

Ανασκόπηση σχετικά με την επίδραση της σχετικής υγρασίας στη διεργασία αποστείρωσης του αέρα με τη χρήση υπεριώδους μικροβιοκτόνου ακτινοβολίας UV-C σε κλιματιζόμενους χώρους

Γιώργος Π. Κουρόπουλος

Πτυχιούχος μηχανικός ενεργειακής τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας

E – mail: etmecheng@gmail.com

Περίληψη

ο παρόν άρθρο ασχολείται με την βιβλιογραφική ανασκόπηση και έρευνα για την επίδραση που έχει η σχετική υγρασία του κλιματιζόμενου αέρα στην ικανότητα απενεργοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών όταν εφαρμόζεται υπεριώδης ακτινοβολία UV-C. Εξετάζεται επίσης εάν οι συνθήκες θερμικής άνεσης για τον κλιματισμό ενός χώρου επηρεάζουν την ικανότητα απενεργοποίησης των παθογόνων του αέρα. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ικανότητα απενεργοποίησης παθογόνων και κατ' επέκταση ο βαθμός αποστείρωσης του αέρα κατά την διεργασία αποστείρωσης με υπεριώδη ακτινοβολία, στις περισσότερες περιπτώσεις μειώνεται όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία του αέρα, αλλά γενικά είναι διαφορετικός ανάλογα τον τύπο του παθογόνου μικροοργανισμού. Η μεταβολή του βαθμού αποστείρωσης σε σχέση με την σχετική υγρασία επηρεάζεται από το επίπεδο της έντασης της ακτινοβολίας UV-C. Οι απαιτούμενες συνθήκες θερμικής άνεσης δεν έχουν ιδιαίτερη επίδραση στον βαθμό αποστείρωσης του αέρα.

Λέξεις κλειδιά: αποστείρωση αέρα; υπεριώδης ακτινοβολία; βαθμός αποστείρωσης; μικροβιοκτόνος ακτινοβολία; λαμπτήρας UVGI

Εισαγωγή

Η αποστείρωση του αέρα με ακτινοβολία επιτυγχάνεται μέσω των λαμπτήρων μικροβιοκτόνου υπεριώδους ακτινοβολίας (UVGI), οι οποίοι εκπέμπουν την ακτινοβολία προς τους παθογόνους μικροοργανισμούς. Η συγκεκριμένη τεχνολογία απολύμανσης εφαρμόζεται κατά κόρον στον κλιματιζόμενο αέρα που εισέρχεται μέσω των αεραγωγών σε νοσοκομειακούς χώρους καθώς και στην αποστείρωση ιατρικών εργαλείων, μπορεί βέβαια να εφαρμοστεί και στον κλιματιζόμενο αέρα άλλων χώρων εργασίας. Οι λαμπτήρες UVGI τοποθετούνται εντός των αγωγών μεταφοράς του κλιματιζόμενου αέρα που διέρχεται προς τους χώρους εργασίας. Η υπεριώδης ακτινοβολία Γ ή UV-C βρίσκεται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα με μήκος κύματος μεταξύ 100 – 280 μm (ISO 21348) και αποτελεί την πλέον επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία γιατί μπορεί να επιφέρει μεταλλάξεις και καρκινογενέσεις (Pfeifer, 1996). Όταν η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφηθεί από το DNA του μικροοργανισμού, τότε αδρανοποιείται η ανάπτυξή του και επιβραδύνεται ο πολλαπλασιασμός του (Kowalski, 2009), κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται το πλήθος των ενεργών μικροοργανισμών που εμπεριέχονται στον αέρα και δύνανται να αναπαραχθούν. Η σχετική υγρασία του αέρα μπορεί να επηρεάσει την ικανότητα της ακτινοβολίας του λαμπτήρα UVGI να αδρανοποιεί τους παθογόνους μικροοργανισμούς, ενώ η σχετική υγρασία που ορίζουν τα πρότυπα για τις συνθήκες θερμικής άνεσης σε κλιματιζόμενους χώρους, παίζει τον δικό της ρόλο στην επίδραση

της διεργασίας αποστείρωσης. Μικρή ικανότητα αδρανοποίησης σημαίνει χαμηλός βαθμός αποστείρωσης του αέρα, άρα και αύξηση της πιθανότητας μόλυνσης του εργαζόμενου με κάποιον παθογόνο αερομεταφερόμενο μικροοργανισμό από τον κλιματιζόμενο αέρα.

