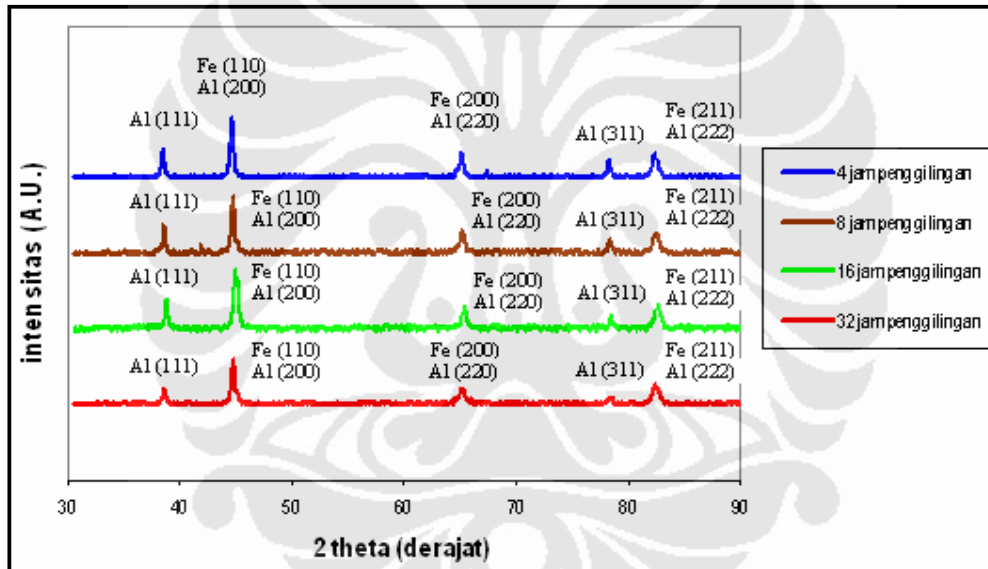


BAB IV

HASIL PENELITIAN dan PEMBAHASAN

4.1. KARAKTERISTIK SERBUK

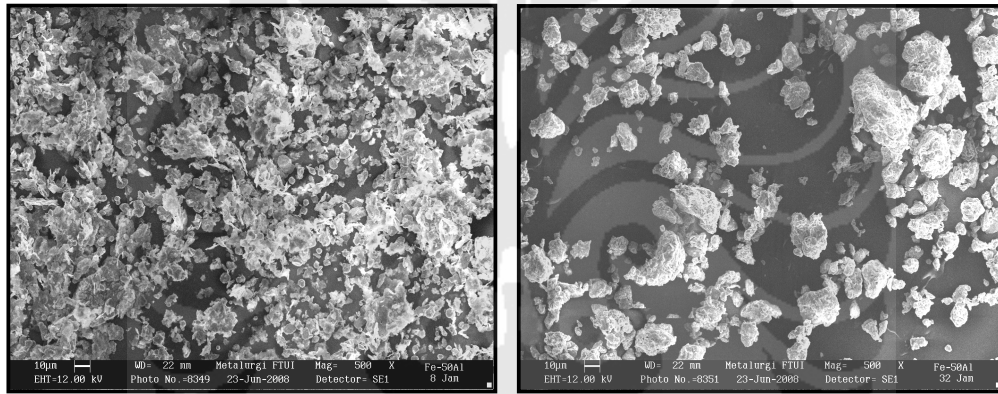
4.1.1. Serbuk Fe-50at.%Al



Gambar 4.1. Hasil Uji XRD serbuk Fe-50at.%Al

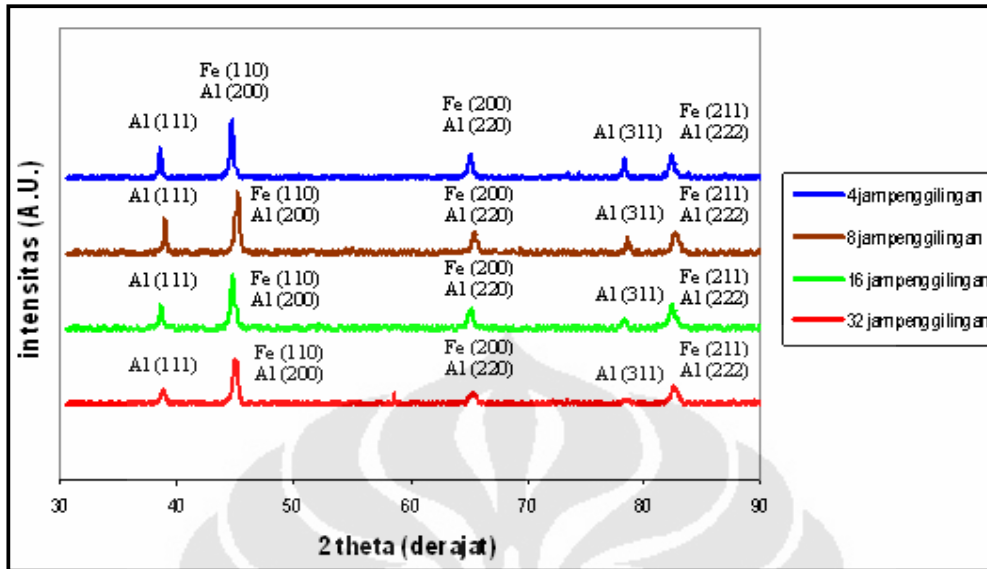
Berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa secara keseluruhan puncak-puncak grafik pola difraksi hasil uji XRD terhadap penggilangan serbuk Fe-50at.%Al selama 32 jam semakin melebar dan menurun, namun tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa laju penghancuran serbuk menurun, sedangkan laju pengelasan dingin meningkat. Namun, berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui pula bahwa selama proses penggilangan bola tersebut tidak terjadi pembentukan senyawa intermetalik Fe-Al. Hal ini mungkin disebabkan karena waktu penggilangan yang belum maksimal.

Pengamatan terhadap morfologi campuran serbuk dengan menggunakan SEM menunjukkan bahwa setelah penggilingan selama 8 jam, partikel-partikel campuran serbuk akan mengalami penghancuran akibat benturan bola-bola giling. Sedangkan setelah penggilingan selama 32 jam, partikel-partikel campuran serbuk akan mengalami penggumpalan akibat terlalu kecilnya ukuran partikel-partikel campuran serbuk untuk dihancurkan dan tidak rata permukaan bola-bola giling dan wadah penggilingan akibat ikut terlapisi oleh partikel-partikel campuran serbuk secara tidak merata sehingga benturan yang diberikan oleh bola-bola giling akan membuat partikel-partikel campuran serbuk tersebut menggumpal. Berikut ini adalah hasil uji SEM serbuk Fe-50at.%Al dengan perbesaran 500 kali.



Gambar 4.2. Evolusi serbuk Fe-50at.%Al setelah penggilingan selama 8 jam (kiri) dan 32 jam (kanan)

4.1.2. Serbuk Fe-50at.%Al-1at.%Cr

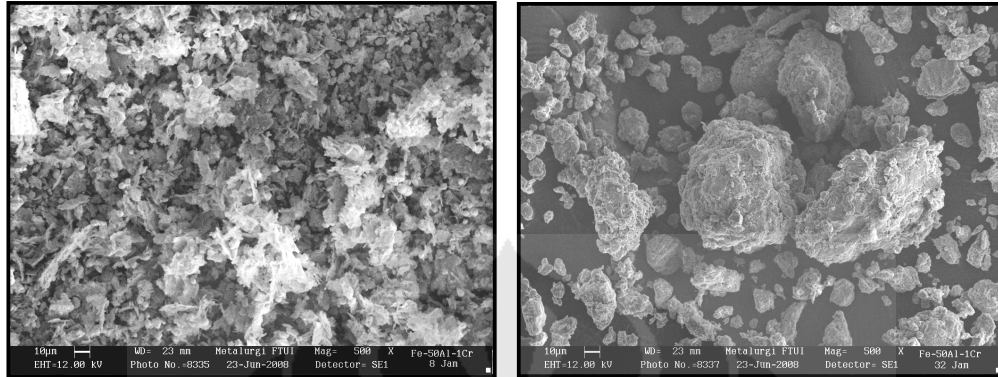


Gambar 4.3. Hasil Uji XRD serbuk Fe-50at.%Al-1at.%Cr

Tidak jauh berbeda dengan hasil uji XRD serbuk Fe-50at.%Al sebelumnya, berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa secara keseluruhan puncak-puncak grafik pola difraksi hasil uji XRD terhadap penggilangan serbuk Fe-50at.%Al-1at.%Cr selama 32 jam semakin melebar dan menurun, namun tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa laju penghancuran serbuk menurun, sedangkan laju pengelasan dingin meningkat. Namun, berdasarkan gambar di atas, diketahui pula bahwa selama proses penggilangan bola tersebut tidak terjadi pembentukan senyawa intermetalik Fe-Al. Hal ini mungkin disebabkan karena waktu penggilangan yang belum maksimal.

