

原创研究型文章

# 温度对热天平中水蒸发系数 (E) 的影响：太阳能驱动的蒸汽生成方法

Carlos Enrique Rojas-Sánchez, Rodolfo Antonio Hernández-Chaverri\*

Laboratorio de Ingeniería en Bioprocesos (LIBP), Universidad Estatal a Distancia, Palmares 20701, Costa Rica

\* 通讯作者: Rodolfo Antonio Hernández Chaverri, rohernandez@uned.ac.cr

## 引用格式

Rojas-Sánchez CE, Hernández-Chaverri RA. 温度对热天平中水蒸发系数 (E) 的影响：太阳能驱动的蒸汽生成方法. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(3): 234.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i3.234>

Rojas-Sánchez CE, Hernández-Chaverri RA. Effect of temperature on water evaporation coefficient (E) in a thermobalance: A solar-driven steam generation approach (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(3): 234.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i3.234>

## 文章信息

收稿日期: 2024-07-16

录用日期: 2024-09-20

发表日期: 2024-09-23

## 版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/188>

**摘要:** 本研究分析了水蒸发现象随设定的干燥温度和水质量的变化, 研究了五个温度水平(50、60、70、80 和 90 °C), 最终建立了温度和蒸发速率之间的相关性。通过研究, 确定了水的蒸发速度可在初始质量为 35 克、温度为 90 °C 的条件下进行计算, 而测定所需的时间为 120 分钟。此外, 根据使用 Sartorius MA-100 天平进行的实验, 确定了蒸发速度与温度呈二次函数关系, 且当温度为 80 °C 时记录的最大偏差为 0.349 mmol/m<sup>2</sup>s。研究得出结论, 水蒸发速度的测定高度依赖于温度和水的质量。此外, 本研究还可以为未来提高蒸汽和电力联合生产等工艺效率的研究提供基础。

**关键词:** 蒸发; 水; 温度; 水分分析仪; 蒸汽; 生成

## 1. 引言

全球对化石燃料的依赖以及全球许多地区饮用水短缺问题, 凸显了寻找可持续替代方案以应对这些挑战的迫切需求 [1]。为此, 联合国等组织通过可持续发展目标确定了行动路线, 强调经济实惠的清洁能源、可持续的城市和社区、以及清洁水源和卫生设施的重要性。

这一情况推动了高效利用太阳能的技术的发展, 其中之一就是蒸汽和电力的光热联产 [2-4]。然而, 体积加热的太阳能到蒸汽的转换效率约为 40% [5]。因此, 这项技术正朝着界面太阳能蒸汽生产的方向发展, 从而提高效率值 [6-8]。

该技术基于光热和光电原理, 其中通过太阳辐射产生的热量用于产生蒸汽, 而蒸发过程中的温差驱动热电发电机发电 [9,10]。此外, 产生的蒸汽的冷凝可用作水净化策略 [11-13]。

在此背景下, 有必要寻找能够提高这两个过程效率的条件和技术。本研究重点关注时间、水量或高度以及温度等变量对水蒸发速率的影响。为此, 研究中使用了一种以红外电阻为加热源的湿度天平。研究目标是水-电联产系统的开发和设计做出贡献。

热表面上水的蒸发速率取决于许多因素, 其中最相关的因素包括: 环境条件 (温度、气压和相对湿度)、传热面积、样品容器形状、杂质以及分析温度下的蒸汽压 [14-20]。

通过在热天平中评估水随时间的蒸发过程, 可以得知, 蒸发的水量主要呈线性行为, 如图 1 所示, 该图标记了三个不同的区域: a) 调节区, 系统达到选定的温度, b) 线性区, 由比例关系定义; c) 非线性区, 由于在没有液体的情况下在板上形成岛状物而引起 [21,22]。

