

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian yang dilakukan oleh Nugroho dkk, (2016) tentang mikrostruktur dan kekerasan sambungan pengelasan gesek disimilar pipa tembaga/kuningan (Cu/Cu-Zn). Penelitian yang dilakukan dengan proses *continuous drive friction welding* (CDFW) menggunakan mesin bubut yang sudah di modifikasi dan diatur pada putaran 2000 rpm. Parameter pada penelitian ini menggunakan tekanan gesek 1471,68 MPa dengan waktu 25 detik, kemudian tekanan tempa 1962,24 MPa diberikan setelah tekanan gesek berakhir. Pengelasan tersebut diulang masing-masing satu kali dengan variasi waktu gesek lain 30, 40, 60 dan 70 detik. Pada pengujian mikrostruktur daerah pusat las (*weld centre zone*, WCZ) tidak dapat diamati adanya perubahan struktur mikro dan butiran rekristalisasi sangat halus. Pada waktu gesek 25-30 detik, ukuran dan bentuk butir pada daerah yang terpengaruh gaya mekanik dan panas (*thermomechanically affected zone*, TMAZ) semakin mengecil sehingga menghasilkan nilai kekerasan paling tinggi sebesar 57,1 VHN pada Cu dan 93,6 VHN pada Cu-Zn. Pada waktu 60 detik ukuran dan bentuk butir membesar dan terjadi rekristalisasi sehingga nilai kekerasannya terendah 36,3 VHN pada Cu dan 62,4 VHN pada Cu-Zn. Bentuk dan ukuran butir pada daerah HAZ cenderung membesar dan membulat mirip struktur mikro *base metal*-nya dengan nilai kekerasan berkisar 40-50 VHN di Cu dan 69-80 VHN di Cu-Zn.

Kurt dkk, (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh parameter pegelasan terhadap sifat mekanik dan mikro pada sambungan AISI 1010-ASTM dengan B22. Penelitian ini menggunakan metode CDFW dengan kapasitas mesin 250 kN dan kecepatan konstan 2500 rpm. Parameter dalam penelitian ini menggunakan tekanan gesek 10, 15 dan 20 MPa dengan waktu gesekan 3 detik. Lalu tekanan tempa 22, 25, dan 30 MPa dengan waktu tempa 1, 5, 7, 8 detik. Pada pengujian kekerasan, nilai kekerasan maksimum diperoleh pada sisi baja didekat garis tengah sambungan. Nilai kekerasan umumnya meningkat dengan

meningkatnya tekanan gesek dan tekanan tempa, tetapi pada penelitian ini dapat diamati bahwa nilai kekerasan menurun dengan meningkatnya waktu tempa. Pada pengujian tarik, secara umum kekuatan tarik meningkat dengan meningkatnya tekanan gesekan. Kekuatan tarik yang diperoleh sebesar 217 MPa pada variasi tekanan 20 MPa dan kekuatan sambungan las mencapai 70% dari kekuatan logam dasar.

Penelitian lain sambungan tembaga dengan baja pernah dilakukan oleh Yanni dan Sun, (2018). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan tembaga dengan baja dengan metode CDFW. Kecepatan rotasi yang digunakan untuk menyambung tembaga dengan baja yaitu 1900 rpm. Sementara parameter lain yang digunakan yaitu tekanan gesek 20, 28, 36, dan 44 MPa dengan waktu gesek selama 5 detik. Setelah tersambung sampel-sampel dari berbagai parameter pengelasan akan dianalisa karakteristik metalografinya dan diuji tarik. Hasil dari analisa metalografi didapatkan tidak ada perbedaan yang terlihat dalam morfologi antarmuka penyambungan beda jenis tembaga dengan baja pada tekanan gesek pengelasan yang berbeda. Analisis lebih lanjut yang diperoleh dari foto TEM menunjukkan bahwa tembaga dengan baja dapat saling berdifusi meskipun tembaga dengan baja memiliki suhu leleh yang berbeda jauh. Pengujian tarik menunjukkan kekuatan tarik meningkat dengan meningkatnya tekanan gesek. Kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada tekanan gesek 36 MPa sebesar 222 MPa atau 95,2% dari raw materialnya. Sementara pada tekanan gesek 20 dan 28 MPa mengalami kegagalan pada matrix tembaga saat pengujian tarik. Nilai kekerasan meningkat didekat antarmuka sambungan, hal ini disebabkan karena pengaruh panas yang mempengaruhi area butir sehingga menaikkan kekerasannya.

