Pengaruh Penambahan *Chill* Baja AISI 1006 dan Ketebalan *Cope* Cetakan Pasir terhadap Morfologi dan Sifat Kekerasan pada Proses Pengecoran Paduan Tembaga-Seng

Soni Aji Pradana, Hosta Ardhyananta, dan Alvian Toto Wibisono
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

***Abstrak*— Paduan tembaga-seng (Cu-Zn) memiliki sifat mampu cor dan mekanik yang baik. Studi ini melakukan penelitian terhadap hasil pengecoran paduan tembaga-seng dengan prosentase seng sebesar 17% (Cu-17Zn). Paduan ini digunakan sebagai material pipa tanpa sambungan (*red brass seamless pipe*). Secara umum morfologi paduan hasil pengecoran dibagi menjadi tiga zona *chill zone, columnar zone,* dan *equi-axed zone*. Terbentuknya ketiga zona tersebut disebabkan oleh komposisi dan laju pendinginan selama proses pembekuan. Penelitian ini mempelajari pengaruh penambahan *chill* baja AISI 1006 dan ketebalan *cope* dari 3, 5, 7, dan 9 cm pada cetakan pasir. Paduan tembaga-seng yang terbentuk dianalisa dengan menggunakan *Optical Emission Spectroscopy* (komposisi), *X-Ray Diffraction* (fasa), mikroskop optik (metalografi), dan *Hardness Tester* (kekerasan). Studi ini menunjukan Penambahan *chill* baja AISI 1006 pada cetakan pasir akan meningkatkan terbentuknya butir kolumnar. Sedangkan peningkatan ketebalan *cope* tidak menunjukan perbedaan yang signifikan terhadap terbentuknya butir kolumnar. Cetakan dengan penambahan *chill* baja AISI 1006 akan meningkatkan kekerasan paduan tembaga-seng. Cetakan dengan penambahan *chill* baja AISI 1006 pada ketebalan *cope* 7 cm menghasilkan paduan tembaga-seng dengan nilai kekerasan tertinggi sebesar 66.76 BHN.**

Kata Kunci*— Paduan Tembaga-Seng, Kolumnar, Ketebalan *Cope, Chill

I. PENDAHULUAN

Tembaga merupakan logam yang sudah digunakan oleh manusia sejak 4000 tahun yang lalu. Secara umum tembaga dan paduannya memiliki sifat mampu bentuk yang baik [1]. Paduan tembaga dapat dibedakan menjadi dua yaitu kuningan dan perunggu. Kuningan adalah paduan tembaga dengan seng sebagai elemen paduan utama sedangkan perunggu merupakan paduan tembaga dengan elemen paduan utama selain seng atau prosentase seng berada dibawah prosentase elemen paduan lain [2]. Saat ini, tembaga dan paduannya telah banyak diaplikasikan ke dalam berbagai bidang seperti industri (pipa air, silinder pompa, inti radiator, dsb), kelistrikan (kabel), dan beberapa alat-alat kesenian. Dalam penggunaannya, tembaga banyak dipadukan dengan berbagai elemen paduan untuk meningkatkan kekuatan mekaniknya. Salah satu paduan tembaga yang banyak digunakan ialah paduan tembaga-seng (kuningan). Kuningan memiliki sifat mampu cor yang baik dan harga yang relatif murah, namun kuningan memiliki kekuatan mekanik lebih rendah dibandingkan dengan paduan lain [3]. Selain dengan penambahan elemen paduan, peningkatan kekuatan mekanik juga dapat dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran butir [4].

