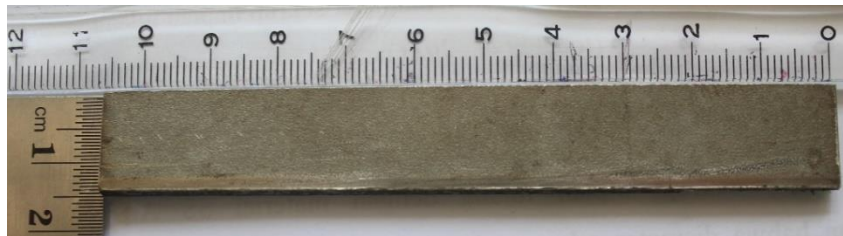


## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

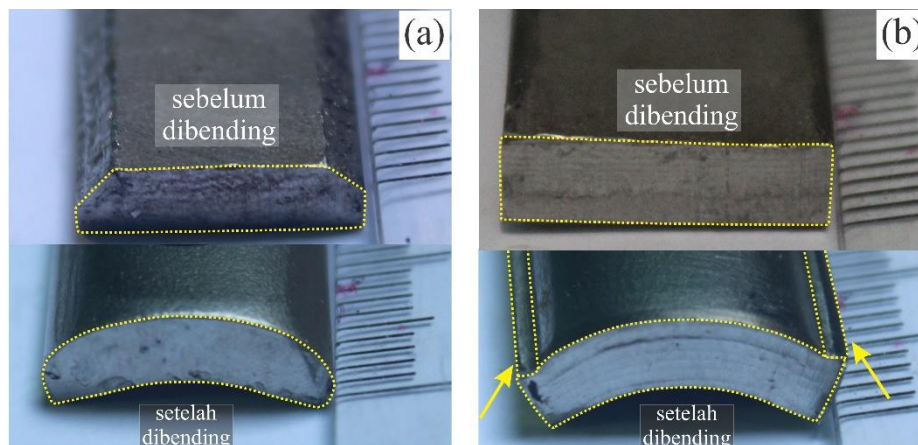
### 4.1 *Preparation* Spesimen DCP SS AISI 316L

Spesimen *dynamic compression plate* (DCP) disiapkan dari lembaran pelat *stainless steel* AISI 316L (SS AISI 316L) dan dipotong dengan dimensi 105 mm × 14 mm × 4 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dimensi tersebut didesain sesuai dengan kontur tulang lengan atas (*humerus*) dan lengan bawah (*radius* dan *ulna*) (Saputra, 2016).



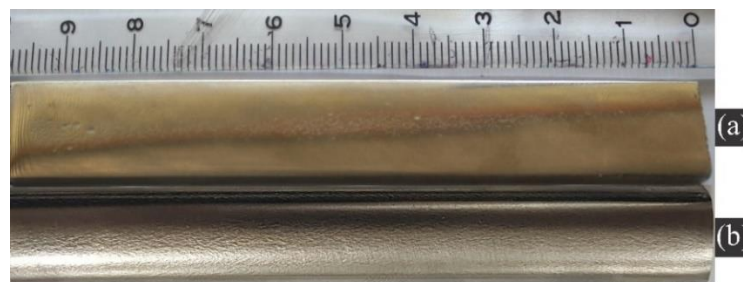
Gambar 4.1 Pelat spesimen SS AISI 316L

Spesimen selanjutnya *dichamfer* pada kedua sisi tajam memanjang spesimen dengan sudut *chamfer* 45° dan kedalaman pemotongan 2 mm (2×45°), seperti pada Gambar 4.2 (a). Tujuan melakukan *chamfer* kedua sisi tajam memanjang spesimen untuk menghindari sisa sudut atau sisa sisi yang tidak diinginkan setelah dilakukan pembendungan atau pelengkungan spesimen, seperti yang ditunjukkan anak panah berwarna kuning pada Gambar 4.2 (b).



Gambar 4.2 Pelat spesimen SS AISI 316L yang telah, (a) *dichamper*, (b) tidak *dichamper*.

Semua spesimen yang telah *dichamfer* lalu diampelas permukaannya (Gambar 4.3 (a)) dengan tujuan mendapatkan kondisi awal permukaan yang sama pada semua spesimen yang akan diuji dan untuk mendapatkan permukaan dengan kekasaran seragam. Spesimen yang telah diampelas permukaannya selanjutnya ditebuk atau dilakukan pembendingan dengan cetakan *jig & dies* menggunakan mesin *universal testing machine* (UTM). Pembendingan spesimen ini bertujuan untuk membentuk spesimen yang awalnya pelat lurus menjadi pelat berbentuk DCP, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 (b).



Gambar 4.3 Pelat spesimen SS AISI 316L yang telah, (a) diampelas permukaannya, (b) dilakukan pembendingan atau dibentuk menjadi pelat DCP.

Spesimen yang sudah berbentuk DCP kemudian diberi perlakuan *shot peening* dengan tiga parameter berbeda-beda pada semua spesimen DCP. Tiga parameter yang digunakan tersebut adalah variasi waktu atau durasi perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit. Hasil perlakuan *shot peening* pada spesimen DCP dengan variasi waktu perlakuan 8, 10 dan 12 menit ditunjukkan pada Gambar 4.4.



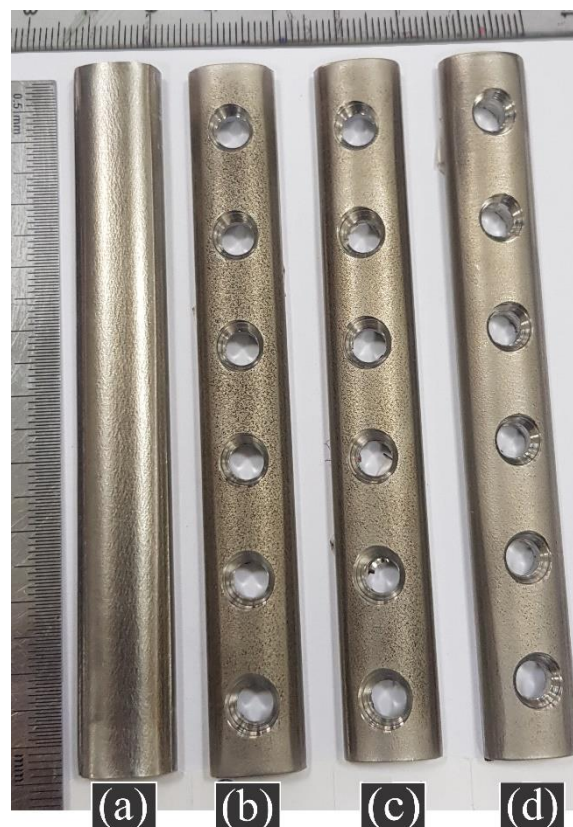
Gambar 4.4 Spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening*

Setelah perlakuan *shot peening* selesai, kemudian dilakukan proses *drilling* atau pembuatan lubang pada spesimen DCP dengan tujuan sebagai lubang untuk

sekrup implan (Gambar 4.5). Pada Gambar 4.5 (b)-(d) memperlihatkan hasil lubang yang memiliki sisi bekas *drilling* yang masih tajam dan perlakuan *shot peening* tidak terlihat mempengaruhi perubahan ukuran dari lubang.

#### 4.2 Spesimen DCP SS AISI 316L *Shot Peening & Drilling*

Spesimen DCP yang telah *dishot peening* dengan waktu perlakuan 8, 10 dan 12 menit memiliki pengaruh terhadap permukaan spesimen DCP yang berbeda-beda, seperti yang terlihat jelas pada permukaan masing-masing spesimen (Gambar 4.5 (b-d) yang memperlihatkan perbedaan hasil setiap variasi waktu perlakuan *shot peening*.



Gambar 4.5 (a) Permukaan spesimen DCP tanpa perlakuan (*raw material*), permukaan spesimen DCP yang *dishot peening* kemudian *drilling*, (b) durasi perlakuan *shot peening* 8 menit, (c) durasi perlakuan *shot peening* 10 menit, (d) durasi perlakuan *shot peening* 12 menit

Spesimen DCP *raw material* (Gambar 4.5 (a)) menunjukkan permukaan yang halus, terang dan ada sedikit goresan bekas proses pengampelasan, selain itu terlihat ada sedikit kerutan dipermukaannya atau sisi luar spesimen DCP. Kerutan

ini dipengaruhi oleh tegangan tarik pada di sisi luar spesimen DCP dan deformasi plastis yang terjadi di sisi luar spesimen DCP pada saat proses pembendingan sehingga menyebabkan sisi luar spesimen DCP mengalami tarikan dan menimbulkan kerutan sedangkan bagian sisi dalam spesimen DCP mengalami tegangan tekan. Spesimen DCP *raw material* ini merupakan kondisi awal spesimen yang digunakan sebagai referensi untuk dibandingkan dengan dengan spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening*.

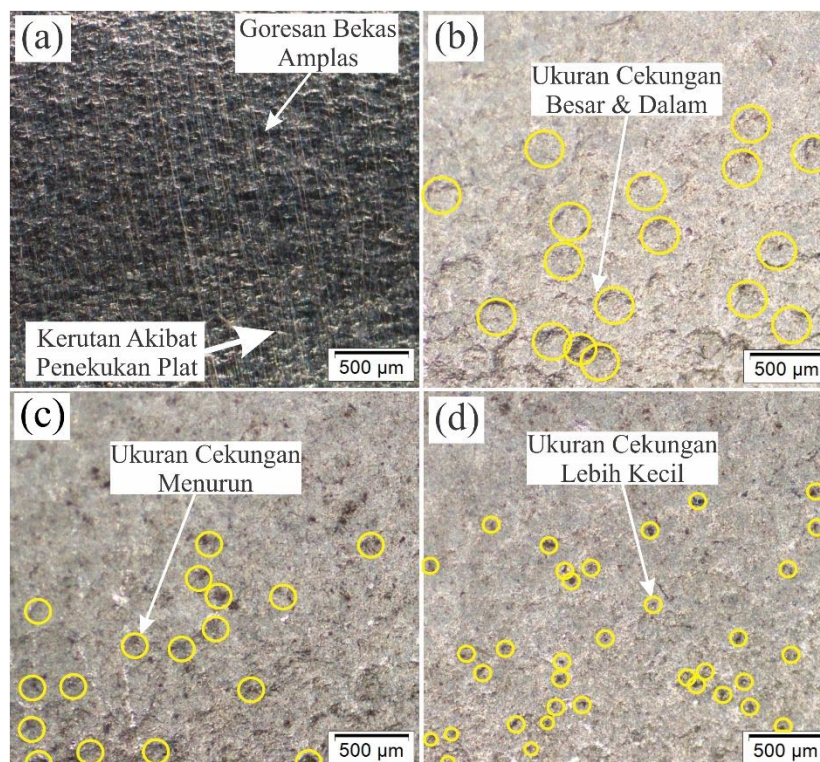
Gambar 4.5 (b)-(d) menunjukkan permukaan spesimen DCP yang telah diberi perlakuan *shot peening*. Gambar 4.5 (b) menunjukkan permukaan spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 8 menit yang memperlihatkan permukaan yang kasar dan terlihat tidak rata yang ditandai dengan ukuran cekungan yang besar dan dalam. Hal ini dikarenakan waktu perlakuan *shot peening* yang singkat (8 menit) sehingga tumbukan *steel ball* ke permukaan juga hanya sebentar dan menghasilkan cekungan yang dalam, tidak beraturan dan tidak rata selain itu, dengan tumbukan *steel ball* ke permukaan spesimen yang singkat tidak mampu meratakan cekungan.

Permukaan spesimen pada Gambar 4.5 (c) memperlihatkan permukaan lebih rata dan ukuran cekungan terlihat menurun. Hal ini dikarenakan permukaan spesimen DCP pada Gambar 4.5 (c) di *shot peening* dengan waktu yang lebih lama (10 menit) sehingga tumbukkan *steel ball* ke permukaan spesimen DCP lebih lama dan dapat meratakan cekungan pada waktu perlakuan *shot peening* sebelumnya. Gambar 4.5 (d) merupakan spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 12 menit. Permukaan pada Gambar 4.5 (d) memperlihatkan permukaan yang semakin halus dan rata dari perlakuan sebelumnya. Berdasarkan penjelasan diatas, lamanya waktu perlakuan *shot peening* terhadap permukaan spesimen dapat mempengaruhi morfologi permukaan dan kekasaran permukaan. Semakin lama waktu perlakuan *shot peening* akan membuat permukaan spesimen DCP menjadi lebih halus dan rata. Dengan waktu perlakuan *shot peening* yang lebih lama, tumbukkan *steel ball* ke permukaan juga semakin intensif dan semakin parah sehingga cekungan atau puncak yang belum tertumbuk dan belum rata sebelumnya mampu diratakan kembali dengan tumbukkan *steel ball* yang lebih lama.

### 4.3 Pengamatan Struktur Makro

Pengamatan struktur makro dalam penelitian ini dilakukan pada bagian dari spesimen DCP yang berbeda-beda. Bagian yang diamati dari spesimen DCP yang berbeda-beda tersebut adalah bagian permukaan spesimen DCP, bagian lubang sekrup spesimen DCP, dan bagian penampang melintang lubang sekrup serta penampang memanjang atau membujur lubang sekrup dari spesimen DCP.

Hasil pengamatan struktur makro pada permukaan spesimen DCP tanpa *dishot peening* dan permukaan spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit ditunjukkan pada Gambar 4.6 (a)-(d).