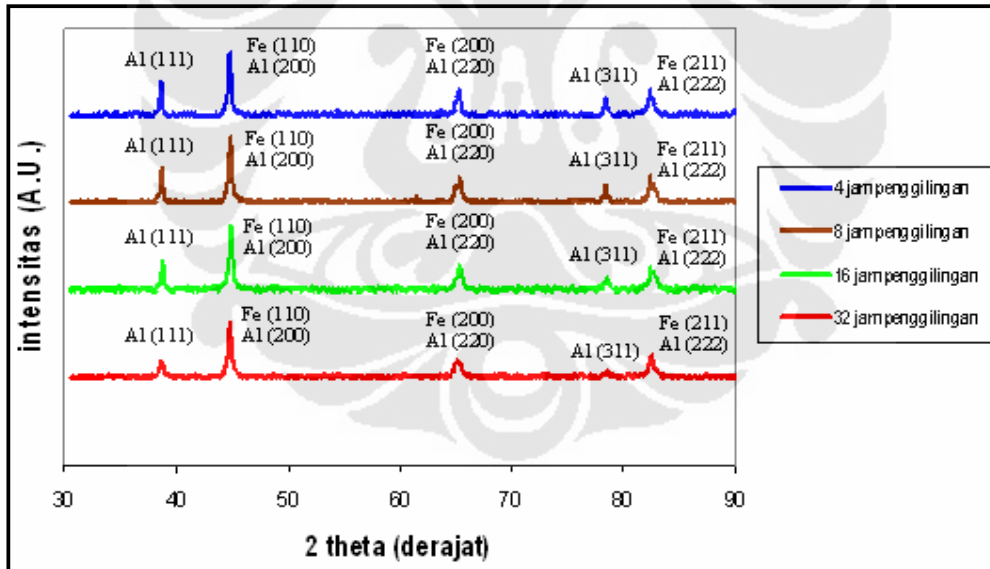
Pengamatan terhadap morfologi campuran serbuk dengan menggunakan SEM menunjukkan bahwa setelah penggilangan selama 8 jam, partikel-partikel campuran serbuk akan mengalami penghancuran akibat benturan bola-bola giling. Sedangkan setelah penggilangan selama 32 jam, partikel-partikel campuran serbuk akan mengalami penggumpalan akibat terlalu kecilnya ukuran partikel-partikel campuran serbuk untuk dihancurkan dan tidak rata permukaan bola-bola giling dan wadah penggilangan akibat ikut terlapisi oleh partikel-partikel campuran serbuk secara tidak merata sehingga benturan yang diberikan oleh bola-bola giling

akan membuat partikel-partikel campuran serbuk tersebut menggumpal. Berikut ini adalah hasil uji SEM serbuk Fe-50at.%Al-1at.%Cr dengan perbesaran 500 kali.



Gambar 4.4. Evolusi serbuk Fe-50at.%Al-1at.%Cr setelah penggilingan selama 8 jam (kiri) dan 32 jam (kanan)

4.1.3. Serbuk Fe-50at.%Al-3at.%Cr

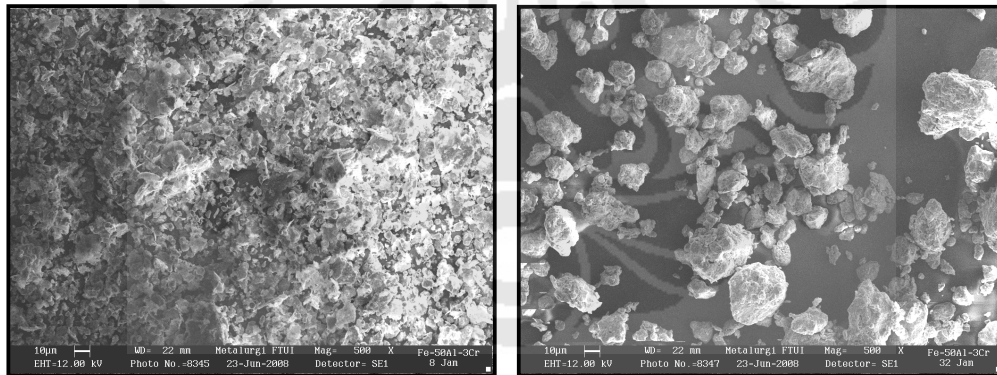


Gambar 4.5. Hasil Uji XRD serbuk Fe-50at.%Al-3at.%Cr

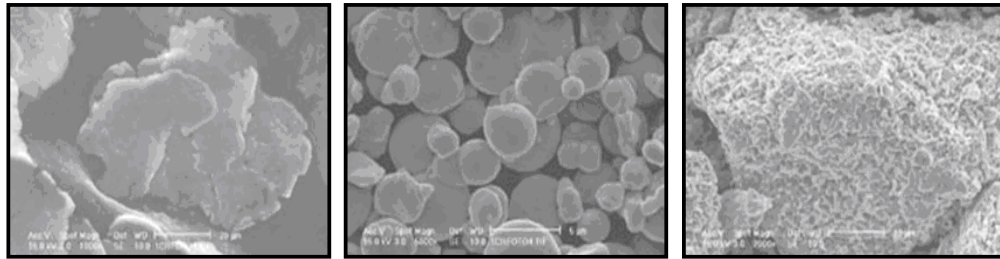
Tidak jauh berbeda dengan hasil uji XRD serbuk Fe-50at.%Al dan Fe-50at.%Al-1at.%Cr sebelumnya, berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa secara keseluruhan puncak-puncak grafik pola difraksi hasil uji XRD terhadap penggilingan serbuk Fe-50at.%Al-3at.%Cr selama 32 jam semakin

melebar dan menurun, namun tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa laju penghancuran serbuk menurun, sedangkan laju pengelasan dingin meningkat. Namun, berdasarkan gambar di atas, diketahui pula bahwa selama proses penggilingan bola tersebut tidak terjadi pembentukan senyawa intermetalik Fe-Al. Hal ini mungkin disebabkan karena waktu penggilingan yang belum maksimal.

Pengamatan terhadap morfologi campuran serbuk dengan menggunakan SEM menunjukkan bahwa setelah penggilingan selama 8 jam, partikel-partikel campuran serbuk akan mengalami penghancuran akibat benturan bola-bola giling. Sedangkan setelah penggilingan selama 32 jam, partikel-partikel campuran serbuk akan mengalami penggumpalan akibat terlalu kecilnya ukuran partikel-partikel campuran serbuk untuk dihancurkan dan tidak rata permukaannya bola-bola giling dan wadah penggilingan akibat ikut terlapisi oleh partikel-partikel campuran serbuk secara tidak merata sehingga benturan yang diberikan oleh bola-bola giling akan membuat partikel-partikel campuran serbuk tersebut menggumpal. Berikut ini adalah hasil uji SEM serbuk Fe-50at.%Al-3at.%Cr dengan perbesaran 500 kali.



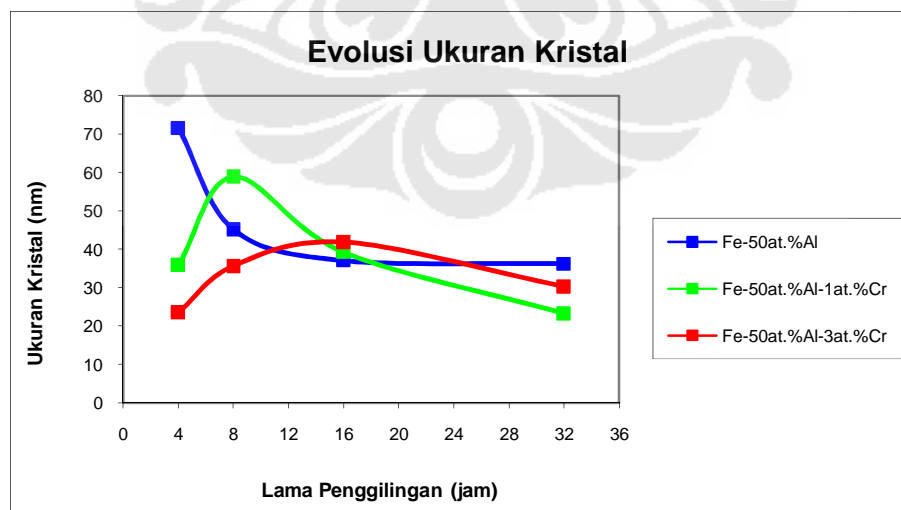
Gambar 4.6. Evolusi serbuk Fe-50at.%Al-3at.%Cr setelah penggilingan selama 8 jam (kiri) dan 32 jam (kanan)



Gambar 4.7. Hasil uji SEM terhadap serbuk awal
(kiri ke kanan: aluminium, besi dan kromium)

Jika dibandingkan dengan hasil uji SEM terhadap serbuk awal di atas, maka dapat terlihat bahwa proses pemaduan telah terjadi. Hal ini tampak dari tidak terdeteksinya partikel-partikel masing-masing komponen campuran serbuk.

