

Aluminium Oxynitride sebagai Pengganti Material Kaca Tahan Peluru di Masa Depan

Akbar Ferdinan Nuansa

Teknik Metalurgi ITB

Jln. Ganeca 10. Bandung INDONESIA

ferdinannuansaakbar@gmail.com

Abstrak — Kaca tahan peluru adalah suatu bahan tembus pandang yang tidak tembus jika terkena tembakan peluru hingga kaliber tertentu yang sesuai dengan standar NIJ (National Institute of Justice). Fungsinya untuk mendapatkan perlindungan dari peluru, namun tetap dapat melihat keluar. Kaca tahan peluru banyak digunakan pada kendaraan militer, mobil kepresidenan, pesawat tempur, kereta cepat, dan lain-lain.^[5] Aluminium Oxynitride merupakan jenis keramik yang terdiri dari Aluminium, Oksigen, dan Nitrogen. Aluminium Oxynitride dipasarkan dengan nama ALON oleh Surmet Corporation. ALON memiliki sifat optik transparan ($\geq 80\%$) pada daerah spektrum ultraviolet, cahaya tampak, dan *midwave-infrared*. ALON memiliki nilai kekerasan 1850 kg/mm² (Knoop Indent, 200g). ALON memiliki struktur kristal *cubic spinel* sehingga dapat mudah dibentuk menjadi berbagai macam barang. ALON merupakan jenis keramik transparan polikristalin yang paling sulit dan tersedia secara komersial. Kombinasi sifat optik dan mekanisnya membuat bahan ini menjadi kandidat utama untuk aplikasi armor transparan berkinerja tinggi seperti jendela anti-peluru dan anti-ledakan. Armor berbasis ALON telah terbukti dapat menghentikan beberapa proyektil penembus armor hingga kaliber 50mm. Dengan keunggulan sifat optik dan mekanik yang dimiliki oleh ALON, tidak menutup kemungkinan material ini dapat dijadikan pengganti material kaca di masa depan, tentunya dengan ditemukannya cara sintesis yang ekonomis.^[6]

Kata kunci — Aluminium Oxynitride, Keramik, ALON, Transparan, Tangguh

I. PENDAHULUAN

Kaca tahan peluru adalah suatu bahan tembus pandang yang tidak tembus jika terkena tembakan peluru hingga kaliber tertentu yang sesuai dengan standar NIJ (National Institute of Justice). Fungsinya untuk mendapatkan perlindungan dari peluru, namun tetap dapat melihat keluar. Kaca tahan peluru banyak digunakan pada kendaraan militer, mobil kepresidenan, pesawat tempur, kereta cepat, dan lain-lain. Material tembus pandang namun tahan peluru ini biasanya terbuat dari rangkaian material yang disusun dan ditempelkan sedemikian rupa, sehingga mampu menghentikan laju peluru.

Walaupun bertujuan untuk menghentikan laju peluru, namun ketahanan kaca tersebut tetap bergantung pada ketebalan kaca dan jenis senjata (ukuran kaliber peluru) yang digunakan untuk menembak kaca tersebut. Sebuah kaca tahan peluru konvensional pada dasarnya dibuat dengan cara melapiskan sebuah material polikarbonat pada lembar kaca biasa. Proses pelapisan ini disebut dengan laminasi. Proses laminasi akan menghasilkan material yang mirip kaca yang lebih tebal dibandingkan kaca biasa. Material polikarbonat merupakan suatu kelompok polimer termoplastik (mudah dibentuk pada temperatur tinggi) yang sering dikenal dengan merek Lexan, Tuffak atau Cyrolon. Kaca tahan peluru biasanya memiliki ketebalan antara 7 milimeter sampai 75 milimeter. Sebutir peluru yang menghantam sebuah kaca tahan peluru akan menerobos lapisan bagian luar dari kaca tersebut, tetapi lapisan material kaca-polikarbonat akan mampu menyerap energi peluru tersebut dan menghentikannya sebelum peluru tersebut menembus keluar dari lapisan terakhir. Sampai saat ini masih belum ada kaca yang benar-benar anti peluru karena kaca yang terkena terjangan peluru tetap saja akan mengalami pecah pada permukaan luar. Secara sekilas kaca ini terlihat seperti panel kaca biasa namun sepotong kaca biasa akan pecah bila ditembak dengan sebuah peluru, sedangkan kaca tahan peluru dirancang untuk menahan satu atau beberapa butir peluru yang

bergantung pada seberapa tebal kaca tersebut dan juga jenis kaliber pelurunya.

Meninjau dari batasan yang dimiliki oleh kaca tahan peluru konvensional, yaitu jika kaliber peluru yang digunakan terlalu besar dan ketebalan kaca tersebut kurang maka dapat dipastikan proyektil peluru dapat menembusnya. Namun, jika ketebalannya terlalu besar maka dapat meningkatkan massa kaca tahan peluru sehingga biaya distribusi dan transportasi menjadi meningkat. Apalagi jika kaca tersebut dipasang pada kendaraan otomotif atau militer, jika terlalu berat maka dapat menurunkan efisiensi bahan bakar yang digunakan.