Sahin, (2009) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi mekanik pada sambungan *austenitic-stainless steel* dan tembaga. Parameter yang digunakan pada CDFW ini adalah parameter dengan hasil paling optimal yaitu pada putaran mesin 1410 rpm, tekanan gesek 75 MPa, waktu gesek 8,5 detik, tekanan tempa 160 MPa, dan waktu tempa 20 detik. Hasil pengujian mikro yang didapat *stainless steel* hampir tidak pernah cacat karena suhu leleh

tembaga lebih rendah dari *stainless steel*. Struktur mikro dari logam dasar terdiri dari austenitik. Lebar zona leleh dan zona yang terkena panas pada sisi tembaga lebih lebar dibanding pada sisi *stainless steel* yaitu 4.5 mm dan 0,2 mm. Variasi kekerasan pada bagian yang disambung dapat dilihat bahwa nilai kekerasan tembaga meningkat karena konduktivitas termal yang tinggi dan proses pendinginan yang cepat.

Selanjutnya Sahin, (2009) melakukan penelitian yang berjudul penyambungan material aluminium dan tembaga dengan pengelasan gesek. Parameter yang digunakan adalah parameter dengan hasil paling optimal yaitu tekanan gesek 60 MPa, waktu gesek 2,5 detik, tekanan tempa 120 MPa dan waktu tempa 15 detik. Hasil pengujian tarik menunjukkan kekuatan tarik optimal pada aluminium 70% dan tembaga 50% dibanding dengan logam induknya. Ketika tekanan gesek dan waktu gesek meningkat, kekuatan tarik meningkat hingga kekuatan puncak kemudian menurun dengan bertambahnya waktu dan tekanan gesek. Dari pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa lapisan pada sambungan aluminium dan tembaga yang termasuk senyawa intermetalik seperti CuAl_2 , CuAl dan Cu_9Al_4 terbentuk dalam paduan aluminium/tembaga yang berbeda. Pemendekan aksial pada sisi aluminium lebih besar dibanding sisi tembaga karena titik lebur aluminium lebih rendah dari pada tembaga. Sesuai dengan harapan, variasi kekerasan pada sisi aluminium lebih rendah dari pada sisi tembaga.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, penelitian mengenai sifat mekanis pengelasan gesek logam pipa tembaga masih jarang dilakukan. Pada penelitian sebelumnya, tembaga yang sering digunakan adalah silinder pejal. Dari penelitian tersebut secara umum kekuatan tarik meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan gesek kemudian menurun sedikit setelah mencapai nilai variasi parameter yang optimal. Penurunan mungkin disebabkan oleh deformasi plastis saat terkena tekanan tempa dan ini dapat dikaitkan dengan difusivitas baja yang lebih tinggi daripada tembaga. Kekerasan akan meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan gesek dan tekanan tempa. Tetapi kekerasan juga akan menurun seiring naiknya waktu tempa. Struktur mikro menunjukkan sambungan

las antara baja ringan dengan tembaga, difusi tembaga terhadap baja ringan bagus dengan meningkatnya waktu dan tekanan gesek. Oleh karena itu, perlu adanya penelitian mengenai penyambungan pipa tembaga menggunakan metode *continuous drive friction welding* untuk mendapat parameter yang tepat dan sambungan yang kuat.