Untuk membuktikan bahwa laju penghancuran lebih kecil daripada laju pengelasan dingin, maka dilakukan perhitungan terhadap ukuran kristal. Berdasarkan hasil penghitungan ukuran kristalnya, ternyata ukuran kristal rata-rata dari serbuk Fe-50at.%Al, Fe-50at.%Al-1at.%Cr dan Fe-50at.%Al-3at.%Cr yang didapat telah mencapai skala nanometer, namun memang tidak terjadi perubahan ukuran kristal secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa laju penghancuran menurun, sedangkan laju pengelasan dingin meningkat Berikut ini adalah gambar hasil penghitungan ukuran kristal serbuk-serbuk tersebut.



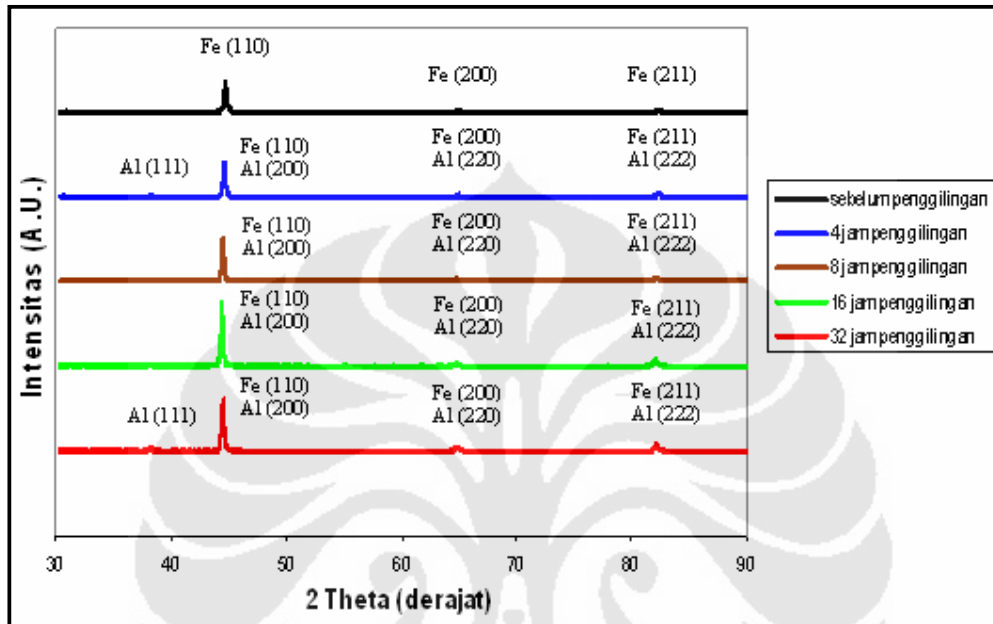
Gambar 4.8. Perbandingan ukuran kristal serbuk rata-rata

Berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa pada komposisi Fe-50at.%Al, semakin lama waktu penggilingan, maka ukuran kristalitnya akan cenderung menurun. Pada komposisi Fe-50at.%Al-1at.%Cr, dapat diketahui bahwa semakin lama waktu penggilingan, maka ukuran kristalitnya juga cenderung menurun. Sedangkan pada komposisi Fe-50at.%Al-3at.%Cr, semakin lama waktu penggilingan, maka ukuran kristalitnya cenderung mengalami sedikit kenaikan. Penjelasan mengenai masalah pengaruh kadar unsur kromium tersebut terhadap ukuran kristal dapat dijelaskan dengan menggunakan prinsip pembentukan larutan padat berikut.

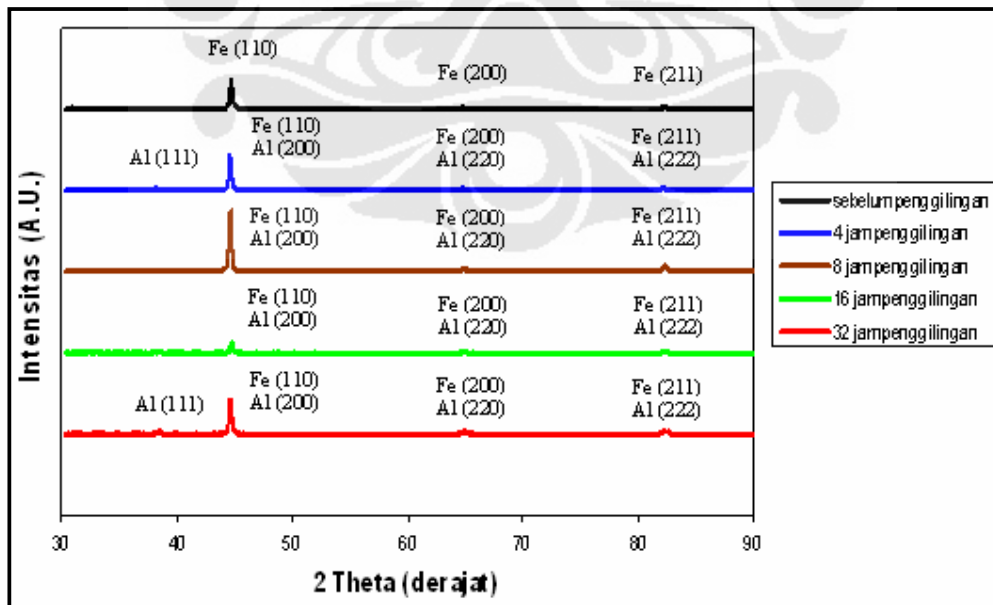
Ketika proses penggilingan bola-bola giling berlangsung, atom-atom besi, aluminium dan kromium akan saling berdifusi satu dengan lainnya sehingga membentuk suatu larutan padat pada daerah permukaan partikel-partikel campuran serbuk. Akibat yang ditimbulkan dari fenomena ini adalah meningkatnya tegangan di dalam struktur kisi kristal serbuk matriksnya. Karena ukuran jari-jari atom kromium lebih besar dibandingkan dengan ukuran jari-jari atom aluminium, maka tegangan yang ditimbulkan di dalam struktur kisi kristal matriks serbuk akibat masuknya atom-atom kromium lebih besar dibandingkan dengan tegangan yang ditimbulkan di dalam struktur kisi kristal matriks serbuk akibat masuknya atom-atom aluminium [24]. Akibatnya, matriks serbuk yang memiliki atom kromium akan bersifat lebih getas dibandingkan dengan matriks serbuk yang hanya memiliki atom aluminium. Dengan semakin besarnya kadar unsur kromium di dalam matriks serbuk, maka semakin getas pula sifat mekaniknya. Akibatnya matriks serbuk tersebut akan lebih mudah untuk dihancurkan oleh benturan bola-bola giling sehingga dihasilkan serbuk yang memiliki ukuran kristal sangat kecil. Namun, sayangnya ketika ukuran kristalit telah mencapai skala nanometer, maka penggumpalan serbuk yang terjadi akan membuat susunan kristalit dari serbuk satu dengan yang lain tampak sejajar sehingga seolah-olah terjadi pertumbuhan kristal dan mengakibatkan perhitungan ukuran kristalit juga ikut mengalami kenaikan.

4.2. KARAKTERISTIK LAPISAN

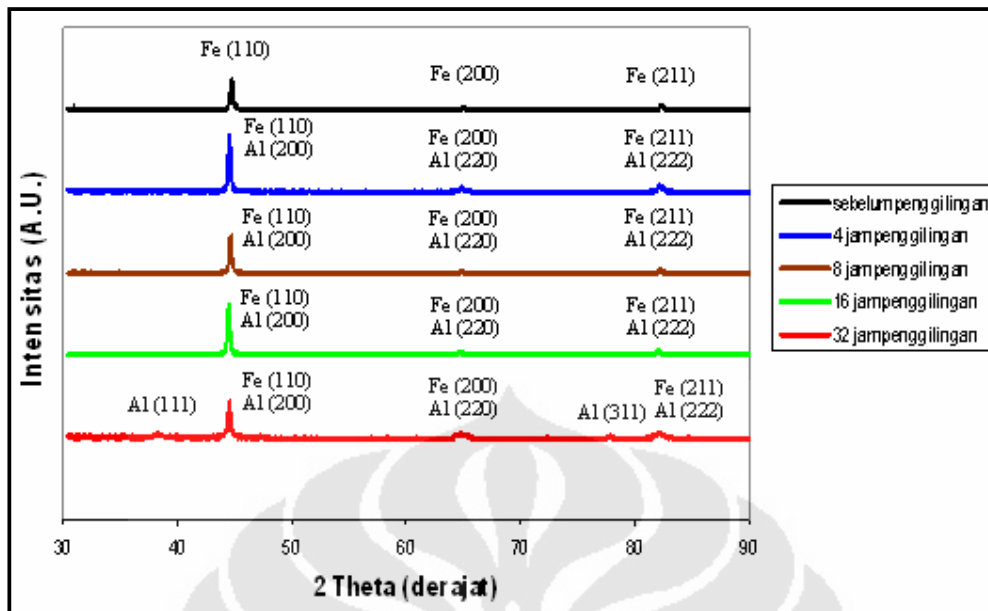
Hasil pengujian XRD terhadap lapisan Fe-50at.%Al, Fe-50at.%Al-1at.%Cr dan Fe-50at.%Al-3at.%Cr pada permukaan *substrate* tampak pada gambar berikut.



