

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Tinjauan Pustaka

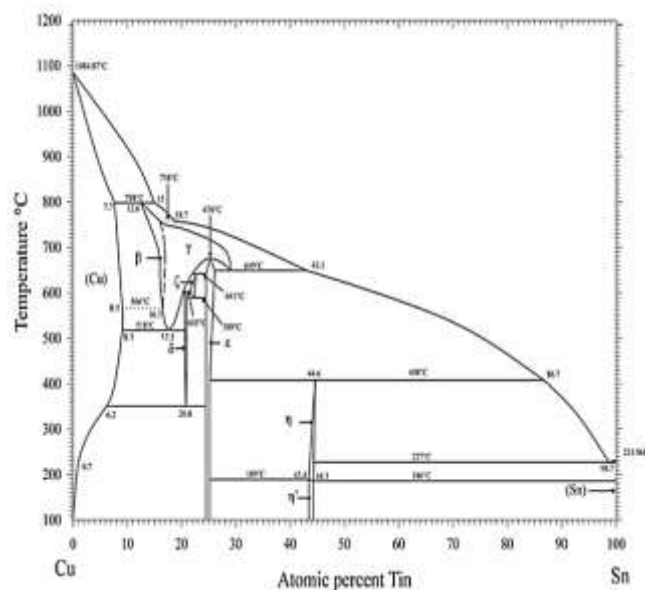
Perunggu merupakan paduan antara logam tembaga (Cu) dan timah (Sn) yang memegang peranan penting dalam industri logam paduan. Paduan Cu-Sn sudah lama dikenal dan digunakan untuk berbagai keperluan selama bertahun-tahun. Bahan perunggu digunakan sejak abad ke-11 untuk bahan loncenggereja (Audy *et al.*, 2008). Produk mangkuk yang dibuat pada abad ke-12 sampai ke-14 menunjukkan struktur mikro perunggu 20wt.%Sn yang diproduksi dengan teknik tempa dan pendinginan cepat (Siket *et al.*, 2009). Paduan perunggu 20%Sn digunakan juga untuk membuat komponen mesin seperti bantalan, impeler pompa, ring piston, komponen katup, industri persenjataan dan produk mekanik lainnya. Bahan perunggu juga digunakan untuk membuat berbagai macam alat musik. Perunggu timah digunakan untuk membuat alat musik terompet di museum London, Inggris pada abad 17, alat musik perkusi yang berdinding tipis (Fletcher, 2012), serta bahan alat musik gamelan (Sumarsam, 2002).

Komposisi bahan baku untuk membuat alat musik lonceng adalah paduan perunggu timah antara 20-25%Sn (Debut *et al.*, 2016). Komposisi tersebut akan menghasilkan frekuensi optimal dibanding paduan perunggu kurang dari 15%Sn. Unsur lain yang sangat berperan selain Sn adalah Pb dengan komposisi antara 1 sampai 3%. Paduan dengan komposisi 10-22%Sn adalah komposisi terbaik paduan perunggu timah dengan sifat mekanis berupa kekuatan yang tinggi tanpa penggetasan (Sik *et al.*, 2009). Penggetasan dapat terjadi ketika paduan menerima beban dampak saat pembentukan atau ketika komponen tersebut digunakan. Komposisi 20-22% sering dinamakan “*bell metal*” karena dikhususkan untuk bahan baku pembuatan alat musik. Penambahan timah pada tembaga akan meningkatkan sifat mampu cor, menurunkan titik lebur, meningkatkan ketahanan korosi dan memberikan penampilan dekoratif yang lebih baik. Penambahan Sn 23% mampu meningkatkan kekerasan dan kualitas sound akustik, sedangkan lebih dari 23% Sn akan meningkatkan sifat rapuhnya (*brittleness*). Penambahan lebih dari 1.5 Pb dan Zn selain akan menurunkan kualitas sound akustik juga menyebabkan kemampuan tuang cairan menurun. Unsur Ag pada paduan perunggu timah akan mempengaruhi kualitas suara, menurunkan titik lebur dan meningkatkan biaya bahan (Nadolski, 2017). Paduan perunggu timah mempunyai kekuatan dan konduktivitas thermal yang tinggi, mampu

mesin, tahan korosi, tahan terhadap keausan dan mudah dituang dan ditempa (Li *et al.*, 2013).

