

## An Overview of the Coatings Used in Condenser Tubes

Mohammad Ghorbannejad<sup>1</sup>, Asal Hosseini Monazzah<sup>1</sup>, Mehran Rostami<sup>2</sup>

1. Department of Materials and Metallurgy, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, P. O. Box:16765-1719, Tehran, Iran.

2. Department of Nano Materials and Nano Coatings, Institute for Color Science & Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 13-08-2022

Accepted: 11-10-2022

Available online: 16-10-2022

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.5.2

### Keywords:

Condenser tubes

Surface coatings

Hydrophobic coating

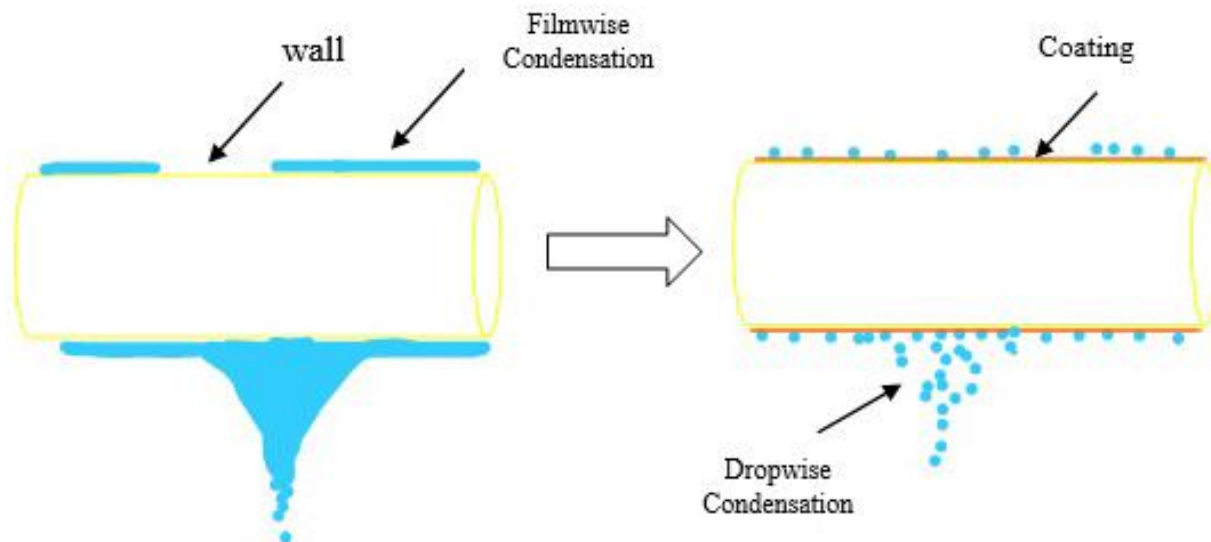
Dropwise condensation

Water film-wise condensation

Heat transfer

### ABSTRACT

Condensation may occur during various industrial applications, including water collection, desalination, energy generation, and thermal management. This phenomenon affects heat transfer efficiency during energy generation and heat management processes. Film-wise and dropwise condensation were the two types of condensation based on their formation manner. Condenser tubes are one of the energy conversion systems in which the condensation phenomenon dramatically affects the system's efficiency. The high surface energy of the condenser tube results in water film formation on the tube surface, which hinders heat transfer. Therefore, the heat transfer efficiency of the condenser is reduced due to further energy loss. The film-wise condensation should be altered to dropwise ones by reducing the surface energy of the tube to eliminate this issue. Hence, different coatings are applied to increase the condenser tubes' hydrophobicity and heat transfer capacity. In this study, the importance of wettability and heat transfer mechanisms in condenser tubes was determined primarily. Afterward, different coatings used to create dropwise condensation were introduced. Eventually, the applications and attributes of the mentioned coatings based on their cost, strength, durability, and efficiency were introduced.



\*Corresponding author: [a\\_hosseini\\_monazzah@sbu.ac.ir](mailto:a_hosseini_monazzah@sbu.ac.ir)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## مروری بر پوشش‌های مورد استفاده در لوله‌های خنک‌کننده

محمد قربان نژاد<sup>۱</sup>، عسل حسینی منزه<sup>۲</sup>، مهران رستمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۱۷۱۹.

۲- استادیار، گروه مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۱۷۱۹.

۳- دانشیار، گروه نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

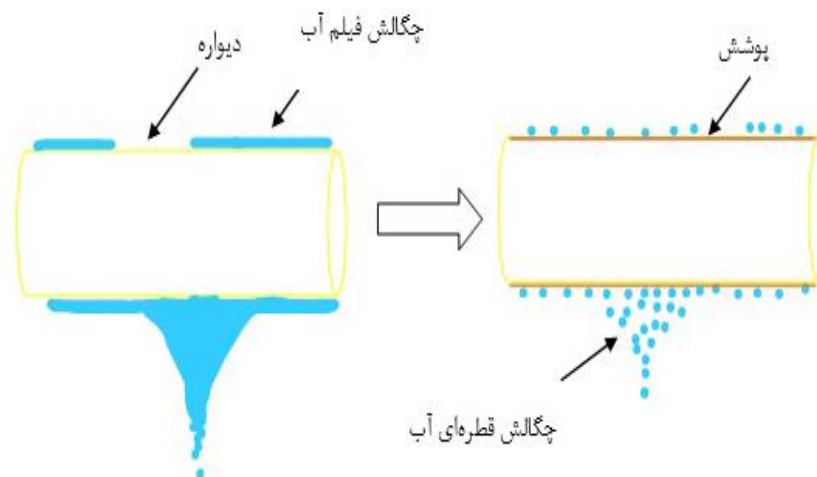
DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.5.2

### واژه‌های کلیدی:

لوله‌های خنک‌کننده  
پوشش‌های سطحی  
پوشش‌های آب‌گریز  
چگالش قطره‌ای آب  
چگالش فیلم آب  
انتقال حرارت

### چکیده

پدیده چگالش در بسیاری از کاربردهای صنعتی نظیر شیرین‌سازی آب، وصول آب، تولید انرژی و مدیریت حرارتی وجود دارد. در فرآیندهای تولید انرژی و مدیریت حرارتی پدیده چگالش سبب تغییر در بازده انتقال حرارت فرآیند می‌گردد. پدیده فوق به دو صورت چگالش فیلم آب و چگالش قطره‌ای رخ می‌دهد. یکی از سیستم‌های تبدیل انرژی که در آن پدیده چگالش، بازده سیستم را بشدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، لوله‌های خنک‌کننده می‌باشند. در صورتیکه انرژی سطحی لوله خنک‌کننده بالا باشد، فیلم آب بر روی سطح لوله تشکیل گردیده، که این پدیده مانع از انتقال حرارت و در نتیجه اتلاف انرژی و کاهش بازده انتقال حرارت خنک‌کننده می‌شود. جهت رفع این مشکل، لازم است که با کاهش انرژی سطح لوله، چگالش قطره‌ای جایگزین چگالش فیلم گردد. بنابراین، امروزه از پوشش‌های مختلفی جهت کاهش انرژی سطح، افزایش آب‌گریزی و بهبود انتقال حرارت سطح لوله‌های خنک‌کننده استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت پدیده چگالش در لوله‌های خنک‌کننده، در این پژوهش، ابتدا به بیان اهمیت مساله ترشوندگی و مکانیزم انتقال حرارت در لوله‌های خنک‌کننده پرداخته، سپس پوشش‌های مختلف مورد استفاده جهت ایجاد چگالش قطره‌ای آب، کاربردها و پتانسیل‌های بهبود هر یک از این پوشش‌ها با توجه به هزینه، استحکام، دوام و کارایی معرفی می‌گردد.



## ۱- مقدمه

زمینه شامل فلزات نجیب<sup>۵</sup> (طلا، نقره، پلاتین، پالادیم و رودیم) [۱۳]، اکسیدهای خاکی کمیاب (سری لاتانید)<sup>۶</sup> [۱۴]، پلیمرها (فلوروپلیمرها) [۱۵]، تک لایه‌های خودبه خودی<sup>۷</sup> (تیول<sup>۸</sup> و سیلان<sup>۹</sup>) [۱۶]، کامپوزیت‌ها [۱۷] و سایر مواد (نانولوله‌های کربن، گرافن، لیاف کربن و سطوح نانو ساختار) [۱۸، ۱۹] می‌باشد. پیش از مرور پوشش‌های یاد شده در ایجاد چگالش قطره‌ای، ابتدا پدیده‌های موثر در ایجاد این نوع چگالش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

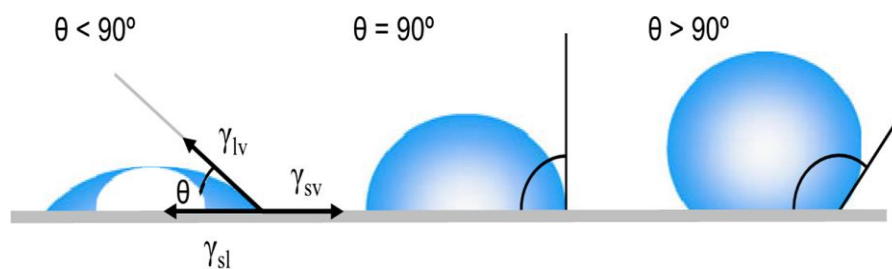
## ۲- پدیده ترشوندگی

## ۱-۲- معرفی ترشوندگی

ترشوندگی از ویژگی‌های یک ماده جهت ایجاد سطح تماس با یک جامد می‌باشد، که از برهمکنش‌های بین ماده و جسم جامد ناشی می‌گردد [۲۰]. در حالت ایده‌آل، هنگامی که یک قطره روی سطح قرار می‌گیرد، دو حالت رخ می‌دهد؛ یا یک کره تشکیل داده و یا سطح را کاملاً خیس می‌نماید [۲۱، ۲۲]. در مطالعات ترشوندگی، معمولاً زاویه تماس یکی از مهم‌ترین داده‌هایی است که مقدار ترشوندگی را در هنگام تماس بین مایع و جامد با یکدیگر نشان می‌دهد. زاویه تماس، زاویه ناشی از تقاطع فصل مشترک جامد/مایع و جامد/گاز می‌باشد. شکل ۱ نشان می‌دهد که زاویه تماس کوچک زمانی تشکیل می‌شود که مایع روی سطح توزیع شود، در حالی که زوایای تماس بزرگ زمانی حاصل می‌شود که سطح تماس کمتری بین جامد و مایع وجود داشته باشد. سطوح جامد بر اساس زاویه تماس قطره آب بر روی سطح آنها، به چند دسته مختلف سطوح آب‌دوست، آب‌گریز و یا ابر آب‌دوست و ابر آب‌گریز تقسیم می‌شوند [۲۳، ۲۴]. در جدول ۱ دسته‌بندی سطوح بر اساس زاویه تماس قطره آب ارائه شده است [۲۵].

امروزه ۵۰ درصد از نیروگاه‌های آب شیرین‌کن و ۸۵ درصد از نیروگاه‌های تولید برق در سراسر جهان بر مبنای خنک‌کننده بخار کار می‌کنند [۱]. خنک‌کننده‌های صنعتی عمدتاً دارای مبدل‌های پوسته، لوله<sup>۱</sup> و دارای ناحیه انتقال حرارت تغییر فاز<sup>۲</sup> می‌باشند [۳]. در این خنک‌کننده‌ها مقدار زیادی آب خنک در لوله‌ها جریان دارد و بخار آب موجود در ناحیه انتقال حرارت با برخورد به این لوله‌ها سرد شده و پدیده‌ی چگالش آب رخ می‌دهد. پدیده‌ی چگالش در این خنک‌کننده‌ها با توجه به انرژی سطحی لوله به دو حالت چگالش قطره‌ای<sup>۳</sup> و چگالش لایه‌ای<sup>۴</sup> صورت می‌گیرد [۴]. در حالت چگالش لایه‌ای آب، یک لایه فیلم آب بر روی سطح لوله تشکیل می‌گردد که بازده انتقال حرارت خنک‌کننده را کاهش می‌دهد. اما در حالت چگالش قطره‌ای، سطح لوله انرژی سطحی پایینی دارد [۵]، که سبب می‌گردد قطرات آب به طور کامل سطح انتقال حرارت لوله را اشغال نکرده و یک لایه فیلم آب تشکیل نمی‌گردد. بلکه قطرات به صورت جداگانه در سراسر سطح لوله ایجاد می‌شوند. در چگالش قطره‌ای، قطرات یک چرخه پیوسته از تولید قطره و از بین رفتن آن را ایجاد می‌نمایند، که اثر مقاومت حرارتی فیلم آب را در حالت چگالش لایه‌ای کاهش می‌دهد. در واقع، در چگالش قطره‌ای، بخار به سطح برخورد می‌کند و قطرات متعددی تشکیل می‌گردد که گرمای نهان میعان را آزاد نموده و سرعت انتقال حرارت را افزایش می‌دهد [۷]. بنابراین به دست آوردن چگالش قطره‌ای پایدار برای عملکرد بهتر خنک‌کننده‌ها بسیار حائز اهمیت است. زیرا هرگونه بهبود در انتقال حرارت منجر به بهبود کارایی کلی شده، که در نهایت سبب کاهش هزینه‌های مالی و اثرات مخرب زیست‌محیطی می‌گردد [۸، ۹]. یکی از روش‌هایی که جهت جایگزینی چگالش قطره‌ای آب به جای چگالش فیلم آب و در واقع کاهش انرژی سطحی و افزایش بازده انتقال حرارت خنک‌کننده به کار می‌رود، اصلاح سطح لوله به وسیله پوشش یا تغییر ساختار سطح در مقیاس میکرو و نانو می‌باشد [۱۰-۱۲].

با توجه به اهمیت مطالب اشاره شده، هدف از این مطالعه، مروری بر پوشش‌های سطحی به کار رفته برای ایجاد چگالش قطره‌ای در لوله‌های خنک‌کننده است. پوشش‌های موجود در این



شکل ۱: طرحواره زاویه تماس قطره آب بر روی سطح [۲۳].

Figure 1: Schematic of contact angle on surface [23].

<sup>1</sup> Shell and Tube

<sup>2</sup> The Phase Change Heat Transfer (PCHT)

<sup>3</sup> Dropwise Condensation (DWC)

<sup>4</sup> Filmwise Condensation (FWC)

<sup>5</sup> Noble Metals

<sup>6</sup> Rare Earth Oxides

<sup>7</sup> Self-Assembled Monolayers

<sup>8</sup> Thiol

<sup>9</sup> Silane

جدول ۱: دسته‌بندی سطوح بر اساس زاویه تماس [۲۵].