Gambar 4.8. Hasil Uji XRD *substrate* Fe-50at.%Al



Gambar 4.9. Hasil Uji XRD *substrate* Fe-50at.%Al-1at.%Cr



Gambar 4.10. Hasil Uji XRD *substrate* Fe-50at.%Al-3at.%Cr

Jika dibandingkan antara data pengujian XRD *substrate* Fe-50at.%Al, Fe-50at.%Al-1at.%Cr dengan Fe-50at.%Al-3at.%Cr di atas, maka terlihat bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Berdasarkan hasil pengujian di atas, tampak bahwa sebelum penggilingan dilakukan, *substrate* hanya terdiri dari unsur besi. Hal ini jelas 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 *substrate* 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 penyelisipan unsur karbon tersebut di dalam matriks logam besi, maka secara otomatis akan timbul cacat-cacat di dalam kisi-kisi struktur kristal matriks logam besi yang mengakibatkan terjadinya pelebaran puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi akibat terjadi perubahan jarak antarbidang atomnya.

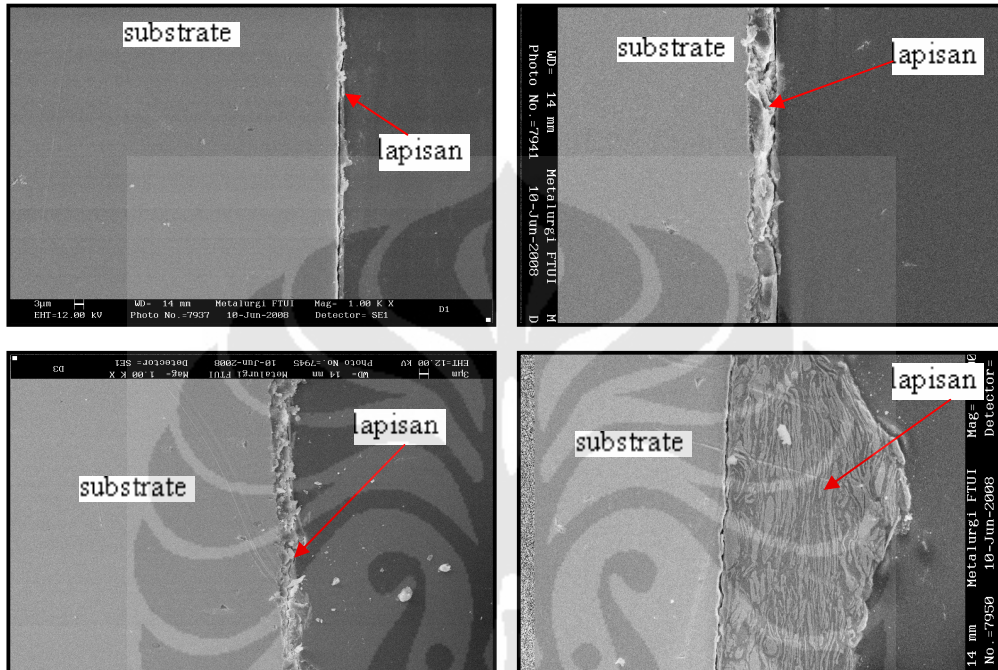
Kemudian setelah penggilingan selama 4 jam, tampak bahwa puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium mulai hadir pada nilai 2 theta yang berhimpitan dengan puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal

logam besi. Hal ini ditandai dengan meningkatnya intensitas puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi oleh bidang (110), (200) dan (211) akibat berhimpitan dengan intensitas puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang (200), (220) dan (222). Munculnya puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium tersebut membuktikan bahwa proses pelapisan *substrate* telah terjadi, namun masih dalam ketebalan yang sangat rendah yang terlihat dari nilai intensitas puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium yang sangat rendah.

Setelah penggilingan selama 8 jam dan 16 jam, terlihat bahwa puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang kristal (111) menghilang. Ada dua kemungkinan terjadinya fenomena tersebut. Pertama, lapisan serbuk yang terbentuk terlalu tipis sehingga puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium pada bidang tersebut 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 (110), (200) dan atau (211). Peningkatan puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal tersebut disebabkan karena bertumpuknya puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi dan aluminium. Puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi oleh bidang atom (110) bertumpuk dengan puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang (200), puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi oleh bidang atom (200) bertumpuk dengan puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang (220), sedangkan puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam besi oleh bidang (211) bertumpuk dengan puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang (222).

Setelah penggilingan selama 32 jam, terlihat bahwa kehadiran puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium semakin jelas, yaitu dengan munculnya puncak-puncak grafik hasil difraksi kisi kristal logam aluminium oleh bidang-bidang (111) dan atau (311) dan terjadinya peningkatan intensitas rata-rata seluruh puncak grafik hasil difraksi dibandingkan dengan

intensitas rata-rata seluruh puncak grafik hasil difraksi sebelumnya. Hal ini juga menunjukkan bahwa lapisan pada permukaan *substrate* semakin tebal. Pernyataan tersebut diperkuat oleh data hasil pengujian SEM terhadap lapisan permukaan *substrate* dengan perbesaran 1000 kali terlihat pada gambar berikut.

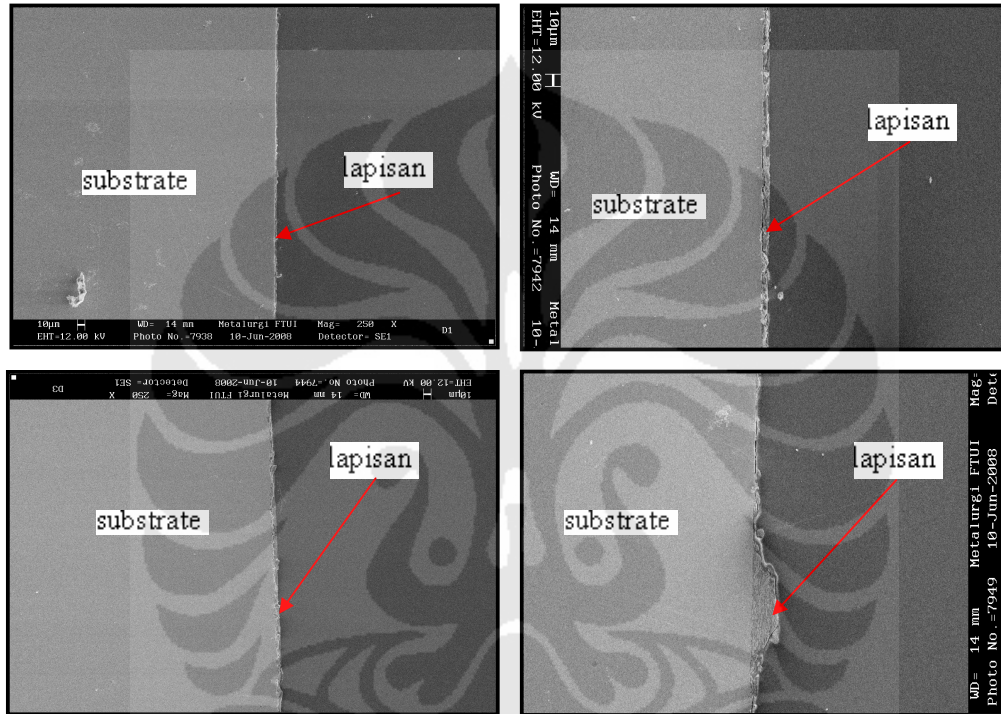


Gambar 4.11. Hasil pengujian SEM *substrate* Fe-50at.%Al setelah penggilingan selama 4 jam (kiri atas), 8 jam (kanan atas), 16 jam (kiri bawah) dan 32 jam (kanan bawah)

