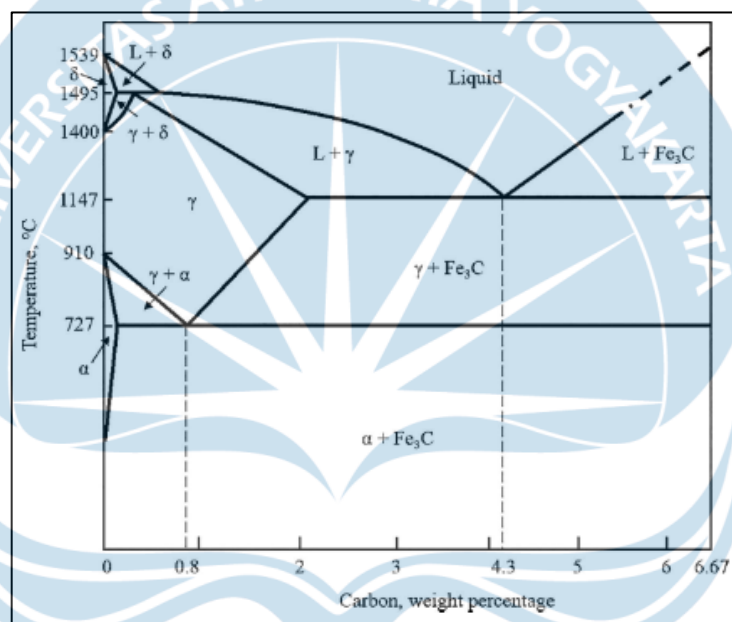


BAB 3 LANDASAN TEORI

3.1. Baja dan Diagram Phase

Iron carbide merupakan kombinasi antara besi murni (Fe) dan karbon (C). Bryson (2009) menyatakan bahwa besi murni bersifat lunak, namun penambahan unsur karbon meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Penambahan unsur karbon pada besi dapat mencapai 6,67%. Jumlah unsur karbon mempengaruhi struktur dan sifat besi. Perubahan struktur (*phase*) berdasarkan kadar karbon dan temperatur ditunjukkan pada Gambar 12 menurut Ray dkk (2020) berikut.



Gambar 12. Diagram phase kesetimbangan besi-karbon

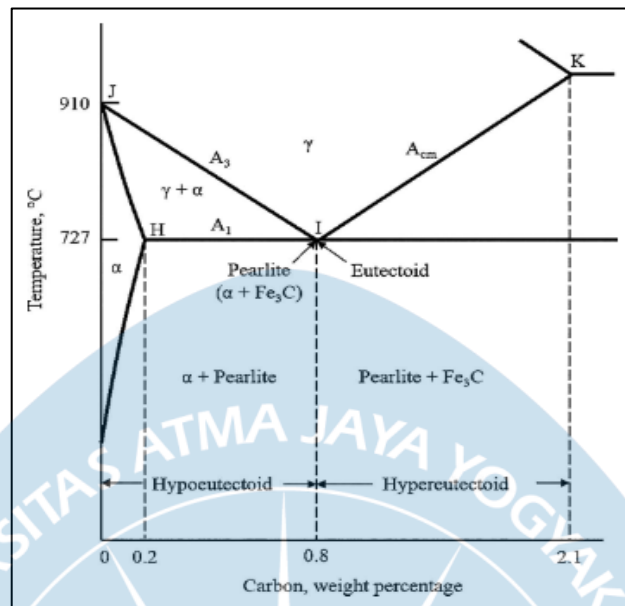
Secara garis besar, *iron carbide* dibagi menjadi 2 golongan, yaitu:

- a. Baja (baja *eutectoid*), dengan kadar karbon antara 0,08% hingga 2,07 %.
- b. Besi tuang (*cast iron*), dengan kadar karbon 2,07% hingga 6,67%.

Bryson (2009) membagi baja dalam 3 kategori berdasarkan jumlah unsur karbon pada baja, yaitu:

- a. Baja karbon rendah, dengan kadar karbon 0,08% hingga 0,25%.
- b. Baja karbon sedang, dengan kadar karbon 0,25% hingga 0,60%.
- c. Baja karbon tinggi, dengan kadar karbon 0,60% hingga 2,07%.

Diagram kesetimbangan baja secara spesifik ditunjukkan pada Gambar 13 berikut.



Gambar 13. Diagram phase kesetimbangan besi-karbon pada baja

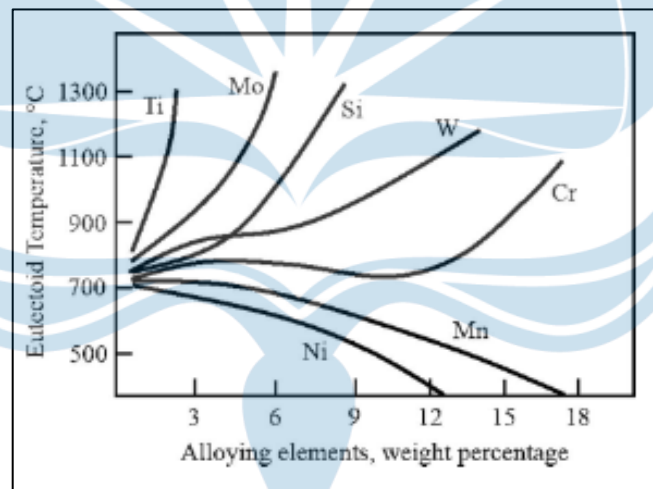
Menurut Ray dkk (2010), Gambar 13 menunjukkan bahwa struktur (*phase*) baja berubah sesuai dengan kadar karbon baja dan temperatur baja. Temperatur 727°C (pada beberapa sumber lain menyebutkan 721°C dan 723°C) merupakan temperatur kritis, dimana pada temperatur tersebut struktur *austenite* mulai muncul. Perubahan struktur (*phase*) pada baja sangat mempengaruhi proses perlakuan panas, terutama proses *hardening*. Diagram *phase* membagi baja *eutectoid* ke 2 kelompok yaitu *hypoeutectoid* dan *hypereutectoid*. *Hypoeutectoid* adalah baja dengan kadar karbon kurang dari 0,8% (beberapa sumber lain menyebutkan 0,85%) dan memiliki struktur atau *phase pearlite* dan *ferrite*. Baja *hypereutectoid* merupakan baja dengan kadar karbon antara 0,8% hingga 2,07%, dan memiliki *phase pearlite* dan *cementite*.

Selain unsur karbon, beberapa unsur lain dipadukan pada baja. Unsur-unsur tersebut dipadukan dengan tujuan mendapatkan keunggulan sifat mekanik tertentu. Beberapa unsur yang dipadukan dengan baja antara lain: kromium, wolfram, mangan, nikel, molibdenum, dan lainnya. Tabel 3 berikut menunjukkan kontribusi unsur-unsur yang dipadukan pada baja.

Tabel 3. Kontribusi unsur paduan pada baja (Bryson, 2009)

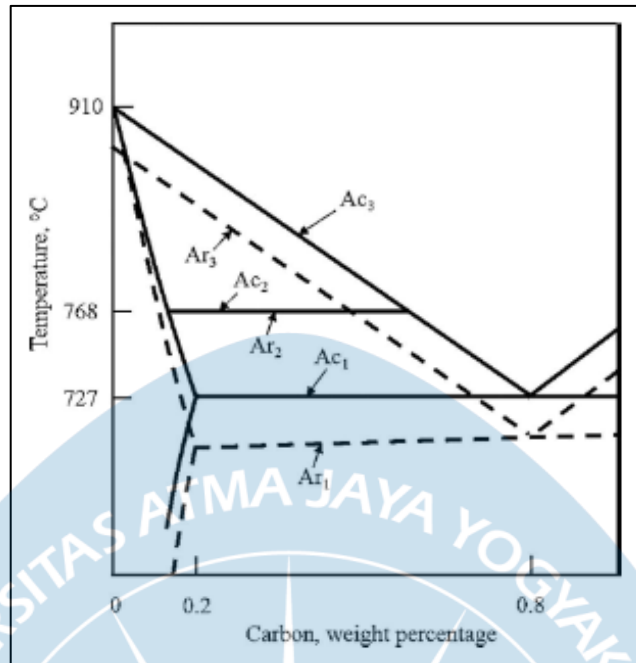
The Element*	The Effect
Carbon	.06 to .40% allows shallow case hardening. .40 to .60% allows easier case hardening. .60 to .80% increases hardenability. .80% up increases wear, not hardness.
Manganese	Increases deeper hardening abilities.
Silicon	Adds strength and toughness.
Chromium	Adds wear resistance and toughness.
Nickel	Adds toughness and some wear.
Tungsten	Adds wear resistance.
Vanadium	Refines grain structure.
Molybdenum	Adds heat resistance and hardenability.
Cobalt	Imparts heat resistance.
Columbium	Adds wear resistance.
Sulfur, Lead, Phosphorus, Calcium	Imparts better machinability.

Penambahan unsur paduan juga memberikan dampak perubahan temperatur pada diagram kesetimbangan. Gambar 14 berikut menunjukkan pengaruh spesifik unsur paduan terhadap perubahan temperatur baja *eutectoid*.



Gambar 14. Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur *austenite*

Hal ini berpengaruh pada diagram kesetimbangan besi-karbon pada baja. Terjadi pergeseran garis ubah Ac_1 dan Ac_3 pada area baja *hypoeutectoid* yang menyebabkan pergeseran temperatur ubah struktur atau *phase*. Hal ini ditunjukkan secara spesifik pada Gambar 15 berikut.



Gambar 15. Pergeseran garis ubah Ac1 dan Ac3 akibat unsur paduan

3.1.1. ASSAB 705

Material ASSAB 705 adalah produk baja dari PT. ASSAB Steel Indonesia dan termasuk dalam golongan baja *machinery steel*. Katalog material merekomendasikan material ini sebagai bahan baku pembuatan komponen seperti: *spindles, bolt and studs, gears, axle shaft, crankshaft, connecting rods, arbors*, dan lain sebagainya. Material didistribusikan pada status *pre-hardened steel* dengan kekerasan 270-310 HB (setara 28-33 HRC) . Tabel 4 berikut menampilkan komposisi kimia penyusun dan Tabel 5 menampilkan data kekuatan mekanik material material ASSAB 705, sesuai dengan katalog resmi PT. ASSAB Steel Indonesia.

Tabel 4. Komposisi kimia penyusun baja ASSAB 705

Material	Kadar (%)					
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si
ASSAB 705	0,4	0,7	0,8	1,8	0,25	-

Tabel 5. Kekuatan mekanik baja ASSAB 705

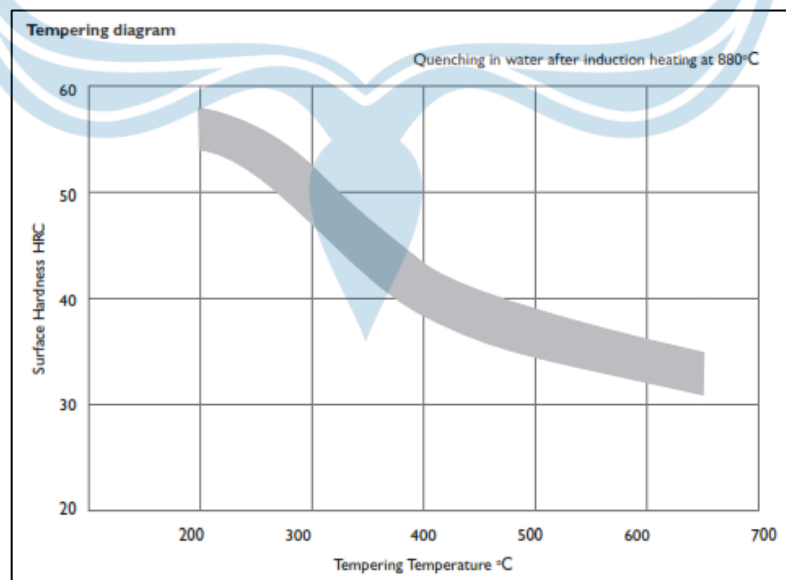
Material	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Impact Strength (J/cm ²)
ASSAB 705	≥ 850	≥ 980	≥ 55

Berdasarkan kadar karbon yang terkandung, baja ASSAB 705 termasuk dalam tipe baja karbon sedang. Baja ASSAB 705 merupakan baja paduan rendah (*low alloy steel*) karena total kadar paduan yang dimiliki kurang dari 5%. Komposisi karbon dan paduan mempengaruhi temperatur perlakuan panas material. Tabel 6 berikut menampilkan data proses perlakuan panas yang direkomendasikan oleh PT. ASSAB Steel Indonesia (lampiran 2).