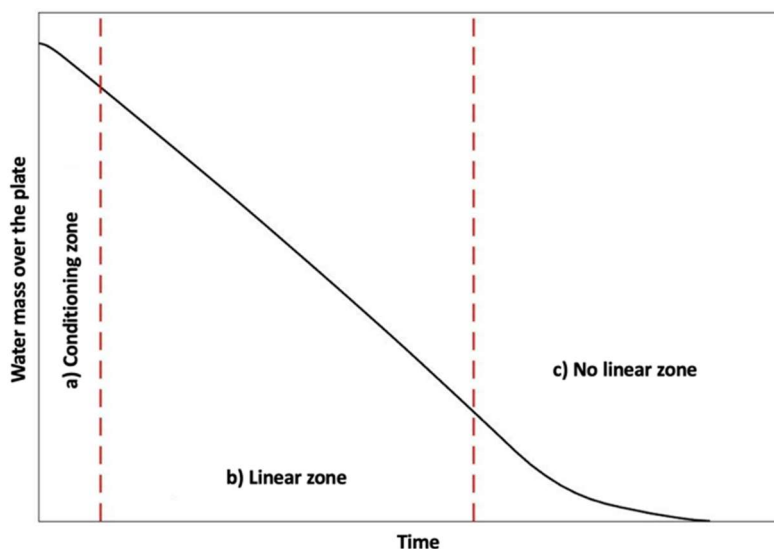


图 1. 热天平中水的质量随时间的变化行为。

Figure 1. Water mass behavior vs time in a thermobalance.

## 2. 材料和方法

### 2.1. 干燥面积计算

使用平均直径为 90 毫米的 80x 铝盘 (Sartorius, 6965542) 进行测试, 但它们呈圆锥形, 如图 2 所示。因此, 干燥面积随盘中液体的高度的变化而改变。为此, 根据时间  $t$  时  $p$  中的水量定义可变干燥面积。

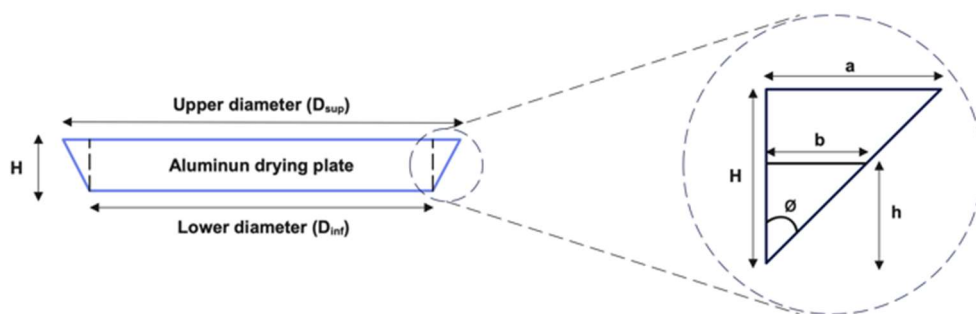


图 2. 80x 铝制称重盘 (Sartorius) 的示意图。

Figure 2. Diagram of 80x aluminum weighing pan (Sartorius).

首先, 取一个有代表性的铝盘样本 ( $n = 20$ ), 测量上直径 ( $D_{sup}$ )、下直径 ( $D_{inf}$ ) 和高度 ( $H$ ); 利用收集到的数值, 提出了  $t$  时刻直径和铝盘内水量之间的关系, 具体如下所述。

直径和铝盘中水质量之间的关系使用  $\phi$  (公式 (1)) 计算:

$$\phi = \arctan\left(\frac{a}{H}\right) = \arctan\left(\frac{D_{sup} - D_{inf}}{H \cdot 2}\right) \quad (1)$$

然后计算  $b$  (公式 (2))。  $\rho_T$  是  $T$  温度下的水密度。

$$3 \cdot \frac{m(t)}{\rho_T} \cdot \tan \phi \cdot \frac{4}{\pi} = 4 \cdot b(t)^3 + 6 \cdot D_{inf} \cdot b(t)^2 + 3 \cdot D_{inf}^2 \cdot b(t) \quad (2)$$

最后计算 t 时刻的干燥面积( $A_s(t)$ ) (公式 (3)) :

$$A_s(t) = \frac{\pi \cdot (2 \cdot b(t) + D_{inf})}{4} \quad (3)$$

所有分析均使用蒸馏水。本节估算了本研究中建议的校正与不同体积的恒定面积假设之间的最大偏差。

## 2.2. 水的蒸发系数测定

对水分测定仪进行编程，并设置标准干燥。在每次实验中，选择温度，记录水质质量随干燥时间的变化。同时，还测量了气压、相对湿度和室温。利用所得数据，计算每次单位面积的水量( $n_w(t)$ )，如公式 (4) 所示，其中  $MM_w$  是水的分子量。

$$n_w(t) = \frac{m(t)}{MM_w \cdot A_s(t)} \quad (4)$$

然后，分析了  $n_w(t)$  与时间的关系。水蒸发系数呈现线性区域斜率，如下面的表达式 (公式 (5)) 所示：

$$E = \frac{-dn_w/dt}{A_s} \quad (5)$$

## 2.3. 水的初始质量对水蒸发系数的影响

本研究在 90 °C 下进行，这是本研究的温度上限。定义了三个质量水平：15 g、25 g 和 35 g。最后，计算了每种情况下的水蒸发系数。这些测定是在 Sartorius MA-100 热天平上进行的。