Paduan dengan komposisi timah lebih dari 17%Sn dinamakan paduan *high tin bronze* (Zeynep *et al.*, 2012). Paduan *high tin bronze* ini mempunyai titik lebur dimulai pada temperatur 950°C pada kondisi setimbang. Adanya unsur penambah dalam paduan seperti Ni, Pb, Si, Zn dalam jumlah relatif kurang dari 1,5%, maka titik lebur paduan ini dilakukan pada temperatur superheat 1000-1200°C. Unsur S dan P pada perunggu cair merupakan pengotor/*impurities* yang terbentuk pada saat paduan dilebur dengan menggunakan bahan bakar arang dan kokas (Audy *et al.*, 2008). Peningkatan temperatur tuang pada Cu18-20wt.%Sn (UNS C91300) pada batas 1000-1200°C dengan interval 50°C menunjukkan terjadinya penurunan densitas dan kekerasannya. Nilai *modulus Young* dan elemen lainnya untuk perunggu timah menurut beberapa sumber sangat bervariasi antara 0.96 – 1.2E+5 MPa dan densitas 7400 – 8900 kg/m<sup>3</sup>. Densitas perunggu timah ini sangat dipengaruhi oleh besar porositasnya (Bartocha dan Baron, 2016).

Diagram fasa tembaga-timah menunjukkan bahwa titik cair timah dimulai pada 232°C dan titik cair tembaga 1084 °C. Ada delapan fase pada paduan binary Cu-Sn yaitu  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \epsilon, \xi$  dan fase Sn. Penambahan prosen paduan timah terhadap tembaga sangat berpengaruh terhadap titik leburnya. Diagram fase *binary* Cu-Sn merupakan reaksi kompleks yang dapat menerangkan reaksi dari fase peritectic ke fase *eutectoid*. Gambar 4. menunjukkan diagram fase *binary* Cu-Sn.



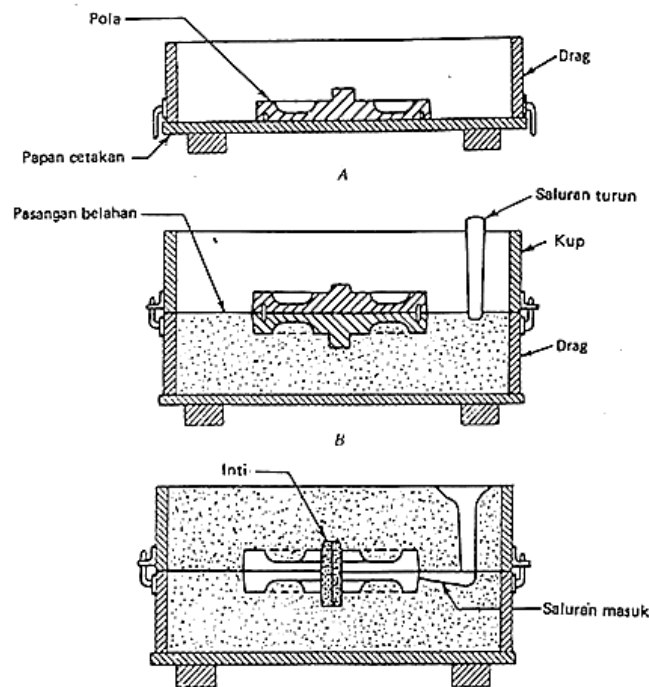
Gambar 4. Diagram fase Cu-Sn (Fürtauer *et al.*, 2013)