Untuk mengatasi keterbatasan dari material kaca tahan peluru konvensional, dikembangkanlah material keramik bernama ALON yang tersusun dari Aluminium, Oksigen, dan Nitrogen. ALON dikembangkan dan dipasarkan oleh *Surmet Corporation*. Dengan kelebihan ALON pada sifat mekanis yang lebih unggul dari kaca tahan peluru konvensional, diharapkan material ini dapat menggantikan material kaca tahan peluru di masa depan.

II. KERAMIK

Dunia ini penuh dengan berbagai macam material. Material-material tersebut dapat dikelompokkan berdasarkan kriteria tertentu. Salah satunya adalah mengelompokkan jenis material menjadi material organik dan anorganik. Pada jenis material anorganik terdapat beberapa subdivisi, dan salah satu subdivisinya adalah keramik. Material keramik biasanya merupakan senyawa yang terdapat unsur logam (Aluminium, Titanium, Zirconium, dan lain-lain) dan unsur nonlogam (Oksigen, Nitrogen, Karbon, dan lain-lain) di dalamnya sehingga dapat menghasilkan sifat-sifat tertentu yang sangat menarik, seperti memiliki nilai titik lebur yang tinggi atau sifat optik tembus cahaya. Keramik secara umum dikenal karena memiliki daya tahan terhadap temperatur yang sangat tinggi dan tidak mudah mengalami reaksi kimia. Dalam kelompok

keramik, kita dapat mengelompokkannya lebih menjadi *classical ceramics* dan *technical ceramics*. *Technical ceramics* juga sering disebut sebagai keramik berteknologi serbuk. *Classical ceramics* biasanya berupa bahan berbasis tanah liat seperti bata, ubin, porselen, dan lain-lain. Sedangkan *technical ceramics* lebih sering digunakan pada peralatan teknis seperti *zinc oxide*, *barium titanate* (kapasitor multilayer), boron karbida (alat pemotong tahan aus), dan lain-lain.^[7]

Salah satu *technical ceramics* tertua dan paling terkenal adalah aluminium oksida (Al_2O_3) yang memiliki tahanan listrik yang tinggi dan digunakan sebagai bahan isolasi dalam banyak aplikasi. Senyawa ini juga digunakan sebagai lampu sodium vapor karena memiliki sifat tembus cahaya. Perbedaan antara transparan dan tembus cahaya adalah tembus cahaya dapat dilewati oleh cahaya namun cahaya tersebut terdistraksi sebagian, sedangkan transparan tidak.^[7]

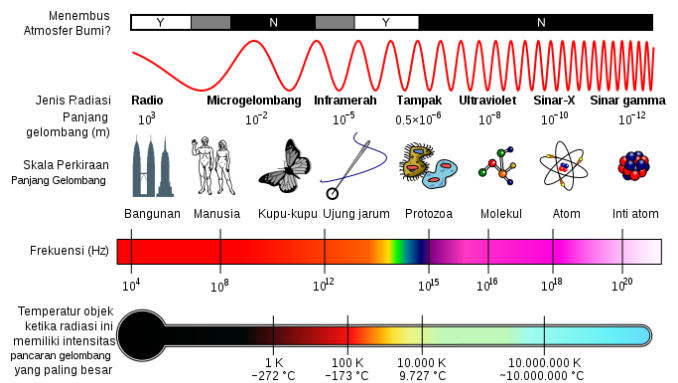
III. ALUMINIUM OXYNITRIDE

Aluminium Oxynitride merupakan jenis keramik yang tersusun dari Aluminium, Oksigen, dan Nitrogen. Senyawa tersebut memiliki rumus kimia $(AlN)_x \cdot (Al_2O_3)_{1-x}$, dimana $0,30 \leq x \leq 0,37$. Aluminium Oxynitride sudah dipasarkan dengan nama ALON oleh *Surmet Corporation*.^[6] Tidak seperti Al_2O_3 , ALON dapat disinter menjadi bersifat transparan karena ALON memiliki struktur kristal *cubic spline*, sementara Al_2O_3 memiliki struktur kristal trigonal. Karena struktur kristal yang dimiliki oleh ALON, sehingga tidak terjadi pembiasan ganda pada batas butir polikristalin. Porositas residual dalam sebuah ALON harus sangat rendah sebelum transparansi benar-benar diamati. Efek hamburan ini terjadi ketika dimensi pori-pori memiliki magnitude yang sama dengan panjang gelombang radiasi elektromagnetik yang digunakan.^[7]