## 2.4. 分析时间对水蒸发系数测定的影响

在后续阶段，使用 Sartorius MA-100 热天平在 50 °C 和 90 °C 两个温度下，对 35 克水的蒸发进行了实验。当水质质量在 5 分钟内的变化小于 1 毫克时，测定结束。

## 2.5. 温度对水蒸发系数测定的影响

此外，还研究了温度的影响。使用初始水量为 35 克、时间为 120 分钟，对五个温度 (50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 和 90 °C) 进行了五次重复试验，确定了水的蒸发系数。使用的设备是 Sartorius MA-100 和 OHAUS MB 120。

### 3. 结果与讨论

首先，计算了不同初始体积（满盘、35 毫升、25 毫升、15 毫升）下建议的干燥面积与恒定面积假设（使用制造商报告的标称直径）之间的最大百分比变化；同时，还计算了在 E 值测定中的差异（表 1）。

表 1. 不同初始体积的最大百分比面积和 E 变化。

Table 1. Maximum percentage area and E variation for different initial volumes.

Initial volume (mL)	Maximum percentage area variation (%)	Maximum percentage E variation (%)
Full pan	21.90	17.97
35	19.06	16.01
25	17.04	14.56
15	15.00	13.04

最初加入的水量越多，面积和 E 的最大百分比变化也越大（满盘情况下分别为 21.90 % 和 17.97 %）。这种情况表明，采用动态面积近似是必要的，因为变化是不可忽略的（两种计算的差异均超过 10%）。

随后，对不同温度（50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 和 90 °C）下的水蒸发现象进行了初步研究，这些条件在太阳能辅助蒸发系统中经常出现。实验使用 Sartorius MA-100，室温在 22.2 °C 到 28.8 °C 之间，相对湿度在 55.9 % 到 77.0 % 之间，海拔高度为 1000 米。实验目的是了解盘中水量随时间的变化，直至水完全蒸发。各种太阳能蒸汽生成过程中达到的温度因研究条件和方法的不同而变化，但已记录的温度值在 50 °C 到 165 °C 之间 [23–30]。

在图 3 中，可以看到每个分析温度下的水蒸发行为。在每种情况下，都观察到相同的模式，并且可以识别出图 1 中标记的三个区域。此外，对于极限温度值 50 °C 和 90 °C，50 °C 时水完全蒸发所需的时间是 90 °C 时的四倍。因此，温度升高意味着蒸发时间减少，或蒸发速率增加 [21]。

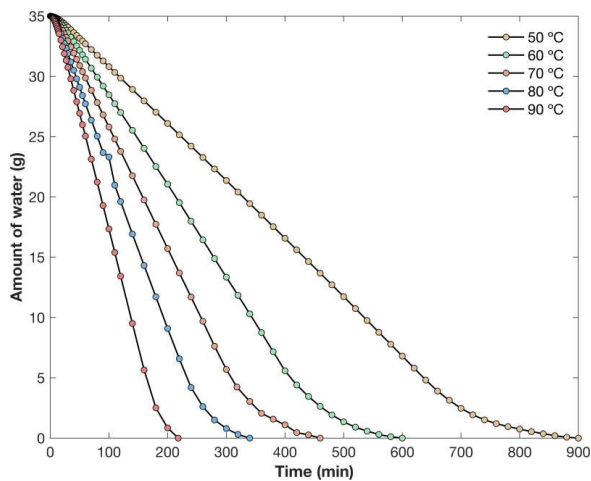


图 3. 使用 Sartorius MA-100 绘制的不同温度下水量与时间的关系。

Figure 3. Amount of water versus time for different temperatures, using Sartorius MA-100.

