

LED 車燈冷凝模擬與實測分析

李嘉雄

成基應用科技有限公司

LED 車燈燈罩內側冷凝嚴重影響行車安全，長期下來除了燈罩霧化加速並可能導致內部電子相關零件損壞。然而現今不單單追求車燈照明能力的提升，對於自適性頭燈能夠依據實際環境自動做燈源的調控，兩者需求意味著車燈內部設計不再像過去傳統車燈開啟與關閉，無可避免的造成 LED 車燈內部功耗上升，因此 LED 車燈已經來到電子元件散熱設計之必要，LED 所產生光輻射熱導致冷凝的現象發生。本研究將利用 CFD 軟體 Simcenter FloEFD 模擬車燈燈罩內側冷凝位置、覆蓋面積及輪廓結果並與實測相互比對，並針對車燈後蓋區域通孔位置及數量對冷凝之影響。本研究實測與模擬環境條件皆溫度 26 度及相對濕度 80% 下，觀測 1800 秒並全程點亮 LED 燈。Model A 模擬結果冷凝位置起於車燈燈罩兩內側底部尖角特徵角落位置，LED 燈照射導致燈罩表面有熱點區域產生，其熱溫度分佈以類橢圓形形狀向外擴散，故冷凝產生一內凹之輪廓，水膜膜厚最大為 9.26 μm ，並比對實測車燈霧氣形成面積及輪廓皆與模擬一致。基於此，模擬三組不同後蓋設計探討通孔位置及數量對於冷凝影響程度，其中 Model B 和 C 兩組位於車燈後蓋不同位置有一通孔並貼上透氣膜，Model D 則後蓋處有兩通孔且位置分別為 Model B 和 C。兩組不同位置單一通孔設計皆能有效降低冷凝覆蓋面積，但針對水膜厚度相差 16%，得知通孔位置對冷凝有一定影響。第三組含兩通孔設計則未有任何冷凝生成，因此通孔數量較位置來的影響較劇。

關鍵字 | 車燈(Headlamp)、冷凝(Condensation)、計算流體力學(CFD)

壹、前言

在 2022 年全球電動車銷量超過 1,020 萬輛，該年度第四季度，純電動車更佔所有電動車市場近 72%，電動車時代的來臨帶動 LED 車燈照明市場需求⁽¹⁾。對比使用鹵素發光的車燈，採用 LED 燈則擁有更高的發光效率、使用壽命和極低能耗需求等優勢，提升汽車更高的安全性和節能性，根據在 2021 年乘用車統計電動車高達 90% 車燈使用 LED，其餘乘用車也能達到 60%，預計在 2026 年整體車用照明市場產值可望達到 394.96 億美元⁽²⁾。

LED 車燈為汽車照明提供更多的設計可能性，近年來發展的自適性頭燈，可根據駕駛及環境條件調整燈光亮度、方向和範圍，提高安全、

高效和舒適的駕駛體驗。但使用 LED 車燈並非有利無弊，駕駛過程點亮 LED 燈時，容易造成燈罩內側表面出現冷凝現象，隨點亮時間增加冷凝所覆蓋面積逐漸擴大，進而形成車燈的能見度及照明範圍降低，如此導致行車安全疑慮，長期下若不斷累積水氣於內部，可能導致電子元件、電線和燈罩因暴露在高溫高濕環境而電性失效、腐蝕及燈罩變色等問題。為了避免 LED 車燈所帶來的各種益處與點亮時冷凝問題此消彼長，加上現今重視研發階段的成本及時程，紛紛在研發階段初期加入模擬評估以利在設計階段就能發現問題並提出解決方案，故模擬的導入及人才的投資儼然成為各車燈公司不可或缺的硬實力。

車燈燈罩內側冷凝屬相變行為，為一種放出潛熱的熱力過程，其描述水分子從氣相變成液相之情形，而冷凝現象發生在冷固體表面且該表面溫度低於所對應之露點溫度(Dew point, T_d)，此時大氣中水分子直接在表面上冷凝成液體型態，稱之為露⁽³⁾。露點溫度可藉由公式估算得到，其公式如下：

$$T_d = \frac{b\gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)}$$

當中 γ 則是：

$$\gamma(T, RH) = \frac{aT}{b + T} + \ln\left(\frac{RH}{100}\right)$$

其中 T 為環境攝氏溫度， RH 為相對濕度百分比，常數 a 和 b 分別為 17.27 和 237.7，此公式是基於 Magnus-Tetens 近似法，僅在下方範圍適用：

