



INTISARI

Metode pembekuan searah digunakan untuk membuat struktur columnar. Pembuatan struktur ini membutuhkan pengontrolan dan pemahaman tentang interkoneksi antar parameter yang mempengaruhi proses pembekuan, seperti konduktivitas termal material cetakan, parameter pembekuan (*cooling rate* (T_R), *growth rate* (V), *temperature gradient* (G), dan *local solidification time* (t_{SL})), dan komposisi kimia. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan: hubungan antara material cetakan terhadap waktu pembekuan total, parameter pembekuan, struktur mikro, dan kekerasan mikro (HV); profil komposisi dan interkoneksi antar parameter pembekuan, parameter mikro, dan HV pada paduan Al-Cu dan Al-(3-19)Cu-10Si; peta struktur *columnar* berdasarkan *cooling rate* dan komposisi; dan hubungan penambahan penghalus butir terhadap pola pembekuan, struktur mikro, dan HV paduan Al-Cu-10Si.

Material yang digunakan Al-6Si, Al-4,5Cu, dan Al-(3-19)Cu-10Si dan Al-10Cu-10Si dengan 0.03%Ti. Al-6Si dibekukan searah dalam cetakan lempung dan *stainless steel* pada alat pembekuan searah Bridgman tipe vertikal. Data temperatur terhadap waktu selama pendinginan direkam menggunakan data akuisisi PLX-DAQ dengan sistem Arduino melalui termokopel yang ditempelkan pada sampel. Data tersebut kemudian diolah untuk mendapatkan parameter pembekuan. Sampel dikarakterisasi dengan pengamatan mikro, SEM, EDS, *Mapping*, dan uji kekerasan mikro. Material cetakan dengan struktur *columnar* terbaik dipilih untuk kegiatan selanjutnya. Tahapan yang sama digunakan untuk mendapatkan profil komposisi dan hubungan parameter pembekuan, parameter mikro, dan kekerasan mikro pada Al-4,5Cu dan Al-(3-19)Cu-10Si. Interkoneksi parameter diperoleh dengan pendekatan matematis *power law*. Hubungan parameter mikro terhadap HV mengacu ke bentuk persamaan Hall-Petch. Analisis interkoneksi parameter dibuat berdasarkan nilai eksponen dari persamaan-persamaan tersebut. Struktur mikro sampel diamati kemudian dihubungkan terhadap *cooling rate* dan komposisi untuk membuat peta struktur *columnar*. Komposisi dengan struktur *columnar* terbaik digunakan pada kegiatan selanjutnya. Hubungan penambahan penghalus butir terhadap pola pembekuan, struktur mikro, dan HV diperoleh dengan menambahkan Al-Ti-B. Perbandingan kurva pembekuan, parameter pembekuan, struktur mikro, dan HV dilakukan pada sampel dengan dan tanpa 0,03Ti.

Peningkatan konduktivitas termal material cetakan sebesar 72% mengurangi nilai parameter pembekuan kecuali t_{SL} , sebaliknya meningkatkan kekerasan mikro dan *primary dendrite arm spacing* (λ_1). Profil komposisi Cu pada Al-4,5Cu berkurang dalam rentang 4.93-3.99% dengan pertambahan jarak dari titik pelepasan panas. λ_1 dan λ_2 (*secondary dendrite arm spacing*) berbanding terbalik dengan parameter pembekuan kecuali untuk t_{SL} . Nilai eksponen λ_1 dan λ_2 dengan cetakan lempung lebih rendah dari nilai eksponen pada cetakan logam. Profil komposisi Cu pada Al-(3-19)Cu-Si cenderung menurun dengan bertambahnya jarak. Peningkatan Cu menambah: nilai eksponen T_R dan V untuk fungsi λ_1 dan λ_2 (hingga 10Cu) dan nilai kekerasan yang ditunjukkan dengan koefisien persamaan Hall-Petch pada komposisi 19Cu. Sebuah peta struktur *columnar* Al-(3-19)Cu-10Si telah dikembangkan berdasarkan *cooling rate* dan komposisi. Penambahan 0,03Ti pada Al-Cu-Si memperbanyak lokasi pengintian sehingga menghalangi pembentukan struktur *columnar*. Hasil pemilihan material cetakan, komposisi (paduan dan refiner), dan peta struktur dapat menjadi acuan pemilihan parameter yang tepat untuk mendapatkan struktur *columnar*.