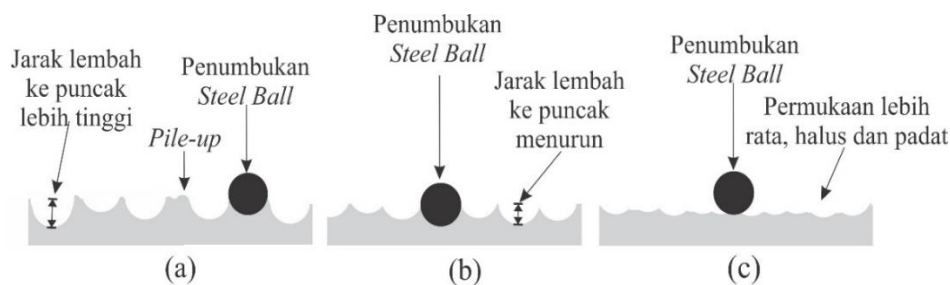
Gambar 4.6 (a) Foto makro permukaan spesimen DCP tanpa perlakuan (*raw material*), foto makro permukaan spesimen DCP yang diberi perlakuan *shot peening* dengan variasi waktu perlakuan, (b) 8 menit, (c) 10 menit, (d) 12 menit

Perubahan morfologi atau profil permukaan terjadi antara spesimen DCP tanpa *dishot peening* dengan spesimen DCP yang *dishot peening* (Gambar 4.6 (a)-(d)). Spesimen DCP tanpa *dishot peening* pada Gambar 4.6 (a) memperlihatkan permukaan yang halus dan memiliki area yang terang dengan goresan dari perlakuan pengampelasan serta terlihat ada kerutan akibat tegangan tarik dari proses pembendingan atau penekukan spesimen, seperti yang dijelaskan

sebelumnya. Spesimen DCP yang *dishot peening* memperlihatkan perubahan morfologi atau profil permukaan yang ditandai dengan adanya indentasi atau cekungan-cekungan akibat permukaan mengalami deformasi butir hasil tumbukan *steel ball* pada permukaan spesimen DCP. Cekungan pada permukaan spesimen inilah yang menyebabkan kekasaran pada permukaan (Saputra, 2016). Banyaknya cekungan dan ukuran cekungan pada permukaan spesimen DCP dipengaruhi oleh waktu perlakuan saat proses *shot peening*. Pada Gambar 4.6 (c) dan (d) juga terdapat *spots* gelap berwarna hitam didalam cekungan yang merupakan hasil kotoran dan debu akibat gesekan atau tumbukan baik antara *steel ball* dengan spesimen maupun *steel ball* dengan *steel ball* yang berlanjut dengan waktu yang cukup lama.

Waktu perlakuan *shot peening* 8 menit (Gambar 4.6 (b)) memperlihatkan ukuran cekungan yang besar dan dalam, adanya tumpukan (*pile up*) di tepi cekungan yang terlihat tinggi, sedikitnya jumlah cekungan persatuan luas, terlihat tingginya jarak puncak ke lembah dan terlihat bekas indentasi atau cekungan yang tidak merata diseluruh permukaan. Morfologi permukaan tersebut menurut Azar *et al* (2010) dan Arifvianto *et al* (2011) dapat menyebabkan permukaan menjadi lebih kasar. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil uji kekasaran permukaan (Tabel 4.1) yang menunjukkan permukaan dengan perlakuan 8 menit memiliki nilai kekasaran permukaan lebih kasar jika dibandingkan dengan waktu perlakuan *shot peening* 10 menit dan 12 menit.

Menurut Arifvianto *et al* (2011) pada awal perlakuan permukaan, bekas indentasi atau cekungan yang tidak merata diseluruh permukaan dikarenakan seluruh permukaan belum dipengaruhi oleh perlakuan permukaan dan hanya sebagian permukaan. Pada awal perlakuan permukaan menghasilkan cekungan baru dan tumpukan (*pile up*) yang mengakibatkan tinggi puncak ke lembah meningkat akibatnya kekasaran permukaan menjadi meningkat, untuk memperjelas fenomena yang terjadi pada permukaan spesimen DCP yang telah *dishot peening* 8 menit dapat dilihat ilustrasi permukaan spesimen DCP pada Gambar 4.7 (a).



Gambar 4.7 Ilustrasi permukaan spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening* dengan waktu perlakuan, (a) 8 menit, (b) 10 menit, (c) 12 menit (Modifikasi Saputra, 2016)

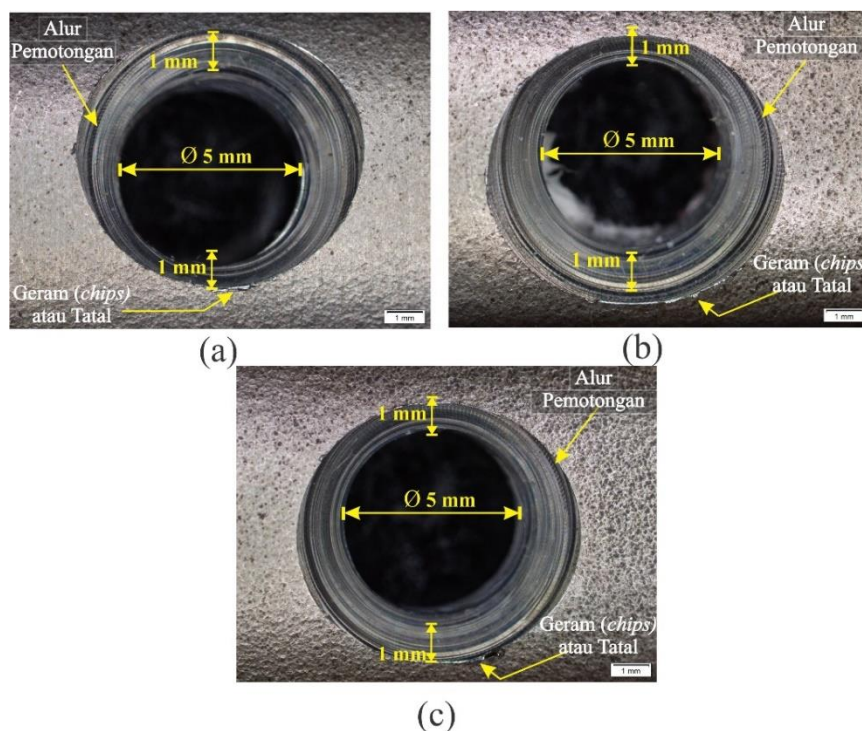
Gambar 4.6 (c)-(d) merupakan hasil foto makro permukaan spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 10 menit dan 12 menit yang menunjukkan perubahan ukuran cekungan yang cenderung menjadi rata, jumlah cekungan persatuan luas meningkat atau ukuran cekungan menurun. Jika dibanding dengan waktu *shot peening* 8 menit maka permukaan dengan waktu *shot peening* 10 dan 12 menit memiliki permukaan lebih halus sehingga nilai kekasaran permukaan semakin menurun seiring lamanya perlakuan (Tabel 4.1). Hal ini dikarenakan waktu penembakan *steel ball* atau perlakuan *shot peening* yang lebih lama dari perlakuan sebelumnya menyebabkan terjadinya penumbukan kembali atau berulang pada tumpukan (*pile up*) atau puncak cekungan yang awalnya tinggi atau lebih kasar sehingga tinggi puncak ke lembah menurun dan seluruh puncak cekungan semakin rata, seperti terlihat pada ilustrasi permukaan spesimen DCP yang *dishot peening* selama 10 dan 12 menit pada Gambar 4.7 (b)-(c). Hal yang sama diungkapkan oleh Arifvianto *et al* (2012), bahwa tinggi puncak ke lembah permukaan semakin menurun sebagai puncak deformasi akibat dampak dari tumbukan berulang dengan durasi perlakuan yang lebih lama.

Permukaan spesimen DCP yang *dishot peening* dengan waktu perlakuan 12 menit (Gambar 4.6 (d)) menunjukkan permukaan yang lebih halus dan padat, ukuran cekungan lebih kecil, permukaan lebih rata dan ketidakrataan permukaan menurun daripada perlakuan sebelumnya. Menurut Azar *et al* (2010) pada waktu perlakuan *shot peening* yang lebih lama mengakibatkan intensitas penumbukan *steel ball* pada permukaan spesimen meningkat atau semakin lama sehingga pengikisan tumpukan (*pile up*) atau puncak cekungan di permukaan menjadi semakin rata.

Akibatnya, kekasaran permukaan menurun dan keseragaman (*homogeneity*) permukaan meningkat.

Hasil foto makro permukaan spesimen DCP sebelum diberi perlakuan *shot peening* (*raw material*) dan sesudah diberi perlakuan *shot peening* pada penelitian ini memiliki kesamaan dengan hasil foto makro permukaan spesimen dalam penelitian Saputra (2016). Kesamaan tersebut adalah foto makro permukaan spesimen sebelum diberi perlakuan *shot peening* (*raw material*) menunjukkan lebih halus dengan goresan-goresan bekas pengampelasan dan foto makro permukaan spesimen setelah perlakuan *shot peening* menunjukkan kesamaan dengan permukaan yang lebih kasar yang ditandai dengan terbentuknya cekungan atau indentasi bekas tumbukkan *steel ball* ke permukaan spesimen.

Penjelasan dari hasil beberapa peneliti di atas menyatakan hasil yang selaras dengan hasil penelitian yang dilakukan ini, bahwa dengan meningkatnya waktu perlakuan *shot peening* dapat mengikis dan menurunkan tinggi puncak ke lembah atau puncak cekungan permukaan dan menyebabkan permukaan spesimen menjadi lebih padat dan merata.



Gambar 4.8 Hasil foto makro pada lubang sekrup spesimen DCP sesudah perlakuan *shot peening*, (a) 8 menit, (b) 10 menit, (c) 12 menit.

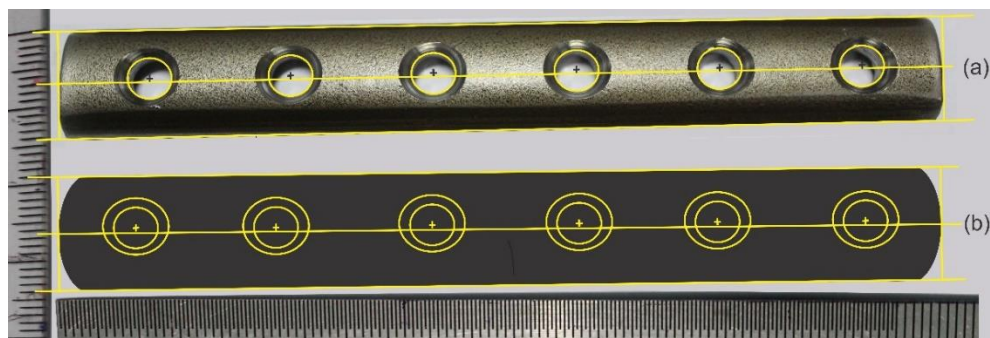


Selanjutnya, pengambilan foto makro permukaan pada bagian lubang sekrup spesimen DCP yang *dishot peening* sebelum *drilling* yang diperlihatkan pada Gambar 4.8 (a)-(c). Pada Gambar 4.8 (a)-(c) memperlihatkan lubang kepala sekrup dengan sisi luar yang tajam serta terlihat alur potong dan sedikit sisa potong pada tepi lubang masuk yang disebut burr, geram (*chip*) atau tatal. Geram (*chips*) atau burr ini adalah hasil bagian yang terbuang yang dihasilkan oleh proses pemotongan bagian material saat proses pembuatan lubang *vershing* (lubang tanam untuk kepala sekrup) menggunakan bor jenis *countersink* (mata bor tanam). Hasil foto makro pada Gambar 4.8 (a)-(c) merupakan hasil dari pemilihan dari beberapa lubang sekrup pada masing-masing variasi waktu perlakuan *shot peening* spesimen DCP. Tiga lubang sekrup DCP pada Gambar 4.8 (a)-(c) dipilih karena memiliki hasil lubang *versing* (lubang *elips*) yang sedikit tidak konsentris atau tidak *center* dengan garis tengah spesimen DCP.

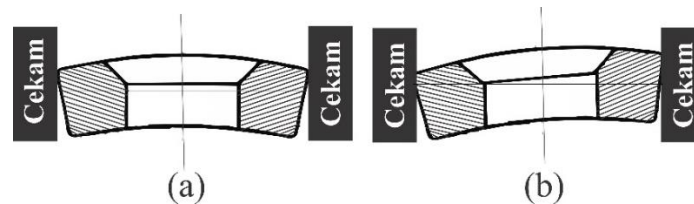
Pada Gambar 4.8 memperlihatkan ketiga hasil lubang *vershing* yang berbentuk tirus pada semua spesimen DCP tidak tepat ditengah (tidak *center*) terhadap lubang sekrup yang berdiameter 5 mm. Seperti yang ditunjukkan ukuran jarak tepi pada Gambar 4.8 (a)-(c), jarak tepi lubang *versing* dengan lubang sekrup yang berdiameter 5 mm memiliki jarak yang tidak sama, pada bagian salah satu jarak tepi menunjukkan jarak tepi yang kurang dari 1 mm dan disalah satu tepi yang lain jaraknya lebih dari 1 mm. Hal ini bisa terjadi karena saat pembuatan titik awal pengeboran menggunakan bor *center* tidak tepat ditengah spesimen atau sedikit bergeser dari garis tengah spesimen sehingga saat spesimen dibor menggunakan *twist drill* dengan diameter 5 mm maka hasil lubang sekrup akan sedikit bergeser dari garis tengah spesimen. Dengan hasil lubang sekrup yang sedikit bergeser dari garis tengah spesimen maka saat dibor menggunakan *countersink bits* (bor pembenam) maka hasil lubang *versing*-pun akan bergeser mengikuti titik awal pengeboran (bor *center*) atau hasil bor *twist drill*, dengan spesimen yang dibor berbentuk lengkung (berbentuk DCP) maka hasil lubang *vershing* yang bergeser dari tengah spesimen akan sangat terlihat tidak tepat ditengah (tidak *center*), seperti yang terlihat pada ilustrasi pergeseran titik tengah lubang pada Gambar 4.9. Walaupun lubang sekrup ( $\varnothing 5$  mm) dan lubang *vershing* memiliki titik tengah atau

titik awal pengeboran yang sama namun jika hasil lubang sekrup dan *vershing* tersebut tidak berada ditengah atau tidak berada digaris tengah spesimen yang berbentuk lengkung maka sangat jelas hasil lubang *versing*-pun akan terlihat bergeser.

Pergeseran titik awal pengeboran terhadap garis tengah spesimen ini disebabkan bergesernya spesimen atau miringnya spesimen ketika proses pengerboran, seperti yang dapat dilihat pada gambar ilustrasi pergeseran spesimen DCP (Gambar 4.10).



Gambar4.9 Skema dari, (a) Pergeseran titik pengeboran spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening* 8 menit, (b) Ilustrasi pergeseran titik pengeboran terhadap garis tengah spesimen.



