

BAB IV

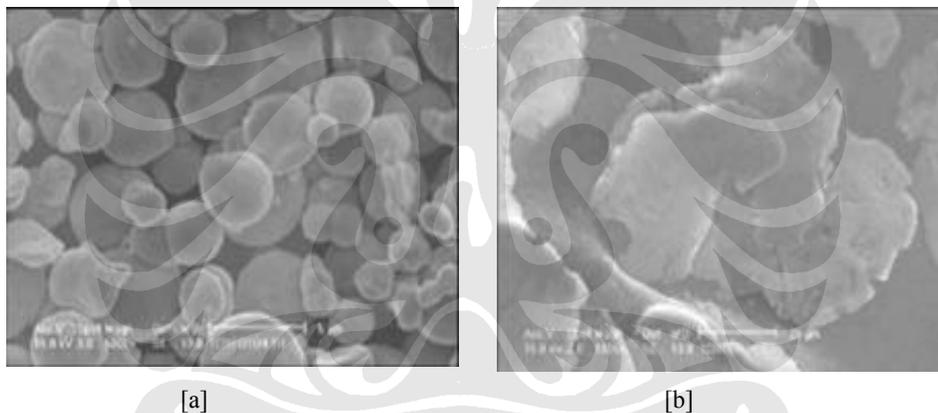
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 KARAKTERISTIK SERBUK

Serbuk hasil pemaduan mekanik dikarakterisasi dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan XRD. SEM digunakan untuk mengamati perubahan morfologi dari serbuk yang mengalami penggilingan selama 32 jam. Sedangkan XRD digunakan untuk mengamati perubahan struktur kristal dari serbuk selama penggilingan 32 jam.

4.1.1 Perubahan Morfologi Serbuk Hasil Pemaduan Mekanik

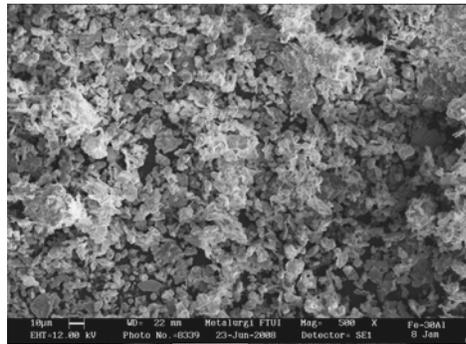
Bentuk partikel serbuk Fe dan Al sebelum penggilingan terlihat oleh gambar 4.1.



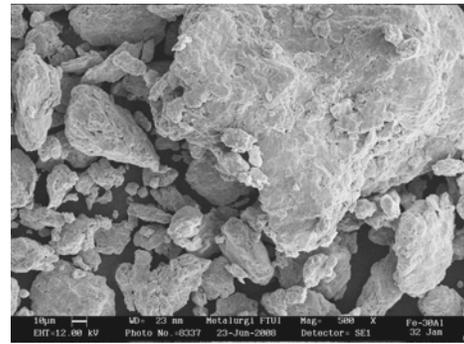
Gambar 4.1 Morfologi serbuk sebelum penggilingan (a) Serbuk Fe (b) Serbuk Al

Bentuk partikel serbuk sebelum penggilingan memiliki ukuran partikel yang besar. Pada gambar 4.1 terlihat bahwa serbuk Fe memiliki bentuk yang bulat sedangkan bentuk partikel Al memiliki bentuk yang tidak beraturan.

Pada gambar 4.2, 4.3, 4.4 dan 4.5 menunjukkan gambar pengamatan SEM serbuk Fe-30at.%Al, Fe-40at.%Al, Fe-50at.%Al dan Fe-60at.%Al dengan waktu penggilingan 8 jam dan 32 jam

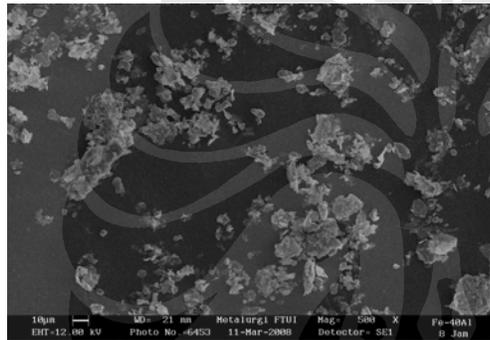


[a]

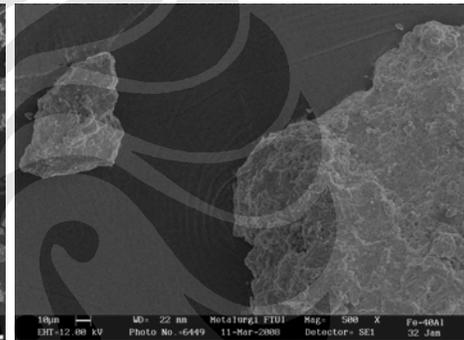


[b]

Gambar 4.2 Foto SEM serbuk Fe-30%at.Al hasil penggilingan dalam perbesaran 500 X
[a] 8 jam penggilingan [b] 32 jam penggilingan

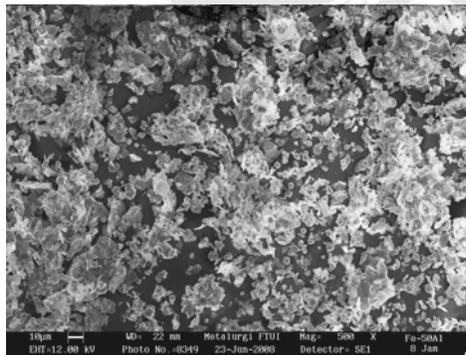


[a]

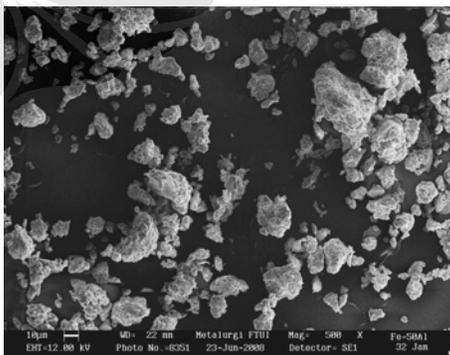


[b]

Gambar 4.3 Foto SEM serbuk Fe-40%at.Al hasil penggilingan dalam perbesaran 500 X
[a] 8 jam penggilingan [b] 32 jam penggilingan

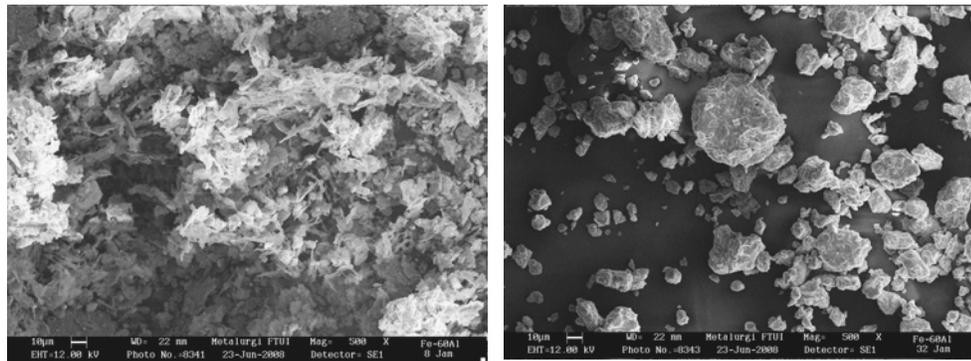


[a]



[b]

Gambar 4.4 Foto SEM serbuk Fe-50%at.Al hasil penggilingan dalam perbesaran 500 X
[a] 8 jam penggilingan [b] 32 jam penggilingan



[a]

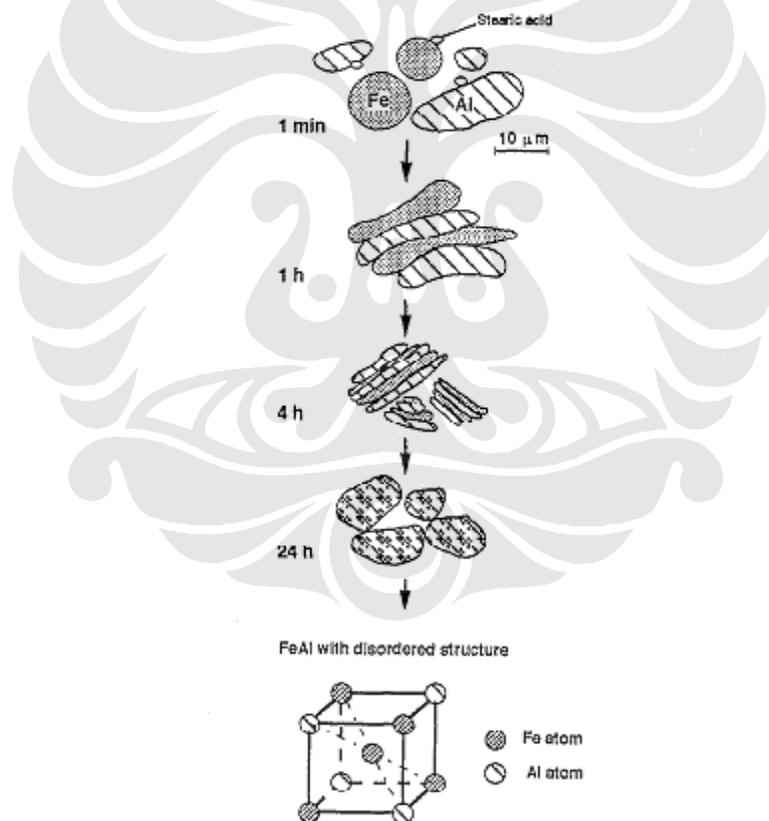
[b]

Gambar 4.5 Foto SEM dalam perbesaran hasil penggilingan 500 X serbuk Fe-60%at.Al hasil penggilingan [a] 8 jam penggilingan [b] 32 jam penggilingan

Dari gambar diatas dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu penggilingan partikel serbuk cenderung menggumpal. Serbuk Fe dan Al adalah sistem pemaduan mekanik serbuk ulet-ulet. Pada awal penggilingan Partikel Fe yang awalnya berbentuk bulat berubah bentuk menjadi pipih. Pemipihan ini disebabkan karena partikel Fe yang granular dan Al yang *flake* mengalami *mikro forging* dan cenderung memiliki bentuk lempeng. Tahapan selanjutnya partikel lempeng tersebut hancur dan pecah menjadi partikel yang lebih bulat dan kecil. Hasil penggilingan serbuk Fe-60%at.Al selama 8 jam terlihat jelas terbentuk lapisan serpihan atau lempeng tipis yang merupakan hasil kombinasi dari deformasi serbuk Fe dan Al. Bentuk dari serbuk pipih ini merupakan tahapan awal dari pemaduan mekanik yaitu terjadi deformasi serbuk menjadi lebih kecil dan tidak teratur. Peningkatan ukuran partikel juga terjadi dalam tahap ini. Dengan peningkatan waktu penggilingan serbuk partikel komposit tersebut mangalami pengerasan (*hardened*), pengerasan ini mengakibatkan peningkatan kegetasan material serbuk dan partikel menjadi pecah. Sedangkan pada penggilingan selama 8 jam serbuk Fe-30%at.Al Fe-40%at.Al dan Fe-50%at.Al terlihat bentuk bulat dan sebagian lempeng. Hal ini dikarenakan proses penghancuran telah terjadi sebelum 8 jam penggilingan, sehingga bentuk lempeng sudah jarang terlihat dan bentuk lebih granular pada 8 jam penggilingan.

