

## ANALISIS PERMUKAAN MATERIAL ALUMINIUM PADUAN (AlSiCu) HASIL NITRIDASI ION

### SURFACE ANALYSIS OF ION NITRIDED ALUMINIUM ALLOY (AlSiCu)

Suprpto<sup>1</sup>, BA. Tjipto Sujitno<sup>1</sup>, Taufik<sup>1</sup>, Adnan Abdussalam<sup>2</sup>, Dwi Priyantoro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN

<sup>2</sup>Sekolah Tinggi Teknik Nuklir BATAN

e-mail: praptowh@batan.go.id

Diterima 11 Agustus 2016, diterima dalam bentuk perbaikan 13 Oktober 2016, disetujui 24 Oktober 2016

#### ABSTRAK

**ANALISIS PERMUKAAN MATERIAL ALUMINIUM PADUAN (AlSiCu) HASIL NITRIDASI ION.** Paduan aluminium (AlSiCu) merupakan material yang banyak digunakan untuk komponen mesin misalnya piston dan pulley karena ringan dan kekuatan spesifiknya tinggi. Kelemahan utama dari paduan ini adalah kekerasan dan kehandalan aus rendah. Untuk mengatasi masalah tersebut dilakukan perlakuan permukaan dengan teknik nitridasi ion. Proses nitridasi ion ini dilakukan untuk berbagai variasi parameter proses. Perubahan sifat sebelum maupun sesudah proses nitridasi di-analisis struktur mikronya, komposisi unsur, kekerasan maupun ketahanan aus menggunakan SEM yang dihubungkan dengan EDX, microhardness tester dan wear testing machine. Diperoleh hasil bahwa kondisi optimum dari parameter proses dicapai pada lamanya proses 3 jam, tekanan 1,2 mbar dan suhu 150 °C. Pada kondisi ini kekerasan meningkat sekitar 2,01 kalinya, keausan menurun sebesar 13,67 kalinya dan terdeteksi kandungan unsur nitrogen serta oksigen masing masing sebesar 3,95 %/berat dan 29,93 %/berat. Kekerasan permukaan meningkat sebesar 2,01 kalinya, ketahanan aus meningkat sebesar 13,67 kalinya. Dapat disimpulkan bahwa peningkatan kekerasan maupun ketahanan aus kemungkinan besar disebabkan oleh terbentuknya senyawa AlN maupun Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dengan meningkatnya kekerasan maupun ketahanan aus maka umur pemakaian komponen juga meningkat.

**Kata kunci :** ion, plasma, nitridasi, aluminium paduan, kekerasan, keausan, umur pakai

#### ABSTRACT

**SURFACE ANALYSIS OF ION NITRIDED ALUMINIUM ALLOY (AlSiCu) MATERIAL.** Aluminium alloy (AlSiCu) is widely used for engine components such as piston and pulley due to their light weight with high specific strength. However their little corrosion resistance, low hardness and low wear endurance became fatal demerit in practical application. To overcome these hindrance, plasma nitriding technique was applied to improve the quality of the surface. Plasma nitriding process were carried out for various of the process parameters. Nitrided and un-nitrided samples were tested their hardness, wear resistance, microstructure and chemical composition using microhardness tester, wear testing machine, and SEM coupled with EDX. It's found that the optimum condition is achieved at 3 hours of time, 1.2 mbar of pressure, and 150 °C of temperature. At these conditions the hardness increase around 2.01 times, the wear resistance increase around 13.67 times. The detected nitrogen around 3.95 %, while the oxygen around 29.93 %. It can be concluded that the increasing in hardness and wear resistance may be caused by the formation both of aluminum nitride (AlN) and aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), by increasing of surface material hardness and wear resistance, it mean the life time increase.

**Keywords :** ion, plasma, nitridation, aluminium alloy, hardness, wear, life time

#### PENDAHULUAN

Dengan berkembangnya teknologi khususnya di bidang permesinan baik di bidang industri maupun otomotif maka pengembangan dan inovasi komponen-komponen permesinan makin bertambah. Pengembangan dan inovasi untuk kemajuan teknologi permesinan berbanding lurus dengan kebutuhan untuk mengembangkan bahan-bahan mekanik yang akan digunakan. Aluminium dan aluminium paduan merupakan bahan logam bukan besi (*non ferro*) yang dalam 3 sampai 5 dekade banyak sekali digunakan untuk konduktor (kabel) listrik, alat-alat transportasi (komponen mesin dan *body*), kemasan dan bangunan[1]. Didorong oleh kebutuhan konsumen dan peraturan yang makin ketat, industri otomotif telah banyak menggunakan aluminium untuk komponen-komponen

otomotif yang dapat mengurangi berat mencapai sekitar 100 kg setiap unit otomotif. Penggunaan untuk komponen ini misalnya untuk silinder *head*, blok mesin dan piston serta *pulley*. Penggunaan aluminium dengan pertimbangan untuk mengurangi berat otomotif dan penghematan konsumsi bahan bakar (dengan mengurangi berat sekitar 100 kg akan mengurangi konsumsi bahan bakar sekitar 0,6 liter/100 km dan gas rumah kaca sebesar 20%), resistensi dan penyerapan energi kinetik lebih rendah sehingga jarak pengereman lebih pendek [1]. Komponen-komponen otomotif yang terbuat dari bahan aluminium dan yang mengalami gesekan sehingga terjadi keausan misalnya piston dan *pulley*. Jenis paduan aluminium yang banyak digunakan untuk bahan piston dan *pulley* adalah paduan aluminium jenis AlSiCu [2]. Keuntungan menggunakan bahan ini antara lain: konstruksi ringan dan murah serta kekuatannya memenuhi syarat [3]. Di samping itu aluminium paduan juga mempunyai sifat mampu mesin baik (*machine ability*) yaitu mudah dikerjakan dengan peralatan mesin, keandalan dan karakteristik daur ulang tinggi, teknik pabrikan sederhana serta konduktivitas termal tinggi [4]. Adapun kelemahan utama dari paduan ini adalah kekerasan dan ketahanan aus yang rendah [5]. Pengembangan selanjutnya adalah untuk mereduksi berat, koefisien gesek rendah, meningkatkan kemampuan terhadap beban mekanik dan termal serta ketahanan pukulan akibat letupan hasil pembakaran (*scuffing*) [4]. Dalam meningkatkan kemampuan terhadap beban mekanik termasuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus sehingga dapat meningkatkan umur pakai (*lifetime*).