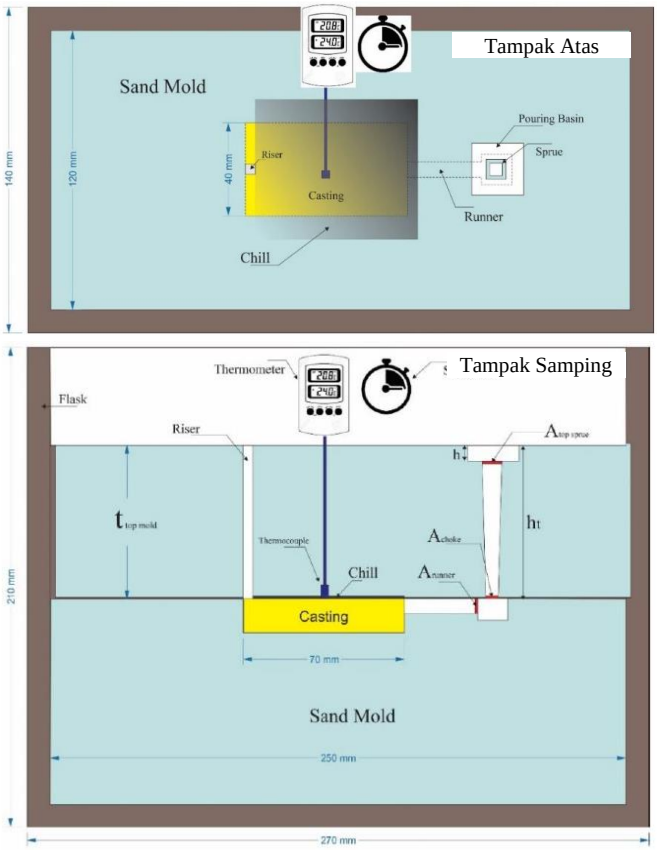
Salah satu metode dalam pembuatan tembaga dan paduannya ialah dengan metode pengecoran. Secara umum tembaga memiliki tingkat *fluiditas* yang tinggi sehingga mudah untuk dilakukan pengecoran [5]. Pengecoran merupakan metode pembuatan logam dengan mencairkan logam hingga titik leburnya dan mencetaknya kedalam bentuk yang diinginkan [6]. Secara umum terdapat 3 daerah struktur butir yang terbentuk dari hasil pengecoran, *chill zone*, *columnar zone*, dan *equi-axed zone* [7]. Proses pembekuan pada tembaga dan paduannya digolongkan menjadi 2, pembekuan dengan *skin formation* atau pembekuan dalam *mushy manner*. Pada tembaga dengan tingkat kemurnian yang tinggi dan beberapa paduan tembaga (*low copper alloy*) pembekuan terjadi secara *skin formation* dimana seluruh butir akan berbentuk kolumnar, sedangkan pada paduan tembaga, pembekuan terjadi pada kondisi *mushy* dimana akan terbentuk butir *equi-axed*. Namun dalam kenyataanya proses pembekuan tersebut tidak akan terjadi secara sempurna. Seiring dengan meningkatknya prosentase elemen paduan pada tembaga maka pembekuan yang terjadi akan membentuk baik butir kolumnar dan juga *equiaxed* (pembekuan terjadi secara *skin formation* dan *mushy manner*) [8]. Hal ini salah satunya dipengaruhi oleh laju pendinginan yang terjadi selama proses pengecoran. Material cetakan, ketebelan dinding cetakan, dan temperatur penuangan akan memberikan pengaruh terhadap laju pendinginan dalam proses pengecoran [9].

Pembentukan dan pertumbuhan butir yang *homogen* akan memberikan sifat mekanik yang baik. Sampai saat ini belum banyak penelitian yang mempelajari mengenai morfologi butir hasil pengecoran paduan tembaga-seng. Morfologi hasil pengecoran salah satuya dipengaruhi oleh kondisi cetakan. Maka dari itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh penambahan *chill* dan ketebalan *cope* pada cetakan pasir terhadap morfologi dan sifat kekerasan selama proses pengecoran paduan tembaga-seng. Cetakan akan

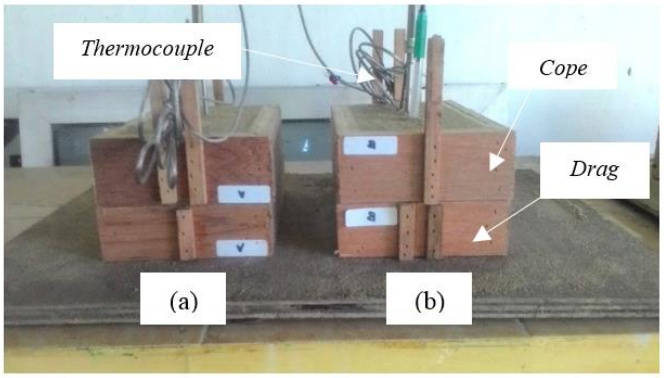
divariasikan dengan memberikan penambahan *chill* baja AISI 1006 dan ketebalan *cope* cetakan yang berbeda-beda.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mevariasikan penambahan *chill* dan juga ketebalan *cope* pada cetakan pasir. Diawali dengan merancang cetakan pasir sesuai dengan Gambar 1. Ketebalan *cope* cetakan pasir divariasikan mulai dari 3, 5, 7, dan 9 cm. Setiap variasi ketebalan dibedakan menjadi 2 , cetakan tanpa *chill* dan dengan penambahan *chill*. *Chill* menggunakan baja AISI 1006. Gambar 2 menunjukan cetakan pasir yang telah siap untuk digunakan. Penelitian ini dilakukan terhadap paduan tembaga-seng dengan prosentase seng sebesar 17% (Cu-17Zn). Waktu peleburan yang dibutuhkan selama 25-30 menit pada temperatur penuangan 1.250°C. Peleburan paduan menggunakan *burner furnace* dengan bahan bakar LPG. Logam cair dituang kedalam cetakan tanpa *chill* dan cetakan dengan penambahan *chill*. Setiap variasi cetakan dipasang *thermocouple* tipe K. *Thermocouple* disambungkan ke dalam *compact rio controler (National Instruments)* yang berfungsi untuk mengamati penurunan temperatur selama proses pendinginan. Setelah dingin hasil pengecoran dibongkar dan dilakukan pengujian OES, XRD *(Philips X'Pert Pro)*, kekerasan (*Universal Hardness Tester*) dan metalografi *(BX51M-RF)*. Setelah itu hasil pengujian dianalisa dan ditarik kesimpulan.