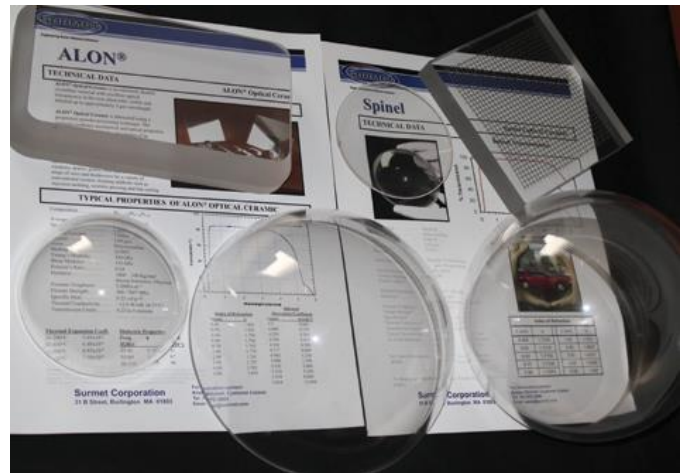
Struktur kristal ALON adalah tipe spinel, dan unit rumus untuk spinel yang ideal adalah AB_2X_4 , dimana A dan B adalah kation, dan X adalah anion. Komposisi spinel ideal untuk ALON adalah Al_3O_3N tetapi senyawa ini tidak ada. ALON lebih banyak mengandung Al_2O_3 , dan akibatnya pada struktur dasar terjadi kekosongan kation atau interstisial anion.^[7]

IV. SIFAT OPTIK DAN MEKANIK YANG DIMILIKI ALUMINIUM OXYNITRIDE

ALON memiliki sifat optik transparan ($\geq 80\%$) pada daerah spektrum ultraviolet, cahaya tampak, dan *midwave-infrared*. Dengan kata lain material ini dapat ditembus $\geq 80\%$ partikel cahaya dengan rentang panjang gelombang $10^{-8}m$ sampai $10^{-5}m$, dimana rentang spektrum cahaya tampak sudah termasuk di dalamnya.



Gambar 1. Rentang spektrum cahaya ^[4]



Gambar 2. Beberapa contoh hasil manufaktur dari ALON ^[3]

Berikutnya adalah sifat mekanik yang dimiliki ALON. Berdasarkan data dari *Surmet Corporation* diperoleh data sebagai berikut :

Physical/Mechanical	
Density (g/cc)	3.68 - 3.69
Flexural Strength (MPa)	350 - 640*
Hardness (kg/mm ² , Knoop, 200g)	1,850 (9 Moh's scale)
Melting Point (°C)	2,150
Fracture Toughness (MPa - m ^{1/2})	2.0 - 2.9
Compressive Strength (GPa)	2.7

Gambar 3. Sifat fisik/mekanik ALON ^[3]

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa ALON memiliki nilai kekerasan 1850 kg/mm^2 (Knoop Indent, 200g). Pada material ini, metode uji kekerasan yang dilakukan adalah *Knoop Hardness Test* atau dengan nama lain *Micro Hardness Test*. Metode uji kekerasan ini sering digunakan pada material yang sulit mengalami deformasi plastis seperti keramik. Untuk

menentukan nilai *Knoop Hardness (HK)* dapat menggunakan formula berikut :

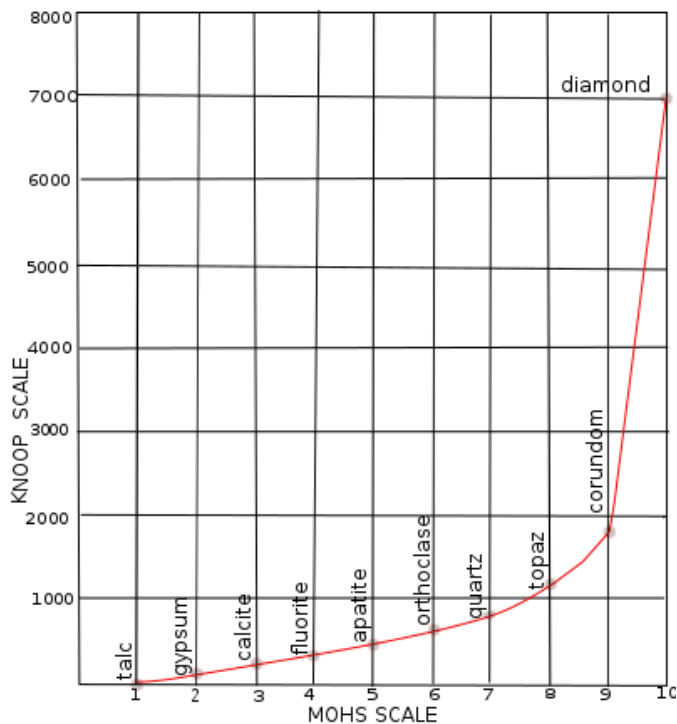
$$HK = \frac{P}{C_p L^2}$$

Keterangan:

P : load (kgf)

C_p : Faktor koreksi : 0,070279

L : Panjang Indentasi



Gambar 4. Perbandingan nilai kekerasan suatu material antara skala Mohs dengan Knoop Hardness Test ^[2]

Dari Gambar 4 dapat kita ketahui bahwa ALON memiliki nilai kekerasan yang hampir setara dengan 9 Mohs, yaitu empat kali lebih keras daripada *fused silica glass*, 85% kekerasan *sapphire/corundum*, dan mendekati 15% lebih keras daripada *magnesium aluminate spinel*.