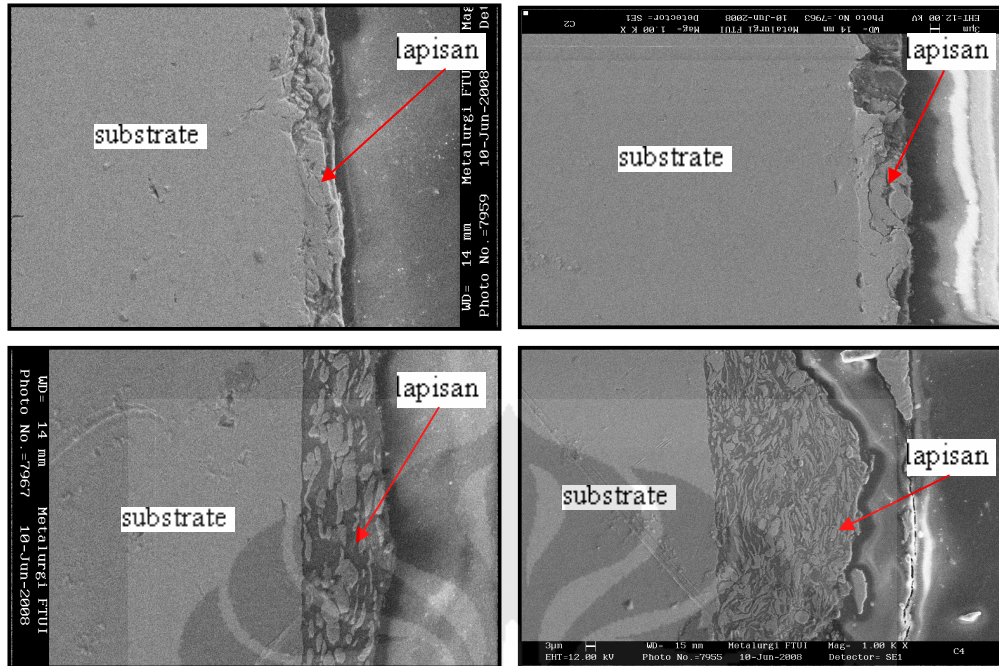
Pada lapisan Fe-50at.%Al, setelah penggilingan selama 4 jam, terlihat bahwa ketebalan lapisan yang terbentuk masih sangat rendah. Lalu, setelah penggilingan selama 8 jam dan 16 jam, tampak bahwa ketebalan lapisan semakin tinggi, namun ukuran serbuk yang menempel pada permukaan *substrate* masih sangat besar. Setelah penggilingan selama 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.

Untuk melihat distribusi lapisan pada permukaan *substrate*, dilakukan pengamatan lapisan dengan menggunakan SEM dengan perbesaran yang lebih

rendah, yaitu 250 kali. Jika dilihat dari distribusi lapisannya, maka dapat disimpulkan bahwa setelah penggilingan selama 16 jam, distribusi lapisan sangat tipis dan merata. Setelah penggilingan selama 32 jam, distribusi lapisan tetap merata, namun terjadi penebalan di titik-titik tertentu. Secara keseluruhan, permukaan substrate terlapisi seluruhnya, namun dengan ketebalan yang berbeda. Berikut ini adalah gambar hasil uji SEM dengan perbesaran 250 kali.



Gambar 4.12. Distribusi lapisan Fe-50at.%Al setelah penggilingan selama 4 jam (kiri atas), 8 jam (kanan atas), 16 jam (kiri bawah) dan 32 jam (kanan bawah)

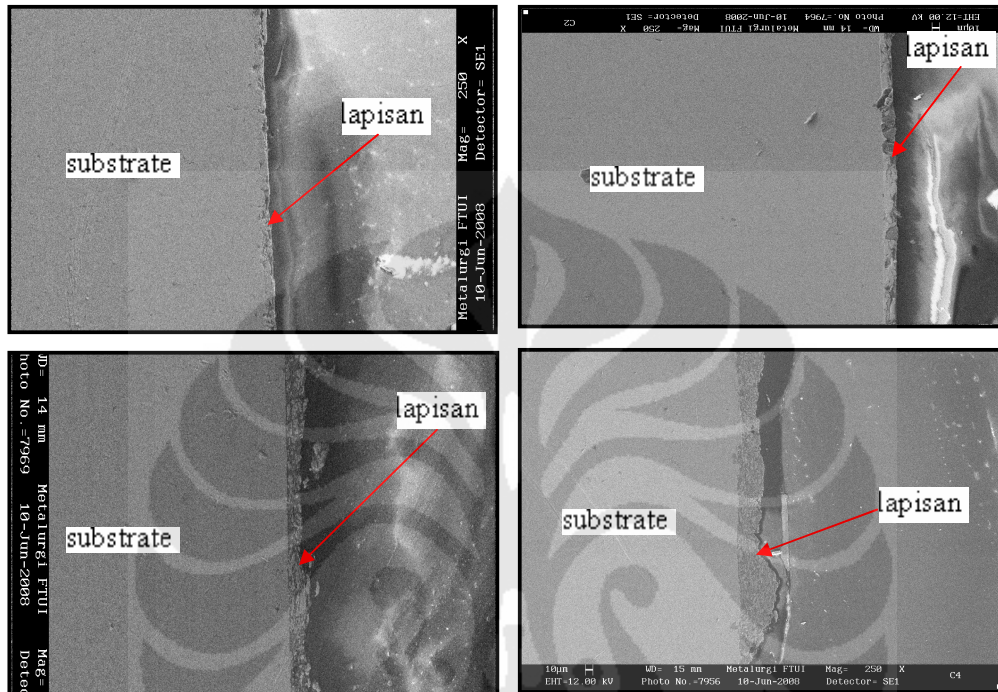


Gambar 4.13. Hasil pengujian SEM *substrate* Fe-50at.%Al-1at.%Cr setelah penggilingan selama 4 jam (kiri atas), 8 jam (kanan atas), 16 jam (kiri bawah) dan 32 jam (kanan bawah)

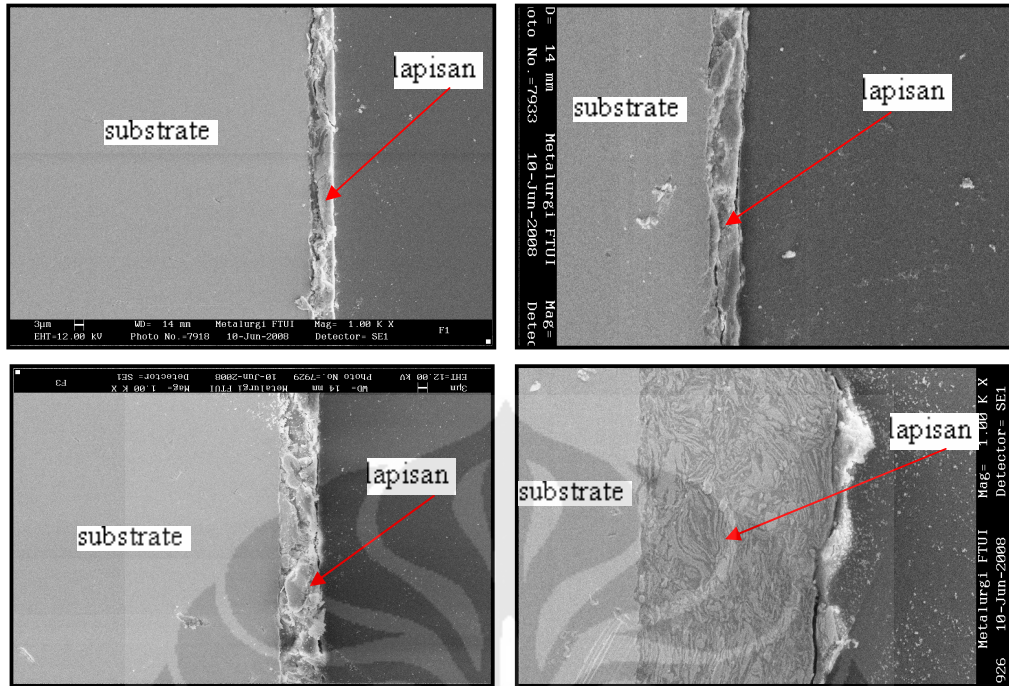
Pada lapisan Fe-50at.%Al-1at.%Cr di atas, setelah penggilingan selama 4 jam, terlihat bahwa ketebalan lapisan yang terbentuk sudah cukup tebal. Lalu, setelah penggilingan selama 8 jam, tampak bahwa ketebalan lapisan semakin tinggi, namun ukuran serbuk yang menempel pada permukaan *substrate* masih sangat besar. Setelah penggilingan selama 16 jam dan 32 jam, terlihat adanya proses pengelasan dingin dan penghancuran partikel-partikel campuran 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.

Jika dilihat dari distribusi lapisannya, maka dapat disimpulkan bahwa setelah penggilingan selama 4 jam, distribusi lapisan sangat tipis dan merata. Setelah penggilingan selama 8 jam, distribusi lapisan tetap merata, namun terjadi peningkatan ketebalan. Setelah penggilingan selama 16 jam, distribusi lapisan tetap merata dan tampak terjadinya proses penghancuran lapisan oleh benturan bola-bola giling berenergi tinggi, dan setelah penggilingan selama 32 jam, distribusi lapisan kembali tersusun dengan merata dengan ketebalan lapisan yang

tinggi. Secara keseluruhan, permukaan substrate terlapisi seluruhnya, tetapi dengan ketebalan yang tidak merata. Berikut ini adalah gambar hasil uji SEM dengan perbesaran yang lebih rendah, yaitu 250 kali, untuk melihat distribusi lapisan pada permukaan *substrate*.