Μικροβιακό φορτίο κλιματιζόμενου αέρα.

Κατά την λειτουργία συστημάτων θέρμανσης-ψύξης με κεντρική κλιματιστική μονάδα, υπάρχει ο νωπός αέρας από την εξωτερική ατμόσφαιρα ο οποίος εισέρχεται στον χώρο με αεραγωγούς, ενώ υπάρχει και ο εσωτερικός αέρας του χώρου ο οποίος ανακυκλοφορείται στους εναλλάκτες θερμότητας για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας. Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι οι συγκεντρώσεις των μικροοργανισμών στον κλιματιζόμενο αέρα ενός χώρου, συναρτώνται τόσο από το μικροβιακό φορτίο του υπάρχοντος εσωτερικού αέρα όσο και του εξωτερικού. Επίσης οι συγκεντρώσεις διαφέρουν ανάλογα με το είδος της εργασίας και του επαγγέλματος που εκτελείται εντός του χώρου, από την χώρα και τις συνθήκες υγιεινής και ποιότητας της ατμόσφαιρας που επικρατούν σε αυτή, καθώς και τις καιρικές συνθήκες. Υπάρχουν μετρήσεις των συγκεντρώσεων για τους αερομεταφερόμενους παθογόνους μικροοργανισμούς που εμπεριέχονται στον εσωτερικό αέρα διάφορων εργασιακών χώρων (Azimi et al., 2013; Flannigan et al., 2011; Ortiz et al., 2009; Park et al., 2013; Szymczak and Gorny, 2010). Οι μετρήσεις παρουσιάζουν κάποιες αποκλίσεις για το ίδιο είδος χώρου, οι αποκλίσεις κυμαίνονται από 5% περίπου για τα κτίρια γραφείων και φτάνουν το 4170% για τα χειρουργεία. Ενδεικτικά διάφορες τιμές αναφέρονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μετρούμενες τιμές μικροβιακού φορτίου σε χώρους εργασίας.

Χώρος εργασίας	Συγκεντρώσεις(CFU/m ³)	Πηγή
Θάλαμοι νοσηλείας	0 – 266	(Ortiz et al., 2009)
	0 – 111	(Park et al., 2013)
Νοσοκομεία (lobby)	833	(Flannigan et al., 2011)
Μαιευτήρια	0.44 – 44.67	(Ortiz et al., 2009)
Χειρουργεία	0 – 7.33	(Ortiz et al., 2009)
	0 – 313	(Park et al., 2013)
Εκπαιδευτήρια	830 – 3.1 × 10 ⁶	(Azimi et al., 2013)
Κτίρια γραφείων	14 – 494	(Szymczak and Gorny, 2010)
	10 – 530	(Szymczak and Gorny, 2010)

Οι διαφορές στις αποκλίσεις οφείλονται ότι οι μετρήσεις έχουν διεξαχθεί σε διαφορετικά μέρη του κόσμου (Flannigan et al., 2011; Park et al., 2013), καθώς και στην μέθοδο δειγματοληψίας του αέρα. Το CFU καλείται ως μονάδα αποικίας μικροβίων. Μια αποικία μικροβίων ισοδυναμεί περίπου με ένα πλήθος από 0 ως 1000 κύτταρα μικροοργανισμών.

Μαθηματικά μοντέλα αποστείρωσης του αέρα με λαμπτήρες UVGI

Ο λόγος αδρανοποίησης S ή ικανότητα αποστείρωσης/απενεργοποίησης ή ποσοστό επιβίωσης S^{-1} ενός πληθυσμού μικροοργανισμών που εκτίθεται σε ακτινοβολία UV-C (Kowalski and Bahnfleth, 2000), ως αδιάστατο μέγεθος ισούται με:

$$S = \frac{N_0}{N} = \frac{1}{\exp(-kD)} \quad (1)$$

Όπου:

N_0 : Αρχικό πλήθος μικροοργανισμών (CFU ή CFU/m^3).

N : Πλήθος μικροοργανισμών (CFU ή CFU/m^3) μετά την έκθεση στην UV-C.

k : Σταθερά του ρυθμού αδρανοποίησης (cm^2/mJ).

D : Δόση υπεριώδους ακτινοβολίας UV (mJ/cm^2).

