

PENGERASAN PERMUKAAN PENA PISTON DENGAN TEKNIK NITRIDASI PLASMA

Suprapto, Lely Susita RM, Sukidi

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

ABSTRAK

PENGERASAN PERMUKAAN PENA PISTON DENGAN TEKNIK NITRIDASI PLASMA. Telah dilakukan nitridasi dengan teknik nitridasi plasma untuk pengerasan permukaan pena piston. Nitridasi bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat mekanik permukaan khususnya peningkatan kekerasan. Peningkatan kekerasan hanya pada permukaan material sedangkan pada bagian dalam sifatnya tetap seperti sifat sebelum dinitridasi. Nitridasi dilakukan dengan variasi tekanan untuk mendapatkan kondisi optimal sehingga diperoleh kekerasan maksimum. Hasil nitridasi diperoleh kekerasan maksimum 1102,91 KHN pada tekanan 1,8 mbar dengan peningkatan kekerasan 4,01 kali dibanding sebelum dinitridasi. Homogenitas kekerasan didapatkan 91 % untuk beban indentasi 10 gf dan 98 % untuk beban indentasi 200 gf. Untuk uji variasi beban identifikasi ditunjukkan bahwa makin besar beban indentasi makin dalam bekas indentasi sehingga diperoleh kekerasan Vickers lebih rendah. Hasil uji metalografi diperoleh perubahan struktur butiran ferrit dan perlit yaitu berubah menjadi butiran yang halus sehingga terjadi peningkatan kekerasan.

Kata kunci: Pengerasan permukaan, pena piston, nitridasi plasma.

ABSTRACT

SURFACE HARDENING OF PISTON PEN USING PLASMA NITRIDING TECHNIQUES. Nitriding of piston pen has been done by using plasma nitriding technique. The purpose of this nitriding is to improve the mechanical properties piston pen especially its surface hardness. In the surface hardening, only the surface is improved, while the inner properties do not change, same as the base materials. To get the optimum conditions, the parameters such as gas pressure were varied. The maximum hardness in the order of 1102.91 KHN was achieved in pressure 1.8 mbar. Compared to the initial hardness (in the order of 220 KHN), the optimum increasing of hardness is 401 %. The homogeneity of hardness was achieved 91 % for indenter load 10 gf and 98 % for indenter load 200 gf. The test of indenter load variation indicated that the heavier the load indenter, more trace indented so that the lower hardness Vickers is obtained. From metallographic observation using optical microscope, it can be concluded that there is a phase changing from coarse ferrite and perlite to fine ferrite, and perlite structure such as to improve hardness.

Keywords: Surface hardening, piston pen, plasma nitriding.

PENDAHULUAN

Di dunia industri khususnya di industri permesinan memerlukan bahan yang mempunyai sifat: keras, tahan aus, tahan korosi, ulet, dan tangguh. Untuk komponen-komponen mesin yang saling bergesekan dengan komponen yang lain dan harus menopang beban berat sifat bahan tersebut sangat penting. Contoh komponen-komponen mesin ini adalah poros, bantalan, piston, cincin piston, pena piston dan batang piston. Pada kondisi operasi, poros berputar pada bantalan dan menopang beban sehingga terjadi gesekan antar permukaannya dan menimbulkan keausan. Disamping itu poros juga harus menopang beban yaitu: beban yang menyebabkan terjadinya momen putir, beban yang menyebabkan momen lengkung dan kombinasi dari kedua beban tersebut. Untuk piston dan cincin piston

bergesekan dengan silinder, sedangkan pena piston dan batang piston saling bergesekan saat meneruskan tenaga. Karena komponen ini disamping bergesekan juga menahan tekanan sehingga beban akibat tekanan tersebut ditumpu pada permukaannya maka akan terjadi keausan. Komponen-komponen ini kebanyakan dibuat dari baja karbon atau baja paduan. Baja karbon kemungkinan memenuhi sifat-sifat yang diperlukan tersebut sangat kecil, sedangkan untuk baja paduan kemungkinan dapat memenuhi sifat-sifat yang diperlukan namun harganya sangat mahal. Agar didapatkan harga yang lebih murah dan kualitasnya terpenuhi maka komponen suatu mesin kebanyakan dibuat dari bahan baja karbon dan dilanjutkan dengan perlakuan permukaan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus.