Gambar 1. Rancangan Cetakan Pasir



Gambar 2. Cetakan Pasir (a) Tanpa *Chill*; (b) Dengan *Chill*

III. HASIL DAN DISKUSI

A. *Komposisi Paduan Tembaga-Seng*

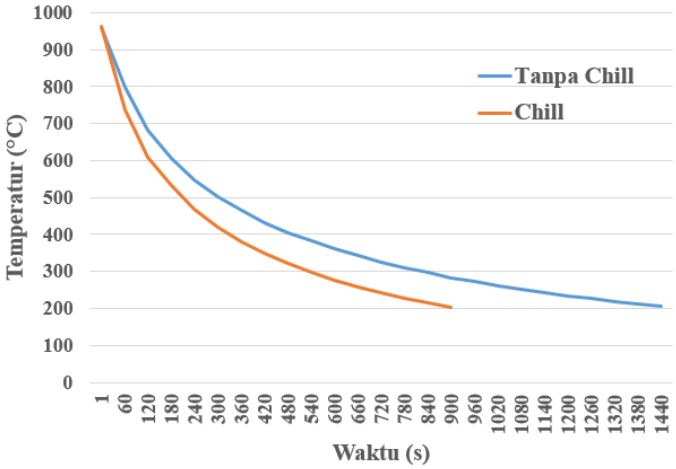
Tabel 1. Hasil Pengujian OES

Cu	**Zn**	**Pb**	**Sn**	**P**	**Mn**	**Fe**	**Ni**
82.3	17.4	0.0075	0.0069	0.0011	0.0004	0.0262	0.0185
Si	**Mg**	**Cr**	**Al**	**S**	**As**	**Be**	**Ag**
0.0002	0.0009	0.0043	0.0453	0.0001	0.0015	0.0001	0.0018
Co	**Bi**	**Cd**	**Sb**	**Zr**	**B**	**Se**	**Te**
0.001	0.0002	0.0013	0.0064	0.0007	0.0009	0.0004	0.0063
Ti	**C**	**Nb**					
0.0001	0.05	0.0039					

Tabel 1. menunjukan terdapat 82.3% unsur Cu, 17.4 % unsur Zn dan 0.3% sisanya adalah pengotor. Prosentase Cu dan Zn hasil coran berbeda dengan prosentase pada awal material bahan dimasukan. Penurunan kadar Zn ini dikarenakan titik didih Zn (910°C) yang berada di bawah titik lebur Cu (1050°C) sehingga dimungkinkan terjadinya proses penguapan pada Zn sebelum paduan Cu-Zn larut sempurna. Temperatur penuangan dibuat 200°C lebih tinggi dari titik lebur Cu untuk meningkatkan kemampuan alir logam cair saat akan dituangkan kedalam cetakan.

B. *Pola Pendinginan Paduan Tembaga-Seng*

Penambahan *chill* baja AISI 1006 pada cetakan pasir menunjukan pola pendinginan yang berbeda. Gambar 3. menunjukan perbandingan pola pendinginan hasil pengecoran pada tebal *cope* 7 cm tanpa *chill* dan dengan *chill.* Kurva berwarna biru menunjukan pola pendinginan paduan tembaga-seng pada cetakan pasir tanpa menggunakan *chill.* Waktu pendinginan untuk mencapai temperatur 200°C adalah 24 menit dan 49 detik. Kurva berwarna merah menunjukan pola pendinginan paduan tembaga-seng pada cetakan pasir dengan penambahan *chill.* Waktu pendinginan untuk mencapai temperatur 200°C adalah 15 menit dan 13 detik. Perbandingan kedua kurva pada Gambar 3. menunjukan pola pendinginan pada *cope* 7 cm dengan penambahan *chill* memiliki waktu yang lebih cepat.