Flexure strength adalah kemampuan material dalam menerima beban berupa tekukan (*bending load*). ALON memiliki flexure strength 350-640* MPa, sedangkan Polikarbonat (sebagai bahan laminasi kaca tahan peluru konvensional) hanya memiliki flexure strength 90 MPa. Sehingga dapat kita ketahui bahwa ALON dapat menerima beban tekuk lebih besar daripada Polikarbonat.

Typical Flexural Strength and Flexural Modulus of Polymers

Polymer Type	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)
ABS	75	2.5
ABS + 30% Glass Fiber	120	7
Acetal Copolymer	85	2.5
Acetal Copolymer + 30% Glass Fiber	150	7.5
Acrylic	100	3
Nylon 6	85	2.3
Polyamide-Imide	175	5
Polycarbonate	90	2.3
Polyethylene, MDPE	40	0.7
Polyethylene Terephthalate (PET)	80	1
Polyimide	140	3
Polyimide + Glass Fiber	270	12
Polypropylene	40	1.5
Polystyrene	70	2.5

Gambar 5. Data flexure strength berbagai polimer ^[1]

Modulus elastisitas adalah perbandingan tegangan dan regangan yang terjadi pada suatu material sebelum material tersebut mengalami deformasi plastis, atau dapat ditentukan dengan mencari gradien uji tarik dari daerah elastis. Dari data Surmet Corporation diketahui ALON memiliki modulus elastisitas (young modulus) sebesar 320 GPa. Sedangkan rata-rata kaca memiliki modulus elastisitas 70 GPa.

Mechanical Properties of Materials -- Comparison						
Material	Density	Modulus	Yield	Ultimate	Specific Yield	Specific Stiffness
Glass	2.6	70	70	70	26.9	26.9
Aluminum, Alloy 1100-H14	2.7	69	110	120	40.7	25.6
Steel, High Strength, low range	7.85	200	340	550	43.3	25.5
Magnesium, low	1.8	43	80	140	44.4	23.9
Steel, hot rolled, 1% C	7.85	200	580	960	73.9	25.5
Glass, Phys Tempered	2.6	70	210	210	80.8	26.9
Steel, High Strength, high range	7.85	200	1000	1200	127.4	25.5
Aluminum, Alloy 2014-T6	2.7	72	410	500	151.9	26.7
Magnesium, high	1.8	43	280	340	155.6	23.9
Titanium, low	4.5	110	760	900	168.9	24.4
Glass, Chem. Tempered	2.6	70	500	500	192.3	26.9
Titanium, high	4.5	110	1000	1200	222.2	24.4
Glass, Fibers	2.6	70	4000	4000	1538.5	26.9

Gambar 6. Perbandingan sifat mekanik dari beberapa material ^[8]

Fracture toughness (ketangguhan retak) adalah kemampuan material untuk menahan terjadinya fraktur/retak, dan merupakan salah satu sifat yang paling penting dari setiap material untuk banyak aplikasi desain. Dari data Surmet Corporation diperoleh nilai ketangguhan retak dari ALON adalah 2,0-2,9 MPa.m^{1/2}, sedangkan kaca silika memiliki ketangguhan retak 0,81± 0,02 MPa.m^{1/2}. Dari perbandingan data tersebut dapat diketahui bahwa ALON lebih tahan terhadap terjadinya retakan daripada kaca silika.

Glass	G_c (J/m ²)	K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})	B
S	9.2 (9.0±0.4 [49])	0.81 (0.81±0.02 [49])	0.88
NS	6.4 (7±1 J/m ² [50])	0.64	0.73
CAS	4.3	0.66 (0.63 ±0.5 J/m ² [51])	0.38

Gambar 7. Data *fracture toughness* dari kaca silika (S), sodium silicate (NS), dan calcium aluminosilicate (CAS)^[9]

Selanjutnya mengenai *compressive strength* dari ALON. *Compressive strength* adalah kemampuan material dalam menerima beban berupa tekanan kompresi, jika uji tarik memberi tegangan ke arah luar material maka kompresi adalah memberi tegangan ke arah dalam. ALON memiliki *compressive strength* sebesar 2,7 GPa, artinya untuk membuat ALON mengalami kegagalan material dibutuhkan tegangan sebesar 2,7 GPa ke arah dalam.