Η σταθερά του ρυθμού αδρανοποίησης επιλέγεται από πίνακες αναλόγως τον μικροοργανισμό που θέλουμε να εξουδετερώσουμε. Η δόση D επιλέγεται από τις πειραματικές καμπύλες αδρανοποίησης του κάθε μικροοργανισμού. Εκτός από το παραπάνω μοντέλο, υπάρχει μαθηματικό μοντέλο το οποίο εξετάζει την ικανότητα αποστείρωσης του αέρα και την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών $S(t)$ ως προς τον χρόνο. Σύμφωνα με αυτό (Severin et al., 1983), ο λόγος αδρανοποίησης ισούται με:

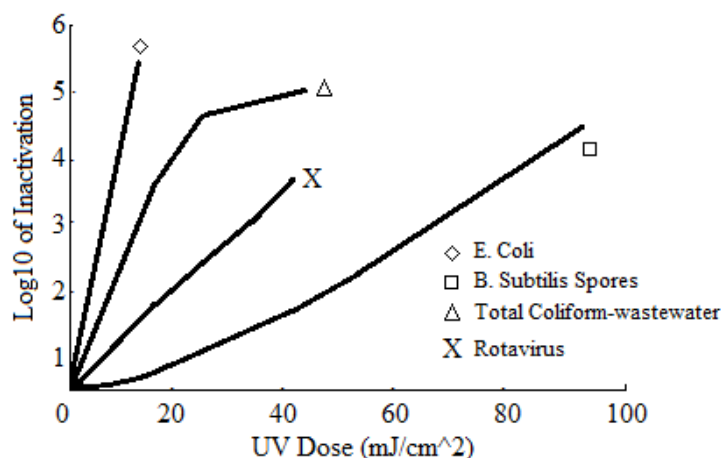
$$S(t) = \frac{N_0}{N} = \frac{1}{\exp(-kIt)} \quad (2)$$

Όπου:

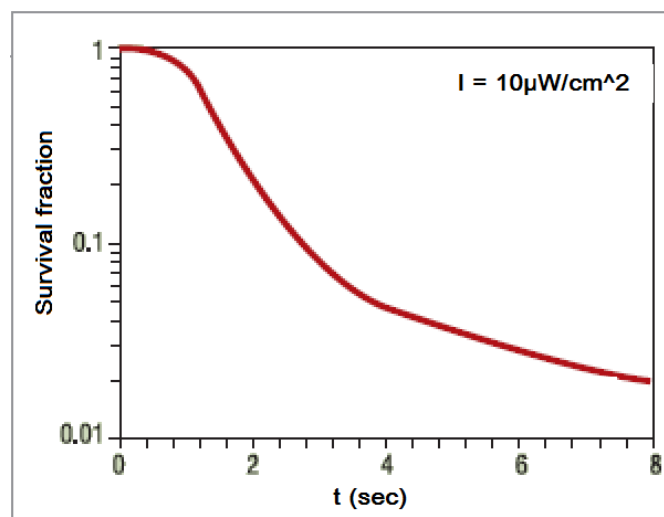
k : Σταθερά του ρυθμού αδρανοποίησης ($cm^2 \times sec/mJ$).

I : Ένταση της υπεριώδους ακτινοβολίας του λαμπτήρα (mJ/cm^2).

t : Χρόνος έκθεσης μικροοργανισμών στην υπεριώδη ακτινοβολία (sec).



Διάγραμμα 1. Μεταβολή της δόσης D της UV-C σε σχέση με την ικανότητα αδρανοποίησης για τέσσερις διαφορετικούς παθογόνους μικροοργανισμούς (Chang et al., 1985).



Διάγραμμα 2. Η μεταβολή του ποσοστού επιβίωσης των παθογόνων μικροοργανισμών συναρτήσει του χρόνου για δεδομένη ένταση ακτινοβολίας UV-C (Sharp, 1939).