Tabel 6. Data rekomendasi perlakuan panas ASSAB 705

Proses	Rekomendasi
<i>Normalizing</i>	840° – 870° C
<i>Soft Annealing</i>	690° – 720° C
<i>Stress Relieving</i>	525° – 650° C
<i>Hardening/Austenite</i>	830° – 860° C
<i>Quenchant</i>	<i>water, oil-quench at 50° - 100° C</i>
<i>Tempering</i>	200° - 675° C

Katalog material menyebutkan bahwa pendinginan dengan media air dan/atau polimer akan menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi karena pendinginan yang lebih cepat. Temperatur temper mempengaruhi hasil nilai kekerasan. Gambar 16 berikut menampilkan grafik pengaruh temperatur temper terhadap hasil nilai kekerasan.



Gambar 16. *Tempering diagram* ASSAB 705

3.1.2. ASSAB 709

Produk baja *machinery steel* lain yang disuplai oleh PT. ASSAB Steel Indonesia ialah ASSAB 709. Baja ASSAB 709 termasuk dalam baja karbon sedang dengan level paduan *low alloy steel*. Kesimpulan ini diperoleh berdasarkan komposisi kimia material ASSAB 709 yang ditampilkan pada Tabel 7 berikut sesuai data pada lampiran 2.

Tabel 7. Komposisi kimia penyusun baja ASSAB 709

Material	Kadar (%)					
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si
ASSAB 709	0,4	0,8	1,0	-	0,2	0,2

Komposisi kimia yang berbeda dengan ASSAB 705 memberikan nilai kekerasan awal dan kekuatan mekanik yang berbeda pada material ASSAB 709. Nilai kekerasan material ASSAB 709 *pre-hardened steel* saat disuplai adalah 300-360 HB (setara 32-39 HRC). Kekuatan mekanik material ditampilkan pada Tabel 8 berikut.

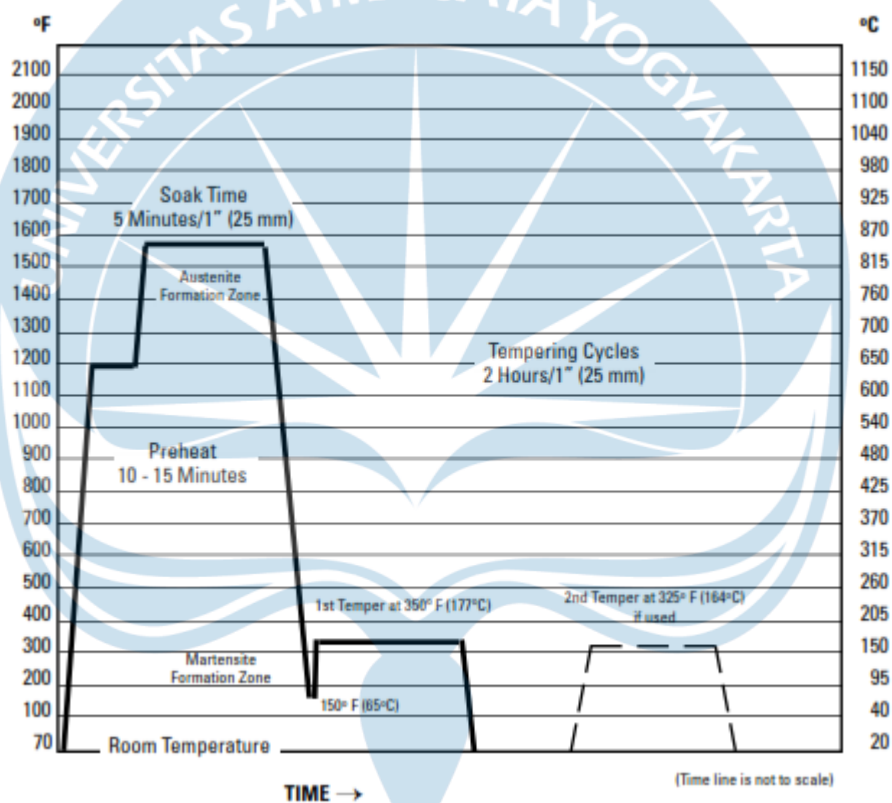
Tabel 8. Kekuatan mekanik baja ASSAB 709

Material	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Impact Strength (J/cm ²)
ASSAB 709	≥ 750	≥ 950	≥ 55

Material ASSAB 709 memiliki komposisi kimia yang berbeda dan kekuatan mekanik yang lebih rendah dibandingkan dengan ASSAB 705. Namun demikian, katalog ASSAB 709 merekomendasikan proses perlakuan panas, diagram temper, dan aplikasi material yang sama dengan ASSAB 705. Hal ini menimbulkan persepsi bahwa kedua material ini sama dan dapat saling disubstitusikan.

Secara khusus Bryson (2009) dalam bukunya membahas proses *hardening* material AISI 4140 yang merupakan padanan material ASSAB 709. Proses *hardening* diawali dengan proses *pre-heating* dengan temperatur yang disarankan ialah 1200°F (650°C) selama 10-15 menit. Proses dilanjutkan dengan proses pemanasan pada temperatur *austenite* 1575°F atau 855°C. Pastikan material telah mencapai temperatur *austenite*, caranya ialah dengan memeriksa temperatur menggunakan *thermometer* laser khusus atau secara visual dengan cara membandingkan warna material dengan warna bagian dalam tungku pemanas. Indikasinya ialah warna yang sama (oranye terang) mengindikasikan temperatur

bahan yang sama. Setelah temperatur *austenite* tercapai, *holding time* diterapkan untuk memastikan temperatur pada bagian luar material sama dengan temperatur di bagian inti material. Menurut Bryson (2009) waktu tahan disesuaikan dengan ketebalan material, yaitu 5 menit per *inch* pada masing-masing penampang. Media *quench* yang disarankan ialah *oil*, dan pendinginan dilakukan hingga temperatur mencapai 400°F (205°C). Proses temper harus segera dilakukan untuk mencegah terjadinya *crack* pada material. Proses temper dilakukan sebanyak 2 kali, dan proses temper kedua menggunakan temperatur lebih rendah 25°F daripada temperatur temper pertama. Proses *hardening* menurut Bryson (2009) dijelaskan melalui Gambar 17 berikut ini.



Gambar 17. Grafik proses *hardening* ASSAB 709 menurut Bryson (2009)

Material ASSAB 705 dan ASSAB 709 termasuk dalam golongan baja karbon sedang *hypoeutectoid* karena kadar karbon yang berada di jangkauan 0,25% hingga 0,60%. Rajan dkk (2011) membagi baja karbon sedang ke dalam dua golongan berdasarkan respon material terhadap proses *heat treatment*. Golongan pertama ialah baja dengan kadar karbon 0,25% hingga 0,35% dan golongan kedua memiliki kadar karbon berkisar 0,35% hingga 0,6%. Golongan kedua merespon baik proses *heat treatment*, sedangkan golongan pertama tidak. Golongan kedua

memiliki kombinasi sifat kuat, liat, dan tangguh, yang dapat disesuaikan nilainya melalui proses *hardening* dan temper. Serupa dengan katalog ASSAB, menurut Rajan dkk (2011) baja karbon sedang golongan kedua diaplikasikan untuk *spindle, gears, bolts, shaft, axle, pinions, cylinder, cams, crank shaft, keys, machine tools, rifle barrel*, dan komponen lainnya. Berikut ditampilkan komposisi kimia dan temperatur *heat treatment* pada baja karbon medium, menurut Rajan dkk (2011).

Tabel 9. Parameter *hardening* untuk baja karbon sedang

Composition	Annealing temperature (°C)	Normalizing temperature (°C)	Hardening temperature (°C)	Quenching medium	Tempering temperature (°C)
0.25–0.30%C	880–900	880–900	860 – 880	Oil	500–650
			850 – 870	Water	
0.30–0.35%C	870–890	870–890	850 – 870	Oil	500–650
			840 – 860	Water	
0.35–0.40%C	860–880	860–880	850 – 870	Oil	500–650
			840 – 860	Water	
0.40–0.45%C	850–870	850–870	840 – 860	Oil	500–650
			830 – 850	Water	
0.45–0.50%C	840–860	840–860	830 – 850	Oil	500–650
			820 – 840	Water	
0.50–0.55%C	830–850	830–850	820 – 840	Oil	500–650
			810 – 830	Water	
0.55–0.60%C	820–840	820–840	810 – 830	Oil	500–650
			800 – 820	Water	
0.60–0.65%C	810–830	810–830	800 – 820	Oil	500–650
			790 – 810	Water	

Tabel 9 menunjukkan bahwa temperatur *austenite* yang disarankan untuk ASSAB 705 dan ASSAB 709 ialah 840°C - 870°C dengan media pendinginan *oil* atau 830°C - 860°C dengan media pendinginan *water*.

3.2. Pengerasan (*Hardening*)

Ray dkk (2020) mengidentifikasi proses *hardening* sebagai proses pemanasan baja hingga temperatur *austenite*, kemudian ditahan pada temperatur tersebut untuk membentuk struktur *austenite* yang seragam, diikuti dengan pendinginan yang lebih cepat dari kecepatan pendinginan kritis agar *austenite* berubah menjadi *martensite* yang bersifat keras. Nilai kekerasan dari *martensite* bergantung pada jumlah kadar karbon yang dimiliki material. Proses *hardening* menghasilkan nilai kekerasan tinggi dengan tujuan memperoleh sifat ketahanan aus yang tinggi.

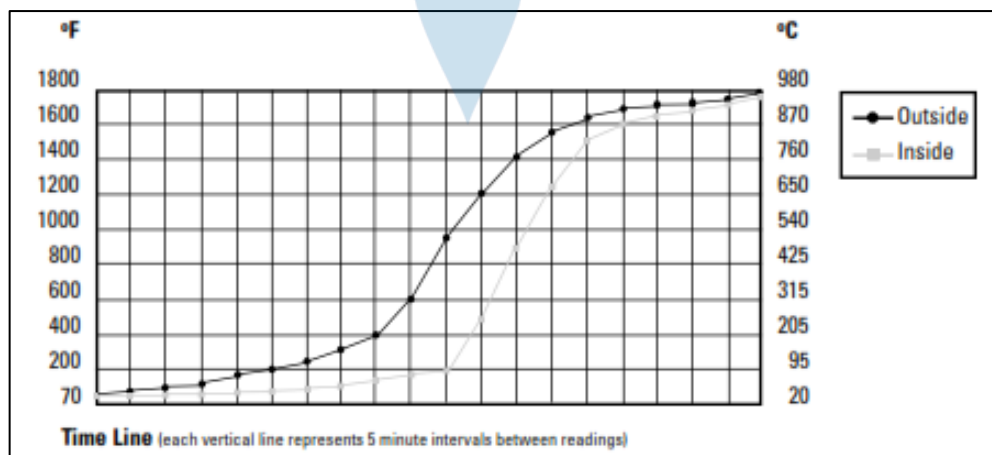
Rajan dkk (2011) mendefinisikan tujuan lain proses *hardening*, yaitu meningkatkan *yield strength* dan *tensile strength* pada komponen mesin, sehingga diperoleh ketangguhan yang cukup untuk menerima beban kerja berat. *Yield strength* pada material lebih diutamakan daripada *tensile strength* terutama pada baja konstruksi karena meningkatkan ketahanan beban melalui sifat elastisitas.

Menurut Rajan dkk (2011) terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi hasil proses *hardening*, antara lain:

- a. komposisi kimia baja;
- b. dimensi dan bentuk komponen baja;
- c. siklus *hardening*, meliputi: *pre-heating*, temperatur *austenite*, waktu tahan, dan kecepatan pendinginan;
- d. keseragaman struktur mikro dan ukuran butiran;
- e. media *quench*;
- f. kondisi permukaan dari komponen yang dikeraskan.