2.2 Dasar Teori

Pengelasan adalah salah satu teknik penyambungan logam yang dilakukan untuk menyambung dua buah logam atau lebih (sejenis dan tidak sejenis) hingga mencapai titik rekristalisasi logam menggunakan energi panas. Pengelasan bisa dilakukan dengan atau tanpa bahan tambah (Arifin, 1997). Berdasarkan uraian dari *Deutch Industrie Normen* (DIN) pengelasan adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam paduan yang dilakukan dalam keadaan lumer atau cair. Kedua ujung logam yang akan dilas dilumerkan atau dilelehkan dengan logam itu sendiri atau dengan busur nyala sehingga kedua ujung atau bidang logam menjadi bidang masa yang kuat dan tidak mudah dipisahkan. Dalam proses pengerjaannya pengelasan dapat digolongkan menjadi beberapa jenis :

1. Pematrian adalah proses pengelasan dengan cara kedua logam yang disambung diikat dengan menggunakan logam yang titik cairnya lebih rendah dari logam yang disambungkan. Dalam proses pematrian ini logam yang disambungkan tidak ikut mencair dan hanya logam pengikatnya saja yang mencair. Contoh dari pematrian adalah *brazing* dan *soldering*.
2. Pengelasan cair adalah metode pengelasan dimana proses penyambungan logam dipanaskan dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas hingga logam mencair. Las busur elektroda terumpan, tak terumpan, dan las busur fluks adalah bagian dari jenis pengelasan cair.
3. Pengelasan tekan adalah proses pengelasan dengan cara memanaskan sambungan kemudian ditekan sehingga menjadi satu. Las titik, las gesek dan las tempa merupakan bagian dari las tekan.

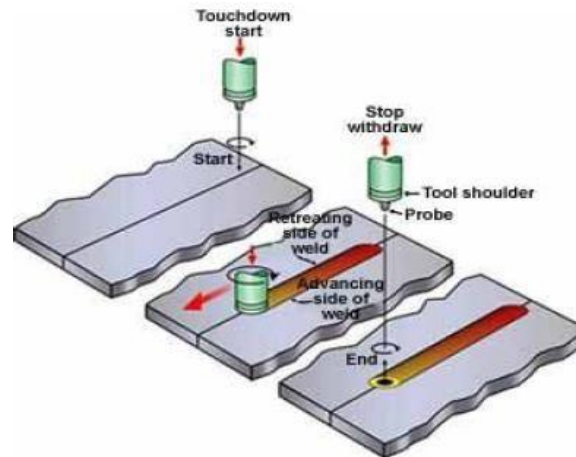
2.3 Friction Welding (FW)

Friction welding adalah proses pengelasan dalam kondisi padat (*solid-state*). Panas yang digunakan untuk menyambung logam dihasilkan dari gesekan mekanis antarmuka logam tersebut. Penyambungan terjadi saat kedua permukaan logam yang bergesekan telah mencapai termoplastis akibat kecepatan rotasi dan tekanan aksial. Metode ini bergantung pada kecepatan putaran yang dikonversi menjadi energi panas untuk membentuk lasan, karena tidak ada panas dari sumber lain (Elmer, 1993). Berdasarkan metode penggesekannya, pengelasan gesek (*friction welding*) memiliki beberapa jenis diantaranya :

1. *Friction Stir Welding* (FSW)
2. *Linear Friction Welding* (LFW)
3. *Continuous Drive Friction Welding* (CDFW)