Η σχετική υγρασία του αέρα

Υπάρχουν τρία διαφορετικά μεγέθη που εξετάζουν την υγρασία του αέρα. Η απόλυτη υγρασία η οποία ισούται με τον λόγο της μάζας των υδρατμών εντός του αέρα προς τον συνολικό όγκο του αέρα και των υδρατμών. Η ειδική υγρασία που ισούται με τον λόγο της μάζας των υδρατμών εντός του αέρα προς την συνολική μάζα του αέρα μαζί με τους υδρατμούς. Η σχετική υγρασία Φ (%) ή RH που είναι ο λόγος της μερικής πίεσης των υδρατμών e_w σε ένα μείγμα αέρα-υδρατμών προς την τάση ισορροπίας ή τάση υδρατμών e_w^* για δεδομένη θερμοκρασία.

$$\Phi = \frac{e_w}{e_w^*} 100\% \quad (3)$$

Η σχετική υγρασία του αέρα μπορεί να βρεθεί εύκολα από ένα ψυχομετρικό διάγραμμα εφόσον είναι γνωστές οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού του αέρα, επίσης μέσω του e_w^* είναι εφικτό να υπολογιστεί μαθηματικές προσεγγιστικές σχέσεις συναρτήσει άλλων φυσικών μεγεθών. Οι σχέσεις αυτές είναι:

Των August-Roche-Magnus (Lawrence, 2005):

$$e_w^* = 6.1094 \exp\left(\frac{17.625T_d}{T_d + 243.04}\right) \quad (4)$$

Του A.L. Buck (Buck, 1987):

$$e_w^* = 6.1121 \exp\left[\left(18.678 - \frac{T_d}{234.5}\right)\left(\frac{T_d}{T_d + 257.14}\right)\right] \quad (5)$$

Με T_d την θερμοκρασία ξηρού βολβού του αέρα σε βαθμούς Κελσίου και e_w^* την τάση των υδρατμών σε hPa. Υπάρχει και μια πιο σύνθετη προσεγγιστική σχέση των Goff-Gratch (Goff, 1957).

Η επίδραση της σχετικής υγρασίας στην αποστείρωση του αέρα

Η σχετική υγρασία μπορεί εύκολα να εκφραστεί ως συνάρτηση της πίεσης του αέρα και της πίεσης των υδρατμών εντός του αέρα, μπορεί επίσης να εκφραστεί και ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα (Buck, 1987; Goff, 1957; Lawrence, 2005), δηλαδή $\Phi=f(T,P)$. Αν ήταν εφικτό το μέγεθος S να εκφραστεί ως συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα, δηλαδή $S=f(T)$ ή $S=f(P)$, τότε θα ήταν εφικτό να εξετάσουμε και την μεταβολή του μεγέθους S ως προς την σχετική υγρασία.

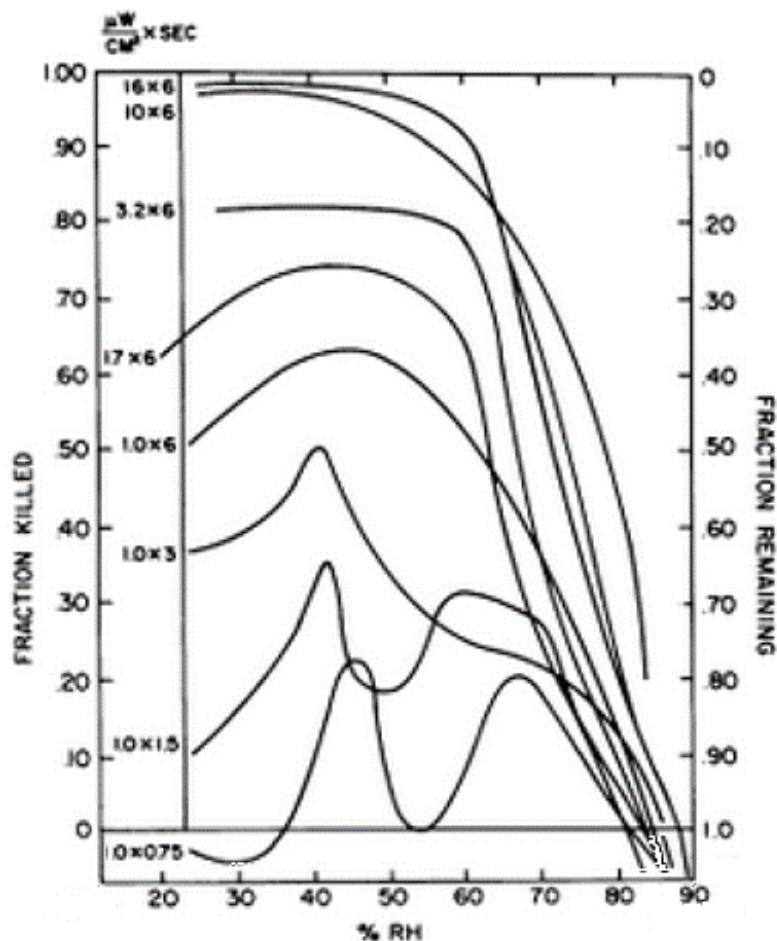
Τα μεγέθη που δύναται να επηρεάσουν άμεσα την ικανότητα αδρανοποίησης S , είναι η δόση της υπερϊώδους ακτινοβολίας D η σταθερά του ρυθμού αδρανοποίησης k και η πυκνότητα της ακτινοβολίας I . Η ικανότητα αδρανοποίησης των μικροοργανισμών κατά την αποστείρωση του αέρα με ακτινοβολία UV-C είναι διαπιστωμένο ότι δεν επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία (Severin et al., 1984). Μπορεί όμως να επηρεάζεται έμμεσα, δηλαδή αν κάποιο από τα φυσικά μεγέθη k , D , I , μεταβάλλεται από την θερμοκρασία τότε επακόλουθα να μεταβάλλεται και το μέγεθος S .

