



A Review of High Heat Transfer Coatings in Steam Power Plant Condensers

Majid Mirzae^{1*}, Tayyebah Mohebbi²

¹Assistant professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran

² Ph.D Student, Chemistry Department, Kashan university, Kashan

Received: 3 Sep 2023 Accepted: 22 Jan 2024

Abstract

Condensation occurs in most heat transfer processes, from cooling electronic devices to heat removal in power plants. The overall heat transfer coefficient of dropwise condensation (DWC) is several times higher than that of filmwise condensation (FWC). Therefore, obtaining a stable DWC is very important for better performance. DWC stability depends on surface hydrophobicity, surface free energy, and surface tension of the condensed liquid. The properties required for DWC may be achieved by micro-scale surface modification. In this review, micro/nanoscale coatings such as noble metals, ion implantation, rare earth oxides, lubricant-injected surfaces, polymers, nanostructured surfaces, carbon nanotubes, graphene, and porous coatings have been reviewed and discussed. Surface coating methods, applications, and potential have been compared with respect to heat transfer ability, durability, and efficiency. In addition, common limitations and challenges for densification enhancement applications are summarized to provide future research directions.

Keyword: Filmwise Condensation, Dropwise Condensation, Surface Coatings, Heat Transfer, Surface Energy.

* mjmirzaei@nri.ac.ir

مروری بر پوشش‌های انتقال حرارت بالا در کندانسورهای نیروگاه بخار

مجید میرزایی^{1*}، طیبه محبی²

¹ استادیار، عضو هیئت‌علمی، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران

² دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده شیمی/دانشگاه کاشان، کاشان

دریافت: 1402/06/12 پذیرش: 1402/11/02

چکیده

چگالش در اکثر فرآیندهای انتقال حرارت، از خنک کردن وسایل الکترونیکی تا دفع گرما در نیروگاه‌ها، رخ می‌دهد. ضریب انتقال حرارت کلی چگالش قطره‌ای (DWC) در مقایسه با چگالش لایه‌ای (FWC)، چندین برابر بیشتر است؛ بنابراین، به دست آوردن DWC پایدار برای عملکرد بهتر بسیار مهم است. پایداری DWC به آب‌گریزی سطح، انرژی آزاد سطح و کشش سطحی مایع چگالشی بستگی دارد. خواص مورد نیاز برای DWC ممکن است با اصلاح سطح در مقیاس میکرو به دست آید. در این بررسی، پوشش‌های میکرو/نانومقیاس مانند فلزات نجیب، کاشت یون، اکسیدهای خاکی کمیاب، سطوح تزریق‌شده با روان‌کننده، پلیمرها، سطوح نانوساختار، نانولوله‌های کربنی، گرافن و پوشش‌های متخلخل بررسی و مورد بحث قرار گرفته‌اند. روش‌های پوشش سطحی، کاربردها و پتانسیل آن با توجه به توانایی انتقال حرارت، دوام و کارایی مقایسه شده‌اند. علاوه بر این، محدودیت‌ها و چالش‌های رایج برای کاربردهای افزایش چگالش برای ارائه دستورالعمل‌های تحقیقاتی آتی جمع‌بندی شده‌اند.

کلمات کلیدی: چگالش لایه‌ای، چگالش قطره‌ای، پوشش‌های سطحی، انتقال حرارت، انرژی سطحی.

* mjmirzaei@nri.ac.ir

1- مقدمه

تغییر فاز به واسطه انتقال حرارت (PCHT¹) جایگاه ویژه‌ای در هر برنامه تبدیل انرژی، از خنک‌سازی پردازنده در مقیاس کوچک تا نیروگاه‌های مقیاس بزرگ دارد [1]. مزیت اصلی PCHT این است که مقادیر زیادی گرما را می‌توان با اختلاف دمای کوچک منتقل کرد [2]. 50 درصد از نیروگاه‌های آب‌شیرین‌کن و 85 درصد از نیروگاه‌های تولید برق در سراسر جهان مبتنی بر کندانسور بخار هستند [3]. با این حال، به دلیل راندمان حرارتی ضعیف فرآیندهای PCHT، تلفات مرتبط زیاد است. بنابراین، هرگونه بهبود در انتقال حرارت منجر به بهبود کارایی کلی خواهد شد که منجر به کاهش هزینه‌های سرمایه‌عملیاتی (CAPEX/OPEX²) و بازگشت محیطی می‌شود. بهبود انتقال حرارت مستلزم بهبودهای فیزیکی در سیستم است و با طیف وسیعی از کاربردهای PCHT، بهبودهای جزئی باعث تأثیرات قابل توجهی در مسائل انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌شود [4]. در کاربردهای PCHT، پدیده‌های تبخیر و چگالش غالب هستند. این فرآیندها از نظر وابستگی متغیر شبیه یکدیگر هستند. هر دو پدیده سطحی هستند و به متغیرهایی مانند ماهیت سیال عامل، سطح و اثر متقابل بین آن‌ها بستگی دارند. با این حال، شرایط سطح برهمکنش مؤثر بر جوشش و چگالش متفاوت است. به عنوان مثال، سطح آب‌دوست با تأخیر در تشکیل فیلم بخار، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد، در حالی که در چگالش، باعث تشکیل فیلم مایع و در نتیجه کاهش عملکرد سطح می‌شود. به طور مشابه، پوشش آب‌گریز عملکرد بهتری در چگالش ایجاد می‌کند، اما منجر به کاهش عملکرد در جوشش می‌شود. علاوه بر این، ماهیت توپوگرافی پوشش‌ها اثرات متفاوتی برای جوشش و چگالش دارد. به عنوان مثال، پوشش‌های متخلخل از نظر شار حرارتی بحرانی (CHF³) و ضریب انتقال حرارت (htc⁴) مزایایی برای جوشش دارند، در حالی که برای چگالش، این پوشش‌ها کارآمد نیستند. کندانسورهای صنعتی عمدتاً مبدل‌های پوسته و لوله است و به ناحیه انتقال حرارت بالا نیاز دارد [5]. علاوه بر این، مقدار زیادی آب خنک‌کننده مورد نیاز است که در قدرت پمپاژ بیشتر منعکس می‌شود. گرمای جذب شده توسط آب خنک‌کننده از کندانسور دوباره به منبع آب ریخته می‌شود. در برخی از نیروگاه‌ها، مانند آب‌شیرین‌کن، کندانسور به عنوان پیش‌گرم‌کن استفاده می‌شود، اما تقریباً یک قسمت از هر ده قسمت به عنوان خوراک استفاده می‌شود و بقیه باقی‌مانده به دریا پمپ می‌شود [6]. فقط آب خنک‌کننده دفع شده دمای بالاتری دارد و ممکن است بر محیط‌زیست و حیات دریایی تأثیر بگذارد. بنابراین، بار کندانسور باید با بهینه‌سازی فرآیند به حداقل برسد و برای یک سیستم کارآمد و پایدار، افزایش فرآیند چگالش مورد نیاز است. شکل 1 فرآیند چگالش را در خارج از سطح لوله نشان می‌دهد، جایی که انتقال حرارت کندانس شدن توسط فاز بخار توسط محیط خنک‌کننده که در داخل لوله جریان دارد از بین می‌رود. انتقال حرارت توسط یک ضریب انتقال حرارت کلی کنترل می‌شود که رابطه عکس با مقاومت حرارتی کل دارد.

$$q = u\Delta T = \frac{1}{R_{tot}} \Delta T \quad (1)$$

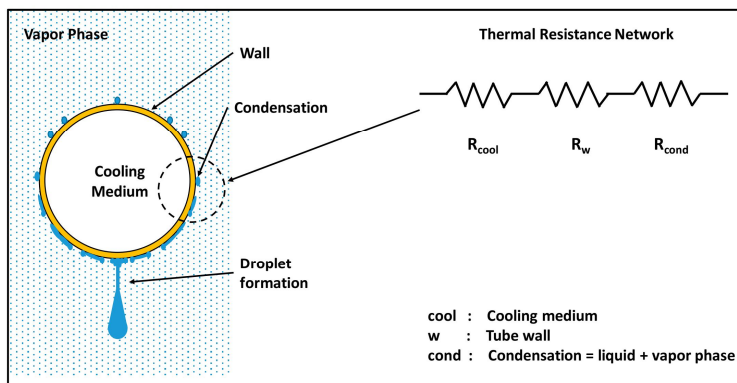
$$R_{tot} = R_{cool} + R_w + R_{cond} \quad (2)$$

¹ Phase change heat transfer

² Capital/operating expenditures

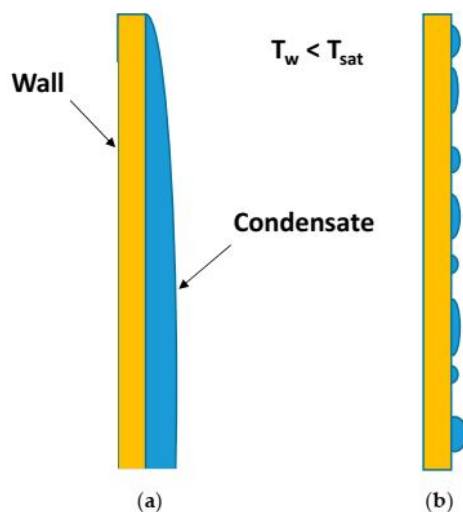
³ Critical heat flux

⁴ Heat transfer coefficient



شکل 1- کندانس خارج از سطح لوله و شبکه مقاومت حرارتی (R) [7]

پدیده چگالش زمانی اتفاق می‌افتد که بخار در فاز اشباع یا فوق اشباع، با سطح/دیوار یا سیال در دمای اشباع پایین‌تر تماس پیدا می‌کند [7]. با توجه به سد انرژی کم‌تر در کاربردهای صنعتی، بخارها به‌جای چگالش مستقیم بر روی سطح دچار کندانس می‌شوند [8-9]. دو نوع اصلی چگالش وجود دارد: چگالش قطره‌ای (DWC⁵) و چگالش لایه‌ای (FWC⁶). مطابق شکل 2، در DWC، قطرات به‌عنوان چگالش ایجاد می‌شوند و به‌صورت ناپیوسته حرکت می‌کنند، در حالی که در FWC، یک مایع رقیق پیوسته فیلم تشکیل می‌شود و سطح سرد کاملاً پوشانده می‌شود که در نتیجه مقاومت حرارتی افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب انتقال حرارت کم‌تر می‌شود.