Table 1: Classification of surfaces based on contact angle [25].

Contact angle	$\theta < 5^\circ$	$5^\circ < \theta < 90^\circ$	$90^\circ < \theta < 150^\circ$	$\theta > 150^\circ$
Type of surface wettability	Super-hydrophilic	Hydrophilic	hydrophobic	Super-hydrophobic

داد [۲۳]. بنابراین در سال ۱۹۳۶، ونزل رابطه‌ای را پیشنهاد کرد که در آن زبری سطح و انرژی سطح با زاویه تماس مطابق رابطه ۲ مرتبط است [۲۹].

$$r((\gamma_{sv} - \gamma_{sl})) = \gamma_{lv} \cos \theta \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $\theta$ ، زاویه ترشوندگی تحت تاثیر عوامل ناهمواری سطح،  $\gamma_{sv}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و بخار،  $\gamma_{sl}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و مایع،  $\gamma_{lv}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و بخار و  $r$ ، عامل ناهمواری سطح است. در این رابطه  $r$  نسبت مساحت واقعی سطح به مساحت اشغال شده هندسی است، که همواره بزرگتر از یک می‌باشد. با توجه به رابطه ونزل نشان داده می‌شود که زبری سطح می‌تواند آب‌دوستی یا آب‌گریزی سطح را بهبود ببخشد [۲۹].

مدل سوم، در سال ۱۹۴۴ توسط کاسی و بکستر ارائه شد. بر اساس این مدل قطره بر روی کامپوزیتی از هوا و سطح جامد قرار می‌گیرد. زاویه تماس در این مدل، از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد [۳۰].

$$\cos \theta = f_{SL} \cos \theta_1 + f_{LA} \cos \theta_2 \quad (3)$$

در این رابطه  $f_{LA}$  و  $f_{SL}$  به ترتیب کسر حجمی قطره در تماس با سطح جامد و سطح هوای به دام افتاده در شکاف‌ها می‌باشد و مجموع این دو کسر حجمی برابر ۱ است.  $\theta_1$ ، زاویه تماس مایع با سطح (بدون زبری) می‌باشد. اگر  $\theta_2$  برابر با  $180^\circ$  در نظر گرفته گردد رابطه ۳ به رابطه ۴ تبدیل می‌شود [۳۱].

$$\cos \theta = f_{SL} (\cos \theta + 1) - 1 \quad (4)$$

امروزه با ایجاد پوشش روی لوله‌های خنک‌کننده سبب تغییر در نوع ترشوندگی سطح و ایجاد قطره‌ی آب به جای فیلم آب و حذف سریع تر قطرات آب بر لوله‌های خنک‌کننده می‌شوند [۳۲].

نوع ترشوندگی سطح لوله بر نوع چگالش در لوله خنک‌کننده تاثیر می‌گذارد. هنگامی که سطح دارای ترشوندگی بالا می‌باشد، زاویه تماس حاصل از قطره آب کم بوده و در نتیجه فیلم آب بر روی لوله خنک‌کننده تشکیل می‌گردد. همچنین کاهش ترشوندگی سطح سبب افزایش زاویه تماس قطره آب و تشکیل قطره‌ای آب بر روی لوله خنک‌کننده می‌شود [۲۶]، که همراه با افزایش بازده انتقال حرارت و کاهش مقاومت حرارتی سطح است [۲۷]. بنابراین، باتوجه به اهمیت ترشوندگی در تشکیل نوع چگالش در لوله‌های خنک‌کننده، پس از بررسی مدل‌های مختلف ترشوندگی، انرژی سطحی، عوامل موثر بر ترشوندگی سطح و پایداری عملکردی سطوح فوق آب‌گریز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

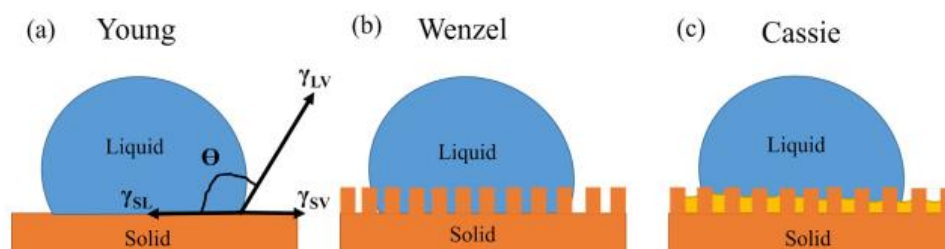
## ۲-۲- مدل‌های مختلف ترشوندگی

باتوجه به اهمیت بحث ترشوندگی، مدل‌های مختلفی (شکل ۲) با فرضیات متفاوت در این حوزه ارائه شده است. اولین مدل در بحث ترشوندگی در سال ۱۸۰۵ توسط یانگ [۲۸] معرفی شد. این مدل برای یک قطره مایع روی یک سطح صاف ایده‌آل تعریف شده است. در این مدل، ترشوندگی با انرژی آزاد سطح طبق رابطه ۱ رابطه دارد [۲۳].

$$\cos \theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lv} \quad (1)$$

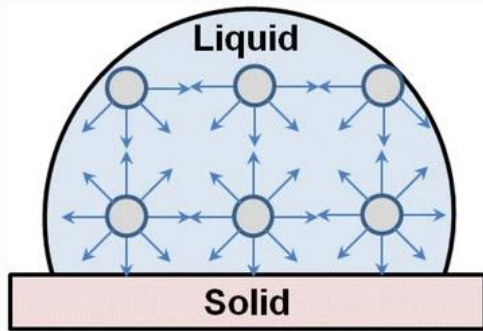
در رابطه (۱)،  $\theta$ ، زاویه ترشوندگی،  $\gamma_{sv}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و بخار،  $\gamma_{sl}$ ، نیروی کشش سطحی بین جامد و مایع و  $\gamma_{lv}$ ، نیروی کشش سطحی بین مایع و بخار است [۲۳].

زاویه تماس در مدل یانگ توسط تعادل ترمودینامیکی سطوح انرژی آزاد در سطح مشترک جامد-مایع-گاز بدست می‌آید. از آنجایی که سطوح واقعی معمولا شرایط سطحی متفاوتی داشته و زبری سطح جامد نقش مهمی در تعیین ترشوندگی دارد، در اکثر مواقع حالت‌های زاویه تماس را نمی‌توان به طور کامل با رابطه یانگ توضیح



شکل ۲: طرح‌واره مدل‌های مختلف ترشوندگی [۲۳].

Figure 2: Schematic of different wetting models [23].



شکل ۳: طرح‌واره نیروهای وارد بر مولکول‌های آب [۳۶].  
Figure 3: Schematic of forces acting on water molecules [36].

برای رسیدن به حالت فوق‌آب‌گریز بایستی سطح مدل کاسی-باکستر را دارا باشد و اگر سطح از حالت مدل کاسی-باکستر به حالت ونزل تبدیل گردد، حالت فوق‌آب‌گریز خود را از دست می‌دهد [۴۳].

### ۳- فرآیند انتقال حرارت در خنک‌کننده

در خنک‌کننده‌ها، پدیده چگالش هنگامی رخ می‌دهد که بخار در فاز اشباع یا فوق‌اشباع با سطح سیال یا دیواره سیال در دمای پایین‌تر از دمای اشباع تماس پیدا کند [۴۴]. در این حالت، تشکیل فیلم آب ناشی از پدیده چگالش در سطح لوله به عنوان یک مانع حرارتی برای رسیدن بخار به سطح عمل کرده و حذف این لایه فیلم آب می‌تواند موجب افزایش چگالش گردد. گوش‌وامی و همکارانش [۴۵] در پژوهشی بیان کردند که در فرآیند چگالش یک ضریب انتقال حرارت کلی (U) وجود دارد که مطابق رابطه ۵ می‌باشد.

$$U=1/R_{Total}=1/(R_{Coolant}+R_{Wall}+R_{Condensation}) \quad (5)$$

در رابطه ۵، مقصود از  $R_{Total}$ ، مقاومت حرارتی کل،  $R_{Coolant}$ ، مقاومت حرارتی سمت سیال خنک‌کننده و  $R_{Condensation}$ ، مقاومت کل چگالش است که از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$R_{Condensation}=R_I+R_C+R_D+R_{Fouling}+R_{Coating} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $R_I$ ، مقاومت سطحی در فصل مشترک مایع بخار،  $R_C$ ، مقاومت انحنای ناشی از دایره شدن قطرات،  $R_D$ ، مقاومت انتقال حرارت از طریق قطره،  $R_{Fouling}$ ، مقاومت ناشی از تجمع آلودگی‌های مختلف سطح و  $R_{Coating}$ ، مقاومت پوشش است. همچنین مطابق شکل ۴ مدار مقاومت‌های حرارتی مختلف که در طی چگالش رخ می‌دهد، نشان داده شده است [۴۵].

### ۳-۲- انرژی سطحی

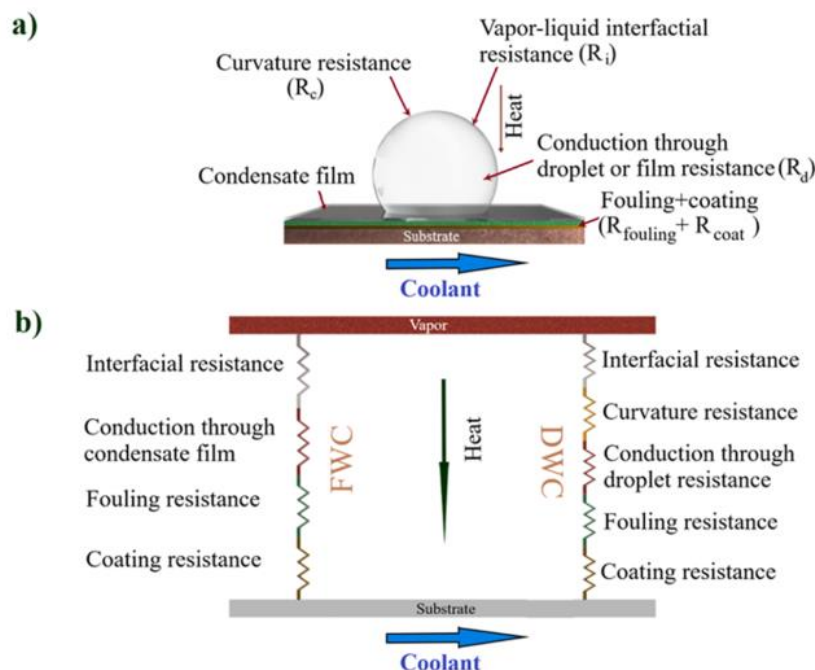
اجزای سازنده یک ماده از لحاظ انرژی در بخش درونی و سطح و نزدیک به سطح متفاوت می‌باشند [۳۳]. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در حجم مشخصی از آب، به مولکول‌های درونی از هر جهت نیرو وارد می‌شود که در نتیجه نیروی برآیند وارد بر آنها صفر می‌باشد؛ ولی نیروی برآیند وارد به مولکول‌های سطحی به سمت داخل آب است. بنابراین همواره آب تمایل دارد که کمترین سطح ممکن را ایجاد نماید. از لحاظ هندسی چون کره کمترین مساحت سطح نسبت به سایر اشکال را دارد، لذا قطره‌ی آب معلق در هوا به شکل کره در می‌آید [۳۴]. انرژی سطحی در جامدات نیرویی است که از سطح جامد به مولکول‌های اطرافش وارد می‌گردد که در مدل‌های مختلف ترشوندگی در بخش ۲.۲ مورد بررسی قرار گرفت. به عبارت دیگر انرژی سطحی مشخصه‌ای است که میزان ترشوندگی سطح را تعیین می‌کند و با نیرو بر واحد طول (N/m) یا انرژی بر واحد سطح ( $J/m^2$ ) بیان می‌گردد [۳۵].

### ۴-۲- عوامل موثر بر ترشوندگی سطح

شیمی سطح [۳۷] و زبری آن [۳۸] دو عامل موثر بر ترشوندگی سطح می‌باشند. سطوح آب‌گریز از لحاظ شیمی سطح تقریباً غیرقطبی می‌باشند، لذا به دلیل قطبی بودن مولکول‌های آب، دافع آب می‌باشند. از سوی دیگر مواد غیرقطبی معمولاً جاذب مواد غیرقطبی می‌باشند، لذا سطوح آب‌گریز جاذب مواد غیرقطبی مانند آلکان‌ها، گازهای نجیب هستند [۳۹]. یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل موثر در میزان ترشوندگی سطوح، هندسه سطح می‌باشد. زبری سطح باعث افزایش یا کاهش مساحت سطح تماس می‌گردد. در مدل و نزل و کاسی-باکستر اثر زبری سطح بر میزان ترشوندگی سطوح مورد بررسی قرار گرفته است. اگر اندازه زبری سطح به اندازه‌ای افزایش یابد که حباب هوا بین قطره آب با سطح ایجاد نشود، می‌تواند منجر به آب‌دوست کردن سطح گردد و همچنین اگر اندازه زبری سطح تا حدی کم باشد که آب نتواند به حفره‌ها نفوذ کرده و هوا بین آب و سطح به دام بیفتد؛ آب‌گریزی افزایش می‌یابد [۴۰].

### ۲.۵ پایداری عملکردی سطوح فوق‌آب‌گریز

سطوح آب‌گریز ممکن است پس از مدتی در نتیجه عدم پایداری شیمیایی یا عدم پایداری مکانیکی، عملکرد آب‌گریزی خود را از دست بدهند [۲۳]. یک پوشش فوق‌آب‌گریز می‌تواند به دلیل کاهش زبری سطح [۴۱] و یا انحلال لایه سطح [۴۲]، پایداری شیمیایی خود را از دست بدهد. همچنین عدم پایداری مکانیکی سطح و از بین رفتن آب‌گریزی می‌تواند ناشی از آلودگی باشد [۲۳].



شکل ۴: مقاومت‌های حرارتی و مدار مقاومت‌های حرارتی مختلف در طی چگالش [۴۵].

Figure 4: Various resistances and resistance networks in condensation [45].

بخش به انواع این پوشش‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- فلزات نجیب

فلزات نجیب مقاوم در برابر خوردگی و اکسیدشدن بوده و معمولاً به دلیل انرژی سطحی پایین خود، زاویه تماس بالایی با قطره آب تشکیل می‌دهند. در جدول ۲ میزان ترشوندگی سطح فلزات بعد از ۳۶۵۰ ساعت از چگالش پیوسته توسط آب خالص ذکر شده است [۴۸].