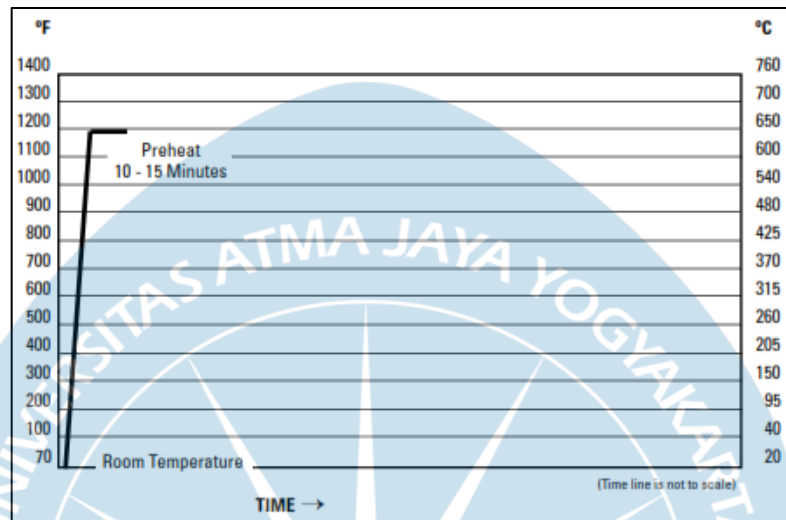
3.2.1. Pemanasan Mula (*Pre-heating*)

Pre-heating didefinisikan sebagai proses pemanasan awal dengan tujuan mempersiapkan struktur mikro material sebelum proses *hardening* dan menghilangkan tegangan dalam material pasca proses pemesinan (Bryson, 2009). Tujuan lain dari proses *pre-heating* ialah untuk meminimalkan selisih temperatur pada bagian luar dan inti material. Selisih temperatur luar dan inti material yang besar meningkatkan resiko terjadinya distorsi material. Gambar 18 berikut menampilkan perbedaan temperatur antara bagian luar dan inti material pada saat proses pemanasan.



Gambar 18. Pembacaan temperatur pada bagian luar dan inti material

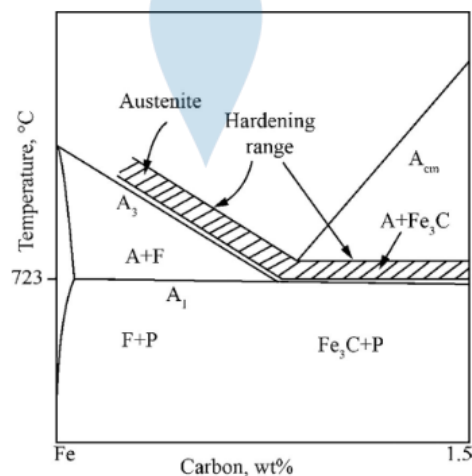
Temperatur yang digunakan untuk proses *pre-heating* tidak boleh lebih dari batas garis ubah, tujuannya menjaga struktur mikro tetap sama dan seragam pada proses tersebut (Bryson, 2009). Durasi proses *pre-heating* berkisar antara 10 menit hingga 15 menit, sesuai dengan ukuran material. Skema proses *pre-heating* ditampilkan pada Gambar 19 berikut.



Gambar 19. Skema proses *pre-heating* menurut Bryson (2009)

3.2.2. Proses *Austenitizing* (Temperatur *austenite*)

Rajan dkk (2011) dan Ray dkk (2020) menyatakan bahwa temperatur *austenite* ditentukan oleh komposisi kimia baja dan kandungan karbon di dalam baja. Pada baja karbon, temperatur *austenite* ditentukan oleh kandungan karbon dan tipe *eutectoid* baja tersebut. Hal ini ditunjukkan oleh Ray dkk (2020) melalui grafik jangkauan temperatur *austenite* pada Gambar 20 berikut.



Gambar 20. Temperatur *austenite* dan perubahan struktur

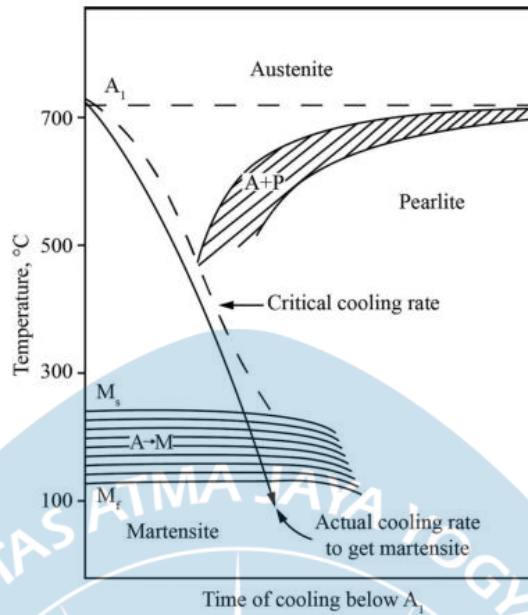
Gambar 20 menunjukkan bahwa baja *hypoeutectoid* menggunakan temperatur *austenite* pada kisaran 20°C-40°C di atas garis ubah A_3 , sedangkan baja *eutectoid* dan *hypereutectoid* menggunakan temperatur pada kisaran 20°C - 40°C di atas garis ubah A_1 . Menurut Rajan dkk (2011) pemilihan temperatur *austenite* merupakan hal krusial karena menentukan jumlah struktur *austenite* yang terbentuk dan homogenitas (keseragaman) struktur mikro. Temperatur *austenite* yang terlalu rendah hanya mengubah sebagian *austenite*, sehingga pada proses *quench* hanya sebagian struktur yang berubah menjadi *martensite* keras. Penggunaan temperatur *austenite* yang terlalu tinggi menyebabkan terjadinya dekarburisasi unsur karbon pada baja sehingga nilai kekerasan tidak tercapai. Resiko dekarburisasi mendorong penggunaan pelindung baja pada proses *hardening* untuk meminimalkan resiko tersebut. Pelindung baja terhadap dekarburisasi pada proses *hardening* menurut Bryson (2009) dapat berupa:

- a. penggunaan *stainless steel foil*,
- b. penggunaan tatal besi tuang atau arang padat,
- c. penggunaan tungku *vacuum or atmospheric controlled*,
- d. penggunaan cat anti dekarburisasi.

Holding time atau dalam beberapa buku disebutkan sebagai *soak time*, didefinisikan sebagai waktu tahan yang diterapkan pada saat temperatur *austenite* tercapai. Tujuan *holding time* ialah menyamakan temperatur pada bagian luar dan inti, sehingga diperoleh struktur *austenite* yang seragam. Durasi *holding time* untuk baja karbon sedang ialah 5 menit untuk setiap dimensi tebal 25 mm (Bryson, 2009).

3.2.3. Quench

Quench adalah proses pendinginan dengan mengatur kecepatan pendinginan dengan tujuan mengubah struktur mikro *austenite* menjadi *martensite*. Kecepatan pendinginan diatur sesuai dengan jenis material dan kebutuhan pendinginannya dalam bentuk kurva kecepatan pendinginan kritis. Menurut Ray dkk (2020) pendinginan kritis didefinisikan sebagai kecepatan pendinginan minimal yang masih menghasilkan struktur *martensite*. Media pendinginan yang dipilih tidak terlalu cepat agar material tidak mengalami tegangan dalam besar, namun juga tidak terlalu lambat agar *martensite* tetap dapat terbentuk. Visualisasi kecepatan pendinginan kritis dan kecepatan pendinginan yang disarankan pasca temperatur *austenite* menurut Ray dkk (2020) ditampilkan pada Gambar 21 berikut.



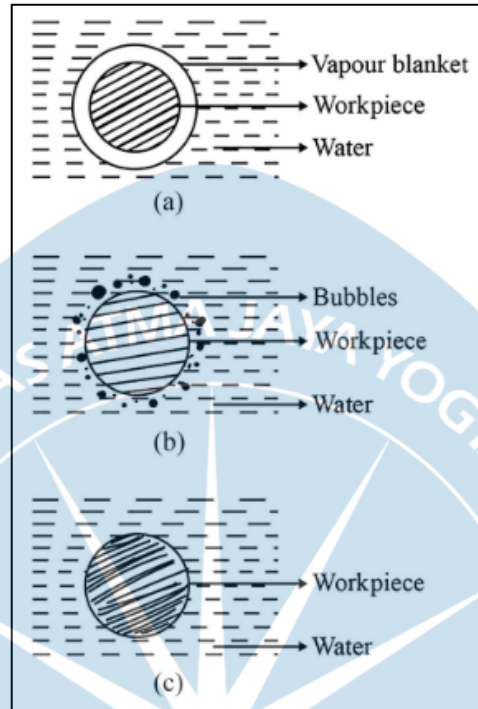
Gambar 21. Grafik kecepatan pendinginan menurut Ray dkk (2020)

Media *quench* yang umum digunakan pada proses *hardening* antara lain, air, *oil*, udara, campuran air dan polimer *quench*, *salt bath*, dan gas bertekanan. Menurut Ray dkk (2020) karakter media *quench* yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihannya antara lain:

- temperatur *quenchant*,
- kapasitas panas *quenchant*,
- viskositas *quenchant*,
- konduktivitas thermal,
- Agitasi media *quench*.

Media pendinginan air merupakan yang populer digunakan karena biaya rendah, ketersediaan dan *handling* yang mudah, tanpa polusi, dan menjadi media pendinginan dengan kecepatan pendinginan tertinggi. Ray dkk (2020) menyatakan bahwa media pendinginan air hanya digunakan untuk baja karbon dan beberapa tipe baja paduan. Karakternya sebagai media dengan kecepatan pendinginan tertinggi memberikan keuntungan berupa pembentukan *martensite* yang sempurna dan meminimalkan distorsi, namun terdapat resiko tegangan dalam yang sangat tinggi hingga menyebabkan *crack*. Pendinginan air direkomendasikan untuk dikombinasikan dengan polimer *quench* dengan tujuan meminimalkan *vapour blanket* dan *bubble*, serta mendorong tercapainya kondisi *direct contact stage* pada saat proses *quench*. Kondisi *vapour blanket* dan *bubble* memberikan resiko pembentukan *martensite* yang tidak optimal sehingga kekerasan material

tidak tercapai. Ray dkk (2020) memberikan gambaran terbentuknya *vapour blanket* dan *bubble* serta kondisi *direct contact stage* yang merupakan kondisi yang diinginkan terjadi lebih cepat.



Gambar 22. Tahap pendinginan media water

Canale dkk, 2008 menyatakan bahwa *quench severity* didefinisikan sebagai kemampuan media pendingin (*quenchant*) untuk mengambil panas dari material baja, yang diukur dalam satuan *Grossman-number* (*H-value*). Tabel 10 menunjukkan kecepatan pendinginan media *quench* dalam satuan *H-value*.

Tabel 10. Kecepatan pendinginan dalam *H-value* (Canale dkk, 2008)

Table 9 Typical quenching conditions and Grossmann *H*-values

Quenching medium	Grossmann <i>H</i> -value
Poor (slow) oil quench—no agitation	0.20
Good oil quench—moderate agitation	0.35
Very good oil quench—good agitation	0.50
Strong oil quench—violent agitation	0.70
Poor water quench—no agitation	1.00
Very good water quench—strong agitation	1.50
Brine quench—no agitation	2.00
Brine quench—violent agitation	5.00
Ideal quench	...

Note: It is possible with high-pressure impingement to achieve *H*-values greater than 5.00.

Tabel 10 menunjukkan bahwa media pendinginan *oil* memiliki kecepatan pendinginan yang lebih lambat dari pada air. Di sisi lain, pendinginan *oil* memiliki titik didih yang lebih tinggi dengan stabilitas pendinginan yang merata. Kelemahan lain media pendinginan *oil* ialah biaya yang cukup mahal dan karakternya yang menghasilkan polutan asap. Kecepatan pendinginan *oil* lebih lambat dari pada air memberi keuntungan berupa resiko *crack* yang minimal dan resiko distorsi yang lebih kecil (Ray dkk, 2020), karena tegangan dalam yang minimal. Alasan tersebut menjadikan *oil* sebagai media *quench* yang paling populer dan sering digunakan.

Proses pendinginan bertujuan untuk membentuk struktur *martensite*. Tabel 11 berikut menunjukkan temperatur material ASSAB 705 dan ASSAB 709 pada saat proses pendinginan agar struktur *martensite* terbentuk.

Tabel 11. Temperatur *austenite* baja karbon (Canale dkk, 2008)

Table 3 Martensite start (M_s) and martensite finish (M_f) values for selected steels

AISI No.	Austenitizing temperature, °C	M_s , °C	M_f , °C
1065	815	275	150
1090	885	215	80
1335	845	340	230
3140	845	330	225
4130	870	375	290
4140	845	340	220
4340	845	290	165
4640	845	340	255
5140	845	330	240
8630	870	365	280
8695	845	135	...
9442	860	325	-15

3.2.4. Temper

Pasca proses *quench*, baja akan mencapai nilai kekerasan maksimum, ketahanan aus yang baik, dan kekuatan mekanik yang tinggi, namun pada saat yang sama memberikan dampak tegangan dalam yang besar pada baja serta menghilangkan keuletan, ketangguhan, dan kekuatan impak (Rajan dkk, 2011). Proses temper merupakan proses pemanasan kembali untuk memperoleh kombinasi kekerasan, kekuatan, dan ketangguhan, serta menyeragamkan struktur mikro pasca proses *hardening*. Pada proses *hardening* baja karbon, temperatur temper berbanding terbalik terhadap nilai kekerasan material, semakin tinggi temperatur temper, maka kekerasan material semakin menurun. Bryson (2009) menyatakan bahwa proses

temper harus segera dilakukan pasca proses *quench* untuk mencegah *crack* pada material akibat tegangan dalam yang tinggi. Waktu tahan minimal yang direkomendasikan oleh Bryson (2009) untuk setiap proses temper pada baja karbon adalah 2 jam per kedalaman 25 mm material. Proses temper dilakukan sebanyak 2 kali untuk menyempurnakan pembentukan *martensite* stabil pada baja. Bryson (2009) memberikan data pengaruh temperatur temper terhadap nilai kekerasan dan kekuatan tarik baja ASSAB 709, pada Tabel 12 berikut.