شکل 2- شماتیک (الف) چگالش لایه‌ای و (ب) چگالش قطره‌ای که در آن دمای دیواره T_w و دمای اشباع سیال T_{sat} است [7]

حالت چگالش در درجه اول به خواص ترموفیزیکی میعانات، شرایط عملیاتی و ویژگی‌های سطح چگالش بستگی دارد. در FWC، ضخامت فیلم، مقاومت حرارتی را به انتقال حرارت اضافه می‌کند؛ بنابراین، گرادیان‌های دمایی بزرگ‌تری

⁵ Dropwise Condensation

⁶ Filmwise Condensation

در سراسر فیلم وجود دارد [10]. با این حال، در DWC، قطرات زمانی که به اندازه بحرانی خاصی می‌رسند، به پایین می‌لغزند و سطح را پاک می‌کنند و در معرض بخار قرار می‌دهند. در این مورد هیچ فیلم مایع برای مقاومت در برابر انتقال حرارت وجود ندارد. در سال 1920، اشمیت⁷ و همکاران کشف کردند که ضرایب انتقال حرارت برای چگالش قطره‌های 5 تا 7 برابر بیشتر از چگالش لایه‌ای معمولی است [11-12]. بنابراین، ترویج DWC مورد توجه محققان در سراسر جهان قرار گرفته است. در اصل، ترویج چگالش قطره‌ای به‌طور بالقوه، طراحی کندانسورهای کوچک‌تر و کم‌هزینه‌تر را ممکن می‌سازد. قطرات مجزا در DWC در مکان‌های هسته‌زایی خاص تشکیل می‌شوند و با ادغام یا چگالش مستقیم رشد می‌کنند تا به شعاع قطره‌ای بحرانی برسند [13]. فراتر از این نقطه، نیروهای گرانشی از کشش سطحی که قطره را روی سطح نگه می‌دارد، تجاوز می‌کند و باعث می‌شود که قطرات از سطح خارج شوند. هر گونه کاهش در مقاومت حرارتی بر راندمان فرآیند انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد. برای محیط خنک‌کننده، می‌توان از نانوذرات برای کاهش مقاومت حرارتی استفاده کرد، اما این امر مشکلات اضافی هزینه عملیاتی و اثرات زیست‌محیطی دارد. مقاومت حرارتی چگالش را می‌توان با اصلاحات سطحی کاهش داد و یکی از راه‌ها ارتقای چگالش قطره‌ای است. ژنگ⁸ و همکاران یک روش بولتزن شبکه حرارتی ترکیبی را برای بررسی DWC اجرا کرد [14]. تکنیک‌های مختلفی برای ترویج تراکم قطره‌ای مانند پوشش سطح با پلیمرها، به‌عنوان مثال، تفلون، محرک‌های آلی مانند اسیدهای چرب یا کاشت یون وجود دارد [15-16]. علاوه بر پوشش، تزریق یک ماده شیمیایی تقویت‌کننده به بخار چگالش یافته و اصلاحات سطحی ساختاری نیز می‌تواند چگالش قطره‌ای را امکان‌پذیر کند [17-18].

هدف از این مطالعه تلفیق روش‌های پوشش سطحی به‌کاررفته برای تقویت فرآیند چگالش خارجی است. به‌طور خاص، تکنیک‌های پوشش‌دهی میکرو/نانومقیاس برای اصلاح هندسه و شیمی سطح توسعه یافته است. پوشش‌های موجود شامل کاشت یون، فلزات نجیب (طلا، نقره، پلاتین، پالادیوم و رودیم)، اکسیدهای خاکی کمیاب (سری لانتانید)، پلیمرها (فلوروپلیمرها)، تک لایه‌های خود مونتاژ شده (تیول و نمک)، سطوح تزریق شده با روان‌کننده، پوشش‌های متخلخل و مواد در حال ظهور (نانولوله‌های کربنی، گرافن، کربن الماس مانند، فیبر کربن و سطوح نانوساختار) است. روش‌های پوشش سطحی، کاربردها و پتانسیل‌های بهبود با توجه به هزینه، استحکام، دوام و کارایی مقایسه شده‌اند. علاوه بر این، محدودیت‌ها و چالش‌های موجود برای کاربردهای بهبود کندانس شدن ارائه شده است.

2- مکانیسم‌های چگالش قطره‌ای

این بخش به‌طور خلاصه دو مورفولوژی قطره‌ای را که به حالت‌های ونزل⁹ و کیسی¹⁰ شناخته می‌شوند، توصیف می‌کند که درک مدل‌های چگالش قطره‌ای را امکان‌پذیر می‌سازد. هنگامی که بخار روی سطح متراکم می‌شود، یا سطح را تر می‌کند و یک لایه تشکیل می‌دهد، یا بسته به اختلاف انرژی سطح، قطرات مجزایی را تشکیل می‌دهد. هر چه انرژی سطحی زیرلایه کمتر باشد، احتمال اینکه بخار پس از متراکم شدن، قطرات مجزای تشکیل دهد، بیشتر می‌شود. برای یک سطح ایده‌آل، تر شونده‌گی سطح با زاویه تماس متناظر آن که با معادله 3 نشان داده می‌شود [18]، کمی‌سازی می‌شود.

⁷ Schmidt

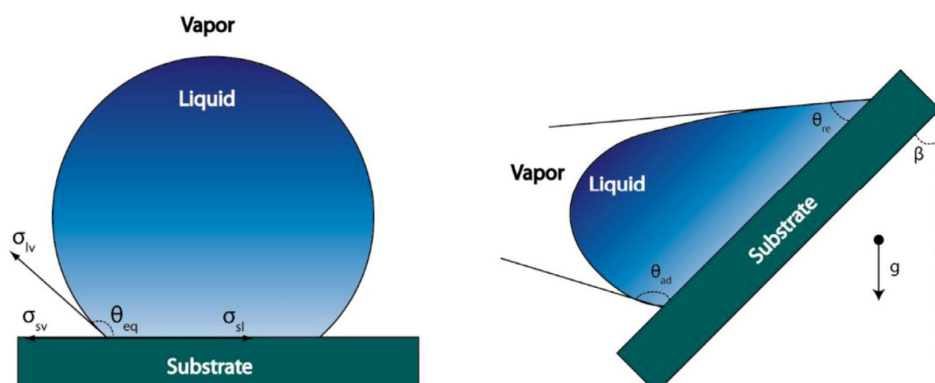
⁸ Zheng

⁹ Wenzel

¹⁰ Cassie

$$\theta = \text{Arc COS}\left(\frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}}\right) \quad (3)$$

در زاویه حدود صفر درجه، بخار متراکم می‌شود و یک لایه مایع تشکیل می‌دهد که به‌طور کامل سطح را تر می‌کند. سطوحی که زاویه تماس کمتر از 90 درجه دارند، به عنوان آب‌دوست و سطوحی که دارای زاویه تماس بیشتر از 90 درجه هستند به عنوان آب‌گریز طبقه‌بندی می‌شوند. سطوح آب‌گریز به خاطر انرژی سطحی کم خود و دفع‌کننده آب در ترویج تراکم قطره‌ای مؤثر هستند [19-20]. سطوح فوق‌آب‌گریز با زوایای تماس بزرگ (بیشتر از 150 درجه)، و هیستریزیس کم، یعنی تفاوت بین زاویه پیشروی¹¹ (θ_{ad}) و زاویه پس‌روی¹² (θ_{re}) مشخص می‌شوند. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است. حفظ هیستریزیس کم ضروری است که نشان‌دهنده نیروی پینینگ مویرگی کمتر بین بستر و قطره است که تحرک بالاتری را القا می‌کند.



شکل 3- شماتیک زوایای تماس استاتیک و دینامیک [21]

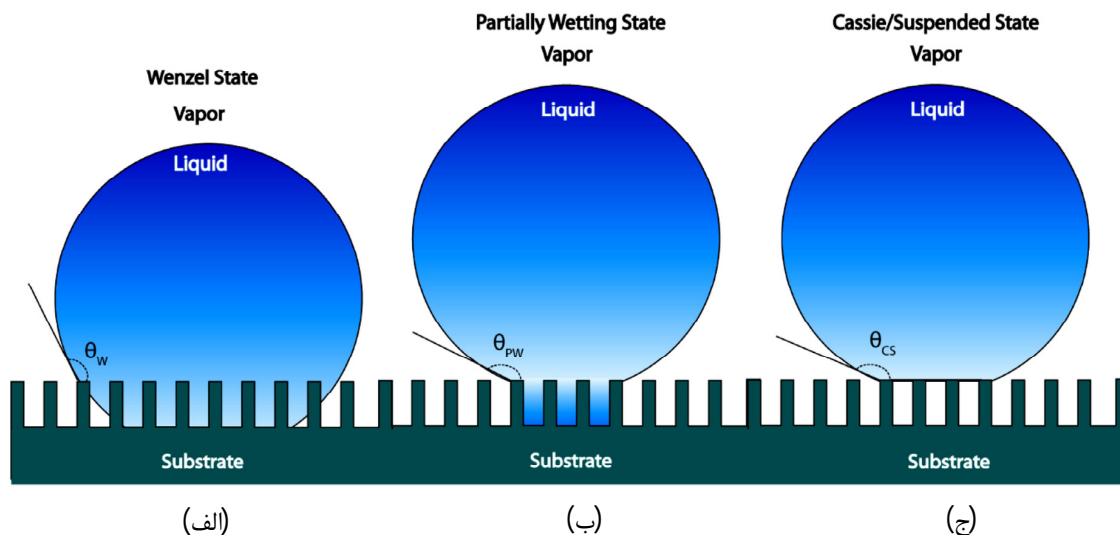
سطوح واقعی یا «غیرایده‌آل» از نظر مولکولی صاف نیستند. زبری سطح تمایل دارد بر سرعت رشد و زاویه تماس در یک قطره تأثیر بگذارد و بنابراین، یک معادله اصلاح شده برای پیش‌بینی آن مورد نیاز است. خیس شدن یک سطح واقعی می‌تواند هر دو مورفولوژی توصیف شده توسط ونزل و کیسی را نشان دهد. بسیاری از سطوح، زبری (ξ) را نشان می‌دهند که با نسبت کل سطح به منطقه محافظت‌شده تعریف می‌شود. ونزل [22] نشان داد که اگر سیال تمام ناحیه ناهموار را خیس کند (نشان داده شده در شکل 2 الف)، زاویه تماس (θ_w) را می‌توان با استفاده از $\cos \theta_w = \cos \theta_a \xi$ یافت که در آن θ_a زاویه تماس ظاهری است [23]. از سوی دیگر، کیسی و بکستر¹³ [24] مواردی را بررسی کردند که قطره روی نوک زبری قرار می‌گیرد. برای این مورد، زاویه تماس (θ_{cs}) را می‌توان به صورت $\cos \theta_{cs} = -1 + \phi(\cos \theta_a + 1)$ تعریف کرد. هر دو قطرات ونزل [22] و کیسی و بکستر [24] که به ترتیب در شکل 4 الف و ج نشان داده شده‌اند، می‌توانند روی بسترهای ناهموار مدل شوند. با این حال، حالت ونزل برای DWC خیلی مطلوب نیست، زیرا نیروهای چسبندگی بالاتری نسبت به نیروهای چسبندگی کم در حالت کیسی نشان می‌دهد [25] شکل 4 (ب) حالتی را نشان می‌دهد که به عنوان حالت تر شدن جزئی (P_w) شناخته می‌شود. زمانی که یک قطره پخش نمی‌شود تا حدی خیس می‌شود، اما در عوض یک کلاهک کروی شکل می‌دهد که روی بستر با زاویه تماس (θ_{pw})

¹¹ advancing

¹² receding

¹³ Baxter

قرار دارد. حذف قطرات در حالت جزئی مرطوب یا کیسی، آسان‌تر از حالت و نزل است. میلکوویچ¹⁴ و همکاران [26] تأثیر مورفولوژی قطرات بر دینامیک رشد قطرات را بررسی کرد. آن‌ها دریافتند که نرخ رشد و نرخ انتقال حرارت قطرات جزئی مرطوب، 4 تا 6 برابر بیشتر از قطرات در حالت کیسی است که در این حالت قطرات بر روی یک سطح ناهموار معلق می‌شوند و در آن بخار یا بسته‌های هوا باعث مقاومت حرارتی قابل توجهی می‌شود که مانع از انتقال حرارت می‌شود.