Pada waktu penggilingan 32 jam bentuk partikel terlihat mengalami penggumpalan. Fenomena ini terjadi untuk semua jenis serbuk yang digunakan.

Penggumpalan terjadi paling besar ialah dengan menggunakan serbuk Fe-30%at.Al dan Fe-40%at.Al sedangkan pada serbuk Fe-50%at.Al dan Fe-60%at.Al penggumpalan sangat kecil. Penggumpalan dari serbuk ini terjadi disebabkan karena partikel serbuk mengalami pengelasan dingin sehingga ukuran partikel serbuk menjadi besar . Kemungkinan lain adalah penggumpalan terjadi karena serbuk yang dihasilkan telah berstruktur nano. Partikel yang berstruktur nano meter akan cenderung menggumpal. Pada tahapan ini perpaduan kemungkinan terjadi karena bentuk partikel yang seperti ini adalah gabungan dari partikel Al dan Fe. Bentuk morfologi partikel ini dinamakan bentuk *microsandwich* karena bentuknya yang berlapis-lapis, bentuk seperti kemungkinan terjadi pelarutan padat terjadi.^[21] Dibawah ini adalah gambaran tentang perubahan bentuk partikel serbuk selama penggilingan :



Gambar 4.6 Mekanisme Pemaduan Mekanik Serbuk Fe-Al ^[21]

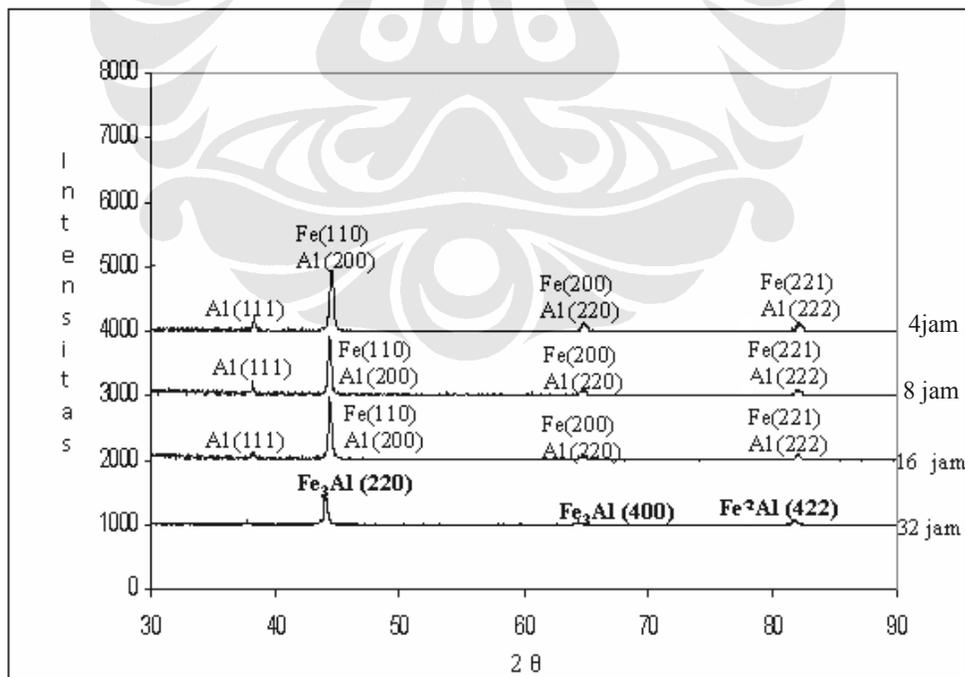
Pemaduan dimulai pada tahap ini karena penggabungan ini akan mengakibatkan penurunan jarak difusi (*interlamelar spacing*), peningkatan masa

jenis dari cacat kisi (lattice defect) dan panas yang bisa terjadi selama operasi penggilingan.

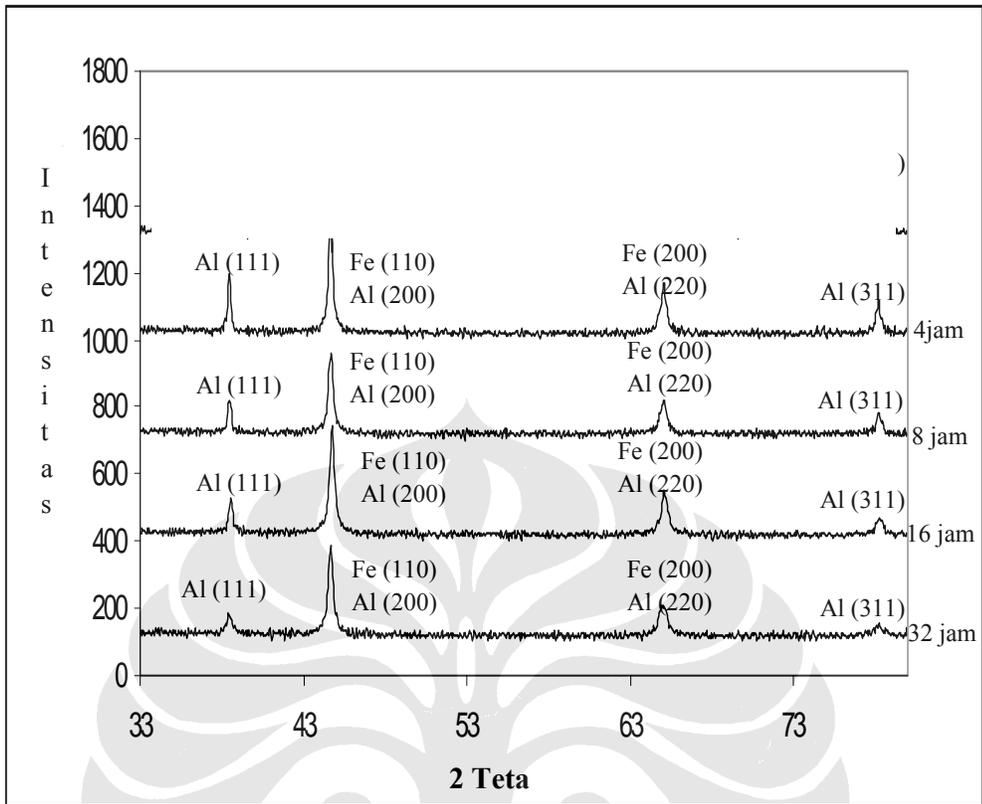
4.1.2 PERUBAHAN STRUKTUR KRISTAL DALAM SERBUK

Perubahan struktur kristal dari serbuk akan menentukan hasil pelapisan substrat baja karbon. Fasa yang terbentuk pada serbuk hasil pemaduan mekanik akan menjadi pelapis pada baja karbon. Kemungkinan apabila pada serbuk sudah terjadi proses pemaduan maka akan sangat besar kemungkinan terbentuk pelapisan yang memiliki fasa yang sama dengan serbuk. Berikut akan dijelaskan satu persatu perubahan struktur kristal dari masing-masing serbuk yang digunakan pada penelitian. Terdapat empat macam variabel kadar serbuk yang digunakan pada penelitian yaitu Fe-30 %Al, Fe-40 %Al, Fe-50%at.Al dan Fe-60%at.Al..

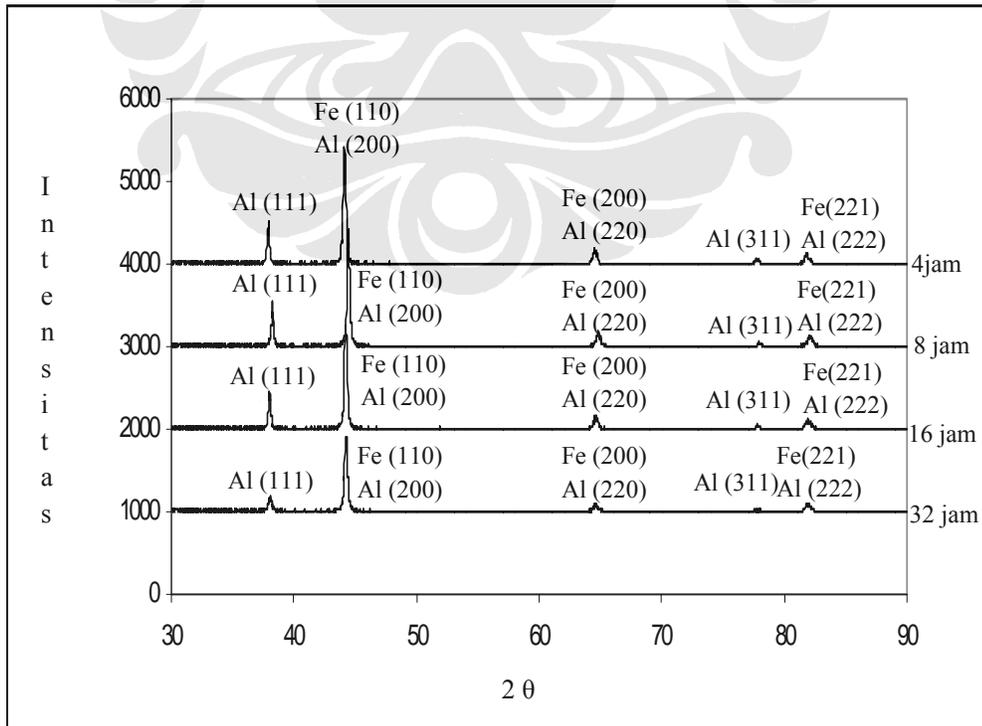
Perubahan struktur kristal dari serbuk Fe-30%at.Al 40%at.%Al, Fe-50%at.Al dan Fe-60%at.Al yang mengalami penggilingan selama 4, 8, 16 dan 32 jam ditunjukkan dari hasil XRD pada gambar 4.7 di bawah ini.