同样值得注意的是，温度越低，标记区域越宽 (图 3)。因此在 50 °C 时，需要更长的稳定或调节时间才能开始线性行为。这种现象可以通过分析温度与室温之间的较小差异来解释 [31]。

蒸发过程主要发生在线性区域，这在所有温度下都可以看到；因此，关注蒸发现象的这一部分至关重要。将线性区域作为研究的主要关注点，确定了水的蒸发系数，它对应于线性区域斜率的负值(公式 (5))。

对于通过太阳能进行蒸汽和电力联产，建议在恒定速度区域内操作，确保水位高度不是蒸发过程的限制因素。目前，联产蒸发器的设计侧重于 三维结构，修改水的传输高度，达到 15 厘米 [32]，旨在提高蒸汽生成过程的效率 [33,34]。

随后，研究了初始水质对 E 测定的影响。在 90 °C(本研究中使用的最高温度)下进行了三个试验(35 g、25 g 和 15 g)，分析时间为 120 分钟(图 4)。

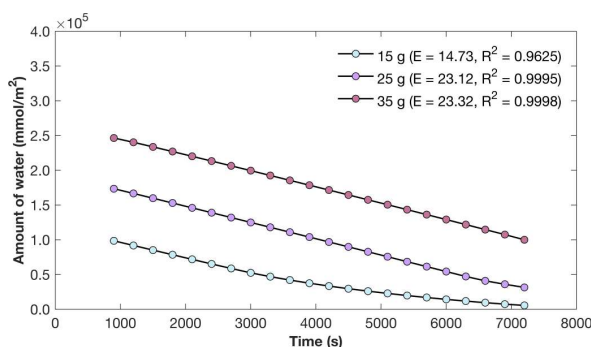


图 4. 使用 Sartorius MA-100 测量不同初始水量与时间的关系。

Figure 4. Amount of water versus time for different initial mass of water, using Sartorius MA-100.

图 4 显示了一种比例关系；因此，随着初始质量的减少，线性区域的时间也相应缩短。例如，当初始质量为 15 克时，线性行为持续约 40 分钟，而对于 35 克，线性区域达到 120 分钟。

如果对每个初始质量在 15 分钟和 120 分钟之间进行线性校正，则可以看到  $R^2$  和  $E$  随着水质量的减少而降低。这个现象可以通过蒸发现象限制来解释，即水膜在铝板上破裂，形成没有水存在的区域（岛状结构，图 5）。在接下来的试验中，选择 35 克水，预期蒸发速率更高。这些测定在室温在 27.3 °C 到 30.0 °C 之间，相对湿度在 55.2 % 到 59.8 % 之间进行。



图 5. 无水存在的岛屿形成。

Figure 5. Island formation without water presence.

随后，研究了分析时间的影响，比较了 35 克水在 50 °C 和 90 °C 下的蒸发情况(图 6)。在这两种情况下，几乎始终保持线性行为，但是，选择 90 °C 来定义测定时间和标准化测试。在这种情况下，线性区域界定在 15 分钟和 120 分钟之间，相关系数为 0.9997。对于相同范围，但在 50 °C 下，相关系数为 0.9996。无论如何，都力求获得高于 0.9995 的  $R^2$  值。