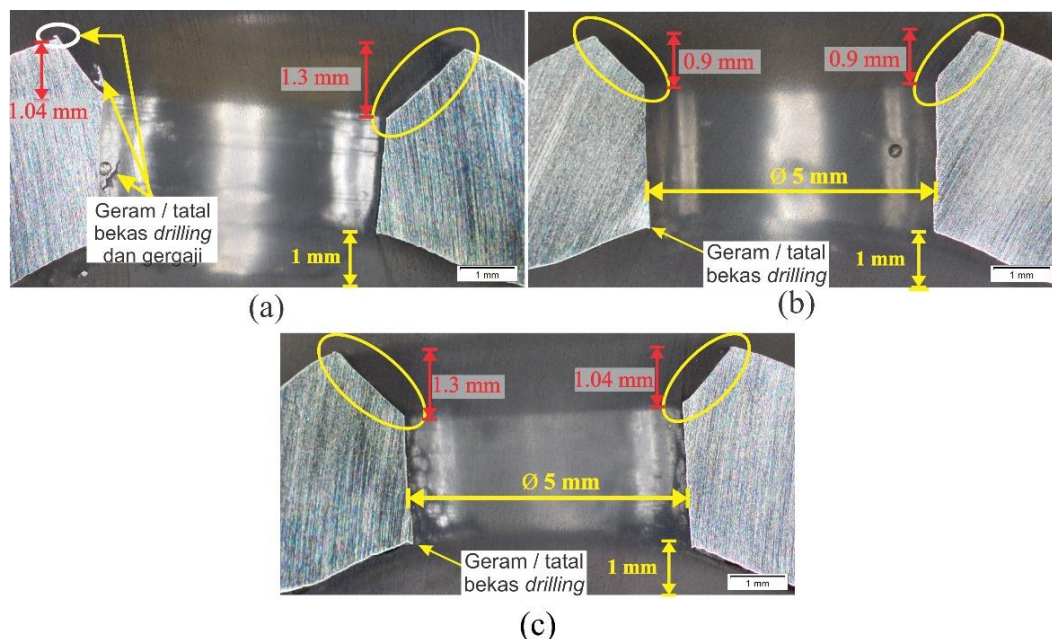
Gambar 4.10 Ilustrasi pergeseran atau kemiringan spesimen DCP ketika proses *drilling*, (a) Posisi pengecaman spesimen DCP belum dikencangkan dan belum dibor, (b) Posisi pengecaman spesimen DCP yang miring atau bergeser ketika dikencangkan dan ketika proses pengeboran.

Pergeseran atau miringnya spesimen ketika dibor ini disebabkan oleh 2 faktor, faktor pertama yaitu karena spesimen berbentuk lengkung mengakibatkan kecilnya bidang dari spesimen yang dapat dicekam oleh ragum. Ketika ragum dikencangkan, spesimen secara perlahan bergeser sampai spesimen berada pada posisi dapat tercekam dengan kuat oleh ragum meskipun keadaan atau posisi spesimen berubah menjadi miring. Faktor pertama ini diperkuat dengan fakta dilapangan saat proses pengeboran spesimen di bengkel BPTTG, spesimen

mengalami kesulitan saat dicekam dan beberapa kali spesimen terlempar keluar dari cekaman ragum ketika dikencangkan.

Faktor kedua adalah dengan bidang cekam dari spesimen yang kecil mengakibatkan tekanan atau gaya tekan dari bor dapat menggeser sedikit posisi spesimen secara perlahan sehingga posisi spesimen menjadi miring dan menyebabkan titik awal pengeboran menjadi tidak berada diposisi garis tengah spesimen (tidak *center*). Faktor kedua ini dibuktikan saat proses pengeboran di bengkel BPPTG, ketika proses pengeboran sedang berlangsung spesimen beberapa kali lepas dari cekaman ragum dan memungkinkan posisi spesimen yang ketika dibor kembali menjadi miring.

Pengamatan foto makro pada penampang melintang lubang sekrup spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a)-(c).



Gambar 4.11 Hasil foto makro penampang melintang lubang sekrup spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening*, (a) 8 menit, (b) 10 menit, (c) 12 menit.

Gambar 4.11 (a)-(c) menunjukkan penampang melintang lubang sekrup spesimen DCP dengan sisi luar dan sisi dalam dari lubang *versing* atau lubang tanam kepala sekrup yang tajam (lancip), seperti yang ditunjukkan pada lingkaran

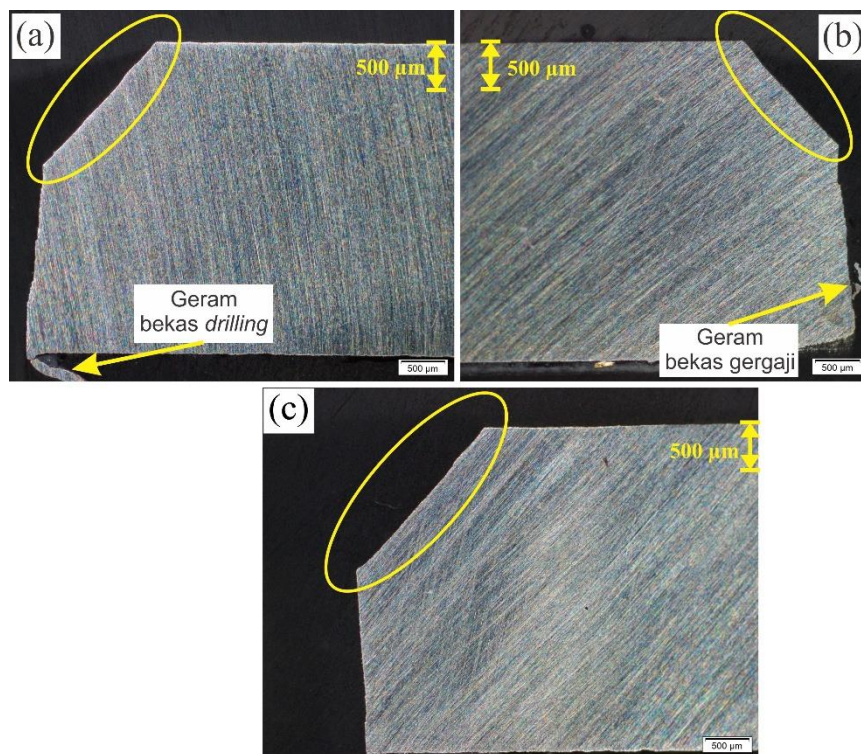
berbentuk oval berwarna kuning. Sisi luar dan sisi dalam dari lubang *versing* yang tajam ini dikarenakan proses *drilling* dan proses pembuatan lubang *versing* yang menggunakan mata bor *countersink* dilakukan setelah proses *shot peening*. Setelah proses *drilling* dan proses pembuatan lubang *versing* selesai, spesimen DCP tidak menerima perlakuan lagi sehingga sisi luar dan sisi dalam lubang *versing* masih utuh atau tajam.

Geram atau tatal yang tertinggal di dalam resin, seperti yang terlihat pada Gambar 4.11 (a)-(c) ini merupakan tatal bekas proses *drilling* dan proses pemotongan spesimen menggunakan gergaji besi (*hack saw*). Pada Gambar 4.11 (a) dan (c) juga memperlihatkan kedalaman tirus dari lubang *versing* yang berbeda-beda yaitu 1.04 mm dan 1.3 mm, seperti yang ditunjukkan pada ukuran kedalaman tirus berwarna merah. Perbedaan kedalaman tirus dari lubang *versing* ini dikarenakan pergeseran titik awal pengeboran terhadap garis tengah spesimen seperti yang dijelaskan sebelumnya. Bergesernya titik awal pengeboran mengakibatkan titik tengah lubang sekrup yang berdiameter 5 mm dan lubang *versing* juga ikut bergeser. Bergesernya lubang *versing* terhadap titik tengah spesimen semakin terlihat jelas karena spesimen berbentuk lengkung (DCP). Berbeda dengan Gambar 4.11 (b) yang menunjukkan kedalaman tirus yang sama yaitu 0.9 mm, hal ini terjadi karena titik awal pengeboran terhadap titik tengah spesimen DCP tepat digaris tengah sehingga lubang *versing* yang dihasilkan juga tepat ditengah spesimen DCP.

Pengamatan struktur makro selanjutnya adalah pada penampang memanjang atau membujur dari samping lubang sekrup spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 (a)-(c).

Dari hasil foto makro penampang memanjang antara dua lubang sekrup spesimen DCP pada Gambar 4.12 (a)-(c) memperlihatkan dengan jelas bagian sisi dalam dan sisi luar dari lubang *versing* atau lubang tanam kepala sekrup yang memiliki sisi yang tajam (*lancip*), seperti yang ditunjukkan lingkaran berbentuk oval berwarna kuning. Penyebab bagian sisi luar dan sisi dalam yang tajam pada lubang *versing* ini telah dijelaskan pada hasil pengamatan foto makro penampang

melintang lubang spesimen DCP sebelumnya. Pada Gambar 4.12 (a) dan (c) juga terlihat ada burr, geram atau tatal yang tertinggal di dalam resin yang merupakan bekas pemotongan spesimen DCP menggunakan gergaji besi (*hack saw*) dan bekas pemotongan dari proses *drilling*.



Gambar 4.12 Hasil foto makro penampang memanjang atau membujur bagian samping antara dua lubang sekrup pada spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening*, (a) 8 menit, (b) 10 menit, (c) 12 menit.

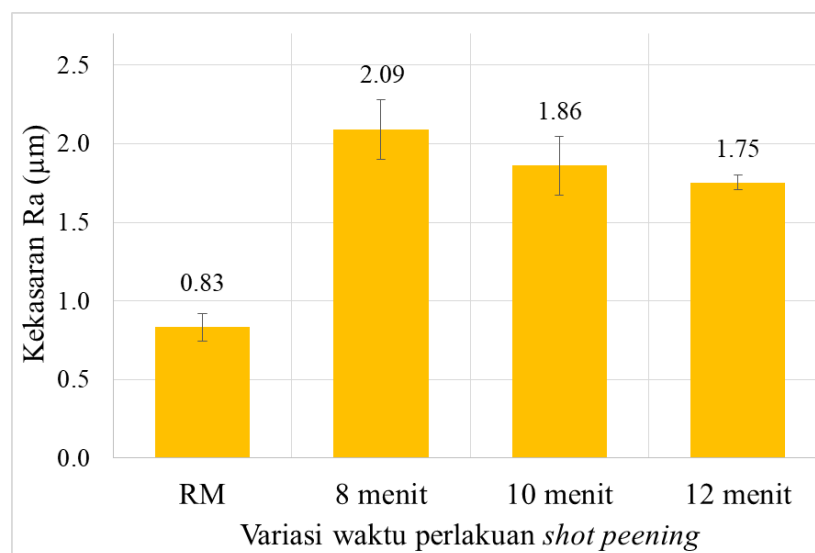
Dapat disimpulkan dari pengamatan foto makro pada lubang sekrup berdiameter 5 mm dan lubang *vershing* (*elips*) menunjukkan morfologi permukaan bagian dalam baik pada Gambar 4.11 (a)-(c) dan Gambar 4.12 (a)-(c) memperlihatkan kontur atau profil permukaan dinding yang tajam (lingkaran berbentuk oval berwarna kuning) dan tidak ada pengaruh signifikan dari perlakuan *shot peening*. Hal ini dikarenakan proses pembuatan lubang atau proses *drilling* dilakukan setelah perlakuan *shot peening* selesai. Hal tersebut diperkuat dengan hasil pengukuran geometri lubang sekrup berdiameter 5 mm dan lubang *vershing* (*elips*) pada Tabel 4.7 hingga Tabel 4.9 yang menunjukkan ukuran atau nilai yang sama pada semua spesimen DCP.

#### 4.4 Pengukuran Kekasaran Permukaan

Pengaruh penumbukan *steel ball* pada proses *shot peening* menciptakan cekungan atau identasi dan menghasilkan kekasaran pada permukaan spesimen DCP. Kekasaran yang dihasilkan pada setiap permukaan spesimen DCP memiliki nilai yang berbeda-beda, tergantung waktu perlakuan *shot peening*. Hasil pengukuran nilai kekasaran pada permukaan spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening* ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.13. Parameter nilai kekasaran permukaan yang digunakan adalah Ra (tinggi rata-rata puncak ke lembah).

Tabel 4.1 Hasil pengujian nilai kekasaran permukaan spesimen DCP SS AISI 316L selama perlakuan *shot peening*

Variasi perlakuan <i>shot peening</i>	Kekasaran Ra ( $\mu\text{m}$ )				SD
	Uji ke-1	Uji ke-2	Uji ke-3	Rata-rata	
RM	0.869	0.898	0.733	0.83	0.09
8 menit	1.898	2.092	2.28	2.09	0.19
10 menit	1.71	2.068	1.8	1.86	0.19
12 menit	1.731	1.806	1.725	1.75	0.05



Gambar 4.13 Grafik nilai rata-rata kekasaran permukaan dari spesimen DCP SS AISI 316L selama perlakuan *shot peening*

Tabel 4.1 menunjukkan spesimen DCP yang diberi perlakuan *shot peening* memiliki nilai kekasaran rata-rata lebih besar jika dibandingkan dengan spesimen

DCP tanpa perlakuan (*raw material*). Hal yang sama juga didapatkan dalam penelitian Saputra (2016) yang menunjukkan bahwa perlakuan *shot peening* meningkatkan nilai kekasaran permukaan spesimen SS AISI 316L jika dibandingkan dengan spesimen SS AISI 316L tanpa perlakuan *shot peening*. Menurut Saputra (2016) hal ini dikarenakan penumbukan *steel ball* ke permukaan spesimen pada proses *shot peening* dapat menciptakan bekas tumbukan atau cekungan di permukaan spesimen DCP sehingga mempengaruhi kekasaran permukaan spesimen DCP. Pada Tabel 4.1 juga menunjukkan tingkat kekasaran permukaan spesimen DCP yang dipengaruhi oleh waktu perlakuan *shot peening*. Permukaan spesimen DCP yang memiliki nilai kekasaran terendah ditemukan pada spesimen DCP yang diberi perlakuan *shot peening* dengan waktu lebih lama.

Gambar 4.13 menunjukkan grafik perubahan nilai kekasaran permukaan selama perlakuan *shot peening* dengan *steel ball*. Kekasaran permukaan spesimen DCP meningkat secara signifikan dari  $R_a = 0,83 \mu\text{m}$  *raw material* hingga  $2,09 \mu\text{m}$  pada waktu perlakuan *shot peening* 8 menit pertama. Penurunan nilai kekasaran permukaan spesimen DCP terjadi setelah nilai kekasaran maksimal tercapai. Penurunan nilai kekasaran terjadi pada waktu perlakuan *shot peening* 10 menit dengan nilai  $R_a = 1,86 \mu\text{m}$ . Penumbukan *steel ball* untuk waktu yang lebih lama dari 10 menit tidak terlalu menurunkan nilai kekasaran yang signifikan dan menghasilkan kekasaran permukaan  $R_a = 1,75 \mu\text{m}$  pada waktu perlakuan *shot peening* 12 menit.