Kata kunci: pembekuan searah, *cooling rate*, struktur *columnar*, Al-Cu-Si, profil komposisi, TiB



ABSTRACT

Unidirectional solidification is a method to produce columnar structures. It requires control and understanding of the interconnection between affected parameters. Those parameters are the thermal conductivity of the mold material, solidification parameters (cooling rate (T_R), growth rate (V), temperature gradient (G), and local solidification time (t_{SL})), and chemical composition. This research aims to obtain: the relation between mold material to the total solidification time, the solidification parameters, microstructure, and micro-hardness (HV) in Al-6wt.%Si; composition profile and interconnection between the solidification parameters, microstructural parameters, and HV in Al-4.5wt.%Cu and Al-(3-19)wt.%Cu-10wt.%Si alloys; a columnar structure map based on T_R and composition; and a connection of grain refiner addition to solidification mechanism, microstructure, and HV of Al-Cu-10wt.%Si alloys.

The materials used were Al-6wt.%Si, Al-4.5wt.%Cu, Al-(3-19)wt.%Cu-10Si and Al-10Cu-10Si with 0.03%Ti. Al-6wt.%Si samples were unidirectionally solidified in clay and stainless-steel molds in the Bridgman vertical type furnace. During the cooling, Temperature-to-time data was recorded using PLX-DAQ acquisition data with Arduino system through the embedded thermocouples to the sample. The solidification parameters were obtained from this data. The samples were characterized using the optical microscope, SEM, EDS, Mapping, and micro-hardness tester. The mold material that idles for producing columnar structure was selected for the next activities. The same steps were employed to obtain the composition profile and the relationship between freezing parameters, micro parameters, and HV of Al-4,5Cu and Al-(3-19)Cu-10Si. The interconnection of parameters was obtained by using a power law mathematical approach. In the context of microstructural parameters to HV, the approach was referred to Hall-Petch equation form. The parameter interconnection analysis is made based on the exponential value of these equations. The observed sample's microstructure was then linked to the cooling rate and composition to develop a columnar structure map. The composition with the best columnar structure was selected for the next activity. The relation between grain refiner addition to solidification mechanism, microstructure, and HV was obtained by adding Al-Ti-B. A comparison was made on the samples with and without 0.03wt.%Ti.

The 72% increase of mold thermal conductivity reduces the value of solidification parameters except for t_{SL} ; in contrast, it increases HV and λ_1 . The composition of Cu in Al-4,5wt.%Cu decreases in the range of 4.93-3.99% with the heat extraction point's distance. The λ_1 and λ_2 are inversely proportional to the solidification parameters except for the t_{SL} . The exponent values of λ_1 and λ_2 with clay molds are lower than exponent values with the metal mold. The increase in Cu composition of the Al-Cu-Si alloy does not change the declining trend of Cu composition with the distance from the heat extraction point. The Cu composition profile in Al-(3-19)wt.% Cu-10wt.% Si tends to decrease with the distance. The increase of Cu increases the exponent value of T_R and V for the λ_1 and λ_2 functions and the hardness value which indicates by the Hall-Petch equation coefficient at 19wt.%Cu. A columnar map of the Al-(3-19) wt.%Cu-10wt.%Si has been developed based on T_R and composition. The addition of 0.03wt.%Ti to Al-Cu-Si promotes many nucleation sites and restricts the columnar growth. The current results provide a reference for proper parameter selection to obtain columnar structures.

Keywords: unidirectional solidification, cooling rate, columnar structure, Al-Cu-Si, composition profile, TiB