2.3.1. Friction Stir Welding (FSW)

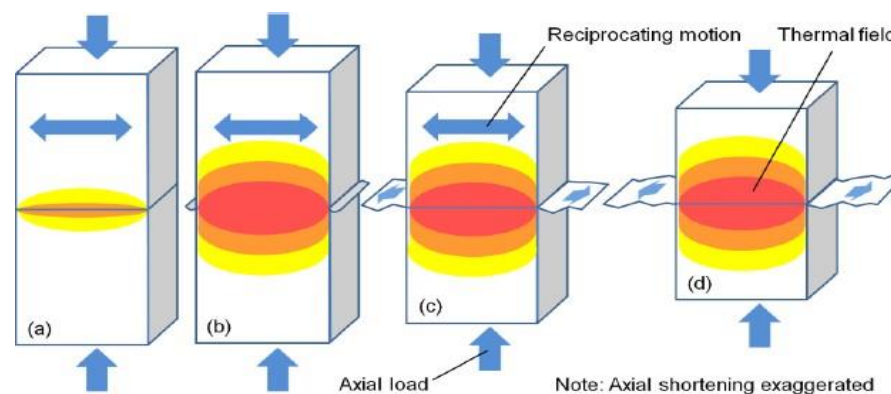
Friction stir welding (FSW) merupakan metode pengelasan fasa padat, yaitu dengan memanfaatkan gesekan antara benda kerja yang diam dengan *tool* yang bergerak dan berputar. Proses pengelasan ini bekerja pada suhu yang relatif rendah. *Tool* berputar dengan kecepatan konstan dan bergerak melintang pada jalur pengelasan dari material yang akan disambung. Logam dasar dipanaskan hingga suhunya mencapai 80% dari titik leburnya, sehingga menjadi lembut dan mudah disambung. Panas yang dihasilkan berasal dari benda kerja dan *tool* yang dilengkapi dengan pin berputar dan diberi tekanan aksial pada daerah pengelasan. Panjang pin lebih rendah dari pada tebal benda kerja yang di sambung agar pin tidak bersentuhan dengan alas. Temperatur panas yang ada pada *tool* tidak membuat *tool* leleh dan menyatu dengan benda kerja. *Tool* akan menempa benda kerja sehingga terbentuklah fasa padat yang menghasilkan struktur mikro lebih kompleks dibandingkan logam induk. Sambungan yang dihasilkan dengan metode FSW memiliki sifat mekanis bagus dan kuat (Wijayanto, 2012).



Gambar 2.1 Proses *friction stir welding* (Wijayanto, 2012)

2.3.2. Linear Friction Welding (LFW)

Linear friction welding (LFW) adalah metode penyambungan logam *solid-state* dimana komponen digerakkan secara melintang resiprokting ditekan terhadap komponen stasioner atau komponen yang diam. Panas dihasilkan melalui gesekan dan hanya sedikit menghasilkan aksial ‘*burn-off*’ atau pemendekan. Panas dan plastisitas gesekan pada antarmuka melunakkan material sehingga berdifusi dan membentuk flash lalu *thermo mechanically affected zone* (TMAZ) dan *heat-affected zone* (HAZ) meluas. Akhirnya amplitudo dengan cepat berkurang menjadi nol, dan tekanan tempa memperkuat sambungan atarmuka (Jedrasiak dkk, 2018).

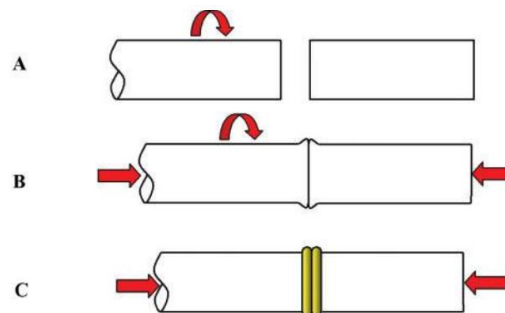


Gambar 2.2 Proses *linear friction welding* (LFW): (a) Fase awal, (b) Fase transisi, (c) Fase equilibrium, (d) Perlambatan dan fase tekanan tempa (Jedrasiak dkk., 2018)

Seperti metode las gesek lainnya, proses ini memiliki keunggulan dibandingkan pengelasan fusi seperti menghindari pembekuan dan kerusakan batas butir, porositas, mikrosegregasi, dan penggiliran butir. Proses ini sangat cepat dan dapat diulang, mudah dikendalikan, hemat energi, tanpa gas pelindung dan logam pengisi.