Tabel 12. Pengaruh temperatur temper terhadap material

Tempering Temperature	Rockwell Hardness Rc	Tensile Strength
Annealed	13 - 15	95 ksi 655 MPa
350°F 175°C	53 - 54	265 ksi 1825 MPa
400°F 205°C	52 - 53	260 ksi 1790 MPa
600°F 315°C	46 - 48	200 ksi 1380 MPa
800°F 425°C	40 - 42	165 ksi 1135 MPa
1000°F 540°C	34 - 36	135 ksi 930 MPa

3.3. Kegagalan proses *Hardening*

Proses *hardening* meningkatkan kekuatan mekanik material. Ada kalanya proses *hardening* menghasilkan produk dengan nilai kekerasan dan kekuatan mekanik yang tidak sesuai. Penting untuk mengetahui macam kegagalan dalam proses *hardening* dan kemungkinan penyebabnya. Rajan dkk (2011) mengidentifikasi jenis kegagalan akibat proses *hardening*, antara lain: 1) nilai kekerasan yang rendah, 2) titik lunak pada material, 3) oksidasi dan dekarburasi, 4) *overheat* dan *burning*, 5) pecah atau *crack* pada material, 6) distorsi material. Pada penelitian ini, fokus pembahasan kegagalan pada nilai kekerasan yang rendah, *crack*, dan distorsi material, sesuai dengan pengujian yang dilakukan pada eksperimen penelitian.

3.3.1. Nilai Kekerasan Rendah

Pasca proses *hardening*, material diuji kekerasannya dan tidak mencapai nilai kekerasan sesuai dengan harapan. Rajan dkk (2011) mengidentifikasi beberapa kemungkinan penyebabnya, antara lain:

- a. temperatur *austenite* yang digunakan terlalu tinggi atau terlalu rendah,
- b. waktu tahan pada temperatur *austenite* terlalu lama atau terlalu cepat,

- c. tidak melakukan proses *quench* segera setelah pemanasan pada temperatur *austenite*,
- d. kecepatan pendinginan yang terlalu lambat (kesalahan pemilihan media *quench*),
- e. keberadaan sejumlah besar *austenite* tertahan,
- f. jumlah kadar karbon pada material tidak memenuhi syarat minimal.

3.3.2. Crack

Kegagalan *crack* pada material baja kerap terjadi akibat tegangan yang dihasilkan selama proses transformasi dari *austenite* menuju *martensite* (Rajan dkk, 2011). Kegagalan *crack* akan muncul pasca proses *quench*. Baja memiliki koefisien *linear thermal expansion* $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Proses pendinginan dari temperatur 850°C ke 25°C menghasilkan kontraksi sekitar 0,9% sesuai dengan yang diutarakan Rajan dkk (2011). Hal ini menyebabkan resiko *crack* muncul sebagai hasil dari kontraksi atau tegangan material.

Solusi yang dilakukan untuk mengatasi resiko *crack* antara lain: 1) menurunkan kecepatan pendinginan dalam toleransi pendinginan kritis yang diizinkan, 2) melakukan proses *stress relieving* sebelum proses *hardening* untuk mengurangi tegangan dalam material.

3.3.3. Distorsi Material

Distorsi atau deformasi diidentifikasi sebagai perubahan bentuk dan dimensi pada material selama proses perlakuan panas akibat tegangan dalam temperatur dan tegangan dalam struktur (Rajan dkk, 2011). Perubahan dimensi secara spesifik disebabkan oleh:

- a. tegangan dalam temperatur pada garis ubah AC_1 ,
- b. tegangan dalam struktur akibat transformasi menuju *austenite*,
- c. tegangan dalam temperatur selama waktu tahan temperatur *austenite*,
- d. tegangan dalam temperatur pada proses *quench*,
- e. tegangan dalam struktur akibat proses difusi pada *austenite*,
- f. tegangan dalam temperatur pada pendinginan menuju suhu ruang,
- g. tegangan dalam temperatur pada proses temper.

Menurut Ray dkk (2020) distorsi terjadi selama proses *hardening* dan temper. Distorsi merupakan dampak dari kombinasi tegangan termal dan transformasi. Distorsi merupakan masalah yang sering terjadi dan merupakan permasalahan

yang paling sulit diatasi. Menurut Rajan dkk (2011) dan Ray dkk (2020) ada dua tipe distorsi, yaitu:

- a. Distorsi ukuran, mengacu kepada perubahan volume material.
- b. Distorsi bentuk, perubahan bentuk, profil, geometri pada komponen tanpa adanya perubahan volume.

Distorsi material juga dipengaruhi oleh laju pemanasan, bentuk dan ukuran komponen, ketebalan dan geometri komponen, ketidakseragaman struktur mikro, serta laju pendinginan yang terjadi (Rajan dkk, 2011). Resiko distorsi material terjadi di sepanjang proses *heat treatment*. Tabel 13 berikut menampilkan resiko distorsi yang mungkin terjadi menurut Rajan dkk (2011).

Tabel 13. Resiko distorsi ukuran dan bentuk akibat *heat treatment*

Operation	Sequence	Size distortion	Shape distortion
Hardening	Heating and holding at austenitizing temperature	(a) Formation of austenite (b) Dissolution of carbides	(a) Relief of residual stresses (b) Thermal stresses (c) Sagging (due to weight of component, distortion under plastic condition)
	Quenching	Formation of martensite and non-martensitic phases	(a) Thermal stresses (b) Transformation stresses (c) Introduction of residual stresses
Sub-zero treatment	Cooling to and holding at sub-zero temperature and returning to room temperature	Formation of martensite	(a) Thermal stresses (b) Transformation stresses (c) Introduction of residual stresses
Tempering	Heating to and holding at tempering temperature	(a) Decomposition of martensite (b) Transformation of retained austenite	(a) Stress relief (b) Thermal stresses
	Cooling from tempering temperature	Transformation of retained austenite	(a) Thermal stresses (b) Introduction of residual stresses

Menurut Rajan dkk (2011) ada lima hal yang dapat dilakukan untuk meminimalkan terjadinya distorsi, yaitu:

- a. proses *stress relieving* untuk mengurangi tegangan dalam material akibat proses permesinan,
- b. menurunkan laju pemanasan,

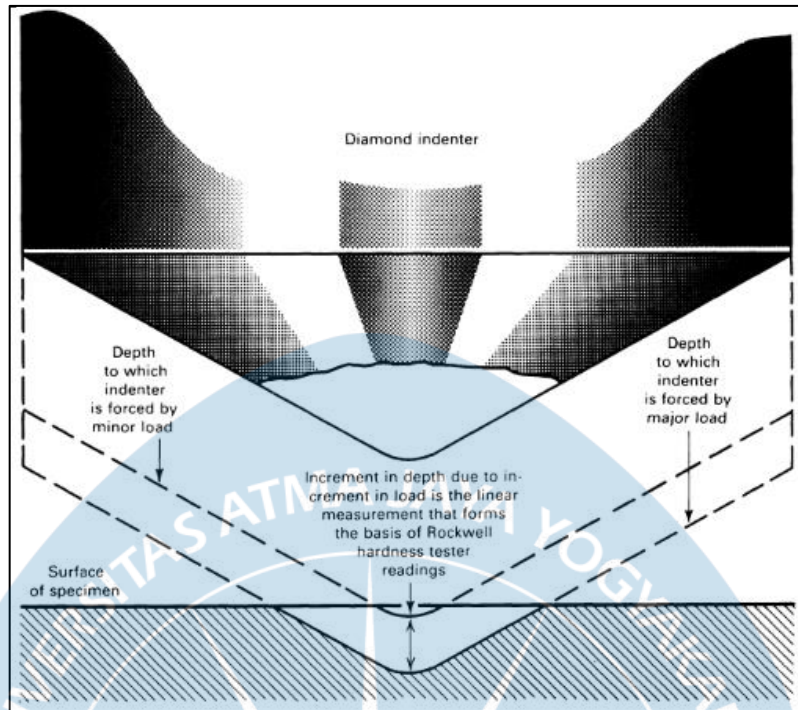
- c. melakukan proses *pre-heating* untuk mengurangi tegangan dalam temperatur yang muncul akibat perbedaan temperatur antara bagian permukaan dan inti material,
- d. menurunkan laju pendinginan dengan memilih media *quench* dengan kecepatan pendinginan yang lebih lambat,
- e. melakukan *press quench* dengan menggunakan jig untuk mencegah perubahan sumbu atau bentuk pada saat proses pendinginan.

3.4. Pengujian Mekanik (*Mechanical Test*)

3.4.1. Pengujian Kekerasan (*Hardness Test*)

Kekerasan material didefinisikan oleh Kuhn (2000) sebagai kemampuan suatu bahan untuk menahan indentasi permanen atau beban deformasi pada saat kontak langsung dengan indenter dibawah beban. Pengujian kekerasan menggunakan beberapa variasi indenter, antara lain: bola (Brinell & Rockwell B test), piramida (Vickers & Knoop tests), konus atau kerucut (Rockwell test).

Pengujian kekerasan Rockwell diperkenalkan oleh Stanley P. Rockwell pada tahun 1919. Pengujian kekerasan Rockwell merupakan metode pengujian yang sering dilakukan karena mampu menguji nilai kekerasan dengan jangkauan yang besar, pengujian cepat, mudah dalam pembacaan skala, serta tidak membutuhkan operator dengan keterampilan khusus. Pengujian kekerasan Rockwell menggunakan standar pengujian ASTM E18. Pengujian ini menggunakan perbedaan kedalaman indentasi berdasarkan 2 jenis pembebanan yang berbeda. Beban yang pertama adalah beban minor, digunakan untuk menentukan datum awal pengujian. Beban kedua ialah beban mayor yang diberikan dalam durasi waktu tertentu untuk menghasilkan kedalaman penetrasi dengan basis datum awal, setelah itu beban mayor diangkat dan menyisakan beban minor. Hasil pengukuran merepresentasikan kedalaman penetrasi akhir terhadap datum awal. Kuhn (2000) memvisualisasikan pengujian Rockwell pada Gambar 23 berikut.



Gambar 23. Pengujian kekerasan Rockwell dengan indenter kerucut

Penelitian ini menggunakan metode pengujian kekerasan Rockwell C karena jenis tipe pengujian ini sesuai dengan jenis spesimen yang diuji, yaitu material yang telah dikeraskan. Pengujian kekerasan Rockwell-C menggunakan indenter berbentuk kerucut dengan sudut 120° dengan bahan *diamond*. Total pembebanan uji Rockwell-C ialah 150 kgf dengan rincian 10 kgf untuk beban minor dan 140 kgf untuk beban mayor. Spesifikasi pengujian kekerasan Rockwell-C menurut Kuhn (2000) ditampilkan pada Tabel 14 berikut.

