

INTISARI

Miniaturisasi perangkat elektronik mendorong pengembangan *chip* berperforma tinggi, namun menghasilkan akumulasi panas berlebih yang dapat memicu kegagalan perangkat akibat *thermo-mechanical stress*. Oleh karena itu, diperlukan metode manajemen termal yang efisien. Salah satu metode menjanjikan adalah *pool boiling*, karena mampu menghilangkan panas besar pada suhu *wall superheat* rendah. Penelitian ini mengkaji pengaruh modifikasi permukaan tembaga dengan struktur *microcavity-microchannel* dan pemberian getaran ultrasonik untuk meningkatkan perpindahan panas pada *pool boiling*. Pendekatan dilakukan secara pasif melalui rekayasa permukaan untuk menambah situs nukleasi dan aktif melalui aktuasi getaran *ultrasonic* untuk memperbaiki dinamika fluida. Permukaan *microcavity* dibuat sedalam 0,5 mm dan getaran diberikan menggunakan *ultrasonic transducer* pada frekuensi 20, 30, dan 40 kHz dengan bentuk gelombang sinus dan *square*.

Pengujian menggunakan *aquadest* dan elemen pemanas tembaga yang dilengkapi *thermocouple* untuk mencatat suhu. Data digunakan untuk menghitung *heat flux*, *wall superheat*, dan *heat transfer coefficient* (HTC). Permukaan *microcavity* terbukti meningkatkan densitas situs nukleasi dan mempercepat pembentukan gelembung, yang menyebabkan karakteristik kurva berbalik arah atau *hook back*. Getaran ultrasonik meningkatkan efek *acoustic streaming* dan gaya *bjerknes*, sehingga mendukung pelepasan gelembung. Gelombang sinus menunjukkan kinerja perpindahan panas lebih baik dari *square*, dengan penurunan *wall superheat* hingga 10°C. Frekuensi 20-30 kHz menghasilkan performa lebih baik dibandingkan 40 kHz pada kedua jenis permukaan dan bentuk gelombang.

Kinerja terbaik dicapai pada frekuensi 30 kHz sinus di permukaan *microcavity*, dengan *heat flux* maksimum 831,3 kW/m² dan HTC 656,2 kW/m²·°C pada suhu *wall superheat* 10°C lebih rendah dibandingkan pengujian tanpa modifikasi sama sekali, yaitu pengujian tanpa getaran dengan permukaan halus. *Heat flux* meningkat 55,5 % dan HTC meningkat hingga 10 kali lipat dibandingkan pengujian tanpa getaran permukaan halus. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi rekayasa permukaan dan gelombang akustik mampu secara signifikan meningkatkan performa sistem *pool boiling*, serta potensial untuk manajemen termal perangkat elektronik berdensitas daya tinggi.

Kata Kunci: *pool boiling*, HTC, fluks kalor, *microcavity*, getaran ultrasonik.

ABSTRACT

The miniaturization of electronic devices drives the development of high-performance chips, but it also leads to excessive heat accumulation, which can trigger device failure due to thermo-mechanical stress. Therefore, an efficient thermal management method is required. One promising method is pool boiling, as it can dissipate a large amount of heat at a relatively low wall superheat.

This study investigates the effect of copper surface modification using microcavity–microchannel structures combined with ultrasonic vibration to enhance heat transfer performance in pool boiling. The approach involves passive enhancement through surface engineering to increase nucleation site density and active enhancement through ultrasonic excitation to improve fluid dynamics. The microcavity surface was fabricated with a depth of 0.5 mm, and vibration was applied using an ultrasonic transducer at frequencies of 20, 30, and 40 kHz with both sinus and square waveforms.

The experiments used aquadest and a cylindrical copper heating element equipped with thermocouples to record temperature. The temperature data were used to calculate heat flux, wall superheat, and heat transfer coefficient (HTC). The microcavity surface significantly increased nucleation site density and accelerated bubble formation, resulting in a boiling curve with hook back characteristic. Ultrasonic vibration enhanced acoustic streaming and Bjerknes force, thereby supporting more efficient bubble release. Sinus waves demonstrated better heat transfer performance than square waves, with up to a 10°C reduction in wall superheat. Frequencies of 20–30 kHz performed better than 40 kHz on both surface types and waveform.

The best performance was achieved at 30 kHz sinus vibration on the microcavity surface, yielding a maximum heat flux of 831.3 kW/m² and an HTC of 656.2 kW/m²·°C, with a wall superheat 10°C lower than the test condition without vibration smooth surface. Heatflux increases up to 55,5% while HTC increases significantly up to 10 times. These results demonstrate that the combination of surface engineering and acoustic actuation can significantly enhance the heat transfer performance of pool boiling systems, making it a promising solution for thermal management in high-power-density electronic devices.

Keywords: pool boiling, HTC, heat flux, microcavity, ultrasonic vibration