Beberapa jenis perlakuan permukaan secara konvensional untuk meningkatkan sifat mekanik permukaan logam antara lain cara karburasi, nitridasi, karbonitridasi, nyala api, dan induksi listrik^[1,2,3]. Dengan kemajuan teknologi untuk memperbaiki sifat mekanik permukaan logam, saat ini mulai dikembangkan cara lain untuk membentuk lapisan tipis dan memperbaiki sifat-sifat pada permukaannya. Cara tersebut meliputi metode evaporasi, implantasi ion, plasma lucutan pijar RF, dan plasma lucutan pijar DC^[4,5]. Pada penelitian ini digunakan metode plasma lucutan pijar DC yang diaplikasikan untuk proses nitridasi yang disebut nitridasi ion. Kelebihan dari metode ini yaitu dapat menghasilkan lapisan tipis baik dengan gas maupun bahan padat yang mempunyai titik leleh tinggi (*plasma sputtering*)^[5,6,7,8]. Di PTAPB-BATAN telah dilakukan rancangbangun sistem nitridasi ion dan untuk mengetahui kinerjanya maka digunakan untuk proses nitridasi komponen mesin yaitu pena piston agar sifat keras permukaannya dapat meningkat sehingga ketahanan ausnya meningkat dan menambah umur pakai.

DASAR TEORI

Nitridasi

Nitridasi adalah suatu proses pengerasan permukaan dengan menambahkan unsur nitrogen pada permukaan benda kerja (biasanya baja). Pada proses nitridasi secara konvensional dibedakan menjadi 2 (dua) cara yaitu proses nitridasi dengan gas (*gas nitriding*) dan proses nitridasi dengan cairan (*liquid nitriding*). Sehubungan dengan perkembangan teknologi telah dikembangkan teknologi terkini untuk proses nitridasi yaitu teknik nitridasi ion/plasma (*ion/plasma nitriding*)^[5,7,8].

Proses nitridasi dengan gas (gas nitriding)

Pada proses nitridasi ini menggunakan gas amonia (NH₃), nitridasi dilakukan di dalam tanur (*furnace*) pada suhu antara 460°C s/d. 600°C. Pada suhu ini amonia akan berdesosiasi sehingga menghasilkan atom hidrogen dan nitrogen dengan reaksi sebagai berikut:^[5]

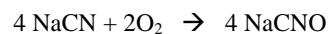


Dari desosiasi ini selanjutnya atom nitrogen larut pada permukaan benda yang dinitridasi sehingga membentuk nitrida. Proses nitridasi pada umumnya diterapkan untuk pengerasan peralatan (komponen mesin) yang terbuat dari baja karbon medium dan baja paduan yang mengandung unsur-unsur: Al, Cr, Mo dan unsur lain yang memungkinkan bereaksi dengan unsur nitrogen. Unsur-unsur baja tersebut akan bereaksi dengan nitrogen yang larut secara

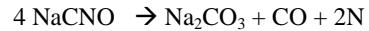
interstisi sehingga membentuk nitrida-nitrida seperti: Fe₂N, Fe₃N, Fe₄N, Cr₂N, Mo₂N maupun AlN. Penggunaan metode ini umumnya untuk *valve guide*, *valve setting*, roda gigi (*gear* dan *pinion*), pena piston, cincin piston, dan *spiral springs*^[5].