Menurut Oshida (2010) dalam bukunya tentang *bioscience and bioengineering of titanium materials*, material yang digunakan sebagai implan tulang haruslah memenuhi standar kekasaran permukaan kisaran  $1 \mu\text{m}$  sampai  $10 \mu\text{m}$ . Menurut Oshida (2010) pada skala kekasaran permukaan tersebut dapat mempengaruhi biologi antarmuka, karena itu pada kekasaran permukaan ( $1 \mu\text{m}$ - $10 \mu\text{m}$ ) merupakan ukuran yang sama dengan ukuran sel dan biomolekul yang dikenal sebagai kondisi aktif untuk adsorpsi, dan dapat mempengaruhi ikatan biomolekul ke permukaan implan. Mengacu pada kisaran standar kekasaran permukaan untuk implan tulang, hasil kekasaran permukaan yang didapatkan dalam

penelitian ini menunjukkan bahwa spesimen DCP dengan material SS AISI 316L memenuhi standar kekasaran permukaan sebagai material implan tulang.

Grafik pada Gambar 4.13 menunjukkan peningkatan kekasaran permukaan spesimen DCP selama 8 menit pertama perlakuan *shot peening* dan diikuti sedikit penurunan setelah nilai kekasaran maksimumnya. Perubahan kekasaran permukaan selama perlakuan permukaan tersebut menurut Arifvianto *et al* (2012) terjadi dalam tiga fase. Fase pertama ditandai dengan peningkatan signifikan oleh kekasaran permukaan dengan pembentukan cekungan baru dan tumpukan (*pile up*) di tepi cekungan dampak dari tumbukan *steel ball*. Pada fase pertama ini seluruh permukaan belum dipengaruhi oleh hasil tumbukan *steel ball* ke permukaan sehingga menciptakan cekungan bekas tumbukan *steel ball* yang tidak merata diseluruh permukaan spesimen. Kehadiran cekungan dan tumpukan baru meningkatkan tinggi puncak ke lembah sehingga mengakibatkan permukaan tidak beraturan dan kekasaran permukaan tidak rata.

Fase kedua terjadi ketika seluruh permukaan sudah tertutup oleh cekungan atau identasi dan beberapa lokasi juga terkena dampak tumbukan *steel ball* beberapa kali. Ketinggian puncak ke lembah di permukaan spesimen menurun dan kedalaman lembah tidak lagi dipengaruhi oleh dampak tumbukan *steel ball* berulang sehingga kekasaran permukaan menurun. Fase ketiga adalah kejenuhan kekasaran (*roughness saturation*), kekasaran permukaan hampir konstan karena perubahan ketinggian yang parah antara puncak ke lembah tidak lagi terjadi pada waktu perlakuan yang lebih lama.

Pada fase pertama atau waktu perlakuan *shot peening* 8 menit, cekungan dan tumpukan (*pile up*) dengan mudah dan cepat dihasilkan oleh dampak tumbukan *steel ball* sehingga menghasilkan peningkatan kekasaran permukaan yang signifikan. Pengurangan kekasaran permukaan spesimen DCP pada fase kedua atau pada waktu perlakuan *shot peening* 10 menit, menunjukkan bahwa dengan waktu yang lebih lama mengakibatkan tumbukan *steel ball* ke permukaan semakin tinggi dengan cakupan yang lebih luas masih memungkinkan dapat merusak lapisan ini sehingga mampu menurunkan tingkat kekasaran permukaan spesimen DCP. Pada fase ketiga atau pada waktu perlakuan *shot peening* 12 menit kekasaran permukaan



spesimen DCP menurun karena menurut Arifvianto *et al* (2012) dengan waktu tumbukan *steel ball* ke permukaan lebih lama mampu meratakan kembali seluruh permukaan spesimen dengan cakupan penembakan yang lebih luas dan menyeluruh.

Hasil pengujian nilai kekasaran pada permukaan spesimen DCP yang diberi perlakuan *shot peening* pada penelitian ini memiliki nilai kekasaran permukaan yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai kekasaran permukaan spesimen yang telah *dishot peening* pada penelitian Saputra (2016). Hal ini dibuktikan pada nilai kekasaran permukaan spesimen yang *dishot peening* dengan variasi perlakuan yang sama yaitu pada waktu perlakuan 10 menit dengan tekanan 6 bar yang menunjukkan nilai kekasaran permukaan 0.985  $\mu\text{m}$  pada penelitian Saputra (2016) dan 1.86  $\mu\text{m}$  pada penelitian ini. Nilai kekasaran permukaan pada penelitian Saputra (2016) yang lebih rendah (0.985  $\mu\text{m}$ ) jika dibandingkan nilai kekasaran pada penelitian ini (1.86  $\mu\text{m}$ ) dikarenakan perbedaan ukuran diameter *steel ball* yang digunakan. Pada penelitian ini diameter *steel ball* yang digunakan adalah 0.6 mm sedangkan pada penelitian Saputra (2016) adalah 0.4 mm. Menurut Sukarno (2017) penggunaan diameter *steel ball* yang berbeda-beda pada perlakuan *shot peening* dapat menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang berbeda.

Menurut Rupp *et al* (2004) protein serum total, molekul pemelihara *blood-brain barrier* dan fungsi pembuluh darah atau biasa disebut fibronectin yang ditemukan pada implan tulang yang mengikat jauh lebih banyak pada permukaan yang lebih kasar jika dibandingkan dengan permukaan yang lebih halus. Permukaan yang kasar dan hidrofilik sesuai untuk adhesi sel-tulang untuk implan osseointegrasi (Arifvianto *et al.*, 2011).

Berdasarkan hasil pengujian dan penjelasan peneliti sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa dengan variasi waktu pada perlakuan *shot peening* dapat mempengaruhi kekasaran suatu permukaan dan dengan waktu perlakuan *shot peening* yang lebih lama dapat menurunkan tingkat kekasaran permukaan. Selain itu, hasil pengujian kekasaran permukaan spesimen DCP yang *dishot peening* pada penelitian ini lebih baik dengan nilai kekasaran permukaan yang lebih besar jika

dibandingkan dengan kekasaran permukaan spesimen yang telah *shot peening* pada penelitian Saputra (2016).

#### 4.5 Pengujian *Wettability*

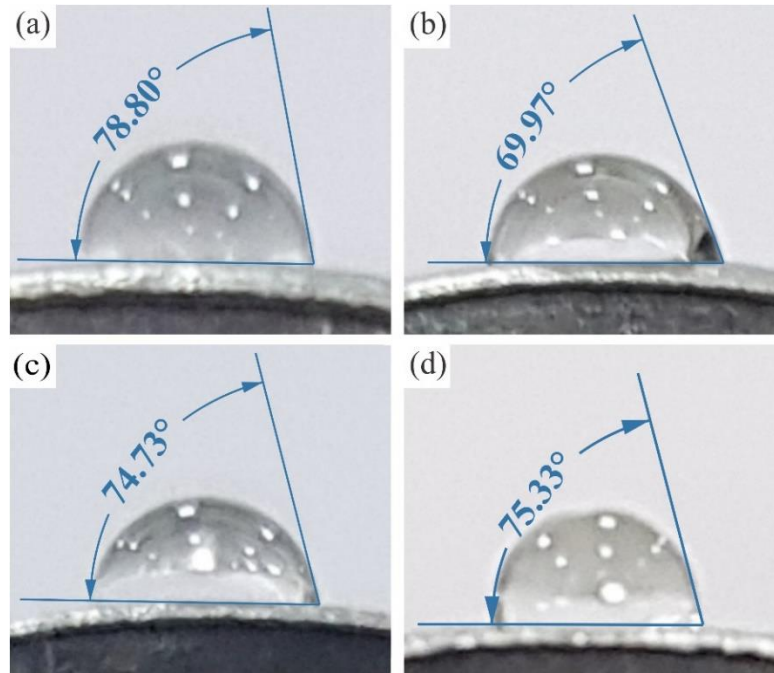
Interaksi antara molekul cair dan molekul permukaan material lain (*wettability*) dapat memberikan informasi yang berguna tentang kinerjanya di lingkungan biologis karena *wettability* memainkan peran penting dalam merubah respon jaringan yang bersentuhan dengan permukaan material implan, melalui modifikasi tingkat penyerapan protein pada implan (Bagherifard *et al.*, 2016). Pada pengujian ini, *wettability* dievaluasi melalui pengukuran sudut kontak ( $\theta$ ) tetesan air pada permukaan spesimen DCP. Dengan variasi waktu perlakuan *shot peening* yang berbeda pada spesimen DCP memiliki pengaruh terhadap tingkat *wettability* atau nilai sudut kontak spesimen DCP. Pengaruh variasi waktu perlakuan *shot peening* terhadap tingkat *wettability* spesimen DCP ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.15 serta foto pengujian *wettability* dengan mengukur sudut kontak tetesan air pada Gambar 4.14.

Tabel 4.2 Hasil pengujian nilai sudut kontak spesimen DCP SS AISI 316L selama perlakuan *shot peening*

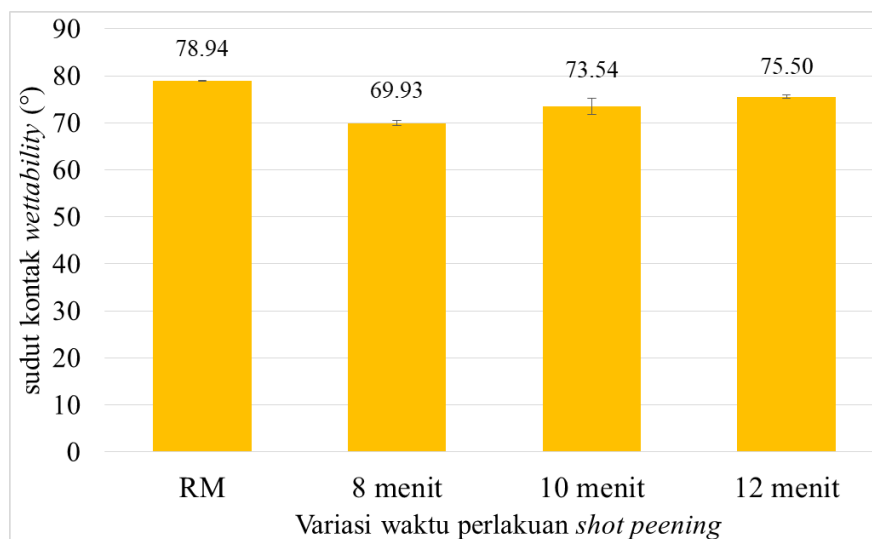
Variasi perlakuan <i>shot peening</i>	Sudut kontak (°)				SD
	Tetes ke-1	Tetes ke-2	Tetes ke-3	Rata-rata	
RM	78.8	79.09	78.94	78.94	0.15
8 menit	69.97	69.36	70.46	69.93	0.55
10 menit	74.73	71.56	74.34	73.54	1.73
12 menit	75.33	75.93	75.23	75.50	0.38

Tabel 4.2 menunjukkan nilai rata-rata sudut kontak permukaan spesimen DCP sesudah perlakuan *shot peening* dengan variasi waktu perlakuan 8 10 dan 12 menit. Perlakuan *shot peening* sedikit meningkatkan *wettability* permukaan yang ditandai dengan pengurangan sudut kontak tetesan air dengan permukaan semua spesimen DCP yang mendapat perlakuan *shot peening* (Gambar 4.15). Sudut kontak untuk spesimen DCP tanpa perlakuan atau *raw material* adalah 78.94° dan

mengalami penurunan menjadi  $69.93^\circ$  (perlakuan *shot peening* 8 menit),  $73.54^\circ$  (perlakuan *shot peening* 10 menit) dan  $75.50^\circ$  (perlakuan *shot peening* 12 menit) (masih dibawah  $78.94^\circ$ ). Semakin lama perlakuan *shot peening*, menghasilkan sudut kontak yang lebih besar, namun peningkatan sudut kontak tersebut tidak lebih besar dari sudut kontak *raw material*.



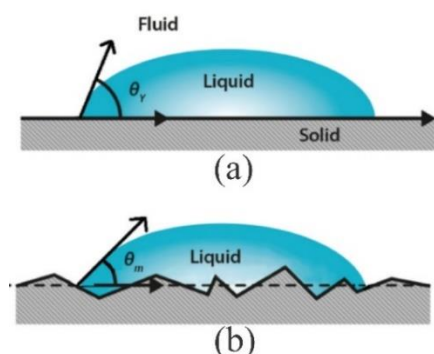
Gambar 4.14 (a) Nilai sudut kontak spesimen DCP *raw material*, Perubahan nilai sudut kontak spesimen DCP akibat pengaruh variasi waktu perlakuan *shot peening*, (b) 8 menit, (c) 10 menit, (d) 12 menit.



Gambar 4.15 Grafik nilai rata-rata sudut kontak spesimen DCP SS AISI 316L selama perlakuan *shot peening*

Gambar 4.15 menunjukkan spesimen DCP tanpa perlakuan *shot peening* (*raw material*) memiliki nilai sudut kontak paling besar dengan nilai kekasaran rata-rata  $R_a = 0,83 \mu\text{m}$ . Namun, pada spesimen DCP dengan perlakuan *shot peening* selama 8 menit ( $R_a = 2,09 \mu\text{m}$ ) menunjukkan penurunan nilai sudut kontak yang signifikan. Menurut Ahmed *et al* (2015) penurunan sudut kontak terjadi karena morfologi permukaan yang tidak beraturan (*irregularity*) atau akibat kekasaran permukaan material. Al-Janabi *et al* (2017) memperkuat dalam penelitiannya bahwa penurunan sudut kontak tersebut dapat dikaitkan dengan pengaruh tepi tajam atau adanya puncak dan lembah dari profil kekasaran permukaan, cairan dapat terjebak didalam lembah tersebut.

Dalam penelitian Zhang (2007) tentang pengaruh kekasaran permukaan terhadap *wettability* pada material padat menunjukkan, bahwa penting untuk diperhatikan bahwa persamaan *Wenzel* tentang pengukuran sudut kontak pada permukaan yang kasar (*non-ideal the roughness of solid surface*) didasarkan pada asumsi bahwa cairan menembus ke dalam alur kekasaran (seperti pada Gambar 4.16 (b)). Selain itu, sudut kontak memiliki hubungan langsung dengan profil kekasaran permukaan yaitu peningkatan profil kekasaran permukaan menyebabkan sudut kontak menurun. Selain itu, peningkatan kekasaran permukaan akibat perlakuan *shot peening* berkontribusi meningkatkan luas kontak cairan ke permukaan daripada luas kontak cairan ke permukaan tanpa perlakuan *shot peening*.