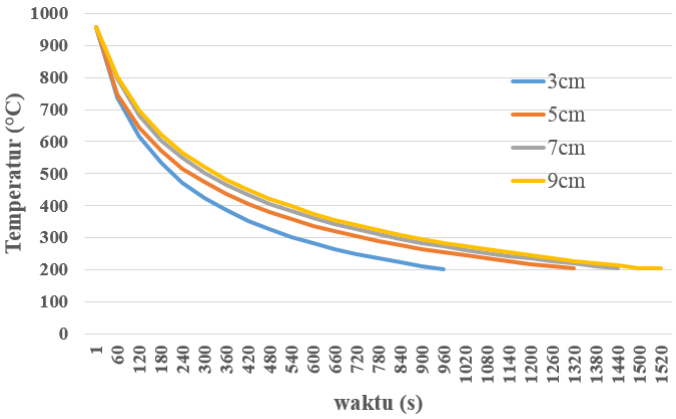
Gambar 3. Pola Pendinginan Paduan Tembaga-Seng pada Cetakan dengan *Cope* 7 Cm

Pola pendinginan pada tebal *cope* 3, 5, dan 9 cm juga menunjukan pola yang serupa. Cetakan dengan penambahan *chill* akan menunjukan kurva pendinginan yang lebih curam dibandingkan dengan cetakan tanpa menggunakan *chill*. Waktu pendinginan yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur 200°C pada setiap variasi tebal *cope* cetakan pasir ditunjukan pada Tabel 2.

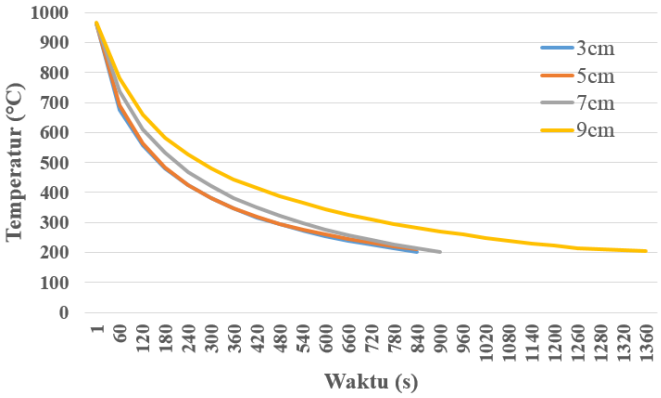
Tabel 2. Waktu Penurunan Temperatur Paduan Tembaga-Seng

Cetakan Pasir	Tebal *Cope*			
	3 Cm	5 Cm	7 Cm	9 Cm
Tanpa *Chill*	16 menit 5 detik	22 menit 27 detik	24 menit 49 detik	26 menit
Chill	14 menit 12 detik	14 menit 48 detik	15 menit 13 detik	23 menit 16 detik

Cetakan pada variasi ketebalan *cope* 3, 5, 7, dan 9 cm dengan penambahan *chill* baja AISI 1006 menunjukan waktu pendinginan yang lebih singkat dibandingkan cetakan tanpa *chill*. Waktu pendinginan yang lebih singkat disebabkan oleh *chill* baja AISI 1006 yang memiliki kondukivitas panas yang lebih besar dibandingkan pasir pada cetakan tanpa penambahan *chill*. Semakin besar nilai konduktivitas panas maka semakin cepat panas keluar dari dalam cetakan.



Gambar 4. Pola Pendinginan Paduan Tembaga-Seng pada Cetakan Tanpa *Chill*

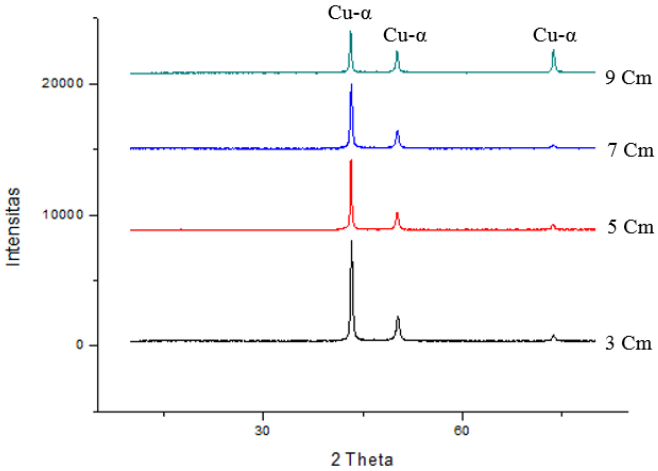


Gambar 5. Pola Pendinginan Paduan Tembaga-Seng pada Cetakan dengan *Chill*

Gambar 4 menunjukan pola pendinginan pada beberapa variasi tebal *cope* tanpa penambahan *chill* dan Gambar 5 menunjukan pola pendinginan pada beberapa variasi tebal *cope* dengan penambahan *chill*. *Cope* dengan tebal 9 cm menunjukan waktu pendinginan paling lama baik pada cetakan tanpa *chill* dan cetakan dengan penambahan *chill*. Semakin tebal *cope* pada cetakan pasir maka waktu pendinginan paduan tembaga-seng dalam cetakan akan semakin lama.