Komposisi 8wt.%Sn merupakan fase *eutectoid*  $\alpha$  pada temperatur 350°C. Rentang temperatur yang cukup besar menyebabkan paduan ini mengalami segregasi sampai pada fase *peritectic*  $\beta$  di temperatur 799°C. Pada proses pendinginan fase *peritectic*  $\beta$  akan menjadi  $\alpha$  dan  $\gamma$ , dilanjutkan fase  $\gamma$  akan menjadi fase *eutectoid*  $\alpha$  dan  $\delta$ , pada akhirnya  $\delta$  akan bertransformasi menjadi  $\alpha$  dan  $\epsilon$ . Fase yang mudah terbentuk adalah  $\alpha$  dan  $\delta$  *eutectoid*, karena fase  $\alpha$  dan  $\epsilon$  terbentuk sangat lambat dan berlangsung pada suhu rendah dengan perlakuan panas (Copper Development Association, 1994). *Peritectic* terbentuk pada fase ( $\alpha$  padat + L) menjadi fase  $\beta$  dan pada fase ( $\beta$ +L) menjadi  $\gamma$  pada 799°C. Fase *peritectic*  $\alpha$  dengan fase  $\beta$  dapat dibedakan menjadi 2 batas (Kohler *et al.*, 2009) yaitu : *Hypoperitectic* dari  $C_{\alpha} = 13,5\text{wt.}\% \text{Sn}$  sampai  $C_{\beta} = 22\text{wt.}\% \text{Sn}$  dan *Hyperperitectic* dari  $C_{\beta} = 22\text{wt.}\% \text{Sn}$  sampai  $C_1 = 25,5\text{wt.}\% \text{Sn}$ . Proses pendinginan paduan Cu (13.5-25.5wt.%)Sn fase *peritectic* ( $\alpha + L$ ) menjadi  $\beta$  dan ( $\beta$ +L) menjadi  $\gamma$  mulai terbentuk pada temperatur 755°C. Fase *eutectoid* ( $\alpha + \gamma$ ) terbentuk pada temperatur 586°C dan ( $\alpha + \delta$ ) temperatur 520°C (Li *et al.*, 2013). Fasa  $\alpha$  yang lebih didominasi komposisi tembaga akan membentuk struktur *faced centered cubic*/FCC. Fase  $\beta$  dan  $\gamma$  terbentuk struktur kristal *body centered cubic*/BCC (Hanson dan Walpole, 1951).

Bahan baku utama paduan perunggu timah yang digunakan untuk material alat musik mengacu beberapa referensi adalah paduan perunggu 22-23wt.%Sn (Goodway, 1992), paduan perunggu C91300; 18-20%Sn (Copper Development Association, 1994), paduan perunggu 20-23wt.%Sn (Audy *et al.*, 2008), paduan 20-22.5wt.%Sn (Sugita *et al.*, 2011), Cu-23wt.%Sn (Ploszajki, 2014) dan paduan perunggu 20-25wt.%Sn (Debut *et al.*, 2016). Paduan sebagaimana tersebut di atas termasuk pada paduan *high tin bronze* dengan komposisi timah lebih dari 17% (Zeynep *et al.*, 2012). *High tin bronze* ini banyak digunakan untuk memproduksi alat musik berupa bel lonceng. Komposisi paduan yang digunakan yaitu Cu dan Sn dengan kemurnian 99,99% dengan perbandingan komposisi 4:1 (Bartocha dan Baron., 2016; Nadolski, 2017). *High tin bronze* komposisi 18- 22wt.%Sn memiliki sifat akustik yang baik, mampu menghasilkan bunyi yang panjang dengan waktu bergetar yang lama, namun paduan ini bersifat getas (Sugita *et al.*, 2011).