Gambar 4.14. Distribusi lapisan Fe-50at.%Al-1at.%Cr setelah penggilingan selama 4 jam (kiri atas), 8 jam (kanan atas), 16 jam (kiri bawah) dan 32 jam (kanan bawah)

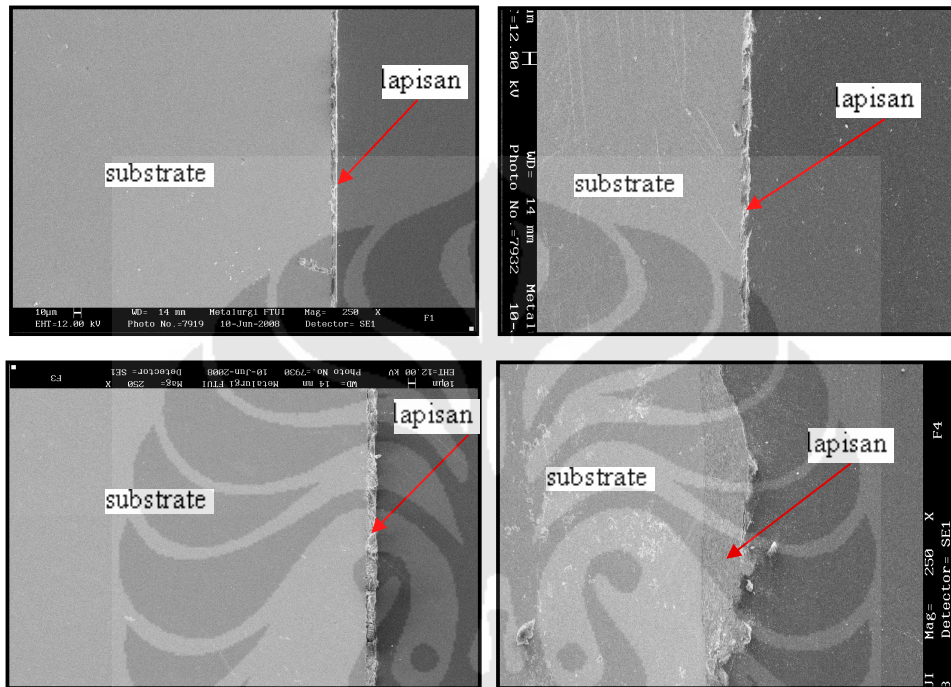


Gambar 4.15. Hasil pengujian SEM *substrate* Fe-50at.%Al-3at.%Cr setelah penggilingan selama 4 jam (kiri atas), 8 jam (kanan atas), 16 jam (kiri bawah) dan 32 jam (kanan bawah)

Pada lapisan Fe-50at.%Al-3at.%Cr di atas, setelah penggilingan selama 4 jam, terlihat bahwa ketebalan lapisan yang terbentuk sudah cukup tebal. Lalu, setelah penggilingan selama 8 jam, tidak tampak perubahan yang signifikan. Setelah penggilingan selama 16 jam, tampak ketebalan lapisan semakin tinggi, namun ukuran serbuk yang menempel pada permukaan *substrate* masih sangat besar, dan setelah penggilingan selama 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 yang membuat struktur *laminar* lapisannya berbentuk serpihan pipih tipis. Hasil pengujian XRD dan SEM di atas membuktikan bahwa semakin lama waktu penggilingan, maka ketebalan lapisan yang dihasilkan juga semakin tinggi.

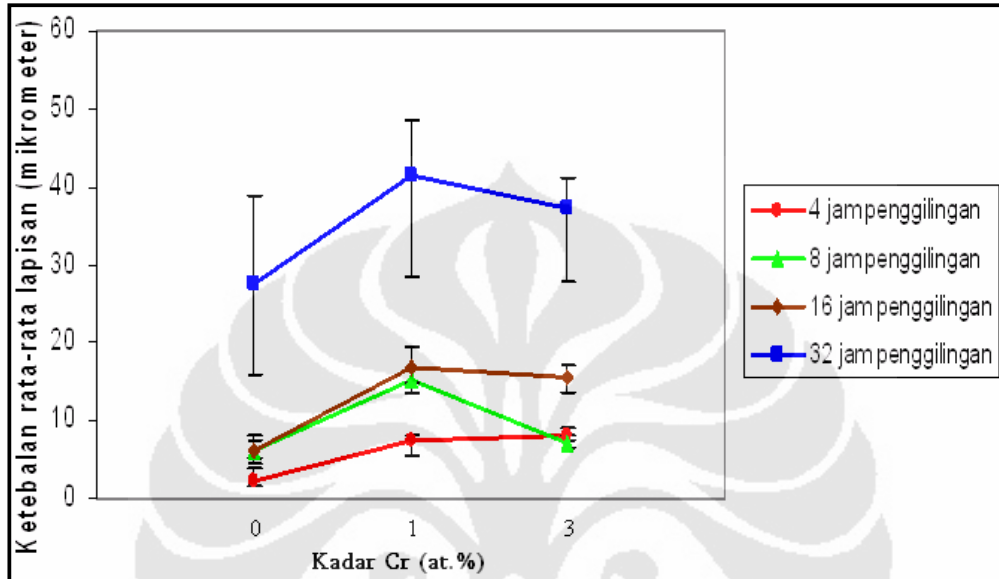
Jika dilihat dari distribusi lapisannya, maka dapat disimpulkan bahwa setelah penggilingan selama 16 jam, distribusi lapisan sangat merata dengan peningkatan ketebalan lapisan dari proses penggilingan selama 4 jam, 8 jam dan 16 jam. Namun, setelah penggilingan selama 32 jam, distribusi lapisan tetap

merata dengan terjadinya penebalan di titik-titik tertentu. Secara keseluruhan, permukaan *substrate* terlapisi seluruhnya, tetapi dengan ketebalan yang tidak merata. Berikut ini adalah gambar hasil uji SEM dengan perbesaran yang lebih rendah, yaitu 250 kali, untuk melihat distribusi lapisan pada permukaan *substrate*.



Gambar 4.16. Distribusi lapisan Fe-50at.%Al-3at.%Cr setelah penggilingan selama 4 jam (kiri atas), 8 jam (kanan atas), 16 jam (kiri bawah) dan 32 jam (kanan bawah)

Berikut ini merupakan perbandingan ketebalan lapisan pada permukaan *substrate* hasil percobaan. Pada gambar tersebut tampak bahwa penambahan kromium cenderung meningkatkan ketebalan lapisan yang terbentuk pada permukaan *substrate*.



Gambar 4.17. Pengaruh Cr terhadap ketebalan lapisan *substrate*

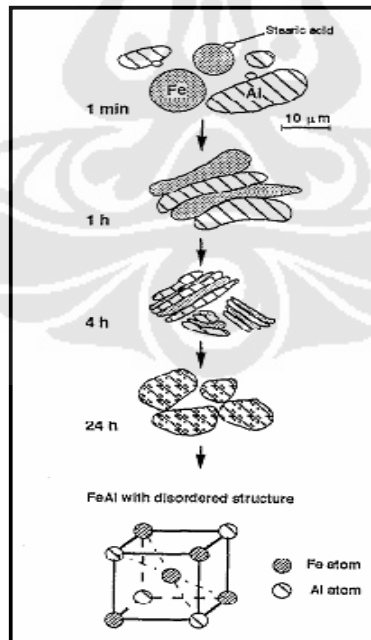
Proses pelapisan permukaan *substrate* dapat terjadi diperkirakan karena material serbuk yang digunakan sebagai pelapis lebih ulet dibandingkan dengan material *substrate* itu sendiri. Hal inilah yang memungkinkan terjadinya proses penempelan serbuk pada permukaan *substrate* melalui mekanisme pengelasan dingin. Jika diteliti dari jenis material serbuknya, yaitu serbuk besi (kadar Fe > 99%) dan serbuk aluminium (kadar Al > 90%), maka serbuk aluminium akan bertindak sebagai pemicu terjadinya proses pengelasan dingin terhadap serbuk besi maupun terhadap *substrate*-nya. Hal ini disebabkan karena serbuk aluminium lebih mudah terdeformasi dibandingkan dengan serbuk besi.