C. Hasil Pengujian XRD Paduan Tembaga-Seng

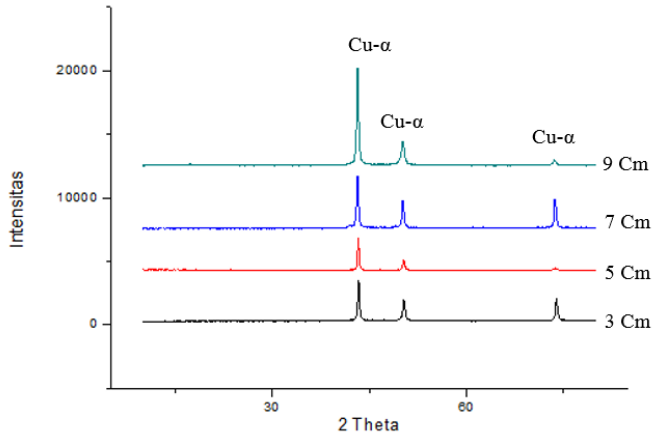
Gambar 6 dan 7 menunjukan hasil pengujian XRD dari 8 sampel. Sampel berupa hasil pengecoran paduan tembaga-seng dalam variasi tebal *cope* yang berbeda. Dari kedelapan sampel tersebut, menunjukan fasa berupa Cu-α. Fasa tersebut ditunjukan oleh 3 *peak* pada kisaran 2θ; 43,298°, 50,434°, dan 74,133° (PDF Card 01-085-1326). Ketiga peak tersebut mengidenifikasikan bahwa fasa Cu-α memiliki struktur kristal FCC.



Gambar 6. Hasil Pengujian XRD Paduan Tembaga-Seng Pada Berbagai Variasi Tebal *Cope* Tanpa *Chill*

Gambar 6 menunjukan peak dari hasil pengecoran paduan tembaga-seng dalam cetakan tanpa *chill*. Pada tebal *cope* 3 cm peak muncul pada 2θ; 43,2972°, 50,24909°, dan 73,6782°. Pada tebal *cope* 5 cm peak muncul pada 2θ; 43,19694°, 50,16553°, dan 73,59473°. Pada tebal *cope* 7 cm peak muncul pada 2θ; 43,24707°, 50,21567°, dan 73,59473°.

Pada tebal *cope* 9 cm peak muncul pada 2θ; 43,13009°, 50,13211°, dan 73,66158°.



Gambar 7. Hasil Pengujian XRD Paduan Tembaga-Seng Pada Berbagai Variasi Tebal *Cope* Dengan *Chill*

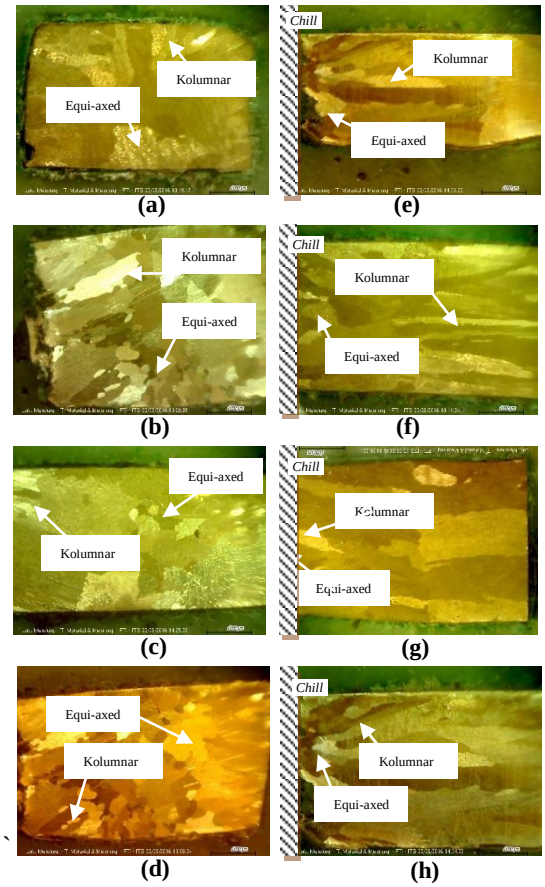
Gambar 7 menunjukan peak dari hasil pengecoran paduan tembaga-seng dalam cetakan dengan penambahan *chill*. Pada tebal *cope* 3 cm peak muncul pada 2θ; 43,33063°, 50,33265°, dan 73,89554°. Pada tebal *cope* 5 cm peak muncul pada 2θ; 43,28049°, 50,28251°, dan 73,81198°. Pada tebal *cope* 7 cm peak muncul pada 2θ; 43,16351°, 50,16553°, dan 73,67829°. Pada tebal *cope* 9 cm peak muncul pada 2θ; 43,18022°, 50,14882°, dan 73,57802°.