Ο L.A. Fletcher αναφέρει ότι κατά την αποστείρωση αέρα με UV στο βακτήριο *B. Ceracia* (Fletcher, 2004), η αύξηση της σχετικής υγρασίας από 58% σε 73%, επέφερε μια αύξηση του ποσοστού επιβίωσης S^{-1} από 9% σε 50% για $D = 5 \text{ J/m}^2$. Με αύξηση της δόσης σε $D = 20 \text{ J/m}^2$ και ίδια ποσοστά σχετικής υγρασίας, το ποσοστό επιβίωσης αυξάνεται από 2% σε 12%. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της σχετικής υγρασίας πάνω από 58% επιφέρει την μείωση της μικροβιοκτόνου δράσης της ακτινοβολίας UV-C για το συγκεκριμένο βακτήριο.

Άλλοι επιστήμονες αναφέρουν ότι η επίδραση της ακτινοβολίας UV μειώνει την ικανότητα απενεργοποίησης των παθογόνων βακτηρίων όταν $\Phi > 50\%$, επίσης ο βαθμός επίδρασης αλλάζει αναλόγως τα είδος του βακτηριδίου (Peccia et al., 2001). Ενδιαφέρον αποτελούν οι πειραματικές μετρήσεις των Riley και Kaufman οι οποίοι μελέτησαν το βακτήριο *serratiamarcescens* και έβγαλαν λεπτομερή διαγράμματα σχετικά με την μεταβολή της σχετικής υγρασίας το ποσοστό θνησιμότητας και την δόση ακτινοβολίας (Riley and Kaufman, 1972). Τα διαγράμματα αυτά μας επιτρέπουν να εξάγουμε μαθηματικές σχέσεις μέσω γραμμικής παλινδρόμησης για τον υπολογισμό της μεταβολής της ικανότητας αδρανοποίησης συναρτήσει της σχετικής υγρασίας.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 3, τα υψηλότερα ποσοστά θνησιμότητας ανεξαρτήτως της δόσης UV, σημειώνονται στο πεδίο τιμών $40\% < \Phi < 45\%$, ενώ η μεταβολή της σχετικής υγρασίας είναι περίπου περιοδική για μικρούς χρόνους έκθεσης από 0.75 ως 1.5sec και για σχετική υγρασία στο πεδίο τιμών $25\% < \Phi < 75\%$. Εκτός από τα παραπάνω, η αποτελεσματικότητα της μικροβιοκτόνου δράσης της υπερϊώδους ακτινοβολίας επηρεάζεται και από την θερμοκρασία του χώρου ενώ σε σχετικές υγρασίες κοντά στο 50-52% έχει την ελάχιστη αποτελεσματικότητα (Gwangpyo et al., 2015). Οι Peccia και M. Hernandez αναφέρουν ότι η αύξηση της σχετικής υγρασίας από 50% σε 95% για το *mycobacterium bovis* BCG, επιφέρει μείωση του συντελεστή ανταπόκρισης Z ($\text{cm}^2/\mu\text{W} \times \text{sec}$) στην ακτινοβολία UV-C για τον συγκεκριμένο μικροοργανισμό (Peccia and Hernandez, 2004). Για το *mycobacterium parafortuitum* οι ίδιοι επιστήμονες αναφέρουν ότι για σχετική υγρασία μεταξύ των ορίων $40\% < \Phi < 50\%$ ο μικροοργανισμός παρουσιάζει τον μέγιστο συντελεστή ανταπόκρισης Z στην ακτινοβολία UV. Για το βακτήριο *subtilis* η αύξηση σχετικής