Gambar 4.16 Ilustrasi sudut kontak tetesan cairan pada, (a) Permukaan yang rata dan halus, (b) Permukaan yang kasar (Modifikasi Gusrita *et al.*, 2014)

Hasil serupa juga ditunjukkan dalam penelitian Al-Janabi *et al* (2017), bahwa perlakuan *shot peening* meningkatkan nilai kekasaran permukaan dan dapat

mengubah perilaku pembasahan serta penyebarannya dengan menghasilkan penurunan sudut kontak. Berdasarkan Gambar 4.6 (a)-(d), peningkatan kekasaran permukaan pada spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 8 menit merupakan alasan utama dalam penurunan sudut kontak.

Tabel 4.3 Perbandingan nilai sudut kontak dan kekasaran permukaan spesimen DCP SS AISI 316L selama perlakuan *shot peening*.

Variasi perlakuan <i>shot peening</i>	Sudut kontak (°)	Kekasaran Ra (µm)
RM	78.94	0.833
8 menit	69.93	2.090
10 menit	73.54	1.859
12 menit	75.50	1.754

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai rata-rata sudut kontak berbanding terbalik dengan nilai rata-rata kekasaran permukaan spesimen DCP. Hal tersebut menjelaskan bahwa kekasaran permukaan memiliki pengaruh terhadap tingkat *wettability*. Pernyataan di atas diperkuat oleh beberapa peneliti sebelumnya, seperti Nascimento *et al* (2014) yang menjelaskan, bahwa beberapa faktor dapat mengubah sudut kontak termasuk ukuran tetesan, seperti kekasaran permukaan dan heterogenitas permukaan.

Dalam buku *Wetting and Roughness* Quere (2008) mengklasifikasikan permukaan dengan sudut kontak  $<90^\circ$  memiliki sifat permukaan hidrofilik (menyerap cairan) dan permukaan yang sangat hidrofilik memiliki sudut kontak tetesan air  $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ . Permukaan dengan sudut kontak  $>90^\circ$  memiliki sifat permukaan hidrofobik (sukar cairan) dan permukaan sangat hidrofobik dengan sudut kontak  $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ . *Raw material* spesimen DCP memiliki nilai kekasaran rata-rata  $Ra = 0,83 \mu\text{m}$  dengan menghasilkan sudut kontak  $78.94^\circ$  (Gambar 4.15). Hasil nilai sudut kontak *raw material* spesimen DCP tersebut merupakan parameter permukaan yang memiliki sifat hidrofilik atau menyerap cairan karena sudut kontak  $<90^\circ$  merupakan permukaan yang memiliki sifat hidrofilik. Sifat hidrofilik pada *raw material* spesimen DCP tersebut semakin baik setelah perlakuan *shot peening*

karena sudut kontak tetesan air pada spesimen DCP mengalami penurunan dari sudut kontak *raw material*.

Menurut Bagherifard *et al* (2016) material SS AISI 316L yang bersifat hidrofilik sangat penting untuk aplikasi biomedis karena mereka dapat mengurangi risiko infeksi bakteri, meningkatkan interaksi dengan jaringan di sekitarnya dan berpotensi mengurangi laju pelepasan (*rate of loosening*) dan migrasi perangkat. Permukaan kasar dan *wettability*, adalah salah satu faktor penting yang menentukan masa pakai material. Permukaan yang kasar dan memiliki sifat permukaan yang hidrofilik sangat sesuai untuk adhesi sel tulang dan untuk implan osseointegrasi (Arifvianto *et al.*, 2011).

Manfaat uji *wettability* ini terhadap kualitas material biomedik tentunya disesuaikan dengan tujuan pengaplikasiannya terhadap tulang apakah untuk dipasang selamanya atau untuk dilepas kembali dalam jangka waktu tertentu. Jika material biomedik tersebut akan dipasang dalam jangka panjang maka material tersebut disarankan memiliki sifat hidrofilik (suka cairan) karena sifat tersebut nantinya berdampak positif dalam penyerapan protein untuk memperbaiki sel-sel tulang yang rusak seperti yang dijelaskan sebelumnya. Jika material biomedik pemasangannya untuk jangka pendek atau dilepas kembali, disarankan menggunakan material yang bersifat hidrofobik (sukar cairan) karena material tersebut cenderung susah kontak langsung dengan cairan yang ada didalam tubuh seperti yang dijelaskan sebelumnya sehingga memudahkan dalam pelepasannya kembali.

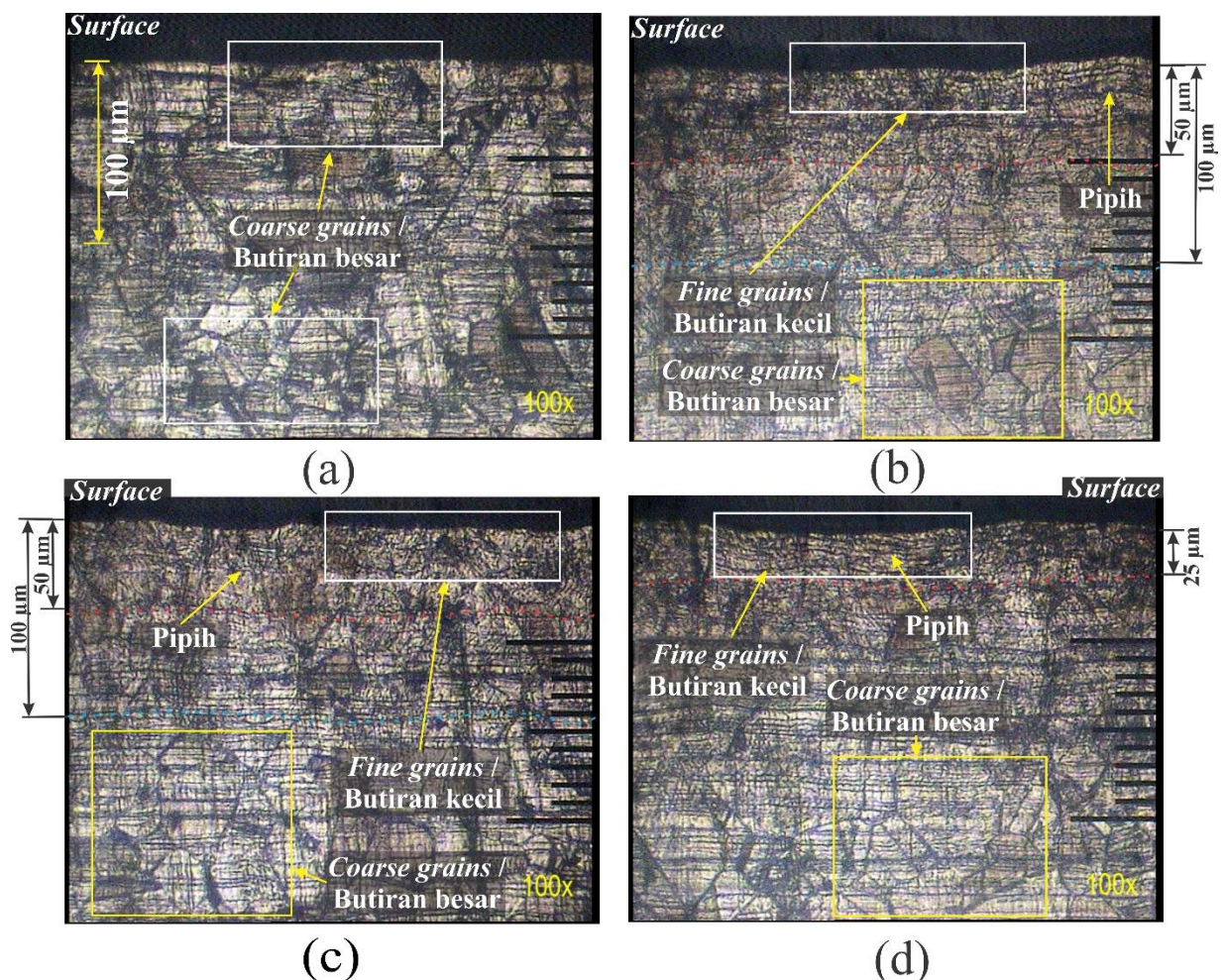
Namun, untuk jenis material SS AISI 316L cenderung lebih banyak diaplikasikan untuk dilepas kembali, sehingga yang diharapkan material tersebut cenderung bersifat hidrofobik Hasil uji *wettability* pada penelitian ini didapatkan material SS AISI 316L bersifat hidrofilik sehingga hasil dari penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan atau sebagai bahan evaluasi dalam pengaplikasiannya terhadap dunia bedah tulang..

#### **4.6 Pengamatan Struktur Mikro**

Pengujian struktur mikro dilakukan pada penampang membujur atau memanjang spesimen DCP yang telah *shot peening* permukaannya. Menurut Lu *et*

al (2017) proses perubahan struktur mikro dapat ditandai oleh karakteristik struktur mikro pada kedalaman yang berbeda. Pengamatan struktur mikro pada penampang memanjang spesimen DCP merupakan metode yang efektif untuk memahami secara sistematis struktur mikro yang dikembangkan atau yang dipengaruhi oleh perlakuan *shot peening* dengan durasi perlakuan yang berbeda.

Hasil pengamatan struktur mikro pada penampang membujur spesimen DCP *raw material* dan spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* yang berbeda disajikan bersama pada Gambar 4.17 (a)-(d). Terlihat bahwa terjadi pemipihan pada lapisan permukaan spesimen DCP yang *dishot peening*.



Gambar 4.17 (a) Struktur mikro penampang memanjang spesimen DCP tanpa perlakuan (*raw material*), Struktur mikro penampang memanjang spesimen DCP setelah diberi perlakuan *shot peening* dengan variasi waktu perlakuan (b) 8 menit, (c) 10 menit, (d) 12 menit

Gambar 4.17 (a) merupakan hasil struktur mikro dari spesimen DCP *raw material* yang menunjukkan rata-rata ukuran butir sama besar atau homogen baik di permukaan atas spesimen maupun pada kedalaman spesimen yang lebih jauh dari permukaan atas. Hal ini dikarenakan spesimen tersebut merupakan spesimen tanpa perlakuan sehingga foto struktur mikro yang dihasilkan merupakan struktur mikro awal material SS AISI 316L. Hasil struktur mikro spesimen DCP *raw material* ini digunakan sebagai referensi atau untuk perbandingan hasil struktur mikro pada spesimen DCP dengan perlakuan *shot peening* yang berbeda-beda yaitu 8, 10 dan 12 menit.

Dari Gambar 4.17 (b)-(d) terlihat perubahan ukuran butir dan adanya lapisan deformasi pada subpermukaan spesimen DCP setelah *dishot peening* dengan ketebalan lapisan deformasi yang berbeda-beda sesuai variasi waktu perlakuan *shot peening*. Menurut Multinger *et al* (2009) perubahan struktur mikro terjadi setelah perlakuan *sandblasting* dan dapat menghasilkan lapisan deformasi plastis didekat permukaan yang diberi perlakuan.

Setelah perlakuan *shot peening* selama 8 menit (Gambar 4.17 (b)), struktur mikro mengalami perubahan signifikan jika dibandingkan struktur mikro pada spesimen DCP *raw material*. Perubahan struktur mikro terjadi pada kedalaman 50  $\mu\text{m}$  dari permukaan atas spesimen DCP dengan terjadinya penyempurnaan butir (*grain refinement*) atau berubahnya ukuran butiran menjadi menjadi pipih atau terjadi pepadatan butir terutama didekat permukaan yang terkena pengaruh *shot peening* (pada jarak kedalaman 25  $\mu\text{m}$ ), hal ini terjadi karena tekanan dari tembakan berulang *steel ball* ke permukaan yang mampu merubah struktur mikro permukaan. Menurut Gonzalez *et al* (2018) lapisan permukaan yang mengalami penyempurnaan butir dari struktur mikro permukaan menunjukkan telah mengalami deformasi plastis. Tumbukan *steel ball* yang berulang yang lebih dalam mampu menghasilkan lapisan deformasi plastis. Menurut Ahmed *et al* (2016) lapisan deformasi plastis yang terbentuk di bawah permukaan spesimen dengan perlakuan *shot peening* menyebabkan kekerasan permukaan meningkat.

Pada jarak kedalaman 100-150  $\mu\text{m}$  pengaruh perlakuan *shot peening* menurun yang ditandai dengan pemipihan atau pepadatan berkurang dan



menurunya ketebalan lapisan deformasi. Seiring bertambahnya kedalaman, pada jarak kedalaman 200  $\mu\text{m}$  lapisan deformasi semakin berkurang dan menghilang dengan berubahnya ukuran butiran menjadi lebih besar atau pengaruh pemipihan dan pepadatan butir pada subpermukaan yang lebih dalam semakin hilang, hal ini terjadi karena dampak perlakuan *shot peening* tidak mempengaruhi bagian spesimen yang lebih dalam.

Hal yang sama juga diamati pada Gambar 4.17 (c), yaitu struktur mikro spesimen DCP dengan perlakuan *shot peening* selama 10 menit pada jarak kedalaman 50  $\mu\text{m}$  ada lapisan deformasi yang ditandai terjadinya penyempurnaan butir dengan berubahnya ukuran butir menjadi lebih padat, merata dan lebih pipih, terutama pada kedalaman 25  $\mu\text{m}$ . Dengan bertambahnya kedalaman, pengaruh pepadatan dan pemipihan butir berkurang karena lapisan deformasi pada kedalaman 100-150  $\mu\text{m}$  terlihat semakin berkurang atau menurun.

Hasil struktur mikro spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 12 menit ditunjukkan pada Gambar 4.17 (d). Pengamatan struktur mikro spesimen yang di *shot peening* selama 12 menit menunjukkan terjadinya penyempurnaan butir atau perubahan ukuran butir menjadi lebih pipih dan lebih padat pada kedalaman 25  $\mu\text{m}$  dari permukaan. Pada kedalaman 50-100  $\mu\text{m}$  pengaruh pepadatan dan pemipihan butir berkurang. Menurut (Sun *et al.*, 2014) nilai kekerasan mikro permukaan sangat sensitif terhadap kepadatan atau kerapatan butir struktur mikro yang meningkat setelah deformasi plastis. Selain itu, telah dijelaskan oleh peneliti sebelumnya bahwa perubahan struktur mikro suatu material mempengaruhi kekuatan dan kekerasan material secara signifikan (Fu *et al.*, 2013).