2.3.3. Continuous Drive Friction Welding (CDFW)

Continuous drive friction welding (CDFW) adalah jenis penyambungan dua logam yang prosesnya terjadi pada saat benda kerja yang berputar dikontakkan dengan benda kerja yang tidak berputar dibawah tekanan konstan sampai kedua benda kerja mencapai suhu pengelasan kemudian putaran dihentikan dan diberi tekanan tempa (Maleekian, 2007).

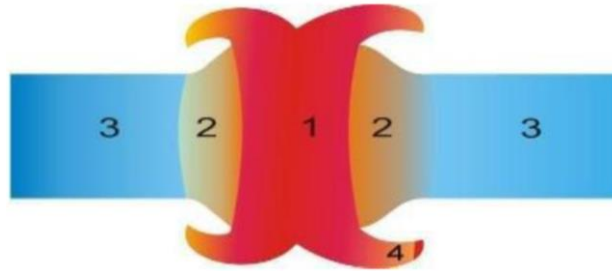


Gambar 2.3 Proses continuous drive friction welding (Maalekian, 2007)

Gambar 2.3 menunjukkan sproses pengelasan CDFW dimana pemasangan benda kerja pada mesin, salah satu benda kerja akan dipasang pada cekam berputar dan cekam diam. Gambar A: benda kerja diputar hingga mencapai kecepatan yang telah ditentukan; Gambar B: benda kerja disatukan dengan cara benda kerja yang diam diberi tekanan aksial dan bergesekan dengan benda kerja yang berputar. Panas yang terjadi akibat gesekan akan terus meningkat selama tekanan aksial diberikan hingga mencapai termoplastis dan terjadi ikatan antara kedua permukaan yang bergesekan; Gambar C: setelah parameter pengelasan yang telah ditetapkan terpenuhi, selanjutnya putaran mesin dihentikan.

Pada proses penyambungan CDFW terjadi gesekan antar dua buah permukaan dan menimbulkan panas yang dapat mempengaruhi sifat mekanis

dan metalurgi dari material. Tetapi, tidak semua pengaruh panas pada CDFW merubah sifat mekanis dan metalurgi dari material. Daerah yang terkena pengaruh saat pengelasan disebut daerah pengelasan. Daerah pengelasan menurut gambar 2.4 dibagi menjadi 4 bagian, yakni:



Gambar 2.4 Daerah pengelasan pada *continuous drive friction welding* (Purnomo, S., 2016)

1. Daerah inti pengelasan (*weld nugget*) adalah daerah yang mengalami pelelehan dan pembekuan. Pada daerah ini struktur mikro yang terjadi adalah struktur cor. Struktur mikro pada logam las dicirikan dengan adanya struktur berbutir panjang. Struktur ini berawal dari logam induk yang tumbuh ke arah daerah inti.
2. *Heat Affected Zone* (HAZ) adalah daerah yang mendapat pengaruh panas yang dihasilkan dari daerah inti. Sehingga struktur mikro dan sifat mekanisnya berubah. HAZ adalah daerah yang paling kritis pada sambungan las, selain terjadi perubahan sifat strukturnya juga berubah. Namun, secara umum sifat dan struktur panas efektif dipengaruhi lamanya pendinginan dan komposisi dari logam induk.
3. Logam induk adalah daerah yang terkena pengaruh panas dan suhu pengelasan tetapi tidak menyebabkan sifat mekanik dan struktur mikro.
4. *Flash* merupakan lelehan yang keluar dari pusat bidang gesekan dan tempaan.