شکل ۵: چگالش قطره‌ای بر روی قسمت پوشش‌داده شده سطح لوله خنک‌کننده و چگالش فیلم آب بر روی سطح پوشش‌داده نشده سطح لوله خنک‌کننده [۴۷].

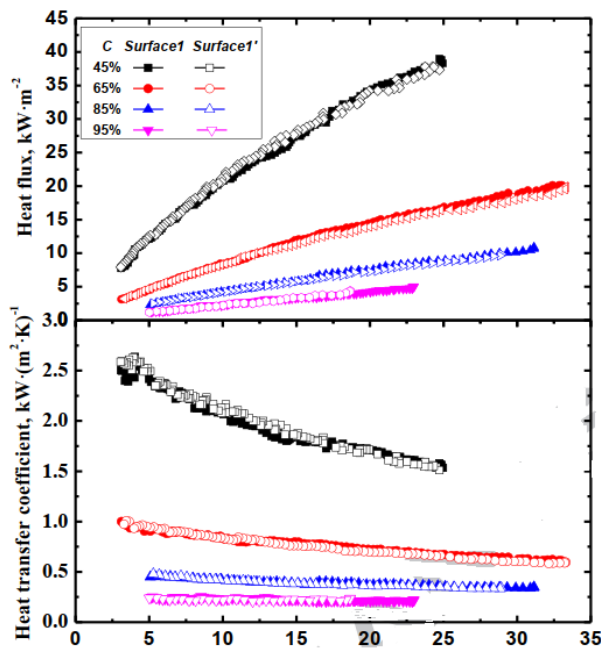
Figure 5: Drop-wise condensation on the coated part of the condenser tube surface and film-wise condensation on the uncoated surface of the condenser tube surface [47].

#### ۴- روش‌های بهبود چگالش از طریق پوشش

لوله‌های خنک‌کننده عمدتاً از جنس مس، آلومینیم، فولاد زنگ نزن و تیتانیوم ساخته می‌شوند، که اکثر این فلزات دارای انرژی سطحی بالایی هستند، که سبب ترشوندگی و تشکیل لایه‌ای آب روی آنها می‌گردد [۴۶]. در شکل ۵ بخشی از سطح مس پوشش داده شده، که در این قسمت تشکیل قطره‌ای آب قابل مشاهده است و در سایر قسمت‌ها که پوششی اعمال نشده است، فیلم آب شکل گرفته است [۴۷]. علاوه بر اعمال پوشش‌های آب‌گریز با انرژی سطحی پایین روی یک بستر، پوشش‌های فوق آب‌گریز نیز جهت افزایش زاویه ترشوندگی بکار می‌روند. جهت تامین یک سطح فوق آب‌گریز با انرژی سطحی پایین علاوه بر کاهش انرژی سطحی، لازم است زبری سطح در مقیاس میکرو و نانو ایجاد گردد. در زیر سه روش جهت بدست آوردن پوشش فوق آب‌گریز ذکر شده است [۴۵]:

- اعمال پوشش با انرژی سطحی پایین بر روی یک بستر ناهموار.
- ایجاد ناهمواری بر روی یک بستر دارای انرژی سطحی پایین.
- اعمال تک مرحله‌ای پوشش‌های با زبری بالا و انرژی سطحی کم روی یک بستر.

امروزه انواع مختلفی از پوشش‌های سطحی برای بهبود چگالش قطره‌ای آزمایش شده‌اند. از جمله این پوشش‌های سطحی می‌توان به ترکیبات معدنی، فلزات نجیب [۴۸]، پلیمرها [۱۵]، آلیاژهای سطحی [۴۹]، کامپوزیت‌ها [۵۰] و ترکیبات آلی [۵۱] اشاره کرد. در این



شکل ۶: تاثیر افزایش غلظت  $CO_2$  بر عملکرد شار انتقال حرارت و ضریب انتقال حرارت صفحات بدون پوشش و با طلا پوشش داده شده [۵۵].  
**Figure 6:** The effect of increasing  $CO_2$  concentration on the heat transfer coefficient and heat flux of uncoated and gold coated plates [55].

همچنین مواد فعال سطحی<sup>۵</sup> مورد استفاده در پوشش بر میزان چگالش قطره‌ای آب تاثیر دارند. مشاهدات نشان می‌دهد که یک پوشش نقره روی سطح مس در مقایسه با سطح مس خالص انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و افزودن ماده فعال سطحی n-هیپتان به پوشش هم چگالش قطره‌ای آب و هم انتقال حرارت پوشش را نسبت به مس خالص بدون پوشش بهبود می‌بخشد. به گونه‌ای که، استفاده از مواد فعال سطحی به میزان ۲ درصد وزنی به همراه پوشش نقره منجر به افزایش ۵۷/۷۲ درصدی انتقال حرارت در مقایسه با فیلم آب تشکیل شده بر روی سطح مس خالص بدون پوشش می‌گردد [۵۷].

#### ۴-۲- اکسیدهای خاکی کمیاب

ماهیت آب‌گریز اکسیدهای خاکی کمیاب آنها را از سایر اکسیدهای فلزی متمایز می‌کند. این ماهیت آب‌گریز متاثر از آرایش الکترونی آنها ( $5s^2 2p^6$ ) می‌باشد، که تعامل اکسیدهای فوق را با مولکول‌های آب به حداقل می‌رساند [۵۸]. در شکل ۷ مقایسه بین جهت‌گیری مولکول آب بر روی آلومینا، به عنوان یک اکسید فلزی در مقابل یک اکسید خاکی کمیاب نشان داده شده است. سطح آلومینا توانایی حفظ پیوند هیدروژنی را به سبب آب‌دوست بودن دارا می‌باشد [۵۹].

جدول ۲: میزان ترشوندگی سطح فلزات بعد از ۳۶۵۰ ساعت [۴۸].

Table 2: Wetting rate of metal surface after 3650 hours[48].

Type of Material	Receding Angle	Advancing Angle
Silver	74	85
Gold	46	85
Rhodium plated on silver	51	65
Platinum	30	50
Palladium	51	74
Rhodium plated on copper-nickel	73	82

همچنین فلزات نجیب توانایی ذاتی جذب ناخالصی‌ها و هیدروکربن‌ها را دارند، که به تشکیل قطرات مایع به ابعاد میکرون تا میلی‌متر روی سطح آنها کمک می‌کنند [۵۲]. یکی از مهم‌ترین مشکلات در استفاده از فلزات نجیب قیمت بالای آنها می‌باشد [۵۳]. وست واتر<sup>۱</sup> و ود روف<sup>۲</sup> [۵۴] ضخامت‌های مختلف پوشش طلا را بر روی زیرلایه مسی از طریق رسوب‌دهی الکتریکی اعمال نموده و نوع چگالش آنها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضخامت پوشش تا ۲۰ نانومتر نتوانسته است موجب تشکیل قطره آب گردد. همچنین در این پژوهش مشخص گردید که حداقل ضخامت ۲۰۰ نانومتر برای تشکیل قطره‌ای آب لازم می‌باشد. در پژوهشی دیگر جی<sup>۳</sup> و همکارانش [۵۵] اثر اعمال پوشش طلا با ضخامت ۱۵ تا ۵۰ میکرومتر را بر صفحه فولادی زنگ نزن در حضور ۴۵ تا ۹۵ درصد  $CO_2$  مورد بررسی قرار دادند. سطح پوشش داده شده دارای زاویه تماس ۱۱۳ بوده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است افزایش غلظت  $CO_2$  عملکرد انتقال حرارت را برای سطوح کاهش داده است. از سوی دیگر، پوشش طلا روی این سطوح عملکرد بهتری نسبت به سطح بدون پوشش در غلظت‌های بالای  $CO_2$  نشان نداده است. پدیده فوق به دلیل چگالش پایین‌تر و از طرفی کاهش سرعت تشکیل چرخه قطرات آب و از بین رفتن آنها در حضور  $CO_2$  می‌باشد. بنابراین در خنک‌کننده‌های صنعتی که با غلظت‌های بالای  $CO_2$  کار می‌کنند، پوشش‌های طلا به دلیل هزینه بالا و کارایی کمتر نمی‌توانند به عنوان جایگزین پوشش‌های پلیمری در نظر گرفته شوند.

در پژوهش دیگر وست واتر و اونیل<sup>۴</sup> [۵۶] ضخامت‌های مختلف پوشش نقره بر روی زیرلایه مسی را به منظور به‌دست آوردن حداقل ضخامت لازم جهت تشکیل قطره‌ای آب بررسی نمودند. بررسی ایشان نشان داد که ضخامت پوشش که به روش آبکاری اعمال گردیده بین ۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر متغیر بوده، همچنین در پوشش‌های با ضخامت بیشتر از ۱۵۰ نانومتر، قطرات آب تشکیل می‌شود، در حالی که ضخامت کمتر از ۳۰ نانومتر منجر به تشکیل فیلم آب می‌گردد.

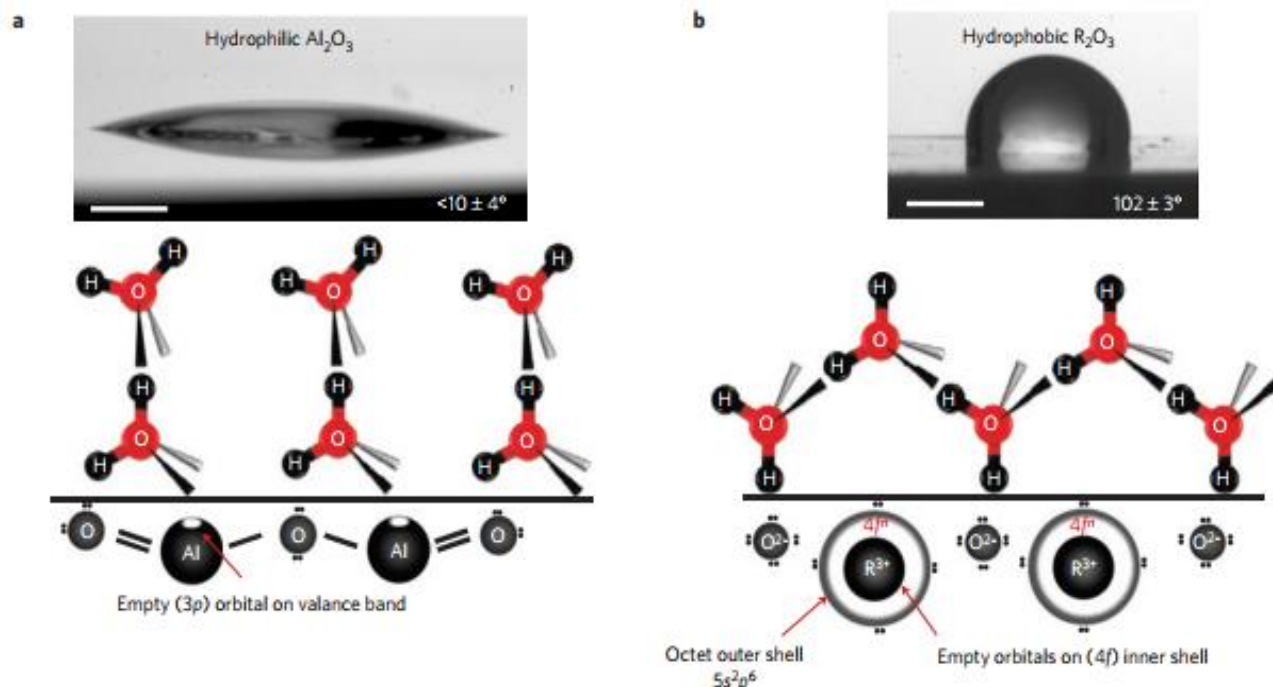
<sup>1</sup> Westwater

<sup>2</sup> Woodruff

<sup>3</sup> Ge

<sup>4</sup> Oneill

<sup>5</sup> Surfactant



شکل ۷: جهت گیری مولکول آب بر روی الف) سطح آلومینیم اکسید (فلز)، ب) سطح اکسیدهای خاکی نجیب [۵۹].

Figure 7: Water molecule orientation on a) Aluminium (metal) oxide and b) REO [59].

زیرلایه فولادی اعمال کرده‌اند و سپس به بررسی پتانسیل آنها برای کاربرد صنعتی پرداخته‌اند. آنها در این پژوهش بیان می‌کنند استفاده از لیزر برای اعمال پوشش‌های اکسیدهای خاکی روشی مناسب در کاربردهای صنعتی است.