V. APLIKASI ALON SEBAGAI KACA TAHAN PELURU

Surmet Corporation sebelumnya sudah pernah melakukan pengujian ketahanan terhadap ALON, dan membandingkannya dengan kaca tahan peluru konvensional (*glass laminate*). Pengujian tersebut dilakukan dengan proyektil peluru dengan kaliber yang sama dan jarak tembak yang sama.



Gambar 8. Pengujian ALON dan glass laminate terhadap peluru 50 cal M2AP (*Armor Piercing*)^[10]



Gambar 9. Perbandingan ketebalan ALON dan *glass laminate* yang digunakan pada pengujian^[10]

ALON yang digunakan pada pengujian memiliki ketebalan 1,6 inch, sedangkan *glass laminate* yang digunakan menggunakan ketebalan 3,7 inch. Keduanya akan ditembak menggunakan jenis peluru yang sama, yaitu 50 cal M2AP. M2AP sendiri

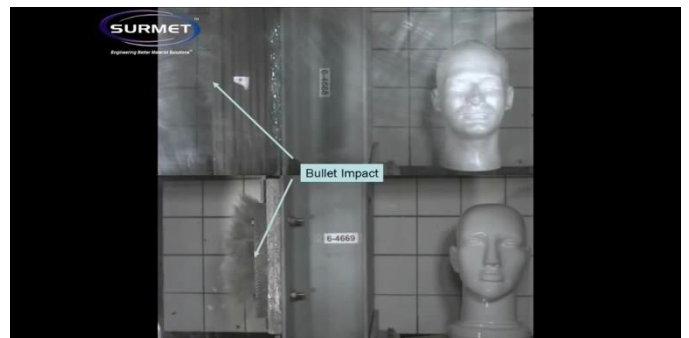
merupakan senjata tipe *armor piercing* yang biasa digunakan untuk menembus perlindungan lawan di medan pertempuran jarak jauh.



Gambar 10. Peluru yang digunakan pada pengujian ini



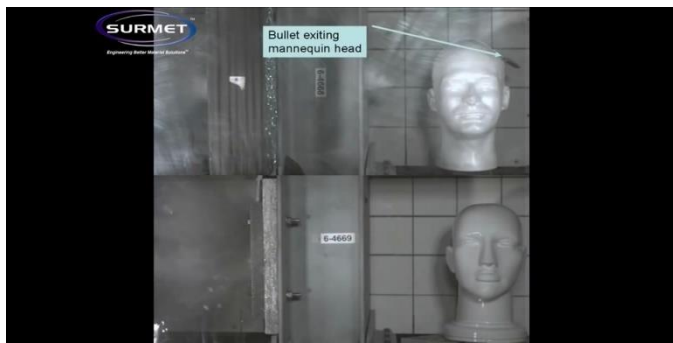
Gambar 11. Proyektil peluru mulai melesat menuju masing-masing objek, yaitu *glass laminate* (atas) dan ALON (bawah)^[10]



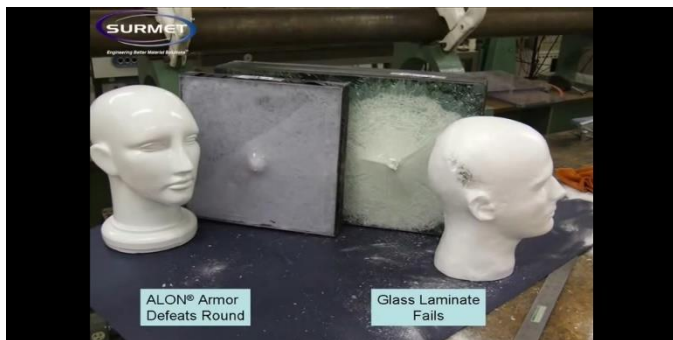
Gambar 12. Proyektil peluru mulai menghantam masing-masing objek, yaitu *glass laminate* (atas) dan ALON (bawah)^[10]



Gambar 13. Proyektil peluru berhasil menembus *glass laminate* (atas), namun tidak berhasil menembus ALON (bawah)^[10]



Gambar 14. Kepala mannequin yang dilindungi *glass laminate* (atas) terkena proyektil peluru, sedangkan kepala mannequin yang dilindungi ALON (bawah) terhindar dari peluru^[10]



Gambar 15. Hasil akhir pengujian^[10]

Dari pengujian yang dilakukan *Surmet Corporation* tersebut dapat kita ketahui bahwa ALON dengan ketebalan 1,6 inch memiliki kualitas yang lebih unggul dalam menghalau terjangan peluru 50 cal M2AP daripada kaca tahan peluru konvensional (*glass laminate*) dengan ketebalan 3,7 inch.