$$0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$$

$$1\% < RH < 100\%$$

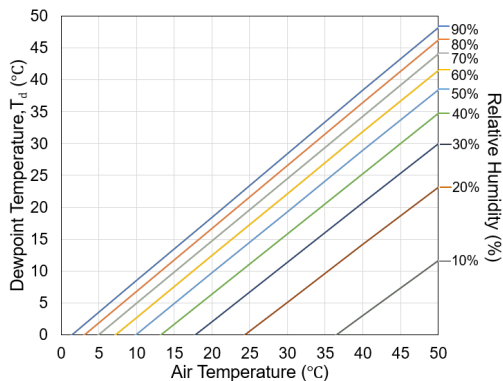
$$0^\circ\text{C} < T_d < 50^\circ\text{C}$$

依照該公式繪出各相對濕度下露點溫度對環境溫度作圖(如圖一)，由該圖得知，在越高的相對濕度下，露點溫度越接近環境溫度，表示易於相對低溫固體表面冷凝。

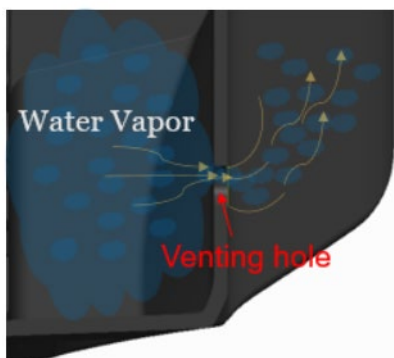
冷凝是日常生活中常見的相變，最容易發生在相對低溫的冷表面暴露在高溫的環境當中。例如，夏天從冰箱中拿出冰冷的飲料罐時遇到高溫的環境表面開始出現水珠。又例如，冬天洗完熱水澡後，熱水蒸氣接觸到鏡面時開始冷凝，最終覆蓋整個鏡面。在車燈燈罩內側表面冷凝現象，原理為溫暖的環境溫度碰到相對低溫表面。如冬天時汽車停放在溫暖的車庫或是地下室，燈罩內部為室內溫度，當行駛離開後，因為室外的低溫環境及行駛所造成燈罩的迎風冷卻，進而導致燈罩瞬間形成一冷表面和內部為原先室內溫度產生較大的溫差，故達成相對低溫的固體表面及相對溫暖的環境溫度和濕度即冷凝發生。另一種較常見的情境為晚上或是雨天時，行駛中開啟車

燈一段時間後關閉，因燈源發熱造成車燈內外較大溫差，當內側表面達露點溫度冷凝發生。而在傳統車燈採用鹵素燈，其操作溫度可高達 2,500 °C⁽⁴⁾，加上點亮所產生的光輻射熱加熱整個車燈，點亮期間車燈燈罩溫度易超過 100 度以上。採用 LED 車燈雖然具備低功耗及可散熱設計，但同時有利於在點亮過程燈罩內側產生冷凝，造成在晚上或是雨天行駛過程時發生，進而造成照射距離及亮度不足導致行車安全疑慮。採取鹵素燈的車燈，多數情況下可以透過點亮加熱使冷凝在短時間內消散掉，但 LED 車燈在使用過程中則會使冷凝狀況加劇。然而車燈燈罩冷凝是無法避免的物理現象，且容易出現在底部具尖角特徵的角落處，從露點溫度圖表中，不難發現要抑制冷凝的發生，控制車燈燈罩內側區域環境溫度是重要關鍵，但由於不可能在車燈內裝置風扇來達到散熱，因此剩下自然對流及熱輻射散熱機制，目前車燈針對冷凝的解決方案即為將整個 LED 鋁基板放置在 Heatsink 直接對其做散熱，除了讓 LED 維持好的操作溫度，同時將熱導流到車燈後蓋區域避免車燈燈罩內側區域溫度加劇。現今車燈解決冷凝問題最有效為在車燈後蓋處設計通孔(Ventilation holes)，讓水汽得以離開內部同時達到降低內部溫度和濕度(如圖二)，雖然開孔能有效的解決冷凝問題，但同時也增加水滲入及灰塵等外部物質藉由通孔進入而導致內部損壞等風險，因此常見利用透氣膜(Mesh)貼於開孔處，能避免外部物質進入車燈內部，同時具備水氣透濕能力讓水氣從內部排出，然而並非設計越多通孔越好反而可能導致水氣易進入車燈內部，因此對於通孔的數量及位置設計成為車燈重要的設計指標⁽⁵⁾⁽⁶⁾。過去已有許多文獻針對車燈做冷凝模擬分析，但僅專注在起始條件為較低環境溫度搭配車燈內部高溫高濕的情境⁽⁷⁾，少部分文獻是考量車燈內部熱源來至 LED 燈⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本文將利用西門子 Simcenter FloEFD 軟體分析 LED 車燈冷凝問題同時加入燈罩受 LED 輻射熱造成的局部熱點，再