Dari hasil penelitian sebelumnya yang sudah dijelaskan di atas, dapat disimpulkan bahwa dengan perlakuan *shot peening* yang berbeda (8 10 dan 12 menit) mampu mengubah struktur mikro permukaan dengan perbaikan butir atau perubahan ukuran butir. Seiring lamanya waktu perlakuan *shot peening* ukuran butiran menjadi lebih pipih dan padat.

#### 4.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan mikro pada permukaan spesimen DCP dilakukan untuk mengetahui ketahanan permukaan spesimen DCP akan deformasi lokal atau deformasi didekat permukaan. Tabel 4.4 dan Gambar 4.18 menunjukkan data dan profil kekerasan mikro semua spesimen DCP dengan variasi perlakuan *shot peening* pada lapisan permukaan dan pada kedalaman spesimen DCP. Data kekerasan mikro pada Tabel 4.4 menunjukkan pengaruh perlakuan *shot peening* dalam meningkatkan kekerasan dan pengerasan kerja (*work hardening*) di tepi permukaan atau dekat permukaan spesimen DCP.

Tabel 4.4 Nilai distribusi kekerasan pada permukaan dan subpermukaan spesimen DCP SS AISI 316L selama perlakuan *shot peening*

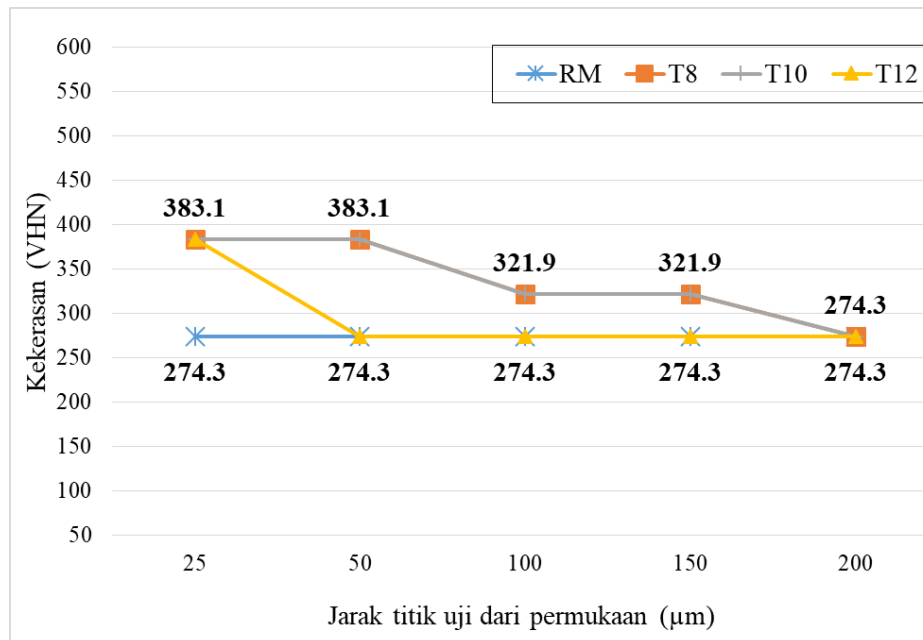
Depth of surface (μm)	Raw Material	Perlakuan SP 8 menit	Perlakuan SP 10 menit	Perlakuan SP 12 menit
	Nilai Kekerasan Permukaan (VHN)	Nilai Kekerasan Permukaan (VHN)	Nilai Kekerasan Permukaan (VHN)	Nilai Kekerasan Permukaan (VHN)
25	274.3	383.1	383.1	383.1
50	274.3	383.1	383.1	274.3
100	274.3	321.9	321.9	274.3
150	274.3	321.9	321.9	274.3
200	274.3	274.3	274.3	274.3

Seperti dapat dilihat pada Tabel 4.4 nilai kekerasan permukaan spesimen DCP dengan variasi waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit mampu meningkatkan nilai kekerasan permukaan (383,1 VHN) secara signifikan dari nilai kekerasan permukaan spesimen DCP *raw material* (274,3 HVN). Peningkatan kekerasan ini menyebabkan ketangguhan spesimen DCP meningkat. Nilai kekerasan permukaan spesimen DCP yang tinggi dari perlakuan *shot peening* dengan waktu perlakuan 8, 10 dan 12 menit menandakan kepadatan partikel-partikel yang lebih tinggi di lapisan permukaan dibandingkan dengan spesimen DCP *raw material*. Selain peningkatan kekerasan, ketebalan lapisan pengeras (*hardened layer*) di permukaan juga meningkat dengan durasi *shot peening*.

Kekerasan lapisan permukaan spesimen DCP meningkat setelah perlakuan *shot peening* menjadi 383,1 VHN atau meningkat sekitar 39.7% dari spesimen DCP

*raw material* 274,3 VHN, seperti yang disajikan pada Tabel 4.4. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, meningkatnya nilai kekerasan permukaan spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening* dikarenakan adanya lapisan keras atau terjadinya pengerasan material (*work hardening*) karena adanya deformasi plastis pada permukaan spesimen DCP.

Selama proses *shot peening*, permukaan spesimen terus-menerus terkena dampak oleh penumbukkan *steel ball*, yang menyebabkan deformasi plastis permukaan spesimen. Deformasi plastis tersebut mengakibatkan pemipihan, pepadatan butir dan kerapatan dislokasi semakin tinggi sehingga mempersulit dan mengurangi kecepatan atau mencegah gerakan dislokasi pada batas butirnya atau terhalang oleh dislokasi yang lain sehingga lapisan permukaan memiliki pengaruh pengerasan permukaan untuk meningkatkan kekerasan permukaan (Azar *et al.*, 2010). Hal ini diperkuat dengan hukum Hall-Petch yang menyatakan hubungan terbalik antara kekerasan dan ukuran butir, jika ukuran butir mengalami penurunan maka peningkatan kekerasan terjadi.



Gambar 4.18 Grafik distribusi kekerasan pada permukaan dan subpermukaan spesimen DCP selama perlakuan *shot peening*

Distribusi kekerasan mikro di area penampang memanjang spesimen DCP ditunjukkan grafik pada Gambar 4.18. Dari grafik (Gambar 4.18) menunjukkan

bahwa perlakuan *shot peening* mampu meningkatkan kekerasan mikro pada subpermukaan atau pada kedalaman spesimen DCP jika dibandingkan spesimen DCP tanpa perlakuan (*raw material*). Hal ini menunjukkan bahwa sifat fisis, seperti kekerasan dan kepadatan, partikel-partikel mampu untuk menghasilkan deformasi plastis dan merubah struktur mikro di permukaan dan bawah permukaan spesimen.

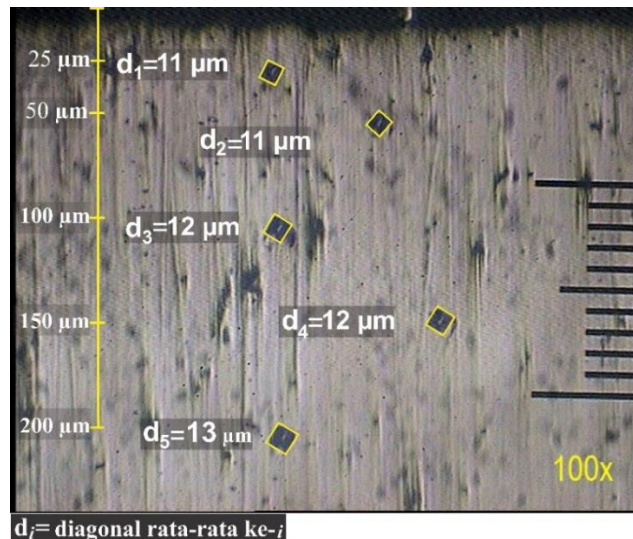
Dalam penelitian ini perlakuan *shot peening* selama 8, 10 dan 12 menit meningkatkan nilai kekerasan mikro pada kedalaman 25  $\mu\text{m}$  dengan nilai kekerasan 383,1 VHN dan seiring kedalaman nilai kekerasan turun sampai 274,3 VHN (200  $\mu\text{m}$ ). Nilai kekerasan mikro menurun seiring kedalaman dan mendekati nilai dari spesimen DCP *raw material*. Ketebalan lapisan permukaan keras (*hard layer*) dapat ditentukan dengan mengukur kedalaman kekerasan mikro dari tepi permukaan.

Grafik pada Gambar 4.18 menunjukkan nilai kekerasan didekat permukaan (kedalaman 25  $\mu\text{m}$ ) pada semua variasi waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit didapatkan hasil nilai kekerasan yang sama yaitu 383,1 VHN. Setelah waktu perlakuan *shot peening* selama 8 menit peningkatan lebih lanjut pada kekerasan mikro permukaan spesimen tidak lagi terjadi atau konstan pada nilai kekerasan 383,1 VHN. Hal tersebut dikarenakan dengan variasi waktu perlakuan *shot peening* yang memiliki selisih atau jarak antar variasi waktu perlakuan yang singkat (jarak antar variasi hanya 1 menit). Ditambah lagi dengan perlakuan *shot peening* yang harus bergerak di atas permukaan spesimen DCP dengan lintasan pergerakan sepanjang 105 mm maka energi kinetik yang dihasilkan *steel ball* saat menumbuk permukaan spesimen DCP yang disertai pergerakan penembakkan tersebut tidak mampu menghasilkan perubahan ukuran butiran dan deformasi plastis yang signifikan berbeda. Dengan kata lain, ukuran butir dan deformasi plastis yang dihasilkan di setiap variasi waktu perlakuan *shot peening* pada spesimen DCP memiliki hasil yang sama (stabil). Akibatnya, tidak terjadi peningkatan kekerasan mikro lebih lanjut setelah perlakuan 8 menit *shot peening* dan cenderung konstan.

Hasil pengujian kekerasan spesimen DCP yang diberi perlakuan *shot peening* pada penelitian ini memiliki nilai kekerasan spesimen yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai kekerasan spesimen yang telah *dishot peening* pada penelitian Saputra (2016). Hal ini dibuktikan pada nilai kekerasan spesimen yang

*dishot peening* dengan variasi perlakuan yang sama yaitu pada waktu perlakuan 10 menit dengan tekanan 6 bar yang menunjukkan nilai kekerasan 195.6 HVN pada penelitian Saputra (2016) dan 383.1 HVN pada penelitian ini. Nilai kekerasan pada penelitian Saputra (2016) yang lebih rendah (195.6 HVN) jika dibandingkan nilai kekasaran pada penelitian ini (383.1 HVN) dikarenakan perbedaan ukuran diameter *steel ball* yang digunakan. Pada penelitian ini diameter *steel ball* yang digunakan adalah 0.6 mm sedangkan pada penelitian Saputra (2016) adalah 0.4 mm. Menurut Ahmed *et al.*, (2015) perubahan variasi diameter *steel ball* yang semakin besar pada perlakuan *shot peening* dapat meningkatkan nilai kekerasan spesimen.

Grafik pada Gambar 4.18 menunjukkan distribusi kekerasan yang dihasilkan oleh perlakuan *shot peening* dengan waktu 8, 10 dan 12 menit mengalami penurunan nilai kekerasan seiring kedalaman spesimen. Pada kedalaman 50  $\mu\text{m}$  kekerasan mulai terlihat mengalami penurunan sampai mendekati nilai kekerasan *raw material* dengan nilai kekerasan 274,3 VHN, hal ini dibuktikan dengan foto makro bekas injakan indenter pada Gambar 4.19.



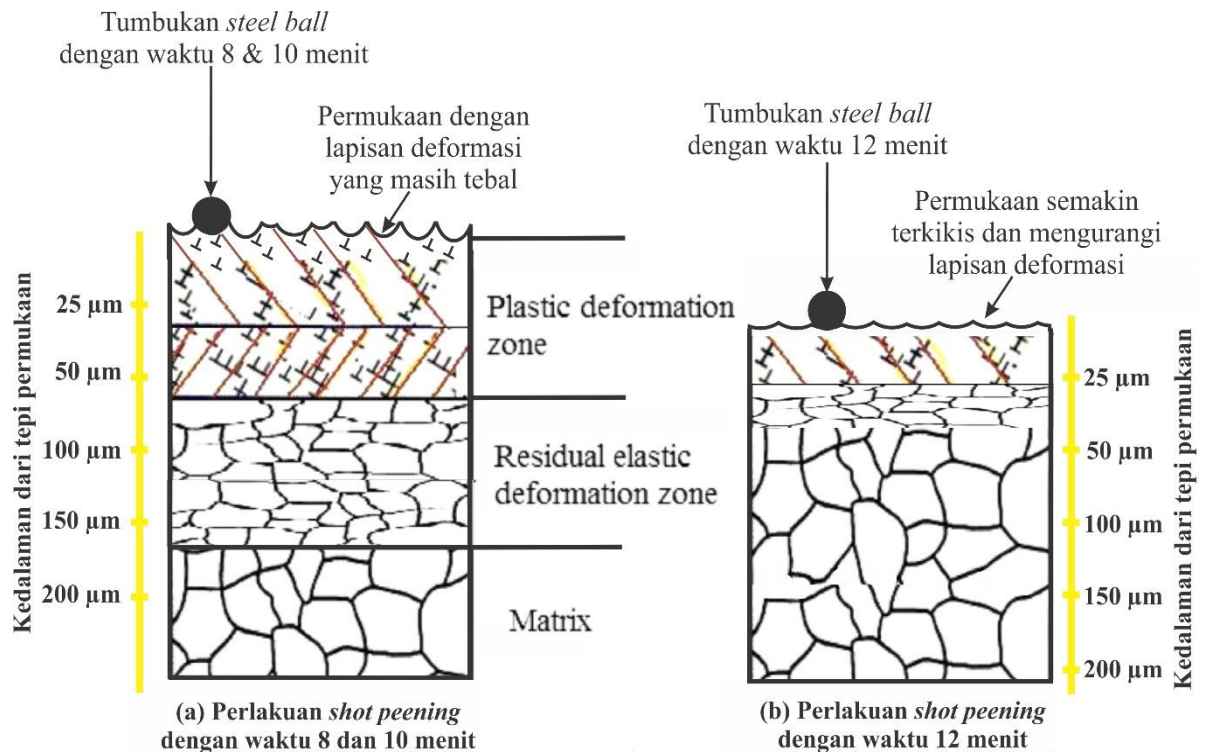
Gambar 4.19 Bekas indentasi atau injakan hasil pengujian kekerasan mikro pada kedalaman (subpermukaan) spesimen DCP dengan metode uji *vickers*

Penurunan nilai kekerasan seiring kedalaman spesimen dapat dibuktikan dengan hasil panjang diagonal rata-rata bekas injakan indenter uji *Vickers*. Panjang diagonal rata-rata merupakan parameter selain sudut indenter dan beban penekanan yang digunakan untuk menghitung nilai kekerasan permukaan (Persamaan 2.4).