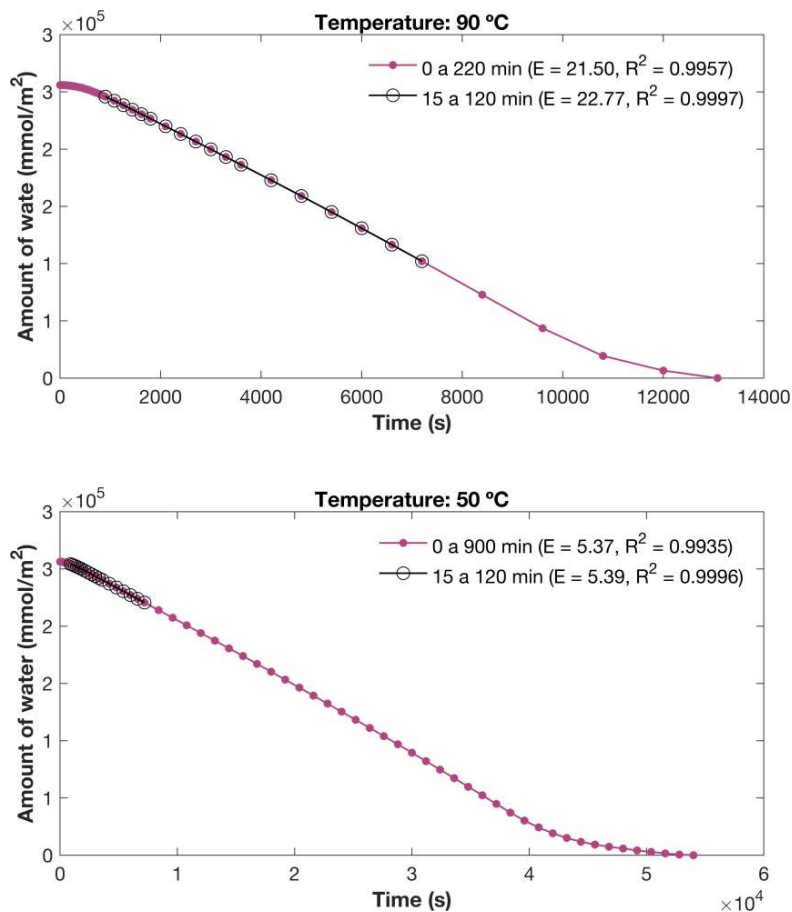


图 6. 使用 Sartorius MA-100 绘制的 50 °C 和 90 °C 下水量与时间的关系。

Figure 6. Amount of water versus time at 50 °C and 90 °C, using Sartorius MA-100.

测定 E 所需的时间与水的初始质量直接相关。为了获得  $R^2$  大于 0.9995 的回归校正，时间和初始水质量分别设定为 120 分钟和 35 克。因此，准确测定 E 必须考虑系统在达到工作温度时的调节，并且必须确保在过程中的任何阶段都不缺水，因为会导致蒸发效率的降低。

然后，研究了温度及其对测定 E 值的影响。选择了五个温度(50 °C、60 °C、70 °C、80 °C 和 90 °C)，这些条件在太阳能水电联产系统中很容易达到。所有测定均使用 Sartorius MA-100 (BH1) 进行五次重复。这些测试是在室温 21.9 °C 到 29.8 °C 之间、相对湿度 45.1 % 到 78.1 % 之间、海拔高度为 1000 米的条件下进行的。

温度升高意味着蒸发率和 E 值的增加(图 7)。这种行为可以用传热理论来解释，因为随着温度升高，会产生更多的热量，从而加速样品蒸发 [21]。

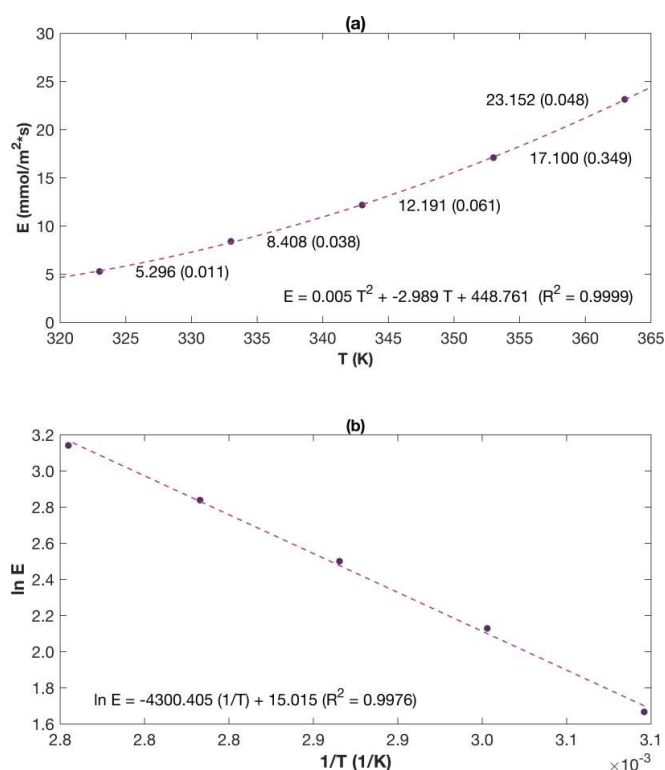


图 7. 使用 Sartorius MA-100 得到的 E 与温度的关系。(a) 二级多项式校正；(b) 阿伦尼乌斯校正。

Figure 7. E relation with temperature, using Sartorius MA-100. (a) second grade polynomial adjustment; (b) Arrhenius adjustment.