與實測結果相互比對，並利用模擬探討通孔位置及數量對冷凝影響。



圖一 露點溫度對環境溫度作圖



圖二 車燈後蓋開孔排氣示意圖

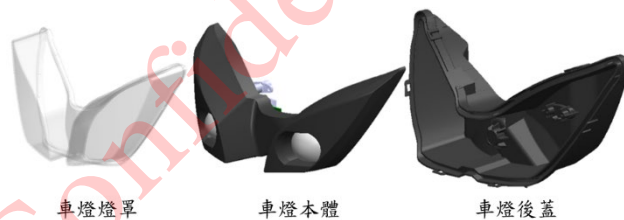
貳、研究手法

本次研究為 LED 車燈單體，主要區分為三大物件，分別為車燈燈罩、車燈本體及車燈後蓋如圖三所示。

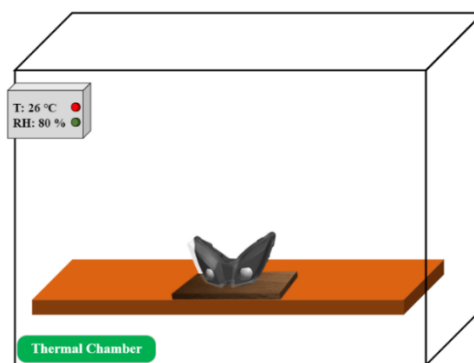
為了創造恆溫恆濕達到以利與模擬結果做比對，實測手法為將車燈放置於恆溫恆濕機 (Thermal Chamber)，設置恆溫溫度 26°C，相對濕度 80% (如圖四)。當溫度及相對濕度平衡，開始點亮 LED 車燈維持 1800 秒後並觀察車燈燈罩冷凝情形。模擬邊界條件與實測設置相同環境溫度 26°C 及相對濕度 80%，因系統主要散熱為自然對流，故該模擬必須考慮熱輻射表面設置。除了模擬 LED 燈本體發熱外為了追求光照射於燈罩上的輻射熱，本次模擬也將 LED 燈性能參數包含電流

對輻射通量 (Radiant Flux)、電流對光通量 (Luminous Flux) 及輻射方向圖 (Radiant Pattern) 等加入，針對透氣膜也加入氣體滲入係數 (Gas Permeability Coefficient) 及水氣擴散係數 (Vapor Diffusion Coefficient) 參數。

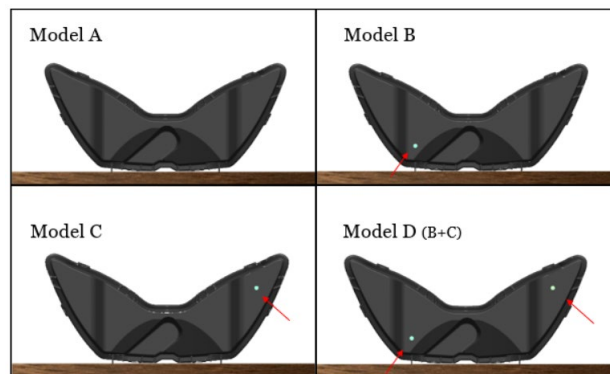
本文模擬共四組模型分別為 Model A、B、C 和 D (如圖五)，Model A 為車燈後蓋無任何通孔並與實測結果相互比較，Model B 和 Model C 為分別於後蓋左下及右上有一通孔設計並利用透氣膜覆蓋，Model D 則結合 B 和 C 位置於後蓋有兩通孔設計也利用透氣膜覆蓋。