υγρασίας από 50% σε 95% επιφέρει ελάχιστη μείωση του συντελεστή Z (Peccia and Hernandez, 2001). Δύο άλλες μελέτες των Rentschler και Nagy αναφέρουν ότι η σχετική υγρασία κατά την έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία, δεν επηρεάζει την ικανότητα απενεργοποίησης του μικροοργανισμού *Esherichia coli* (NIOSH, 2009).



Διάγραμμα 3. Η μεταβολή του ποσοστού αδρανοποίησης του βακτηριδίου *serratiam*. ως προς την σχετική υγρασία του αέρα για διάφορες τιμές της δόσης UV και χρόνους έκθεσης σε $\mu W/cm^2 \times sec$ (Riley and Kaufman, 1972).

Αποστείρωση κλιματιζόμενου αέρα και συνθήκες θερμικής άνεσης

Στην συγκεκριμένη μελέτη εξετάζουμε την σχετική υγρασία επειδή αυτό το μέγεθος επιλέγεται συνήθως για τον σχεδιασμό συστημάτων HVAC (Heating Ventilating Air Conditioning) και αποτελεί έναν παράγοντα μεταξύ διαφόρων άλλων για τις συνθήκες θερμικής άνεσης στον εσωτερικό κλιματιζόμενο αέρα των κτιρίων. Υπάρχουν μερικά πρότυπα τα οποία ορίζουν τα όρια της σχετικής υγρασίας του αέρα στην θέρμανση και την ψύξη ώστε να μην δημιουργείται στον άνθρωπο δυσάρεστο κλίμα. Αυτά τα όρια σε συνδυασμό με τα δεδομένα της προηγούμενης ενότητας για την μεταβολή του βαθμού αποστείρωσης σε σχέση με την σχετική υγρασία, μπορούν να μας δώσουν μια απάντηση αν παρουσιάζεται η βέλτιστη αποστείρωση του αέρα με υπεριώδη ακτινοβολία εντός των ορίων της σχετικής υγρασίας για τις συνθήκες θερμικής άνεσης.

Η ASHRAE θεωρεί ότι η μέγιστη τιμή σχετικής υγρασίας που πρέπει να λαμβάνεται για τον αέρα προσαγωγής κατά την μελέτη σχεδιασμού συστημάτων κλιματισμού ώστε να υπάρχει θερμική άνεση δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 65% για χώρους εργασιακής απασχόλησης (ASHRAE, 2013). Τα ελληνικά πρότυπα του Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδας αναφέρουν τα παρακάτω όρια για ψύξη και θέρμανση.

Πίνακας 2. Συνθήκες θερμικής άνεσης για την σχετική υγρασία (TOTEE, 1986)

Χώρος	Θέρμανση (χειμώνας)	Ψύξη (Καλοκαίρι)
Κτίρια γραφείων	30 – 35%	40 – 50%
Εστιατόρια	30 – 40%	50 – 60%
Χώροι εκπαίδευσης	35 – 40%	40 – 50%
Βιβλιοθήκες – Μουσεία	40 – 50%	40 – 55%
Θάλαμοι νοσηλείας	30%	50 – 60%
Χειρουργεία	30%	50 – 60%
Αίθουσες νοσοκομείων	30%	45 – 50%

Συμπεράσματα

Κατά τη διεργασία αποστείρωσης του αέρα με ακτινοβολία UV-C, η ικανότητα αδρανοποίησης για την πλειονότητα των παθογόνων μικροοργανισμών μειώνεται όσο αυξάνεται η σχετική υγρασία του αέρα με εξαίρεση λίγες περιπτώσεις. Η επίδραση της υπερϊώδους ακτινοβολίας UV-C κατά την αποστείρωση του αέρα είναι διαφορετική σε κάθε μικροοργανισμό. Η ικανότητα αδρανοποίησης άρα και ο βαθμός αποστείρωσης του αέρα, δεν μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την σχετική υγρασία. Η καμπύλη μεταβολής της ικανότητας αδρανοποίησης συναρτήσει της σχετικής υγρασίας, εξαρτάται από την δόση της υπερϊώδους ακτινοβολίας και το χρονικό διάστημα έκθεσης του μικροοργανισμού στην ακτινοβολία.