شکل 4- شماتیکی که حالت‌های تر شونده را بر روی سطح ناهموار نشان می‌دهد (الف) حالت و نزل (ب) حالت مرطوب جزئی (ج) حالت کیسی/بکستر یا حالت معلق [21]

دو مشکل اصلی در مورد چگالش قطره‌ای که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد وجود دارد. اولین مورد آب‌دوست یا آب‌گریز بودن آن است. سطوح آب‌دوست و آب‌گریز نقش‌های متفاوت و یکسانی در فرآیند چگالش دارند. سطح آب‌دوست کلید ارتقای سرعت هسته‌زایی یک قطره است و سطح آب‌گریز شرط لازم برای به دست آوردن چگالش قطره‌ای و ضریب انتقال حرارت بالا است. مورد دوم این است که چگونه می‌توان سرعت خروج قطرات را تسریع کرد و یک چگالش قطره‌ای پایدار را حفظ کرد. برای یک سطح خاص، نرخ خروج قطرات یک محدودیت دارد. با افزایش دمای زیر خنک‌کننده¹⁵ سطحی ΔT ، نرخ چگالش بخار از نرخ خروج قطرات بیشتر خواهد شد که باعث رسوب قطرات بر روی سطح می‌شود و چگالش تشکیل شده را از چگالش قطره‌ای را به چگالش لایه‌ای تبدیل می‌کند. سطح فوق آب‌گریز می‌تواند خروج قطرات را تسریع کند، با این حال، سطح فوق آب‌گریز نیز اثر نامطلوبی بر هسته‌زایی قطرات دارد. طبق مطالعه تجربی، در مقایسه با سطح آب‌گریز، سطح فوق آب‌گریز اثر انتقال حرارت خوبی در مرحله اولیه چگالش ندارد، اما با گذشت زمان، سطح فوق آب‌گریز دارای ضریب انتقال حرارت بالاتری است [73].

3- افزایش چگالش توسط پوشش‌های سطحی

¹⁴ Miljkovic

¹⁵ Subcooling

تکنیک‌های اصلاح سطح، روش‌های اصلی ترویج چگالش قطره‌ای هستند، زیرا چشم‌انداز کاربرد صنعتی روشنی دارد. این کار به دو صورت انجام می‌شود: ساخت سطوح کم انرژی آزاد و ساخت سطوح ساختار میکرو نانو. متالیزاسیون¹⁶ یک روش مؤثر برای کاهش انرژی آزاد سطحی است که می‌توان آن را با آبکاری برخی از فلزات گران‌بها مانند طلا، نقره، پالادیوم، رودیوم و غیره به دست آورد. برخی از محققان بر این باورند که سطح طلا و سایر فلزات نجیب یک سطح چگالش قطره‌ای طبیعی است [27-28]. چگالش قطره‌ای نیز می‌تواند با آبکاری کروم روی سطح فلز [29] حاصل شود که تا حدودی در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌کند. در حال حاضر، روش‌های متالیزاسیون رایج عبارت‌اند از آبکاری الکتریکی و آبکاری الکترولس که روش الکترولس معمولاً سریع‌تر و با عمر طولانی‌تر در نظر گرفته می‌شود. در روش متالیزاسیون سطحی مقاومت حرارتی کم است، اما هزینه فلز نجیب بسیار زیاد است و نمی‌توان عمر آبکاری کروم را تضمین کرد. در عین حال، آبکاری کروم آبکاری نیز می‌تواند کروم تشکیل دهد که به راحتی باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شود. انرژی سطحی فلزات رایج برای استفاده در کندانسور، مانند مس (Cu)، آلومینیوم (Al)، فولاد ضدزنگ (SS) و تیتانیوم (Ti) بالا است، که منجر به ترشوندگی بالا و در نتیجه تشکیل FWC می‌شود. پوشش‌های سطحی در بسیاری از مطالعات برای کاهش انرژی سطح و دستیابی به DWC استفاده شده است [30]. شکل 5 یک سطح مسی را نشان می‌دهد که بخشی از آن با یک فیلم پوشانده شده است و بقیه آن پوشش داده نشده است. مکان‌های پوشش داده شده DWC را نشان می‌دهند، در حالی که قسمت‌های خالی سطح با یک لایه مایع پوشیده شده است که نشان دهنده FWC است.

محققان در سال‌های اخیر کشف کرده‌اند که برگ‌های نیلوفر آبی و بال‌های سیکادا سطوح آب‌گریز طبیعی هستند، بنابراین تحقیقات عمیقی روی ویژگی‌های ساختاری این سطوح انجام داده‌اند و دریافته‌اند که این سطوح از ساختارهای سوزنی تشکیل شده‌اند. سایر سطوح طبیعی فوق آب‌گریز نیز دارای ساختارهای میکرونانوی بسیاری در سطوح خود هستند. محققان با الهام از این کشف، از روش‌های مختلفی (مانند اچ کردن، رسوب شیمیایی و غیره) برای تولید یک سری سطوح ساختاری میکرو نانو استفاده کرده‌اند. یانگ¹⁷ [31]، لو¹⁸ [32] و میرحسینی [33] از فناوری پردازش لیزر نانوثانیه (اچ لیزری) برای ساخت ساختار میکرو نانو روی سطح استفاده کردند و سطح تیتانیوم آب‌دوست را به سطح آب‌گریز تبدیل کردند. نم¹⁹ [34] با اکسید کردن مستقیم سطح مس، ساختار میکرو نانو سوزنی ماندنی ایجاد کرد. علاوه بر تکنیک‌های فوق، سطح میکرو نانو را می‌توان با رسوب مواد دیگر بر روی سطح ساخت. رسوب‌گذاری مواد دیگر بر روی سطح می‌تواند انواع سطوح ساختار میکرو نانو را بسازد. در حال حاضر، ساختارهای اصلی شامل نانوسیم‌ها (نان سوزن‌ها) [35]، نانومخروط‌ها [36]، نانومیل‌ها [37]، نانوصفحات (نانوگل‌ها) [38]، نانوبلوک‌ها [39] است. سطوح مختلف ساختار میکرو نانو اثرات متفاوتی بر آب‌گریزی دارند. هرچه سطح ویژه سطح بیشتر باشد و توانایی جذب هوا بالایی داشته باشد، دستیابی به زاویه تماس بزرگ‌تر آسان‌تر است. به همین دلیل است که نانوسیم‌ها، نانومخروط‌ها و نانومیل‌ها می‌توانند به راحتی به زوایای تماس بزرگ‌تری نسبت به نانوصفحات و نانوبلوک‌ها دست

¹⁶ Metallization

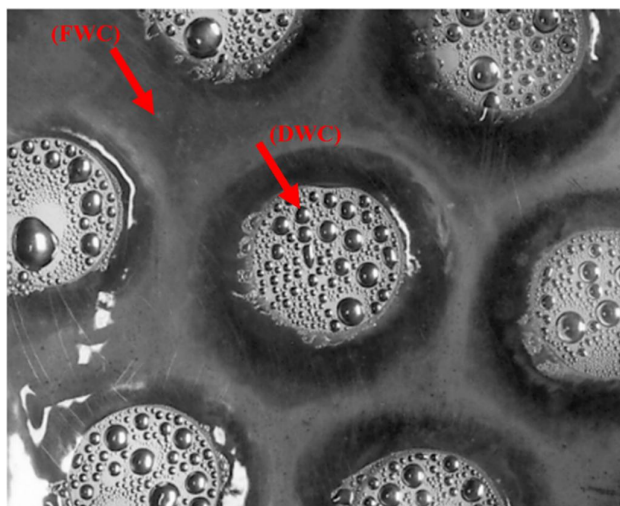
¹⁷ Yang

¹⁸ Lou

¹⁹ Nam

یابند. ساختار نانو ورق با سیلانیزه کردن زیر می‌شود، که می‌تواند به طور مؤثر مشکل عملکرد ضعیف خود تمیز شونده را حل کند.

انواع مختلفی از پوشش‌های سطحی برای افزایش چگالش آزمایش شده‌اند، مانند ترکیبات معدنی، فلزات نجیب، پلیمرها، آلیاژهای سطحی و ترکیبات آلی (برای سیستم‌های بخار/سیال با کشش سطح بالا) [40]. برای هر نوع و تکنیک اصلاح سطح، مزایا و معایبی در ارتباط با آن‌ها وجود دارد. پارامترهای اصلی برای ارزیابی پوشش‌های مختلف عبارتند از: آب‌گریزی، مقاومت/سانایی حرارتی، دوام/پایداری و هزینه [41].



شکل 5- چگالش قطره‌ای روی قسمت پوشش داده زیر لایه و چگالش لایه‌ای روی بخش‌های بدون پوشش از همان بستر [42]

3-1- فلزات نجیب

فلزات نجیب توانایی مقاومت در برابر خوردگی و اکسیداسیون را دارند. آن‌ها زاویه تماس بالاتری به دلیل انرژی سطحی کم‌تر با آب دارند. به‌عنوان مثال، نقره 89-68 درجه، طلا 55-85 درجه، رودیوم 82-65 درجه، پلاتین 50 درجه و پالادیوم 74 درجه. فلزات نجیب دارای توانایی ذاتی برای جذب ناخالصی‌ها و هیدروکربن‌ها هستند که به تشکیل قطرات مایع به ابعاد میکرون تا میلی‌متر بر روی سطح آن‌ها کمک می‌کند [43]. قیمت بالای مواد کاربرد عملی آن‌ها را محدود می‌کند، اما با استفاده از پوشش‌های لایه نازک می‌توان مشکل را تا حدی حل کرد. افزایش چگالش توسط پوشش‌های فلزات نجیب در جدول 1 خلاصه شده است. وودراف²⁰ و وست واتر²¹ ضخامت‌های مختلف پوشش‌های طلا را از طریق رسوب نشانی الکتریکی بر روی بستر مسی برای بخار مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که ضخامت‌های تا 20 نانومتر هیچ دستاورد واضحی در افزایش DWC ندارند، در حالی که حداقل ضخامت 200 نانومتر برای DWC ثبت شد. با افزایش ضخامت پوشش از 20 به 100 نانومتر انتقال از FWC به DWC مشاهده شد. با این حال، شایان ذکر است که توزیع ضخامت توسط رسوب الکتریکی یکنواخت نبود. اسمیت²² [44] حداقل

²⁰ Woodruff

²¹ Westwater

²² Smith

ضخامت طلا را 100 نانومتر به عنوان حد پایین برای به دست آوردن DWC روی بستر مس گزارش کرد. علاوه بر این، وست واتر به طور خلاصه کاربردهای پوشش‌های لایه نازک طلا را برای افزایش چگالش با دستیابی به DWC بررسی کرد. او به این نتیجه رسید که هر چه پوشش طلا بر روی یک بستر روشن‌تر و خالص‌تر باشد، DWC بالاتری را می‌توان به دست آورد. جه²³ و همکاران [45] اثر گاز غیرقابل چگالش (CO₂) را بر روی چگالش بخار مورد مطالعه قرار داد. غلظت‌های بالاتر CO₂ موجود در فرآیندهای جذب و شیرین‌سازی آب دریا [46] بر فرآیند چگالش تأثیر می‌گذارد. آن‌ها آزمایش‌هایی را برای مخلوط بخار با 45 تا 95 درصد CO₂ روی فولاد ضدزنگ (SS) و صفحات عمودی با پوشش طلا انجام دادند و مشخص شد که با افزایش غلظت CO₂، افزایش چگالش به دلیل افزایش مقاومت حرارتی ناچیز بود. با این حال، چگالش را می‌توان با ایجاد سطح پره‌ای شکل افزایش داد. ارب²⁴ و تلن²⁵ در موسسه فرانکلین [47] هزینه فلزات نجیب رسوب‌نشانی شده الکتریکی شده برای DWC را ارزیابی کردند و به هزینه کل حدود \$/m² 0/07-0/2 رسیدند. پوشش‌های فلز نجیب فرآیند چگالش را بهبود می‌دهند، اما دوام این پوشش‌ها هنوز یک چالش است و برای حفظ حالت DWC به سورفکتانت‌ها نیاز است.