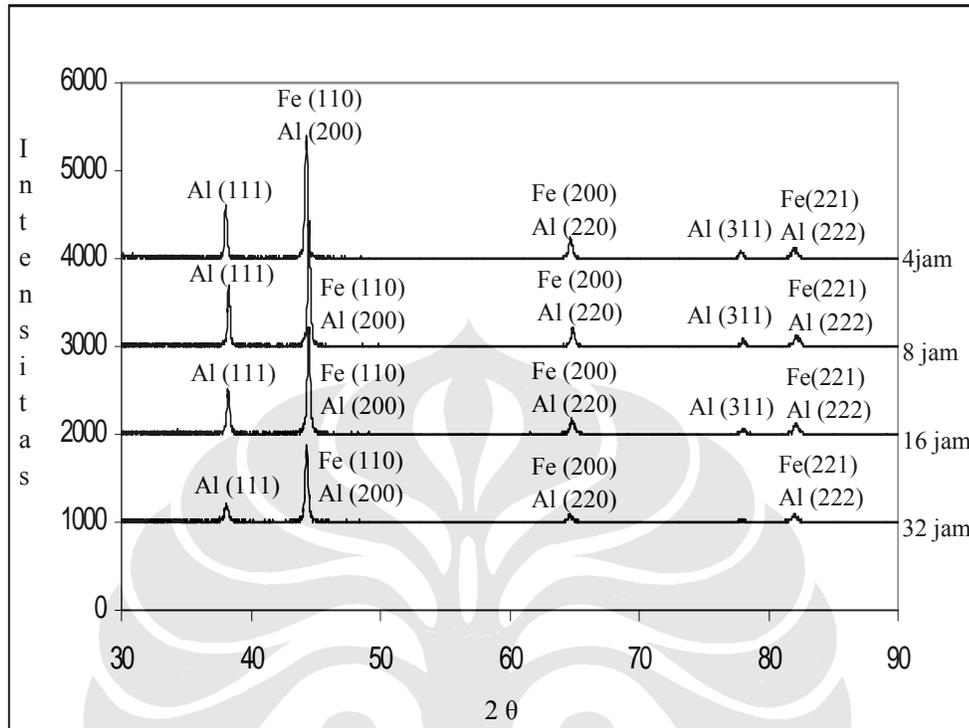
Gambar 4.7 Hasil XRD serbuk Fe-30%at.Al



Gambar 4.8 Hasil XRD serbuk Fe-40%at.Al



Gambar 4.9 Hasil XRD serbuk hasil menggunakan serbuk Fe 50%Al



Gambar 4.10 Hasil XRD serbuk hasil menggunakan serbuk Fe 60%Al

Pada gambar hasil XRD serbuk diatas memperlihatkan hasil XRD dari serbuk yang dimiling selama 32 jam. Pada penggilingan selama 4 jam keseluruhan serbuk dengan kadar Al yang berbeda menunjukkan pola yang sama. Pada hasil XRD tersebut nampak terdapat puncak Al yang memiliki bidang (111) (311) dan gabungan Fe (110)-Al(200), Fe(200)-Al(220) dan Fe(221)-Al(222). Profil dari Fe dan Al menunjukkan bentuk kristal bcc α -Fe dan fcc Al. Pada penggilingan selama 8 jam serbuk keseluruhan serbuk Fe-30%at.Al 40%at.%Al, Fe-50%at.Al dan Fe-60%at.Al mengalami penurunan intensitas. Penurunan intensitas paling besar terjadi pada serbuk Fe-30%at.Al. Pada penggilingan serbuk Fe-30%at.Al intensitas dari Al (311) sudah hilang, hal ini dimungkinkan akibat penghancuran kristal sehingga atom kristal Al akan mengalami solid solution pada matrix kristal Fe. Pada serbuk 40%at.%Al, Fe-50%at.Al dan Fe-60%at.Al intensitas kristal Al (311) masih terdapat dalam hasil XRD.

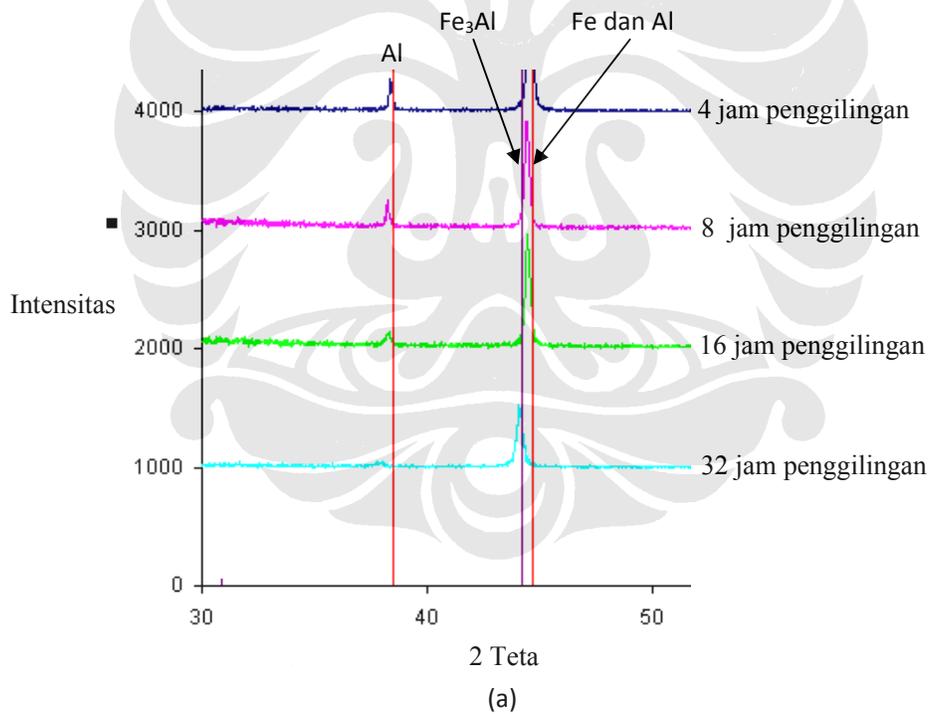
Puncak Fe dan Al mengalami pelebaran dan nilai intensitas yang menurun jika dibandingkan dengan hasil XRD tanpa penggilingan. Pelebaran dari puncak pada XRD ini dikarenakan oleh karena serbuk mengalami penghancuran akibat penggilingan. Fenomena yang sama ditunjukkan dengan penambahan waktu penggilingan selanjutnya. Semakin bertambahnya waktu penggilingan puncak difraksi Al (111) dan Al (311) menghilang secara bertahap. Pada waktu penggilingan 4 jam puncak Al (311) hilang. Dan pada waktu penggilingan selama 8 dan 6 jam puncak Al (111), Al (220) dan Al (222) mengalami penurunan intensitas secara perlahan dan pada waktu penggilingan selama 32 jam puncak Al (111) telah menghilang. Sedangkan pada puncak Al (220) dan Al (222) hampir menghilang dari pola difraksi hasil XRD. Puncak Al yang sudah tidak terlihat tersebut disebabkan karena difusi atom Al ke dalam kisi bcc Fe untuk membentuk paduan *solid solution*.^[4,13,23]

Hasil yang sama terdapat pada waktu penggilingan 32 jam serbuk 40%at.%Al, Fe-50%at.Al dan Fe-60%at.Al. Dari ketiga jenis serbuk diatas menunjukkan pola difraksi yang sama yaitu masih dalam gabungan Fe dan Al. Pada tiga jenis serbuk ini terjadi penguatan oleh karena *solid solution strengthening* hal ini dimungkinkan karena kelarutan Al dalam Fe bcc. Pola difraksi XRD dalam waktu penggilingan 32 jam menunjukkan intensitas kristal Al yang semakin menurun dan pada penggilingan serbuk Fe-30%atAl menunjukkan terdapat intermetalik.

Pembentukan *solid solution* ini dapat berupa pelarutan yang teratur dan pelarutan yang tidak teratur.^[1] Alasan lain yang menyebabkan puncak Al menghilang adalah karena ukuran partikel Al yang terlalu kecil atau telah mengalami perubahan dari susunan kristal menjadi amorph sehingga tidak dapat terdeteksi oleh X-Ray^[23]. Pada penelitian yang dilakukan Run Hua Fan menghasilkan pepaduan mekanik Fe-28%Al yang memiliki fenomena yang sama dengan penelitian ini. Run Hua Fan menyebutkan bahwa penurunan intensitas Al akibat ukuran partikel yang kecil dan tersusun secara acak sehingga tidak dapat terdeteksi oleh X-Ray.^[23] Partikel Al tersebut menjadi *scrappy* pada batas butir dari Fe^[23]. Pengukuran parameter kisi dilakukan oleh Run Hua fan untuk

membuktikan bahwa partikel Al belum larut ke dalam bcc Fe ^[23]. Parameter kisi pada waktu penggilingan 10 jam tidak berubah yaitu sebesar 2.8694 Å dan nilai parameter kisi ini sama dengan struktur bcc murni^[23]. Hal ini membuktikan bahwa belum tentu partikel Al yang tidak terdeteksi X-Ray larut dalam bcc Fe karena parameter kisi yang tidak berubah.

Pada waktu penggilingan 32 jam serbuk Fe-30%atAl, terjadi perubahan pola difraksi XRD. Setelah partikel Al menjadi amorph dan kemungkinan larut menjadi solid solution ke dalam atom Fe kemudian terbentuk paduan Fe₃Al. Pada waktu penggilingan 32 jam puncak Fe (110) (200) dan (221) mengalami pergeseran ke arah kiri dan mengalami kecenderungan menjadi fasa paduan Fe₃Al. Pergeseran pola difraksi pada 8, 16 dan 32 jam ditunjukkan pada gambar 4.11 dibawah ini.



Gambar 4.11 Pergeseran pola difraksi pada pembentukan paduan Fe₃Al pada Hasil XRD Penelitian

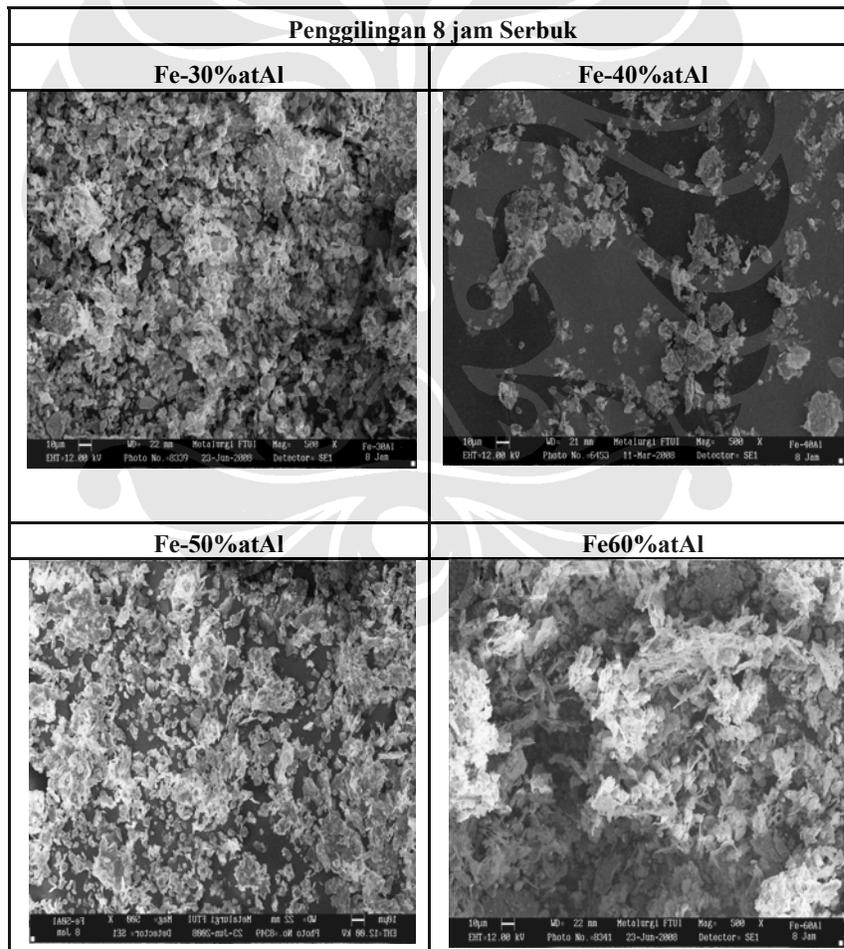
Pembentukan paduan Fe₃Al hasil proses pepaduan mekanik serbuk Fe-30%at.Al mengikuti aturan dalam diagram fasa biner Fe-Al. Pada diagram fasa

Fe-Al biner apabila komposisi atom berada pada 25 – 35 Al maka intermetalik yang terbentuk pada suhu ruang adalah Fe₃Al. Paduan Fe-Al yang terbentuk bergantung pada temperatur dan komposisi dari unsur besi dan aluminiumnya. Setiap paduan Fe-Al tersebut masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda satu dengan lainnya

