*Fundamental of Engineering Thermodynamics.*” United States of America. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 13 978-0470-49590-2
- [4] Prabu, D. (2013) “*Valve & Valve Mechanism*” Chapter 8. P E S C E, Mandya.
- [5] 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.
- [6] Lavhale ,Y. & Salunke, J. (2014) “*Overview of Failure Trend Inlet & Exhaust Valve.*” Mechanical Engineering, Deogiri Institute of Engineering and Management Studies/ Aurangabad(MS), India. ISSN 0976 – 6340
- [7] Setyono & Koiruman, A. (2020) “*Analisis Pengaruh Kerak Karbon yang Mengendap di Ruang Bakar Terhadap Unjuk Kerja Mesin Bensin.*” Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pancasila. Jakarta 12640
- [8] Sekip, M. (2009) “*Assembling Engine Valve & Causes of Valve Failures.*” Supar. Konya. 3rd edition
- [9] ASM Metal Handbook. (1993) “*Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys.*” ASM International Handbook Committee :Volume 1. 1985. Ohio
- [10] Yu, Z. W. (2005) “*Failure Analysis and Metallurgical Investigation of Diesel Enginw Exhaust Valve.*” Institute of Metal and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, PR China