Selain dari hasil pengujian yang telah dilakukan *Surmet Corporation*, berikut data perbandingan spesifikasi kaca tahan peluru dan ketahanannya :

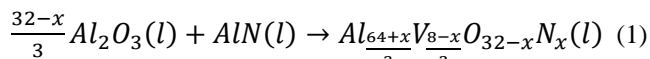
Sample thickness and areal densities for bullet-resistant glass materials ^{[7][8][9]}																					
Protection Level	Threat Stopped (example)	Glass Laminate				Polycarbonate				Acrylic				Glass-Clad Polycarbonate				Aluminum oxynitride			
		Thickness		Density		Thickness		Density		Thickness		Density		Thickness		Density		Thickness		Density	
		in.	cm	lb/sq. ft.	kg/m ²	in.	cm	lb/sq. ft.	kg/m ²	in.	cm	lb/sq. ft.	kg/m ²	in.	cm	lb/sq. ft.	kg/m ²	in.	cm	lb/sq. ft.	kg/m ²
UL 752 Level 1	9 mm 3 shots	1.185	3.009	15.25	74.46	0.75	1.905	4.6	22.46	1.25	3.175	7.7	37.6	0.818	2.078	8.99	43.9				
UL 752 Level 2	.357 Magnum 3 shots	1.4	3.556	17.94	87.6	1.03	2.616	6.4	31.25	1.375	3.492	8.5	41.50	1.075	2.73	11.68	57.02				
UL 752 Level 3 (approximately NIJ IIIA ^[10])	.44 Magnum 3 shots (5 shots for NIJ IIIa)	1.59	4.038	20.94	102.24	1.25	3.175	7.7	37.6					1.288	3.271	14.23	69.47				
UL 752 Level 4	30-06 1 shot													1.338	3.525	14.43	69.47				
UL 752 Level 5	7.62 mm 1 shot																				
UL 752 Level 6	.357 Magnum underloaded 5 shots																				
UL 752 Level 7	5.56x45 5 shots																				
UL 752 Level 8 (approximately NIJ III)	7.62 mm 5 shots													2.374	6.03	26.01	126.99				
UL 752 Level 10	.50 BMG 1 shot																	1.6	4.06	30.76	150.1

Gambar 16. Rentang ketahanan kaca tahan peluru berdasarkan ketebalannya terhadap ukuran peluru^[11]

VI. SINTESIS ALUMINIUM OXYNITRIDE

Preparasi ALON dilakukan dengan dua langkah. Pada langkah pertama AIN diproduksi dengan reduksi carbothermal dan proses nitridasi dalam alumina dalam thermal plasma. Pada langkah kedua, campuran plasma yang disintesis AIN dan Al₂O₃ mengalami perlakuan pada thermal plasma untuk menghasilkan ALON. Awalnya kita memulai eksperimen untuk persiapan AIN dengan mengambil campuran Al₂O₃ dan arang aktif sebagai bahan awal. Campuran homogen dari kedua bubuk tersebut digranulasi menggunakan Dextrin sebagai pengikat, lalu dikeringkan. Granula diproses dalam NH₃ dan plasma Ar dalam *extended arc thermal plasma reactor* (50 kW). Sebuah wadah grafit silinder (anoda), yang digunakan untuk menjaga muatan dan elektroda grafit atas (katoda) yang memiliki lubang aksial di mana gas-gas pembentuk plasma yang dimasukkan ke perapian, lalu grafit disusun dalam konfigurasi vertikal. Busur plasma dinyalakan dengan memendekkan arus elektroda sebentar lalu memisahkannya, sementara stabilisasi busur dicapai oleh gerakan vertikal katoda. Gas Argon digunakan untuk pembentukan, stabilisasi busur plasma, dan mempertahankan atmosfer pelindung di dalam perapian grafit. Deskripsi detail reaktor dan prosedur eksperimental dilaporkan di tempat lain.^[12]