Piston merupakan salah satu bagian komponen otomotif yang sangat penting karena piston digunakan untuk mengubah tenaga potensial (tekanan gas hasil pembakaran bahan bakar) menjadi tenaga mekanik (tenaga gerak). Untuk mengubah tenaga potensial ke tenaga mekanik, piston menerima gaya tekan langsung dari gas hasil pembakaran. Akibat tekanan gas tersebut piston bergerak (gerak bolak-balik) untuk meneruskan tenaga gerak ke poros engkol melalui batang piston. Akibat gerakan ini maka terjadi gesekan antara piston dengan silinder blok/silinder *liner* sehingga terjadi keausan dan kerusakan. Keausan dan kerusakan yang sering terjadi pada piston adalah pada mahkota/puncak piston (*piston crown*), pinggiran piston (*piston skirt*) dan cincin piston. Kerusakan pada mahkota/puncak piston disebabkan karena adanya letupan hasil pembakaran dan keausan disebabkan karena adanya gesekan antara pinggiran piston dengan silinder blok akibat gerak bolak-balik. Untuk letupan yang sangat membahayakan piston adalah letupan karena detonasi (*knocking*) yaitu letupan akibat pembakaran bahan bakar yang tidak tepat pada waktunya. Detonasi sering terjadi jika tidak sesuai kebutuhan angka oktan (*research octane number/RON*) bahan bakar yang digunakan dengan perbandingan kompresi (*compression ratio*) dari mesin. Piston biasanya diproduksi dengan cara pengecoran (*casting*). Proses pengecoran piston ada 4 (empat) jenis yaitu: pengecoran dengan gravitasi (*gravity die casting/GDC*), pengecoran dengan tekanan rendah (*low pressure die casting/LPDC*), pengecoran dengan tekanan tinggi (*high pressure die casting/HPDC*) dan pengecoran secara sentrifugal (*centrifugal casting*) [6, 7]. Hasil proses pengecoran piston tersebut adalah piston dengan proses LPDC dan HPDC [6] mempunyai porositas lebih tinggi dibanding proses GDC, sedangkan uji simulasi kerusakan *fatigue* terhadap beban termal pada suhu minimum 200 °C dan maksimum 440 °C mendekati sama [6]. Untuk pengecoran secara sentrifugal dapat meningkatkan kekerasan sehingga dapat meningkatkan ketahanan aus dan menurunkan laju keausan hingga mencapai 70,3 % dibanding dengan pengecoran secara gravitasi [7]. Walaupun demikian masih terjadi keausan sehingga diperlukan rekayasa permukaan untuk meningkatkan kualitas permukaan yang dapat meningkatkan ketahanan aus sehingga memperpanjang umur pemakaian. Rekayasa permukaan ini dapat dilakukan dengan metode nitridasi ion yaitu untuk membentuk lapisan nitrida logam yang dapat meningkatkan kekerasan, ketahanan aus dan korosi sehingga dapat meningkatkan umur pakai (*lifetime*) [5]. Di samping itu, nitridasi ion adalah efektif untuk proses nitridasi paduan logam karena tingkat kecepatan (waktu yang dibutuhkan lebih cepat dan suhu nitridasi relatif lebih rendah) [5]. Proses nitridasi dapat digunakan untuk proses perlakuan permukaan logam baik logam berbasis fero (besi/baja) maupun logam berbasis bukan fero (aluminium). Pada tahun 2013 telah dilakukan uji fungsi/uji kinerja perangkat nitridasi ion bejana ganda yang dirancangkan di PSTA, dalam uji kinerja termasuk untuk proses nitridasi [8]. Proses nitridasi ini digunakan untuk pra-penerapan perangkat nitridasi untuk perlakuan permukaan bahan logam.

Berdasarkan uraian tersebut maka tujuan utama dari proses nitridasi ion material logam berbasis bukan fero yaitu AlSiCu untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, uji struktur mikro dan komposisi serta analisis hasil nitridasi. Uji kekerasan dan keausan permukaan dilakukan dengan *Micro Hardness Tester* MATSUZAWA tipe MMT-X7 dan *Ogoshi high speed universal wear testing machine* (type OAT-U), sedangkan uji struktur mikro dan komposisi dengan SEM-EDS. Selanjutnya hasil penelitian ini diharapkan dapat diterapkan untuk perlakuan

komponen mesin misalnya perlakuan piston otomotif untuk mengurangi laju keausan pada pinggiran piston (*piston skirt*) sehingga dapat meningkatkan umur pakai (*life time*).

## METODOLOGI

Bahan yang dinitridasi adalah paduan aluminium (AlSiCu) dengan komposisi (wt%) sebagai berikut: 81,73% Al, 13,83% Si dan 1,36% Cu, sedangkan untuk proses pengerasan menggunakan gas nitrogen.

Peralatan yang digunakan untuk penelitian ini meliputi: perangkat nitridasi ion lengkap dengan catu daya DC, sistem vakum dan instrumennya, *Micro Hardness Tester* MATSUZAWA tipe MMT-X7 di PSTA-BATAN, SEM-EDS di UNM-Malang, alat uji aus *Ogoshi high speed universal wear testing machine* (type OAT-U) di Teknik Mesin-UGM.

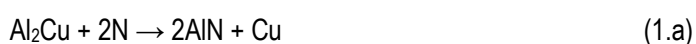
Bahan yang dinitridasi adalah cuplikan aluminium paduan AlSiCu yang mempunyai ukuran 10 mm × 20 mm × 2 mm, bahan ini disiapkan dengan teknik konvensional yaitu pemotongan, pemolesan (pengampelasan dan penghalusan permukaan). Pengampelasan dilakukan dengan kertas ampelas mulai dari ukuran 400 mesh hingga 2000 mesh, dihaluskan dengan autosol yang dioleskan pada kain beludru hingga diperoleh permukaan yang halus dan mengkilap. Untuk membersihkan kotoran pada permukaan dicuci menggunakan mesin cuci ultrasonik dengan menggunakan air dan deterjen serta dilanjutkan dalam alkohol. Dari proses persiapan cuplikan tersebut dilanjutkan proses nitridasi menggunakan perangkat nitridasi ion. Proses nitridasi untuk berbagai variasi waktu, tekanan dan suhu. Variasi waktu yaitu 2 jam, 3 jam, 4 jam dan 5 jam sedangkan variasi tekanan yaitu 0,8 mbar, 1 mbar, 1,2 mbar dan 1,4 mbar. Untuk variasi suhu dilakukan pada suhu 125 °C, 150 °C dan 175 °C. Tekanan selama proses nitridasi dilakukan dengan mengatur masukan gas nitrogen menggunakan *needle valve*, sedangkan suhu nitridasi diatur dengan mengatur tegangan catu daya mulai dari 0 volt s/d. 700 volt DC sehingga terjadi proses ionisasi nitrogen dan ion-ion yang terbentuk diarahkan ke katode/cuplikan.