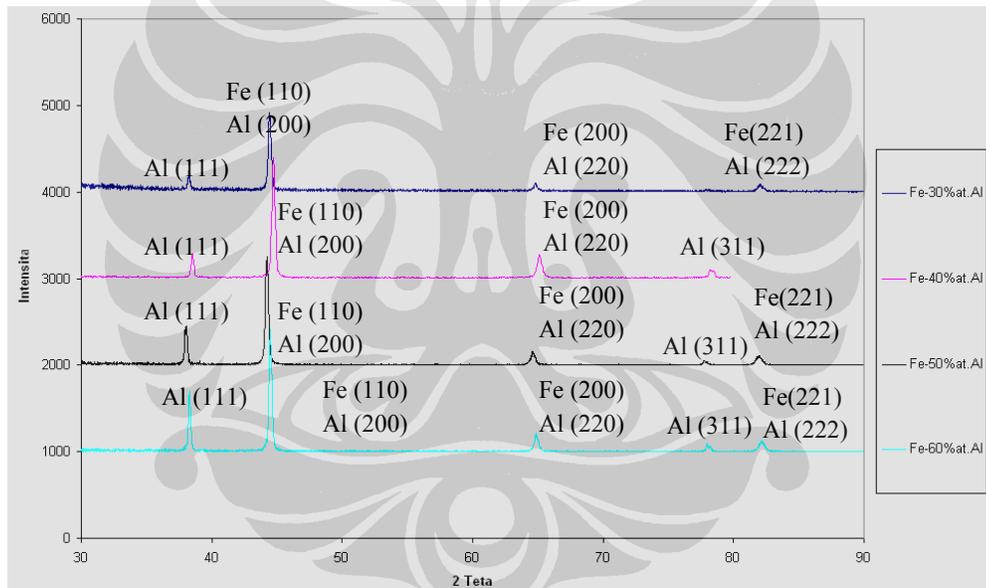
4.1.3 Pengaruh Komposisi Al terhadap Perubahan Morfologi dan Struktur Kristal Serbuk

Perbandingan karakteristik serbuk pada setiap komposisi serbuk Al yang digunakan terlihat pada tabel dibawah ini

Tabel 4.1 Perbandingan serbuk untuk komposisi Al yang berbeda



Pada table 4.1 menunjukkan perbandingan serbuk pada setiap komposisi Al yang berbeda. Bentuk morfologi serbuk Fe-60%atAl memiliki bentuk lebih lempeng dibanding serbuk Fe-30%atAl, Fe-40%atAl dan Fe-50%atAl yang memiliki bentuk lebih bulat dan sedikit lempeng. Dari perbandingan gambar diatas didapat bahwa penghancuran banyak terjadi pada Fe-30%atAl dan Fe-40%atAl karena partikel serbuk mengalami bentuk yang lebih kecil dan bulat, sedangkan pada serbuk Fe-60%atAl memiliki bentuk lebih lempeng, hal ini dikarenakan proses penghancuran baru mulai terjadi. Pada penghancuran Fe-30%atAl dan Fe-40%atAl telah terjadi bentuk penggumpalan dalam skala kecil. Penggumpalan ini terjadi dikarenakan telah terjadi penghancuran serbuk dalam ukuran kecil sehingga partikel serbuk akan lebih mudah menggumpal.

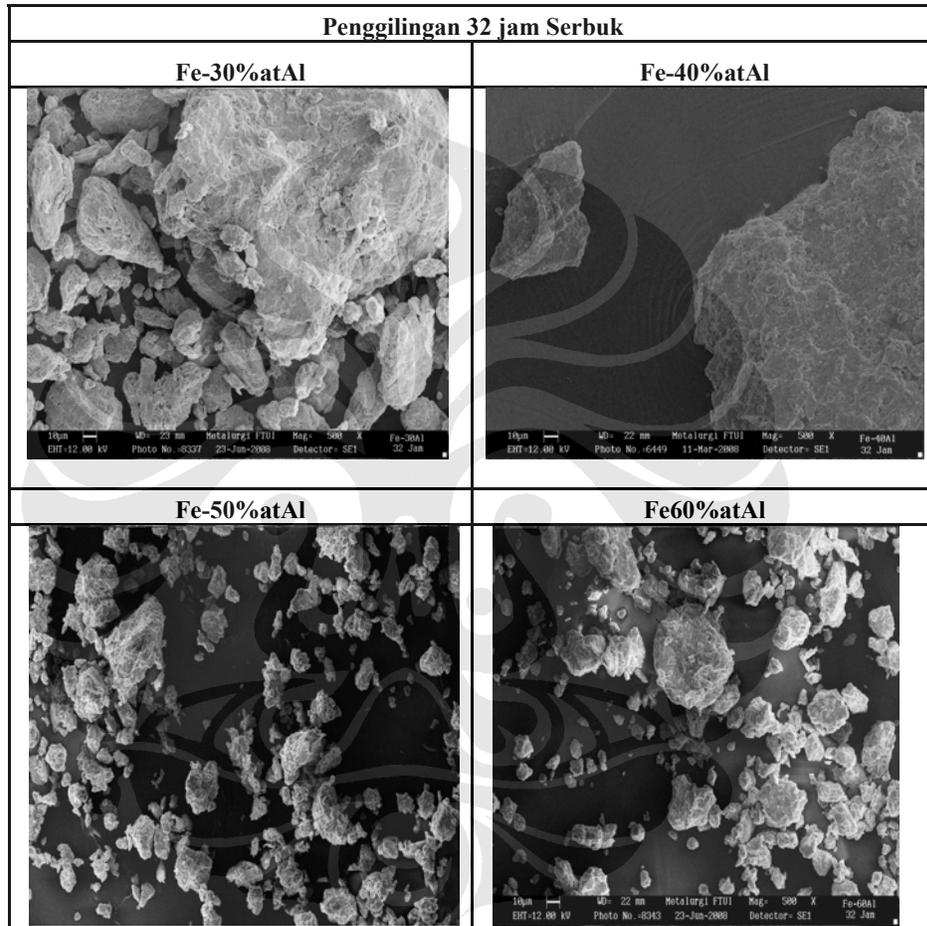


Gambar 4.12 Perbandingan Hasil XRD Penggilingan 8 jam Pada Komposisi Al yang berbeda

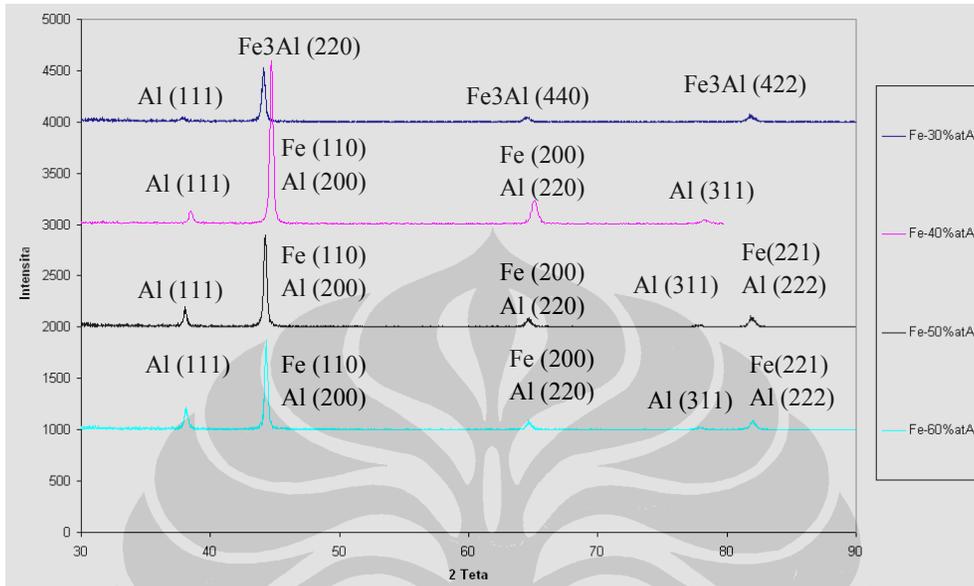
Dari hasil XRD diatas dapat terlihat semakin kecil kadar Al maka puncak Al akan semakin kecil. Pada gambar 4.12 diatas puncak Al paling kecil terdapat pada serbuk Fe-30%atAl. Hal ini mengindikasikan bahwa penghancuran lebih besar pada serbuk Fe-30%atAl. Penghancuran yang lebih besar ini diakibatkan karena serbuk fe lebih getas dari pada serbuk Al maka semakin besar Fe maka akan semakin besar penghancuran serbuk. Makin besar komposisi Al maka

puncak Al yang terjadi pada penggilingan 8 jam diatas akan semakin besar, hal inilah yang menyebabkan akan sulit terbentuk intermetalik Fe-Al, karena untuk terbentuk intermetalik Fe-Al, serbuk Al harus hancur terlebih dahulu sehingga atom Al akan larut kedalam bcc Fe untuk membentuk intermetalik Fe-Al.

Tabel 4.2 Perbandingan serbuk untuk komposisi Al yang berbeda



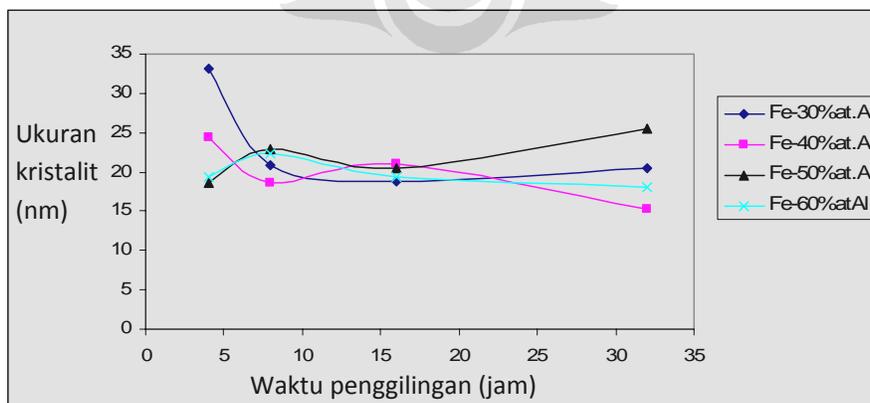
Pada tabel 4.2 terlihat bahwa penggumpalan besar terjadi pada komposisi serbuk Fe-30%atAl dan Fe-40%atAl. Hal ini terjadi karena partikel dalam ukuran kecil cenderung menggumpal. Sedangkan pada komposisi Fe-50%atAl dan Fe-46 0%atAl belum terjadi proses penggumpalan karena serbuk baru mengalami penghancuran. Pada penelitian ini tidak digunakan zat *control agent* yang menyebabkan partikel cenderung menggumpal.



Gambar 4.13 Perbandingan Hasil XRD Penggilingan 32 jam Pada Komposisi Al yang berbeda

Pada gambar 4.13 diatas terlihat bahwa semakin meningkat komposisi Al maka intensitas penghancuran akan semakin berkurang. Hasil XRD diatas memperlihatkan terbentuknya intermetalik Fe Al pada penggilingan Fe-30%at.Al.