Teknik pengecoran logam merupakan teknik pembentukan yang sudah lama di kenal untuk memproduksi komponen logam. Teknik pengecoran logam merupakan salah satu proses manufaktur yang sesuai untuk membuat komponen logam dengan bentuk yang kompleks, sesuai untuk produk massal dengan biaya yang relatif murah. Walaupun teknik pengecoran logam merupakan proses manufaktur tertua, metode dalam pengecoran logam

terus mengalami perkembangan. Proses pengecoran modern mempunyai banyak tahapan mulai dari cara memasukkan logam cair, komposisi bahan paduan, media cetakan, proses penuangan, proses pembekuan dan pengerjaan akhir produk. Teknik pengecoran logam membutuhkan pola untuk membuat cetakan. Bahan yang digunakan untuk membuat pola antara lain : logam, kayu, lilin dan *styrofoam*, sedangkan bahan untuk membuat cetakan sangat beragam antara lain: logam, keramik dan pasir. Desain dan bahan cetakan akan menentukan kualitas produk cor serta efisiensi selama proses pengecoran logam. Gambar 5. menunjukkan tahapan proses pengecoran logam.



Gambar 5. Proses pengecoran logam

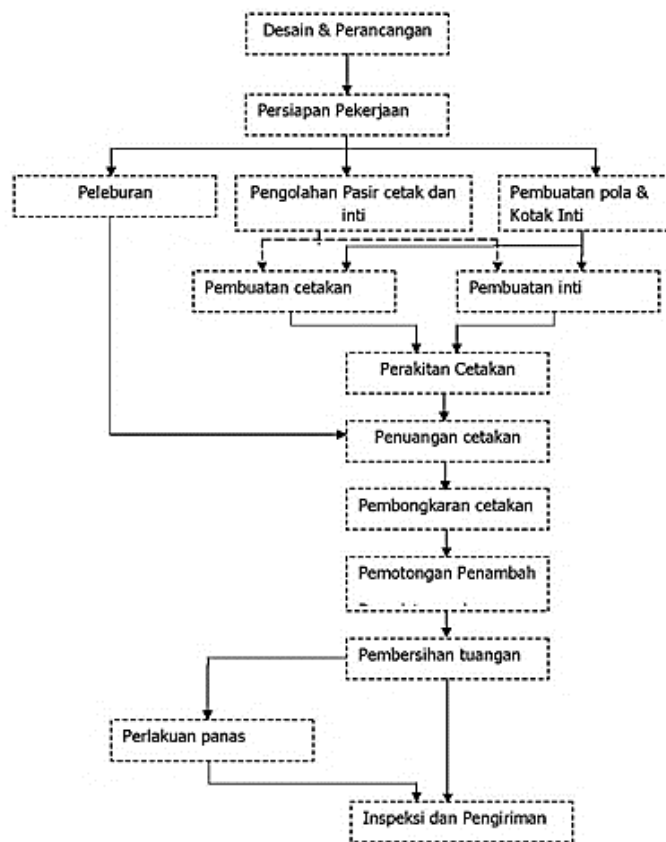
## B. Pengecoran dengan cetakan pasir ( *Sand Casting* )

Cetakan dengan media pasir merupakan metode pengecoran tertua. Teknik ini dilakukan dengan cara menempatkan pola pada media pasir yang berfungsi sebagai cetakan. Selanjutnya logam cair dituangkan ke dalam cetakan melalui cawan dan saluran turun yang ada, sehingga logam cair akan mengisi rongga cetakan. Logam cair akan mengalami proses pembekuan selama dalam cetakan.

Keuntungan dari pengecoran dengan cetakan pasir adalah dapat digunakan untuk semua jenis logam, tidak dibatasi ukuran, bentuk dan berat benda serta sesuai untuk produk massal (Sulaiman dan Hamouda, 2001). Media pasir juga dapat digunakan untuk beberapa

kali proses dengan tetap memperhatikan kelembaban, permeabilitas dan distribusi partikelnya. Cetakan pasir dapat juga digunakan untuk produk cor ber dinding tipis dengan menggunakan binder anorganik. Cetakan pasir yang diikat dengan binder anorganik yang tersusun atas *tetraethyl orthosilicate*,  $\text{SiO}_2$ , *sodium methoxide* dan  $\text{Na}_2\text{O}$  dengan perlakuan panas mencapai  $1000^\circ\text{C}$  dengan penahanan selama 1 jam sesuai untuk produk impeller yang tipis dan kompleks (Kim *et al.*, 2016).