2.3.4. Aplikasi Pengelasan Gesek

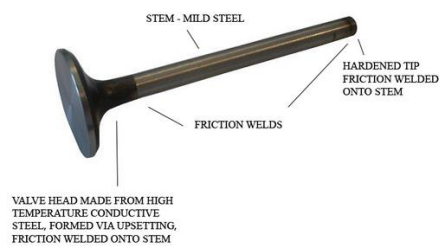
Komponen dibawah ini merupakan contoh dari aplikasi pengelasan gesek :



a. Gardan mobil
(www.gatwicktechnologies.com)



b. Automotive gears
(www.gatwicktechnologies.com)



c. Katup isap
(www.gatwicktechnologies.com)



d. Drive shaft
(www.gatwicktechnologies.com)



a. Electricals connector (Mehmet dkk., 1980)

Gambar 2.5 Aplikasi Pengelasan Gesek

2.3.5. Kelebihan dan Kekurangan Pengelasan Gesek

- a. Pengelasan gesek memiliki kelebihan sebagai berikut:
 5. Hemat energi dan biaya.
 6. Cocok untuk produksi skala besar.
 7. Tidak memerlukan logam pengisi.
 8. Tidak menghasilkan asap dan uap.
 9. Dapat dilakukan pada logam yang berbeda jenis.
 10. Peleburan pengelasan merata antara tepi dan tengah.
 11. Waktu pengelasan relatif singkat.
 12. Daerah HAZ yang sempit.
- b. Adapun kekurangan dari las gesek adalah sebagai berikut:
 1. Pengelasan untuk pipa memungkinkan terjadinya flash di dalam pipa.
 2. Benda yang disambung harus simetris.
 3. Permukaan benda yang akan disambung harus halus.

2.4 Tembaga

Tembaga merupakan konduktor panas dan listrik yang baik serta memiliki ketahanan korosi yang baik. Tembaga murni memiliki sifat yang lunak dan halus, selain itu permukaannya berwarna jingga kemerahan. Ion tembaga dapat terlarut dalam air. Tembaga mempunyai satu elektron orbital-s pada kulit atom d dengan sifat konduktivitas listrik yang baik. Penggunaan tembaga terbesar adalah untuk kabel listrik, atap, perpipaan serta mesin industri. Tembaga biasanya digunakan dalam bentuk logam murni, tetapi jika ingin kekerasannya lebih tinggi maka biasanya dipadukan dengan elemen lain. Pada penelitian ini material tembaga yang digunakan adalah tembaga ASTM B280.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Tembaga ASTM B280 – Berat %

Element	Copper UNS No.		
	C10200 ^A	C12000	C12200
Copper, ^B min	99.95	99.90	99.9
Phosphorus	. . .	0.004–0.012	0.015–0.040

^A Oxygen shall be 10 ppm max.

^B Copper + silver.

C10200: Oksigen bebas tanpa deoxidant sisa

C12000: Fosfor mengalami deoksidasi, fosfor sisa rendah

C12200: Fosfor mengalami deoksidasi, fosfor sisa tinggi

Sumber: *ASTM International B280*

2.5 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikro dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik, fisis, dan struktur dalam material. Struktur mikro adalah gabungan struktur kristal yang terdiri dari banyak kristal dan fasa-fasa didalam logam. Kondisi dari suatu logam dapat diketahui dengan mengamati struktur mikronya. Pengamatan struktur mikro logam menggunakan mikroskop dengan perbesaran yang bervariasi. Pengujian mikro dapat menunjukkan perubahan struktur setelah adanya perlakuan terhadap material tersebut. Benda uji harus melewati tahap-tahap preparasi sebelum diamati pada mikroskop optik. Tujuannya agar benda uji terlihat dengan jelas pada saat diamati, karena sangatlah penting hasil gambar pada metalografi. Pengujian struktur mikro ini memiliki langkah sebagai berikut (Syarifudin, 2017):

1. Pemotongan spesimen

Pemotongan dilakukan untuk memperkecil ukuran spesimen sehingga pengujian mikro fokus pada satu penampang melintang. Pemotongan spesimen menggunakan gergaji agar struktur mikronya tidak berubah.