### ۴-۳- پوشش‌های پلیمری

پلیمرها از لحاظ هزینه و عملکرد، پوشش مناسبی برای لوله‌های خنک‌کننده می‌باشند [۶۸]. به عنوان نمونه فلوتور پلیمرها یکی از انواع پوشش‌های پلیمری به کار رفته در لوله‌های خنک‌کننده است که خواص آب‌گریزی بالا، انرژی سطحی پایین و پایداری گرمایی و شیمیایی بالا دارد [۶۹]. همچنین پوشش‌های پارلین و سیلیکون نیز به خاطر خواص منحصر به فردی که دارند به صورت فیلم نازک بر لوله‌های خنک‌کننده اعمال شده و در آب‌گریزی این لوله‌ها موثر می‌باشند. اما یکی از مشکلات پلیمرها برای کاربرد فوق، دوام آنها می‌باشد، که صنایع برای تامین دوام، نیازمند استفاده از پوشش‌های پلیمری در ضخامت بالا هستند. از سوی دیگر، ضخامت بالا در پوشش‌های پلیمری سبب افزایش مقاومت حرارتی می‌گردد، که کاربرد این پوشش‌ها را در لوله‌های خنک‌کننده محدود می‌نماید. چالش دیگر در بکارگیری پوشش‌های پلیمری، چسبندگی بین یک بستر و فیلم نازک است که بر استحکام و دوام پوشش پلیمری تاثیرگذار است. یکی از روش‌های افزایش چسبندگی استفاده از مواد یا روش اتصال مناسب بین فیلم پلیمری نازک و بستر بوده، تا مقاومت حرارتی آنها کاهش و

اکسیدهای خاکی کمیاب در مقایسه با پوشش‌های فلزات نجیب هزینه کمتری دارند [۶۰] و از طرفی هدایت حرارتی آنها تقریباً ۵۰ برابر بیشتر از فلوروپلیمرها است [۶۰]. پژوهش‌ها در زمینه انتقال حرارت بر روی پوشش‌های اکسیدهای خاکی کمیاب به صورت محدود انجام شده است و این مورد می‌تواند یکی از موانع برای استفاده از این دسته از مواد در کاربردهای صنعتی باشد [۶۱]. سطوح فوق‌آب‌گریز با استفاده از اکسیدهای خاکی کمیاب را می‌توان با استفاده از سایش لیزری<sup>۱</sup>، پاشش [۶۲]، فرآیند کلونیدی، فیلم نازک<sup>۲</sup> و رسوبدهی لایه به لایه روی [۶۳] یک بستر ایجاد کرد [۵۸]. در چندین پژوهش زوایای تماس بالا برای قطرات آب بر روی سطوح اکسیدهای خاکی کمیاب [۶۵-۶۳]، مقاومت در برابر سایش بالاتر از آلومینیم [۵۸] و پایداری حرارتی بالاتر از سطح سیلان ذکر شده است [۵۸، ۶۶]. در پژوهشی در این زمینه شیم و همکارانش [۶۶] یک پوشش CeO با ضخامت کمتر از ۲۰۰ نانومتر بر روی سطوح مس، آلومینیم و فولاد توسط فرآیند شیمیایی تر تک‌مرحله‌ای<sup>۳</sup> ایجاد کردند. این فرآیند منجر به تشکیل سطوح فوق‌آب‌گریز با پسماند زاویه تماس کمتر از ۵ درجه شد. در پژوهشی دیگر عظیمی و همکارانش [۶۷] با استفاده از لیزر پوشش‌های اکسیدهای خاکی کمیاب را برای تولید سطوح فوق‌آب‌گریز بر روی

<sup>1</sup> Laser Ablation

<sup>2</sup> Thin Film

<sup>3</sup> One-Step Wet Chemical Process



علاوه بر جنس پوشش و زیرلایه و ضخامت پوشش، روش پوشش‌دهی نیز بر دوام و کارایی پوشش‌های پلیمری موثر است. به‌عنوان مثال، در پژوهشی ما<sup>۱</sup> و همکارانش [۶۸] شرایط پردازش سطح را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش کاشت یون<sup>۲</sup> به همراه پرتو یونی<sup>۳</sup>، پوشش فیلم‌های پلی تترافلورواتیلن را بر لوله‌های از جنس مس، برنج، فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی با روش‌های مختلف پردازش سطحی اعمال نمودند. نتایج نشان داد که شرایط پردازش سطحی نقش مهمی در چسبندگی یک لایه پلیمری به زیرلایه و تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی آن دارد. همچنین در پژوهش مدنظر ذکر شده است که شرایط بهینه پردازش برای زیرلایه‌های مختلف متفاوت بوده است. به عنوان نمونه با توجه به شرایط پردازش، هدایت حرارتی زیرلایه‌ی برنجی که با پلی‌تترا فلورواتیلن پوشش داده شده در مقایسه با سطح برنجی که پوشش داده نشده در بازه ۱/۶ تا ۲۸/۶ برابر است. در پژوهشی دیگر که توسط جی‌ای<sup>۴</sup> و همکارانش [۷۲] انجام شد، سطوح هیبریدی فوق‌آبدوست-فوق‌آب‌گریز برای بررسی انتقال حرارت چگالش قطره‌ای بر روی زیرلایه فولاد زنگ نزن تولید شد. سطح آب‌گریز با پوشش فلوروکربن با استفاده از پلی تترافلورواتیلن (PTFE) به عنوان زمینه و نانو سیلیس آب‌گریز به عنوان عامل زبری سطح مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش سه نوع سطح فوق‌آبدوست-فوق‌آب‌گریز مورد بررسی قرار گرفت. سطح فوق‌آبدوست که یک سطح صاف می‌باشد، از آماده سازی سطح توسط سمباده حاصل گشته است. در سطح فوق‌آب‌گریز نیز پس از آماده‌سازی سطح، محلول فلوروکربن توسط محلول سیکلوهاگزان رقیق شده و سپس نانو ذرات سیلیس به آن اضافه شده است. برای ایجاد سطوح فوق‌آب‌گریز، فوق‌آبدوست نیز شیارهای با ابعاد مشخص بر روی سطح فوق‌آبدوست اعمال شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سطح هیبریدی فوق‌آبدوست-فوق‌آب‌گریز قطر قطرات میعان را کنترل کرده و عملکرد انتقال حرارت چگالش آن بهتر از سطوح آبدوست و آب‌گریز است. شایان ذکر است، سطح فوق‌آبدوست-فوق‌آب‌گریز قطر قطرات را در زمان مناسب جمع‌آوری نموده و رشد قطرات بزرگ ناشی از چگالش را از طریق شیارهای فوق‌آبدوست محدود کرده است.

در این پژوهش همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد قطر قطرات طی یک چرخه بر سطح فوق‌آبدوست تشکیل شده و جدا می‌گردند. در زمان شروع، قطرات بزرگ به تازگی جدا شده و جای خالی جدیدی برای تشکیل و رشد قطرات باقی می‌گذارند. سپس با گذشت زمان، قطرات جدید به تدریج رشد کرده و در سطح ادغام می‌گردند. جهت کاهش قطر قطرات و کوتاه کردن چرخه جدا شدن قطرات، ویژگی‌های ترشوندگی قطرات بر روی سطح فوق‌آبدوست مورد استفاده قرار می‌گیرد.

<sup>1</sup> Ma

<sup>2</sup> Ion Implantation

<sup>3</sup> Ion Beam

<sup>4</sup> Ji

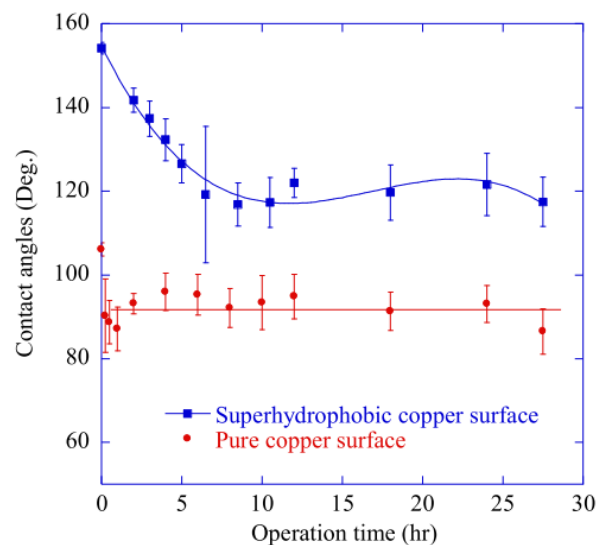
ظرفیت انتقال حرارت آنها افزایش یابد [۱۵]. در جدول ۳ میزان هدایت حرارتی برخی از پوشش‌های پلیمری مختلف در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفته است [۷۰].

مانگ و همکارانش [۷۱] در پژوهشی عملکرد چگالش قطره‌ای را بر روی یک سطح مس خالص و سطح مس پوشش داده شده به روش پوشش دورانی با پلیمر فلئور سیلان مورد بررسی قرار دادند. مشخص گردید، زاویه تماس قطرات آب بر روی سطح مس خالص ۱۰۶/۱۷ درجه و زاویه تماس قطرات آب بر روی سطح مس پوشش داده شده با پلیمر فلئور سیلان ۱۵۳/۴۳ می‌باشد. همچنین نتایج بررسی پایداری عملکرد دو پوشش حاصل از چگالش مداوم بخار آب (شکل ۸) نشان می‌دهد، میزان پایداری عملکرد سطح مس در مدت زمان کوتاهی به طور چشم‌گیری کاهش یافته و سپس تقریباً زاویه تماس سطح یکسان می‌گردد. اما در پوشش فلئورسیلان به طور مداوم با گذشت زمان عملکرد آب‌گریزی پوشش کاهش می‌یابد.

جدول ۳: میزان هدایت حرارتی پلیمرها [۷۰].

Table 3: Thermal conductivity of polymers [70].

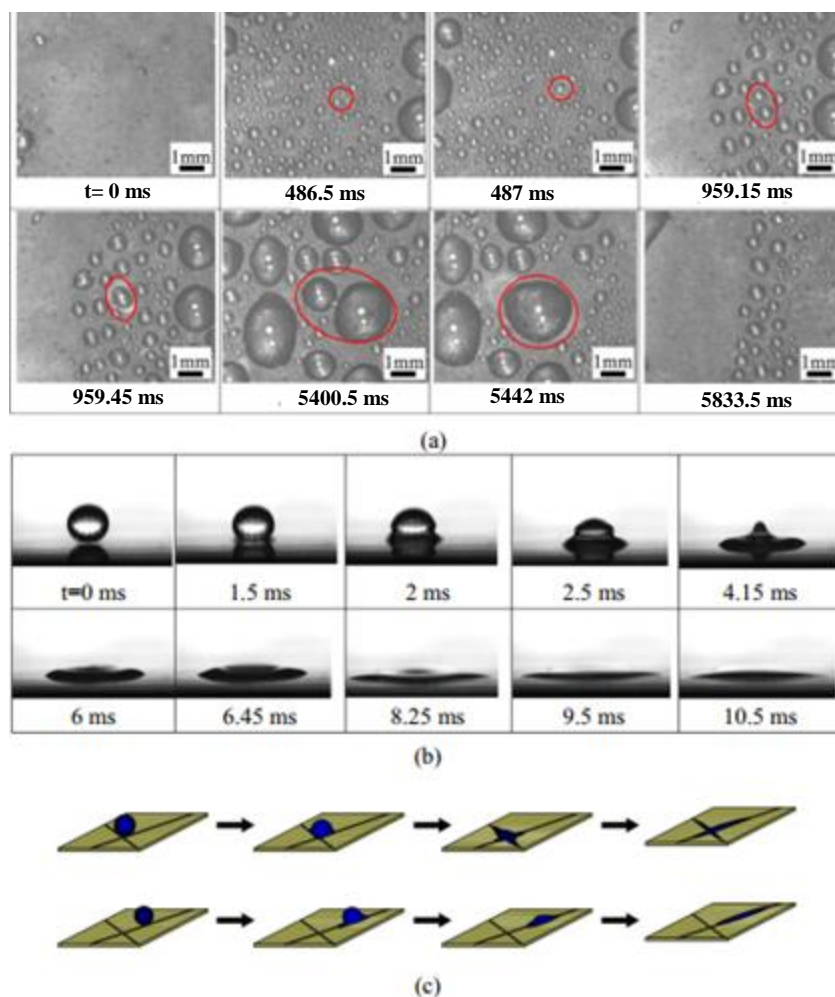
Material	Thermal Conductivity at 25°C (W/m K)	Material	Thermal Conductivity at 25°C (W/m K)
Polyvinylidene difluoride (PVDF)	0.19	Polypropylene (PP)	0.11
Polyvinyl chloride (PVC)	0.19	Polymethylmethacrylate (PMMA)	0.21
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.27	Poly(dimethylsiloxane) (PDMS)	0.25
Polysulfone (PSU)	0.22	Polycarbonate (PC)	0.20
Polystyrene (PS)	0.14	Epoxy resin	0.19



شکل ۸: تاثیر چگالش مداوم بخار آب بر روی سطح نمونه‌ی مس خالص و

سطح فوق‌آب‌گریز مس پوشش داده شده با فلئورسیلان [۷۱].

Figure 8: The effect of continuous condensation of water vapor on the surface of the pure copper sample and the superhydrophobic surface of copper coated with fluorosilane [71].



شکل ۹: (a) رشد و حرکت قطرات بر روی سطح فوق آب‌گریز، (b) رشد و حرکت قطرات بر روی سطح فوق آب‌دوست، (c) طرح‌واره رشد و حرکت قطرات بر روی سطح فوق آب‌دوست - فوق آب‌گریز [۷۲].

Figure 9: a) Droplet growth and movement on a superhydrophobic surface, b) Droplet growth and movement on a superhydrophilic surface, c) Schematic of droplet growth and movement on a superhydrophilic-superhydrophobic surface [72].

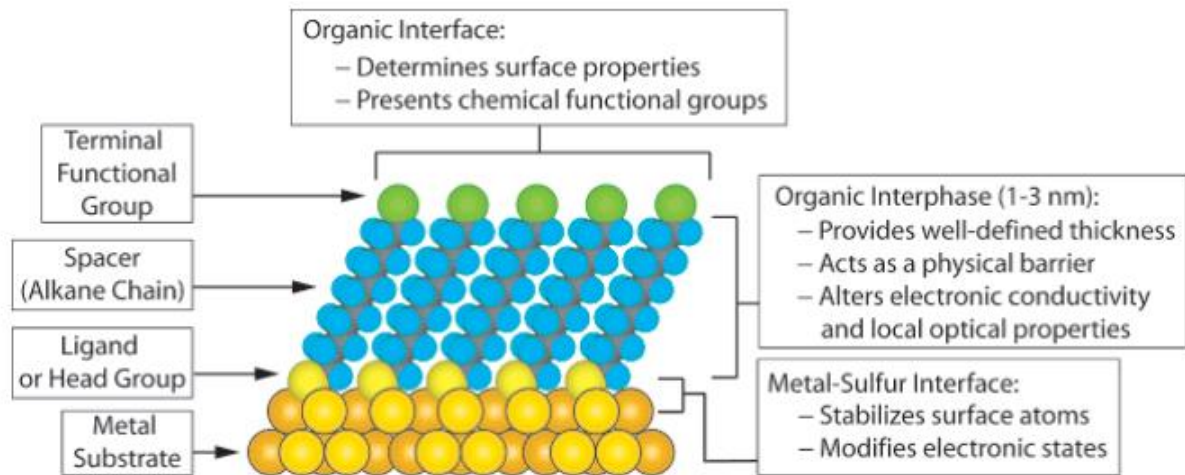
متشکل از مولکول‌های منفرد با دم‌های آب‌گریز می‌باشند که یک سمت آن با سطحی که چگالش بر روی آن رخ می‌دهد در تعامل بوده و با پیوند شیمیایی با سطح مذکور واکنش می‌دهد و سمت دیگر آن لیگاندی است که به میعانات متصل شده، انرژی سطحی کمی دارد و موجب کاهش ترشوندگی می‌گردد [۷۴، ۸]. در شکل ۱۰ طرح‌واره یک پوشش تک لایه خود به خودی بر روی سطح طلا نشان داده شده است [۷۵].