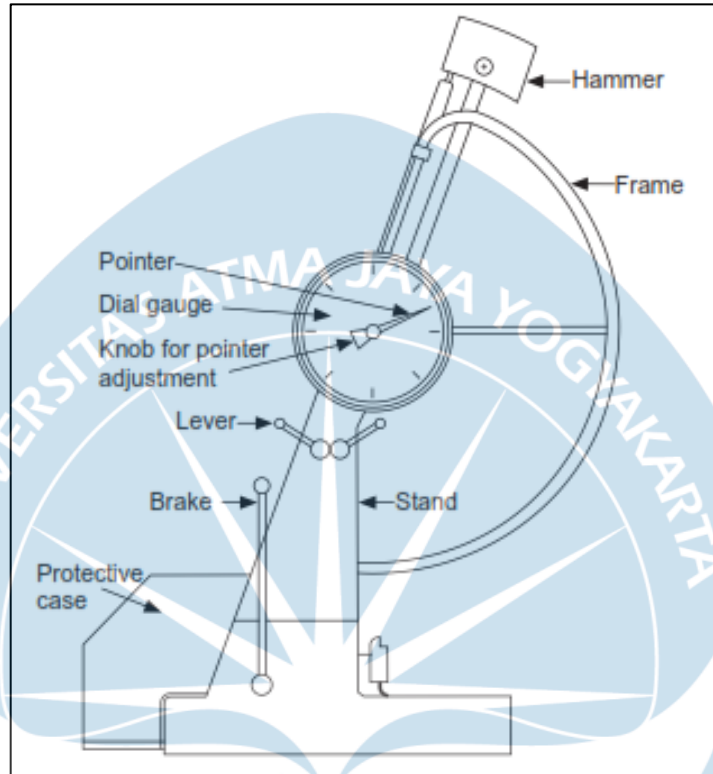
Tabel 14. Spesifikasi uji kekerasan Rockwell (Kuhn, 2000)

Scale symbol	Indenter	Major load, kgf	Typical applications
A	Diamond (two scales—carbide and steel)	60	Cemented carbides, thin steel, and shallow case-hardened steel
B	$\frac{1}{16}$ in. (1.588 mm) ball	100	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron
C	Diamond	150	Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case-hardened steel, and other materials harder than 100 HRB
D	Diamond	100	Thin steel and medium case-hardened steel and pearlitic malleable iron
E	$\frac{1}{8}$ in. (3.175 mm) ball	100	Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals
F	$\frac{1}{16}$ in. (1.588 mm) ball	60	Annealed copper alloys, thin soft sheet metals
G	$\frac{1}{16}$ in. (1.588 mm) ball	150	Phosphor bronze, beryllium copper, malleable irons. Upper limit 92 HRG to avoid possible flattening of ball
H	$\frac{1}{8}$ in. (3.175 mm) ball	60	Aluminum, zinc, lead
K	$\frac{1}{8}$ in. (3.175 mm) ball	150	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.
L	$\frac{1}{4}$ in. (6.350 mm) ball	60	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.
M	$\frac{1}{4}$ in. (6.350 mm) ball	100	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.
P	$\frac{1}{4}$ in. (6.350 mm) ball	150	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.
R	$\frac{1}{2}$ in. (12.70 mm) ball	60	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.
S	$\frac{1}{2}$ in. (12.70 mm) ball	100	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.
V	$\frac{1}{2}$ in. (12.70 mm) ball	150	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.

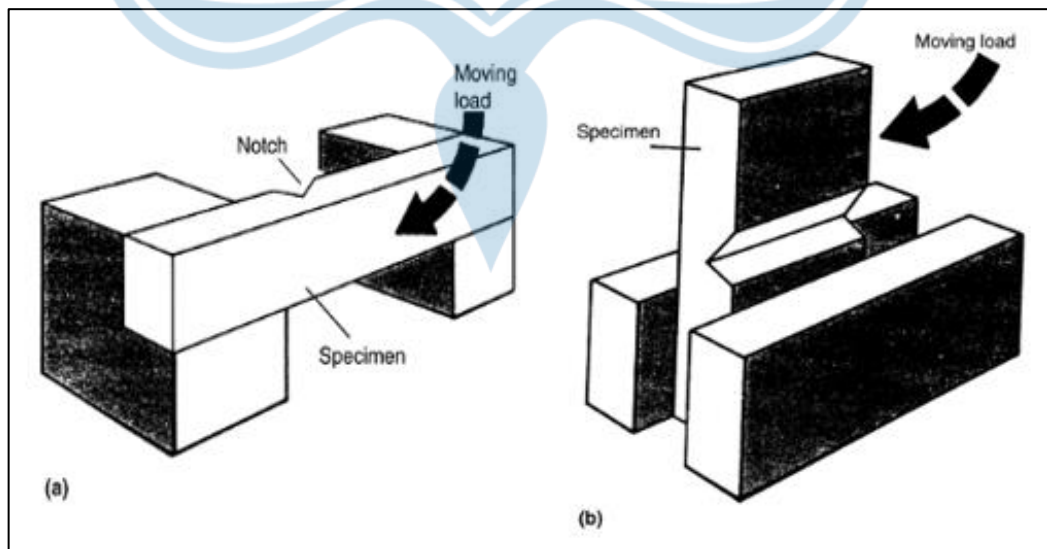
3.4.2. Pengujian Ketangguhan (*Toughness Test*)

Ketangguhan didefinisikan oleh Kuhn (2000) sebagai kemampuan suatu bahan untuk menyerap energi akibat pembebanan seketika dengan adanya takik (*notch*). Ketangguhan material diketahui berdasarkan sifat ulet-getas sebagai hasil dari perlakuan panas pada material. Menurut Kuhn (2000) ketangguhan baja dipengaruhi oleh: 1) temperatur, 2) kecepatan dan pembebanan, 3) takik atau cacat. Pengujian ketangguhan yang umum digunakan ialah uji impak Charpy dan uji impak Izod (Gambar 24). Penelitian ini menggunakan uji impak Charpy, atau dikenal sebagai Charpy *impact test*, karena merupakan alat uji ketangguhan yang paling banyak digunakan dan diterima oleh industri manufaktur (Kuhn, 2000).

Charpy *impact test* dikembangkan oleh George Charpy pada tahun 1905. Penelitian ini menggunakan standar uji ASTM E23 sesuai dengan peruntukannya, yaitu pengujian ketangguhan untuk bahan logam. Gambar 25 berikut menampilkan daftar standar pengujian ketangguhan dan aplikasi penggunaannya.



Gambar 24. Mesin uji ketangguhan atau *impact test* (Rajan dkk, 2011)

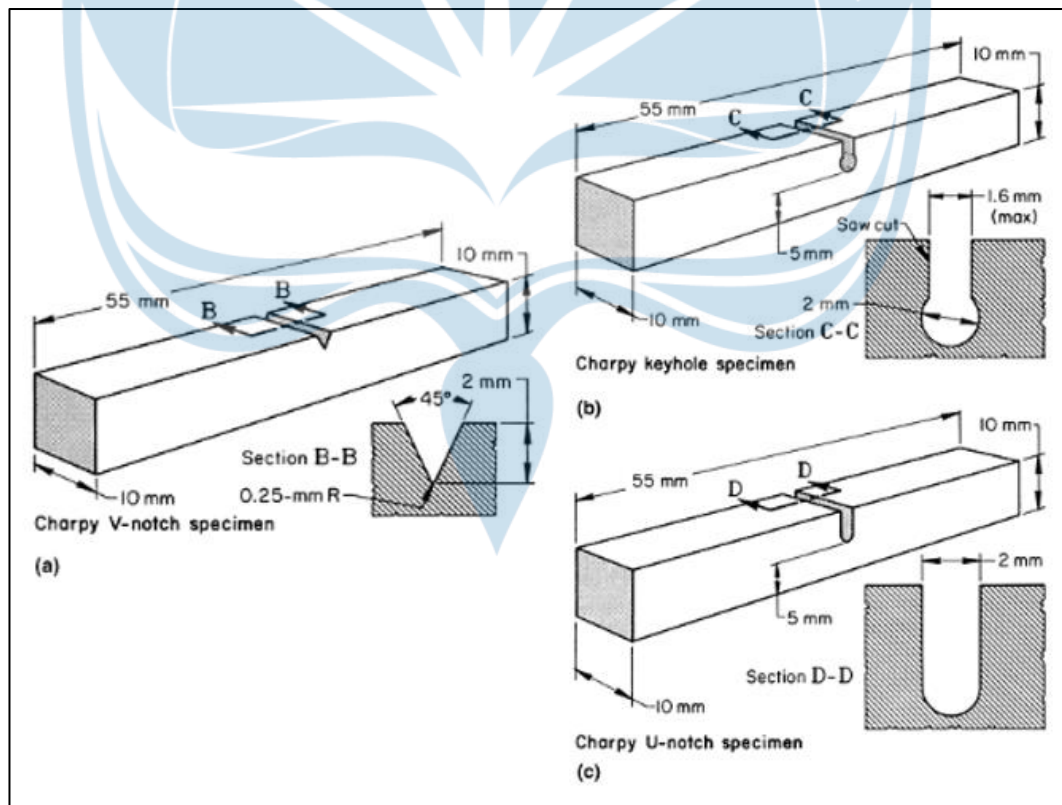


Gambar 25. a) Charpy *impact test*, b) Izod *impact test*

Tabel 15. Standar uji ketangguhan dan aplikasinya (Kuhn, 2000)

Designation	Title
ASTM E 23	Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials
BS 131-2	The Charpy V-Notch Impact Test on Metals
BS 131-3	The Charpy U-Notch Impact Test on Metals
BS 131-6	Method for Precision Determinations of Charpy V-Notch Impact Energies for Metals
ISO 148	Steel—Charpy Impact Test (V-Notch)
ISO 83	Steel—Charpy Impact Test (U-Notch)
DIN-EN 10045	Charpy Impact Test of Metallic Materials

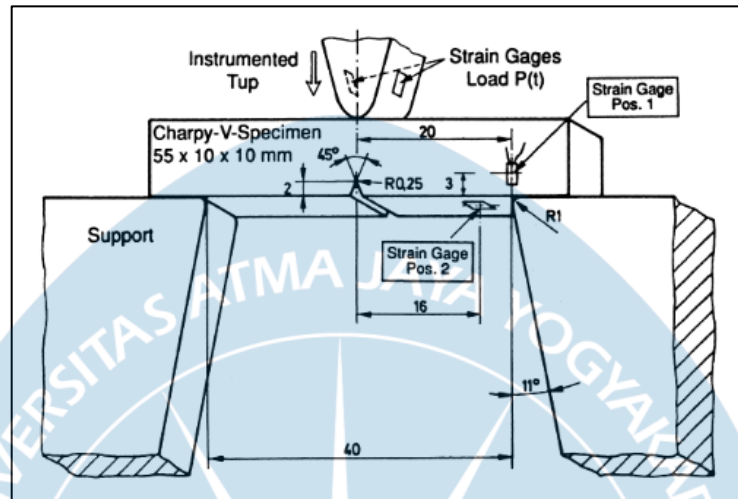
Pengujian Charpy *impact test* dibagi menjadi 3 tipe berdasarkan jenis alur takik atau *notch*-nya, yaitu: 1) *V-notch*, 2) *U-notch*, 3) *Keyhole*, seperti ditampilkan pada Gambar 26. Pengujian Charpy *impact test* yang digunakan dalam penelitian ini ialah Pengujian Charpy V-notch *impact test* dengan mempertimbangkan jenis mesin pengujian yang akan digunakan. Pengujian Charpy V-notch *impact test* menggunakan spesimen berbentuk balok berdimensi 10 mm x 10 mm x 55 mm, memiliki alur takik tepat pada bagian tengah spesimen berukuran 2 x 45° dan radius 0,25 mm. Visualisasi bentuk dan dimensi spesimen Charpy V-notch *impact test* sesuai pada Gambar 26 huruf a.



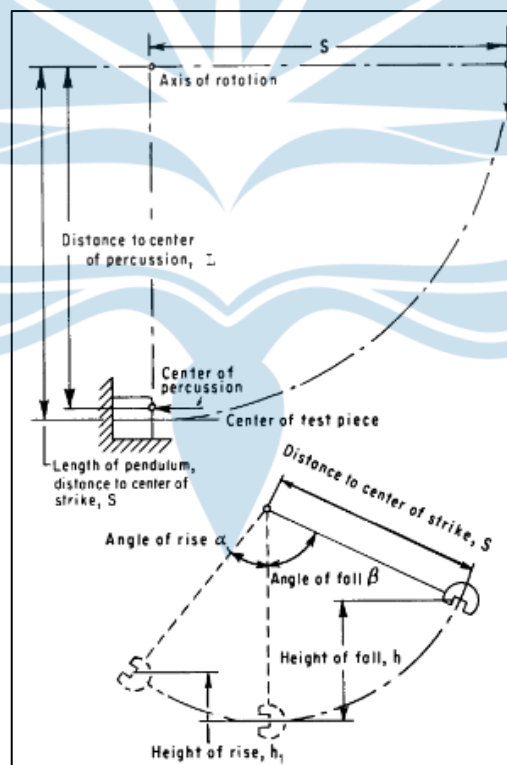
Gambar 26. Charpy *impact specimen*: a) *V-notch*, b) *keyhole*, c) *U-notch*

Pengujian Charpy V-notch *impact test* dilakukan dengan meletakkan spesimen pada 2 tumpuan kanan dan kiri, dengan jarak tumpuan 40 mm. Selanjutnya

spesimen diberi tumbukan tepat pada bagian tengah dengan gaya dan panjang lengan yang telah ditentukan. Hasil pengujian diketahui dengan melihat besar sudut sisa ayunan pemukul yang terbentuk pasca tumbukan. Visualisasi posisi spesimen pengujian Charpy V-notch *impact test* ditampilkan Gambar 27 berikut.



