

## INTISARI

Perkembangan teknologi termal dalam sistem pendinginan, khususnya pada perangkat elektronik dan pembangkit energi, menuntut efisiensi perpindahan kalor yang tinggi. Salah satu metode yang efektif untuk meningkatkan efisiensi perpindahan kalor adalah *pool boiling*, terutama dalam rezim *nucleate boiling* yang mampu mencapai laju perpindahan kalor yang signifikan. Penggunaan material *metal foam* dalam fenomena *pool boiling* menawarkan keunggulan berupa luas permukaan efektif yang besar, struktur pori tiga dimensi, serta kemampuan mendistribusikan gelembung secara merata. Namun, performa perpindahan kalor juga dipengaruhi oleh sudut orientasi permukaan pemanas yang dapat mengubah arah gaya *buoyancy* dan perilaku dinamika gelembung selama proses *boiling* berlangsung. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh sudut orientasi dan perbandingan perbedaan permukaan *metal foam* terhadap dinamika *bubble* dan *heat transfer coefficient* (HTC) pada fenomena *pool boiling*.

Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan memvariasikan sudut orientasi permukaan, yaitu pada  $\theta = 0^\circ$ ,  $30^\circ$ , dan  $60^\circ$  dan *heat rate* divariasikan dari 50 W sampai 90 W, dengan kenaikan setiap 10 W. Spesimen yang digunakan adalah material *metal foam* dengan porositas 40% (MFF PM4) dan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan material *metal foam* dengan porositas 30% (MFF PM5). Sistem uji terdiri dari *boiling chamber*, *cartridge heater*, *immersion heater*, dan sistem akuisisi data menggunakan *thermocouple* tipe-K yang terhubung dengan OMEGALOG. Fluida kerja yang digunakan adalah Shell S3-X, dan pengukuran dilakukan pada kondisi tekanan atmosferik dan temperatur saturasi. Parameter yang diamati meliputi temperatur permukaan, *heat flux*, serta frekuensi dan ukuran gelembung yang terbentuk. HTC dihitung menggunakan pendekatan *steady-state* berdasarkan perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida kerja.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut orientasi memiliki dampak yang signifikan terhadap koefisien perpindahan kalor dan dinamika *bubble*. Studi ini menunjukkan bahwa semakin meningkatnya sudut orientasi ( $\theta$ ), mengakibatkan pengurangan daerah sebaran dan pertumbuhan *bubble*. Nilai *heat flux* ( $q''$ ) berpengaruh terhadap koefisien perpindahan kalor, di mana peningkatan  $q''$  dan  $\theta$  menyebabkan penurunan koefisien perpindahan kalor *pool boiling*. Nilai  $\bar{h}$  yang didapatkan memiliki performa terbaik terjadi pada sudut  $\theta = 0^\circ$  dengan nilai  $\bar{h}$  sebesar  $0,840 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$  untuk AMF PM<sub>4</sub>, pada  $\theta = 30^\circ$  dan  $60^\circ$  nilainya turun menjadi  $0,752 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$  dan  $0,694 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ . Sementara itu, untuk AMF PM<sub>5</sub> dengan performa terbaik pada  $\theta = 0^\circ$ , memiliki nilai  $\bar{h}$  sebesar  $1,103 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ , sedangkan pada  $\theta = 30^\circ$  dan  $60^\circ$  nilainya turun menjadi  $0,922 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$  dan  $0,871 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ . Pengaruh nilai HTC yang dipengaruhi oleh dinamika *bubble* yang berupa diameter *bubble*, gaya *bouyancy*, frekuensi pelepasan *bubble*, luas permukaan internal, dan *nucleation sites*.

**Kata Kunci** : *Pool boiling*, sudut orientasi, koefisien perpindahan kalor, dinamika *bubble*, *metal foam*.

## ABSTRACT

The advancement of thermal technology in cooling systems, particularly in electronic devices and power generation, demands high heat transfer efficiency. One effective method to enhance heat transfer performance is pool boiling, especially in the nucleate boiling regime, which can achieve significant heat transfer rates. The use of metal foam material in pool boiling phenomena offers advantages such as a large effective surface area, three-dimensional porous structure, and the ability to evenly distribute bubble formation. However, heat transfer performance is also influenced by the orientation angle of the heating surface, which can alter the direction of buoyancy forces and affect bubble dynamics during the boiling process. This study aims to investigate the effect of orientation angle and the variation of metal foam surface characteristics on bubble dynamics and heat transfer coefficient (HTC) in pool boiling phenomena.

The research method was carried out experimentally by varying the surface orientation angles at  $\theta = 0^\circ$ ,  $30^\circ$ , and  $60^\circ$ , and the heat rate was adjusted from 50 W to 90 W, with an increment of 10 W at each step. The test specimens were made of metal foam material with 40% porosity (MFF PM4), and the results were compared to previous research using metal foam with 30% porosity (MFF PM5). The experimental setup consisted of a boiling chamber, cartridge heater, immersion heater, and a data acquisition system using type-K thermocouples connected to OMEGALOG. The working fluid used was Shell S3-X, and measurements were conducted under atmospheric pressure and saturation temperature. The observed parameters included surface temperature, heat flux, as well as the frequency and size of bubble formation. The heat transfer coefficient (HTC) was calculated using a steady-state approach, based on the temperature difference between the heating surface and the working fluid.

The results of the study show that orientation angle has a significant impact on heat transfer coefficient and bubble dynamics. This study indicates that an increase in orientation angle ( $\theta$ ) leads to a reduction in the bubble distribution area and bubble growth. The heat flux value ( $q''$ ) affects the heat transfer coefficient, where an increase in both  $q''$  and  $\theta$  causes a decrease in the pool boiling heat transfer coefficient. The best performance of the average heat transfer coefficient ( $\bar{h}$ ) was achieved at  $\theta = 0^\circ$ , with a value of  $0.840 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$  for AMF PM4. At  $\theta = 30^\circ$  and  $60^\circ$ , the values decreased to  $0.752 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$  and  $0.694 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$ , respectively. Meanwhile, for AMF PM5, the best performance also occurred at  $\theta = 0^\circ$ , with a  $\bar{h}$  value of  $1.103 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$ , while at  $\theta = 30^\circ$  and  $60^\circ$ , the values dropped to  $0.922 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$  and  $0.871 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$ , respectively. The variation in HTC is influenced by bubble dynamics, which include bubble diameter, buoyancy force, bubble release frequency, internal surface area, and nucleation sites.

**Keywords:** Pool boiling, orientation angle, heat transfer coefficient, bubble dynamics, metal foam.