此外，随着温度的升高，水蒸气压升高，蒸发速度加快，这是因为分子的动能增加，使其能够从液相逃逸到气相。这种情况解释了实施提高太阳能转换效率的策略的必要性，例如设计二维或三维蒸发器。如果目标是海水淡化，最强的天然海洋蒸发率发生在热带地区(南纬 10° 到 20°)，其估计蒸发率为 1540 毫米/年(0.00271 mmol/m²·s) [35]，全球海洋平均温度为 17 °C(最高为 35 °C) [36,37]。

在忽略盐分存在、风对蒸发的影响或太阳辐射不稳定等相关因素的影响下，强调寻找增强传热和提高蒸汽生成效率的技术是十分重要的。还必须注意，前面提到的海水蒸发率与设备在受控温度条件和恒定辐射下实现的蒸发率之间存在显著差异。

根据 Djellabi 等人 [38] 的研究，介绍了多项太阳能蒸汽生成的研究，其中发现水蒸发率在 49.6 至 14.4 mmol/m²·s 之间，效率超过 70%，这说明了这些技术在电力联产和水处理方面的前景。

研究发现 E 值的偏差在 0.01 mmol/m² s 到 0.35 mmol/m² s 之间。最大计算偏差出现在 80°C 时，占该温度下 E 值(17.100 mmol/m² s) 的 2%。这一情况表明，室温和相对湿度不会影响各温度下的 E 值测定。

另外，利用二阶多项式方程拟合了水蒸发系数与温度之间的关系，其 R<sup>2</sup> 为 0.9999，由此可见存在二次行为，如公式(6)所示。

$$E = 0.005 \cdot T^2 - 2.989 \cdot T + 448.761 \quad (6)$$

拟合数据的另一种方法是线性化的阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程(公式(7)):

$$\ln E = 15 - 4300.4 \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

得到的相关系数为 0.9976。活化能为 35.753 kJ/mol。该值可以与研究条件下启动水蒸发过程所需的太阳能量相关联，因此可以将其用作确定进行该过程所需的太阳能以及评估效率的参考。

#### 4. 结论

本研究强调温度是水蒸发速率 (E) 变化的决定性因素，可将其应用于利用太阳能蒸汽生成系统以提高运行效率。结果表明，随着温度升高，水蒸发量也随之增加，且呈二次关系。此外，还就水蒸发率的计算提出了建议，这是决定太阳能水蒸发系统效率的关键变量。

另一方面，必须注意试验过程中的水量，因为如果水位太低，蒸发率就会开始显著下降。因此，确保太阳能水蒸发系统中的水位在任何情况下都不是过程的限制因素非常重要。

对于未来的研究，建议研究风速、太阳辐射的不稳定性以及水中盐类等杂质的引入等变量对水蒸发速率的影响。

**作者贡献:** 概念化, CERS 和 RAHC; 方法论, CERS 和 RAHC; 软件, CERS 和 RAHC; 验证, CERS 和 RAHC; 形式分析, CERS; 调查, CERS 和 RAHC; 资源, CERS 和 RAHC; 数据管理, CERS; 写作——原始草稿准备, CERS 和 RAHC; 写作——审查和编辑, CERS 和 RAHC; 可视化, CERS; 监督, RAHC; 项目管理, RAHC; 资金获取, CERS 和 RAHC。所有作者均已阅读并同意发表手稿版本。

**致谢:** Julio Mata Segreda 博士的修订和建议。

**利益冲突:** 作者声明没有潜在的利益冲突。

#### 参考文献

1. Li X, Xie W, Zhu J. Interfacial solar steam/vapor generation for heating and cooling. *Advanced Science*. 2022; 9(6): e2104181. doi: 10.1002/advs.202104181
2. Ren J, Ding Y, Gong J, et al. Simultaneous Solar-driven Steam and Electricity Generation by Cost-effective, Easy Scale-up MnO<sub>2</sub>-based Flexible Membranes. *Energy & Environmental Materials*. 2023; 6(3): e12376. doi: 10.1002/eem2.12376
3. Huang L, Wang Y, He R, et al. Solar-driven co-generation of electricity and water by evaporation cooling. *Desalination*. 2020; 488: 114533. doi: 10.1016/j.desal.2020.114533
4. Xu Y, Dong S, Sheng Y, et al. Highly efficient solar driven cogeneration of freshwater and electricity. *Journal of Materials Chemistry A*. 2023; 11(4): 1866-1876. doi: 10.1039/D2TA08590A
5. Li X, Cooper T, Xie W, Hsu PC. Design and utilization of infrared light for interfacial solar water purification. *ACS Energy Letters*. 2021; 6(8): 2645-2657. doi: 10.1021/acsenerylett.1c00869
6. Xie Z, Duo Y, Lin Z, et al. The rise of 2D photothermal materials beyond graphene for clean water production. *Advanced Science*. 2020; 7(5): 1902236. doi: 10.1002/advs.201902236