Gambar 6 dan 7 menunjukan tidak terdapat perbedaan peak yang signifikan pada paduan tembaga-seng. Seluruh sampel yang diuji memiliki fasa Cu-α dan struktur kristal FCC. Komposisi 17% Zn tidak menghasilkan fasa baru. Hal tersebut menunjukan bahwa Zn telah larut sempurna dalam Cu.

D. *Morfologi Paduan Tembaga-Seng*

Gambar 8 memperlihatkan struktur makro hasil pengecoran pada variasi cetakan yang berbeda. Paduan hasil pengecoran dengan cetakan tanpa *chill* baja AISI 1006 memiliki struktur makro yang didominasi oleh bentuk kristal *equi-axed* dan terdapat sedikit bentuk kristal kolumnar. Sedangkan hasil pengecoran pada cetakan yang ditambahkan *chill* baja AISI 1006 memiliki struktur makro yang didominasi oleh bentuk kristal kolumnar yang memanjang. Namun jika diamati berdasarkan tebal *cope*, butir kristal kolumnar yang terbentuk tidaklah jauh berbeda baik *cope* dengan tebal 3, 5, 7, dan 9 cm.

Rujukan [8] menyebutkan bahwa paduan Cu-17Zn (*red brass*) yang memiliki *freezing range* yang panjang, secara makro struktur akan memiliki bentuk kristal *equi-axed*. Hal ini dikarenakan pada pada pendinginan yang sangat lambat akan terdapat perbedaan titik beku antara kedua unsur paduan. Ketika kristal terbentuk, atom dari elemen paduan yang titik bekunya lebih rendah akan tersisih ke sekitar logam cair yang mengakibatkan turunnya temperatur beku logam cair karena meningkatknya komposisi paduan di dalam logam cair. Dengan turunnya temperatur logam cair maka pertumbuhan kristal akan terhenti yang menjadikan kristal akan berebentuk *equi-axed*.



Gambar 8.Struktur Makro Paduan Tembaga-Seng pada Setiap Variasi Tebal *Cope* Cetakan (a) 3 Cm; (b) 5 Cm; (c) 7 Cm; (d) 9 Cm; (e) 3 Cm Dengan *Chill*; (f) 5 Cm Dengan *Chill*; (g) 7 Cm Dengan *Chill*; (h) 9 Cm Dengan *Chill*.

Namun dalam proses pengecoran, laju pendiginan tidak akan berjalan dengan lambat karena cetakan pasir berada pada temperatur ruangan sehingga laju pendinginan akan berjalan cepat. Dari laju pendinginan yang cepat ini akan mulai terbentuk dendrit yang berlawanan arah dengan laju aliran kalor, dimana sisi samping pada dendrit akan banyak mengandung elemen paduan sehingga menyebabkan dendrit akan tumbuh ke arah dalam coran dan membentuk butir kristal kolumnar.

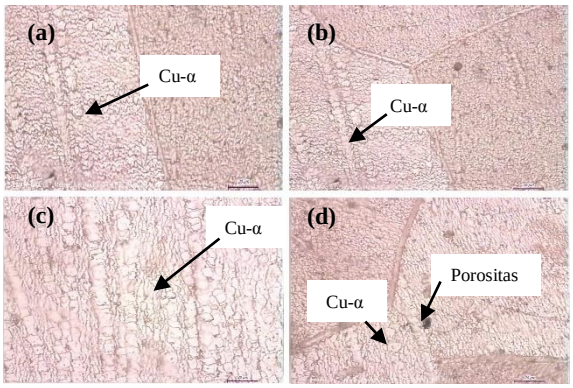
Dengan adanya penambahan *chill* kedalam cetakan maka butir kristal kolumnar yang terbentuk akan semakin banyak. Adanya penambahan *chill* pada salah satu sisi cetakan akan memberikan kecenderungan kepada arah terbentuknya butir kolumnar. C*hill* pada cetakan akan mempercepat laju aliran panas yang menyebabkan arah butir kolumnar menjadi seragam berlawanan arah dengan laju aliran panas, atau dapat dikatakan sebagai pembekuan terarah. Jika dibandingkan cetakan dengan tebal *cope* yang berbeda, tidak terdapat perbedaan yang jelas antar butir kolumnar yang terbentuk pada coran hasil dari *cope* dengan tebal 3, 5, 7, dan 9 cm. Hal tersebut disebabkan oleh tebal *drag* cetakan yang sama antara variasi tebal *cope* cetakan 3, 5, 7, dan 9 cm. Tebal *drag*