سطح متراکم پوشش‌های تک‌لایه خود به خودی در مقایسه با سایر پوشش‌های آب‌گریز مانند تفلون، به علت ضخامت کم، مقاومت حرارتی ناچیزی دارند. پوشش‌های تک لایه خود به خودی دوام چندانی ندارد و پس از گذشت مدت زمان کوتاهی از روی سطح جدا می‌شود. همچنین این نوع پوشش‌ها پایداری حرارتی ندارند و با گذشت زمان توانایی انتقال حرارت آنها کاهش پیدا می‌کند [۱۵].

وقتی بخار چگالش می‌یابد و قطرات در ناحیه آب‌گریز تشکیل می‌گردد، قطرات رشد کرده، ادغام گردیده و به سمت شیارهای فوق‌آب‌دوست حرکت نموده‌اند. هنگامی که قطرات با شیارهای فوق‌آب‌دوست تماس پیدا کرده‌اند، به سرعت توسط شیارهای فوق‌آب‌دوست کشیده شده و سپس در مدت زمان بسیار کوتاهی در شیار پخش می‌گردند. که این موضوع سبب می‌گردد قطرات خیلی بزرگ نشده و برای افزایش انتقال حرارت چگالش مفید بوده باشند [۷۲].

#### ۴-۴- پوشش‌های تک‌لایه خود به خودی

پوشش‌های تک‌لایه خود به خودی نوعی از پوشش‌ها می‌باشند که توانایی تشکیل پوشش‌هایی با ضخامت مولکولی جداگانه روی یک زیرلایه را دارند [۷۳]. پوشش‌های تک‌لایه خود به خودی در واقع



شکل ۱۰: طرح‌واره یک پوشش تک لایه خود به خودی بر روی سطح طلا [۷۵].

Figure 10: Schematic diagram of a self-assembled monolayers coating on a gold surface [75].

• ترشوندگی موضعی ضعیف سطح توسط محلول سیلان- حلال در طی فرآیند پوشش. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است گرادیان دما و فشار بین بخار و زیرلایه در طول چگالش بخار آب، آب را به سطح مشترک پوشش-زیرلایه هدایت می‌کند، که منجر به نفوذ بخار آب در مناطقی از پوشش که انرژی سطحی بالایی، به دلیل نقص ساختاری دارند، می‌گردد. این موضوع سبب می‌گردد آب پیوندهای سیلیس-اکسیژن-سیلیس را حل کرده و آبکافت نماید. در شکل ۱۲ طرح‌واره مولکول‌های سیلان روی یک بستر سیلیکونی در سه حالت نشان داده شده است. حالت اول یک حالت ایده‌آل است، که پوشش تک‌لایه خود به خودی به طور کامل به زیرلایه متصل است. حالت دوم پوشش تهیه شده در یک محیط کنترل شده و حالت سوم پوشش تهیه شده در یک محیط کنترل نشده است. هرچند پوشش ایده‌آل از نظر کاهش تخریب مناسب است، اما به دلیل جهت‌گیری خاصی که تمام مولکول‌های سیلان در طول آبکافت و هیدروکسیل/سیلانول سطحی دارد، بعید می‌باشد که در واقعیت این حالت رخ بدهد. فرآیندهای پیوند در حالت ایده‌آل کاملاً صاف و بدون تجمع می‌باشد و از این رو زاویه تماس پسماند به دلیل مطابقت آب‌گریزی سطح و جهت‌گیری گروه دم آنها صفر می‌باشد. در حالت دوم حداقل تخریب‌ها به دلیل جهت‌گیری تصادفی پوشش‌های تک لایه خود به خودی ایجاد می‌گردد، این حالت به ایجاد یک پوشش یکنواخت‌تر با زاویه تماس پسماند کمتر کمک می‌کند. در حالت سوم که در یک محیط پوشش کنترل نشده است، عیوب سطح بدون پوشش و تجمع مولکول سیلان به هم پیوسته، منجر به تشکیل پوشش چند لایه به جای پوشش تک‌لایه می‌شود. در نتیجه زبری سطح افزایش یافته و زاویه تماس پسماند بزرگ‌تر می‌گردد [۷۹].

به عنوان نمونه پوشش n اکتا دسیل مرکاپتان<sup>۱</sup> بر روی زیرلایه بیش از ۵۰۰ ساعت دوام نداشته و از روی سطح جدا می‌گردد. از طرفی به علت اینکه ضخامت پوشش‌های تک‌لایه خود به خودی حدوداً ۱ نانومتر است، با تخریب قسمتی از این پوشش‌ها، هدایت حرارتی تغییر فاز آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، در کاربردهای صنعتی بایستی استحکام و دوام این نوع پوشش‌ها افزایش یابد [۷۶]. سیلان‌ها و تیول‌ها دو مورد از رایج‌ترین پوشش‌های تک لایه خود به خودی می‌باشند [۷۷]. تیول‌ها در مقایسه با سیلان‌ها، پایداری کمتری دارند [۷۵]، زیرا سیلان‌ها با سطح پیوند کووالانسی تشکیل می‌دهند [۷۸]. تیول‌ها هنگامی که در معرض شرایط محیطی یا پرتو فرابنفش قرار می‌گیرند، تمایل به اکسیدشدن دارند و به دی سولفیدها و سولفونات‌ها تبدیل می‌شوند و در نتیجه به راحتی با حلال‌های قطبی از سطح پاک می‌شوند [۷۵]. همچنین تیول‌ها نیز از نظر حرارتی پایداری کمتری نسبت به سیلان‌ها دارند [۷۷].

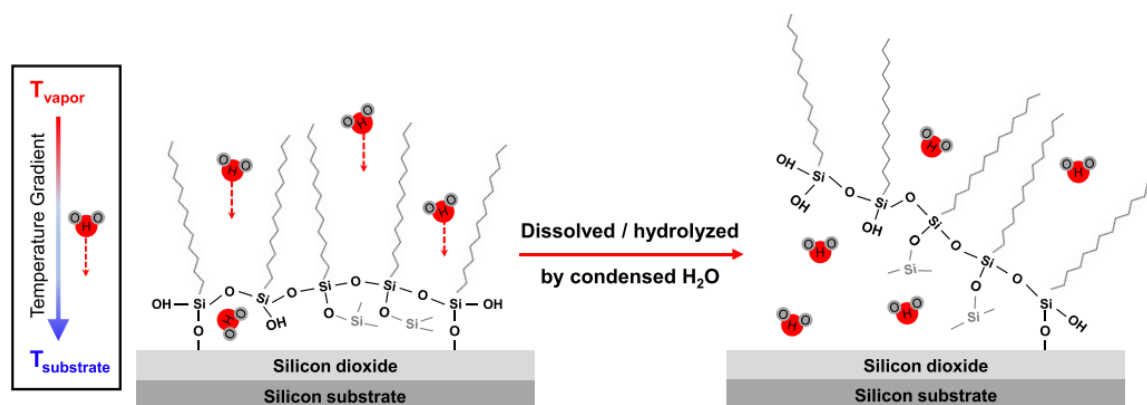
در سال ۲۰۲۱ وانگ<sup>۲</sup> و همکارانش [۷۹] فرضیه‌ای از سازوکار تخریب پوشش تک لایه خود به خودی سیلان به واسطه چگالش بخار آب ارائه نموده و فرضیه خود را از طریق قرار دادن انواع مختلف پوشش‌های تک لایه خود به خودی در شرایط محیطی دارای رطوبت و بدون رطوبت تایید کردند. فرضیه سازوکار تخریب از طریق بررسی پیوندهای مولکولی و برهم‌کنش‌ها در سطح مشترک پوشش-زیرلایه مورد تایید قرار گرفت. تخریب پوشش تک لایه خود به خودی بنا بر دو پدیده زیر می‌تواند رخ دهد:

- اتصال عرضی مولکول‌های سیلان و تجمع<sup>۳</sup> آنها در سطح.

<sup>1</sup> n-octadecyl mercaptan

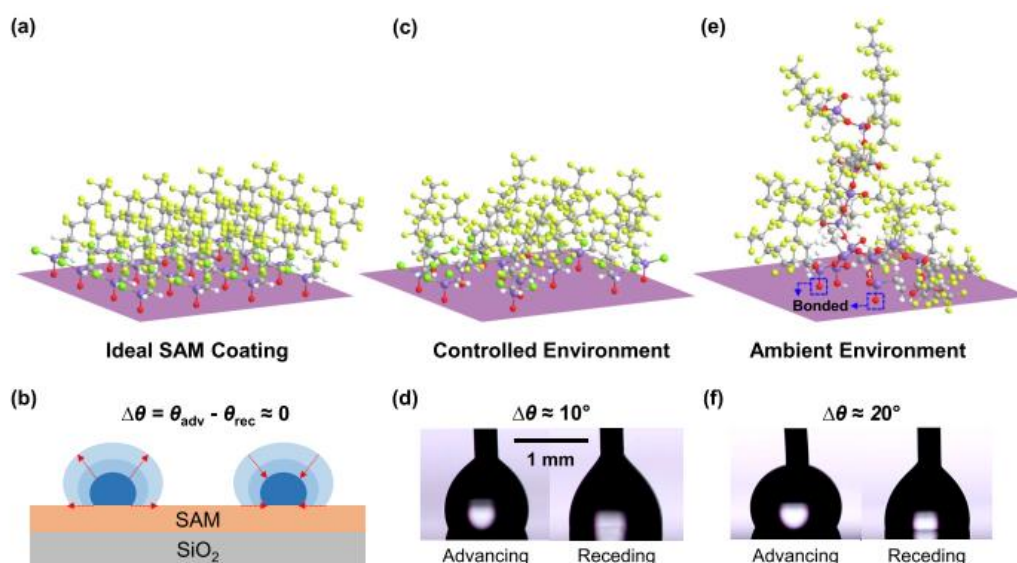
<sup>2</sup>Wang

<sup>3</sup> Agglomerate



شکل ۱۱: طرح‌واره فرآیند تخریب یک پوشش تک لایه خودبه خودی در طی چگالش بخار آب [۷۹].

Figure 11: Schematic of the process of destruction of self-assembled monolayer coating during the condensation of water vapor [79].



شکل ۱۲: طرح‌واره جهت‌گیری مولکول‌های سیلان به همراه زوایای تماس پیشروی<sup>۱</sup> و پسرفت<sup>۲</sup> مربوطه برای (a, b) حالت ایده‌آل، (c, d) پوشش تهیه شده در یک محیط کنترل شده و (e, f) پوشش تهیه شده در یک محیط کنترل نشده [۷۹].

Figure 12: Schematic of the orientation of silane molecules along with the corresponding advancing and receding contact angles for (a, b) ideal state, (c, d) coating prepared in a controlled environment and (e, f) coating prepared in an uncontrolled ambient environment [79].

بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۱۳ در این پژوهش از یک پوشش گرافن نازک تک لایه بر روی بستر مس خالص ۹۹/۹۹ درصد به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار<sup>۳</sup> در دو حالت اتمسفر و فشار کم، استفاده شد. نتایج نشان داد، حضور پوشش فوق سبب افزایش بازده انتقال حرارت ۴ برابری نسبت به حالت چگالش فیلم آب شده است، همچنین چگالش قطره‌ای آب رخ داده است. نتایج حاصل از زاویه تماس در این پژوهش همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، بیانگر میانگین زاویه تماس پیشروی/پسرفتی برای گرافن در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار کم و فشار اتمسفر به ترتیب برابر ۶۴/۸۷ درجه و ۵۶/۹۳ درجه بوده است.

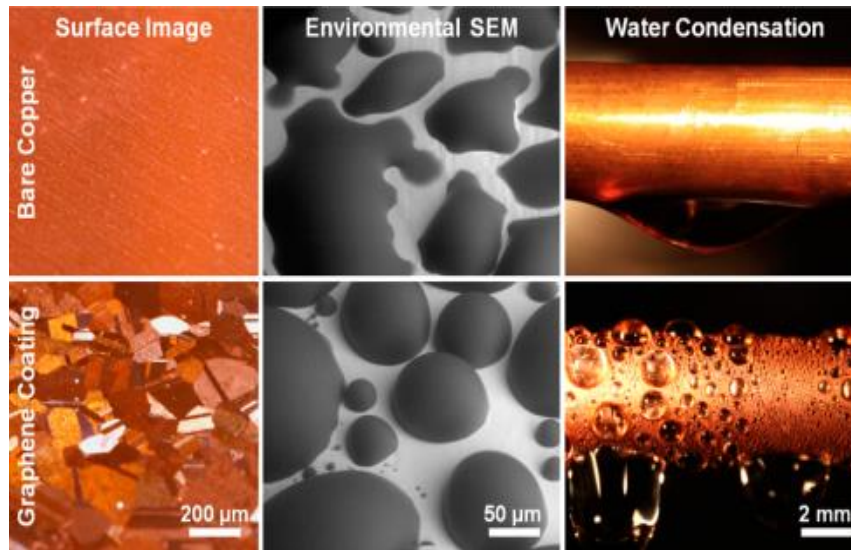
#### ۴-۵- گرافن، نانو لوله کربن، سطوح نانو ساختار

امروزه گرافن، نانولوله‌های کربنی و سایر سطوح نانوساختار برای کاربردهای مختلف انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸۰]. گرافن یک ماده دوبعدی متشکل از اتم‌های کربن است، که در یک شش ضلعی قرار گرفته [۸۱] و خواص منحصر به فرد مکانیکی، الکتریکی و حرارتی دارد [۸۲]. از گرافن به دلیل توانایی آن در بهبود هدایت حرارتی، در کاربردهای مدیریت حرارتی پوشش نیز استفاده می‌گردد [۸۳]. در پژوهشی توسط پرستون و همکارانش [۱۹] کاربرد گرافن برای ایجاد چگالش قطره‌ای آب و افزایش انتقال حرارت مورد

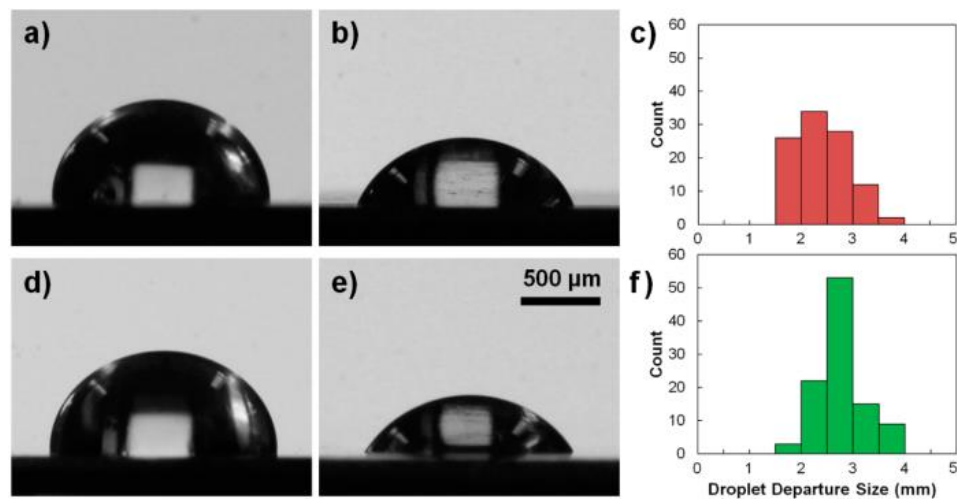
<sup>۱</sup> Advancing Angle

<sup>۲</sup> Receding Angle

<sup>۳</sup> Chemical Vapor Deposition (CVD)



شکل ۱۳: چگالش قطره‌ای و چگالش فیلم‌آب بر روی لوله خنک‌کننده مسی [۱۹].  
**Figure 13:** Dropwise condensation and film-wise condensation on copper condenser tube [19].