Proses nitridasi dengan cairan (liquid nitriding)

Pada proses nitridasi ini menggunakan cairan garam seperti *cyanide-cyanite salts* yang mengandung 60% - 70% NaCN (berat) dan 30% - 40% KCN (berat). Proses ini diawali pencairan garam pada daerah suhu 560°C – 570°C dan waktu 1 - 2 jam untuk membasahi permukaan logam yang dinitridasi. Kemudian dilanjutkan dengan proses nitridasi pada suhu antara 565°C - 595°C dengan waktu sampai 12 jam. Untuk menghasilkan nitrogen dengan reaksi sebagai berikut^[5]:



Sodium cyanate ini bersifat tidak stabil sehingga terurai menghasilkan nitrogen sebagai berikut^[5]:



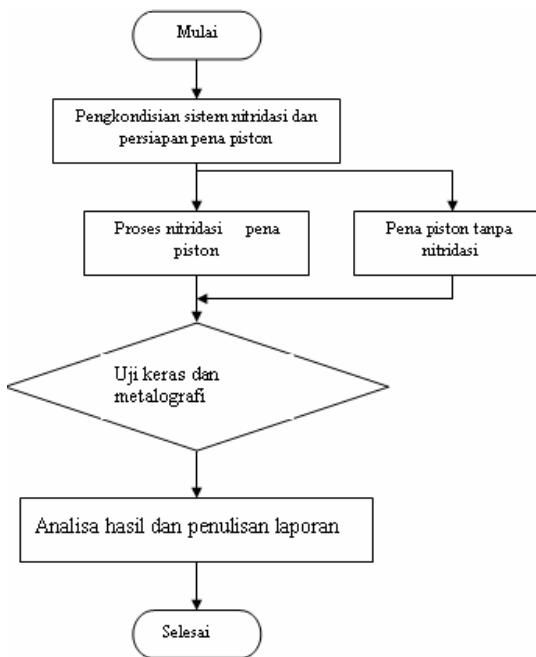
Selanjutnya atom nitrogen larut pada permukaan benda yang dinitridasi sehingga membentuk nitrida seperti pada nitridasi dengan gas NH₃.

Proses nitridasi dengan teknik nitridasi ion/plasma

Cara lain yang digunakan dalam proses nitridasi untuk pengerasan permukaan adalah dengan teknik nitridasi ion/plasma (*plasma nitriding*)^[5,7,8]. Teknik nitridasi ion/plasma termasuk teknologi terkini yang digunakan untuk proses pengerasan permukaan yang merupakan salah satu pengembangan pemanfaatan teknologi plasma. Pada nitridasi ion/plasma, proses nitridasi dilakukan dengan mendeposikan ion nitrogen pada permukaan yang dikeraskan. Untuk membentuk ion nitrogen dilakukan dengan cara memplasmakan gas nitrogen di dalam tabung reaktor plasma sehingga terbentuk pasangan ion nitrogen dan elektron. Ion-ion nitrogen ini terdeposisi pada permukaan yang dikeraskan, sehingga terjadi difusi dan kelarutan secara interstisi membentuk lapisan nitrida. Jika yang dinitridasi adalah baja dengan unsur utama Fe maka akan terbentuk lapisan nitrida besi (FeN) pada permukaan. Nitrida besi (FeN) mempunyai sifat sangat keras sehingga membentuk lapisan keras pada permukaan baja yang dinitridasi.

TATA KERJA

Langkah-langkah dalam melakukan proses nitridasi dengan sistem nitridasi ion digambarkan dengan diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.

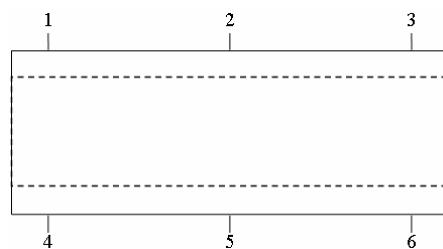
**Gambar 1. Diagram alir proses nitridasi pena piston**

Proses nitridasi dimulai dengan persiapan yaitu pembuatan cuplikan (pena piston) dan pengkondisian alat. Pena piston dibuat dari bahan baja ST 42 yang ukurannya disesuaikan dengan pena piston salah satu sepeda motor yang banyak digunakan di masyarakat sehingga dimensinya sesuai dengan dimensi sesungguhnya yaitu dengan diameter luar 13 mm, diameter dalam 7,8 mm dan panjang 38 mm. Dengan dimensi ini dapat diketahui fungsi sistem nitridasi ion/plasma untuk nitridasi komponen mesin yang sesungguhnya. Untuk mendapatkan tekanan optimum saat nitridasi dilakukan dengan variasi tekanan mulai 1,2 mbar sampai 2,0 mbar dengan interval 0,2 mbar.