Kelemahan dari cetakan pasir adalah diperlukan proses permesinan dan finishing, khususnya produk dengan ukuran besar dan permukaan yang kasar. Kelemahan cetakan pasir lainnya adalah cenderung menghasilkan gelembung udara yang timbul sebagai akibat dari pembakaran binder organik dari proses penuangan sampai pembekuan. Hal ini dapat menimbulkan cacat permukaan tidak terkecuali cacat mikrostruktur. Gambar 6. menunjukkan diagram alir proses pengecoran logam dengan pasir cetak.



Gambar 6. Diagram alir proses pengecoran dengan pasir cetak

### C. Pengecoran dengan pola lilin (*Investment casting*)

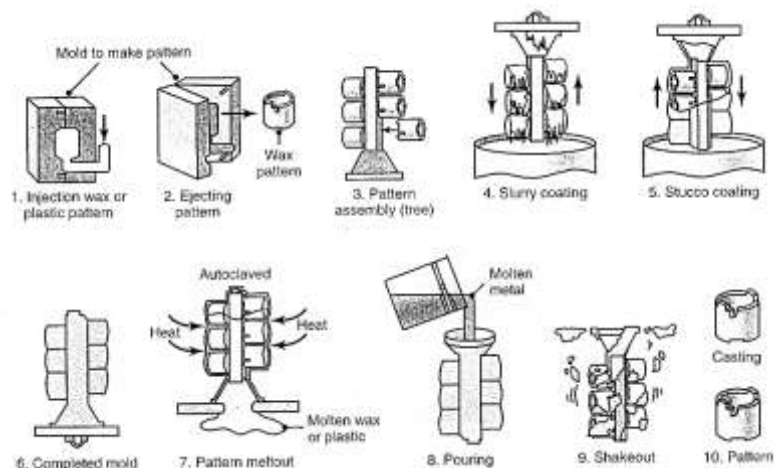
*Investment casting* juga dikenal dengan *lost wax process*. Salah satu teknologi pengecoran logam yang mampu menghasilkan produk cor yang presisi dengan bentuk geometri yang kompleks. *Investment casting* sesuai untuk menghasilkan produk cor berdinding tipis, mempunyai kemiringan dan kelengkungan dengan variasi radius yang kecil, permukaan yang halus, bentuk dan dimensi yang akurat (Pattnaik *et al.*, 2012). *Investment casting* menghasilkan produk cor mendekati produk akhir (*near net shape*) sehingga menurunkan waktu produksi tanpa proses permesinan (Chua dan Feng, 2005). Produk yang dihasilkan tidak memerlukan pengerjaan akhir pada permukaannya dan toleransi produk yang tinggi (Lee *et al.*, 2017). Kelemahan cetakan *investment casting* yaitu memerlukan tahapan proses yang panjang, biaya relatif mahal, terbatas untuk benda cor ukuran kecil dan sulit ditambahkan inti.