جدول 1- افزایش چگالش توسط پوشش‌های فلز نجیب

مرجع	بهبود در ضریب انتقال حرارتی (%)	ضخامت مؤثر پوشش (نانومتر)	عمر مؤثر پوشش (ساعت)	محیط	روش پوشش دهی	پوشش	زیرلایه
[48]	55	300	2400	بخار	آبکاری الکتریکی	نقره	مس
[7]	57	-	-	بخار	-	نقره	مس
[45]	-	15000-50000	-	بخار/CO ₂	آبکاری الکتریکی	طلا	فولاد زنگ‌نزن
[49]	1000	100	-	بخار	آبکاری الکتریکی	طلا	مس

3-2- اکسیدهای نادر خاکی (REO)

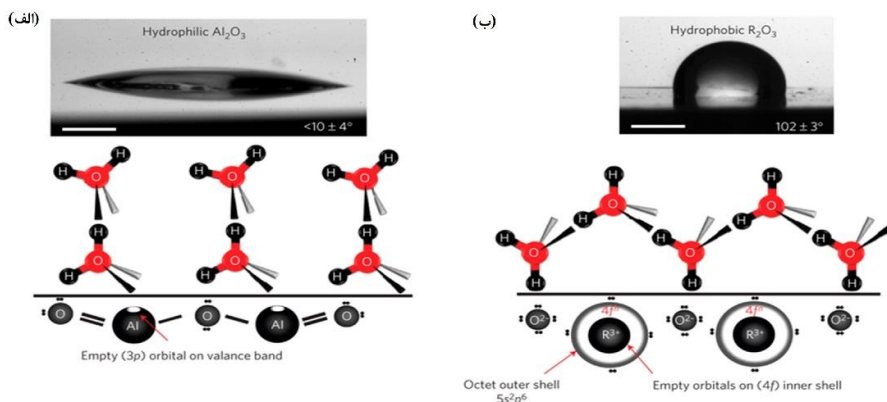
مطالعات مختلف ماهیت آب‌گریز اکسیدهای نادر خاکی سری لانتانید و ترویج DWC آن‌ها را ثابت کرده است [50]. ماهیت آب‌گریز REOها آن‌ها را از سایر اکسیدهای فلزی متمایز می‌کند. ساختار الکترونیکی پوسته بیرونی منحصربه‌فرد آن‌ها از $5s^2 6p^6$ ، اندرکنش آن‌ها با مولکول‌های آب را به حداقل می‌رساند [39]. مقایسه بین جهت‌گیری مولکول آب روی اکسید آلومینیوم (آلومینا) و یک REO در شکل 6 نشان داده شده است. توانایی سطح آلومینا برای حفظ پیوند هیدروژنی به این معنی است که آب‌دوست است. هزینه REOها کمتر از 1% پوشش‌های فلزات نجیب است [51] و هدایت حرارتی آن‌ها تقریباً 50 برابر بیشتر از فلوروپلیمرها است [52]. این ویژگی‌ها REOها را برای افزایش چگالش مطلوب می‌کند، اما هنوز موانعی وجود دارد که باید برای کاربردهای صنعتی بر آن‌ها غلبه کرد. محققان روش‌هایی را برای تشکیل پوشش‌هایی در مقیاس میکرو/نانو برای اکسید پراسودیمیم، اکسید سریم، اکسید گادولینیوم، اکسید هولمیوم، اکسید لانتانیم و اکسید تربیوم توسعه داده‌اند. سطوح ابرآب‌گریز را می‌توان از REOها

²³ Ge

²⁴ Erb

²⁵ Thelen

با روش‌های فرسایش لیزری²⁶، فرآیند کلوئیدی، رسوب لایه به لایه روی یک بستر تولید کرد. شیم²⁷ [53] یک پوشش CeO با ضخامت کم‌تر از 200 نانومتر بر روی سطوح مس، آلومینیوم و فولاد توسط یک فرآیند شیمیایی تر یک مرحله‌ای ایجاد کرد. این فرآیند منجر به تشکیل سطوح فوق آب‌گریز با زاویه تماس جانبی 5° شد. آن‌ها ضریب انتقال حرارت را توسط شبکه مقاومت حرارتی و با استفاده از داده‌های میکروسکوپی از آزمایش‌های چگالش محاسبه کردند. برای پوشش htc، CeO، 5 برابر بیشتر از سطوح تحت عملیات با سیلان است. مطالعات بیشتری برای انتقال حرارت در مورد افزایش چگالش پوشش، دوام و استحکام این ترکیبات لازم است.



شکل 6- جهت‌گیری مولکول آب روی اکسید آلومینیوم (فلز) (الف) و (ب) REO [51]

3-3- کاشت یون

کاشت یون فرآیندی است که در آن یون‌های عناصر خاص به سمت یک سطح جامد هدف قرار می‌گیرند تا خواص فیزیکی، شیمیایی یا الکتریکی آن را تغییر دهند. ژانگ²⁸ [54] و ژائو²⁹ [14] از اولین کسانی بودند که فناوری کاشت یون را برای تقویت DWC پیشنهاد کردند. ژائو و برنساید³⁰ برای یک پوشش پلیمر کاشته شده با یون کروم میزان htc را 1/8 برابر گزارش کردند. ژائو و همکاران چهار نوع آلیاژ سطحی را روی بستر مسی با استفاده از H، He، Ar و N سنتز کردند و نشان دادند که انرژی سطحی هم تحت تأثیر مقدار و هم نوع یون کاشته شده قرار می‌گیرد. به دلیل ضخامت کمتر پوشش، مقاومت حرارتی با این روش ناچیز بود. آلیاژهای سطحی حاصل: Cu-Ar، Cu-N، Cu-He و Cu-H، عملکرد عالی را با توجه به تشکیل DWC نشان دادند. آن‌ها نتایج حاصل از نشریات مختلف و سطح کاشته شده با یون در روش خودشان را مقایسه کردند و تأثیر آن را بهتر از تفلون، نقره و طلا نشان دادند. به طور خاص، ضریب انتقال حرارت 3 برابر (حداکثر) بیشتر از فلزات نجیب است و استنباط شد که با کاشت یون، سطح به حالت آمورف تغییر می‌کند و مدول الاستیسیته و انرژی سطحی آن کاهش می‌یابد. کنانه³¹ و همکاران [55] اثر فشار بخار بر DWC را مورد مطالعه قرار داده و نتیجه‌گیری کردند که htc برای سطح SS کاشته شده با یون N⁺ به میزان 3/2

²⁶ Laser ablation

²⁷ Shim

²⁸ Zhang

²⁹ Zhao

³⁰ Burnside

³¹ Kananeh

برابر افزایش یافته بود. کاشت یون برای چگالش به طور گسترده توسط لایپرتز³² و فروبا³³ [56] و گوو³⁴ [57] مورد مطالعه قرار گرفته است که بیان کرد که پوشش ایجاد شده از نظر مکانیکی پایدار است. اخیراً کیم³⁵ و همکاران [58] کاشت یون کروم را روی سطح Al آزمایش کردند و مشاهده کردند که DWC بیش از 6 ماه حفظ شد و htc دو برابر FWC بود. جدول 2 کارهای تجربی مربوط به افزایش DWC با کاشت یون را خلاصه می‌کند. دیزل³⁶ [59] و لوکیچ³⁷ [60] تجزیه و تحلیل هزینه یک کندانسور کاشته شده با یون را برای کاربرد شیرین‌سازی انجام داد. آن‌ها دریافتند که هزینه واحد تقطیر را می‌توان تا 35/4 درصد کاهش داد. با این حال، مدل توسعه یافته و مفروضات آن‌ها با داده‌های تجربی تأیید نشد، در نتیجه استفاده از آن برای کاربردهای صنعتی محدود شد.

جدول 2- افزایش چگالش بخار با کاشت یون

مرجع	بهبود در ضریب انتقال حرارتی (%)	ضخامت مؤثر پوشش (نانومتر)	عمر مؤثر پوشش (ساعت)	روش پوشش‌دهی	پوشش	زیرلایه
[14]	3 برابر فلزات نجیب	لایه نازک (1 نانومتر)	-	کاشت یون	N, Ar, He, H, Cr	لوله مس
[61]	-	لایه نازک (1 نانومتر)	15600	کاشت یون	Cr, O	لوله مس
[62]	1/8 برابر	5000	-	کاشت یون	Cr ⁺	پلی تترافلوئورواتیلن
[63]	3/2 برابر	لایه نازک (1 نانومتر)	-	کاشت یون پلاسما	N ⁺	لوله فولاد زنگ نزن
[64]	5/5 برابر	لایه نازک (1 نانومتر)	-	کاشت پرتو یونی	N ⁺	تیتانیوم
[58]	2 برابر	13-9	-	کاشت یون پلاسما	Cr	آلومینیوم

3-4- پوشش‌های پلیمری

برای کاربرد کندانسور صنعتی، به نظر می‌رسد لوله‌های پوشش داده شده با پلیمر از هر دو جنبه هزینه و عملکرد، یک روش مؤثر هستند [65]. پوشش‌های لایه‌های نازک پارلین، سیلیکون و پلی تترا فلوئورواتیلن (PTFE) برای DWC مؤثر هستند. دوام پلیمرها فقط برای ضخامت‌های بالاتر تأیید می‌شود، اما ضخامت نیز مقاومت حرارتی را افزایش می‌دهد و از این رو بر مزایای DWC غلبه می‌کند. چسبندگی بین یک بستر و لایه نازک برای استحکام و دوام بسیار مهم است. این مشکل را می‌توان با مواد / روش اتصال مناسب بین لایه پلیمری نازک و بستر حل کرد تا مقاومت حرارتی آن‌ها کاهش یابد و ظرفیت انتقال حرارت آن‌ها افزایش یابد. افزایش چگالش توسط پوشش‌های پلیمری در