2. Pengamplasan spesimen

Pengamplasan dilakukan untuk mendapatkan permukaan penampang yang halus dan mampu memantulkan cahaya keatas. Pada saat pengamplasan spesimen, digunakan cairan pendingin agar struktur mikronya tidak berubah akibat gesekan antara amplas dengan permukaan spesimen.

3. Pemolesan spesimen

Pemolesan dilakukan untuk membersihkan sisa kotoran setelah proses

pengamplasan. Pemolesan dilakukan dengan autosol.

4. Etsa

Etsa adalah penghalusan butir secara selektif dan terkendali pada permukaan spesimen. Penghalusan ini bertujuan untuk memperjelas struktur mikro spesimen.

2.6 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan Untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap beban yang dihasilkan dari penekanan. Beban dari penekanan akan menyebabkan material mengalami deformasi plastis. Deformasi plastis adalah sesuatu hal yang terjadi pada material yang mengalami perubahan struktur mikro secara permanen akibat adanya pembebanan dan pemberian gaya. Sementara kekerasan adalah salah satu sifat mekanik dari suatu material yang harus diketahui apabila material mengalami gesekan dan deformasi plastis.

Penelitian ini menggunakan pengujian kekerasan vikers. Pengujian kekerasan dengan metode *vickers* bertujuan untuk menentukan kekerasan material dan daya tahan material terhadap indentor. Pengujian kekerasan vikers menggunakan indentor berbentuk piramida intan dan beralaskan bujursangkar. Tapak tekan dari pengujian ini berbentuk bujursangkar dengan sudut 136° dan pengukurannya diukur dari kedua diagonal tapak tekannya. Nilai kekerasan vikers (*vickers hardness number*, VHN) dapat dicari dengan persamaan berikut (Haryadi, 2006).

$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1.854P}{d^2} \dots\dots\dots(2.1)$$

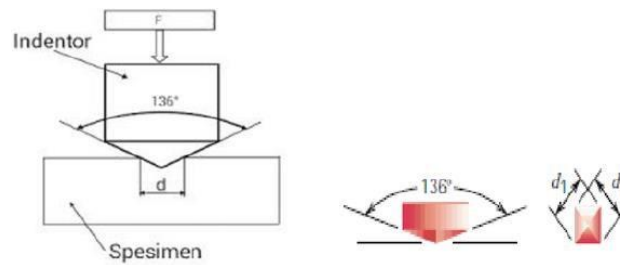
Keterangan:

P = Beban yang digunakan (kg)

d = Panjang diagonal rata-rata

θ = Sudut diantara permukaan intan = 136°

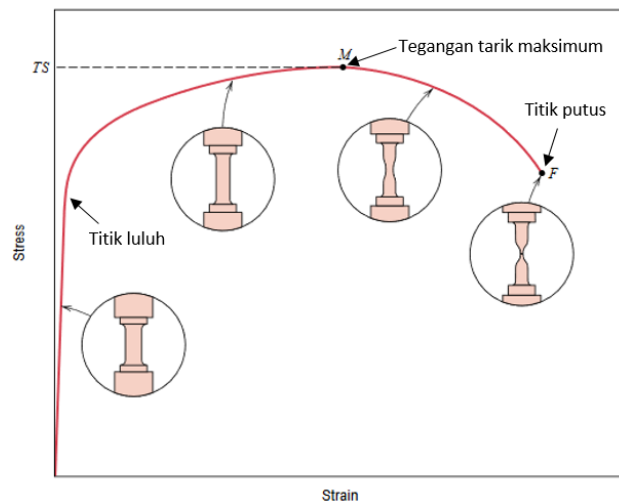
Pengujian kekerasan *vickers* dilakukan dengan cara menekan benda uji atau spesimen dengan indentor intan yang berbentuk piramida dengan alas segi empat dan besar sudut dari permukaan-permukaan yang berhadapan 136° . Penekanan indentor pada material akan menghasilkan suatu jejak pada permukaan material uji.