Gambar 27. Visualisasi posisi pengujian Charpy V-notch *impact test*



Gambar 28. Visualisasi pengujian Charpy *impact test*

Visualisasi pengujian Charpy V-notch *impact test* beserta dimensi pengukurannya ditampilkan pada Gambar 28, sesuai standar ASTM International (2002).

Pengujian pada mesin uji Charpy *impact test* menghasilkan output pengukuran berupa sudut α° dan β° yang selanjutnya dikonversi menjadi ukuran tinggi h dan h_1 dalam satuan meter (m). Rumus yang digunakan menurut ASTM International (2002) ialah:

$$h_0 = S \times (1 - \cos(\alpha)) \quad (3.1)$$

$$h_1 = S \times (1 - \cos(\beta)) \quad (3.2)$$

keterangan

- S = Panjang lengan pemukul atau pendulum (m);
- h_0 = Tinggi awal pendulum sebelum dijatuhkan (m);
- h_1 = Tinggi akhir pendulum setelah impact (m);
- α° = Sudut akhir pendulum yang terbentuk setelah proses impact ($^\circ$), pada lab. pengujian bahan tempat penelitian nilai α adalah sudut awal sebelum pendulum dijatuhkan;
- β° = Sudut awal yang terbentuk sebelum pendulum dijatuhkan ($^\circ$), pada lab. pengujian bahan tempat penelitian nilai β adalah sudut akhir pendulum setelah proses impact.

Kumar dkk (2019) menampilkan rumus perhitungan Harga Impact (HI) sebagai nilai ketangguhan bahan yang diperoleh dari pengujian Charpy *impact test*. Berikut ditampilkan rumus untuk mencari nilai Harga Impact.

$$P = m \times g \quad (3.3)$$

$$E = P \times (h_0 - h_1) \quad (3.4)$$

$$A = l \times t_1 \quad (3.5)$$

$$HI = \frac{E}{A} \quad (3.6)$$

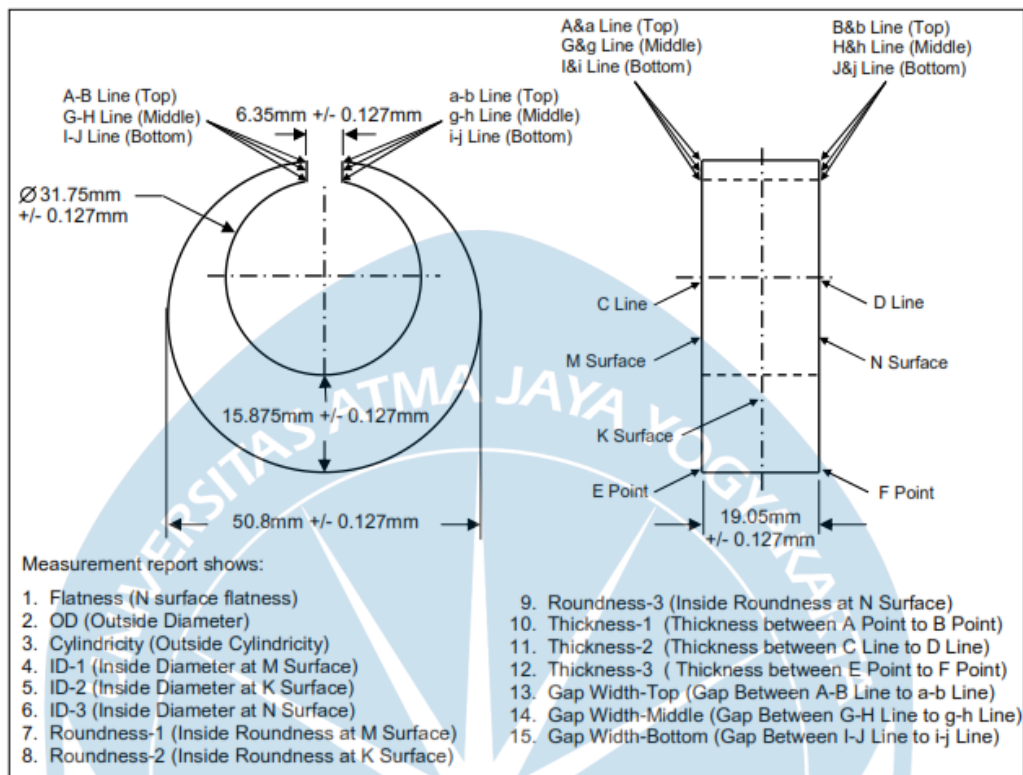
keterangan

- HI = Harga Impact, nilai ketangguhan bahan terhadap uji impact (J/mm^2);
- E = Energi yang diserap bahan (J);
- A = Luas penampang terkecil pada spesimen (mm^2);
- P = Nilai gaya impact yang diberikan (N);
- h_0 = Tinggi awal pendulum sebelum dijatuhkan (m);
- h_1 = Tinggi akhir pendulum setelah impact (m);
- m = Massa pendulum yang digunakan pada pengujian (kg);
- g = Percepatan gravitasi bumi (m/s^2);
- l = Lebar penampang spesimen uji impact (mm);
- t_1 = Tebal minimal penampang spesimen uji impact pada bagian takik (mm).

3.5. Pengujian Distorsi

Pengujian distorsi pada penelitian ini menerapkan spesimen uji *Navy C-ring*. Spesimen *Navy C-ring* mampu merepresentasikan resiko distorsi material karena

mencakup bentuk atau profil yang bervariasi. Bentuk dan dimensi spesimen uji *Navy C-ring* ditampilkan pada Gambar 29 berikut.



Gambar 29. Spesimen *Navy C-ring* penelitian Northwood dkk (2007)

Gambar 29 menunjukkan dimensi standar spesimen *Navy C-ring* yang digunakan untuk menguji variasi profil yang digunakan sebagai referensi pengecekan distorsi material. Variasi profil yang menjadi referensi pengukuran antara lain:

- a. *outside diameter*, dimensi diameter luar spesimen,
- b. *inside diameter*, dimensi diameter dalam spesimen,
- c. *cylindricity*, kelingkar diameter luar spesimen,
- d. *roundness*, kelingkar diameter dalam spesimen,
- e. *Thickness*, ketebalan bidang spesimen,
- f. *gap width*, jarak atau gap pada celah alur (*slot*).

Penelitian ini menerapkan 3 dari 6 referensi pengukuran, yaitu: *outside diameter*, *inside diameter*, *gap width*, ditambah 1 referensi pengukuran sebagai pengganti *Thickness* yaitu *flatness* atau kerataan permukaan bidang datar spesimen. 4 referensi pengukuran uji distorsi dipilih atas dasar kesesuaian dengan faktor perlakuan dan alat ukur yang dimiliki.

Totten dkk (2000) merilis pengaruh media *quench* dan kecepatan pendinginan terhadap besar distorsi yang terjadi pasca proses *hardening* seperti ditampilkan pada Tabel 16 berikut.

Tabel 16. Pengaruh media *quench* terhadap distorsi (Totten dkk, 2000)

Quenchant	Cooling rate	Distortion
10% NaOH water solution		Large
10% NaCl water solution		Large
10% Na ₂ CO ₃ water solution		Large
50% NaOH water solution		Large
Water		Large
Polymer quenchants		Medium
25% NaNO ₃ + 20% KNO ₃ + 20% NaNO ₂ + 35% H ₂ O		Medium
Accelerated quenching oil		Small
Alkaline salt bath		Very small
Nitrate bath		Very small
Ordinary mechanical oil		Small
Air		Very small

Totten dkk (2000) juga merilis pengaruh media *quench* dan komposisi penyusun material terhadap arah distorsi material, yang ditampilkan pada Tabel 17 berikut.

Tabel 17. Pengaruh jenis baja terhadap arah distorsi

Quenching medium	Types of steel							
	Medium-carbon steel	High-carbon steel	Carburized low-carbon steel	Carburized low-alloy steel	Medium-carbon low-alloy steel	Low-alloy tool steel	Medium-alloy steel	High-alloy steel
Saline water	Expand	Shrink	Shrink	Shrink	...	...	...	...
Oil	Shrink	Shrink	Shrink	Shrink	Expand	(a)	(a)	(a)
Alkaline salt	Expand	(b)	Shrink	Shrink	Expand	Expand	...	...
Nitrate bath	Expand	Expand	Shrink	Shrink	Expand	(b)	(b)	(b)
Air	...	...	...	...	...	Expand	...	...

3.6. Metode *Taguchi*: Desain, Analisis, dan Optimasi

Metode *Taguchi* merupakan salah satu teknik dalam *Design of Experiment* yang diperkenalkan oleh Dr. Genichi *Taguchi*. Konsep *Taguchi* ialah menyederhanakan dan menyusun desain faktorial pecahan standar sedemikian rupa sehingga eksperimen yang dilakukan terpisah dan menggunakan desain dengan ukuran yang sama akan mendapatkan hasil yang konsisten. *Taguchi* mengatasi keterbatasan eksperimen faktorial dan fraksional. Rancangan percobaan *Taguchi* digunakan untuk mengurangi jumlah percobaan yang harus dilakukan, mengurangi biaya dan mencapai hasil yang optimal dalam waktu yang lebih

singkat. Roy (2010) menyatakan bahwa Dr. *Taguchi* mengajukan pertimbangan dalam implementasi teknik *Taguchi* dengan:

- a. mendefinisikan kualitas, dengan langkah-langkah: 1) menemukan kombinasi faktor-level yang mempengaruhi performansi, 2) mengatur faktor dan level sedekat mungkin dengan tujuan.
- b. melakukan standarisasi DOE, dengan menggunakan *orthogonal arrays* yang merepresentasikan fraksional faktorial terkecil dan digunakan sebagai desain eksperimen.
- c. *robust design strategy*, menggunakan *outer array design* untuk menghilangkan pengaruh faktor *noise* yang tak terkendali, sehingga hasil dekat dengan tujuan.
- d. *loss function*, model matematika yang terkait dengan *loss function* secara konseptual dapat menampilkan prediksi pengembangan dari hasil DOE untuk menghemat biaya.
- e. *signal-to-noise (S/N) analysis*, analisis hasil dari beberapa sampel menggunakan *S/N Ratio* agar hasil *Design of Experiment* lebih mudah. Transformasi logaritmik dari hasil *S/N Ratio* memberdayakan prediksi peningkatan kinerja dari analisis eksperimen.

Roy (2010) menyatakan filosofi *Taguchi* berdasarkan pada 3 konsep, yaitu: 1) kualitas harus dirancang bersama produk, 2) kualitas yang baik dicapai dengan meminimalkan penyimpangan, 3) biaya kualitas diukur sebagai fungsi penyimpangan dari standar, dan kerugian diukur di seluruh sistem. Untuk mencapai kualitas produk yang diinginkan melalui desain, metode *Taguchi* merekomendasikan proses tiga tahap, sebagai berikut:

- a. *system design*, menentukan tingkat kerja yang sesuai dari faktor desain, meliputi: merancang dan menguji sistem, memilih bahan, komponen, dan parameter proses dan parameter produk.
- b. *parameter design*, menentukan tingkat faktor yang menghasilkan kinerja terbaik dari proses atau produk.
- c. *tolerance design*, merupakan langkah akhir untuk menyempurnakan hasil dengan memperketat toleransi faktor-faktor yang berpengaruh secara signifikan pada produk.

Metode *Taguchi* menggunakan *S/N Ratio* untuk menganalisis pengaruh faktor-faktor yang berkontribusi terhadap respon (Myers dkk, 2016). Karakteristik respon menentukan perhitungan *S/N Ratio*. Macam karakteristik respon dan rumus

perhitungannya menurut Devi dkk (2016), Sylajakumari dkk (2018), dan Qazi dkk (2020) antara lain:

- a. *The smaller the better*, digunakan untuk meraih hasil eksperimen yang meminimalkan respon. Nilai *S/N Ratio* dihitung dengan rumus berikut.

$$S/N \text{ Ratio} = (-10) \times \log_{10} \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n y_{ij}^2 \quad (3.7)$$

- b. *The larger the better*, digunakan untuk meraih hasil eksperimen yang memaksimalkan respon.

$$S/N \text{ Ratio} = (-10) \times \log_{10} \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \quad (3.8)$$

- c. *The target is best*, eksperimen dilakukan dengan harapan meraih nilai target tertentu.

$$S/N \text{ Ratio} = (-10) \times \log_{10} \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (3.9)$$

Keterangan:

- n = jumlah eksperimen
- y_{ij} = nilai respon ke-j pada eksperimen ke-i
- \bar{y} = rata-rata nilai respon
- s = variansi data eksperimen

Tujuan *S/N Ratio* dalam pendekatan *Taguchi* untuk desain parameter yang kuat adalah untuk memberikan kriteria kinerja, yang mengambil rata-rata proses dan variansi yang diperhitungkan. Nilai *S/N Ratio* yang tinggi menunjukkan faktor level yang optimal terhadap variabel respon. Output dari analisis *Taguchi* ialah parameter dengan nilai respon yang optimal.