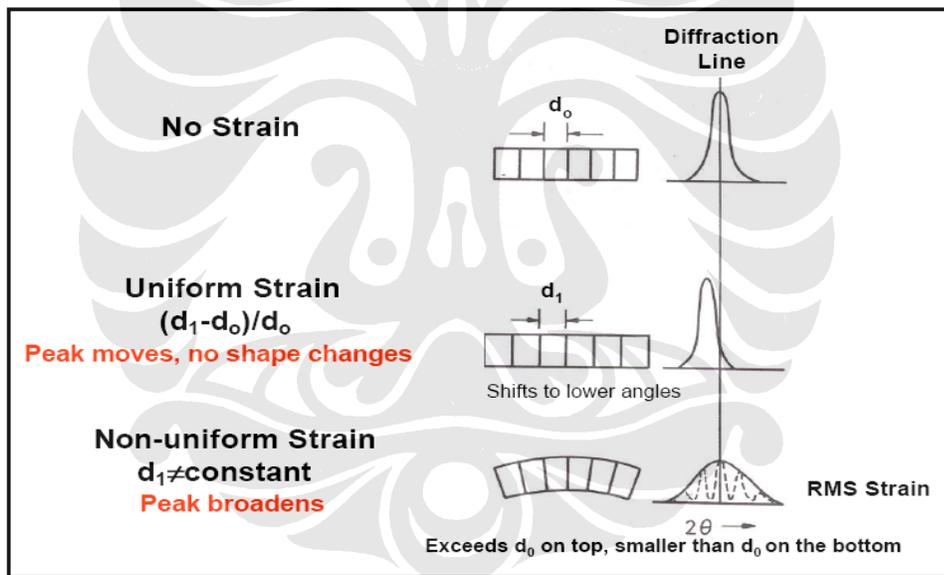
4.1.4 Pendekatan Pengukuran Kristalinit



Gambar 4.14 Perbandingan ukuran kristalinit serbuk terhadap waktu penggilingan

Pengukuran kristalinit dilakukan dengan analisis dari XRD. Ukuran kristalinit dilakukan dengan cara mengukur jarak pelebaran puncak dalam XRD dengan menggunakan rumus Scherer. Pengukuran kristalinit dilakukan untuk mengetahui penghacuran butir .

Dari kurva diatas didapat penghancuran dalam skala nano meter. Pada waktu penggilingan 4 jam telah dicapai penghancuran mencapai skala nano meter. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada pemaduan mekanik ini akan dihasilkan material nanokristalin. Pergeseran ke kanan dan kiri yang ditunjukkan pada kurva XRD sebelumnya dapat dijawab dengan kurva ukuran kristalinit diatas. Pergeseran tersebut dapat diakibatkan strain yang tinggi dalam kristal sehingga menyebabkan ukuran kristalinit lebih besar dan menyebabkan pergeseran kurva XRD.



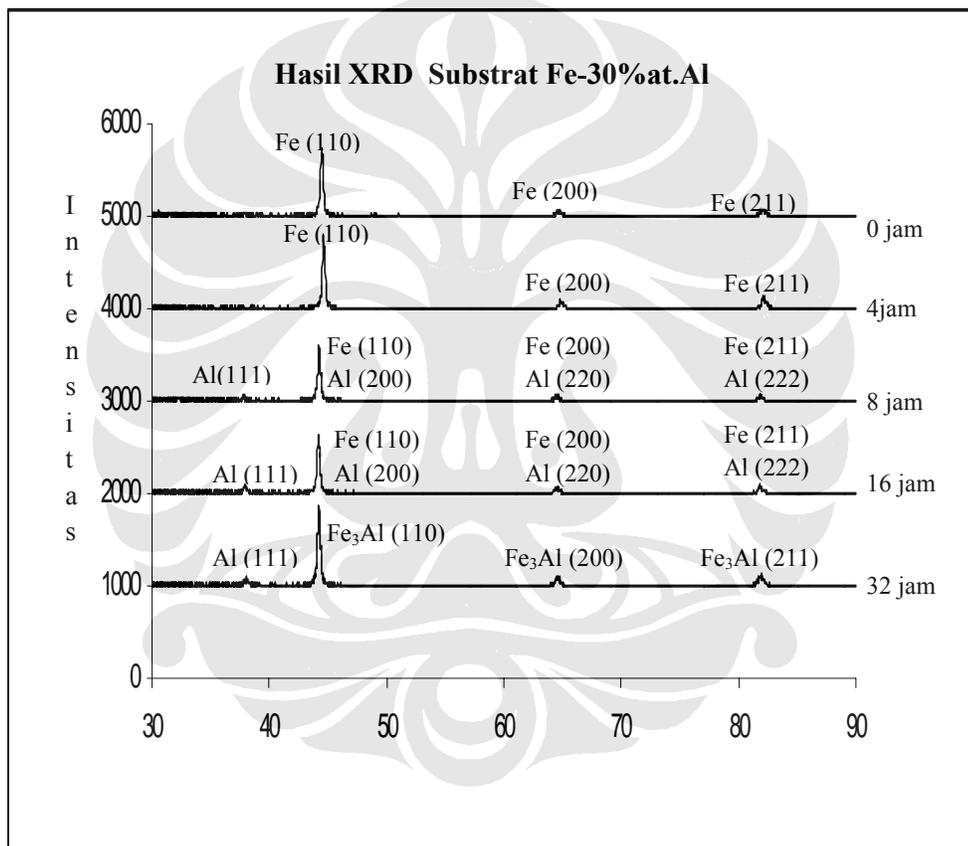
Gambar 4.15 Penyebab pergeseran kurva xrd [24]

Pada pengukuran ukuran kristalinit terlihat bahwa nilai ukuran kristalinit naik. Penyebab kenaikan ukuran kristalinit ini dapat disebabkan karena ukuran kristal melebar akibat adanya strain yang tinggi pada kristal, strain yang besar ini juga dapat menyebabkan pergeseran kurva XRD yang terdapat pada hasil penelitian ini. Pengaruh strain dapat dilihat dari gambar 4.15 diatas.

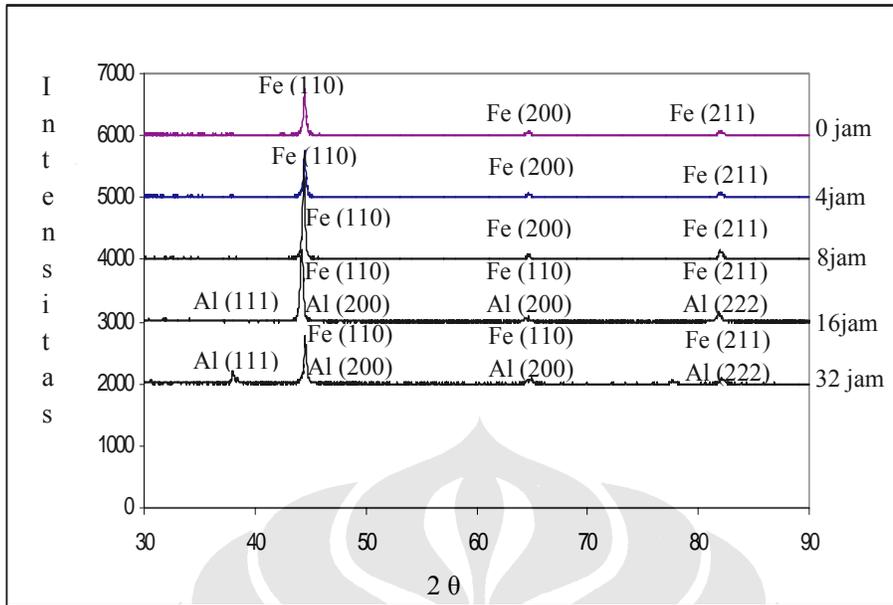
IV. 2.KARAKTERISASI SUBSTRAT HASIL PELAPISAN

IV.2.1 Perubahan Struktur Kristal Substrat

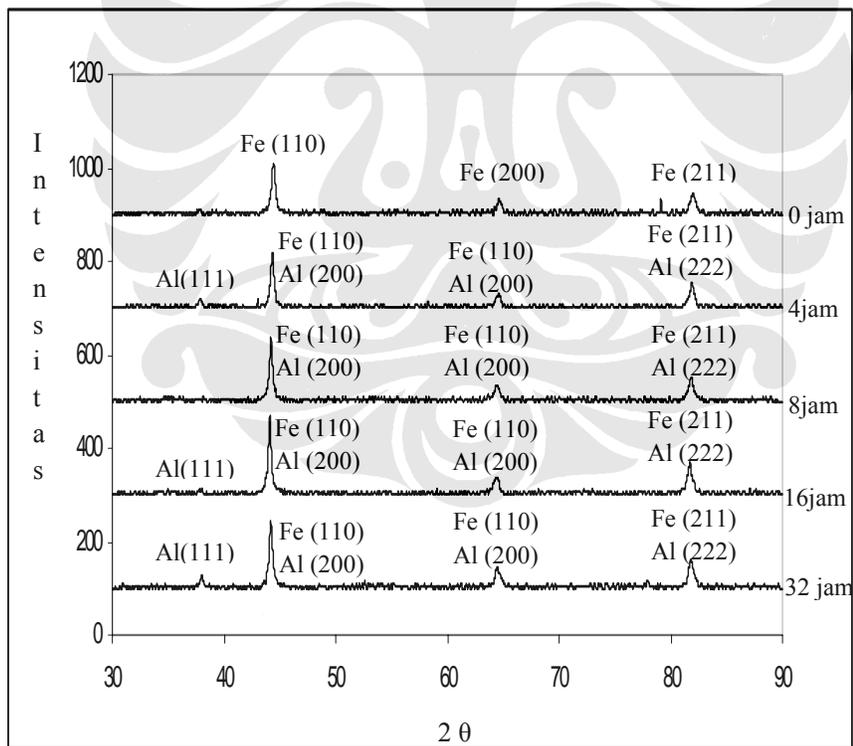
Substrat yang digunakan sebelum penggilingan dikarakterisasi terlebih dahulu dengan XRD untuk membandingkan dengan substrat hasil penggilingan akibat pemaduan mekanik. Pada gambar 4.16,4.17,4.18 dan 4.19 adalah.Hasil XRD substrat dengan menggunakan serbuk Fe-30%at.Al dengan waktu penggilingan 4, 8, 16 dan 32 jam



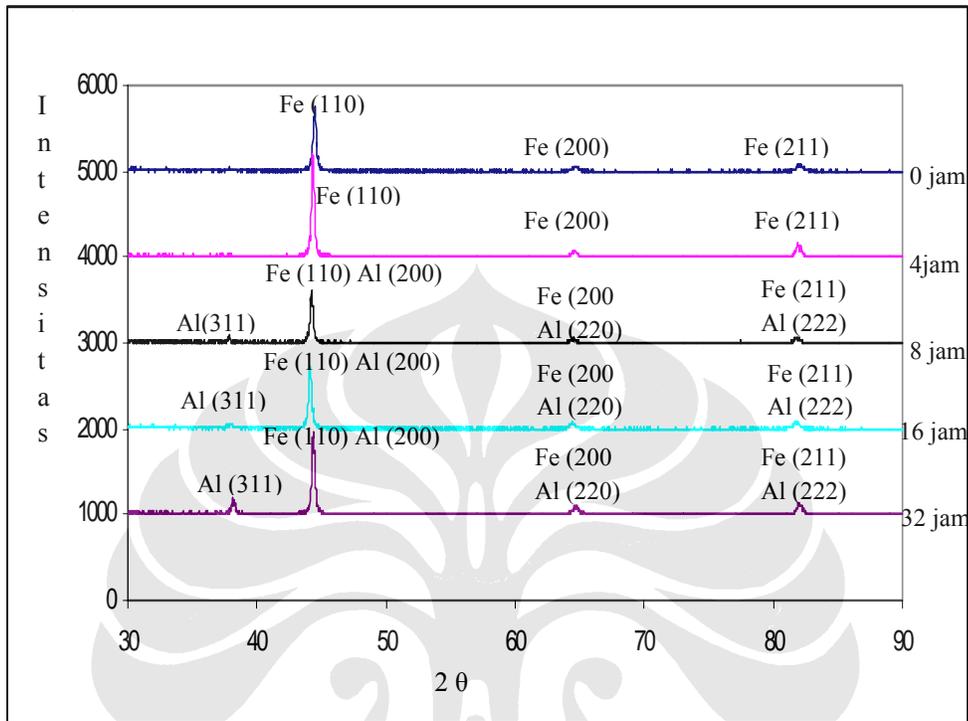
Gambar 4.16 Hasil XRD substrat menggunakan serbuk Fe-30at.%Al