Pengujian ditekankan pada struktur mikro, kekerasan, keausan dan korosi. Pengujian ini didasarkan pada kebanyakan kerusakan piston yang disebabkan oleh keausan walaupun kerusakan akibat lainnya memungkinkan terjadi. Uji struktur mikro dilakukan menggunakan SEM-EDS di UNM-Malang baik untuk permukaan cuplikan sebelum dinitridasi (*raw material*) maupun permukaan cuplikan yang telah dinitridasi. Untuk uji keras dilakukan dengan metode Vickers menggunakan *Mikro Hardness Tester* MATSUZAWA tipe MMT-X7 di PSTA-BATAN, uji aus menggunakan alat uji aus *Ogoshi high speed universal wear testing machine* (type OAT-U) di Teknik Mesin-UGM.

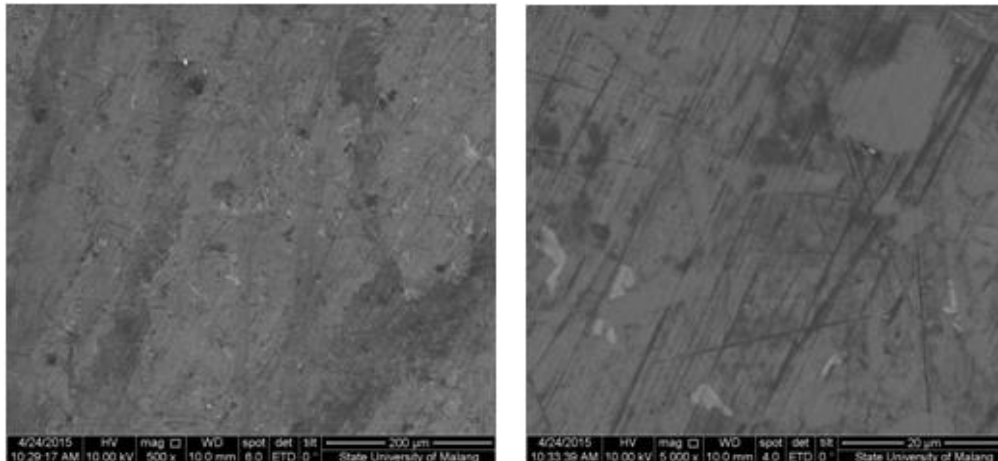
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Struktur Mikro Hasil Uji SEM-EDS

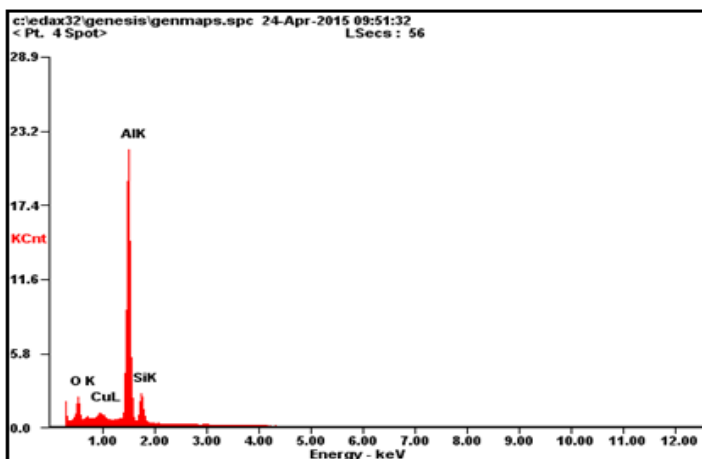
Mikrograf SEM dari permukaan cuplikan AlSiCu ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Pengujian dikenakan untuk material dasar (Gambar 1) dan setelah dinitridasi (Gambar 2) sehingga dapat diketahui perubahan yang terjadi baik kandungan unsurnya maupun struktur mikro dari permukaan. Mekanisme terbentuknya AlN pada permukaan aluminium yang dinitridasi adalah dimulai terdosisnya ion nitrogen ke permukaan akibat beda potensial antara anode dan katode (cuplikan AlSiCu ditempatkan pada katode). Di samping terdosisnya ion nitrogen juga terjadi tumbukan antara ion nitrogen dengan permukaan aluminium yang selanjutnya terjadi pemanasan dan ter-*sputter*-nya sebagian atom-atom aluminium dari permukaan. Akibatnya, atom-atom yang ter-*sputter* berinteraksi dengan ion nitrogen dan terbentuk senyawa aluminium nitrida (AlN), AlN ini sebagian besar terdosis pada permukaan cuplikan. Pemanasan cuplikan dihasilkan dari tumbukan ion nitrogen dengan cuplikan dimungkinkan sampai dapat mencairkan permukaan sehingga terjadi pelelehan pada permukaan. Pembentukan lapisan nitrida pada aluminium permukaan ada 2 jenis yaitu struktur kolom (*columnar*) dan struktur *granular*, struktur ini ditunjukkan pada Gambar 3. Struktur kolom (*columnar*) terjadi pada dasar permukaan akibat pelelehan yang disebabkan dari tumbukan dan senyawa ion nitrogen, sedangkan struktur *granular* terjadi pada permukaan selanjutnya yang terbentuk akibat kondensasi atom aluminium yang ter-*sputter* dan bersenyawa dengan ion nitrogen serta terkondensasi pada permukaan [9]. Pengujian mikrograf pada Gambar 1.a adalah untuk cuplikan sebelum dinitridasi sehingga yang terlihat hanya hasil preparasi (hasil pemolesan), sedangkan mikrograft pada Gambar 2.a adalah cuplikan setelah dinitridasi sehingga terlihat bekas pelelehan permukaan hasil nitridasi. Hasil ini sesuai dengan mekanisme pembentukan lapisan nitrida aluminium pada permukaan seperti yang telah diuraikan dan ditunjukkan pada Gambar 3. Adapun pembentukan senyawa AlN saat proses nitridasi ion khususnya untuk material AlCu yaitu endapan Al<sub>2</sub>Cu bekerja sebagai katalis untuk mengakomodasi tingkat kecepatan nitridasi dengan rangkaian reaksi fase padat. Reaksi ini dapat dituliskan sebagai berikut [5]:



dan selanjutnya



a. Mikrograf material AISiCu sebelum dinitridasi.