Dilihat dari struktur kristalnya, serbuk aluminium yang berstruktur kristal FCC memiliki sistem *slip* dengan bidang *slip* (111) dan arah *slip* [110], sedangkan serbuk besi yang berstruktur kristal BCC memiliki sistem *slip* dengan bidang *slip* (110), (211) dan (321) dan arah *slip* [111]. Memang, serbuk besi memiliki lebih banyak bidang *slip* dibandingkan dengan serbuk aluminium. Namun, semua

bidang *slip* serbuk besi tersebut bergerak pada satu arah *slip* saja, yaitu arah *slip* (111). Ketika suatu beban impact yang berasal dari benturan bola-bola giling diaplikasikan pada serbuk besi, maka ketiga bidang *slip* tersebut akan bergerak secara bersamaan. Akibatnya ketiga bidang *slip* tersebut akan saling menghambat satu sama lainnya sehingga deformasi sulit terjadi. Sedangkan pada serbuk aluminium, deformasi lebih mudah terjadi karena bidang *slip*-nya lebih mudah bergerak [24].

Jika dibandingkan dengan material *substrate*-nya, serbuk besi akan bersifat lebih ulet. Hal ini disebabkan karena material yang digunakan sebagai *substrate*, baja karbon AISI 1045, merupakan paduan besi dengan karbon di mana unsur karbon yang terlarut di dalam atom-atom unsur besi akan mengakibatkan terhambatnya pergerakan dislokasi dan meningkatkan tegangan di dalam struktur kristalnya sehingga keuletannya menurun [16].

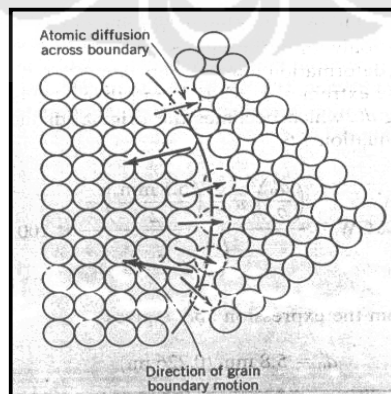
Proses pelapisan *substrate* oleh campuran serbuk besi dan aluminium yang merupakan suatu proses pemaduan mekanik antara serbuk ulet dengan serbuk ulet tampak pada gambar berikut.



Gambar 4.18. Mekanisme pemaduan mekanik [25]

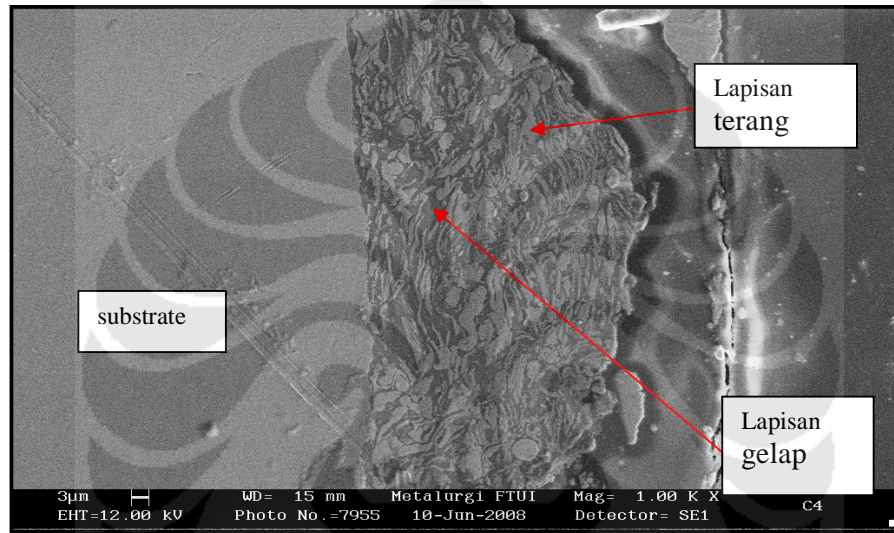
Pada tahap awal proses pemaduan mekanik, partikel-partikel serbuk ulet akan mengalami proses pemipihan akibat proses tempa berskala mikro oleh tumbukan bola-bola giling. Selanjutnya, partikel-partikel pipih tersebut akan saling bergabung membentuk suatu struktur *lamellar* dengan ukuran partikel yang lebih besar dari partikel-partikel pipih sebelumnya akibat proses pengelasan dingin yang dilakukan oleh bola-bola giling. Seiring dengan tumbukan-tumbukan bola-bola giling yang terus menimpa partikel-partikel berstruktur *lamellar* tersebut, maka akan terjadi proses pengerasan regangan sehingga partikel-partikel berstruktur *lamellar* akan menjadi getas dan akhirnya hancur. Proses ini berlangsung terus-menerus hingga tercapai kesetimbangan antara laju penghancuran dengan laju pengelasan dingin sehingga proses pemaduan mekanik dapat terjadi [13].

Namun, berdasarkan ketiga hasil uji XRD di atas, tidak tampak terbentuknya suatu senyawa intermetalik Fe-Al dari hasil penggilingan selama 32 jam. Diperkirakan bahwa lapisan yang terbentuk pada permukaan *substrate* hanya merupakan suatu larutan padat antara besi dan aluminium. Terbentuknya larutan padat tersebut dimulai dari daerah permukaan partikel-partikel serbuk besi maupun aluminium melalui proses difusi atom-atom pada daerah-daerah cacat *vacancy* dan atau batas butir yang terbentuk saat proses pengelasan dingin dan penghancuran yang terjadi secara berulang akibat benturan bola-bola giling sehingga distribusi larutan padat tersebut tidak homogen.

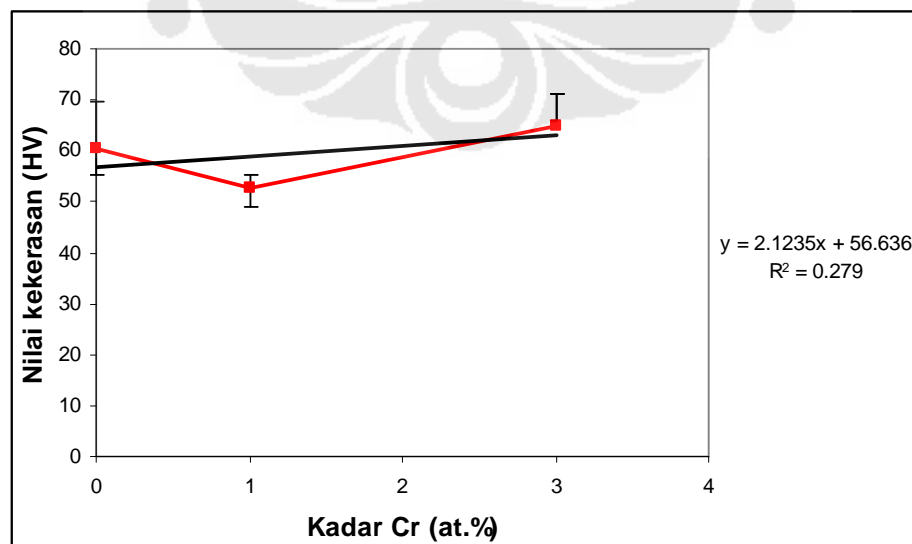


Gambar 4.19. Mekanisme difusi pada batas butir [16]

Pada gambar berikut tampak bahwa pada lapisan *substrate* terdapat dua jenis lapisan, yaitu lapisan terang dan lapisan gelap. Berdasarkan hasil uji EDX, komposisi utama dari lapisan terang adalah unsur besi, sedangkan sisanya adalah unsur aluminium. Sebaliknya, komposisi utama dari lapisan gelap adalah unsur aluminium, sedangkan sisanya adalah unsur besi. Jadi, dapat disimpulkan bahwa lapisan terang terbentuk dari partikel serbuk besi, sedangkan lapisan gelap terbentuk dari partikel serbuk aluminium. Selain itu, komposisi tersebut juga membuktikan bahwa proses pembentukan larutan padat telah terjadi.



Gambar 4.20. Lapisan terang dan gelap pada permukaan *substrate*



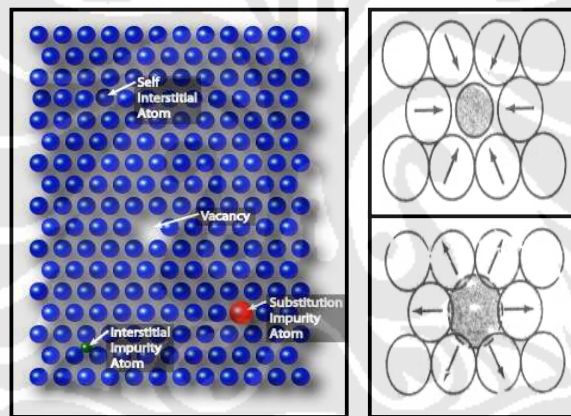
Gambar 4.21. Pengaruh Cr terhadap nilai kekerasan rata-rata lapisan

Berdasarkan gambar di atas, menurut persamaan garis kuadrat terkecilnya diketahui bahwa dengan penambahan Cr, nilai rata-rata kekerasan lapisan yang terbentuk pada permukaan *substrate* oleh campuran serbuk Fe-50at.%Al akan cenderung meningkat.