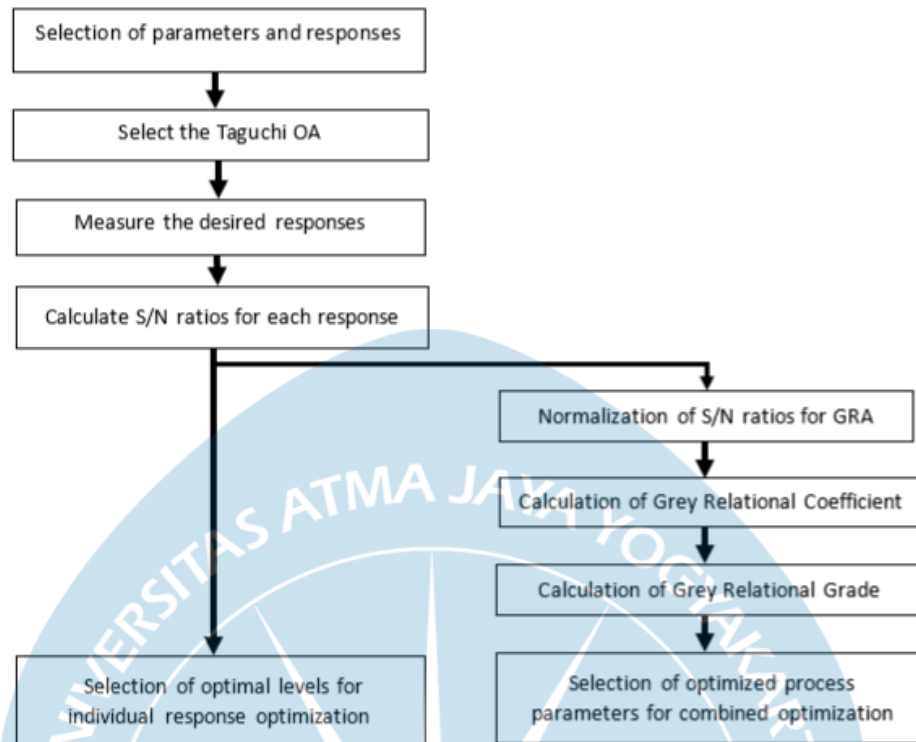
Qazi dkk (2020) dan Devi dkk (2016) menyatakan bahwa metode *Taguchi* merupakan *mono-optimization process*, sehingga metode ini belum mampu mengoptimalkan multi-respon secara simultan. Optimalisasi multi-respon termasuk dalam *Multiple Attribute Decision Making (MADM)*. Beberapa metodologi penyelesaian permasalahan multi-respon, menurut Pervez dkk (2016), antara lain: *Simple Additive Weighting (SAW)*, *Analytical Hierarchi Process (AHP)*, *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, *Grey Relational Analysis (GRA)*, dan lain sebagainya, namun sebagian besar metode memerlukan jumlah data yang besar dan beresiko gagal apabila data tidak pasti atau terdapat interaksi antar faktor berbeda.

3.7. ANOVA (*Analysis of Variance*)

ANOVA (*Analysis of Variance*) digunakan untuk mengolah hasil analisis *Taguchi*. Pervez dkk (2016) menyatakan bahwa analisis variansi (ANOVA) adalah metode statistik yang umum digunakan dalam studi optimasi untuk mengidentifikasi faktor level yang memiliki kontribusi tertinggi dalam menyusun sifat-sifat respon. Menurut Sylajakumari dkk (2018) ANOVA secara konvensional digunakan untuk menyelidiki apakah parameter desain eksperimental memiliki efek yang signifikan pada respon. Tabel ANOVA digunakan pula untuk menganalisis interaksi antar faktor dan pengaruh interaksi tersebut terhadap variabel dependen. ANOVA mirip dengan regresi dalam hal menyelidiki dan memodelkan hubungan antara variabel respon dan satu atau lebih variabel independen dengan menganalisis sarana sampel (Pervez dkk, 2016). *F-test* digunakan untuk mengukur dan mengevaluasi faktor-faktor yang mengendalikan hasil tes atau respon. Nilai *p-value* < 0,05 pada tingkat kepercayaan (*confidence level*) 95% diinterpretasikan bahwa faktor dan interaksi dianggap signifikan. Nilai *F* yang besar merupakan indikasi parameter proses memiliki efek yang signifikan pada respon. Pada ANOVA, koefisien korelasi yang disesuaikan (*Adjusted R²*) digunakan untuk mengevaluasi validitas dari *fitted model* dan mengukur persentase variasi respon yang mampu dijelaskan oleh variabel prediktor, sehingga diketahui variabel prediktor yang secara signifikan mempengaruhi variabel respon (Sylajakumari dkk, 2018). Sylajakumari dkk (2018) menyatakan bahwa model yang tepat digunakan untuk eksperimen ialah model yang memiliki nilai *R²* dan *Adjusted R²* yang tinggi dan nilainya tidak berbeda jauh.

3.8. Grey Relational Analysis (GRA)

Grey Relational Analysis (GRA) merupakan bagian dari *Grey Theory System* yang dikembangkan oleh J.L. Deng pada tahun 1982 (Qazi dkk, 2020). Pervez dkk (2016) menyatakan bahwa GRA merupakan pendekatan komprehensif untuk memecahkan masalah MADM apabila data yang dimiliki tidak pasti, atau tidak diketahui hubungan antara berbagai atribut yang kompleks, karena menerapkan pendekatan dengan mempertimbangkan semua nilai kinerja MADM menjadi nilai tunggal. Analisis dilakukan dengan prosedur tertentu untuk menghasilkan *Grey Relational Grade*, yang diterjemahkan sebagai pilihan terbaik alternatif. Gabungan metode *Taguchi* dan *Grey Relational Analysis* ditampilkan Qazi dkk (2020) pada Gambar 30 berikut.



Gambar 30. Tahapan kombinasi *Taguchi* - GRA (Qazi dkk, 2020)

GRA terdiri atas beberapa tahap hingga menghasilkan *Grey Relational Grade* sebagai hasil akhir. GRA diawali dengan mendata nilai *S/N Ratio* setiap respon untuk setiap parameter eksperimen. Nilai *S/N Ratio* dapat dihitung dengan rumus 3.7, rumus 3.8, atau rumus 3.9 sesuai dengan karakteristik respon.

Tahap berikutnya ialah melakukan normalisasi pada setiap nilai *S/N Ratio* agar bernilai antara 0 hingga 1. Tahap ini disebut *Grey Relational Generation* (Perves dkk, 2016; Sylajakumari dkk, 2018; dan Qazi dkk, 2020).

$$y_j^*(q) = \frac{\max y_j(q) - y_j(q)}{\max y_j(q) - \min y_j(q)} \quad (3.10)$$

$$y_j^*(q) = \frac{y_j(q) - \min y_j(q)}{\max y_j(q) - \min y_j(q)} \quad (3.11)$$

keterangan:

- y_j^* = nilai normalisasi *S/N Ratio* (*generated grey relational values*)
- y_j = nilai *S/N Ratio*
- $\min y_j$ = nilai *S/N Ratio* terkecil
- $\max y_j$ = nilai *S/N Ratio* terbesar
- q = jumlah variabel respon

Rumus yang digunakan disesuaikan pula dengan karakteristik respon (Qazi dkk, 2020). Karakteristik respon *the smaller the better* menggunakan rumus 3.10 dan

the larger the better menggunakan rumus 3.11. Menurut Qazi dkk (2020) hasil normalisasi terbaik adalah sama dengan 1, sehingga performa terbaik ditunjukkan oleh nilai normalisasi yang tertinggi.

Tahap selanjutnya ialah menghitung nilai *Deviation Sequence*. Devi dkk (2016) menyatakan bahwa *deviation sequence* adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi dengan data yang telah dinormalisasi. Devi dkk (2016) dan Qazi dkk (2020) menyatakan bahwa *deviation sequence* dihitung dengan rumus 3.12 berikut.

$$\Delta_{0i}(q) = |y_0^*(q) - y_j^*(q)| \quad (3.12)$$

keterangan:

- Δ_{0i} = nilai *Deviation Sequence*
- y_0^* = nilai normalisasi *S/N Ratio* maksimum (bernilai 1)
- y_j^* = nilai normalisasi *S/N Ratio* (*generated grey relational values*)

Selanjutnya dilakukan perhitungan *Grey Relational Coefficient* (GRC) yang menampilkan hubungan antara nilai normalisasi yang diinginkan dengan nilai normalisasi nyata (Qazi dkk, 2020). *Grey Relational Coefficient* dihitung dengan rumus 3.13 berikut.

$$\xi(y_j^*(q), y_0^*(q)) = \frac{\Delta_{min}(q) + \zeta \Delta_{max}(q)}{\Delta_{0i}(q) + \zeta \Delta_{max}(q)} \quad (3.13)$$

keterangan:

- ξ = nilai *Grey Relational Coefficient*
- Δ_{0i} = nilai *Deviation Sequence*
- Δ_{min} = nilai *Deviation Sequence* minimum
- Δ_{max} = nilai *Deviation Sequence* maksimum
- ζ = *distinguish coefficient*; bernilai antara 0 hingga 1, umumnya bernilai 0,5.

Tahap berikutnya ialah menghitung *Grey Relational Grade* (GRG) untuk parameter eksperimen. Menurut Qazi dkk (2020) *Grey Relational Grade* memberikan informasi tentang kekuatan korelasi antara eksperimen dengan menghitung rata-rata bobot setiap nilai GRC untuk semua eksperimen. Nilai GRG terletak antara 0 dan 1. Eksperimen dengan nilai GRG yang lebih besar dianggap sebagai parameter yang ideal, yang menunjukkan kekuatan korelasi antara eksperimen yang sesuai dan nilai yang dinormalisasi secara ideal (Qazi dkk, 2020). Perhitungan GRG untuk parameter eksperimen dengan nilai bobot respon kualitas yang sama ditampilkan pada rumus 3.14, sedangkan untuk respon kualitas dengan bobot yang berbeda menggunakan rumus 3.15.

$$\gamma_j(y_0^*, y_j^*) = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \xi(y_j^*(q), y_0^*(q)) \quad (3.14)$$

$$\gamma_j(y_0^*, y_j^*) = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n w_q \xi(y_j^*(q), y_0^*(q)) \quad (3.15)$$

keterangan:

- γ_j = nilai GRG untuk eksperimen ke-j
- n = jumlah respon kualitas
- ξ = nilai *Grey Relational Coefficient*
- w_q = bobot dari respon; dimana $\sum_{q=1}^n w_q = 1$

Tahap terakhir ialah menghitung *Grey Relational Grade (GRG)* untuk setiap level faktor. Nilai GRG level faktor dihitung menggunakan rata-rata nilai GRG parameter yang mengandung level faktor tertentu. Rumus perhitungan Nilai GRG level faktor yang digunakan menurut Devi dkk (2016) sebagai berikut.

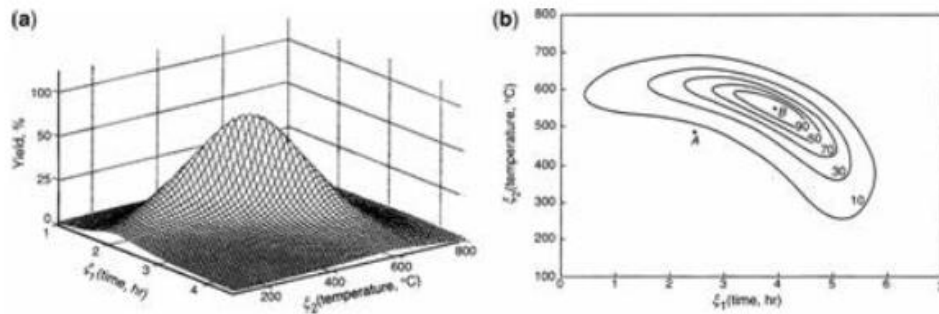
$$A_{kl} = \frac{\sum \gamma_{kl}}{n_{kl}} \quad (3.16)$$

keterangan:

- A_{kl} = nilai GRG level faktor untuk faktor k dan level l
- γ_{kl} = nilai GRG parameter yang mengandung faktor k dan level l
- n_{kl} = jumlah eksperimen yang mengandung faktor k dan level l

3.9. Response Surface Methodology

Response Surface Methodology (RSM) merupakan kumpulan teknik statistika dan matematika yang digunakan untuk membangun, memperbaiki, dan mengoptimalkan proses (Myers dkk, 2016). RSM juga digunakan untuk perancangan, pengembangan, dan memformulasikan produk. Response diidentifikasi sebagai ukuran performansi atau karakteristik kualitas yang dipengaruhi oleh variabel input. RSM menghasilkan dua output berupa perspektif grafis yang disebut *Response Surface Methodology* dan *two-dimensional plane* yang disebut *contour plot*, seperti ditampilkan pada contoh Gambar 31 berikut.