شکل ۱۴: تصویر زاویه تماس (a) پیشروی (b) پسرفتی برای گرافن در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار کم، (c) هیستوگرام اندازه خروج قطرات در طی چگالش آب بر روی گرافن در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار کم، تصویر زاویه تماس، (d) پیشروی، (e) پسرفتی برای گرافن در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار اتمسفر، (f) اندازه خروج قطرات در طی چگالش آب بر روی گرافن در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار اتمسفر [۱۹].

**Figure 14:** Contact angle image a) advance b) receding for graphene in the state of chemical deposition at low vapor pressure, c) histogram of droplet departure size during condensation of water on graphene state of chemical deposition at low vapor pressure, image of contact angle d) advance e) receding for graphene in the state of chemical deposition at atmospheric vapor pressure, f) departure size during condensation of water on graphene state of chemical deposition at atmospheric vapor pressure [19].

شیمیایی در فشار بخار اتمسفر است. ضریب انتقال حرارت چگالش گرافن در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار کم، اندکی بیشتر از حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار اتمسفر است، چراکه اندازه خروج قطرات کوچک‌تر می‌باشد [۱۹].

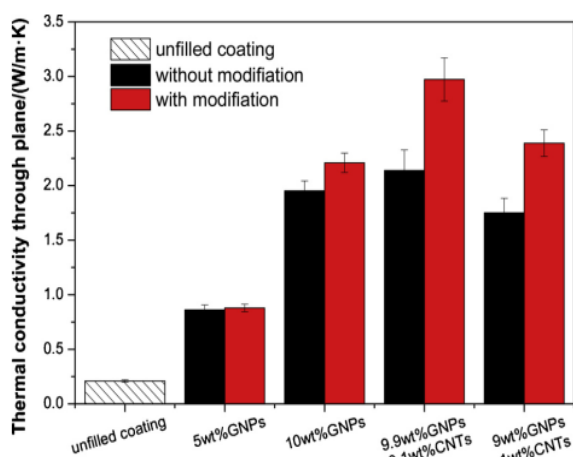
نانولوله کربن نیز همانند گرافن خواص حرارتی، الکتریکی و مکانیکی منحصر به فردی دارد، که سبب کاربرد زیاد آن شده است. به طور کلی نانولوله کربن را به دو دسته‌ی چند لایه و تک لایه

در قسمت c و f اندازه خروج قطرات در طی چگالش قطرات<sup>۱</sup> که به عنوان قطره‌ای که شروع به لغزش به سمت پایین دیواره خنک‌کننده می‌کند، نشان داده شده است. میانگین اندازه خروج قطرات ۲/۴ میلی‌متر در حالت رسوب‌دهی شیمیایی در فشار بخار کم و میانگین اندازه خروج قطرات ۲/۸ میلی‌متر در حالت رسوب‌دهی

<sup>1</sup> Droplet Departure Size During Water Condensation

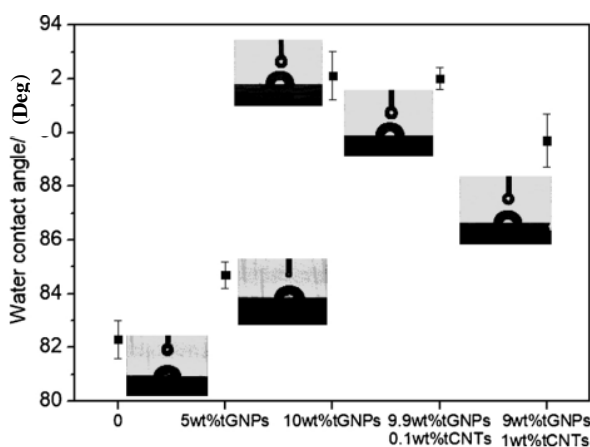
۲۰۲۰ کلاوسی و همکارانش [۸۹] پوشش نانو کامپوزیت زمینه پلیمری پلی‌وینیلیدین فلوراید با ذرات تقویت‌کننده نانو صفحه‌ی گرافن را با رسانایی حرارتی  $13 \text{ W/m.k}$  تولید نموده و با استفاده از دو روش پاشش و روش پرس گرم بر روی فویل و صفحات آلومینیم اعمال نمودند. نتایج نشان داد که گرافن بر انتقال حرارت و آب‌گریزی پلی‌وینیلیدین فلوراید تاثیر می‌گذارد.

در شکل ۱۷ نتایج حاصل از آزمایش زاویه تماس بر روی پوشش‌های حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانو صفحه‌ی گرافن بر مبنای دو روش متفاوت اعمال از طریق پاشش و روش پرس گرم نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نتایج حاصل از آزمایش اندازه‌گیری هدایت حرارتی در درصد‌های مختلف ترکیب نانو صفحه گرافن و نانو لوله کربن [۸۵].

Figure 15: The results of the thermal conductivity measurement in different percentages of graphene nanoplate and carbon nanotube composition [85].



شکل ۱۶: نتایج حاصل از آزمایش زاویه تماس در درصد‌های مختلف ترکیب نانو صفحه گرافن و نانو لوله کربن [۸۵].

Figure 16: The results of the contact angle test in different percentages of the combination of graphene nanoplate and carbon nanotube [85].

تقسیم می‌کنند. نانولوله کربن به دلیل رسانایی حرارتی بالا و ماهیت آب‌گریزی که دارد برای افزایش چگالش قطره‌ای به کار می‌رود [۱۸]. چن<sup>۱</sup> و همکارانش [۸۴] با ساخت یک بافت دولایه، مشاهده نمودند که ساختار تولید شده، چگالش قطره‌ای آب را حفظ می‌کند. بافت دو لایه متشکل از نانولوله کربن و سیلیس می‌باشد، که نانولوله کربن از طریق رسوبدهی شیمیایی بخار بر روی میکروستون‌های بستر سیلیس اچ شده است. در این فرآیند یک لایه نازک کرم و نیکل به عنوان کاتالیزور استفاده شده است.

شای<sup>۲</sup> و همکارانش [۸۵] در پژوهشی از نانو لوله کربن و نانو صفحه‌ی گرافن برای افزایش هدایت حرارتی و آب‌گریزی رزین اکریلیک اصلاح شده توسط سیلیکون استفاده نمودند. نتایج حاصل از آزمایش اندازه‌گیری هدایت حرارتی و آب‌گریزی حاصل در درصد‌های مختلف ترکیب نانو صفحه گرافن و نانو لوله کربن در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.

نتایج حاصل نشان می‌دهد، به دلیل شکل‌گیری ریخت لانه زنبوری با اتصال نانو لوله کربن به نانو صفحات گرافن، بهترین انتقال حرارت در ترکیب ۹/۹ درصد وزنی و ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربن رخ می‌دهد. همچنین بهترین میزان آب‌گریزی مربوط به پوشش ساخته شده با ۱۰ درصد وزنی صفحات گرافن می‌باشد. افزایش زاویه تماس با استفاده از گرافن و نانو لوله کربن نسبت به پوشش خالص، به افزایش زبری سطح و کاهش انرژی سطح نسبت داده شده است [۸۵].

در پژوهشی دیگر رئوفی و همکارانش [۸۶] پودر سیلیکا ایزوژل<sup>۳</sup> را به همراه یک ماده‌ی فعال سطحی آنیونی<sup>۴</sup> و دو ماده‌ی فعال سطحی غیریونی<sup>۵</sup> با غلظت‌های مختلف به عنوان عامل ترشوندگی پودر سیلیکا ایزوژل استفاده کردند. پس از انجام آزمایش زاویه تماس بر روی نمونه‌های ساخته شده، آنها به تاثیر استفاده از ماده‌ی فعال سطحی آنیونی در برابر استفاده از ماده‌ی فعال سطحی غیریونی در کاهش زاویه تماس بر روی پودرهای سیلیکا پی بردند.

#### ۴-۶- کامپوزیت‌ها

امروزه با توجه به مزایا و معایبی که هر دسته از پوشش‌های مورد استفاده در لوله‌های خنک‌کننده دارند، پژوهشگران به سراغ ساخت و بررسی پوشش‌های کامپوزیتی رفته‌اند. پوشش‌های کامپوزیتی براساس نوع زمینه‌ای که دارند به سه دسته پلیمری، فلزی و سرامیکی تقسیم می‌گردند. در بین این سه دسته، پوشش‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری به علت روش ساخت، نحوه اعمال آسان‌تر و هزینه کمتر در لوله‌های خنک‌کننده بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸۷، ۸۸]. در سال

<sup>1</sup> Chen

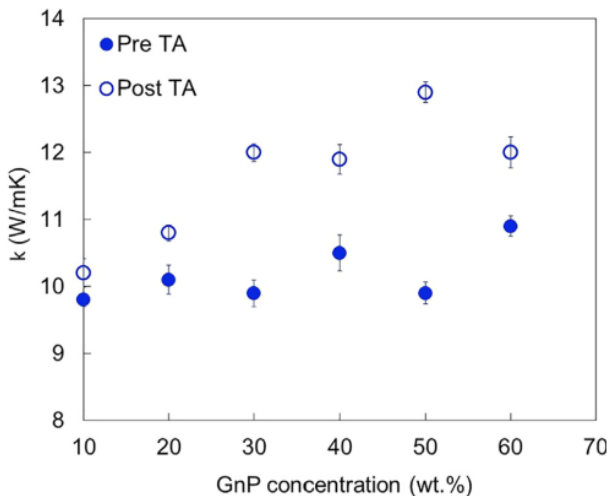
<sup>2</sup> Shi

<sup>3</sup> Silica Aerogel Powder

<sup>4</sup> Anionic Surfactant

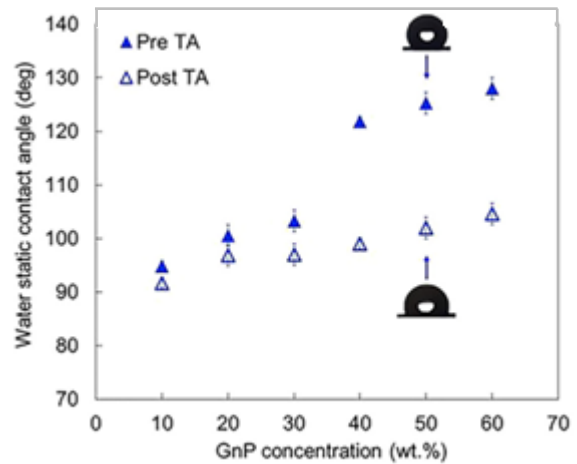
<sup>5</sup> Non-ionic Surfactants

اندازه‌گیری دقیق تغییر رفتار انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت<sup>۳</sup> پوشش در طیف وسیعی از دما و سرعت بخار آب، با دو محفظه حاوی فشار بخار اشباع زیر اتمسفر ۳۰ میلی بار (نزدیک به شرایط واقعی خنک‌کننده) و دیگری در فشار اشباع بخار بالاتر از اتمسفر ۱/۴۲ بار اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت پوشش کامپوزیتی پلی تترافلورواتیلن با تقویت کننده نانو الیاف کربن نسبت به پوشش پلی تترافلورواتیلن و سطح بدون پوشش در فشار بخار زیر اتمسفر ۳۰ میلی بار در شکل ۱۹ مقایسه شده است. مورد فوق نشان دهنده بهبود شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت پوشش کامپوزیتی نسب به دو حالت ذکر شده است [۱۷]. نتایج مشابهی برای حالت دیگر فشار بخار، حاکی از رفتار بهتر کامپوزیت در مقایسه با زمینه خالص و سطح بدون پوشش می‌باشد. همچنین جهت بررسی دوام عملکردی آب‌گریزی پوشش کامپوزیتی پلی تترافلورواتیلن با تقویت کننده نانو الیاف کربن، پوشش مذکور به مدت ۷۲ ساعت در معرض فشار اشباع بخار بالاتر از ۱/۴۲ بار و دمای ۱۱۱ درجه سانتی‌گراد و جریان ۳ متر بر ثانیه قرار گرفت. همانطور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌گردد، در ۱۰ ساعت اول حالت چگالش قطره‌ای وجود دارد و پس از ۱۰ ساعت اگرچه همچنان چگالش قطره‌ای مشاهده می‌شود، اما اندازه متوسط قطر قطرات آب افزایش می‌یابد.



شکل ۱۸: میزان هدایت حرارتی پوشش‌های حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانو صفحه‌ی گرافن در حالت پاشش (Pre TA) و در حالت پرس گرم (Post TA) [۸۹].

**Figure 18:** The thermal conductivity of coatings containing different weight percentages of graphene nanosheets in spray mode (Pre TA) and in hot press mode (Post TA) [89].



شکل ۱۷: نتایج آزمایش زاویه تماس بر روی پوشش‌های حاوی درصد‌های وزنی مختلف نانو صفحه‌ی گرافن در حالت اعمال به روش پاشش و حالت اعمال به روش پرس گرم [۸۹].

**Figure 17:** Contact angle test results on coatings containing different weight percentages of graphene nanosheets in the application mode using the spray method and the application mode using the hot press method [89].

زاویه تماس پلی وینیلیدین فلوراید بعد از پرس گرم ۹۵ درجه اندازه‌گیری شده است. با افزایش درصد وزنی نانو صفحات گرافن از ۱۰ درصد وزنی به ۶۰ درصد وزنی، زاویه تماس آب از ۹۳ درجه به حدود ۱۲۵ درجه افزایش داشته است. همچنین با انجام عملیات پرس گرم، زاویه تماس آب در غلظت ۶۰ درصد وزنی نانو صفحه گرافن به ۱۰۵ درجه کاهش یافته است.