圖三 車燈單體內部物件



圖四 車燈實測示意圖



圖五 Model A~D 車燈後蓋圖

參、結果與討論

在 LED 車燈點亮情況下，車燈內部主要發熱源分別為 LED 燈及控制板上電子元件所產生，LED 本身所產生的廢熱會藉由鋁基板傳遞至散熱模組因此車燈本體至車燈後蓋區域溫度上升，由於控制板放置於此區域，在 LED 車燈模組也有解決電子元件散熱需求。為了使 LED 能夠具備較強的照射距離及亮度，會在 LED 燈照射前方放置聚光鏡(Condenser Lens)讓光線能夠聚焦，也因此 LED 燈照射正前方區域的燈罩會因為光輻射熱產生一熱點(Hot spot)，而燈罩溫度上升，內外皆有自然對流，由於熱空氣密度低所以熱空氣向上使燈罩上半部溫度較底部溫度高，之所以為何冷凝容易發生於燈罩底部原因，經長時間後燈罩內側區域逐漸溫暖，且燈罩底部表面是相較低溫區域，故冷凝容易發生於此，實際 LED 車燈冷凝機制可參考示意圖(如圖六)。

實測與模擬 Model A 皆採用車燈後蓋無任何通孔，在實測結果照可得知 LED 燈在點亮時冷凝發生於燈罩底部兩凸出特徵區域內側處(如圖七右側)，而在模擬冷凝現象利用藍色深至淺表示冷凝水膜厚度薄至厚，Model A 冷凝位置(如圖七左側)與實測生成位置相同，冷凝所涵蓋區域範圍也近似。除此之外，不管在實測或是模擬結果圖中，皆可清楚看見冷凝所產生的輪廓都有一凹陷弧度(如圖七黃色粗體線標示處)，對此利用模擬燈罩溫度分布後處理方式剖析該現象(如圖八)，從燈罩兩側都各有兩熱點區域(虛線圈選)，藉由 Simcenter FloEFD 可得到每個物件熱能傳遞路徑，因此得知燈罩受熱是來自 LED 燈所產生的光輻射熱，燈罩材料為 PC(Polycarbonate)熱傳係數無方向性，因機殼外型特徵和受自然對流影響，溫度分布會以類橢圓形方式擴散，而冷凝生成面積受此特性形成有一內凹的輪廓。

利用 Simcenter FloEFD 精確地分析 LED 車燈冷凝現象與實測結果一致後，本研究將藉由

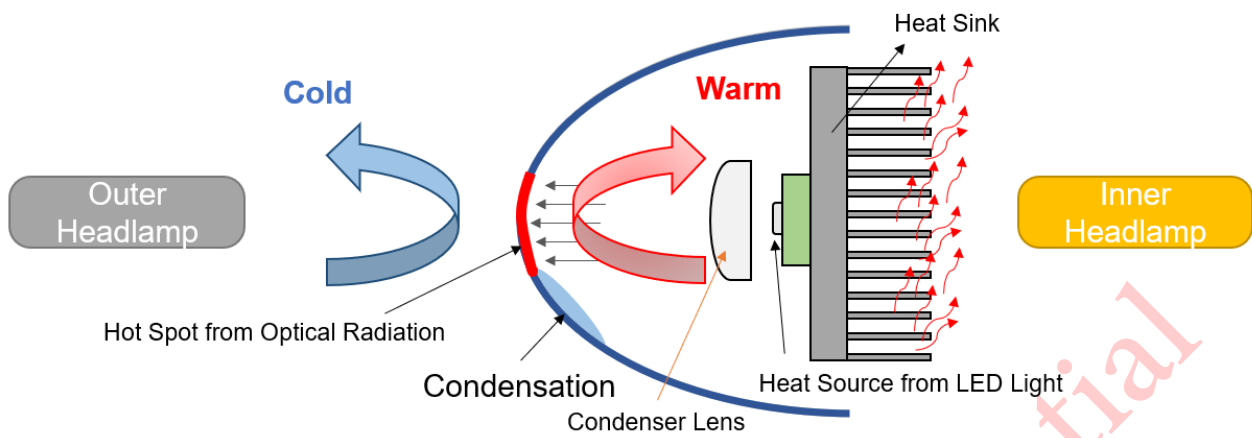
Model B、C 和 D 研究車燈後蓋使用通孔並更換其位置與數量之影響。Model B 後蓋正視角左下角有一通孔並貼上透氣膜(圖九 Model B 虛線圈選處)，比較 Model A 因通孔有助於水氣離開車燈內部，因此冷凝面積有顯著的縮小且水膜厚度由最大值 $9.26\ \mu\text{m}$ 到 $3\ \mu\text{m}$ 減少近 67%。Model C 後蓋正視角右上有一通孔並貼上透氣膜，由冷凝面積與 Model B 並無較明顯差異，但在水膜厚度最大值 $3.49\ \mu\text{m}$ 反倒是增加 16%，由厚度可以得知通孔位置是會影響冷凝的生成。為了讓整體具備比較基礎，Model D 則是於後蓋正視角有兩通孔設計且其位置分別同為 Model B 和 C，該模擬則在結果圖中並未發現有冷凝現象發生，因此得知通孔數量是最直接影響冷凝形成。