³² Leipertz

³³ Froba

³⁴ Guo

³⁵ Kim

³⁶ Diezel

³⁷ Lukic

جدول 3 ذکر شده است. توانایی پوشش‌های آلی برای DWC بخار توسط محققان ارزیابی شده است [66]. هاراگوچی³⁸ و همکاران [67] به این نتیجه رسیدند که htc را می‌توان تا 20 برابر با پوشش‌های پلی وینیلیدین کلرید افزایش داد. در مطالعه دیگری توسط هولدن³⁹ و همکاران [77]، چگالش قطره‌ای برای بیش از 22000 ساعت کار ادامه داشت، اما به دلیل ضخامت پوشش بالاتر 60 میکرومتر، مقاومت حرارتی افزایش یافت و بهبود زیادی در انتقال حرارت مشاهده نشد. ملیچ کویک⁴⁰ و همکاران [60] از رسوب بخار فیزیکی تقویت شده با پلازما (PVD) برای مطالعه فلوروپلیمرها برای DWC استفاده کردند. همچنین رسوب شیمیایی بخار (CVD) فلوروپلیمرها روشی جذاب برای پوشش نازک و مقاوم است [68]. CVD همراه شده با پلازما اخیراً برای تولید پوشش‌های پلیمری بسیار نازک (40 نانومتر) برای دستیابی به پدیده DWC استفاده شده است [72]. بررسی دقیق کاربردهای پلیمرها برای DWC سطحی توسط نویسندگان انجام شد. ژانگ و همکاران [64] پلیمرهایی مانند پلی فینیل سولفید (PPS) و پلی تترا فلورواتیلن (PTFE) را با میکرو/نانو نقره خود مونتاژ شده (SAMS⁴¹) مقایسه کردند. PPS و PTFE هر دو نتایج بهتری را با توجه به تر شوندگی با زاویه تماس بالا نشان دادند. با این وجود، نتایج نشان داد که پلیمرها به دلیل مقاومت حرارتی بالا، شار حرارتی ضعیفی نسبت به SAMS دارند. ارب و تلن هزینه پوشش‌های پلیمری نازک برای DWC را ارزیابی کردند و به هزینه کل حدود $0/0-01/02 \text{ \$/m}^2$ رسیدند. ارقام مربوط به پوشش‌های پلیمری نازک جذاب هستند. با این حال، دوام پوشش‌های پلیمری نازک هنوز یک چالش است. اخیراً مورفولوژی‌های سطحی با ترکیب شبکه‌های آب‌دوست و آب‌گریز با استفاده از پوشش‌های پلیمری ساخته شده‌اند [69].

جدول 3- افزایش چگالش بخار توسط پوشش‌های پلیمری

زیرلایه	پوشش	روش پوشش‌دهی	عمر مؤثر پوشش (ساعت)	ضخامت مؤثر پوشش (نانومتر)	بهبود در ضریب انتقال حرارتی (%)	مرجع
مس، نیکل - مس، برنج	پوشش‌های ارگانیک (پاریلن D/N، فلوروآکریلیک)	-	>1200	3000-2000 (فلوروآکریلیک)، 1000-500 (پاریلن N/D)	3-6 برابر	[70]
مس، برنج، فولاد زنگ نزن، لوله کربن استیل	PTFE	کاشت + پرتو یونی	>1000		28/6 - 1/6	[65]
بلوک مس	پلی وینیلیدین کلراید		>21568	500-50	20	[67]
مس و آلومینیوم	فیلم‌های کوپلیمر بسیار نازک: پلی- (1H, 1H, 2H, 2Hperfluorodecyl	CVD	>48	40	7	[71]

³⁸ Haraguchi³⁹ Holden⁴⁰ Miljkovic⁴¹ Self-Assembled Monolayers

					acrylate)-co-divinyl benzene p(PFDA-co-DVB)	
[72]	-	200	-	پاشش اسپری	تیتانیوم (Ti) با پوشش تفلون	شیشه
[69]	به ترتیب 2/7 و 3/4 برابر سطوح آب‌دوست و آب‌گریز	-	-	پاشش اسپری	PTFE+SiO ₂	فولاد زنگ نزن
[73]	1/64	1000	-	الکتروسیسی	لایه‌های نازک پلی تترا فلوئورواتیلن (PTFE)	آلومینیوم و مس
[74]	>2/1	-	>3	پوشش‌دهی چرخشی	پلیمر فلوروسیلان (EGC-1720)	مس

5-3- گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNT) و سطوح نانوساختار

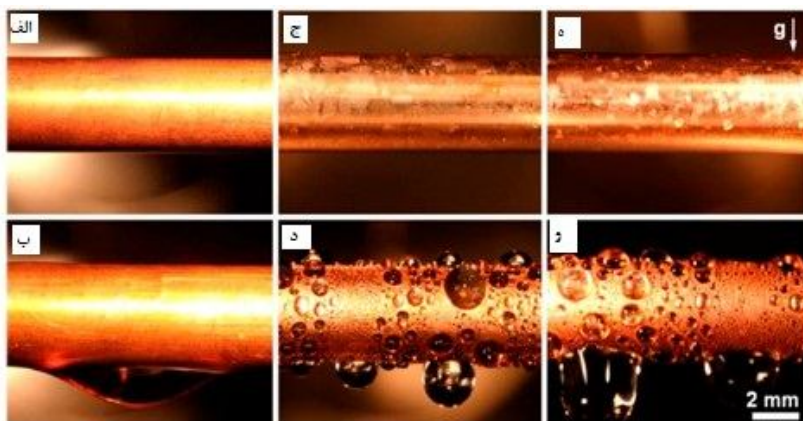
گرافن، نانولوله‌های کربنی و سایر سطوح نانوساختار توجه محققان را برای کاربردهای مختلف انتقال حرارت به خود جلب کرده‌اند. کاربرد این پوشش‌ها برای افزایش چگالش در جدول 4 فهرست شده است. گرافن به دلیل طیف وسیعی از کاربردهایش در دستگاه‌های الکترونیکی، غشای نمک‌زدایی و بسیاری موارد مورد توجه قرار گرفته است [75]. به‌طور مشابه، کاربرد آن برای DWC توسط پرستون⁴² و همکاران بررسی شد [76]. در حضور پوشش گرافن نازک تک‌لایه روی بستر مس خالص 99/99% مشاهده شد که افزایش htc برای چگالش، 4 برابر بیشتر از FWC و DWC بدون پوشش است. همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، آن‌ها از CVD فشار کم و CVD با فشار اتمسفری استفاده کردند. برای هر دو نمونه نتایج بهتری در مقایسه با نمونه بدون پوشش نشان داده شد. علاوه بر این، برای دوام هر دو سطح پوشش داده شده هیچ نشانه‌ای از تخریب در طول یک دوره دو هفته‌ای مشاهده نشد. پوشش‌های گرافن به علت استحکام و مقاومت حرارتی بالا، راه‌حلی بالقوه برای چالش‌های رایج در کاربردهای عملی پوشش DWC در مقیاس صنعتی هستند.

نانولوله‌های کربنی (CNT43) مشابه گرافن، خواص حرارتی، مکانیکی و الکتریکی منحصربه‌فرد دارند. CNTها را می‌توان به صورت چند دیواره یا تک‌جداره توسعه داد. رسانایی حرارتی CNT چند جداره تا 3000 W/m oK در دمای اتاق گزارش شد. هدایت حرارتی بالا و ماهیت آب‌گریز CNT نیز آن را برای کاربرد افزایش چگالش قابل توجه می‌کند. با این حال، برخلاف کاربردهای گسترده CNT که در آن پوشش‌های CNT به‌طور گسترده آزمایش شده است، مطالعه آن در مورد پدیده چگالش محدود است. چن⁴⁴ و همکاران [20] یک پوشش CNT را با استفاده از یک لایه کروم-نیکل به عنوان کاتالیزور سنتز کردند. آن‌ها با رسوب CNTها، سطوح ابر آب‌گریز ایجاد کردند. مشخص شد که آب‌گریز بودن برای یک سطح پوشش داده شده با هگزادکانتیول دوام بیشتری نسبت به سطح پوشش داده شده با CNT برای کاربرد چگالش بخار دارد.

⁴² Preston

⁴³ Carbon nano tube

⁴⁴ Chen



شکل 7- لوله مس (الف) تحت خلأ و (ب) FWC را نشان می‌دهد. لوله مس پوشیده شده با گرافن، DWC را برای پوشش‌های ایجاد شده با روش CVD فشار کم (ج و د) و (ه-و) فشار اتمسفر نشان می‌دهد [65]

کیم و همکاران [77] پوشش‌های CNT چندجداره و آهن را روی بستر فولادی مورد مطالعه قرار دادند که هدف یافتن شرایط بهینه برای ترکیب پودر و زینترینگ برای حداکثر افزایش انتقال حرارت چگالش بود. با افزایش درصد حجم CNT، زاویه تماس افزایش یافته و شرایط بهینه با 10 درصد کامپوزیت CNT حاصل شد که نتیجه‌ی آن افزایش 1/6 برابری در htc بود. پوشش فیلم کربن الماس مانند (DLC) یک پوشش نانوکامپوزیتی با خواص منحصربه‌فرد سختی و نرخ خوردگی بالا و اصطکاک کم است و یکی از روش‌هایی است که برای DWC بخار بر روی سطوح فلزی توسعه و آزمایش شده است. پوشش‌های DLC از نظر مکانیکی پایدار، آب‌گریز، از نظر شیمیایی بی‌اثر و بسیار مقاوم در برابر حلال‌ها، قلیایی‌ها و اسیدها هستند. با این حال، آن‌ها مقاومت بیشتری در برابر انتقال حرارت می‌دهند که می‌توان با کاشت یون بر آن غلبه کرد. برآورد هزینه برای گرافن مقیاس‌پذیر توسط CVD، $11/98 \$/m^2$ ، شامل مصرف گاز و برق برای تولید در مقیاس آزمایشگاهی محاسبه شده است [78]. هزینه تخمینی در مقایسه با پوشش‌های فلزی نجیب، REO و پلیمری بسیار بالا است، اما انتظار می‌رود که با بهینه‌سازی کاربرد پوشش و تولید در مقیاس بزرگ، هزینه به طور قابل توجهی کاهش یابد. در میان مواد نوظهور مانند گرافن و CNT، لیاف کربن (CFs) نیز خواص مطلوبی مانند وزن سبک، تخلخل بالا و استحکام را نشان می‌دهند که آن را برای بسیاری از کاربردها از جمله چگالش ارزشمند است.