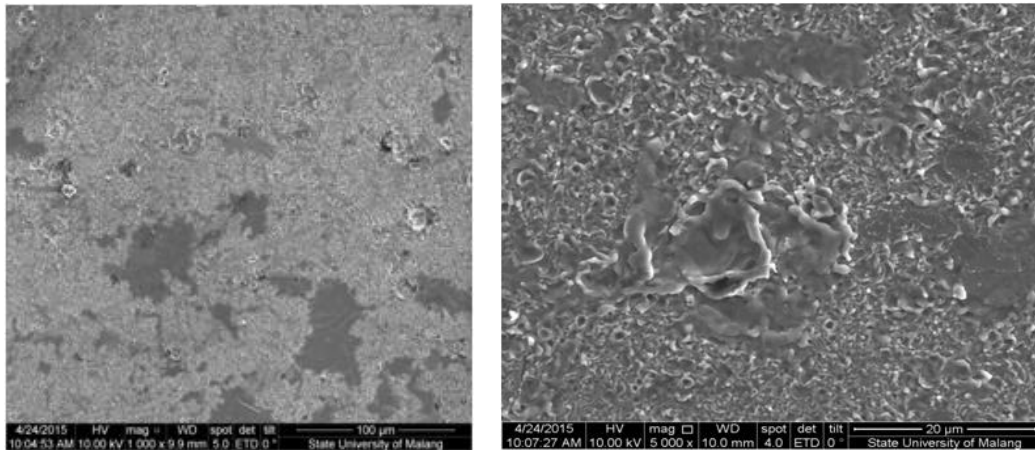
Element	Wt%	At%
OK	4.12	6.89
CuL	2.65	1.12
AlK	81.11	80.44
SiK	12.12	11.55
Matrix	Correction	ZAF

b. Uji EDS material AISiCu sebelum dinitridasi.

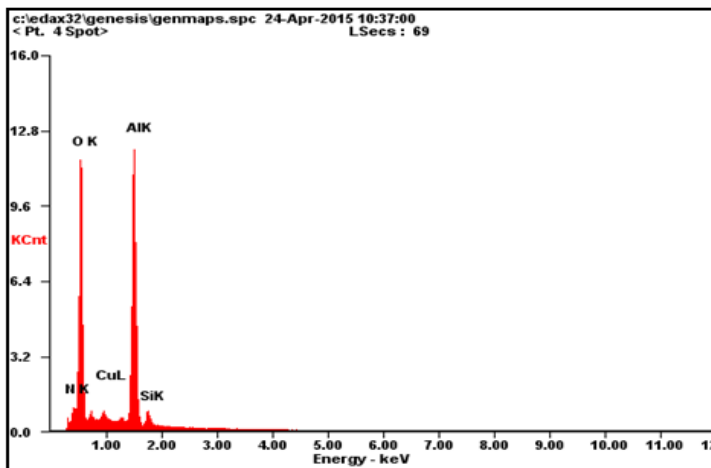
**Gambar 1.** Hasil Uji SEM-EDS material AISiCu sebelum dinitridasi ion.

Didasarkan pengamatan mikrograf, jika dibandingkan antara sebelum (Gambar 1.a) dan sesudah dinitridasi (Gambar 2.a) menunjukkan perbedaan yang signifikan yaitu mikrograf permukaan setelah dinitridasi terjadi pelelehan pada permukaan sesuai uraian mekanisme pembentukan ikatan AlN. Di samping pelelehan permukaan dimungkinkan juga terjadi percikan (*sputter*) atom aluminium akibat tumbukkan ion nitrogen dan bersenyawa dengan ion nitrogen sehingga membentuk senyawa AlN serta terkondensasi pada permukaan. Terbentuknya senyawa AlN pada permukaan dibuktikan dengan analisis unsur menggunakan EDS yang ditunjukkan pada Gambar 1.b dan Gambar 2.b. Hasil pengamatan pada Gambar 1.b tidak menunjukkan adanya unsur nitrogen karena cuplikan (*raw material*) sebelum dinitridasi tetapi unsur oksigen sudah ada, sedangkan pengamatan pada Gambar 2.b menunjukkan adanya tambahan unsur nitrogen dan oksigen akibat proses nitridasi.

Menurut Shahien [10], untuk terbentuknya reaksi pada nitridasi dimulai pada permukaan partikel cairan berbentuk bola (*molten spherical particle*) untuk membentuk struktur kubik aluminium oxynitride ( $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$ ). Dari struktur kubik aluminium oxynitride ( $\text{Al}_5\text{O}_6\text{N}$ ) dilanjutkan terbentuknya senyawa kubik aluminium nitrida (*c-AlN*) dan aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Pada pengamatan ini diperoleh tambahan unsur (wt%) 3,95% N dan 29,93% O, sedangkan sebelum dinitridasi 0% N dan 4,12% O. Dari analisis unsur tersebut diperoleh kandungan unsur oksigen (O) jauh lebih besar dibandingkan kandungan unsur nitrogen (N). Cuplikan sebelum dinitridasi,



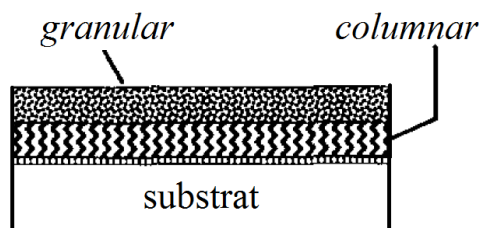
a. Mikrograf material AlSiCu setelah dinitridasi.



Element	Wt%	At%
NK	3.95	6.19
OK	29.93	41.08
CuL	2.09	0.72
AlK	60.12	48.94
SiK	3.91	3.06
Matrix	Correction	ZAF

b. Uji EDS material AlSiCu setelah dinitridasi.

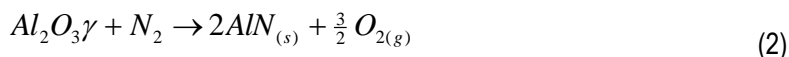
Gambar 2. Hasil Uji SEM-EDS material AlSiCu setelah dinitridasi ion.