Dalam penelitian ini beban penekanan yang digunakan adalah 25 gf dengan waktu penekanan (*load time*) 5 detik untuk semua spesimen DCP. Pada Gambar 4.19 terlihat bahwa semakin jauh dari permukaan yang *dishot peening* maka panjang diagonal rata-rata yang dihasilkan oleh bekas injakan indenter lebih besar, hal ini menunjukkan bahwa semakin ke dalam material menjadi semakin lunak atau semakin jauh dari permukaan atas kekerasan spesimen mengalami penurunan karena bekas injakan indenter yang lebih besar. Dalam penelitian Tosha (2008) tentang pengaruh *shot peening* terhadap integritas permukaan menunjukkan, bahwa penurunan kekerasan mikro di kedalaman spesimen terjadi karena perubahan ketebalan lapisan pengeras (*hardened layer*) akibat pengaruh perlakuan *shot peening*.

Dalam penelitian ini, perlakuan *shot peening* selama 8 dan 10 menit mampu menghasilkan lapisan permukaan keras (*hard surface layer*) sampai ketebalan 150  $\mu\text{m}$  dan ketebalan lapisan permukaan keras yang berbeda didapatkan dari spesimen DCP dengan perlakuan *shot peening* selama 12 menit hanya sampai ketebalan 25  $\mu\text{m}$ . Hal ini dikarenakan pada kedalaman 50  $\mu\text{m}$  perlakuan *shot peening* yang parah dengan waktu perlakuan yang semakin lama (12 menit), tumbukan *steel ball* mampu mendeformasi lapisan keras sampai berkurang bahkan sampai ketebalan lapisan keras sampai mengilang pada kedalaman 50  $\mu\text{m}$ . Pemadatan yang diakibatkan perlakuan *shot peening* yang lebih lama (12 menit) tidak ke bawah atau penumbukkan *steel ball* dengan waktu yang lebih lama mampu menghilangkan atau meratakan pemadatan lapisan keras, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20.

Hal tersebut dibuktikan dengan pengaruh pemadatan dan pemipihan butir akibat *shot peening* berkurang dan deformasi plastis menghilang. Untuk mempermudah penjelasan disajikan ilustrasi ketebalan lapisan struktur mikro pada Gambar 4.20. Alasan ini diperkuat oleh penjelasan sebelumnya Sun *et al* (2014) bahwa nilai kekerasan sangat sensitif terhadap penyempurnaan butir dan pengerasan kerja (*work hardening*) serta deformasi plastis.



Gambar 4.20 Ilustrasi perbandingan ketebalan deformasi atau lapisan keras antara waktu perlakuan *shot peening* 8 dan 10 menit dengan 12 menit. ( $\perp$  arah dislokasi) (Modifikasi Xing *et al.*, 2004)

Hasil pengujian kekerasan mikro yang memiliki nilai sama atau konstan didekat permukaan dengan variasi perlakuan permukaan yang berbeda telah dilakukan oleh Roland *et al* (2007) dan Arifvianto *et al* (2011) yang menunjukkan fenomena yang sama dengan hasil nilai kekerasan permukaan yang konstan atau sama didekat permukaan pada penelitian ini. Penelitian yang dilakukan oleh Roland *et al* (2007) dan Arifvianto *et al* (2011) menggunakan spesimen dengan material SS AISI 316L yang diberi variasi perlakuan permukaan *cold working* (SMAT) yang berbeda menghasilkan nilai kekerasan yang sama pada titik dekat tepi permukaan. Menurut Roland *et al* (2007) dan Arifvianto *et al* (2011) hal tersebut disebabkan oleh pengaruh kejenuhan atau ukuran butir yang sama dan stabil (*saturation effect*) pada semua variasi perlakuan permukaan.

Dapat disimpulkan bahwa perlakuan *shot peening* mampu meningkatkan kekerasan spesimen DCP sampai 39.7% dari *raw material*. Hasil pengujian kekerasan mikro pada penelitian yang dilakukan penulis memiliki kesamaan dengan peneliti terdahulu yang dijelaskan pada pembahasan uji kekerasan mikro

sebelumnya, seperti Roland *et al* (2007) dan Arifvianto *et al* (2011). Hasil pengujian kekerasan spesimen DCP pada penelitian ini memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi (383.1 HVN) jika dibandingkan dengan hasil nilai kekerasan pada penelitian Saputra (2016) (195.6 HVN). Selain itu, nilai kekerasan spesimen DCP pada penelitian ini telah memenuhi standar kekerasan material logam untuk implan tulang, yaitu kisaran 95 HRB atau 222 HVN (ASTM F139–86 (1992) ; Bronzino dan Park, (2002)).

#### **4.8 Pengukuran Geometri Spesimen DCP SS AISI 316L**

Perlakuan *shot peening* biasanya tidak ditujukan untuk mengubah dimensi (geometri). Namun, perubahan dimensi mungkin terjadi akibat perlakuan *shot peening*. Pengukuran ketebalan spesimen DCP dilakukan untuk mengetahui persentase pengurangan ketebalan spesimen DCP sebelum dan sesudah perlakuan *shot peening*. Hasil pengukuran ketebalan spesimen DCP sebelum mendapat perlakuan ditunjukkan pada Tabel 4.5 dan pengukuran ketebalan spesimen DCP setelah *dishot peening* disajikan pada Tabel 4.6.

Pada Tabel 4.5 terlihat nilai rata-rata ketebalan semua spesimen DCP sebelum perlakuan *shot peening* menunjukkan nilai rata-rata ketebalan yang hampir sama. Setelah diberi perlakuan *shot peening* dengan variasi waktu 8 10 dan 12 menit pada setiap spesimen DCP, nilai rata-rata ketebalan mengalami pengurangan (Tabel 4.6) dengan selisih pengurangan yang tidak terlalu berbeda jauh antar variasi waktu perlakuan. Pengurangan ketebalan spesimen setelah diberi perlakuan *shot peening* juga terjadi dalam penelitian yang dilakukan oleh Saputra (2016) dari ketebalan spesimen 3.946 mm (*raw material*) menjadi 3.754 mm (*shot peening* 10 menit). Menurut Saputra (2016) pengurangan ketebalan spesimen setelah diberi perlakuan *shot peening* dikarenakan tekanan dipermukaan akibat tumbukkan berulang *steel ball* yang mengakibatkan deformasi. Tumbukan yang berulang-ulang tersebut mengakibatkan deformasi permukaan dan mengakibatkan terjadinya penghalusan butir, pemadatan dan pemipihan pada butir permukaan serta mengakibatkan terkikisnya lapisan permukaan luar spesimen sehingga spesimen mengalami perubahan dimensi.



Tabel 4.5 Data ketebalan spesimen DCP sebelum perlakuan *shot peening*

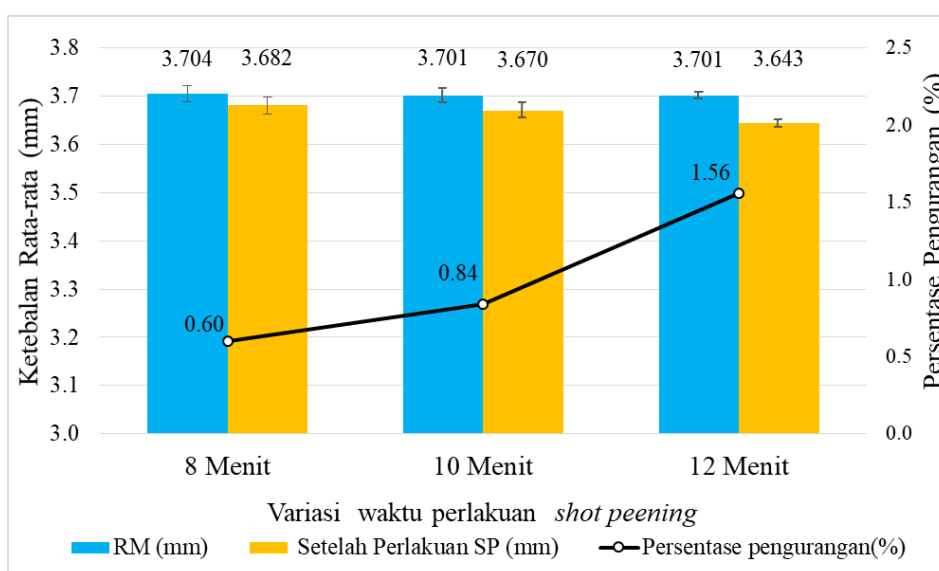
Data ketebalan sebelum perlakuan <i>shot peening</i>							
Variasi perlakuan	Kode Spesimen	Ketebalan (mm)					SD
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata Titik	Rata-rata	
8 Menit	4D	3.65	3.73	3.74	3.707	3.704	0.017
	21D	3.75	3.68	3.73	3.720		
	2D	3.69	3.66	3.71	3.687		
10 Menit	19D	3.72	3.68	3.71	3.703	3.701	0.013
	17D	3.73	3.71	3.7	3.713		
	7D	3.67	3.69	3.7	3.687		
12 Menit	18D	3.73	3.69	3.69	3.703	3.701	0.004
	14D	3.7	3.67	3.72	3.697		
	3D	3.69	3.71	3.71	3.703		

Tabel 4.6 Data ketebalan spesimen DCP setelah perlakuan *shot peening*

Data ketebalan setelah perlakuan <i>shot peening</i>								
Variasi perlakuan	Kode Spesimen	Ketebalan (mm)					SD	Persentase pengurangan (%)
		Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-rata Titik	Rata-rata		
8 Menit	4D	3.65	3.7	3.72	3.690	3.682	0.02	0.60
	21D	3.73	3.65	3.71	3.697			
	2D	3.66	3.62	3.7	3.660			
10 Menit	19D	3.69	3.64	3.68	3.670	3.670	0.017	0.84
	17D	3.7	3.67	3.69	3.687			
	7D	3.65	3.63	3.68	3.653			
12 Menit	18D	3.68	3.62	3.64	3.647	3.643	0.009	1.56
	14D	3.65	3.59	3.66	3.633			
	3D	3.66	3.64	3.65	3.650			

Pada grafik (Gambar 4.21) dan Tabel 4.6 perubahan ketebalan spesimen DCP menunjukkan bahwa variasi waktu perlakuan *shot peening* pada spesimen DCP menghasilkan pengurangan ketebalan dari 3.682 mm (0.60%) hingga 3.643 mm (1.56%). Pada perlakuan *shot peening* selama 8 menit menyebabkan pengurangan ketebalan spesimen menjadi 3.682 mm dengan persentase pengurangan sekitar 0.60% dari spesimen sebelum perlakuan *shot peening* (3.704 mm). Perlakuan *shot peening* selama 10 menit menyebabkan ketebalan spesimen DCP semakin berkurang menjadi 3.670 mm dengan persentase pengurangan yang lebih besar 0.84%. Dengan waktu perlakuan *shot peening* yang lebih lama (12

menit) pada spesimen DCP menghasilkan pengurangan ketebalan terbesar yaitu 3.643 mm dengan persentase pengurangan 1.56%. Terlihat pada perlakuan *shot peening* yang lebih lama (12 menit) menunjukkan pengurangan ketebalan yang lebih besar dari perlakuan *shot peening* selama 8 dan 10 menit, hal ini karena dengan waktu perlakuan yang lebih lama menyebabkan deformasi permukaan yang lebih besar dan menjadi semakin padat serta semakin pipih (Saputra, 2016). Deformasi yang lebih besar ini diakibatkan oleh waktu penumbukkan *steel ball* ke permukaan yang lebih lama.

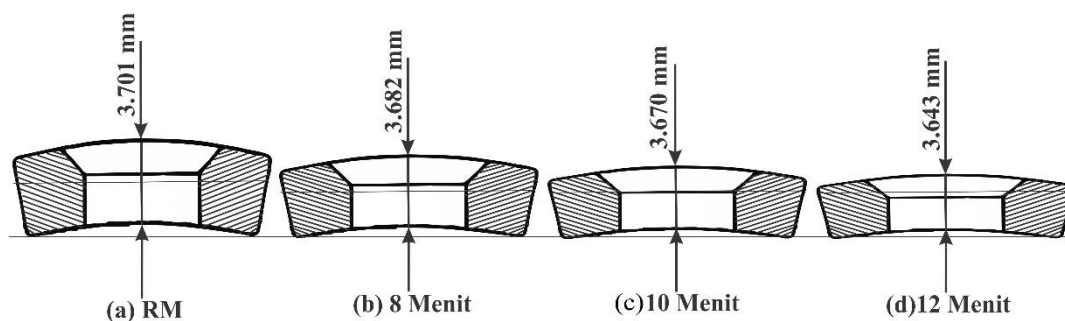


Gambar 4.21 Grafik nilai rata-rata ketebalan spesimen DCP SS AISI 316L sebelum dan setelah perlakuan *shot peening*

Hasil pengukuran ketebalan spesimen DCP yang diberi perlakuan *shot peening* pada penelitian ini memiliki pengurangan ketebalan spesimen yang lebih besar jika dibandingkan dengan pengurangan ketebalan spesimen yang telah di *shot peening* pada penelitian Saputra (2016). Hal ini dibuktikan pada nilai pengurangan ketebalan spesimen yang di *shot peening* dengan variasi perlakuan yang sama yaitu pada waktu perlakuan 10 menit dengan tekanan 6 bar yang menunjukkan ketebalan 3.754 mm pada penelitian Saputra (2016) dan 3.670 mm pada penelitian ini. Pengurangan ketebalan spesimen pada penelitian ini (3.670 mm) lebih besar jika dibandingkan pengurangan ketebalan spesimen pada penelitian Saputra (2016) (3.754 mm) ini dikarenakan perbedaan ukuran diameter *steel ball* yang digunakan. Pada penelitian ini diameter *steel ball* yang digunakan adalah 0.6 mm sedangkan

pada penelitian Saputra (2016) adalah 0.4 mm. Menurut Sukarno (2016) perubahan variasi diameter *steel ball* yang semakin besar pada perlakuan *shot peening* dapat menyebabkan deformasi permukaan material yang lebih dalam lagi dan terjadi pemadatan serta pipihan pada butiran permukaan yang lebih besar sehingga dapat meningkatkan pengurangan ketebalan spesimen.

Grafik pada Gambar 4.21 juga menunjukkan persentase pengurangan yang semakin besar seiring lamanya waktu perlakuan *shot peening*. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu perlakuan *shot peening*, pengurangan ketebalan spesimen DCP semakin besar.