cetakan yang digunakan setinggi 5 cm. Ketika logam cair pertama kali masuk kedalam rongga cetakan dan bersentuhan dengan bagian dari cetakan maka seketika logam yang pertama kali membeku ialah logam yang dekat dengan *drag* cetakan. *Drag* dengan tebal yang sama menyebabkan pola pembekuan dan pembentukan butir yang sama. Pengukuran panjang butir kolumnar paduan tembaga-seng terdapat pada Tabel 3.

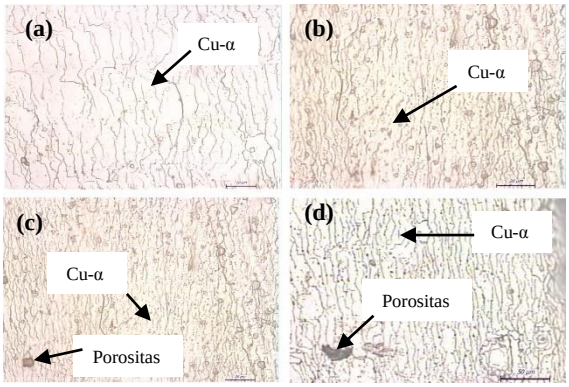
Tabel 3. Panjang Butir Kolumnar Paduan Tembaga-Seng

	3 Cm		5 Cm	
	Tanpa chill (µm)	Chill (µm)	Tanpa chill (µm)	Chill (µm)
Pengukuran 1	2275.82	3192.63	2880	2083.46
Pengukuran 2	1278.47	2120.08	2291.27	3716.79
Pengukuran 3	2252.52	2862.56	3153.24	4305.27
	7 Cm		9 Cm	
	Tanpa chill (µm)	Chill (µm)	Tanpa chill (µm)	Chill (µm)
Pengukuran 1	1334.15	2458.81	1972.16	2935.75
Pengukuran 2	3465.28	3603,55	916.16	3011.94
Pengukuran 3	1654.17	4716.27	2578.86	3596.15

Diagram fasa Cu-Zn menunjukan paduan tembaga dengan prosentase seng 17% memiliki fasa Cu-α. Menurut hasil pengujian XRD, paduan tembaga-seng pada variasi cetakan yang berbeda tidak menunjukan fasa baru selain Cu-α. Gambar 9 dan 10 menunjukan hasil pengamatan struktur mikro pada perbesaran 50X.



Gambar 9. Struktur Mikro Paduan Tembaga-Seng Pada Variasi Cetakan Tanpa *Chill* Baja AISI 1006 di perbesaran 50x (a) Tebal 3 Cm; (b) Tebal 5 Cm; (c) Tebal 7 Cm; (d) Tebal 9 Cm.



Gambar 10. Struktur Mikro Paduan Tembaga-Seng Pada Variasi Cetakan Dengan *Chill* Baja AISI 1006 di perbesaran 50x(a) Tebal 3 Cm; (b) Tebal 5 Cm; (c) Tebal 7 Cm; (d) Tebal 9 Cm.

Gambar 9 dan 10 menunjukan hasil struktur mikro paduan tembaga-seng pada variasi ketebalan *cope* tanpa penambahan *chill* dan dengan penambahan *chill*. Struktur mikro hasil cetakan tanpa *chill* menunjukan bentuk butir yang membulat. Sedangkan struktur mikro hasil cetakan dengan *chill* terlihat lebih memanjang. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan laju aliran kalor antara cetakan tanpa menggunakan *chill* dan cetakan dengan penambahan *chill*. Perbedaan ketebalan *cope* cetakan tidak memberikan pengaruh terhadap struktur mikro yang terbentuk. Gambar 9 dan 10 menunjukan bintik hitam dibeberapa bagian. Bintik hitam tersebut merupakan porositas hasil dari proses pengecoran paduan tembaga-seng.