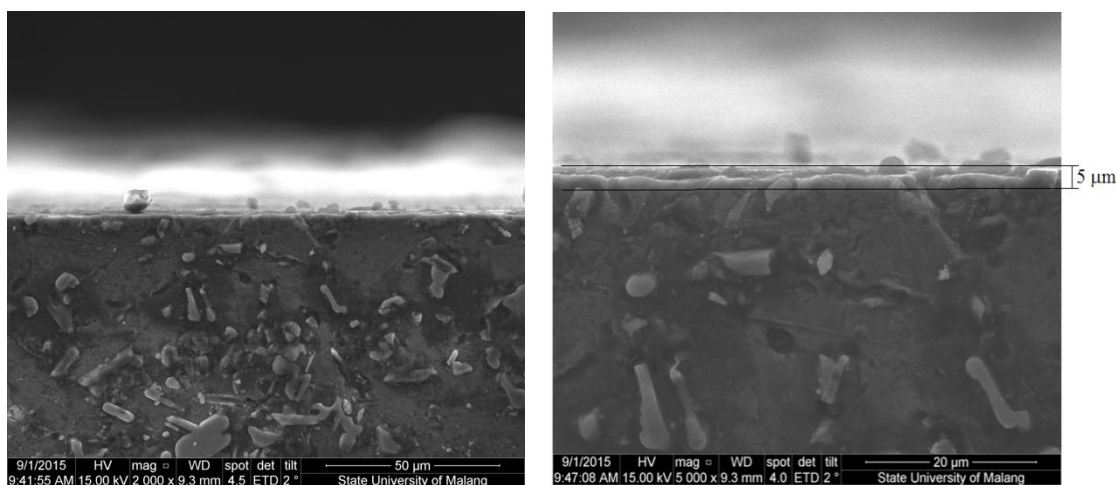
Gambar 3. Lapisan nitrida aluminium akibat nitridasi ion [9].

kandungan oksigen dimungkinkan terjadi pembentukan senyawa aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) pada permukaan saat proses preparasi karena senyawa ini dapat terjadi pada suhu ruangan. Untuk cuplikan setelah dinitridasi dimungkinkan karena pembentukan senyawa aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) lebih mudah dibanding aluminium nitrida (AlN), sedangkan oksigen ( $O_2$ ) untuk pembentukan aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) diperoleh dari ketidakmurnian gas nitrogen yang digunakan. Jika didasarkan pada uraian tersebut, maka akibat kandungan oksigen sebagai gas ikutan (*impurity*) pada gas nitrogen yang digunakan untuk proses nitridasi maka pada permukaan aluminium akan terbentuk aluminium nitrida (AlN) dan aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) sehingga pada analisis unsur diperoleh kandungan unsur nitrogen (N) dan oksigen (O). Dengan terbentuk lapisan permukaan aluminium nitrida (AlN) dan aluminium oksida ( $Al_2O_3$ ) dapat mengubah sifat-sifat fisis dan kimia dari permukaannya. Kondisi tambahan unsur nitrogen (N) dan oksigen (O) sesuai dengan yang dilakukan pada proses nitridasi aluminium menggunakan nitridasi plasma

radio frekuensi yang dilakukan oleh Hassan [11] yaitu pada waktu nitridasi 3 jam, 6 jam dan 9 jam. Dari analisis unsur menggunakan EDS pada nitridasi ini diperoleh unsur nitrogen (N) dan oksigen (O) masing-masing (wt %) adalah: 3,99% N dan 12,44% O untuk 3 jam, 4,31% O dan 18,61% N untuk 6 jam serta 8,78% N dan 4,01% O untuk 9 jam serta untuk nitridasi dengan >12 jam tidak ada unsur oksigen [11]. Hal ini dimungkinkan karena terjadinya reaksi  $Al_2O_3$  dengan  $N_2$  sehingga terbentuk  $AlN$  dan  $O_2$  dengan reaksi sebagai berikut [12]:



Untuk mengetahui ketebalan lapisan diamati tampak lintang permukaan yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.



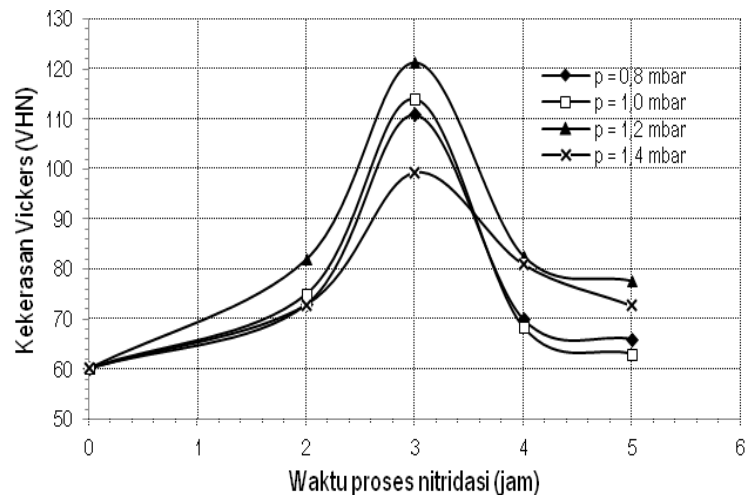
Gambar 4. Mikrograf SEM tampak-lintang cuplikan AlSiCu setelah dinitridasi ion

Dari pengamatan tersebut diperoleh tebal lapisan keras yaitu lapisan  $AlN$  dan  $Al_2O_3$  sekitar  $5 \mu m$ . Hasil ini dikarenakan hasil kekerasan optimum diperoleh pada suhu  $150 \text{ }^\circ C$  (Gambar 5) dan laju difusi unsur nitrogen berbanding secara eksponensial suhu nitridasi sehingga pada suhu ini dimungkinkan laju difusi sangat rendah.