Gambar 4.22 Ilustrasi pengurangan ketebalan spesimen DCP akibat variasi waktu perlakuan *shot peening*

Pengurangan ketebalan yang semakin besar seiring lamanya waktu perlakuan *shot peening* ini diprjelas pada ilustrasi pengurangan ketebalan spesimen DCP (Gambar 4.22). Hal ini diperkuat oleh penelitian Prasetya *et al* (2011) yang menunjukkan, semakin lama perlakuan *sand blasting* pada sekrup implan, semakin besar juga pengurangan diameter sekrup implan. Pengurangan ketebalan spesimen DCP pada penelitian ini memiliki selisih penurunan yang tidak berbeda jauh. Selisih pengurangan ketebalan yang tidak terlalu jauh antara waktu perlakuan *shot peening* 8 10 dan 12 menit ini disebabkan oleh jarak antara variasi waktu perlakuan *shot peening* yang terlalu singkat atau hanya beda 1 menit sehingga dampak yang dihasilkan tidak signifikan atau tidak berbeda jauh. Seperti yang dijelaskan oleh peneliti sebelumnya (2016) bahwa perlakuan *shot peening* mampu mengubah dimensi atau ketebalan spesimen.

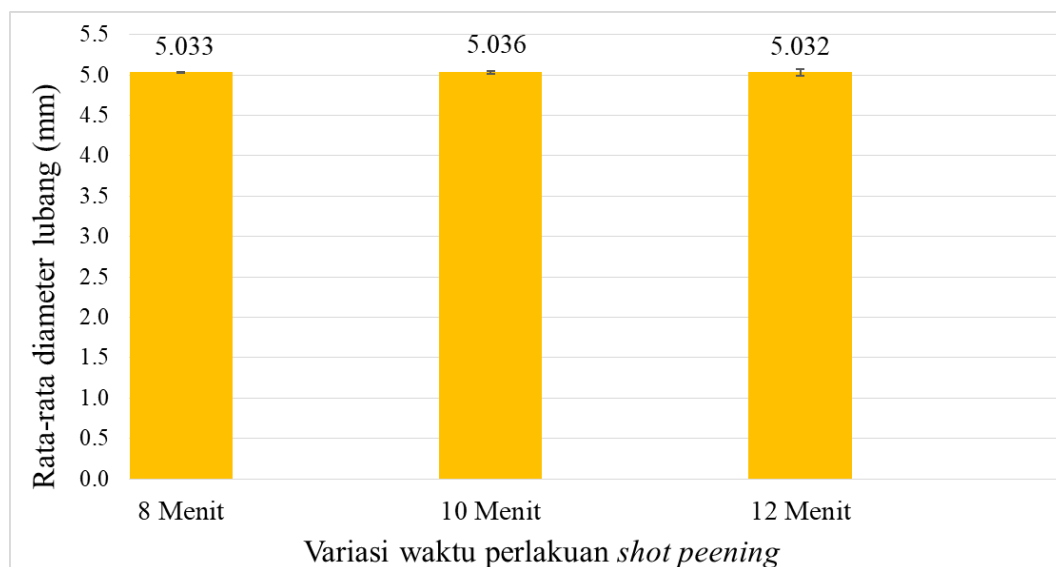
Proses *drilling* atau pembuatan lubang sekrup dan lubang *vershing* (*elips*) pada penelitian ini dilakukan setelah perlakuan *shot peening* pada semua spesimen

selesai. Hasil data pengukuran diameter lubang sekrup pada setiap spesimen DCP variasi waktu perlakuan *shot peening* 8 10 dan 12 menit ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan grafik ukuran diameter spesimen DCP pada Gambar 4.23.

Tabel 4.7 Data hasil pengukuran diameter lubang sekrup spesimen DCP SS AISI 316L yang *dishot peening* sebelum *drilling*

Variasi perlakuan	Kode	Diameter Lubang (mm)								SD
		Diameter Lubang ke-						Rata-rata Diameter	Rata-rata	
		1	2	3	4	5	6			
8 Menit	4D	5.02	5.05	5.02	5.01	5.06	5.06	5.037	5.033	0.003
	21D	5.08	5.05	5.06	4.97	5.02	5.02	5.033		
	2D	5.01	5.04	4.93	5.05	5.06	5.09	5.030		
10 Menit	19D	4.92	5.03	5.04	5.00	5.04	5.06	5.015	5.036	0.018
	17D	5.08	5.07	5.03	5.05	5.02	5.01	5.043		
	7D	5.06	5.06	5.04	5.02	5.06	5.05	5.048		
12 Menit	18D	5.07	5.08	5.06	5.06	5.08	5.07	5.070	5.032	0.040
	14D	5.02	4.92	4.91	5.00	5.04	5.05	4.990		
	3D	5.03	5.01	5.05	5.00	5.06	5.06	5.035		

Tabel 4.7 menunjukkan hasil pengukuran diameter lubang sekrup spesimen DCP yang telah *dishot peening* sebelum proses *drilling* dengan rata-rata diameter lubang sekrup yang hampir sama pada setiap variasi perlakuan *shot peening*. Pada spesimen DCP yang *dishot peening* selama 8 menit lalu *drilling* menghasilkan diameter rata-rata 5.033 mm, untuk spesimen DCP yang *dishot peening* selama 10 menit lalu *drilling* menghasilkan diameter rata-rata 5.036 mm dan spesimen DCP yang *dishot peening* lebih lama (12 menit) lalu *drilling* menghasilkan diameter rata-rata 5.032 mm. Hasil pengukuran rata-rata diameter terbesar 5.036 mm (*shot peening* 10 menit) dengan rata-rata diameter terkecil 5.032 (*shot peening* 12 menit) memiliki selisih rata-rata diameter sangat kecil, yaitu 4  $\mu\text{m}$  sehingga bisa dikatakan diameter lubang sekrup spesimen DCP pada penelitian ini sama.



Gambar 4.23 Grafik nilai rata-rata diameter lubang sekrup spesimen DCP dengan variasi waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit

Grafik nilai rata-rata diameter lubang spesimen DCP pada setiap variasi waktu perlakuan *shot peening* pada Gambar 4.23 menunjukkan rata-rata diameter yang sama selain itu selisih rata-rata diameter yang sangat kecil ( $4 \mu\text{m}$ .) antara diameter yang terbesar dan terkecil sehingga bisa disimpulkan perlakuan *shot peening* tidak berpengaruh cukup besar untuk merubah ukuran diameter lubang karena proses *drilling* atau proses pembuatan lubang sekrup dilakukan setelah perlakuan *shot peening* selesai.

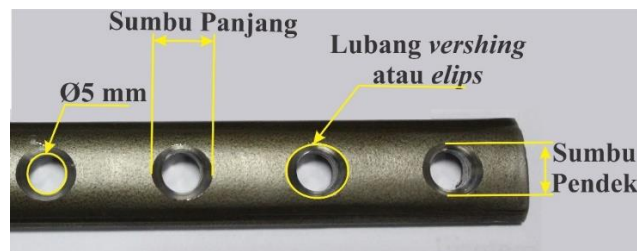
Selanjutnya, pengukuran sumbu panjang dan sumbu pendek pada lubang *versing (elips)* spesimen DCP. Untuk memperjelas posisi sumbu panjang dan sumbu pendek yang diukur maka disajikan bagian pengukuran sumbu panjang dan sumbu pendek lubang *vershing (elips)* pada Gambar 4.24. Hasil data pengukuran sumbu panjang dan sumbu pendek lubang *versing (elips)* disajikan pada Tabel 4.8 untuk data hasil pengukuran sumbu panjang dan Tabel 4.9 untuk data hasil pengukuran sumbu pendek.

Tabel 4.8 Data hasil pengukuran sumbu panjang lubang *versching* (*elips*) pada spesimen DCP SS AISI 316L yang *dishot peening* sebelum *didrilling*

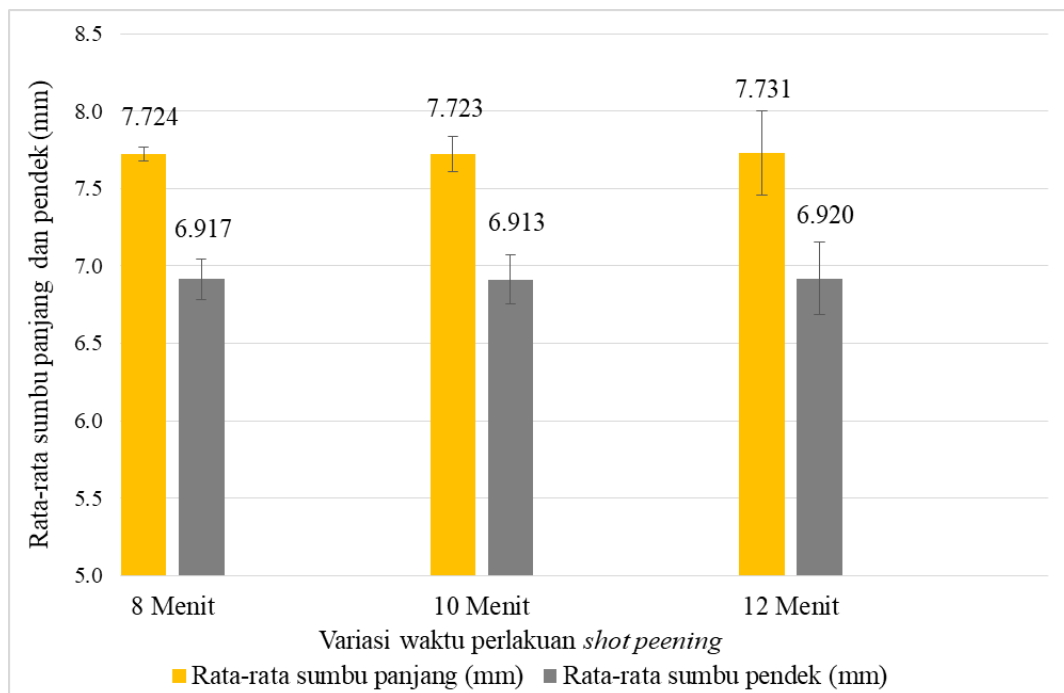
Variasi perlakuan	Kode	Sumbu panjang lubang <i>versching</i> ( <i>elips</i> ) (mm)							Rata-rata sumbu panjang	Rata-rata	SD
		Sumbu panjang lubang <i>versching</i> ke-									
		1	2	3	4	5	6				
8 Menit	4D	7.58	7.64	7.9	7.88	7.78	7.88	7.777	7.724	0.045	
	21D	7.62	7.6	7.78	7.64	7.76	7.78	7.697			
	2D	7.8	7.72	7.68	7.70	7.68	7.62	7.700			
10 Menit	19D	7.72	7.72	7.6	7.66	7.78	7.82	7.717	7.723	0.117	
	17D	7.64	7.64	7.74	7.80	8.02	8.22	7.843			
	7D	7.56	7.64	7.54	7.68	7.7	7.54	7.610			
12 Menit	18D	7.54	7.6	7.56	7.52	7.6	7.56	7.563	7.731	0.271	
	14D	7.82	7.92	8.04	8.04	8.2	8.24	8.043			
	3D	7.62	7.54	7.52	7.62	7.68	7.54	7.587			

Tabel 4.9 Data hasil pengukuran sumbu pendek lubang *versching* (*elips*) pada spesimen DCP SS AISI 316L yang *dishot peening* sebelum *didrilling*

Variasi perlakuan	Kode	Sumbu pendek lubang <i>versching</i> ( <i>elips</i> ) (mm)							Rata-rata sumbu pendek	Rata-rata	SD
		Sumbu pendek lubang <i>versching</i> ke-									
		1	2	3	4	5	6				
8 Menit	4D	6.9	6.84	7.3	6.86	7.38	6.94	7.037	6.917	0.131	
	21D	6.92	6.92	7.08	6.96	6.86	6.88	6.937			
	2D	6.96	6.76	6.74	6.86	6.72	6.62	6.777			
10 Menit	19D	6.9	6.9	6.7	6.88	6.9	6.92	6.867	6.913	0.159	
	17D	6.88	6.88	6.98	7.08	7.3	7.42	7.090			
	7D	6.7	6.8	6.8	6.78	6.82	6.8	6.783			
12 Menit	18D	6.66	6.68	6.74	6.84	6.78	6.88	6.763	6.920	0.235	
	14D	7.28	7.24	7.18	7.20	7.16	7.08	7.190			
	3D	6.8	6.7	6.78	6.80	6.78	6.98	6.807			



Gambar 4.24 Pengukuran sumbu panjang dan sumbu pendek lubang *vershing*



Gambar 4.25 Grafik nilai rata-rata sumbu panjang dan sumbu pendek lubang *vershing* (*elips*) pada spesimen DCP SS AISI 316L dengan variasi waktu perlakuan *shot peening* 8, 10 dan 12 menit.

Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 menunjukkan hasil pengukuran sumbu panjang & pendek lubang *vershing* (*elips*) dengan rata-rata sumbu panjang & pendek lubang *vershing* (*elips*) yang hampir sama pada setiap variasi perlakuan *shot peening* 8 menit dengan sumbu panjang 7.724 mm dan sumbu pendek 6.917 mm, pada spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* 10 menit menghasilkan sumbu panjang 7.723 mm dan sumbu pendek 6.913 mm dan untuk spesimen DCP dengan waktu perlakuan *shot peening* selama 12 menit menghasilkan sumbu panjang 7.731 mm dan sumbu pendek 6.920 mm. Hasil pengukuran sumbu panjang terbesar dan terkecil adalah 7.731 mm dan 7.723 mm dan memiliki selisih 8  $\mu\text{m}$

sementara sumbu pendek lubang *vershing* (elips) terbesar dan terkecil adalah 6.920 mm dan 6.913 memiliki selisih 7  $\mu$ m.

Grafik pada Gambar 4.25 menunjukkan bahwa pada spesimen DCP dengan perlakuan *shot peening* selama 8 10 dan 12 menit menunjukkan hasil rata-rata sumbu panjang dan sumbu pendek lubang *vershing* (*elips*) yang sama selain itu selisih antara sumbu panjang dan sumbu pendek yang terbesar dan terkecil sangatlah kecil (sumbu panjang 8  $\mu$ m dan sumbu pendek 7  $\mu$ m) sehingga bisa disimpulkan perlakuan *shot peening* tidak berpengaruh cukup besar untuk merubah ukuran rata-rata sumbu panjang dan sumbu pendek lubang *vershing* (*elips*) karena proses *drilling* atau proses pembuatan lubang *versing* (*elips*) dilakukan setelah perlakuan *shot peening* selesai, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.