Gambar 4.17 Hasil XRD substrat menggunakan serbuk Fe-40at.%Al



Gambar 4.18 Hasil XRD substrat menggunakan serbuk Fe-50at.%Al



Gambar 4.19 Hasil XRD substrat menggunakan serbuk Fe -60%at.Al

Berdasarkan hasil pengujian XRD di atas, tampak bahwa sebelum penggilangan dilakukan, substrat hanya terdiri dari kristal bcc Fe. Hal ini terlihat dari puncak-puncak grafik pola difraksinya yang hanya terdiri dari puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi oleh bidang-bidang kristal (110), (200) dan (211). Penyebab hal tersebut adalah karena material yang digunakan sebagai substrat adalah baja karbon AISI 1045 yang memiliki komposisi 0.45% unsur karbon dalam matriks unsur besi. Kehadiran unsur karbon tersebut tidak terdeteksi oleh pengujian XRD karena unsur karbon tersebut tidak memiliki struktur kisi kristal yang berdiri sendiri akibat terlarutnya unsur karbon di dalam matriks unsur besi. Namun, akibat dari interstisi unsur karbon tersebut di dalam matriks logam besi, maka muncul tegangan yang mengakibatkan terjadinya pelebaran puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi akibat berubahnya jarak antar bidang atomnya.

Pada penggilingan serbuk Fe-30%at.Al puncak difraksi Al(111) sudah muncul pada waktu penggilingan 16 jam, ini menandakan bahwa pelapisan sudah mulai terjadi pada waktu penggilingan 16 jam. Kemudian untuk waktu penggilingan selanjutnya puncak difraksi Al (111) makin meningkat. Hal ini membuktikan bahwa pada penggilingan serbuk Fe-30%atAl telah mengalami peningkatan pelapisan pada substrat. Pada pelapisan dengan menggunakan serbuk Fe-30%atAl juga terdapat paduan Fe₃Al, hal ini dibuktikan dengan adanya puncak paduan Fe₃Al (110) pada penggilingan 32 jam. Paduan Fe₃Al yang menempel ini merupakan paduan intermetalik yang memiliki kekuatan yang tinggi

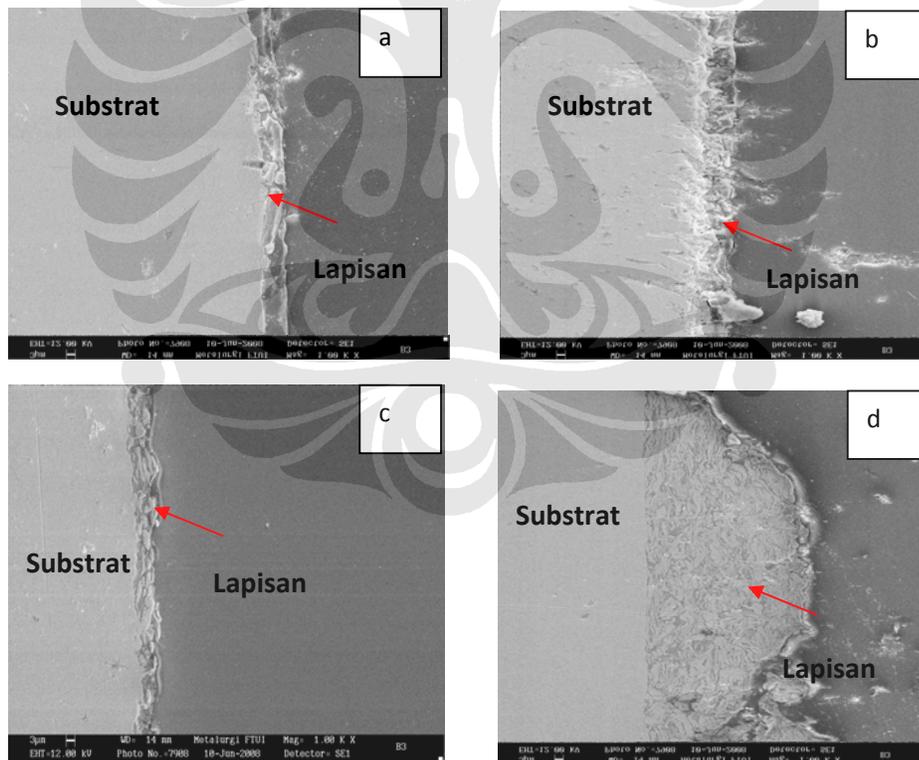
Pada penggilingan dengan serbuk Fe-40%at.Al puncak Al(111) sudah muncul pada waktu penggilingan 16 jam dan puncak Al naik pada waktu penggilingan 32 jam. Hal ini membuktikan bahwa pelapisan pada substrat meningkat dengan pertambahan waktu penggilingan. Pelapisan dengan serbuk Fe-40%at.Al akan meningkat seiring dengan peningkatan puncak difraksi Al.

Pada penggilingan dengan menggunakan serbuk Fe-50%at.Al, pola difraksi puncak Al (111) muncul pada penggilingan 4 jam kemudian menghilang pada saat waktu penggilingan 8 dan 16 jam. Setelah penggilingan selama 8 jam dan 16 jam, terlihat bahwa puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang kristal (111) hilang. Ada dua kemungkinan terjadinya fenomena tersebut. Pertama, susunan kristal telah hancur dan lebih menuju kepada struktur amorph sehingga puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium tidak terdeteksi. Kedua, lapisan serbuk yang telah menempel pada permukaan *substrate* terlepas akibat benturan bola-bola giling yang tidak tegak lurus terhadap garis normal permukaan *substrate*. Namun, diperkirakan bahwa kehadiran logam aluminium pada permukaan *substrate* tetap ada. Hal ini terlihat dari adanya peningkatan puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi oleh bidang (200) dan (211). Pada waktu penggilingan 32 jam puncak Al muncul kembali. Kemunculan dari puncak Al yang fluktuatif ini membuktikan bahwa penempelan lapisan berjalan tidak optimal karena sifat penempelan lapisan tidak berjalan dengan konstan.

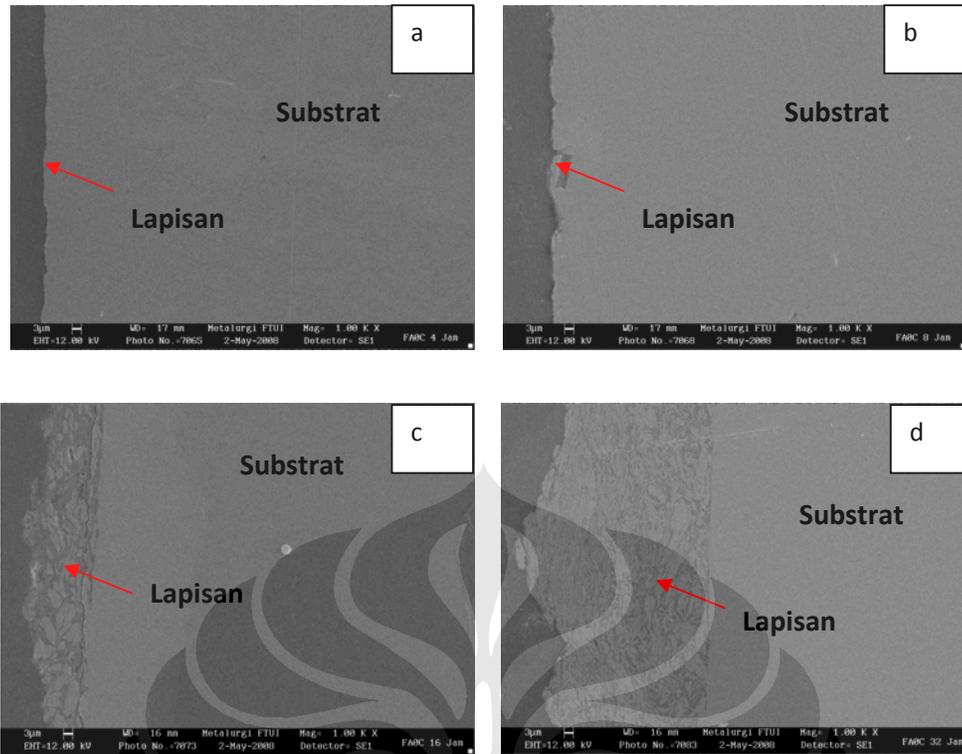
Pada penggilingan dengan menggunakan serbuk Fe-60%at.Al puncak Al muncul pada jam ke 8 kemudian intensitas menurun pada jam ke 16 dan intensitas Al naik kembali pada saat jam ke 32. Fenomena mirip dengan pola difraksi serbuk Fe-50%at.Al. Hal ini menandakan bahwa pelarutan Al kedalam kisi bcc Fe substrat tidak berjalan konstan atau lapisan yang terjadi pada substrat terlepas sehingga menyebabkan tidak terditeksinya Al. Hal ini akan berpengaruh terhadap karakteristik lapisan yang terbentuk. Lapisan yang terbentuk tidak akan berjalan dengan keadaan stabil.