Gambar 2.6 Skema uji kekerasan dan berbentuk indentor vickers
(Callister, 2001)

2.7 Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik suatu material terhadap gaya tarik yang diberikan dengan cara menarik material yang diuji hingga putus. Pengujian tarik sudah mengalami standarisasi di seluruh dunia, misalnya *ASTM* (*American Society for Testing and Material*), *JIS* (*Japan International Standar*) dan *DIN* (*Deutch Industrie Normen*). Ukuran spesimen pada setiap standar memiliki ukuran yang bermacam-macam. Pemberian gaya tarik pada material yang diuji mengakibatkan material spesimen mengalami deformasi lokal hingga putus. Hubungan antara gaya tarik dengan pertambahan panjang spesimen ditunjukkan pada gambar 2.7. Melalui sifat mekanik suatu bahan bisa diketahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap gaya tarik dan mengetahui material yang bertambah panjang (Sastranegara, 2010).



Gambar 2.7 Grafik pengujian tarik (Callister, 2001)

Dalam pengujian tarik kemampuan maksimum material untuk menahan beban yang diberikan disebut *Ultimate Tensile Strength*. Dari pengujian tarik yang dilakukan akan didapatkan data sebagai berikut:

1. Batas proporsionalitas (*proportionality limit*)
Batas tegangan dan regangan yang memiliki hubungan proporsional satu dengan lainnya disebut batas proporsionalitas. Apabila tegangan bertambah maka regangan juga akan bertambah.
2. Batas elastis (*elastic limit*)
Batas elastis adalah daerah dimana pertambahan panjang suatu bahan material akan kembali apabila tegangan luar dihilangkan. Apabila tegangan terus bertambah maka material akan mengalami deformasi plastis.
3. Titik luluh (*yield point*)
Titik luluh merupakan daerah dimana material akan terus mengalami deformasi walaupun tanpa adanya beban tambahan.
4. Tegangan luluh (*yield stress*)
Tegangan luluh adalah tegangan yang mengakibatkan material menunjukkan fenomena luluh.
5. Kekuatan luluh (*yield strength*)
Kekuatan luluh merupakan kekuatan material untuk menahan deformasi plastis apabila suatu bahan diberikan beban tarik, puntir dan bending.

6. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*)

Kekuatan tarik maksimum adalah kekuatan suatu material menahan beban maksimal yang diberikan sebelum terjadinya patah.

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

σ = Kekuatan tarik maksimum (MPa)

F = Gaya maksimum (N)

A = Luas penampang (mm²)

7. Keuletan (*ductility*)

Keuletan adalah fenomena material logam untuk menahan deformasi sebelum terjadi patahan.

8. Kekuatan putus (*breaking strength*)

Kekuatan putus dapat ditentukan dengan cara membagi beban saat material mengalami putus dengan luas penampang awal.

9. Elongnasi (presentase perpanjangan)

Elongnasi adalah pertambahan panjang ukur setelah perpatahan terhadap panjang awal. Elongnasi dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\varepsilon = \left[\frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100\% \right] \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

ε = Regangan (%)

L_f = Panjang ukur akhir material pengujian (mm)

L_0 = Panjang ukur awal material pengujian (mm)

10. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas adalah kekuatan dari suatu material tertentu. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas material maka material tersebut akan semakin kaku. Modulus elastisitas hanya dapat dirubah dengan merubah struktur suatu material.

11. Modulus kelentingan

Modulus kelentingan adalah kemampuan suatu material menyerap energi dari luar tanpa terjadi kerusakan.

12. Modulus ketangguhan

Kemampuan suatu material menyerap energi dari luar hingga terjadi perpatahan disebut modulus ketangguhan . Modulus ketangguhan yang tinggi akan mengakibatkan distorsi terlebih dahulu apabila suatu material diberikan pembebanan berlebih sebelum terjadi patahan. Apabila modulus ketangguhan suatu material rendah dan material tersebut diberikan beban berlebih maka material akan mengalami patahan tanpa adanya peringatan.