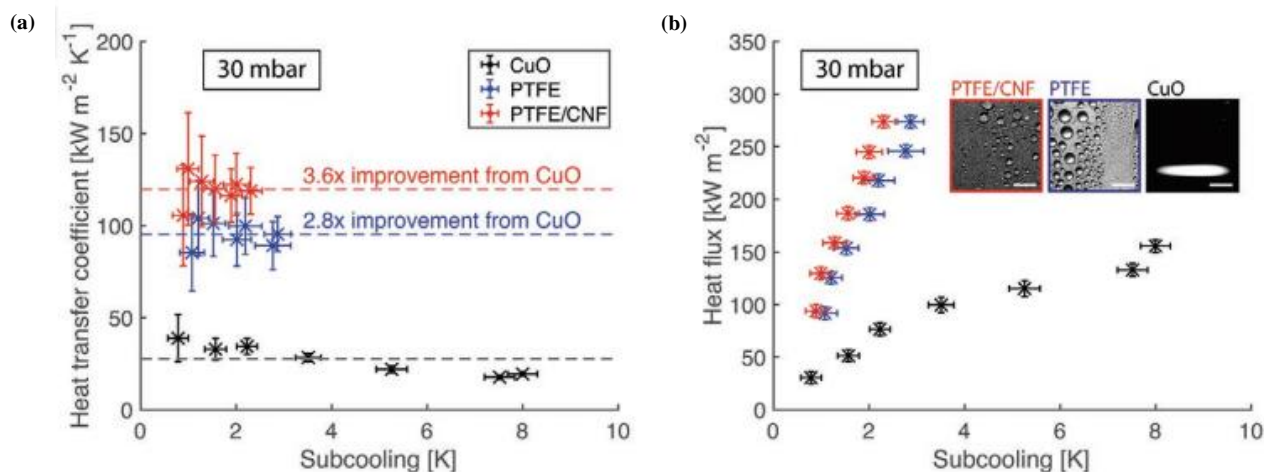
همچنین همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌گردد، بعد از عملیات پرس گرم هدایت حرارتی پوشش نانو کامپوزیتی افزایش یافته است، چراکه که پرس گرم سبب بهبود نقاط تماس بین صفحات گرافن گردیده است [۸۹].

در پژوهشی دیگر کامپوزیت زمینه پلیمری پلی تترافلورواتیلن با جزء تقویت کننده نانو الیاف کربن، با ضخامت ۲ میکرومتر بر روی لوله‌های خنک‌کننده از جنس مس اعمال گردید. همچنین قبل از اعمال پوشش، لایه‌ی از جنس آلومینیم به عنوان یک لایه اولیه<sup>۱</sup> ضخیم برای بهبود چسبندگی پوشش بر زیر لایه مس اضافه گردیده و سپس سوسپانسیون کامپوزیتی به روش پاشش بر روی سطح آلومینیم اعمال گردید [۱۷]. جهت جلوگیری از ایجاد ریخت پودری و شکننده پوشش از بازپخت دمایی<sup>۲</sup> در دمای ۴۰۰ درجه در محیط غنی از نیتروژن استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش زاویه تماس نشان داد، پوشش کامپوزیتی حاصل دارای زاویه تماس ۱۶۱ درجه می‌باشد، که نسبت به پوشش پلی تترافلورواتیلن که دارای زاویه تماس ۱۳۲/۶ درجه می‌باشد، آب‌گریزتر شده است. همچنین برای

<sup>1</sup> Primer

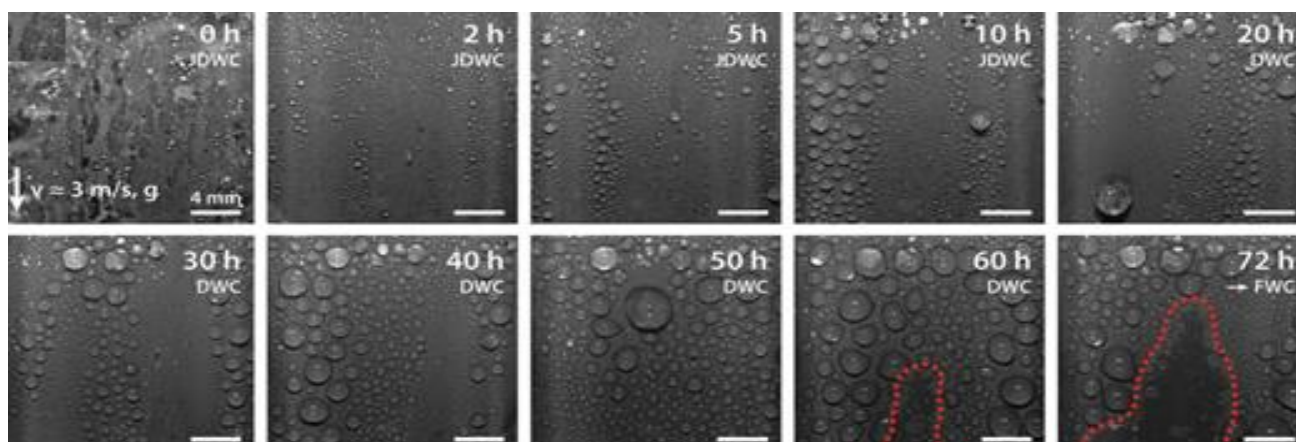
<sup>2</sup> Thermal annealing

<sup>3</sup> Heat transfer coefficient (HTC)



شکل ۱۹: میزان ضریب حرارت و انتقال شار حرارتی پوشش کامپوزیتی پلی تترافلورواتیلن با تقویت‌کننده نانو الیاف کربن نسبت به پوشش پلی تترافلورواتیلن و سطح بدون پوشش در فشار بخار زیر اتمسفر ۳۰ میلی بار [۱۷].

Figure 19: The amount of heat transfer coefficient and heat flux of the polytetrafluoroethylene composite coating with carbon nano fiber reinforcement compared to the polytetrafluoroethylene coating and the uncoated surface at a vapor pressure below the atmosphere of 30 millibars [17].



شکل ۲۰: نتایج حاصل از دوام عملکردی آب‌گریزی پوشش کامپوزیتی پلی تترافلورواتیلن با تقویت‌کننده نانو الیاف کربن، پوشش مذکور را به مدت ۷۲ ساعت در معرض فشار اشباع بخار بالاتر از ۱/۴۲ بار و دمای ۱۱۱ درجه سانتی‌گراد و جریان ۳ متر بر ثانیه [۱۷].

Figure 20: The results of the functional durability of the hydrophobic polytetrafluoroethylene composite coating with carbon nano fiber reinforcement, exposed the said coating for 72 hours to a vapor saturation pressure higher than 1.42 bar, a temperature of 111 °C, and a flow of 3 m/s [17].

در جدول ۴ به طور خلاصه پوشش‌های مختلفی که برای ایجاد چگالش قطره‌ای آب پیشنهاد شده، ذکر گردیده و مزایا و معایب هر یک بیان شده است.

پس از ۵۰ ساعت، در نهایت فیلم آب بر روی سطح پوشش ایجاد می‌شود، شایان ذکر است در تصویر، زمان ۶۰ ساعت این فیلم آب با خط چین قرمز نشان داده شده است. در ۷۲ ساعت خط چین مربوط به فیلم آب سطح پوشش بیشتر می‌گردد (شکل ۲۰)، که نشان از افت عملکرد آب‌گریزی پوشش کامپوزیتی حاصل با گذشت زمان می‌باشد. چنانچه امروزه یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که پوشش‌های آب‌گریز با آن روبه‌رو می‌باشند مسئله دوام عملکرد پوشش آب‌گریز با گذشت زمان است [۱۷].



جدول ۴: نواع پوشش‌های مختلف به کار رفته در لوله‌های خنک‌کننده به همراه مزایا و معایب آنها.  
**Table 4:** Types of different coatings used in condenser pipes with their advantages and disadvantages.

Type of Coating	Advantages	Disadvantages	Brief Description
Noble metals	Promotes dropwise condensation if hydrocarbon absorbed on the surface	High cost	Applied as a coating on the condensing surface
Rare earth oxides (REOs)	Intrinsically hydrophobic	Low thermal conductivity	Ceramic deposited on condensing surface
Polymers	Promote dropwise condensation, excellent heat transfer with thin coatings	Low durability for low thickness, low heat transfer for high thickness	Enable thin to thick coatings applied on condensing surfaces
Self-assembled monolayers (SAMs)	Low thermal resistance	Low durability for long time	~1-nm thick molecular film on condensing
Graphene, carbon nanotubes, nanostructure surfaces	High thermal conductivity and dropwise condensation	High cost	One of their coating methods is chemical vapor deposition.
Composite	The advantageous of composites depends on the type of the second phases used for reinforcing them. Some of the benefits are as follows; high droplet condensation, suitable heat transfer, durability and suitable adhesion.	In some cases, the manufacturing method is difficult and costly compared to other processes.	Most of the coatings used in this category are polymer based composite.

#### ۵- نتیجه گیری

در لوله‌های خنک‌کننده، چگالش به دو صورت چگالش قطره‌ای و چگالش فیلم آب صورت می‌گیرد. افزایش چگالش قطره‌ای آب در لوله‌های خنک‌کننده سبب کاهش مقاومت حرارتی، افزایش هدایت حرارتی و در نتیجه افزایش بازده انتقال حرارت خنک‌کننده می‌گردد. استفاده از پوشش‌هایی که انرژی سطحی پایینی دارند، یکی از رویکردهایی است که جهت ایجاد چگالش قطره‌ای بر روی لوله‌های خنک‌کننده به کار می‌رود. همانطور که در این مقاله نیز ذکر شد، پوشش‌های مختلفی برای افزایش چگالش قطره‌ای آب به جای تشکیل فیلم آب روی لوله‌های خنک‌کننده وجود دارد. در همه این پوشش‌ها با کاهش انرژی سطحی و افزایش زاویه تماس، چگالش قطره‌ای حاصل می‌شود.

#### تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از بخش مروری بر منابع یک پروژه دانشجویی در مقطع کارشناسی ارشد می‌باشد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از پژوهشگاه رنگ، به جهت در اختیار قرار دادن امکانات لازم جهت انجام پایان نامه کارشناسی ارشد فوق، تشکر و قدردانی نمایند.

#### تعارض منافع

در این مقاله هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

#### ۶- مراجع

1. A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, J. Wie, "Advances in seawater desalination technologies", *Desalination*. 221,47-69, 2008.
2. K. Rykaczewski, H. J. Scott, S. Rajauria, J. Chinn, M. Chinn, "Three dimensional aspects of droplet coalescence during dropwise condensation on superhydrophobic surfaces", *Soft Matter*. 19, 8749-8752, 2011.
3. X. Chen, J. Wu, R. Ma, M. Hua, N. Koratkar, Sh. Yao, Z. Wang. "Nanograsped micropyramidal architectures for continuous dropwise condensation", *Adv. Funct. Mater.* 21, 4617-4623, 2011.
4. I. Tanasawa, "Advances in condensation heat transfer", *Adv. Heat Transf.* 21, 55-139, 1991.
5. Q. Zhao, B. M. Burnside, "Dropwise condensation of steam on