جدول 4- افزایش چگالش توسط گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNT) و سایر سطوح نانوساختار

مرجع	بهبود در ضریب انتقال حرارتی (%)	عمر مؤثر پوشش (ساعت)	محیط چگالش	روش پوشش‌دهی	پوشش	زیرلایه
[76]	4	-	بخار	CVD فشار پایین	گرافن	مس
[20]	-	-	بخار	CVD پلاسما	CNT	سیلیسیم

[77]	1/6	-	R134a	پاشش الکترواستاتیک همراه با زینترینگ در دمای 900	کامپوزیت CNT و آهن	فولاد کربنی
[79]	30	-	بخار	تکنولوژی لانگ مویر	فیلم مونو مولکول باریم استتارات	مس
[80]	-	>168	بخار	اکسیداسیون تر + خودآرایی ماکرومولکولها	1H,1H,2H, 2H-perfluorooctyltriethoxysilane	مس
[81]	8	1	بخار	پوشش دهی چرخشی	Trichloro (1H,1H,2H, 2Hperfluorooctyl) silane	آلومینیوم
[82]	1/25	-	بخار	رشد درجا	نانوسوزن مس	مس
[83]	-	-	هوای مرطوب	رشد CNT	CNT روی میکروستونهای سیلیس	سیلیسیم
[84]	4	-	بخار	اچینگ	فیلم فلوئوروسیلان	آلومینیوم
[85]	-	-	هوای مرطوب	پوشش دهی چرخشی همراه با خشک کردن در دمای 100	میکرو/نانوساختار مس	مس
[86]	89	-	بخار	رشد درجا	نانو مخروطهای نیکل	مس
[87]	100	-	بخار	رسوب نشانی الکتریکی آندی	نانوسیمهای مس	مس
[88]	140	-	بخار	آرایه نانومواد اکسید روی	اکسید روی	مس
[89]	155	-	بخار	اچ الکترولس	نانوسیم سیلیس	سیلیسیم
[90]	100	-	بخار	الگوی اکسید آلومینیوم متخلخل سه بعدی	نانوسیم مس	مس

3-6- پوشش‌های متخلخل

پوشش‌های متخلخل به جهت مساحت سطح بالا می‌توانند روند چگالش را تسریع کند. با این حال، به دلیل حبس حباب در داخل ساختار، تأثیر منفی بر انتقال حرارت تغییر فاز به بستر را دارد که این مشکل با تزریق فاز مایع کنترل شده که این سطوح به عنوان سطوح متخلخل تزریق شده با مایع لغزنده⁴⁵ (SLIPS) نامیده می‌شوند [91]. نقطه ضعف SLIPS دوام آن‌ها است که پس از مدت زمان معینی، مایع تزریق شده از بین رفته و htc کاهش می‌یابد. تلاش‌هایی برای توسعه سطوح میکرو متخلخل همراه با SAMها انجام شده است [92]. مشخص شد که ضریب انتقال حرارت تا حد زیادی به قطر پودر میکرو متخلخل بستگی دارد. با کاهش قطر، htc افزایش می‌یابد. برای قطر 4 میکرومتر، 23 درصد افزایش htc در مقایسه با سطح بدون پوشش گزارش شد. با این حال، بهبود در مقایسه با سایر تکنیک‌های پوشش کم است.

4- بحث و چالش

ضریب انتقال حرارت DWC چندین برابر بیشتر از FWC است، در حالی که ضریب انتقال حرارت کلی را می‌توان تا سه برابر افزایش داد؛ بنابراین، به دست آوردن حالت DWC پایدار عملکرد کلی را بهبود می‌بخشد، اما پایداری حالت DWC به عوامل متعددی مانند حالت تر شونده، آب‌گریزی، کشش سطحی میعان، پسماند زاویه تماس و خروج/حذف قطرات بستگی دارد. این خواص مورد نیاز را می‌توان با اجرای پوشش سطحی در مقیاس میکرونانو به

⁴⁵ Slippery liquid infused porous surfaces

دست آورد. زاویه تماس را می توان با زبری در مقیاس میکرو تنظیم کرد، در حالی که هیستریزیس زاویه تماس را می توان با زبری در مقیاس نانو کاهش داد [93]. با این حال، استحکام، هزینه، دوام و روش های کاربردی برخی از موانع هستند که برای کاربردهای صنعتی باید برطرف شوند. تخریب پوشش ها در شرایط گذرا معمولاً در عرض چند هفته یا چند ماه منجر به FWC می شود. مزایا و معایب مربوط به انواع مختلف پوشش ها در جدول 6 ارائه شده است.

جدول 6- مزایا و معایب مرتبط با انواع مختلف پوشش های سطحی

معایب	مزایا	تکنیک پوشش دهی سطح
قیمت بالای مواد کاربرد عملی آن را محدود می کند	DWC به دلیل جذب ناخالصی ها و هیدروکربن ها افزایش می یابد	فلزات نجیب
(1) هدایت حرارتی کم، (2) عدم انجام مطالعات انتقال حرارت	دارای طبیعت آب گریز است که DWC را ترویج می کند.	اکسیدهای نادر خاکی (REO)
روش گران قیمت که مقیاس پذیری آن را محدود می کند	(1) قابلیت انتقال حرارت را در زیر خنک کننده کم افزایش می دهد. (2) فرآیند در دمای پایین	کاشت یون
دوام پوشش نازک باید مورد توجه قرار گیرد	(1) روش مؤثر از هر دو جنبه هزینه و عملکرد (2) DWC و htc را افزایش می دهد.	پوشش های پلیمری
مشکلات دوام طولانی مدت، مقیاس پذیری را در سطح صنعتی محدود می کند.	افزایش htc برای چگالش	سطوح نانو ساختار
مایع به دام افتاده تأثیر منفی بر انتقال حرارت کلی از فاز گاز به زیر لایه دارد. برخلاف جوشاندن، این خاصیت باعث می شود که چگالش کمتر امکان پذیر باشد.	(1) افزایش سطح (2) فرآیند چگالش سریع	پوشش های متخلخل

5- کاربرد چگالش قطره ای در نیروگاه ها

حدود 60 درصد برق در ایالات متحده در سال 2019 از نیروگاه های حرارتی تولید شده است که از زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت به عنوان سوخت استفاده می کنند [94]. تقریباً تمام نیروگاه های بخار دارای کندانسور در پایین دست توربین بخار هستند. چگالش با استفاده از کندانسورهای پوسته و لوله جفت شده با مایع، برج های خنک کننده تبخیری یا کندانسورهای جفت شده با هوا (ACC⁴⁶) به دست می آید. در واحدهای پوسته و لوله، چگالش می تواند هم در پوسته و هم در سمت لوله رخ دهد. با توجه به اینکه این سیستم های انتقال بخار معمولاً نرخ جریان حجمی زیادی را نشان می دهند، از طریق بهینه سازی طراحی مناسب، وجود بخار در سمت پوسته می تواند به کاهش افت فشار کمک کند. علاوه بر این، برای به حداقل رساندن اثرات خوردگی، آب خنک کننده در سمت لوله نگه داشته می شود. بنابراین، چگالش بخار بر روی سطوح خارجی لوله ها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. اگرچه بسیاری از

⁴⁶ Air-coupled condensers

محققین توانایی ارتقاء چگالش قطره‌ای بر روی سطوح مختلف مهندسی شده را نشان داده‌اند، اما دوام و عمر آن‌ها هنوز چالش است. مک کورمیک⁴⁷ و وست واتر [95] پیچیدگی حفظ چگالش قطره‌ای را برای دوره‌های طولانی در چنین سطوحی برجسته کردند. در اوایل دهه 1990، فناوری آبکاری یونی برای تهیه آلیاژهای سطحی روی لوله‌های مسی مورد استفاده قرار گرفت که می‌توان از آن‌ها برای ترویج DWC استفاده کرد. این مورد توسط برنساید⁴⁸ [96]، مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین یک کندانسور بخار آزمایشی در نیروگاه اول دالیان چین نصب شد که عملکرد خوبی را در سال‌های اولیه نشان داد [97]. کندانسور عمودی متشکل از 800 لوله برنجی بود که با فناوری آبکاری یونی پردازش شده بودند. این مطالعه ادعا کرد که چگالش قطره‌ای در شرایط صنعتی مشاهده شد. با این حال، هیچ مقایسه‌ای بین کندانسور لایه‌ای و قطره‌ای گزارش نشد. ژائو⁴⁹ و همکاران [98] آزمایش‌هایی را بر روی نمونه اولیه کندانسورهای عمودی و افقی نوع U انجام دادند و بهبود کلی در ضرایب انتقال حرارت را به ترتیب 40 و 60 درصد نسبت به کندانسورهای سطحی گزارش کردند. کنانه⁵⁰ و همکاران [55] نشان داد که ضریب انتقال حرارت برای لوله‌های فولادی کاشته شده با یون سه برابر افزایش می‌یابد. همچنین گزارش شده است که چگالش قطره‌ای پایدار تنها در نرخ‌های جریان آب خنک‌کننده پایین حاصل می‌شود. علیزاده و همکاران [99] توسعه پوشش‌های جدید با انرژی کم سطح را گزارش کرد که افزایش سه برابری را در انتقال حرارت سمت بخار نشان داد. علاوه بر این، آن‌ها تخمین زدند که کاهش فشار کندانسور منجر به کاهش انتشار CO₂ در حدود 20 میلیون تن در سال می‌شود. کندانسورهای قطره‌ای باید منجر به افزایش نرخ چگالش، افزایش خروجی نیروگاه و کاهش مصرف سوخت شوند. با این حال، به استثنای کامک نیل⁵¹ [100] و کنانه [9]، که آزمایش‌هایی را روی لوله انجام داد، تقریباً تمام اندازه‌گیری‌های انتقال حرارت گزارش شده تاکنون به آزمایش‌های تک‌صفحه‌ای یا تک لوله‌ای در محدوده‌های محدودی از شرایط بخار محدود شده‌اند. بنابراین، آزمایش‌ها باید برای هندسه اجزا در شرایط عملیاتی معمولی کندانسورهای واقعی نیروگاه انجام شود تا کاربرد آن‌ها مشخص شود.

6- نتیجه‌گیری

فن‌آوری‌های تولید میکرو/نانو طیف وسیعی از امکانات را برای اصلاح سطح و در نتیجه بهبود عملکرد برای فرآیندهای چگالش می‌دهد. توسعه فن‌آوری‌های اصلاح سطح، به‌ویژه ساخت در مقیاس میکرو/نانو و اصلاح ترشوندگی پوشش‌ها (از آب‌دوست تا آب‌گریز)، طیف وسیعی از امکانات را برای استفاده از آن‌ها در کاربردهای عملی فراهم کرده است. در این بررسی، پوشش‌های موجود در مقیاس میکرو/نانو مورد بحث و ارزیابی قرار گرفت و چالش‌های موجود در رابطه با اجرای آن‌ها برجسته شد. برخی از مهم‌ترین نکات برجسته به شرح زیر است:

- کاشت یون و فلزات نجیب آب‌گریزی بهتری ارائه می‌دهند، اما هزینه پوشش‌ها بالا است و آب‌گریزی آن‌ها در مقایسه با پوشش‌های پلیمری پایدار نیست.