4.2.2 Pengamatan Struktur Lapisan

Hasil pengamatan dengan SEM digunakan untuk mengamati struktur lapisan yang terbentuk dari proses pemaduan mekanik untuk setiap kadar Al yang digunakan. Gambar 4.20, 4.21 memperlihatkan hasil pengamatan SEM dari struktur lapisan yang terbentuk pada serbuk Fe-30%at.Al dan Fe-40%at.Al



Gambar 4.20 Hasil pengamatan SEM struktur lapisan yang terbentuk dengan menggunakan serbuk Fe-30%at.Al (a) 4 jam penggilingan (b) 8 jam penggilingan (c) 16 jam penggilingan (d) 32 jam penggilingan

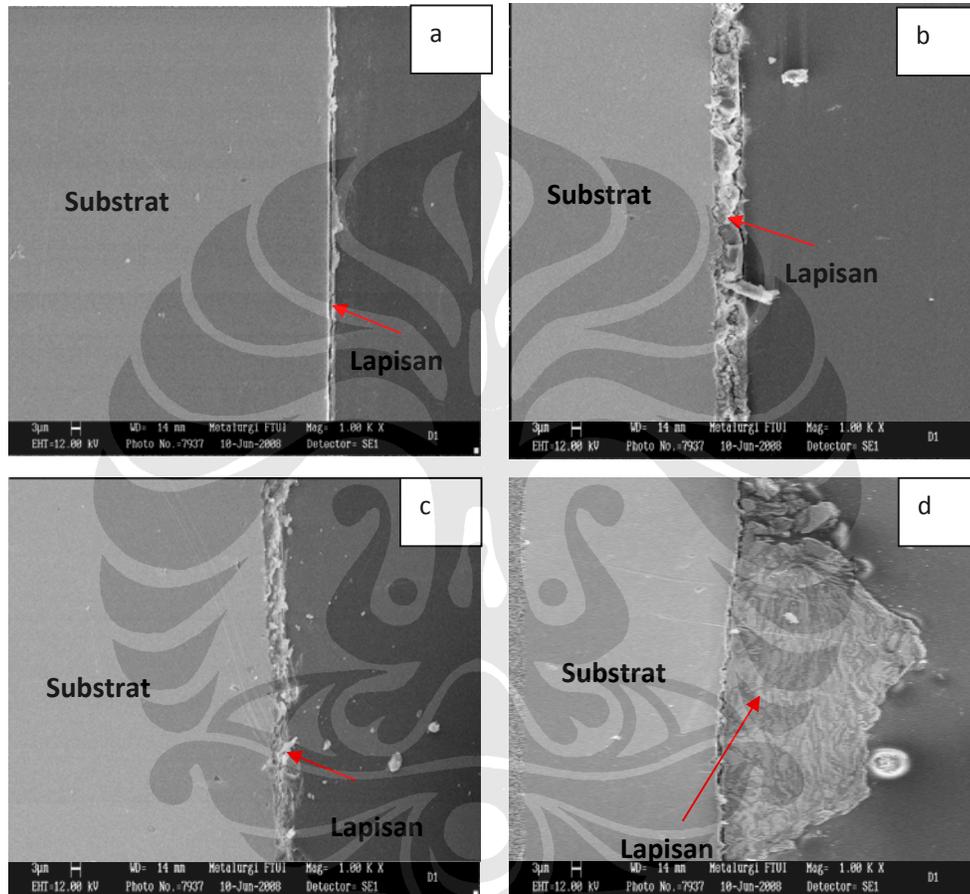


Gambar 4.21 Perubahan Substrat Baja Karbon dengan menggunakan serbuk Fe-40%at.Al (a) Penggilingan 4 jam (b)Penggilingan 8 jam (c)Penggilingan 16 jam dan (d)Penggilingan 32 jam

Gambar 4.20 dan 4,21 adalah hasil analisa SEM penampang melintang sampel pada pelapisan menggunakan serbuk Fe-30%at.Al dan Fe-40%atAl. Terlihat bahwa pada penggilingan serbuk Fe-30%at.Al terbentuk lapisan pada permukaan sampel pada waktu penggilingan 4 dan 8 jam. Akan tetapi lapisan ini bukanlah Al akan tetapi hasil deformasi dari serbuk dan bola giling. Sebaliknya pada penggilingan serbuk Fe-40%atAl dengan 4 dan 8 jam waktu penggilingan tidak terlihat lapisan. Pada serbuk Fe-30%at.Al dan Fe-40%atAl terlihat pelapisan pada waktu 16 jam. Pada tahapan penggilingan 32 jam pelapisan sudah terjadi pada substrat. Pada waktu penggilingan 32 jam terlihat adanya proses pengelasan dingin dan penghancuran partikel-partikel serbuk di permukaan *substrate* yang diperkirakan terjadi akibat tumbukan bola-bola giling berenergi tinggi yang membentur campuran serbuk besi dan aluminium tersebut. Hasil pengujian XRD dan SEM di atas membuktikan bahwa semakin lama waktu penggilingan, maka

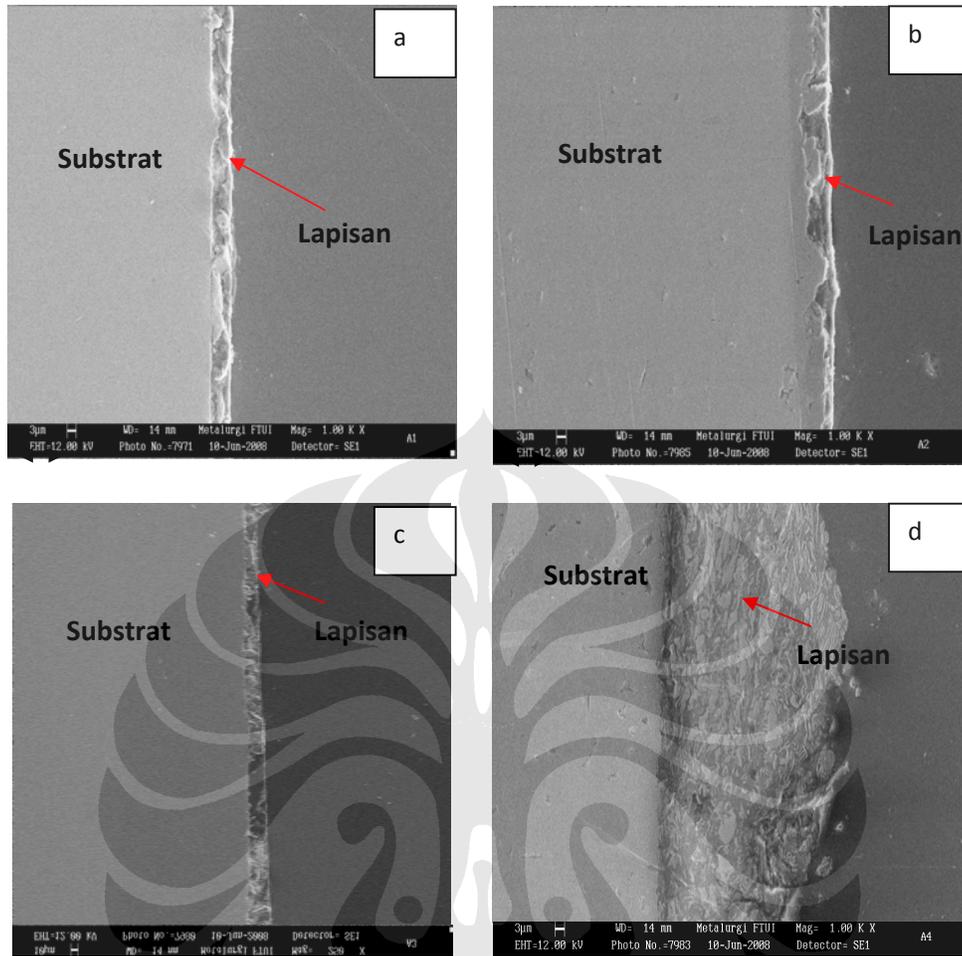
ketebalan lapisan yang dihasilkan juga semakin tinggi. Hasil perhitungan ketebalan lapisan pada permukaan *substrate* tampak pada gambar berikut.

Gambar 4.22 adalah hasil analisa SEM penampang melintang sampel pada pelapisan menggunakan serbuk Fe-50%at.Al.



Gambar 4.22 Perubahan Substrat Baja Karbon dengan menggunakan serbuk Fe-50%at.Al (a) Penggilingan 4 jam (b)Penggilingan 8 jam (c)Penggilingan 16 jam dan (d)Penggilingan 32 jam

Fenomena yang sama ditunjukkan pada pelapisan dengan menggunakan serbuk Fe-50%at.Al. Hasil pelapisan dengan serbuk Fe-50%at.Al tidak jauh berbeda dengan hasil pelapisan dengan menggunakan serbuk Fe-30%at.Al dan Fe-40%.at.Al.

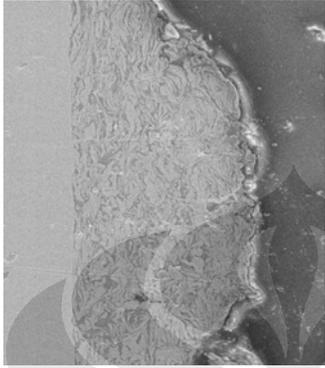
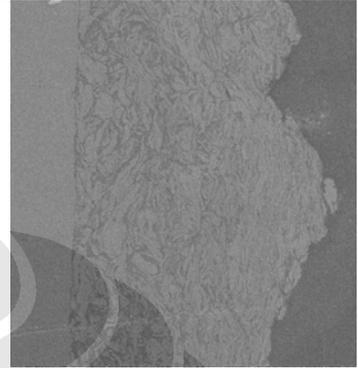
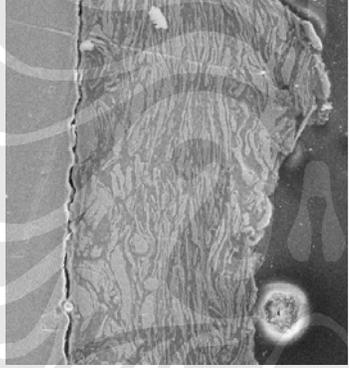
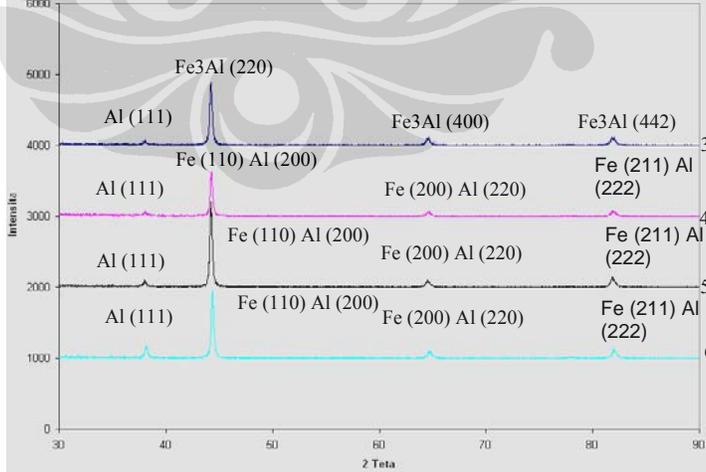


Gambar 4.23 Perubahan Substrat Baja Karbon dengan menggunakan serbuk Fe-60%at.Al (a) Penggilingan 4 jam (b)Penggilingan 8 jam (c)Penggilingan 16 jam dan (d)Penggilingan 32 jam

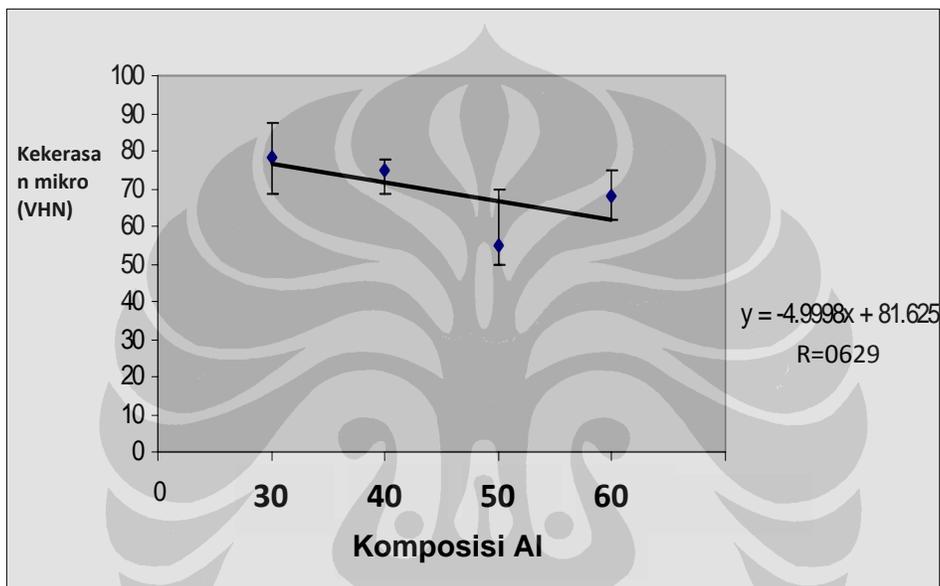
Hasil yang sama ditunjukkan pada pelapisan dengan menggunakan serbuk Fe-50%at.Al. Hasil pelapisan dengan serbuk Fe-50%at.Al tidak jauh berbeda dengan hasil pelapisan dengan menggunakan serbuk Fe-30%at.Al dan Fe40%Al. Pada pelapisan dengan serbuk Fe-60%at.Al memperlihatkan lapisan yang hampir merata pada permukaan lapisan.