Pengujian hasil nitridasi

Pengujian hasil nitridasi adalah untuk mengetahui peningkatan kekerasan hasil nitridasi dan homogenitasnya. Pengujian ini meliputi pengamatan perubahan kekerasan pada berbagai tempat pengukuran dan pengamatan perubahan struktur mikro yang terjadi. Pengamatan perubahan kekerasan dilakukan dengan mengukur kekerasan cuplikan yang dinitridasi pada berbagai tempat (Gambar 2) dan variasi beban penetrasi (10 gf, 25 gf, 50 gf, 100 gf, 200 gf dan 300 gf). Pengujian struktur mikro dilakukan dengan mengamati struktur mikro pada penampang melintang yang dinitridasi. Pengukuran kekerasan juga dilakukan

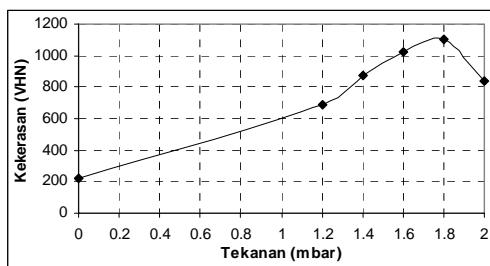
untuk bahan sebelum dinitridasi agar dapat diketahui perubahan keke-rasannya. Dalam pengamatan struktur mikro untuk mengamati perubahan struktur mikro akibat terbentuknya nitrida hasil reaksi nitrogen dengan logam induk. Alat yang digunakan untuk pengukuran kekerasan adalah *Digital Micro Hardness Tester* jenis MXT 70 dan untuk pengamatan struktur mikro adalah mikroskop optik Zeis jenis Axiolab LR 66238 C.

**Gambar 2. Titik-titik pengujian kekerasan pena piston**

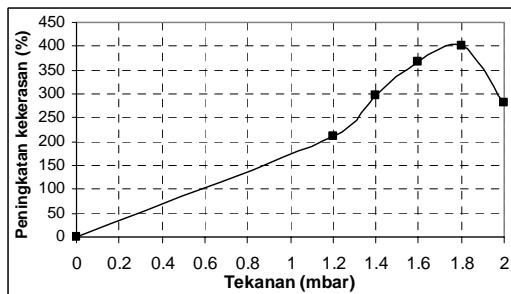
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan perubahan kekerasan dilakukan dengan mengamati kekerasan pena piston sebelum dan sesudah dinitridasi yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 8. Gambar 3 menunjukkan hasil pengamatan kekerasan untuk variasi tekanan tabung reaktor plasma saat nitridasi.

Pengamatan kekerasan ini untuk mengetahui tekanan optimum sehingga didapatkan hasil nitridasi dengan kekerasan maksimum. Pada hasil uji kekerasan (Gambar 3), kekerasan pada tekanan 0 mbar adalah kekerasan pena piston sebelum dinitridasi atau kekerasan benda kerja awal.



a. Kekerasan



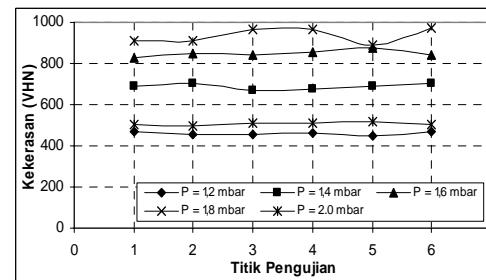
b. Peningkatan kekerasan (%)

Gambar 3. Kekerasan sebagai fungsi tekanan untuk beban identasi 10 gf.