⁴⁷ McCormick

⁴⁸ Burnside

⁴⁹ Zhao

⁵⁰ Kananah

⁵¹ McNeil

- هزینه REOها کمتر از 1 درصد پوشش‌های فلزات نجیب است و رسانایی حرارتی تقریباً 50 برابر بیشتر از فلوروپلیمرها است. با این وجود، مطالعات انتقال حرارت بر روی REOها محدود است، بنابراین قبل از تجاری‌سازی به تحلیل عمیق‌تری نیاز است. اگر ضخامت پوشش در حد میکرون باشد، پوشش‌های پلیمری می‌توانند حالت DWC پایدار و دوام را ارائه دهند. با این وجود، ضخامت بیشتر منجر به افزایش مقاومت حرارتی می‌شود. برعکس، ضخامت اندک پوشش می‌تواند مؤثر باشد و ممکن است 10 برابر h_{tc} بالاتری داشته باشد. چالش‌های مرتبط با پوشش‌های نازک یکنواختی و دوام است.
- پوشش‌های سطحی در حال ظهور مانند CNTها، CF، گرافن و سطوح نانوساختار می‌توانند جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای برای حالت DWC پایدار باشند، اما توسعه این پوشش‌ها در مراحل اولیه است و برای پیاده‌سازی در دنیای واقعی نیاز به بلوغ دارد.
- علی‌رغم بهبودهای قابل توجهی در عملکرد انتقال حرارت چگالش با مواد و فرآیندهای پوششی جدید توسعه یافته، کاربرد صنعتی آن‌ها هنوز عملاً محقق نشده است.

7- منابع

- [1] S.A. Khan, M.A. Atieh, M. Koç, Micro-nano scale surface coating for nucleate boiling heat transfer: A critical review, *Energies*, 11, 3189, 2018.
- [2] S.A. Khan, Y. Bicer, M. Koç, Design and analysis of a multigeneration system with concentrating photovoltaic thermal (CPV/T) and hydrogen storage, *International journal of Hydrogen Energy*, 45, pp. 3484-3498, 2020.
- [3] S. Browne, United Nations Development Programme and System (UNDP), Routledge, 2012.
- [4] Y.J. Wi, J.H. Kim, J.S. Lee, J.S. Lee, Optimal patterned wettability for microchannel flow boiling using the lattice Boltzmann method, *Coatings*, 8, 288, 2018.
- [5] A. Mabrouk, A. Abotaleb, F. Tahir, M. Darwish, R. Aini, M. Koc, A. Abdelrashid, High performance MED desalination plants part I: novel design MED evaporator, Proceedings of the IDA 2017 World Congress on Water Reuse and Desalination, Sao Paulo, Brazil, pp. 15-20, 2017.
- [6] F. Tahir, M. Atif, M.A. Antar, The effect of fouling on performance and design aspects of multiple-effect desalination systems, Recent Progress in Desalination, *Environmental and Marine Outfall Systems*, pp. 35-52, 2015.
- [7] G. Gore, N. Sali, A. Ghodake, Of dropwise condensation heat transfer enhancement on silver coated copper surface using n-Heptane as surfactant additive, 2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering, pp. 291-294, 2016.
- [8] D. Kashchiev, Nucleation, Elsevier, 2000.
- [9] A.B. Kananah, M.H. Rausch, A. Leipertz, A.P. Fröba, Dropwise condensation heat transfer on plasma-ion-implanted small horizontal tube bundles, *Heat transfer engineering*, 31, pp. 821-828, 2010.
- [10] S. Rainieri, F. Bozzoli, G. Pagliarini, Effect of a hydrophobic coating on the local heat transfer coefficient in forced convection under wet conditions, *Experimental heat transfer*, 22, pp. 163-177, 2009.
- [11] E. Schmidt, W. Schurig, W. Sellschopp, Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film-und Tropfenform, *Technische Mechanik und Thermodynamik*, 1, pp. 53-63, 1930.
- [12] Y. Tang, X. Yang, L. Wang, Y. Li, D. Zhu, Dropwise Condensate Comb for Enhanced Heat Transfer, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15, pp. 21549-21561, 2023.
- [13] J.L. McCormick, J.W. Westwater, Nucleation sites for dropwise condensation, *Chemical Engineering Science*, 20, 1021-1036, 1965.

- [14] Z. Qi, Z. Dongchang, L. Jifang, Surface materials with dropwise condensation made by ion implantation technology, *International journal of heat and mass transfer*, 34, pp. 2833-2835, 1991.
- [15] İ.O. UÇAR, H.Y. ERBİL, Droplet condensation on polymer surfaces: A review, *Turkish Journal of Chemistry*, 37, pp. 643-674, 2013.
- [16] D. Tanner, C. Potter, D. Pope, D. West, Heat transfer in dropwise condensation—Part I The effects of heat flux, steam velocity and non-condensable gas concentration, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 8, pp. 419-426, 1965.
- [17] F.M. Mancio Reis, P. Lavieille, M. Miscevic, Dropwise condensation enhancement using a wettability gradient, *Heat Transfer Engineering*, 38, pp. 377-385, 2017.
- [18] X. Ma, J.W. Rose, D. Xu, J. Lin, B. Wang, Advances in dropwise condensation heat transfer: Chinese research, *Chemical Engineering Journal*, 78, pp. 87-93, 2000.
- [19] J. Rose, Dropwise condensation theory and experiment: a review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216, pp. 115-128, 2002.
- [20] C.-H. Chen, Q. Cai, C. Tsai, C.-L. Chen, G. Xiong, Y. Yu, Z. Ren, Dropwise condensation on superhydrophobic surfaces with two-tier roughness, *Applied physics letters*, 9, 2007.
- [21] B. El Fil, G. Kini, S. Garimella, A review of dropwise condensation: Theory, modeling, experiments, and applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160, 120172, 2020.
- [22] R.N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Industrial & engineering chemistry*, 28, pp. 988-99, 1936.
- [23] R. Enright, N. Miljkovic, N. Dou, Y. Nam, E.N. Wang, Condensation on superhydrophobic copper oxide nanostructures, *Journal of Heat Transfer*, 135, 091304, 2013.
- [24] A. Cassie, S. Baxter, Wettability of porous surfaces, *Transactions of the Faraday society*, 40, pp. 546-551, 1994.
- [25] S. Yongji, X. Dunqi, L. Jifang, T. Siexong, A study on the mechanism of dropwise condensation, *International journal of heat and mass transfer*, 34, pp. 2827-2831, 1991.
- [26] N. Miljkovic, R. Enright, E.N. Wang, Effect of droplet morphology on growth dynamics and heat transfer during condensation on superhydrophobic nanostructured surfaces, *ACS nano*, 6, pp. 1776-1785, 2012.
- [27] D.G. Wilkins, L.A. Bromley, S.M. Read, Dropwise and filmwise condensation of water vapor on gold, *AIChE Journal*, 19, pp. 119-123, 1973.
- [28] S.K. Das, D. Chatterjee, In-Tube and Dropwise Condensation, *Vapor Liquid Two Phase Flow and Phase Change*, Springer, pp. 299-328, 2023.
- [29] S.S. Finnicum, J. Westwater, Dropwise vs filmwise condensation of steam on chromium, *International journal of heat and mass transfer*, 32, pp. 1541-1549, 1989.
- [30] D. Torresin, M.K. Tiwari, D. Del Col, D. Poulikakos, Flow condensation on copper-based nanotextured superhydrophobic surfaces, *Langmuir*, 29, 840-848, 2013.
- [31] C. Yang, Y. Li, X. Mei, Study on the fabrication of titanium surface texture by nanosecond laser and its wettability, *J. Hebei Univ. Sci. Technol*, 37, pp. 315-321, 2016.
- [32] B. Luo, P.W. Shum, Z. Zhou, K. Li, Preparation of hydrophobic surface on steel by patterning using laser ablation process, *Surface and Coatings Technology*, 204, pp. 1180-1185, 2010.
- [33] N. Mirhosseini, P. Crouse, M. Schmidh, L. Li, D. Garrod, Laser surface micro-texturing of Ti-6Al-4V substrates for improved cell integration, *Applied surface science*, 253, pp. 7738-7743, 2007.
- [34] Y. Nam, Y.S. Ju, A comparative study of the morphology and wetting characteristics of micro/nanostructured Cu surfaces for phase change heat transfer applications, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27, pp. 2163-2176, 2013.
- [35] X. Luo, M. Wei, M. Cao, Preparation of superhydrophobic Cu mesh with corrosion resistance and applications in oil-water separation, *Journal of Materials Engineering*, 46, pp. 92-98, 2018.

- [36] M. Toma, G. Loget, R.M. Corn, Flexible teflon nanocone array surfaces with tunable superhydrophobicity for self-cleaning and aqueous droplet patterning, *ACS applied materials & interfaces*, 6, pp. 11110-11117, 2014.
- [37] D. Pahari, N. Das, B. Das, K. Chattopadhyay, D. Banerjee, Tailoring the optical and hydrophobic property of zinc oxide nanorod by coating with amorphous graphene, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 83, pp. 47-55, 2016.
- [38] N. Miljkovic, R. Enright, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack, E.N. Wang, Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces, *Nano letters*, 13, pp. 179-187, 2013.
- [39] G. Azimi, R. Dhiman, H.-M. Kwon, A.T. Paxson, K.K. Varanasi, Hydrophobicity of rare-earth oxide ceramics, *Nature Materials*, 12, pp. 315-320, 2013.
- [40] Z. Saghir, I. Hassan, 11th International Conference on Thermal Engineering, 2018, American Society of Mechanical Engineers, pp. 010201, 2020.
- [41] P. Dhanalakota, S. Abraham, P.S. Mahapatra, B. Sammakia, A. Pattamatta, Thermal performance of a two-phase flat thermosyphon with surface wettability modifications, *Applied Thermal Engineering*, 204, 117862, 2022.
- [42] G. Koch, D. Zhang, A. Leipertz, Condensation of steam on the surface of hard coated copper discs, *Heat and mass transfer*, 32, pp. 149-156, 1997.
- [43] D.W. Woodruff, J. Westwater, Steam condensation on electroplated gold: Effect of plating thickness, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 22, pp. 629-632, 1979.
- [44] T. Smith, The hydrophilic nature of a clean gold surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, 75, pp. 51-55, 1980.
- [45] M. Ge, S. Wang, J. Zhao, Y. Zhao, L. Liu, Effects of extended surface and surface gold plating on condensation characteristics of steam with large amount of CO₂, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 92, pp. 13-19, 2018.
- [46] G.P. Thiel, Entropy generation in condensation in the presence of high concentrations of noncondensable gases, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, pp. 5133-5147, 2012.
- [47] U.S.O.o.S. Water, *Proceedings of the First International Symposium on Water Desalination*, US Department of Interior, Office of Saline Water, 1966.
- [48] G.A. O'Neill, J. Westwater, Dropwise condensation of steam on electroplated silver surfaces, *International journal of heat and mass transfer*, 27, pp. 1539-1549., 1984.
- [49] D. Woodruff, J. Westwater, Steam condensation on various gold surfaces, 1981.
- [50] G. Azimi, H.-M. Kwon, K.K. Varanasi, Superhydrophobic surfaces by laser ablation of rare-earth oxide ceramics, *Mrs Communications*, 4, pp. 95-99, 2014.
- [51] S. Khan, G. Azimi, B. Yildiz, K.K. Varanasi, Role of surface oxygen-to-metal ratio on the wettability of rare-earth oxides, *Applied Physics Letters*, 106, 2015.
- [52] D.J. Preston, N. Miljkovic, J. Sack, R. Enright, J. Queeney, E.N. Wang, Effect of hydrocarbon adsorption on the wettability of rare earth oxide ceramics, *Applied Physics Letters*, 105, 2014.
- [53] J. Shim, D. Seo, S. Oh, J. Lee, Y. Nam, Condensation heat-transfer performance of thermally stable superhydrophobic cerium-oxide surfaces, *ACS applied materials & interfaces*, 10, pp. 31765-31776, 2018.
- [54] D. Zhang, Z. Lin, J. Lin, *New surface materials for dropwise condensation*, International Heat Transfer Conference Digital Library, Begel House Inc. 1986.
- [55] A.B. Kananeh, M. Rausch, A. Fröba, A. Leipertz, Experimental study of dropwise condensation on plasma-ion implanted stainless steel tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, pp. 5018-5026, 2006.
- [56] A. Leipertz, A.P. Fröba, Improvement of condensation heat transfer by surface modifications, *Heat Transfer Engineering*, 29, pp. 343-356, 2008.