- ion implanted condenser surfaces", *Heat Recovery Syst. CHP.* 14, 525–534, **1994**.
6. C. A. Depew, R. L. Reisbig, "Vapor condensation on a horizontal tube using teflon to promote dropwise condensation", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 3, 365–369, **1964**.
  7. S. Lee, K. Cheng, V. Palmre, M.D.H.M Bhuiya, K. J. Kim, B. J. Zhang, "Heat transfer measurement during dropwise condensation using micro/nano-scale porous surface", *Int. J. Heat Mass Transfer.* 65, 619–626, **2013**.
  8. R. W. Bonner, "Dropwise condensation life testing of self assembled monolayers", 14th Int. Heat Transf. Conf. IHTC, 221–226, USA, 2010.
  9. A. Phadnis, K. Rykaczewski, "Dropwise condensation on soft hydrophobic coatings", *Langmuir.* 33, 43, 12095–12101, **2017**.
  10. A. Ullah, E. O. Alzahrani, Z. Shah, M. Ayaz, S. Islam, "Nanofluids thin film flow of Reiner-Philippoff fluid over an unstable stretching surface with Brownian motion and thermophoresis effects", *Coat.* 9, 1, **2018**.
  11. X. Zhao, X. Chen, Li. Zhang, Q. Liu, Y. Wang, W. Zhang, J. Zhang, "Preparation of nano-hydroxyapatite coated carbon nanotube reinforced hydroxyapatite composites", *Coat.* 8, 10, 8–10, **2018**.
  12. S. Zarei, H. R.T. Bahrami, H. Saffari, "Effects of geometry and dimension of micro/nano-structures on the heat transfer in dropwise condensation: A theoretical study", *Appl. Therm. Eng.* 137, 440–450, **2018**.
  13. R. A. Erb, "Dropwise condensation on gold - Improving heat transfer in steam condensers", *Gold Bulletin.* 6, 2–6, **1973**.
  14. S. Khan, "Hydrophobicity of rare-earth oxide ceramics and their application in promoting sustained dropwise condensation and corrosion and fouling mitigation in hydropower systems", B.A.Sc, University of Toronto. **2015**.
  15. R. Enright, N. Miljkovic, J. L. Alvarado, K. Kim, J. W. Rose, "Dropwise condensation on micro-and nanostructured surfaces", *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* 18, 3, 223–250, **2014**.
  16. G. Pang, J. D. Dale, D. Y. Kwok, "An integrated study of dropwise condensation heat transfer on self-assembled organic surfaces through Fourier transform infra-red spectroscopy and ellipsometry", *Int. J. Heat Mass Transfer.* 48, 2, 307–316, **2005**.
  17. M. Donati, C.W.E. Lam, A. Milionis, Ch.Sh. Sharma, A. Tripathy, A. Zendeli, D. Poulidakos, "Sprayable Thin and Robust Carbon Nanofiber Composite Coating for Extreme Jumping Dropwise Condensation Performance", *Adv. Mater. Interfaces.* 8, 2001176, **2020**.
  18. P. Kim, L. Shi, A. Majumdar, P. L. Mceuen, "Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes", *Phys. Rev. Lett.* 87, 215502-1-215502-4, **2001**.
  19. D. J. Preston, D. L. Mafra, N. Miljkovic, J. Kong, E. N. Wang, "Scalable graphene coatings for enhanced condensation heat transfer", *Nano Lett.* 5, 2902–2909, **2015**.
  20. U. Thiele and D. Que, "Wetting of textured surfaces", *Colloids Surf. A.* 206, 41–46, **2002**.
  21. N. Durand, D. Mariot, B. Am, B. Boutevin I. C. Gerhardt, "Tailored covalent grafting of hexafluoropropylene oxide oligomers onto silica nanoparticles: toward thermally stable, hydrophobic, and oleophobic nanocomposites", *Langmuir.* 27, 4057–4067, **2011**.
  22. X. Du and J. He, "A Self-templated etching route to surface-rough silica nanoparticles for superhydrophobic coatings", *ACS Appl. Mater Interfaces.* 3, 1269–1276, **2011**.
  23. S. S. Gh. Barati Darband, M. Aliofkhaezrai, S. Khorsand, Kaboli. "Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability", *Arabian J. Chem.* 13, 1763–1802, **2018**.
  24. W. Yue, H. Li, T. Xiang, H. Qin, S. Sun, "Grafting of zwitterion from polysulfone membrane via surface-initiated ATRP with enhanced antifouling property and biocompatibility", *J. Memb. Sci.* 446, 79–91, **2013**.
  25. I. Tlili, T. A. Alkanhal, "Nanotechnology for water purification: Electrospun nanofibrous membrane in water and wastewater treatment", *J. Water Reuse Desalin.* 9, 232–247, **2019**.
  26. M. Alwazzan, K. Egab, B. Peng, J. Khan, C. Li, "Condensation on hybrid-patterned copper tubes ( I ): characterization of condensation heat transfer", *Int. J. Heat Mass Transf.* 112, 991–1004, **2017**.
  27. D. Attinger, Ch. Frankiewicz, A.R. Betz, T. M. Schutzius, R. Ganguly, A. Das, "Surface engineering for phase change heat transfer: A review", *MRS Energy & Sustainability.* 1–40, **2014**.
  28. Th. Young, "*An essay on the cohesion of fluids*", Royal Society. 95, 523, **1805**.
  29. R. N. Wenzel, "Resistance of solid surfaces to wetting by water", *Ind. Eng. Chem.* 28, 988–994, 1936.
  30. A. B. D. Cassie, S. Baxter, "Wetting of porous surfaces", *Trans. Faraday Soc.* 40, 546–551, **1944**.
  31. A. Lafuma, D. Quéré, "Superhydrophobic states", *Nat. Mater.* 2, 457–460, **2003**.
  32. R. Xiao, N. Miljkovic, R. Enright, and E. N. Wang, "Immersion Condensation on Oil-Infused Heterogeneous Surfaces for Enhanced Heat Transfer", *Sci. Rep.* 3, **2013**.
  33. H. J. Butt, M. Kappl, "*Surface and Interfacial Forces*", 6th ed, Germany, WILEY-VCH, **2010**.
  34. S. Ebnesajjad, "*Surface Tension and Its Measurement, Adhesives Technology Handbook*", 21–36, 2009.
  35. K. K. Chawla, "*Composite Materials Science and Engineering*", 3rd ed, U.S.A, Springer, **2012**.
  36. Y. Yoon, D. Kim, J.-B. Lee, "Hierarchical micro/nano structures for super-hydrophobic surfaces and super-lyophobic surface against liquid metal", *Micro Nano Syst. Lett.* 2, 2-18, 2014.
  37. T. Onda, S. Shibuichi, N. Satoh, and K. Tsujii, "Super-water-repellent fractal surfaces", *Langmuir.* 12, 2125–2127, **1996**.
  38. M. Ma, R. M. Hill, "Superhydrophobic surfaces", *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 11, 193–202, **2006**.
  39. A. Irzh, L. Ghindes, A. Gedanken, "Rapid deposition of transparent super-hydrophobic layers on various surfaces using microwave plasma", *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 3, 4566–4572, **2011**.
  40. C. Oehr, "Plasma surface modification of polymers for biomedical use", *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 208, 40–47, **2003**.
  41. L.Y. Cui, H.P. Liu, W.L. Zhang, Z.Z. Han, M.X. Deng, R.Ch. Zeng, Sh. QiLi, Zh. Wang, "Corrosion resistance of a superhydrophobic micro-arc oxidation coating on Mg-4Li-1Ca alloy", *J. Mater. Sci. Technol.* 33, 1263-1271, **2017**.
  42. M. Guo, Z. Kang, W. Li, J. Zhang, "A facile approach to fabricate a stable superhydrophobic film with switchable water adhesion on titanium surface", *Surf. Coat. Technol.* 239, 227–232, **2014**.
  43. X. Chen, Y. Gong, D. Li, and H. Li, "Robust and easy-repairable superhydrophobic surfaces with multiple length-scale topography constructed by thermal spray route", *Colloids Surf. A.* 492, 19–25, **2016**.
  44. G. B. Gore, N. V Sali, A. B. 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, 291–294, Sangamne, **2016**.

45. G. M. Amit Goswami, C. Suresh, B. Pillai, "Surface modifications to enhance dropwise condensation", *Surf. Interfaces*, 25, 101143, **2021**.
46. A. Leipertz, A.P. Fröba, "Improvement of condensation heat transfer by surface modifications", *Heat Transfer Eng.* 29, 343–356, **2008**.
47. G. Koch, D. C. Zhang, A. Leipertz, "Condensation of steam on the surface of hard coated copper discs", *Heat Mass Transfer. und Stoffuebertragung*, 32, 3, 149–156, **1997**.
48. R. A. Erb, "Wettability of metals under continuous condensing conditions", *J. Phys. Chem.* 69, 1306–1309, **1965**.
49. K. Mori, N. Fujita, H. Horie, S. Mori, T. Miyashita, M. Matsuda, "Heat transfer promotion of an aluminum-brass cooling tube by surface treatment with triazinethiols", *Langmuir*, 7, 1161–1166, **1991**.
50. S. Wang, J. Zhang, X. Yu, Y. Zhang, "Condensed dewdrops self-ejecting on sprayable superhydrophobic CNT/SiO<sub>2</sub> composite coating", *RSC Adv.* 2, 27574–27577, **2017**.
51. K. M. Holden, A. S. Wanniarachchi, P. J. Marto, D. H. Boone, J. W. Rose, "The use of organic coatings to promote dropwise condensation of steam", *J. Heat Transfer*, 109, 768–774, **1987**.
52. D. G. Wilkins, L. A. Bromley, S. M. Read, "Dropwise and filmwise condensation of water vapor on gold", *AIChE J.* 19, 119–123, **1973**.
53. S. A. Khan, F. Tahir, A. A. B. Baloch, M. Koc, "Review of micro-nanoscale surface coatings application for sustaining dropwise condensation", *Coatings*, 9, 117–144, **2019**.
54. D. W. Woodruff, J. W. Westwater, "Steam Condensation on Various Gold Surfaces", *Am. Soc. Mech. Eng.* 103, 685–692, **1981**.
55. 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 CO<sub>2</sub>", *Exp. Therm Fluid Sci.* 92, 13–19, **2017**.
56. G. A. O'neill, J. W. Westwater, "Dropwise condensation of steam on electroplated silver surfaces", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27, 1539–1549, **1984**.
57. W. C. Bigelow, D. L. Pickett, W. A. Zisman, "Oleophobic monolayers. I. Films adsorbed from solution in non-polar liquids", *J. Colloid Sci.* 1, 513–538, **1946**.
58. G. Azimi, R. Dhiman, H. Kwon, A. T. Paxson, K. K. Varanasi, "Hydrophobicity of rare-earth oxide ceramics", *Nat. Mater.* 12, 315–320, **2013**.
59. S. Khan, G. Azimi, B. Yildiz, K. K. Varanasi, "Role of surface oxygen-to-metal ratio on the wettability of rare-earth oxides", *Appl. Phys. Lett.* 106, 061601, **2015**.
60. 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" *Appl. Phys. Lett.* 105, 0–5, **2014**.
61. R. Lundy, C. Byrne, J. Bogan, K. Nolan, M. N. Collins, E. Dalton, R. Enright, "Exploring the Role of Adsorption and Surface State on the Hydrophobicity of Rare Earth Oxides", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 13751–13760, **2017**.
62. S. Yasmeen, M.R. Khan, K. Park, Y. Cho, J.W. Choi, H. S. Moon, "Preparation of a hydrophobic cerium oxide nanoparticle coating with polymer binder via a facile solution route", *Ceram. Int.* 8, 12209–12215, **2020**.
63. F. Pedraza, S.A. Mahadik, B. Bouchaud, "Synthesis of ceria based superhydrophobic coating on Ni<sub>20</sub>Cr substrate via cathodic electrodeposition", *Phys. Chem. Chem. Phys.* 17, 31750–31757, **2015**.
64. K. Nakayama, T. Hiraga, C. Zhu, E. Tsuji, Y. Aoki, H. Habazaki, "Facile preparation of self-healing superhydrophobic CeO<sub>2</sub> surface by electrochemical processes", *Appl. Surf. Sci.* 423, 968–976, **2017**.
65. P. Xu, G. Meng, L. Pershin, J. Mostaghimi, T. W. Coyle, "Control of the hydrophobicity of rare earth oxide coatings deposited by solution precursor plasma spray by hydrocarbon adsorption", *J. Mater. Sci. Technol.* 62, 107–118, **2021**.
66. J. Shim, D. Seo, S. Oh, J. Lee, Y. Nam, "Condensation heat-transfer performance of thermally stable superhydrophobic cerium-oxide surfaces", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 10, 31765–31776, **2018**.
67. G. Azimi, H.M. Kwon, K.K. Varanasi, "Superhydrophobic surfaces by laser ablation of rare-earth oxide ceramics", *MRS Commun.* 4, 95–99, **2014**.
68. X. Ma, J. Chen, D. Xu, J. Lin, and C. Ren, "Influence of processing conditions of polymer film on dropwise condensation heat transfer", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, 3405–3411, **2002**.
69. S. Hemmati, F. Najafi, B. Sh. Hadavand, "A review on fluoropolymers coatings", *J. Stud. Color World*, 10, 1–10, **2020**.
70. H. E. Dehaghani, M. Nazempour, "Smart Nanoparticles Technology – Thermal Conductivity of Nanoparticles Filled Polymers", 1st ed, China, IntechOpen, **2012**.
71. D. J. Huang, T. S. Leu, "Condensation heat transfer enhancement by surface modification on a monolithic copper heat sink", *Appl. Therm. Eng.* 75, 908–917, **2015**.
72. X. Ji, D. Zhou, C. Dai, and J. Xu, "Dropwise condensation heat transfer on superhydrophilic-hydrophobic network hybrid surface", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 132, 52–67, **2019**.
73. I. Orkan Uçar and H. Y. Erbil, "Droplet condensation on polymer surfaces: A review", *Turk. J. Chem.* 37, 643–674, **2013**.
74. R. Enright, N. Miljkovic, J. L. Alvarado, K. Kim, "Dropwise condensation on micro- and nanostructured surfaces", *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* 18, 223–250, **2014**.
75. H. Kind, J.M. Bonard, C. Emmenegger, "Patterned films of nanotubes using microcontact printing of catalysts", *Adv. Mater.* 11, 1285–1289, **1999**.
76. S. Vemuri, K.J. Kim, B.D. Wood, S. Govindaraju, "Long term testing for dropwise condensation using self-assembled monolayer coatings of n-octadecyl mercaptan", *Appl. Therm. Eng.* 26, 421–429, **2006**.
77. A. Chandekar, S. K. Sengupta, and J. E. Whitten, "Applied Surface Science Thermal stability of thiol and silane monolayers: A comparative study", *Appl. Surf. Sci.* 256, 2742–2749, **2010**.
78. J. B. Boreyko, C. H. Chen, "Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces", *Phys. Rev. Lett.* 103, 18, 2009.
79. R. Wang, K. Jakhar, S. Ahmed, D. S. Antao, "Elucidating the mechanism of condensation-mediated degradation of organofunctional silane self-assembled monolayer coatings", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 34923–34934, **2021**.
80. Chen, D. Akinwande, K.J. Lee, G.F. Close "Fully integrated graphene and carbon nanotube interconnects for gigahertz high-speed CMOS electronics", *IEEE Trans. Electron Devices*, 57, 3137–3143, **2010**.
81. K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov, A. K. Geim, "Two-dimensional atomic crystals", *Phys. Today*, 58, 9–9, **2005**.
82. X. Li, Y. Zhu, W. Cai, M. Borysiak, B. Han, D. Chen, "Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes", *Nano Lett.* 9, 4359–4363, **2009**.
83. H. Malekpour, K.H. Chang, J.C. Chen, C.Y. Lu, D.L. Nika, "Thermal conductivity of graphene laminate", *Nano Letters*, 14, 5155–5161, **2014**.
84. C. H. Chen, Q. Cai, C. Tsai, C.L. Chen, G. Xiong, "Dropwise

- condensation on superhydrophobic surfaces with two-tier roughness", *Appl. Phys. Lett.* 90, 1–4, **2007**.
85. Q. Shi, A. Zhu, "Interface regulation of graphene/carbon nanotube on the thermal conductivity and anticorrosion performance of their nanocomposite", *Prog. Org. Coat.* 140, 105480, **2020**.
86. F. Raoufi, Z. Ranjbar, S. Rategar, E. Nowak, and B. Nazari, "Wettability study of super-hydrophobic silica aerogel powders", *Prog. Color. Color. Coatings.* 13, 75–83, **2020**.
87. A. Goswami, S. C. Pillai, G. Mcgranaghan, "Surface modifications to enhance dropwise condensation", *Surf. Interfaces*, 25, 101143, **2021**.
88. M. Campo, S. G. Prolongo, C. Escet, and C. Tulipán, "Barrier properties of thermal and electrical conductive hydrophobic multigraphitic / epoxy coatings", *J. Appl. Polym. Sci.* 137, 1–8, **2020**.
89. M. Clausi, S. Grasselli, A. Malchiodi, I. S. Bayer, "Applied Surface Science Thermally conductive PVDF-graphene nanoplatelet ( GnP ) coatings", *Appl. Surf. Sci.* 529, 147070, **2020**.

**How to cite this article:**

M. Ghorbannejad, A. Hosseini Monazzah, M. Rostami, An Overview of the Coatings Used in Condenser Tubes, *J. Stud. Color world*, 12, 2(2022), 171-190.

**DOR: 20.1001.1.22517278.1401.12.2.5.2**