肆、結論

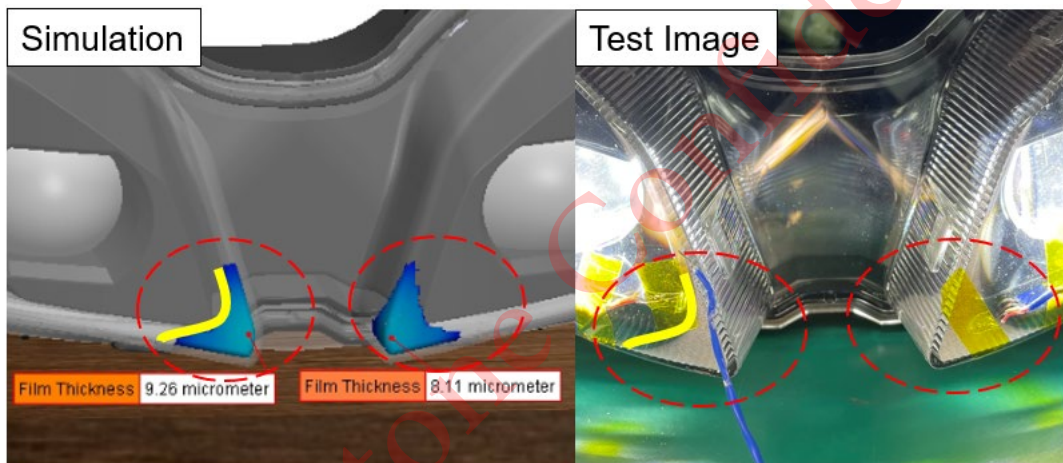
LED 車燈冷凝現象是無可避免，有效的預測冷凝所涵蓋面積，盡可能在初期就能加入模擬分析並設計解決方案也是現今所有電子產品設計相當重要的一環，不僅能減少實測樣品費用且加速產品從設計到生產所需時間。本文考慮 LED 燈照射時，於燈罩表面所受的光輻射熱來提升模擬精確度。從實測與模擬結果比較，冷凝所涵蓋面積以及輪廓皆一。在 Model B 和 C 於車燈後蓋各創造不同位置的一通孔，得到通孔位置具影響冷凝形成，再藉由 Model D 得知通孔的數量影響冷凝程度較大。在實際車燈產品設計，車燈後蓋並非任何位置都能設計通孔，因此利用模擬分析可找到最佳的通孔位置及數量。