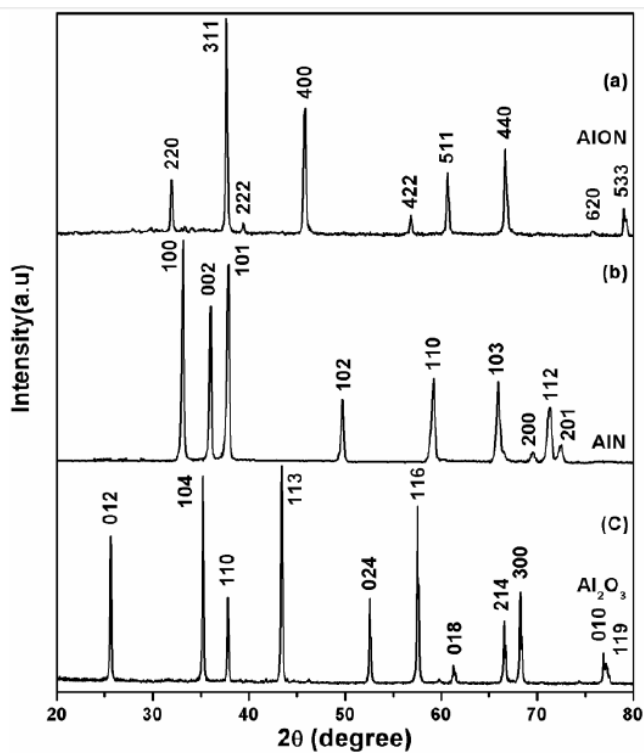
Berdasarkan diagram fasa Al₂O₃-AIN^[13], campuran homogen dari alumina mentah dan AIN sintesis plasma diambil dalam wadah grafit yang sama dalam rasio molar 7: 3 dan plasma diproses lebih lanjut. Kondisi operasi plasma yang umum (muatan 50 gm, beban volt-50 volt, arus beban-300 amp, laju aliran NH₃-0,5 lpm dan laju aliran Ar-0,5 lpm) dipakai dalam percobaan ini. Pembentukan ALON diamati dalam keadaan cair dari campuran Al₂O₃ dan AIN dalam 1 menit waktu reaksi, mengikuti reaksi (persamaan 1) (model anion) yang diusulkan oleh McCauley^[14].^[12]



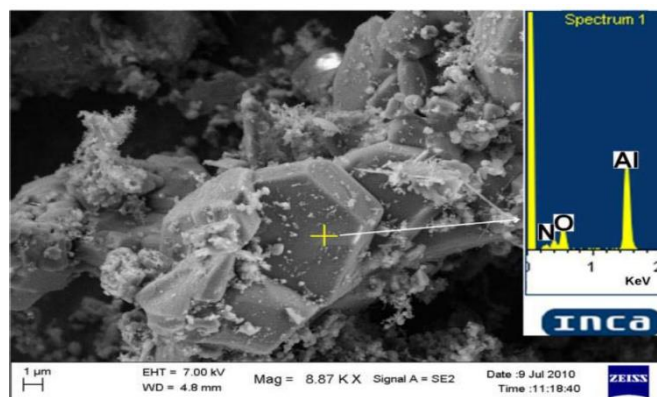
[Dimana V adalah *cation vacancy*, $0 \leq N \leq 11$, $0 \leq x \leq 8$]^[12]

Fase kristal dari produk sintesis plasma diidentifikasi dengan difraksi sinar-X dengan Cu K α Radiation (Phillips, Model: PW 3020). Struktur mikro dan analisis unsur serbuk dari sintesis plasma dilakukan oleh bidang pemindaian mikroskop elektron yang dilengkapi dengan EDX (ZEISS SUPRA 55). Sifat-sifat optik dipelajari oleh mikro RAMAN (InVia, Renishaw). Densitas dari *fused small block* yang disintesis dari ALON diukur dengan metode Archimedes (ASTM C20-90). Sehingga dapat ditentukan densitas ALON sebesar 3,64 g / cc yang 98,11% sesuai dari nilai teoritis 3,71 g / cc.^[12]

Pola XRD yang menyerupai ALON ditunjukkan pada Gambar. 17. Semua puncak pada Gambar. 18 (a) berkaitan dengan kubik-ALON yang memiliki parameter kisi 7,910 Å, dan merupakan kesesuaian yang baik dengan nilai standar (7,937 Å, Kartu JCPDS No. 80-2173).^[12]

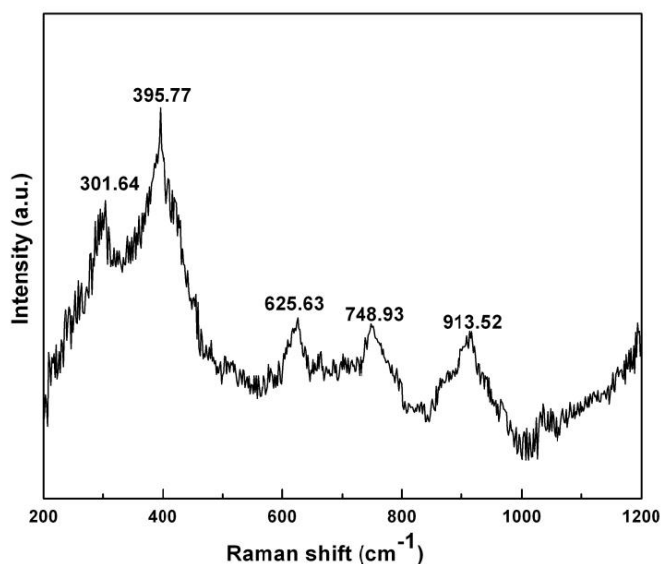


Gambar 17. Hasil XRD dari plasma yang disintesis (a) serbuk Alon leburan; (b) serbuk AlN halus dan (c) komersial α -Al₂O₃.^[12]