- [57] B. Zhang, D. Zhao, M. Pan, W.H. Wang, A.L. Greer, Amorphous metallic plastic, *Physical review letters*, 94, 205502, 2005.
- [58] K. Kim, Y. Lee, J.H. Jeong, Dropwise condensation induced on chromium ion implanted aluminum surface, *Nuclear Engineering and Technology*, 51, pp. 84-94, 2019.
- [59] L.L. Diezel, A.P. Fröba, N. Lukić, A. Leipertz, Optimierung einer auf dem Verfahren der mechanischen Brüdenverdichtung basierenden Meerwasserentsalzungsanlage, *Chemie Ingenieur Technik*, 79, pp. 459-467, 2007.
- [60] N. Miljkovic, D.J. Preston, R. Enright, E.N. Wang, Electrostatic charging of jumping droplets, *Nature Communications*, 4, 2517, 2013.
- [61] Y.-C. Guo, Z. Wang, Amorphous physics, Science: Beijing, China, 1984.
- [62] Q. Zhao, B.M. Burnside, Dropwise condensation of steam on ion-implanted condenser surfaces, *Heat Recovery Systems and CHP*, 14, pp. 525-534, 1994.
- [63] A. Bani Kananeh, M.H. Rausch, A.P. Fröba, A. Leipertz, Experimental study of dropwise condensation on plasma-ion implanted stainless steel tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, pp. 5018-5026, 2006.
- [64] M.H. Rausch, A. Leipertz, A.P. Fröba, Dropwise condensation of steam on ion-implanted titanium surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, pp. 423-430, 2010.
- [65] X. Ma, J. Chen, D. Xu, J. Lin, C. Ren, Z. Long, Influence of processing conditions of polymer film on dropwise condensation heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, pp. 3405-3411, 2002.
- [66] K. Holden, A. Wanniarachchi, P. Marto, D. Boone, J. Rose, *The use of organic coatings to promote dropwise condensation of steam*, 1987.
- [67] T. Haraguchi, R. Shimada, S. Kumagai, T. Takeyama, The effect of polyvinylidene chloride coating thickness on the promotion of dropwise steam condensation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34, pp. 3047-3054, 1991.
- [68] M. Gupta, V. Kapur, N.M. Pinkerton, K.K. Gleason, Initiated chemical vapor deposition (iCVD) of conformal polymeric nanocoatings for the surface modification of high-aspect-ratio pores, *Chemistry of Materials*, 20, pp. 1646-1651, 2008.
- [69] X. Ji, D. Zhou, C. Dai, J. Xu, Dropwise condensation heat transfer on superhydrophilic-hydrophobic network hybrid surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, pp. 52-67, 2019.
- [70] P.J. Marto, D.J. Looney, J.W. Rose, A.S. Wanniarachchi, Evaluation of organic coatings for the promotion of dropwise condensation of steam, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29, pp. 1109-1117, 1986.
- [71] A.T. Paxson, J.L. Yagüe, K.K. Gleason, K.K. Varanasi, Stable dropwise condensation for enhancing heat transfer via the initiated chemical vapor deposition (iCVD) of grafted polymer films, *Advanced Materials*, 26, pp. 418-423, 2014.
- [72] M.R. Haque, C. Zhu, C. Qu, E.C. Kinzel, A.R. Betz, Experimental investigation of condensation phenomenon on hydrophilic and hydrophobic titanium (Ti) pillared glass surfaces, *Micro Nano Flows Conference*. Atlanta, GA. 2018.
- [73] H. Tsuchiya, K. Manabe, T. Gaudalet, T. Moriya, K. Suwabe, M. Tenjimbayashi, K.-H. Kyong, F. Gillot, S. Shiratori, Improvement of heat transfer by promoting dropwise condensation using electrospun polytetrafluoroethylene thin films, *New Journal of Chemistry*, 41, pp. 982-991, 2017.
- [74] D.-J. Huang, T.S. Leu, Condensation heat transfer enhancement by surface modification on a monolithic copper heat sink, *Applied Thermal Engineering*, 75, pp. 908-917, 2015.
- [75] X. Chen, D. Akinwande, K.J. Lee, G.F. Close, S. Yasuda, B.C. Paul, S. Fujita, J. Kong, H.-S.P. Wong, Fully integrated graphene and carbon nanotube interconnects for gigahertz high-speed CMOS electronics, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 57, pp. 3137-3143, 2010.

- [76] D.J. Preston, D.L. Mafra, N. Miljkovic, J. Kong, E.N. Wang, Scalable graphene coatings for enhanced condensation heat transfer, *Nano letters*, 15, pp. 2902-2909, 2015.
- [77] M.S. Kim, K.A.L. Ada, O.K. Kwon, C.W. Park, A comparison of condensation heat transfer performance of MWCNT/Fe composite coatings on steel substrate, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28, pp. 1589-1596, 2014.
- [78] D.J. Preston, E.N. Wang, Jumping droplets push the boundaries of condensation heat transfer, *Joule*, 2, pp. 205-207, 2018.
- [79] Q. Zhao, D. Zhang, J. Lin, G. Wang, Dropwise condensation on LB film surface, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 35, pp. 473-477, 1996.
- [80] J. Xie, J. Xu, X. Li, H. Liu, Dropwise condensation on superhydrophobic nanostructure surface, Part I: Long-term operation and nanostructure failure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, pp. 86-95, 2019.
- [81] R. Parin, A. Martucci, M. Sturaro, S. Bortolin, M. Bersani, F. Carraro, D. Del Col, Nanostructured aluminum surfaces for dropwise condensation, *Surface and Coatings Technology*, 348, pp. 1-12, 2018.
- [82] J. Zhu, Y. Luo, J. Tian, J. Li, X. Gao, Clustered ribbed-nanoneedle structured copper surfaces with high-efficiency dropwise condensation heat transfer performance, *ACS applied materials & interfaces*, 7, pp. 10660-10665, 2015.
- [83] J.B. Boreyko, C.H. Chen, Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces, *Physical review letters*, 103, 184501, 2009.
- [84] R. Parin, D. Del Col, S. Bortolin, A. Martucci, Dropwise condensation over superhydrophobic aluminum surfaces, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, pp. 032134., 2016.
- [85] X. Chen, J.A. Weibel, S.V. Garimella, Exploiting microscale roughness on hierarchical superhydrophobic copper surfaces for enhanced dropwise condensation, 2015.
- [86] Y. Zhao, Y. Luo, J. Zhu, J. Li, X. Gao, Copper-based ultrathin nickel nanocone films with high-efficiency dropwise condensation heat transfer performance, *ACS applied materials & interfaces*, 7, pp. 11719-11723, 2015.
- [87] R. Wen, Q. Li, J. Wu, G. Wu, W. Wang, Y. Chen, X. Ma, D. Zhao, R. Yang, Hydrophobic copper nanowires for enhancing condensation heat transfer, *Nano Energy*, 33, pp. 177-183, 2017.
- [88] M. Qu, J. Liu, J. He, Fabrication of copper-based ZnO nanopencil arrays with high-efficiency dropwise condensation heat transfer performance, *RSC advances*, 6, pp. 59405-59409, 2016.
- [89] M.C. Lu, C.C. Lin, C.W. Lo, C.W. Huang, C.C. Wang, Superhydrophobic Si nanowires for enhanced condensation heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111, pp. 614-623, 2017.
- [90] R. Wen, S. Xu, X. Ma, Y.C. Lee, R. Yang, Three-dimensional superhydrophobic nanowire networks for enhancing condensation heat transfer, *Joule*, 2, pp. 269-279, 2018.
- [91] D.J. Preston, Z. Lu, Y. Zhao, D. Antao, K. Wilke, E.N. Wang, Optimal design of slippery liquid-infused porous surfaces for enhanced condensation of low surface tension fluids, APS March Meeting Abstracts, pp. L12. 002, 2017.
- [92] S.H. Hoenig, R.W. Bonner III, Dropwise condensation on superhydrophobic microporous wick structures, *Journal of Heat Transfer*, 140, 071501, 2018.
- [93] L. Zhu, Y. Xiu, J. Xu, P.A. Tamirisa, D.W. Hess, C.P. Wong, Superhydrophobicity on two-tier rough surfaces fabricated by controlled growth of aligned carbon nanotube arrays coated with fluorocarbon, *Langmuir*, 21, pp. 11208-11212, 2005.
- [94] B.P. Center, Annual energy outlook 2020, Energy Information Administration, Washington, DC, 12, pp. 1672-1679, 2020.
- [95] J. McCormick, J. Westwater, Nucleation sites for dropwise condensation, *Chemical Engineering Science*, 20, pp. 1021-1036, 1965.

- [96] Q. Zhao, B. Burnside ,Dropwise condensation of steam on ion implanted condenser surfaces, *Heat Recovery Systems and CHP*, 14, pp. 525-534, 1994.
- [97] Q. Zhao, D. Zhang, X. Zhu, D. Xu, Z. Lin, J. Lin, Industrial application of dropwise condensation, *International Heat Transfer Conference Digital Library*, Begel House Inc. 1990.
- [98] Q. Zhao, J. Liu, T. Bai, J. Lin, B. Cui, J. Shen, N. Fang, Dropwise condensation of steam on vertical and horizontal U-type tube condensers, *International Heat Transfer Conference Digital Library*, Begel House Inc. 1994.
- [99] A. Alizadeh, V. Bahadur, A. Kulkarni, M. Yamada, J.A. Ruud, Hydrophobic surfaces for control and enhancement of water phase transitions, *MRS bulletin*, 38, pp. 407-411, 2013.
- [100] D.A. McNeil, B. Burnside, G. Cuthbertson, Dropwise condensation of steam on a small tube bundle at turbine condenser conditions, *Experimental Heat Transfer*, 13, pp.89-105, 2000.