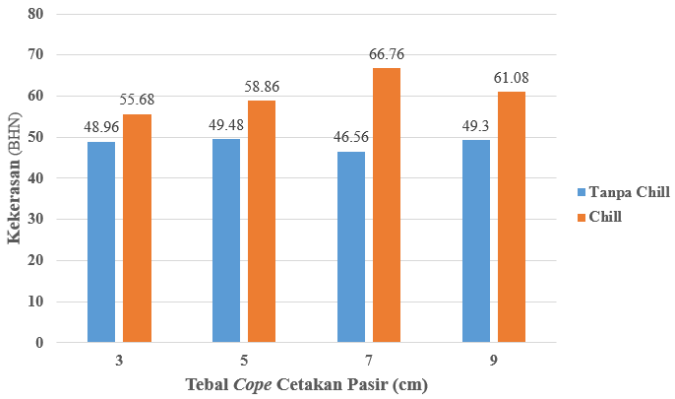
E. Hasil Pengujian Kekerasan Paduan Tembaga-Seng

Tabel 4 menunjukan nilai kekerasan paduan tembaga-seng hasil dari pengecoran pada berbagai variasi cetakan. Paduan tembaga-seng hasil cetakan tanpa *chill* baja AISI 1006 menunjukan nilai kekerasan sebesar 46.56 BHN hingga 49.48 BHN. Sedangkan nilai kekerasan paduan tembaga-seng hasil cetakan dengan penambahan *chill* baja AISI 1006 sebesar 55.68 BHN hingga 66.76 BHN. Nilai kekerasan paduan tembaga-seng meningkat pada paduan tembaga-seng hasil dari pengecoran pada cetakan dengan penambahan *chill* baja AISI 1006.

Tabel 4. Nilai Kekerasan Paduan Tembaga-Seng

3cm		5cm		7cm		9cm	
Tanpa *Chill*	*Chill*	Tanpa *Chill*	*Chill*	Tanpa *Chill*	*Chill*	Tanpa *Chill*	*Chill*
46.3	62.7	44.5	63.2	47.5	63.4	52.6	60.2
49.6	57.1	47.5	53.9	46.3	65.4	49.4	59.2
46.6	53.5	51.5	55.9	45.7	63.2	50.1	62.1
51.4	53.9	54.1	55.7	47.9	70.9	46.2	60.2
50.9	51.2	49.8	65.6	45.4	70.9	48.2	63.7
Rata-rata							
48.96	55.68	49.48	58.86	46.56	66.76	49.3	61.08

Gambar 11 menunjukan bahwa pada perbedaan ketebalan *cope*, nilai kekerasan yang didapatkan hampir sama. Paduan tembaga-seng hasil pengecoran cetakan dengan penambahan *chill* baja AISI 1006 memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi. Meningkatnya nilai kekerasan hasil pengecoran pada cetakan dengan menggunakan *chill* baja AISI 1006 dikarenakan banyaknya butir kolumnar yang terbentuk selama proses pendinginan.



Gambar 11. Nilai Kekerasan Paduan Tembaga-Seng

IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa

1. Penambahan *chill* baja AISI 1006 pada cetakan pasir meningkatkan terbentukya butir kolumnar pada hasil pengecoran paduan tembaga-seng.
2. Penambahan *chill* pada cetakan pasir mempercepat waktu pendinginan paduan tembaga-seng. Semakin tebal *cope* cetakan pasir waktu pendinginan yang dibutuhkan semakin lama. Perbedaan ketebalan *cope* cetakan tidak memberikan pengaruh sigifikan terhadap terbentuknya butir kolumnar pada paduan tembaga-seng.
3. Penambahan *chill* pada cetakan pasir meningkatkan kekerasan dari hasil pengecoran paduan tembaga-seng.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Banga, T. 1981. **Foundry Engineering**. New Delhi: Khanna Plubisher

[2] Callister, W. D. 1940. **Material Science and Engineering and Introduction**. New York: John Wiley & Sons, Inc.

[3] Popovich, A., Sufiiarov, V., May 2014. "Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy", **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University**, 38-41

[4] Wang, Y.H, Xiao, L.R., April 2015. "Microstructure and Mechanical Properties of Columnar-Grained Copper Produced by The Ohno Continuous Casting Technique", **School of Materials Science and Engineering**, 122-130

[5] Rao, P.N. 1998. **Manufacturing Technology Foundry, Forming, and Welding**. New Delhi : McGraw-Hill Company

[6] Gupta, R.B. 1989. **Foundry Engineering**. New Delhi : Satya Prakashan.

[7] Flemings, M.C. 1974. **Solidification Processing**. New York: McGraw-Hll International book Company

[8] _. 1969. **Copper-Base Alloys Foundry Practice**. Des Plaines: AFS Training & Research Institute

[9] Surdia, T., Chijiwa, K.. **Teknik Pengecoran Logam. 2000**. Jakarta: Balai Pustaka