Τα όρια σχετικής υγρασίας που πρέπει να τηρούνται ώστε να επικρατούν συνθήκες θερμικής ανέσεως στον κλιματιζόμενο αέρα, δεν επηρεάζουν πολύ αρνητικά την ικανότητα αδρανοποίησης άρα και τον βαθμό αποστείρωσης του αέρα με ακτινοβολία UV-C. Επειδή το καλοκαίρι πρέπει να υπάρχει υψηλότερη σχετική υγρασία έναντι του χειμώνα και σε τέτοια περίπτωση μειώνεται η ικανότητα αδρανοποίησης, επιβάλλεται και η ανάλογη αύξηση της δόσης της υπερϊώδους ακτινοβολίας του λαμπτήρα UVGI ώστε να επιτευχθεί αντισταθμιστικά ο ίδιος βαθμός αδρανοποίησης των παθογόνων μικροοργανισμών σε σύγκριση με τον χειμώνα. Ειδικά για τα νοσοκομεία, πριν την τοποθέτηση συστήματος αποστείρωσης με ακτινοβολία UVGI, επιβάλλεται η γνώση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του αέρα προσαγωγής και εν συνεχεία η μελέτη της βιβλιογραφίας για να ελεγχθεί πως η σχετική υγρασία του αέρα των κεντρικών κλιματιστικών συστημάτων επηρεάζει τους μικροοργανισμούς που θέλουμε να εξουδετερώσουμε. Διαπιστώνεται ότι κατά την αποστείρωση ορισμένων βακτηρίων που προαναφέρθηκαν, υπάρχει η βέλτιστη αποστείρωση για τις συνθήκες θερμικής άνεσης που ορίζουν σχετική υγρασία στο διάστημα $40\% < \Phi < 60\%$.

Βιβλιογραφικές πηγές

- 1 ISO 21348. Definitions of solar irradiance spectral categories.
- 2 Pfeifer, G.P. (1996). Technologies for Detection of DNA Damage and Mutations, pp.440, Springer, New York. doi: 10.1007/978-1-4899-0301-3

- 3 Kowalski, W. (2009).Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook, Springer-Verlag, Berlin. doi: 10.1007/978-3-642-01999-9
- 4 Ortiz, G., Yaguue, G., Segovia, M. and Catalan, V. (2009).A Study of Air Microbe Levels in Different Areas of a Hospital, *Current Microbiology*, 59, 53-58. doi: 10.1007/s00284-009-9398-7
- 5 Flannigan, B., Samson, R.A and Miller, J.D. (2011).Microorganisms in Home and Indoor Work Environments: Diversity Health Impacts Investigation and Control, 2nd edition, CRC Press, Florida. ISBN 9781138072411
- 6 Azimi, F., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Hassanvand, M.S., Alimohammadi, M., Afhami, F. and Musavi, S.N. (2013).Fungal air quality in hospital rooms: a case study in Tehran Iran, *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 11(30), 1-4. doi: 10.1186/2052-336X-11-30
- 7 Park, D.U, Yeom, J.K., Lee, W.J. and Lee, K.M. (2013).Assessment of the Levels of Airborne Bacteria Gram-Negative Bacteria and Fungi in Hospital Lobbies, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10, 541-545. doi: 10.3390/ijerph10020541
- 8 Szymczak, M.J. and Gorny, R.L. (2010).Bacterial and Fungal Aerosols in Air-Conditioned Office Buildings in Warsaw Poland - The Winter Season, *Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 16(4), 465-476. doi: 10.1080/10803548.2010.11076861
- 9 Severin, B.F., Suidan, M.T., Rittmann, B.E. and Engelbrecht, R.S. (1984).Inactivation kinetics in a flow through UV reactor, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 56(2), 164-169.
<https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/inactivation-kinetics-in-a-flow-through-uv-reactor>
- 10 Kowalski, W.J. and Bahnfleth, W.P. (2000). UVGI Design Basics for Air and Surface Disinfection, *Heating Piping Air-conditioning Engineering*, pp.100-110.
<https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/uvgi-design-basics-for-air-and-surface-disinfection>
- 11 Chang, J.C.H., Osoff, S.F., Lobe, D.C., Dorfman, M.H., Dumais, C.M., Qualls, R.G. and Johnson, J.D. (1985). Inactivation of pathogenic and indicator microorganisms, *Applied and Environmental Microbiology*, 49(6), 1361-1365.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC241729/>
- 12 Sharp, G. (1939). The lethal action of short ultraviolet rays on several common pathogenic bacteria, *Journal of Bacteriology*, 37, 447-459.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC374478/>
13. Lawrence, M.G. (2005).The relationship between relative humidity and the dew point temperature in moist air: A simple conversion and applications, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 225-233.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
14. Buck, A.L. (1981).New equations for computing vapor pressure and enhancement factor, *Journal of Applied Meteorology*, 20, 1527-1532. doi: 10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2
15. Goff, J.A. (1957).Saturation pressure of water on the new Kelvin temperature scale, *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 347-354.
16. Severin, B.F., Suidan, M.T. and Engelbrecht, R.S. (1983).Effects of temperature on ultraviolet light disinfection, *Environmental Science & Technology*, 17(12),