7. Li Z, Ma X, Chen D, et al. Polyaniline-coated MOFs nanorod arrays for efficient evaporation-driven electricity generation and solar steam desalination. *Advanced Science*. 2021; 8(7): 2004552. doi: 10.1002/advs.202004552
8. Alvarez PJJ, Chan CK, Elimelech M, et al. Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security. *Nature nanotechnology*. 2018; 13(8): 634-641. doi: 10.1038/s41565-018-0203-2
9. Wang G, Fu Y, Ma X, et al. Reusable reduced graphene oxide based double-layer system modified by polyethylenimine for solar steam generation. *Carbon*. 2017; 114: 117-124. doi: 10.1016/j.carbon.2016.11.071
10. Rezaie K, Mehrpooya M, Delpisheh M, et al. Solar-driven chemisorption cogeneration system integrated with thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2024; 76: 109705. doi: 10.1016/j.est.2023.109705
11. Bai H, Zhao T, Cao M. Interfacial solar evaporation for water production: from structure design to reliable performance. *Molecular Systems Design & Engineering*. 2020; 5(2): 419-432. doi: 10.1039/C9ME00166B
12. Dao VD, Choi HS. Carbon-based sunlight absorbers in solar-driven steam generation devices. *Global Challenges*. 2018; 2(2): 1700094. doi: 10.1002/gch2.201700094
13. Ghasemi H, Ni G, Marconnet AM, et al. Solar steam generation by heat localization. *Nature Communications*. 2014; 5(1): 4449. doi: 10.1038/ncomms5449
14. Carrier O, Shahidzadeh-Bonn N, Zargar R, et al. Evaporation of water: evaporation rate and collective effects. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016; 798: 774-786. doi: 10.1017/jfm.2016.356
15. Eames IW, Marr NJ, Sabir H. The evaporation coefficient of water: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997; 40(12): 2963-2973. doi: 10.1016/S0017-9310(96)00339-0
16. Heymes F, Aprin L, Bony A, et al. An experimental investigation of evaporation rates for different volatile organic compounds. *Process Safety Progress*. 2013; 32(2): 193-198. doi: 10.1002/prs.11566
17. Manzur A, Cardoso J. Water evaporation rate (Spanish). *Revista Mexicana de Física E*. 2015; 61(1): 31-34.
18. Sartori E. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. *Solar Energy*. 2000; 68(1): 77-89. doi: 10.1016/S0038-092X(99)00054-7
19. Tang R, Etzion Y. Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface. *Building and Environment*. 2004; 39(1): 77-86. doi: 10.1016/j.buildenv.2003.07.007
20. Turza R, Füre BB. Experimental measurements of the water evaporation rate of a physical model. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2017; 25(1): 19-23. doi: 10.1515/sjce-2017-0003
21. Örvös M, Szabó V, Poós T. Rate of evaporation from the free surface of a heated liquid. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016; 57: 1108-1117. doi: 10.1134/S0021894416060195
22. Varju E, Poós T. Determination of evaporation rate at free water surface. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Resources and Efficiency (EXPRES 2016)*; Szabadka, Szerbia.
23. Chiavazzo E, Morciano M, Viglino F, et al. Passive solar high-yield seawater desalination by modular and low-cost distillation. *Nature Sustainability*. 2018; 1(12): 763-772. doi: 10.1038/s41893-018-0186-x
24. Wang W, Shi Y, Zhang C, et al. Simultaneous production of fresh water and electricity via multistage solar photovoltaic membrane distillation. *Nature Communications*. 2019; 10(1): 3012. doi: 10.1038/s41467-019-10817-6
25. Xu Z, Zhang L, Zhao L, et al. Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still. *Energy & Environmental Science*. 2020; 13(3): 830-839. doi: 10.1039/C9EE04122B
26. Yang L, Sun T, Tang J, et al. Photovoltaic-multistage desalination of hypersaline waters for simultaneous electricity, water and salt harvesting via automatic rinsing. *Nano Energy*. 2021; 87: 106163. doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106163
27. Neumann O, Feronti C, Neumann AD, et al. Compact solar autoclave based on steam generation using broadband light-harvesting nanoparticles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2013; 110(29): 11677-11681. doi: 10.1073/pnas.1310131110
28. Zhang Y, Zhao D, Yu F, et al. Floating rGO-based black membranes for solar driven sterilization. *Nanoscale*. 2017; 9(48): 19384-19389. doi: 10.1039/C7NR06861A
29. Chang C, Tao P, Xu J, et al. High-efficiency superheated steam generation for portable sterilization under ambient pressure and low solar flux. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019; 11(20): 18466-18474. doi: 10.1021/acsami.9b04535
30. Li J, Du M, Lv G, et al. Interfacial solar steam generation enables fast-responsive, energy-efficient, and low-cost off-grid sterilization. *Advanced Materials*. 2018; 30(49): e1805159. doi: 10.1002/adma.201805159
31. Wang Z, Xu L, Liu D, et al. Effects of air temperature and humidity on the kinetics of sludge drying at low temperatures. *Energies*. 2021; 14(22): 7722. doi: 10.3390/en14227722