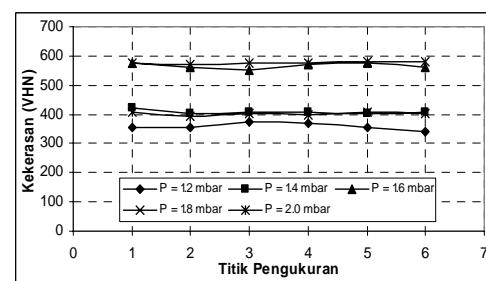
Nitridasi dimulai dari tekanan tabung reaktor plasma 1,2 mbar sampai dengan 2 mbar pada temperatur 525 °C. Berdasarkan hasil uji kekerasan didapatkan bahwa makin tinggi tekanan di dalam tabung reaktor makin tinggi kekerasan pena piston hasil nitridasi. Kenaikan kekerasan maksimum terjadi pada tekanan 1,8 mbar dan pada tekanan diatas 1,8 mbar terjadi penurunan kekerasan. Hal ini disebabkan makin tinggi tekanan reaktor plasma makin banyak atom nitrogen dan makin tinggi rapat plasma sehingga makin banyak ion nitrogen yang terbentuk dan terdeposisi pada permukaan pena piston. Dengan makin banyak ion (atom) nitrogen yang terdeposisi pada permukaan pena piston maka makin banyak atom nitrogen yang berdifusi dan membentuk nitrida besi (FeN) yang mempunyai sifat keras. Berdasarkan hasil uji kekerasan, dimungkinkan kesetimbangan deposisi dan difusi atom nitrogen terjadi pada tekanan 1,8 mbar. Hal ini terbukti bahwa pada tekanan 1,8 mbar diperoleh kekerasan maksimum sebesar 1102,91 VHN pada beban identasi 10 gf dan kekerasan material awalnya

adalah 220 VHN. Dengan hasil ini diperoleh peningkatan kekerasan 401 % atau kekerasan hasil nitridasi 5,01 kali kekerasan sebelum dinitridasi untuk beban identasi 10 gf.

Untuk mengetahui homogenitas kekerasan dilakukan pengukuran pada 6 titik (Gambar 2) untuk tiap pena piston yang dinitridasi dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Pada Gambar 4 ditunjukkan hasil pengukuran untuk mengetahui homogenitas kekerasan dengan beban identasi 50 gf dan pada Gambar 5 dengan beban identasi 200 gf. Besar beban 50 gf dipilih agar lebih mudah dalam mengukur bekas indentasi untuk menentukan kekerasan, namun tidak terlalu dalam sehingga masih pada daerah permukaan yang tipis, sedangkan besar beban 200 gram dipilih untuk mengetahui kekerasan pada permukaan dengan bekas indentasi yang lebih dalam tetapi masih pada lapisan nitrida besi yang terbentuk akibat nitridasi. Penentuan besar beban ini didasarkan coba-coba saat awal pengujian karena kekerasan benda uji dan besar beban indentasi sangat terkait dengan pengamatan bekas indentasi untuk menentukan nilai kekerasan.



Gambar 4. Kekerasan sebagai fungsi titik pengukuran pada variasi tekanan nitridasi untuk beban identasi 50 gf.

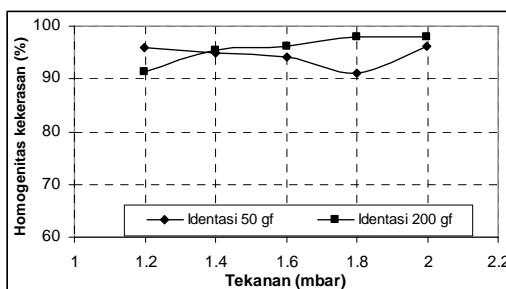


Gambar 5. Kekerasan sebagai fungsi titik pengukuran pada variasi tekanan nitridasi untuk beban identasi 200 gf.