*Investment casting* banyak diterapkan untuk membuat berbagai perhiasan dan bentuk replika dari logam emas dengan menggunakan pola lilin (Prasad dan Mikula., 2001). Saat ini *investment casting* diterapkan untuk memproduksi *blade* turbin dan komponen permesinan (Pattnaik *et al.*, 2012). Teknik ini juga diterapkan untuk membuat stik olah raga golf, komponen elektronik, hip pada implant tulang, komponen industri pesawat terbang dan pertahanan. *Investment casting* dapat digunakan untuk memproduksi berbagai tipe *hip implant* biomedis dengan bahan *stainless steel*. Mikrostruktur dan kekerasan bahan *stainless steel* meningkat pada ketebalan cetakan V/A sebesar 3,34 melalui *hybrid investment casting* (Kumar *etal.*, 2016). Ketebalan cetakan mempengaruhi keakuratan ukuran, kepresisian akan menurun dengan meningkatnya tebal cetakan. Waktu pengeringan akan mempengaruhi kekasaran permukaan, semakin tinggi waktu pengeringan cetakan akan menurunkan kekasaran permukaan (Singh *et al.*, 2017). *Investment casting* merupakan metode yang sesuai untuk pengecoran material *superalloys*, *stainless steel*, paduan aluminium dan paduan tembaga. Teknik pengecoran dengan cetakan pasir dan pola lilin telah digunakan untuk menghasilkan lebih dari 80% jumlah produk cor selama ini..

Pola lilin yang sudah terbentuk selanjutnya dilapisi dengan material keramik atau bahan tahan api. Material keramik menjadi faktor yang penting dalam proses *investment casting*. Kualitas bahan keramik sangat menentukan hasil cor, hal ini disebabkan cetakan keramik langsung menempel pada logam cair yang di cor. Adapun beberapa syarat bahan keramik untuk *investment casting* (Nadolski dan Kanopka, 2007) yaitu :

- a. Mempunyai kekuatan mentah, sehingga tidak mengalami keretakan saat proses *dewaxing*.
- b. Mempunyai kekuatan setelah pembakaran, sehingga mampu menahan logam cair yang dicor ke dalam cetakan.
- c. Memiliki kestabilan kimia yang tinggi, sehingga tidak bereaksi dengan logam cair membentuk fase baru pada permukaan produk.
- d. Memiliki permeabilitas dan konduktifitas thermal yang baik, sehingga logam cair mampu mengalir ke dalam cetakan keramik.
- e. Mampu mempertahankan dimensi cetakan.

Gambar 7. menunjukkan diagram alir proses pengecoran logam dengan cetakan lilin.



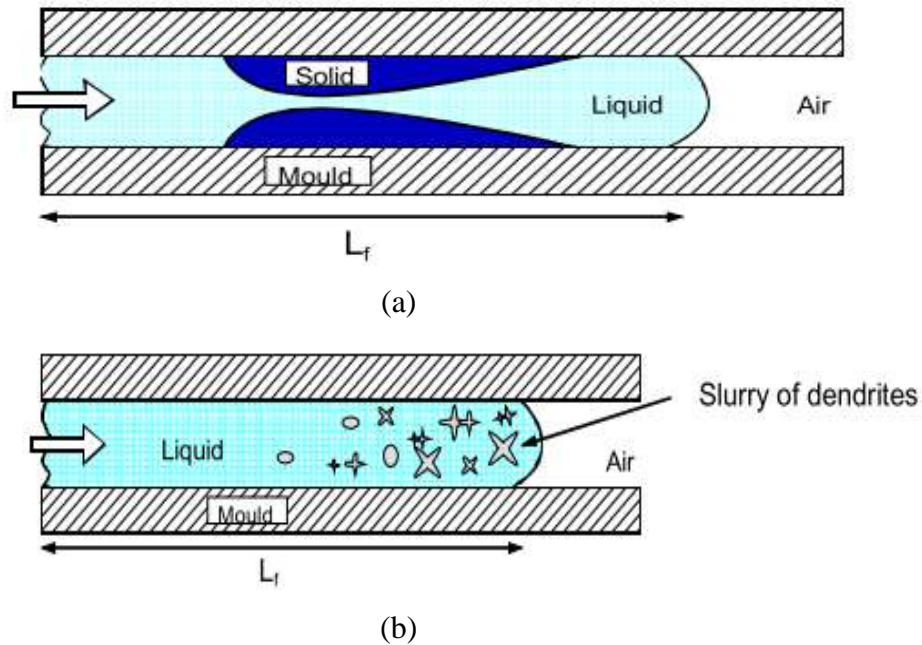
Gambar 7. Proses pengecoran *investment casting*