Gambar 18. Gambar FESEM serbuk ALON yang menyatu dan EDAX yang sesuai.^[12]

Gambar 18. menunjukkan mikrograf FE-SEM dari fragmentasi ALON spinel yang dihasilkan. Hal tersebut menunjukkan pembentukan ALON yang berbentuk spinel segi enam yang baik. Laporan EDS menegaskan keberadaan Al, O, N dalam produk sintesis plasma dan ditemukan 46,39; 29,76; dan 23,86 dalam persentase atom masing-masing yang konsisten dengan nilai yang dilaporkan sebelumnya. Persentase atom dan persentase berat dari semua elemen dalam ALON memiliki kesesuaian yang baik dengan komposisi ALON. Gambar 19 menunjukkan spektrum Raman dari plasma sintesis ALON yang menyatu. Spektrum terdiri dari sejumlah mode fonon di 301,64; 395,77; 625,63; 748,93; dan 913,52 cm⁻¹ dalam kisaran 200-1200 cm⁻¹ yang merupakan kesesuaian yang baik dengan hasil yang dipublikasikan sebelumnya.^[12]



Gambar 19. Spektrum Raman dari serbuk sintesis ALON yang menyatu^[12]

Padatan ALON spinel telah berhasil disintesis dari campuran AlN dan Al₂O₃ menggunakan NH₃ dan plasma termal Ar. Proses ini menggunakan *extended/expanded arc thermal plasma* yang memiliki biaya relatif murah karena dibuat dengan cara memantik elektroda grafit. Waktu reaksi dapat direduksi (dari yang semula membutuhkan waktu beberapa jam dalam kasus sintering konvensional menggunakan *resistance heated furnace*, menjadi 1 menit dalam metode ini).^[12]

Kesimpulan

ALON memiliki banyak sifat mekanis yang lebih unggul daripada kaca tahan peluru konvensional (*glass laminate*), yaitu pada nilai kekerasan, modulus elastisitas, *compressive strength*, *flexural strength*, *fracture toughness*, *compressive strength*, dan titik lebur. Selain itu metode untuk sintesis ALON secara lebih efisien dan ekonomis juga telah ditemukan, yaitu menggunakan teknik plasma termal. Dengan demikian maka ALON memiliki potensi yang besar untuk dijadikan material kaca tahan peluru menggantikan kaca tahan peluru konvensional (*glass laminate*).

Referensi

- [1] Informasi dari <http://www.matweb.com/reference/flexuralstrength.aspx> diakses pada Sabtu 28 Juli pukul 17.02
- [2] Informasi dari https://en.wikipedia.org/wiki/Knoop_hardness_test diakses pada Jumat 27 Juli pukul 16.43
- [3] Informasi dari <http://www.surmet.com/technology/alon-optical-ceramics/index.php> diakses pada Jumat 27 Juli pukul 17.12
- [4] Informasi dari https://id.wikipedia.org/wiki/Spektrum_elektromagnetik diakses pada Sabtu 28 Juli pukul 08.46
- [5] Informasi dari <https://arifh80.wordpress.com/2015/05/18/kaca-tahan-peluru/> diakses pada Kamis 26 Juli pukul 20.35
- [6] Informasi dari https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxynitride diakses pada Kamis 26 Juli pukul 09.27
- [7] H. X. Willem, P. F. Van Hal, G. De With*, R. Metselaar. Centre for Technical Ceramics. Eindhoven University of Technology. "Mechanical Properties of γ -aluminium oxynitride". *Journ; of Materials Science* 28 (1993) 6185-6189
- [8] Lehman Richard. Department Ceramics and Materials Engineering. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, USA. "The Mechanical Properties of Glass : Theoretical strength, practical strength, fatigue, flaws, toughness, chemical processes". 150:312
- [9] Yingtian Yu, Bu Wang, Young Jea Lee, and Mathieu Bauchy. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Los Angeles, USA. "Fracture Toughness of Silicate Glasses : Insights from Molecular Dynamics Simulations". CA90095
- [10] Informasi dari <https://www.youtube.com/watch?v=RnUszxx2pYc> diakses pada Sabtu 14 Juli pukul 20.59
- [11] Informasi dari https://en.wikipedia.org/wiki/Bulletproof_glass#cite_ref-8 diakses pada Sabtu 28 Juli 16.43
- [12] Pravuram Panda, S. K. Singh, and S. P. Singh, "Synthesis of γ -aluminium oxynitride spinel using thermal plasma technique" in *Proc.* 1461, 316 (2012); doi: 10.1063/1.4736912
- [13] Wei Chun-cheng and Tian Gui-shan, *Transa. Nonferr. Met. Soc. China* 17 s1152-s1155 (2007).
- [14] J. W. McCauley, *J. Am. Ceram. Soc.*, 61 372-73 (1978).