Pada beban identasi 50 gf, didapatkan fluktuasi kekerasan tertinggi 9 % pada tekanan nitridasi 1,8 mbar dan terendah 3,7 % pada tekanan nitridasi 2,0 mbar. Untuk beban identasi 200 gf, didapatkan

fluktuasi kekerasan tertinggi 1,6 % pada tekanan nitridasi 1,8 mbar dan terendah 3,2 % pada tekanan nitridasi 2,0 mbar. Kekerasan maksimum yang dihasilkan untuk beban identasi 50 gf adalah 935,7 VHN dan untuk beban identasi 200 gf adalah 575,9 VHN

Pada Gambar 6 ditunjukkan hasil perhitungan homogenitas kekerasan permukaan pena piston hasil nitridasi. Homogenitas kekerasan hasil nitridasi adalah sangat penting karena terkait dengan laju keausan saat komponen mesin digunakan. Jika kekerasan permukaan suatu komponen mesin tidak merata maka homogenitas kekerasannya rendah dan laju keausannya tidak merata.

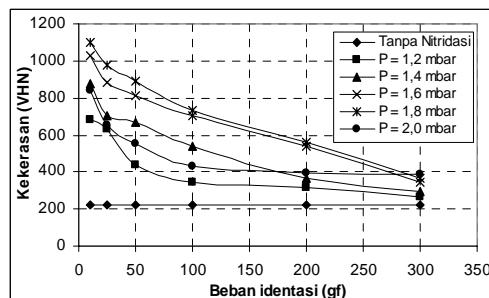


Gambar 7. Homogenitas kekerasan sebagai fungsi tekanan

Pada umumnya suatu komponen mesin yang saling bergesekan diperlukan sifat keras dipermukaannya. Sifat keras ini berbanding terbalik dengan laju keausan dan berbanding lurus dengan umur pakai (*life time*). Untuk komponen mesin yang saling bergesekan diperlukan sifat kekerasan permukaan dan homogenitas yang tinggi sehingga akan mempunyai laju keausan yang rendah dan mempunyai umur pakai yang lama. Dari hasil nitridasi pena piston diperoleh kekerasan 5 kali kekerasan awal untuk beban identasi 10 gf, homogenitas 91 % untuk beban 50 gf dan 98 % untuk beban 200 gf. Hasil ini cukup baik untuk perlakuan permukaan khususnya untuk peningkatan kekerasan komponen mesin sehingga dapat meningkatkan kualitasnya.

Pada Gambar 8 ditunjukkan hasil pengujian kekerasan untuk variasi beban identasi. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui hubungan kekerasan dengan kedalaman difusi nitrogen ke dalam permukaan pena piston sehingga membentuk nitrida besi yang mempunyai sifat keras. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa makin besar beban identasi makin rendah kekerasan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan makin besar beban identasi makin dalam bekas identasi sehingga makin masuk ke permukaan pena piston. Pada proses nitridasi

dengan sistem ini, atom nitrogen terdeposisi ke permukaan pena piston dan dilanjutkan dengan proses difusi ke dalam permukaan. Makin ke dalam dari permukaan makin rendah konsentrasi atom nitrogen yang berdifusi dan membentuk nitrida besi sehingga makin rendah kekerasannya. Hasil pengujian untuk nitridasi pada tekanan optimum yaitu 1,8 mbar dan beban identasi 10 gf didapatkan kekerasan 1102,91 VHN serta untuk beban identasi 300 gf didapatkan kekerasan 367,56 VHN dari kekerasan awal 220 VHN. Untuk tekanan nitridasi 1,2 mbar didapatkan 685,65 VHN untuk beban identasi 10 gf dan 268,66 VHN untuk beban identasi 300 gf, sedangkan pada tekanan nitridasi 2,0 mbar didapatkan 839,3 VHN untuk beban identasi 10 gf dan 388,2 VHN untuk beban identasi 300 gf. Sesuai dengan tujuan nitridasi yaitu untuk meningkatkan kekerasan permukaan, maka hasil ini menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekerasan sebagai fungsi beban identasi. Perubahan beban identasi menyebabkan perubahan kedalaman bekas identasi sehingga dari pengujian ini didapatkan kekerasan optimum pada permukaan walaupun pada jarak tertentu dari permukaan juga terjadi peningkatan kekerasan.