#### D. Fluiditas

Salah satu parameter yang perlu diperhatikan untuk menunjang keberhasilan teknik pengecoran logam adalah pentingnya mempelajari mekanisme fluiditas. Fluiditas adalah kemampuan logam cair mengalir dan mengisi setiap bagian dari cetakan (Campbell dan Harding., 1994). Pengukuran fluiditas secara tidak langsung juga mengukur viskositas dan tidak hanya memaparkan sifat-sifat dari komposisi paduan tetapi secara luas mengukur panjang fluiditas (Raza., 2015). Panjang fluiditas diukur dari titik tuang sampai dengan titik pembekuan berhenti dan merupakan jarak maksimum logam cair mengalir di dalam cetakan (Siavashi., 2011). Fluiditas yang jelek akan menyulitkan pengisian cetakan dan meningkatnya cacat cor (Caliari *et al.*, 2015)

Faktor penting yang dapat mempengaruhi fluiditas logam cair adalah: temperatur tuang, laju pembekuan, viskositas cairan, komposisi paduan, konduktifitas termal, laju aliran panas, dan tegangan permukaan (Raza., 2015). Konsep fluiditas dapat dibedakan dua

definsi yaitu: aspek mampu mengalir dan mampu mengisi pada cetakan. Mampu alir adalah kriteria dinamis terkait dengan kemampuan logam cair mengalir di dalam cetakan. Hal ini sangat dipengaruhi oleh sifat cairan logam antara lain: laju pembekuan, komposisi paduan, viskositas cairan serta laju aliran panas. Mampu isi adalah kriteria statis yang dipengaruhi oleh tegangan permukaan antara cairan yang mengalir dengan sifat material cetakan. Gambar 8. menunjukkan proses pembekuan terhadap fluiditas logam cair.



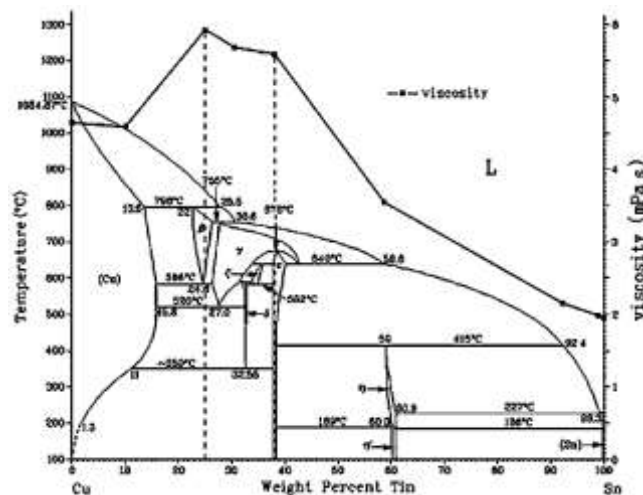
Gambar 8. (a) Fluiditas pada pembekuan cepat (b) Fluiditas pada pembekuan lambat.

Fluiditas logam sangat dipengaruhi oleh temperatur tuang dan temperatur cetakan. Temperatur tuang yang tinggi akan meningkatkan panjang fluiditas pada pengecoran besi tuang kelabu dengan pola *lost foam* (Suyitno dan Sutiyoko., 2012). Temperatur tertinggi yang dilakukan pada proses pengecoran dinamakan temperatur superheat. Temperatur superheat adalah temperatur diatas titik cair paduan logam. Temperatur superheat akan membuat waktu pembekuan dari fase cair ke fase padat meningkat. Peningkatan temperatur tuang akan meningkatkan panjang fluiditas secara signifikan pada semua jenis cetakan (Rzychoń *et al.*,2010).Temperatur tuang yang tinggi akan meningkatkan waktu pembekuan (Sugita *et al.*,2015). Semakin panjang waktu pembekuan semakin panjang fluiditas. Peningkatan panjang fluiditas pada rongga sempit relatif kecil dibandingkan rongga tebal (Qudong *et al.*, 1999). Peningkatan temperatur tuang dan temperatur cetakan dapat menurunkan viskositas yang dapat memperbaiki fluiditas pada pengecoran logam