#### Hasil uji keras Vickers

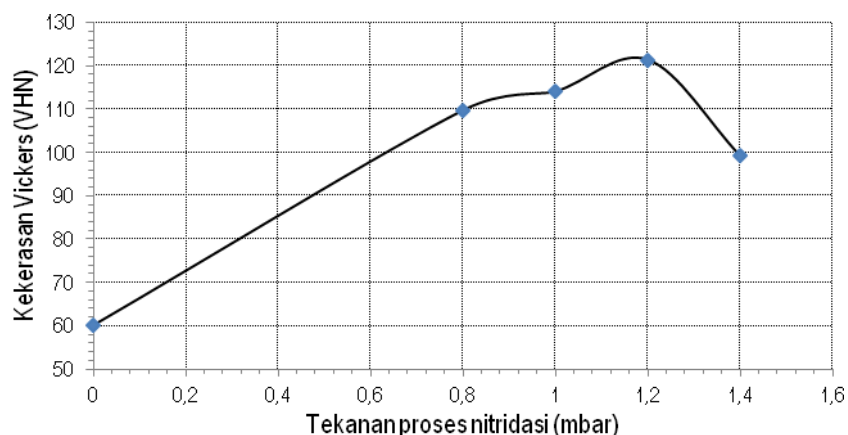
Hasil pengujian kekerasan menggunakan *microhardness tester* MATSUZAWA tipe MMT-X7 pada permukaan AlSiCu yang tanpa nitridasi maupun yang dinitridasi untuk berbagai variasi waktu proses disajikan pada Gambar 5 sampai dengan Gambar 8. Dari hasil pengujian tersebut terlihat bahwa makin lama waktu proses nitridasi berlangsung kekerasannya meningkat dan mencapai puncaknya pada waktu nitridasi 3 jam. Apabila waktu proses nitridasi ditambah, ternyata kekerasan menurun. Peningkatan kekerasan tersebut selaras dengan jumlah atom nitrogen yang terdeposisi pada permukaan maupun yang berdifusi ke tempat yang lebih dalam pada cuplikan. Atom-atom yang berdifusi akan terlarut dalam atom cuplikan secara sisipan (*interstition*). Terlarutnya atom-atom nitrogen dalam atom cuplikan yang dimungkinkan membentuk senyawa aluminium nitrida ( $AlN$ ) tersebut akan memberikan kontribusi pada peningkatan kekerasan permukaan cuplikan AlSiCu. Pembentukan lapisan keras ini adalah lapisan nitrida dengan struktur kolom (*columnar*) [9]. Kondisi kekerasan optimum dari permukaan cuplikan yang dicapai pada waktu nitridasi selama 3 jam tersebut, kemungkinan besar batas kelarutan atom-atom nitrogen pada cuplikan telah terpenuhi (kondisi jenuh). Fenomena pengerasan model ini dinamakan pengerasan larut padat kelewat jenuh (4S, *supersaturated solid solution strengthening*). Di samping itu sebagai akibat interaksi ion-ion nitrogen energi tinggi dengan permukaan cuplikan menyebabkan atom-atom permukaan cuplikan akan terlepas (*sputtered*). Atom-atom cuplikan yang terlepas (*sputtered*) tersebut akan bereaksi dengan ion-ion nitrogen yang datang dan membentuk senyawa  $AlN$  dan selanjutnya menempel pada permukaan cuplikan (*adsorption*). Pembentukan lapisan keras ini adalah lapisan nitrida dengan struktur *granular* [9]. Terbentuknya senyawa  $AlN$  tersebut juga akan memberi kontribusi pada peningkatan kekerasan permukaan cuplikan yang dinitridasi. Penurunan tingkat kekerasan permukaan untuk cuplikan yang dinitridasi 4 jam (waktu proses nitridasi ditambah), maka kebolehdian terjadinya penumpukan atom-atom nitrogen dan menempel (*adsorption*) pada

permukaan cuplikan sangat besar. Tertempelnya atom-atom nitrogen pada permukaan cuplikan tersebut akan menyebabkan ukuran butir (*grain size*) membesar (*growth*).



**Gambar 5.** Hubungan kekerasan sebagai fungsi waktu proses nitridasi untuk berbagai variasi tekanan pada suhu 150 °C.

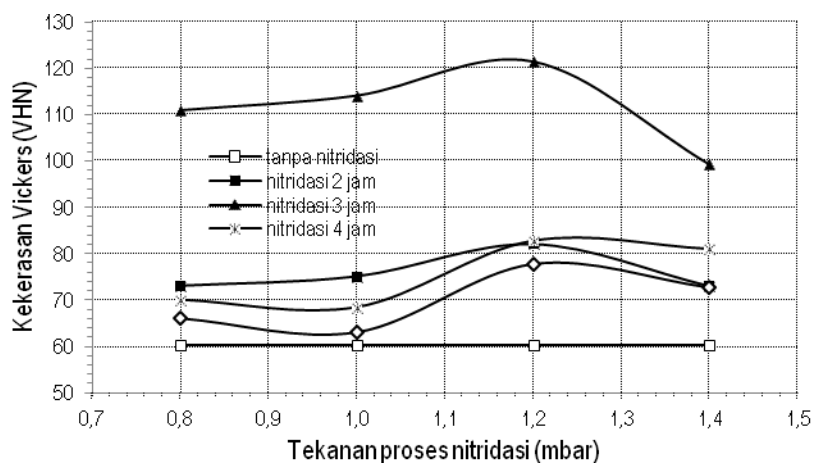
Menurut hukum **Hall Petch** bahwa kekuatan bahan itu berbanding terbalik dengan ukuran butir [13, 14]. Dengan makin besarnya ukuran butir maka kekuatannya menurun. Fenomena ini sesuai hasil penelitian Shah [15] yang menemukan bahwa dari pengukuran butir dengan metode XRD untuk berbagai variasi waktu proses nitridasi yang dilakukan dari 2 jam hingga 14 jam serta dengan menggunakan formula **Scherrer's** diperoleh hasil bahwa untuk waktu nitridasi 2 hingga 6 jam diperoleh ukuran butir makin kecil dan mencapai terkecil pada kondisi waktu nitridasi 6 jam, selanjutnya dengan penambahan waktu proses nitridasi diperoleh ukuran butir makin besar. Dari hasil pengamatan (Gambar 5) menunjukkan bahwa kondisi optimum nitridasi AlSiCu diperoleh dengan waktu proses nitridasi selama 3 jam. Pada Gambar 6 disajikan hubungan kekerasan sebagai fungsi tekanan untuk waktu dan suhu proses nitridasi masing-masing 3 jam dan 150 °C, untuk cuplikan sebelum dinitridasi adalah pada kondisi tekanan 0 (nol) mbar artinya tanpa dinitridasi. Untuk Gambar 7 disajikan hubungan kekerasan sebagai fungsi tekanan untuk berbagai waktu pada suhu proses nitridasi 150 °C, sedangkan pada Gambar 8 disajikan hubungan kekerasan sebagai fungsi suhu proses nitridasi untuk waktu nitridasi 3 jam dan tekanan 1,2 mbar.