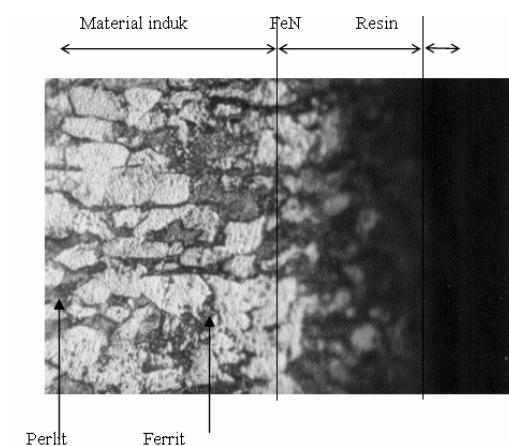


Gambar 8. Kekerasan sebagai fungsi beban identasi untuk variasi tekanan

Pada Gambar 9 ditunjukkan struktur mikro penampang melintang pena piston hasil nitridasi. Dari gambar tersebut terlihat jelas terjadi perubahan lapisan permukaan akibat nitridasi. Perubahan ini ditunjukkan dengan adanya struktur butir yang halus pada permukaan yang disebabkan oleh terdeposisinya atom nitrogen dan berdifusi ke dalam logam induk (Fe) sehingga membentuk ikatan nitida besi (FeN) yang mempunyai sifat keras.

Pada gambar tersebut ditunjukkan 3 daerah yang berbeda yaitu daerah material induk, daerah FeN dan daerah resin. Daerah material induk menunjukkan daerah struktur kristal bahan dasar pena piston yang mempunyai struktur kristal kasar yaitu batas butir ferrit dan perlit cukup jelas. Daerah nitrida besi (FeN) menunjukkan daerah

terjadinya ikatan nitrogen (N) dengan logam induk (Fe) membentuk nitrida besi (FeN), sedangkan daerah



Gambar 9. Struktur mikro penampang melintang hasilnitridasi

resin menunjukkan struktur resin yang digunakan untuk menempatkan substrat (potongan pena piston) pada pengamatan struktur mikro. Adapun gambar pena piston yang dinitridasi ditunjukkan pada lampiran.

KESIMPULAN

Dari hasil proses nitridasi pena piston dengan teknik nitridasi plasma dan berdasarkan hasil pengolahan data dapat disimpulkan bahwa:

1. Kekerasan maksimum hasil nitridasi diperoleh pada tekanan nitridasi 1,8 mbar dan beban indentasi 10 gf sebesar 1102,91 KHN yaitu dengan peningkatan kekerasan 401 % dari bahan sebelum dinitridasi
2. Homogenitas kekerasan didapatkan 91 % untuk beban indentasi 10 gf dan 98 % untuk beban indentasi 200 gf.
3. Makin besar beban indentasi makin dalam bekas indentasi sehingga diperoleh kekerasan vikers lebih rendah.
4. Hasil uji metalografi diperoleh perubahan struktur butiran ferrit dan perlit yaitu berubah menjadi butiran yang halus sehingga terjadi peningkatan kekerasan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] DIETER, G.E., Metalurgi Mekanik, Penerjemah Sriati Djaprie, Penerbit Erlangga, Jakarta (1987).
- [2] Alexander W.O, Dasar-dasar Metalurgi untuk Rekayasa, Penerbit Gramedia, Jakarta (1991).
- [3] -----, Metal Hand Book, Heat Treating, Cleaning and Finishing Volume 2, 8th Edition, ASTM, United State of America (1988).
- [4] KONUMA, M., Film Deposition By Plasma Techniques, Springer Verlag, Berlin (1992)
- [5] SINHA, A.K., Physical Metallurgy Handbook, Mc Graw-Hill, New York (2003)
- [6] WASA, K. AND HAYAKAWA, S., Handbook of Sputter Deposition Technology, Noyes Publication, New York (1992).
- [7] MUKHERJEE, S., Plasma Based Nitrogen Incorporation Techniques for Surface Modification, Current Science, Vol.83-No.3, Gandhinagar, India (2002).
- [8] UEDA, M., GOMES, G.F., KOSTOV, K.G., REUTHER, H., LEPIENSKI, C.M., SOARES, P.C., TOKAI, O., AND SILVA, M.M., Results from Experiments on Hybrid Plasma Immersion Ion Implantation/Nitriding Processing of Materials, Brazilian Journal of Physics, Vol. 34 no 4b, Sao Paulo (2004).