- 717-721.<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es00118a006>
17. Fletcher, A. (2004). The Influence of Relative Humidity on the UV Susceptibility of Airborne Gram Negative Bacteria Louise, Aerobiology Research Group, University of Leeds, 6(1), 12-19.<https://www.iuvanews.com/stories/pdf/archives/060101Fletcher%20Paper.pdf>
 18. Peccia, J.L., Werth, H.M., Miller, S.M. and Hernandez, M.T. (2001). Effects of Relative Humidity on the Ultraviolet Induced Inactivation of Airborne Bacteria, *Aerosol Science and Technology*, 35, 728-740.<https://doi.org/10.1080/02786820152546770>
 19. Riley, R.L. and Kaufman, E.J. (1972). Effect of Relative Humidity on the Inactivation of Airborne *Serratiamarcescens* by Ultraviolet Radiation, *Applied Microbiology*, 23(6), 1113-1120.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC380516/>
 20. Gwangpyo, K., First, M.W. and Burge, H.A. (2015).The Characterization of Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation in Inactivating Airborne Microorganisms, *Environmental Health Perspectives*, 110(1), 95-101.doi: 10.1289/ehp.0211095
 21. Peccia, J.L. and Hernandez, M.T. (2004).UV-Induced Inactivation Rates for Airborne *Mycobacteriumbovis* BCG, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(7), 430-435.doi: 10.1080/15459620490458495
 22. Peccia, J.L. and Hernandez, M.T. (2001). Photoreactivation in Airborne *Mycobacterium parafortuitum*, *Applied and Environmental Microbiology*, 67(9), 4225-4232. doi: 10.1128/AEM.67.9.4225-4232.2001
 23. Environmental Control for Tuberculosis. Basic Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation Guidelines for Healthcare Settings, Department of Health and Human Services, NIOSH, 2009.<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-105/pdfs/2009-105.pdf>
 24. ASHRAE Standard 62.1-2013
https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/62_1_2013_p_20150707.pdf
 25. Τεχνική οδηγία 2425/86 του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας (TOTEE).

A REVIEW ABOUT THE EFFECT OF RELATIVE HUMIDITY ON THE AIR STERILIZATION PROCESS USING ULTRAVIOLET GERMICIDAL IRRADIANCE IN AIR CONDITIONED AREAS

Giorgos P.Kouropoulos
BSc energy technology engineer, TEI of Athens
E – mail: etmecheng@gmail.com

Abstract

The present article deals with the literature review and research for the effect of relative humidity of conditioned air on the inactivation ability of pathogens and microorganisms when applying UV-C ultraviolet irradiance. The article also examines whether the inactivation ability of pathogens is influenced by the thermal comfort conditions for a room air conditioning. The conclusion of this article is that the inactivation ability of pathogens, and by extension, the sterilization efficiency of the air during the air sterilization process with ultraviolet irradiance, in most cases decreases as the relative humidity of the air increases, but generally is different depending on the type of pathogen. The change of sterilization efficiency in relation to relative humidity is influenced by intensity level of UV-C irradiance. The required thermal comfort conditions has no particular impact on the sterilization efficiency of the air.