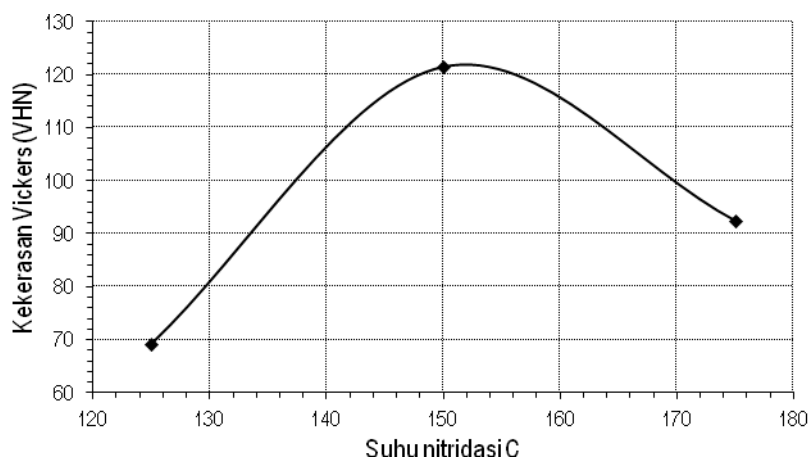
**Gambar 6.** Hubungan kekerasan sebagai fungsi tekanan proses nitridasi untuk waktu nitridasi 3 jam dan suhu 150 °C.

Dari beberapa variasi tersebut diperoleh kekerasan optimum untuk masing-masing variasi tekanan adalah: 110,46 VHN untuk tekanan 0,8 mbar, 113,58 VHN untuk tekanan 1,0 mbar, 120,88 VHN untuk tekanan 1,2 mbar dan 98,87 VHN untuk tekanan 1,4 mbar sedangkan kekerasan awal cuplikan adalah 60,24 VHN. Makin besar tekanan makin tinggi rapat molekul/atom nitrogen yang ada di dalam bejana plasma akibatnya makin banyak molekul/atom nitrogen yang diplasmakan dan dideposisikan ke permukaan cuplikan. Untuk proses nitridasi pada

tekanan 0,8 mbar (tekanan rendah) maka rapat molekul/atom per satuan volume rendah sehingga molekul/atom yang diplasmakan dan dideposisikan sedikit sehingga laju deposisi atom nitrogen dan menumbuk cuplikan rendah, jadi jumlah atom nitrogen yang terdeposisi sedikit. Jika tekanan dinaikkan maka terjadi kenaikan rapat molekul/atom sehingga molekul/atom yang diplasmakan dan did eposisikan terjadi kenaikan serta laju deposisi atom nitrogen dan menumbuk cuplikan bertambah, jadi atom nitrogen yang terdeposisi bertambah. Dengan penambahan jumlah atom nitrogen akan meningkatkan terjadinya senyawa aluminium nitrida (AlN) sehingga nilai kekerasan meningkat. Hal ini terjadi sampai pada tekanan 1,2 mbar, namun untuk tekanan 1,4 mbar kekerasan yang diperoleh menurun. Pada tekanan 1,4 mbar dimungkinkan terjadi fenomena seperti pada penambahan waktu proses nitridasi sehingga terjadi kemungkinan besar batas kelarutan atom-atom nitrogen pada cuplikan telah terpenuhi (kondisi jenuh) yang menyebabkan kekerasan menurun. Dari hasil tersebut, diperoleh kekerasan optimum 1,89 kali kekerasan material sebelum dinitridasi pada proses nitridasi dengan tekanan 1,2 mbar dan waktu 3 jam.



**Gambar 7.** Hubungan kekerasan sebagai fungsi tekanan proses nitridasi untuk berbagai variasi waktu pada suhu 150 °C.



**Gambar 8.** Hubungan kekerasan sebagai fungsi suhu proses nitridasi untuk waktu nitridasi 3 jam dan tekanan 1,2 mbar.

### Uji Aus

Ketahanan aus material sangat terkait dengan kekerasan permukaan material tersebut. Pada umumnya laju keausan berbanding terbalik dengan kekerasan permukaan. Untuk komponen-komponen mesin yang permukaannya bergesekan dengan komponen lainnya, maka umur pakai (*life time*) sangat dipengaruhi oleh laju keausan. Untuk memastikan keterkaitan antara kekerasan dan laju keausan maka dari uji keras dilanjutkan dengan uji aus menggunakan alat *Ogoshi high speed universal wear testing machine* (type OAT-U) di Teknik



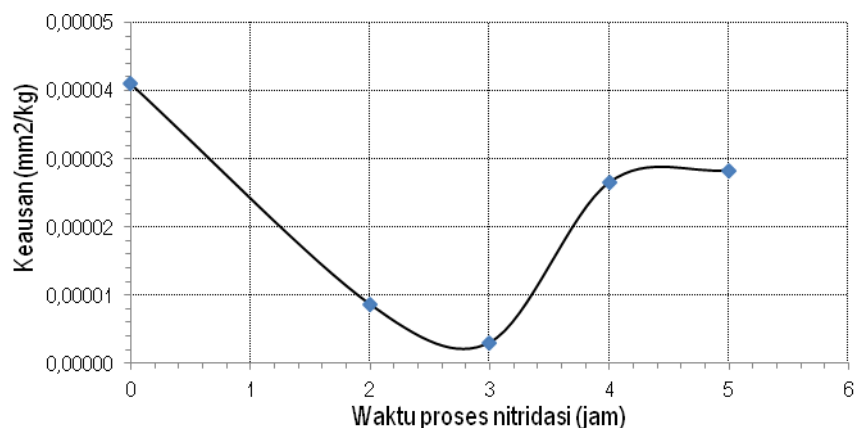
Mesin-UGM yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 9. Laju keausan ( $W_s$ ) ditentukan dengan persamaan [16].

$$W_s = \frac{B \times bo^3}{8 \times r \times Po \times lo} \quad \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{kg}} \right) \quad (3)$$

dengan  $B$  adalah lebar piringan pengaus (mm),  $bo$  adalah lebar keausan pada spesimen (mm),  $r$  adalah jari-jari piringan pengaus (mm),  $Po$  adalah gaya tekan pada proses keausan berlangsung (2,12 kg),  $lo$  adalah jarak tempuh pada proses pengausan (5 m). Dari hasil uji tersebut jika dihubungkan dengan uji keras menunjukkan bahwa keausan berbanding terbalik dengan kekerasan. Nilai keausan minimal yaitu  $3 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kg}$  diperoleh pada proses nitridasi dengan waktu 3 jam pada suhu  $150^\circ\text{C}$  dan tekanan 1,2 mbar.