TANYA JAWAB

Rill Isaris

- *Dalam abstrak tercantum hasil dimensi bejana yang belum terlihat perhitungan di dalam makalah. Apakah hal tersebut berdasarkan Spec Requirement yang belum dinyatakan secara explisit?*
- *Apakah dapat dibuat opsi lain dimensi tersebut?*

Suprapto

- Dimensi bejana ditentukan berdasarkan kebutuhan yang disesuaikan dengan bentuk corong pemayar dan window, kemudian dilakukan perhitungan pendinginan dan penggambaran secara detil sehingga dapatkan dimensi sesungguhnya.
- Opsi lain sangat sulit karena harus menyesuaikan bentuk corong pemayar dan window

Nada Marnada

- *Apakah disain bejana yang dibuat sudah memperhitungkan faktor waktu (lama) masa transparasi yang pada kondisi tertentu akan*

merubah viskositas latex yang menjadi parameter perhitungan ?

Suprapto

– Perhitungan belum mempertimbangkan faktor waktu transpartasi atau penyimpanan yang dapat merubah viskositas lateks. Viskositas diambil pada kondisi standar (acuan) dari lateks

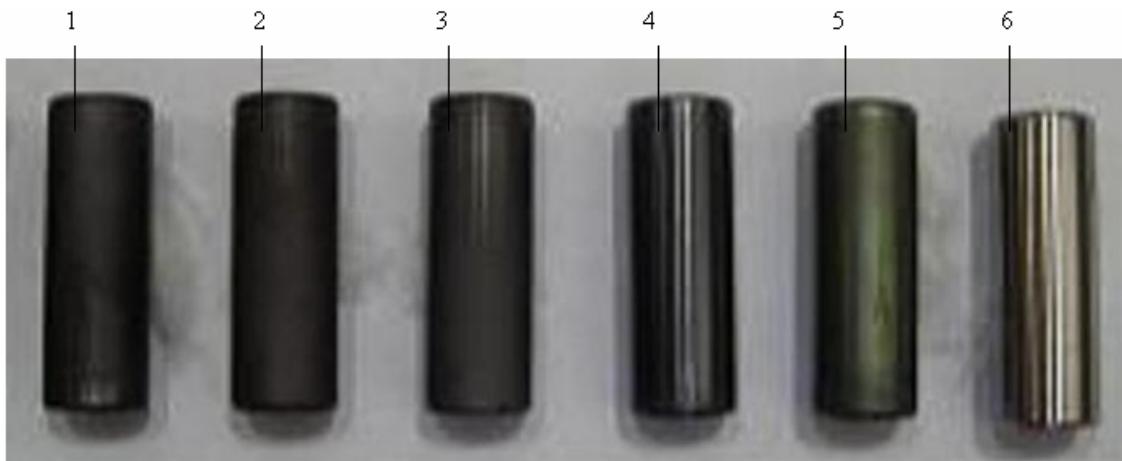
Utaja

– Bagaimana menetralisir muatan yang ada di dalam lateks

Suprapto

– Saat vulkanisasi, lateks diaduk dan disirkulasikan sehingga terjadi kontak antara molekul-molekul lateks dengan bejana. Dengan demikian terjadi penetralan muatan walaupun tidak seluruhnya (100%) karena lateks merupakan isolator listrik.

Lampiran



Keterangan:

- | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1. Nitridasi pada 1,2 mbar | 2. Nitridasi pada 1,4 mbar | 3. Nitridasi pada 1,6 mbar |
| 4. Nitridasi pada 1,8 mbar | 5. Nitridasi pada 2,0 mbar | 6. Tanpa nitridasi |

Gambar 9. Pena piston yang dinitridasi dan tanpa nitridasi