Terdapat tiga faktor utama yang menyebabkan terjadinya peningkatan nilai kekerasan lapisan tersebut. Pertama, peningkatan nilai kekerasan dapat terjadi akibat adanya proses pengerasan regangan. Proses pengerasan regangan merupakan suatu fenomena di mana logam yang bersifat ulet berubah menjadi lebih kuat dan keras karena terjadinya deformasi plastik akibat proses pengerjaan mekanik pada temperatur ruang. Fenomena pengerasan regangan pada kasus di atas dapat dijelaskan melalui mekanisme interaksi antara cacat-cacat dislokasi dalam struktur kristal suatu logam. Ketika bola-bola giling berenergi tinggi menumbuk partikel-partikel serbuk besi dan aluminium, maka kerapatan cacat-cacat dislokasi di dalam partikel serbuk akan meningkat akibat terbentuknya cacat-cacat dislokasi yang baru. Konsekuensinya, jarak antara cacat dislokasi yang satu dengan yang lain semakin dekat. Ketika cacat-cacat dislokasi yang berjarak dekat tersebut bergerak akibat terjadinya deformasi plastik, maka pada suatu titik temu akan terjadi penghambatan pergerakan cacat dislokasi yang satu dengan cacat dislokasi yang lainnya. Munculnya cacat-cacat dislokasi baru dan terjadinya penghambatan pergerakan cacat-cacat dislokasi tersebut akan menyebabkan peningkatan konsentrasi tegangan di dalam struktur kristal serbuk logam sehingga mengakibatkan peningkatan nilai kekerasannya [16].

Kedua, peningkatan nilai kekerasan dapat terjadi akibat adanya proses penguatan larutan padat. Pada proses ini, atom-atom matriks akan dimasuki oleh atom-atom pengotor. Jika ukuran jari-jari atom pengotor yang masuk lebih besar dari ukuran jari-jari atom matriksnya, maka akan terjadi penggantian posisi atom-atom matriks oleh atom-atom pengotor. Sedangkan jika ukuran jari-jari atom pengotor yang masuk lebih kecil dari ukuran jari-jari atom matriksnya, maka akan terjadi penyelipan atom-atom pengotor di antara atom-atom matriks. Kedua mekanisme tersebut dapat terjadi dalam kasus di atas. Atom-atom aluminium dan kromium yang berukuran lebih kecil dapat masuk ke dalam matriks atom-atom besi melalui proses difusi atom pada daerah cacat-cacat *vacancy* dan atau batas

butir dengan metoda penyelipan atom saat berlangsungnya proses penggilingan bola-bola giling berenergi tinggi. Di sisi lain, atom-atom besi dan kromium yang berukuran lebih besar juga dapat masuk ke dalam matriks atom-atom besi melalui proses difusi atom pada daerah cacat-cacat *vacancy* dan atau batas butir dengan metoda penggantian posisi atom saat berlangsungnya proses penggilingan bola-bola giling berenergi tinggi. Akibat dari masuknya atom-atom pengotor tersebut adalah timbulnya tegangan di dalam kisi kristal logam matriksnya yang arahnya ke dalam (untuk mekanisme penyelipan atom) ataupun keluar (untuk mekanisme penggantian posisi) kisi kristal logam matriks yang menyebabkan kekuatan dan kekerasannya meningkat. Selain itu, kehadiran atom-atom pengotor di dalam kisi kristal atom-atom matriks tersebut akan bertindak sebagai penghambat pergerakan cacat dislokasi [16].



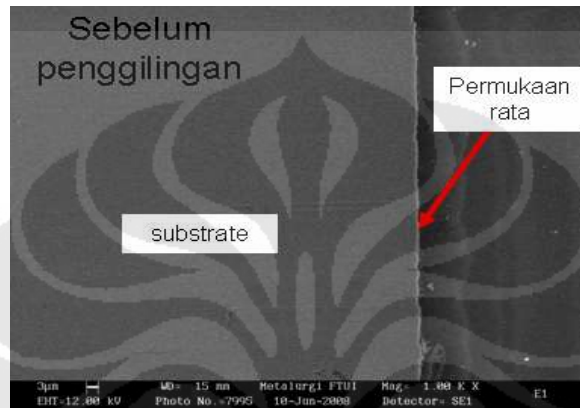
Gambar 4.22. Penyelipan dan penggantian posisi atom serta arah tegangan [26, 16]

Ketiga, peningkatan nilai kekerasan dapat terjadi akibat proses penghalusan butir. Semakin kecil ukuran butir kristal, maka jumlah batas butir akan semakin banyak. Pada kasus di atas, proses penggilingan serbuk oleh bola-bola giling berenergi tinggi akan menyebabkan hancurnya partikel-partikel serbuk menjadi ukuran yang lebih kecil dari ukuran sebelumnya. Akibat dari proses penghancuran serbuk tersebut adalah semakin kecilnya ukuran butir sehingga jumlah batas butirnya semakin banyak. Dengan semakin banyaknya jumlah batas butir, maka pergerakan cacat dislokasi di dalam suatu butir akan dihambat oleh batas butirnya akibat arah bidang-bidang kristal yang berbeda antara butir yang

satu dengan yang lain sehingga deformasi plastik sulit terjadi dan kekuatan dan kekerasan lapisan semakin meningkat [16].

4.3. MEKANISME PELAPISAN

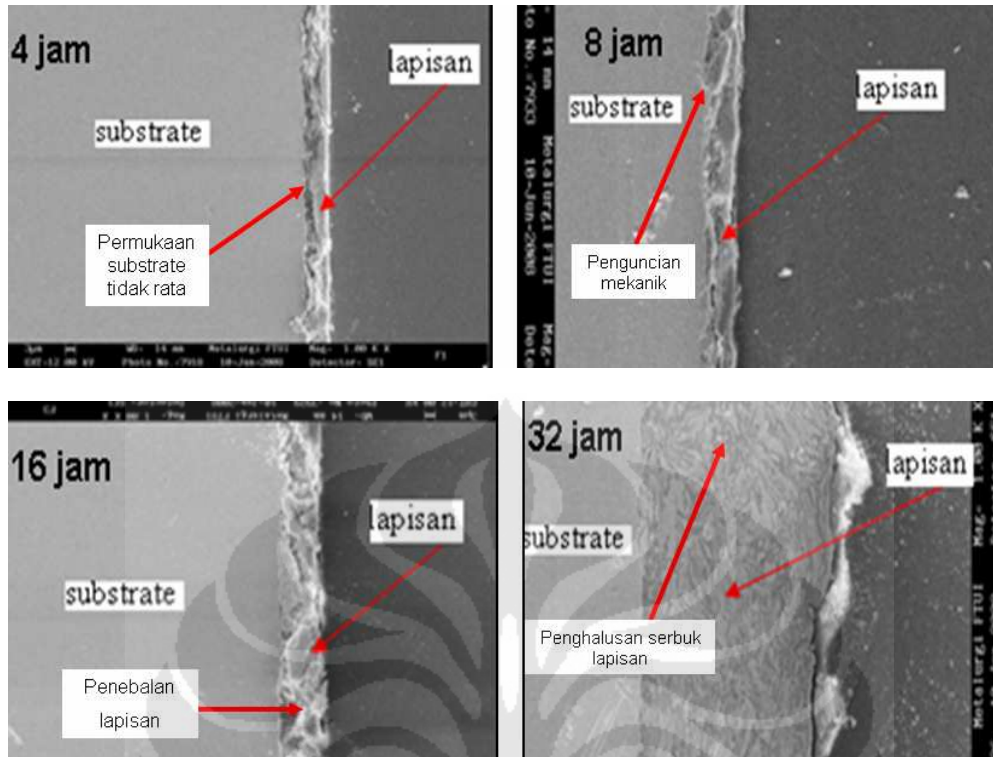
Sebelum proses pepaduan mekanik dilakukan, *substrate* diampas terlebih dahulu dengan menggunakan ampas dari grit 200# hingga grit 1000# sehingga permukaannya tampak halus seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.23. Permukaan *substrate* sebelum penggilingan

Namun, setelah penggilingan 4 jam tampak bahwa permukaan *substrate* sudah tidak halus seperti semula akibat deformasi olah benturan bola-bola giling. Akibat yang ditimbulkan oleh ketidakrataan permukaan *substrate* ini adalah masuknya partikel-partikel serbuk ke dalam celah-celah permukaan *substrate*. Dengan bantuan benturan bola-bola giling, maka terjadilah penguncian secara mekanik antara partikel-partikel serbuk dengan permukaan *substrate*.

Setelah penggilingan 8 jam dan 16 jam, terjadi penebalan lapisan. Namun, ukuran partikel-partikel serbuk yang menempel masih berukuran besar dan kasar. Setelah penggilingan 32 jam, terjadi penghalusan partikel-partikel serbuk akibat benturan bola-bola giling. Berikut adalah ilustrasi mekanisme pelapisan permukaan *substrate*.



Gambar 4.24. Mekanisme pelapisan *substrate*