**Tabel 1.** Hasil uji aus sebelum dan sesudah nitridasi pada suhu  $150^\circ\text{C}$  dan tekanan 1,2 mbar.

No	Proses perlakuan	Keausan ( $\text{mm}^2/\text{kg}$ )
1	Tanpa nitridasi	$4,1 \times 10^{-5}$
2	Nitridasi 2 jam	$8,7 \times 10^{-6}$
3	Nitridasi 3 jam	$3 \times 10^{-6}$
4	Nitridasi 4 jam	$2,65 \times 10^{-5}$
5	Nitridasi 5 jam	$2,83 \times 10^{-5}$



**Gambar 9.** Pengaruh waktu nitridasi terhadap keausan pada cuplikan piston imitasi.

Jika dibandingkan dengan cuplikan tanpa dinitridasi yaitu dengan nilai keausan  $4,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$  mengalami peningkatan ketahanan aus yang sangat signifikan yaitu 13,67 kali. Kerusakan piston yang paling banyak disebabkan oleh terjadinya keausan yaitu keausan pada pinggiran piston (*piston skirt*) yang disebabkan karena adanya gesekan antara pinggiran piston dengan silinder blok [7]. Dengan hasil peningkatan ketahanan aus ini jika diterapkan untuk nitridasi piston maka dapat meningkatkan ketahanan aus piston termasuk pada pinggiran piston (*piston skirt*) sehingga dapat meningkatkan umur pakai (*life time*).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan tersebut dapat disimpulkan bahwa perlakuan permukaan dengan teknik nitridasi ion pada material AlSiCu dengan rentang tekanan 0,8 mbar sampai dengan 1,4 mbar, suhu  $125^\circ\text{C}$  sampai dengan  $175^\circ\text{C}$  dan waktu 2 jam sampai 5 jam diperoleh kondisi optimal pada tekanan 1,2 mbar, suhu  $150^\circ\text{C}$  dan waktu 3 jam. Pada kondisi optimal ini dapat menghasilkan lapisan keras yaitu lapisan aluminium nitrida (AlN) dan aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) yang diindikasikan dari pengamatan SEM-EDS diperoleh unsur N (wt) sebanyak 3,95 % dan O (wt) sebanyak 29,93 %. Tebal lapisan keras sekitar  $5 \mu\text{m}$  dengan kekerasan optimum 120,88 VHN sedangkan kekerasan awal cuplikan sebelum dinitridasi adalah 60,24 VHN. Dari hasil tersebut, diperoleh kekerasan optimum 1,89 kali kekerasan material sebelum dinitridasi. Nilai keausan minimal yaitu  $3 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kg}$  untuk cuplikan yang dinitridasi pada kondisi optimal, sedangkan untuk cuplikan tanpa dinitridasi dengan nilai

keausan  $4,1 \times 10^{-5}$  mm<sup>2</sup>/kg sehingga mengalami peningkatan ketahanan aus yang sangat signifikan yaitu 13,67 kali. Dengan hasil peningkatan ketahanan aus ini jika diterapkan untuk nitridasi piston maka dapat meningkatkan ketahanan aus piston termasuk pada pinggiran piston (*piston skirt*) sehingga dapat meningkatkan umur pakai (*life time*).

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PSTA-BATAN yang telah mengalokasikan anggaran DIPA tahun 2015 dan sebelumnya, Bapak Sayono, Bapak Irianto dan Bapak Sumarmo atas bantuan yang telah diberikan untuk menyelesaikan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. "Aluminium alloy mechanical properties and applications." [Online]. Available: <http://www.constellium.com/technology-center/aluminium-alloy-properties>, diakses (15-Jul-2015).
2. C.-Y. Jeong, "Effect of Alloying Elements on High Temperature Mechanical Properties for Piston Alloy," *Mater. Trans.*, 53.1 (2012): 234–239.
3. "Hypereutectic piston - Wikipedia, the free encyclopedia." [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hypereutectic\\_piston](http://en.wikipedia.org/wiki/Hypereutectic_piston), diakses (14-Sep-2015).
4. "Applications – Power train – Pistons 1 Pistons," European Aluminium Association, (2011).
5. T. Aizawa, S. Muraishi and Y. Sugita, "High Density Plasma Nitriding of Al-Cu Alloys for Automotive Parts," *J. Phys. Sci. Appl.*, 4 4 (2014): 255–261.
6. A. Humbertjean and T. Beck, "Effect of the casting process on microstructure and lifetime of the Al-piston-alloy AlSi<sub>12</sub>Cu<sub>4</sub>Ni<sub>3</sub> under thermo-mechanical fatigue with superimposed high-cycle fatigue loading," *Int. J. Fatigue*, 53 (2013): 67–74.
7. X. Huang, C. Liu, X. Lv, G. Liu and F. Li, "Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting," *J. Mater. Process. Technol.*, 211.9 (2011): 1540–1546.
8. Suprpto, Saminto, E. Priyono and T. Sujitno, "Kinerja Perangkat Nitridasi Plasma/Ion Bejana Ganda Untuk Perlakuan Permukaan Bahan Logam," in *Presentasi dan pertemuan Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Yogyakarta (2013): 45–52.
9. T. Ebisawa and R. Saikudo, "Formation of aluminum nitride on aluminum surfaces by ECR nitrogen plasmas," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 86–87, no. PART 2 (1996): 622–627.
10. M. Shahien, M. Yamada, T. Yasui, and M. Fukumoto, "Synthesis of cubic aluminum nitride coating from Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder in reactive plasma spray process," *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.*, 06.2 (2013): 546–551.
11. M. Hassan, A. Qayyum, S. Ahmad, S. Naseer, N. A. D. Khattak, and Z. Muhammad, "Structural and mechanical properties of radiofrequency Ar-N<sub>2</sub> plasma nitrided aluminium," *Mater. Res.*, 18.2 (2015): 353–359.
12. C. C. Chen, C. Y. Chen, H. W. Yang, Y. K. Kuo, and J. S. Lin, "Phase equilibrium in carbothermal reduction Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → AlN studied by thermodynamic calculations," *Atlas J. Mater. Sci.*, 1. 2 (2014): 30–37.
13. G. Jeong, J. Park, S. Nam, S.-E. Shin, J. Shin, D. Bae, and H. Choi, "The effect of grain size on the mechanical properties of aluminum," *Arch. Metall. Mater.*, 60.2 (2015): 16–20.
14. O. A. Hilders, N. Zambrano and R. Caballero, "Microstructure, strength, and fracture topography relations in AISI 316L stainless steel, as seen through a fractal approach and the hall-petch law," *Int. J. Met.*, (2015): 10.
15. M. S. Shah, U. Ikhlq, and S. Saleem, "Nitriding of titanium using capacitively coupled ac plasma," *CODEN JNSMAC*, 52 (2012): 31–46.
16. Suprpto, T. Sujitno, dan A. W. Valantova, "Pengaruh Nitridasi Ion Terhadap Kekerasan, Keausan dan Laju Korosi Pada Baja ST 60 dan Baja Beton Dalam Media Air Laut," in *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, Yogyakarta (2014): 46–55.