4.2.3 Pengaruh Komposisi Al Terhadap Hasil Pelapisan yang Terbetuk

Tabel 4.3 Perbandingan Lapisan untuk komposisi Al yang berbeda

Karakteristik	Substrat	
	Fe-30%atAl	Fe-40%atAl
S t r u k t u r m i k r o		
		
Hasil XRD		

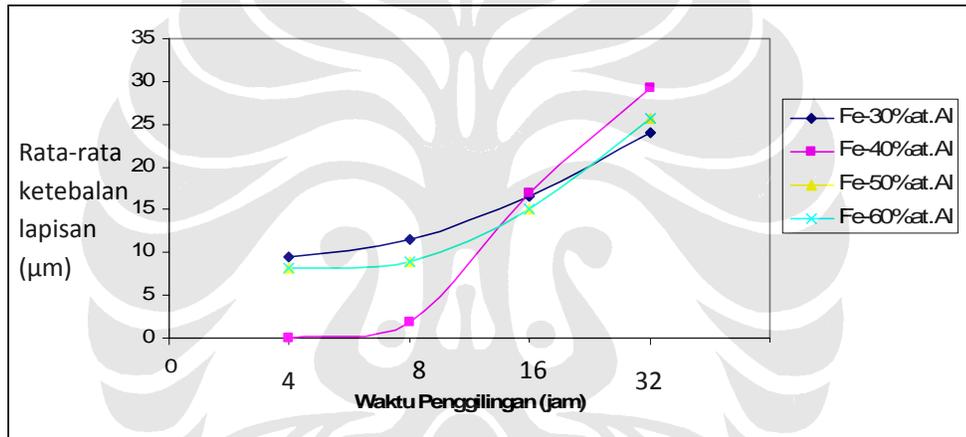
Struktur lapisan pada Fe-30%Al dan Fe-40%Al memiliki butir yang lebih kecil jika dibanding hasil lapisan Fe-50%Al dan Fe-60%Al. Perbedaan ini yang menyebabkan perbedaan nilai kekerasan pada masing-masing lapisan. Struktur butir yang kecil akan memiliki kenaikan kekerasan yang tinggi. Fenomena ini bisa dilihat dari kurva nilai kekerasan dibawah ini :



Gambar 4.24 Nilai Kekerasan Rata-rata Lapisan untuk Setiap Kadar Serbuk yang digunakan

Nilai kekerasan lapisan pada penambahan Al cenderung turun. Penurunan nilai kekerasan ini disebabkan karena proses penghancuran butir yang semakin menurun. Nilai penghancuran mempengaruhi sifat mekanis dari hasil paduan mekanik. Nilai kekerasan yang tinggi ini diakibatkan karena pembentukan paduan intermetalik Fe_3Al yang memiliki nilai kekerasan yang tinggi. Faktor yang mempengaruhi sifat mekanis dari hasil paduan mekanik adalah besar butir dan penguatan dispersoid. Substrat yang mengalami intensitas deformasi yang tinggi akan meningkatkan yield strength. Deformasi elastik yang terjadi pada pelapisan banyak terjadi pada kadar Fe-30%at.Al karena kadar Al yang rendah sehingga banyak terjadi penghancuran. Penghancuran dari serbuk ini yang menyebabkan sifat mekanis yang tinggi. Pada lapisan Fe-60%at.Al nilai kekerasan naik, Hal ini

disebabkan karena struktur mikro yang lebih halus dan mencampur jika dibanding dari hasil lapisan Fe-50%at.Al. Struktur lapisan Fe-50%at.Al lebih besar bagian putihnya, kemungkinan warna putih dari lapisan adalah struktur dari campuran Al dan Fe. Pada Fe-60%at.Al lapisan lebih merata, hal inilah yang menyebabkan nilai kekerasan lebih tinggi dibanding dengan Fe-50%at.Al. Dari hasil XRD penggilingan 32 jam didapat intensitas campuran kristal Fe dan Al terbesar pada Fe-50%at.Al sehingga dapat diperkirakan bahwa penghancuran paling rendah pada komposisi ini. Dan pada perhitungan ukuran kristalit juga menghasilkan ukuran kristalit yang kecil. Oleh karena itu pada komposisi Fe-50%at.Al memiliki sifat mekanis yang rendah

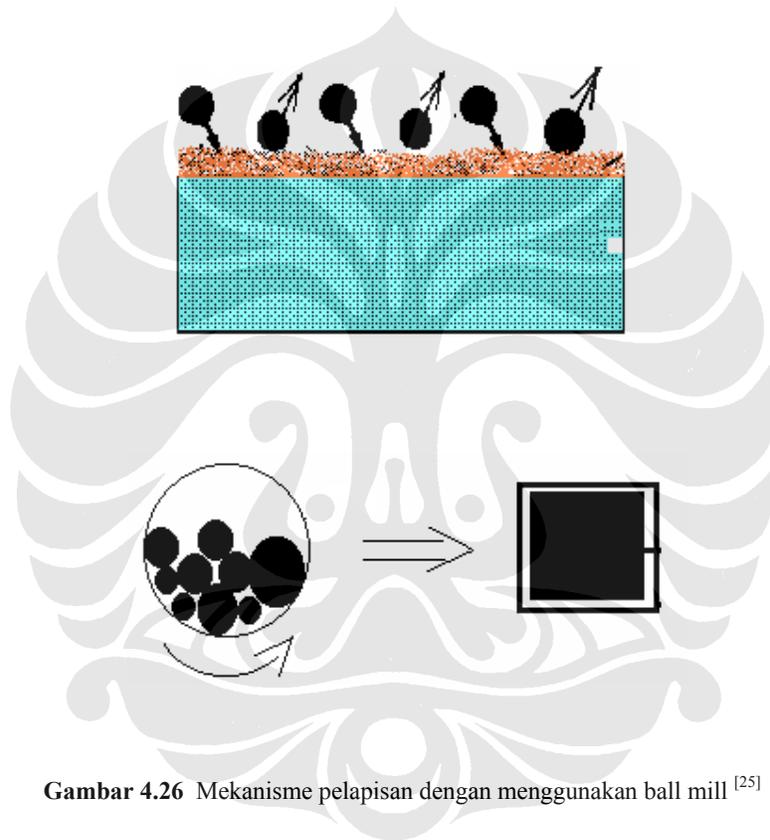


Gambar 4.25 Ketebalan lapisan rata-rata substrat untuk setiap kadar serbuk yang digunakan

Hasil pengukuran ketebalan rata-rata tiap ditunjukkan oleh gambar 4.25. Dari keseluruhan jenis serbuk yang dipakai untuk pelapisan menunjukkan bahwa kenaikan waktu penggilingan akan menaikkan ketebalan lapisan. Pengaruh komposisi Al terhadap ketebalan lapisan tidak signifikan. Ketebalan yang diperoleh tidak jauh berbeda pada masing-masing komposisi Al. Ketebalan lapisan hanya dipengaruhi oleh waktu penggilingan. Semakin lama waktu penggilingan maka lapisan yang terbentuk akan semakin besar.

4.3 MEKANISME PELAPISAN DENGAN METODE PEMADUAN MEKANIK

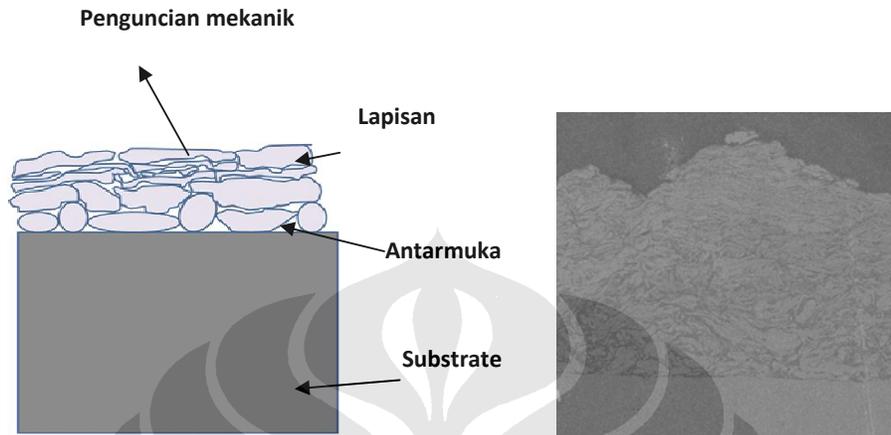
Pelapisan yang terjadi pada permukaan substrat baja karbon merupakan hasil dari tumbukan bola giling dan serbuk terhadap substrat. Substrat mengalami deformasi yang menyebabkan serbuk menempel secara fisik ke dalam baja karbon.



Gambar 4.26 Mekanisme pelapisan dengan menggunakan ball mill ^[25]

Hasil dari tumbukan serbuk yang berulang-ulang akan menyebabkan peguncian secara mekanik (*mechanical interlocking*) pada substrat dengan lapisan dan antara serbuk yang menempel. Kemungkinan serbuk akan menempel ketika partikel memiliki ukuran yang kecil, dengan ukuran yang kecil ini akan memudahkan serbuk masuk ke dalam baja karbon. Jika menggunakan bola giling besar dan kecil maka akan dihasilkan lapisan yang lebih rata.^[23] Hal ini disebabkan karena proses penghancuran yang lebih tinggi dan merata jika

menggunakan bola besar dan kecil. Bola kecil akan menutupi bagian permukaan yang tidak terdeformasi oleh bola besar sehingga permukaan lapisan lebih rata.



Gambar 4.27 Pembentukan Lapisan dengan menggunakan ball mill [23]

Pada waktu awal pemaduan mekanik serbuk yang menempel masih besar-besar. Seiring dengan bertambahnya waktu pemaduan mekanik serbuk yang menempel mulai berbentuk pipih-pipih dan mengikuti tekstur dari serbuk sebelumnya sehingga serbuk terkunci secara mekanik (*mechanical interlocking*) dengan serbuk lainnya. Dengan waktu pemaduan mekanik yang lebih lama maka struktur lapisan akan semakin halus.

Semakin jauh dari permukaan substrat maka butir yang terbentuk akan semakin kecil. Hal ini dapat dijelaskan melalui gambar 4.27 Butir yang lebih besar menempel terlebih dahulu kemudian terjadi deformasi terhadap hasil lapisan yang menyebabkan struktur yang lebih lempeng. Oleh karena itu butir yang semakin jauh dengan permukaan substrat akan memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi karena memiliki struktur butir lebih kecil.