berdinding tipis (Raza., 2015). Temperatur cetakan dan kecepatan penekanan mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap fluiditas pada pengecoran *squeeze*. Peningkatan temperatur cetakan sangat mempengaruhi kemampuan alir pada ketebalan dinding antara 3-4 mm (Yun *et al.*, 2014). Peningkatan temperatur cetakan dan temperatur tuang akan menyebabkan gradien pendinginan mengecil. Hal ini mengakibatkan struktur dendrit cenderung berkurang dan terbentuk struktur butir *dendrite* selular.

Komposisi paduan sangat mempengaruhi viskositas perunggu timah. Viskositas paduan merupakan sifat penting terhadap sifat mampu alir paduan Cu-Sn (Tan *et al.*, 2007). Viskositas paduan akan menurun dengan meningkatnya temperatur peleburan (Hou *et al.*, 2006). Diagram *fase binary* Cu-Sn menunjukkan bahwa paduan perunggu timah menunjukkan viskositas tembaga murni lebih tinggi dibandingkan viskositas timah murni. Penambahan jumlah timah mampu menurunkan nilai viskositasnya (Shmakova *et al.*, 2016). Penambahan komposisi unsur pada paduan Cu-Sn akan mampu meningkatkan fluiditas sampai batas tertentu. Penambahan komposisi unsur Sn pada paduan Cu-Sn melebihi batas optimal akan menurunkan fluiditasnya. Viskositas paduan Cu-Sn mengalami penurunan dengan adanya penambahan komposisi unsur Sn dan peningkatan temperatur. Peningkatan nilai viskositas paduan Cu-Sn terjadi pada komposisi 20-30% Sn dalam phase  $\beta$  dan  $\gamma$  *intermetallic* (Mudry *et al.*, 2013).



Gambar 9. Perbandingan temperatur dan viskositas pada diagram fase Cu-Sn (Tan *et al.*, 2007)

Viskositas tertinggi terjadi pada perunggu timah komposisi 25% Sn. Penambahan komposisi unsur Sn paduan Cu-Sn sangat mempengaruhi konsentrasi titik liquidusnya. Kurva

viskositas dengan temperatur superheat menunjukkan bahwa maksimum viskositas terjadi pada 25%wt Sn. Gambar 9. menunjukkan perbandingan antara temperatur dengan viskositas diagram fase Cu-Sn.

Selain menurunkan viskositas, peningkatan temperatur akan menurunkan energi aktivasinya (Hou *et al.*,2006). Energi aktivasi pada viskositas adalah energi yang dibutuhkan untuk mengubah satu atom dari tempat satu bergerak ke posisi lainnya dalam kondisi cair. Energi aktivasi dengan viskositas menunjukkan kecenderungan yang sama. Penurunan viskositas juga menyebabkan energi aktivasi semakin rendah (Hou *et al.*, 2006; Shmakova *et al.*, 2016). Energi aktivasi meningkat pada komposisi 20-40%Sn dengan peningkatan terbesar pada komposisi 25%Sn (Tan *et al.*, 2007). Peningkatan temperatur akan mampu menurunkan energi aktivasi,viskositas, volume aliran serta menurunkan panjang radius pada ujung aliran (Jixin *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2008).Penurunan viskositas akan menyebabkan terjadinya perubahan radius yang cepat pada temperatur antara 800-900°C pada ujung aliran paduan Cu40Sn (Zhao *et al.*,2008).