32. Finnerty CTK, Menon AK, Conway KM, et al. Interfacial solar evaporation by a 3D graphene oxide stalk for highly concentrated brine treatment. *Environmental Science & Technology*. 2021; 55(22): 15435-15445. doi: 10.1021/acs.est.1c04010
33. Li X, Li J, Lu J, et al. Enhancement of interfacial solar vapor generation by environmental energy. *Joule*. 2018; 2(7): 1331-1338. doi: 10.1016/j.joule.2018.04.004
34. Xu X, Ozden S, Bizmark N, et al. A bioinspired elastic hydrogel for solar-driven water purification. *Advanced Materials*. 2021; 33(18): 2007833. doi: 10.1002/adma.202007833
35. Feistel R, Hellmuth O. Thermodynamics of Evaporation from the Ocean Surface. *Atmosphere*. 2023; 14(3): 560. doi: 10.3390/atmos14030560
36. Venegas RM, Acevedo J, Trembl EA. Three decades of ocean warming impacts on marine ecosystems: A review and perspective. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2023, 212: 105318. doi: 10.1016/j.dsr2.2023.105318
37. Garcia-Soto C, Cheng L, Caesar L, et al. An overview of ocean climate change indicators: Sea surface temperature, ocean heat content, ocean pH, dissolved oxygen concentration, arctic sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation). *Frontiers in Marine Science*. 2021; 8: 642372. doi: 10.3389/fmars.2021.642372
38. Djellabi R, Noureen L, Dao VD, et al. Recent advances and challenges of emerging solar-driven steam and the contribution of photocatalytic effect. *Chemical Engineering Journal*. 2022; 431: 134024. doi: 10.1016/j.cej.2021.134024

Article

## Effect of temperature on water evaporation coefficient (E) in a thermobalance: A solar-driven steam generation approach

Carlos Enrique Rojas-Sánchez, Rodolfo Antonio Hernández-Chaverri\*

Laboratorio de Ingeniería en Bioprocesos (LIBP), Universidad Estatal a Distancia, Palmares 20701, Costa Rica

\* **Corresponding author:** Rodolfo Antonio Hernández Chaverri, rohernandez@uned.ac.cr

---

**Abstract:** During this investigation, the variation of the water evaporation phenomenon with the defined drying temperature and mass of water was analyzed, five levels were studied (50, 60, 70, 80 and 90 °C), finally a correlation between temperature and evaporation rate was generated. With the study carried out, it was defined that the water evaporation velocity can be calculated with an initial mass of 35 g at 90 °C, while the necessary time for the determination was 120 min. In addition, it was determined that the evaporation velocity follows a quadratic behavior with temperature, according to the experiments carried out with the Sartorius MA-100 balance, while the maximum deviation recorded was 0.349 mmol/m<sup>2</sup>s for a temperature of 80 °C. It is concluded that the determination of the water evaporation velocity is highly dependent on the temperature and mass of water. Furthermore, this study can be used as a basis for future studies aimed at improving the efficiency of processes such as steam and electricity cogeneration.

**Keywords:** evaporation; water; temperature; moisture analyzer; steam; generation