Gambar 31. a) RSM grafis dan b) contour plot (Myers dkk, 2016)

RSM adalah bagian dari desain eksperimental. RSM adalah teknologi penting dalam mengembangkan proses, mengoptimalkan kinerjanya, dan meningkatkan desain dan/atau formulasi produk baru. RSM menjadi alat rekayasa dalam desain produk, pengembangan proses, kualitas, teknik manufaktur, dan personel operasi. Tujuan dari penerapan RSM ialah peningkatan kualitas, termasuk pengurangan variabilitas dan peningkatan kinerja produk dan proses.

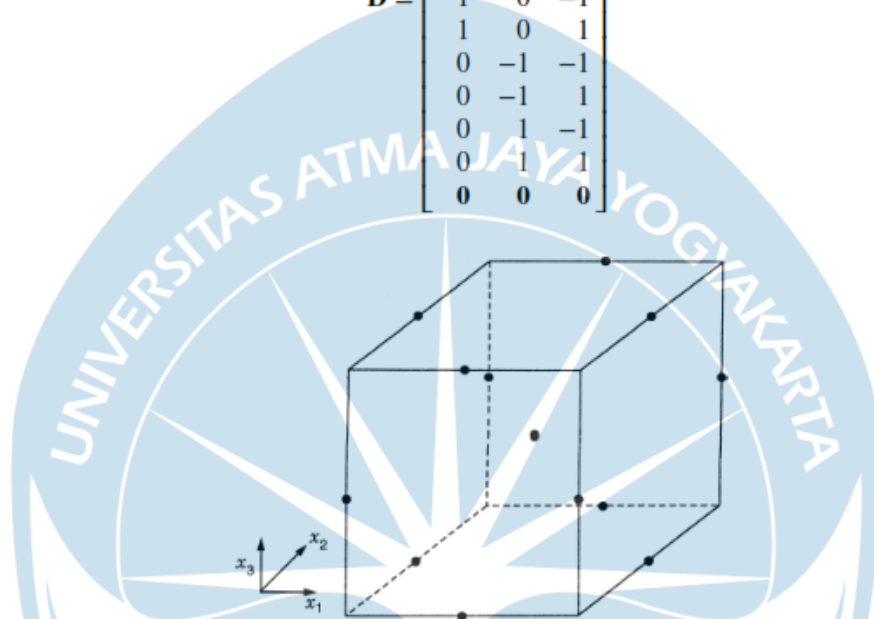
Penelitian ini menggunakan salah satu *tools* dalam RSM yaitu *The Box-Behnken Design (BBD)*. *Tools* ini diperkenalkan oleh Box dan Behnken pada tahun 1960, dengan konsep *three-level design* yang sesuai untuk *second-order response surfaces*. Klasifikasi desain berbasis konstruksi pada *balanced incomplete block designs*. Berikut adalah contoh desain dengan 3 faktor dan 3 *treatment* yang sesuai dengan penelitian ini.

Tabel 18. Desain faktorial *Box-Behnken* k=3 (Myers dkk, 2016)

	Treatment		
	1	2	3
Block 1	X	X	
Block 2	X		X
Block 3		X	X

Tabel 19. *Box-Behnken Design 13 runs* (Myers dkk, 2016)

	x_1	x_2	x_3
$\mathbf{D} =$	-1	-1	0
	-1	1	0
	1	-1	0
	1	1	0
	-1	0	-1
	-1	0	1
	1	0	-1
	1	0	1
	0	-1	-1
	0	-1	1
	0	1	-1
	0	1	1
	0	0	0



Gambar 32. Konsep desain BBD pada k=3

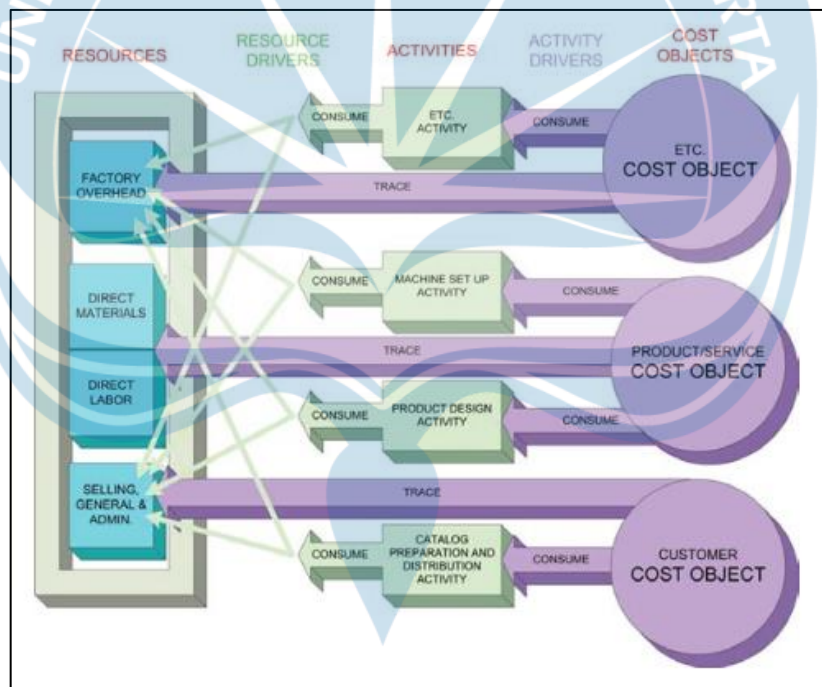
Myers dkk, 2016 menyatakan bahwa BBD adalah pilihan yang efisien dan menjadi alternatif utama dari *tools central composite design*.

Penerapan proses optimasi untuk multirespon memerlukan teknik khusus. Salah satu teknik optimasi multirespon yang simultan ialah *Desirability Function* (Myers dkk, 2016). Teknik optimasi ini dipopulerkan oleh Derringer dan Suich pada tahun 1980. Ide teknik pendekatan muncul dari adanya kriteria berbeda yang diukur pada skala berbeda, dengan kesulitan utama dalam mengetahui perbandingan yang tidak sesuai dari atribut ini. *Desirability Function* menyarankan pengguna untuk membuat perbedaan antar atribut dengan memberikan *desirability score*. Proses awal ialah dengan menetapkan bobot tujuan sesuai dengan *individual desirability* d_i yang bervariasi dalam rentang $0 \leq d_i \leq 1$. Nilai $d_i = 1$ apabila respon memenuhi tujuan, dan $d_i = 0$ bila respon berada di luar wilayah yang dapat diterima sebagai tujuan (Myers dkk, 2016). Kombinasi optimal diperoleh untuk memaksimalkan

tujuan secara keseluruhan, dimana multiplikasi gabungan berbentuk skor desirabilitas (*composite desirability*) sangat mungkin terjadi.

3.10. Activity-Based Costing

Activity-Based Costing merupakan metode perhitungan biaya dengan pendekatan aktivitas manufaktur sebuah produk. Metode ini diperkenalkan oleh R. Copper dan R. S. Kaplan, yang bermanfaat untuk mendistribusikan biaya overhead secara proporsional dengan aktivitas yang dilakukan pada sebuah produk untuk proses produksinya. Metode *Activity-Based Costing* mencoba untuk membagi produksi ke dalam aktivitas intinya, menentukan biaya untuk aktivitas tersebut, dan mengalokasikan biaya tersebut ke produk berdasarkan berapa banyak aktivitas tertentu yang dibutuhkan untuk menghasilkan produk (Walther dkk, 2010). Walther dkk, 2010 memberikan gambaran mengenai logika *Activity-Based Costing* dalam menghitung biaya pada Gambar 33 berikut.



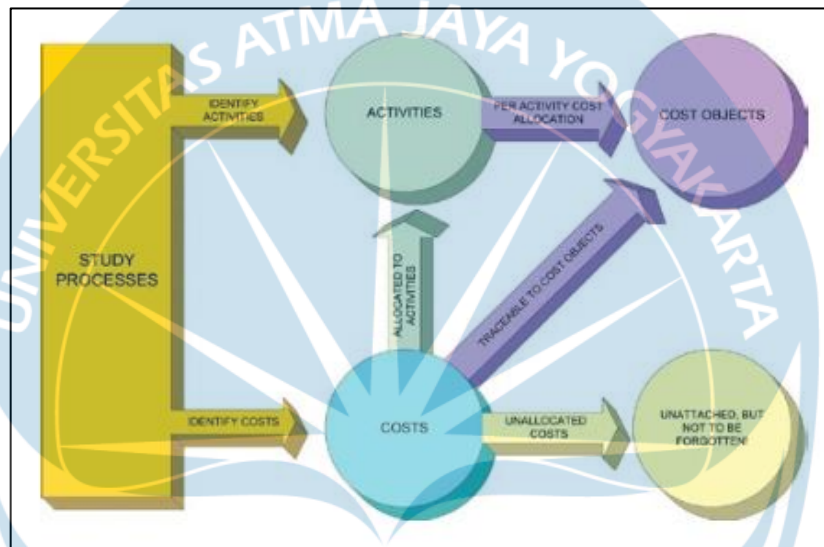
Gambar 33. Logika perhitungan biaya pada *Activity-Based Costing*

Hundal (1997) menyatakan bahwa aktivitas dibagi menjadi empat kategori, yaitu:

- unit-level activities*, berhubungan langsung dengan kecepatan produksi seperti: material, tenaga kerja langsung, biaya mesin, biaya energi.
- batch-level activities*, berkaitan dengan proses yang diperlukan untuk setiap *batch*, misal: *machine set-up, purchase order, inspection, material handling*.

- c. *product-sustaining activities*, yang berkaitan dengan kualitas atau keutuhan produk, misal: *product and process engineering*.
- d. *facility-sustaining activities*, berlaku bagi hal-hal yang tidak berkaitan langsung dengan produk, antara lain: bangunan, peralatan, manajemen.

Langkah implementasi *Activity-Based Costing* menurut Walther dkk, 2010 antara lain: 1) mempelajari proses dan biaya yang ada, 2) mengidentifikasi aktivitas dari setiap proses, 3) mengidentifikasi biaya dan asal biaya, 4) mengalokasikan biaya pada tiap aktivitas, 5) mengaplikasikan biaya pada objek. Langkah ini divisualisasikan dalam Gambar 34 berikut.



Gambar 34. Langkah implementasi *Activity-Based Costing*

Menurut Hundal (1997), beberapa *cost driver* untuk perhitungan biaya pada metode *Activity-Based Costing* antara lain: 1) jumlah produk yang diproduksi, 2) biaya material, 3) jumlah variasi produk, 4) biaya tenaga kerja, 5) waktu persiapan, 6) jumlah order, 7) dsb. Sumber daya yang digunakan dalam proses manufaktur dihitung sebagai: 1) gaji, 2) ruang, 3) energi, 4) waktu, 5) dsb.

3.11. Hipotesis Sementara

Hipotesis sementara disusun berdasarkan kesimpulan yang diperoleh dari proses tinjauan pustaka dan tinjauan dasar teori. Hipotesis sementara penelitian ini ialah:

- a. Penggunaan temperatur *austenite* yang semakin tinggi menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi, nilai ketangguhan yang lebih rendah, distorsi yang lebih besar, dan biaya proses yang lebih tinggi.

- b. Laju pendinginan media *quench* yang cepat menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi, nilai ketangguhan yang lebih rendah, distorsi yang lebih besar, dan biaya proses yang lebih tinggi.
- c. Penggunaan temperatur temper yang semakin tinggi menghasilkan nilai kekerasan yang lebih rendah, nilai ketangguhan yang lebih tinggi, dan biaya proses yang lebih tinggi.
- d. Penggunaan material yang semakin tebal menghasilkan distorsi yang lebih kecil.