伍、致謝

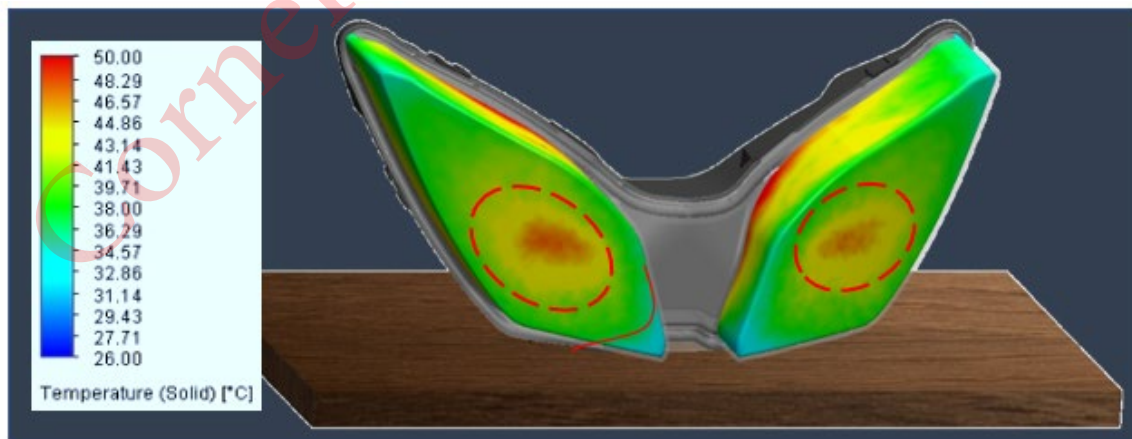
本研究感謝佳欣光電科技股份有限公司提供機會參與產品開發過程，特此致謝。



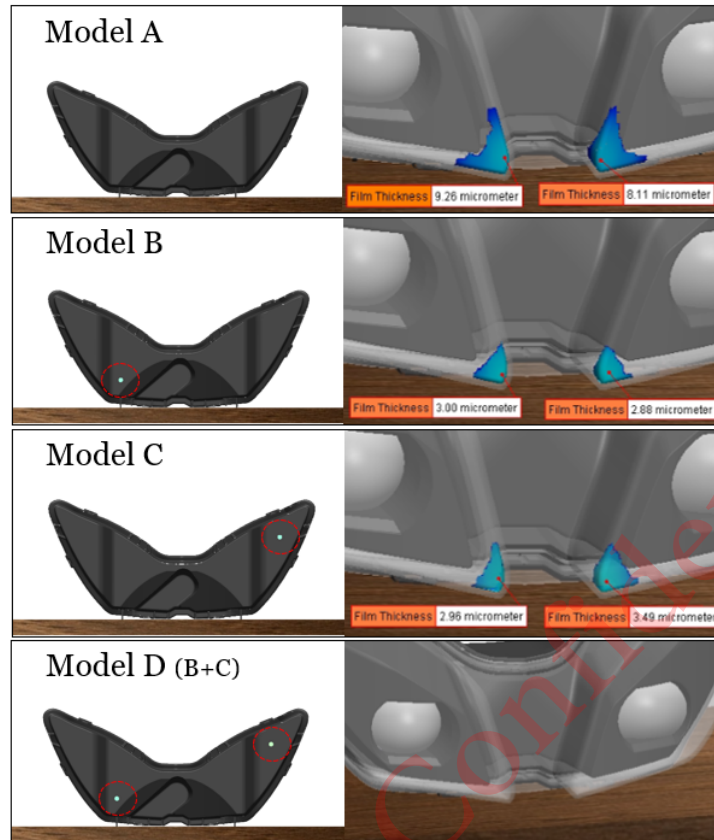
圖六 冷凝機制於LED車燈點亮過程示意圖



圖七 模擬(Model A)與實測冷凝結果圖



圖八 燈罩 Model A 模擬溫度分布圖



圖九 Model A~D 模擬結果圖

陸、參考文獻

1. Investing.com, "Counterpoint Research : 2022 年全球電動車銷量超過1020萬輛 預計2023年底達到近 1700 萬輛" 2023.03.09, <https://hk.investing.com/news/stock-market-news/article-305492>.
2. TRENDFORCE, "車燈產品受惠技術進展及價格支撐，預估2022年全球車用照明產值將年增 4%" , 2022.07.06, <https://www.trendforce.com.tw/presscenter/news/20220706-11287.html>.
3. Wikipedia, "露點", <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%9C%B2%E7%82%B9>.
4. TotalEnergies, "The differences between halogen, xenon, led and laser headlights", <https://totalenergies.rs/en/advice-proposals/ehow/differences-between-halogen-xenon-led-and-laser-headlights>.
5. BETTER AUTOMOTIVE LIGHTING.COM, "Why do my headlights fog up? it's more common than you think!", <https://blog.betterautomotivelighting.com/why-do-my-headlights-fog-up-its-more-common-than-you-think>.
6. Michal Guzej and Martin Zachar (2019). "CFD Simulation of Defogging Effectivity in Automotive Headlamp" energies.
7. J. Christopher Watson., et al. (2016). "Condensation Modeling during Automotive Lighting Product Development Using CFD Simulation" SAE.
8. Johan Brunberg Mikael Aspelin (2011). "CFD Modeling of Headlamp Condensation" Thesis.
9. Alberto Deponti., et al. "Modeling of condensate formation and disposal inside an automotive headlamp"