

Φασματοσκοπία ορατού: βασικές αρχές,
οργανολογία, εφαρμογές. Κατασκευή
φασματοσκοπίου και
φασματοφωτόμετρου χαμηλού κόστους
για χρήση στο σχολικό εργαστήριο.
Μεταφορά της γνώσης στην
εκπαιδευτική διαδικασία.

Νόβας Γεώργιος

Μεταπτ. Φοιτητής

ΚΦΕ/ΣΘΕΤ,

ΕΑΠ

novas.giorgos@gmail.com
std138480@ac.eap.gr

Ιωάννης Καπόλος

Μέλους ΣΕΠ

Καθηγητής και

Μέλος ΣΕΠ

ΚΦΕ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

i.kapolos@go.uop.gr

Περίληψη: Η εργασία πραγματεύεται τη φασματοσκοπία ορατού ως τεχνική ανάλυσης και ως εργαλείο διδασκαλίας. Περιγράφεται η κατασκευή τριών φασματοφωτόμετρων χαμηλού κόστους και τροποποίηση σχολικού φασματοσκοπίου ώστε να υποστηρίζονται ποιοτικές και ποσοτικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα τεκμηριώνουν ότι διατάξεις χαμηλού κόστους μπορούν να προσφέρουν υψηλή γραμμικότητα και επαναληψιμότητα για τις ανάγκες του σχολικού εργαστηρίου.

Λέξεις-Κλειδιά: Φασματοσκοπία ορατού; Νόμος Beer–Lambert; Φασματοφωτόμετρο χαμηλού κόστους; Σχολικό εργαστήριο; Διδακτικό σενάριο

I. Εισαγωγή

Η φασματοσκοπία ορατού φωτός αποτελεί θεμελιώδη τεχνική στην Αναλυτική Χημεία, με εφαρμογές στον ποσοτικό προσδιορισμό ουσιών βάσει της απορρόφησης ακτινοβολίας συγκεκριμένου μήκους κύματος. Παράλληλα, μπορεί να αξιοποιηθεί ως διδακτικό εργαλείο, αναδεικνύοντας έννοιες όπως το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, η δομή της ύλης και οι αρχές της ποσοτικής ανάλυσης στη σχολική τάξη. Ωστόσο, τα εμπορικά φασματοφωτόμετρα είναι συνήθως ακριβά και η διαθεσιμότητά τους σε σχολικά εργαστήρια είναι περιορισμένη. Αυτή η πραγματικότητα έχει δημιουργήσει ανάγκη για εναλλακτικές, οικονομικές λύσεις που θα επιτρέψουν στους μαθητές να εμπλακούν σε πρακτική διερεύνηση φαινομένων φασματοσκοπίας. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί αρκετές προσεγγίσεις DIY (Do-It-Yourself) φασματοφωτόμετρων, χρησιμοποιώντας απλά υλικά όπως χαρτόνι, CDs/DVDs ως φράγματα περίθλασης, smartphones ως ανιχνευτές, ή

εξαρτήματα Arduino, με αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, έχουν κατασκευαστεί φθηνά φασματοφωτόμετρα με 3D-εκτυπωμένα μέρη ή κουτιά (shoe-box spectrophotometer), τα οποία επιτυγχάνουν γραμμικότητα $R^2 \sim 0,99$ και ακρίβεια συγκρίσιμη με αυτήν των εμπορικών οργάνων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός φασματοφωτόμετρου χαμηλού κόστους κατάλληλου για το σχολικό εργαστήριο, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωσή του στην εκπαιδευτική διαδικασία. Παράλληλα, τροποποιήθηκε το σχολικό φασματοσκόπιο, διευρύνοντας τις δυνατότητές του και σε φάσματα διαλυμάτων. Τέλος, σχεδιάστηκε ένα διδακτικό σενάριο βασισμένο στις ανωτέρω κατασκευές, προκειμένου η νέα γνώση και τεχνολογία να μεταφερθεί αποτελεσματικά στους μαθητές, καλλιεργώντας βιωματική κατανόηση του νόμου Beer–Lambert και των φασματικών φαινομένων. Η παρακάτω εργασία παρουσιάζει τη μεθοδολογία υλοποίησης των παραπάνω και τα επιλεγμένα αποτελέσματα που προέκυψαν, καταδεικνύοντας τη συμβολή της ΜΔΕ στην υπάρχουσα γνώση και πρακτική.

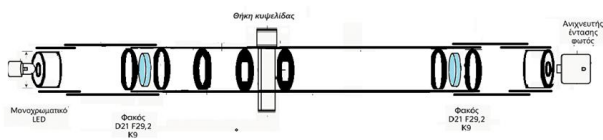
II. Μεθοδολογία

Για την επίτευξη των στόχων, ακολουθήθηκε μια ερευνητική μεθοδολογία σε δύο βασικούς άξονες: (α) την κατασκευή και αξιολόγηση των αυτοσχέδιων φασματοφωτόμετρων και (β) τη διδακτική αξιοποίηση τους.

Ανάπτυξη πρωτοτύπων φασματοφωτόμετρων: Κατασκευάστηκαν τρία διαδοχικά πρωτότυπα DIY φασματοφωτόμετρα ορατού, χρησιμοποιώντας ως πηγή ένα πράσινο LED (~520 nm) και διάφορους φωτοανιχνευτές χαμηλού κόστους. Το Φωτόμετρο 1 ήταν μια απλή διάταξη σωλήνα (PVC, βαμμένος μαύρος εσωτερικά) μήκους ~10 cm και διαμέτρου 18 mm, χωρίς φακούς συγκλίνουσας δέσμης ή κατάλληλη θωράκιση. Ως ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε ένας στοιχειώδης αισθητήρας φωτός (Light Sensor 2.1), συνδεδεμένος με πλατφόρμα Arduino Uno για τη συλλογή δεδομένων. Μετά την αρχική αξιολόγηση, εντοπίστηκαν αρκετοί περιορισμοί στη σχεδίαση του Φωτόμετρου 1 (περιορισμένο δυναμικό εύρος ανίχνευσης, υψηλό ποσοστό παράσιτου φωτός, μη σταθερή τοποθέτηση κυψελίδας κ.ά.). Έτσι, το Φωτόμετρο 2 ενσωμάτωσε βελτιώσεις: χρησιμοποιήθηκε ένας πιο προηγμένος ψηφιακός αισθητήρας φωτός (VEML7700, 16-bit) με πολύ ευρύτερο δυναμικό εύρος, προστέθηκαν δακτύλιοι στον οπτικό σωλήνα για μείωση του διάχυτου φωτός, καθώς και δύο φακοί ώστε η δέσμη LED να γίνεται περίπου παράλληλη μέσα από την κυψελίδα και να εστιάζεται στον ανιχνευτή. Τέλος, το Φωτόμετρο 3 (Σχήμα 1) σχεδιάστηκε με περαιτέρω αναβαθμίσεις:

χρησιμοποιήθηκε ο υψηλής ευαισθησίας αισθητήρας TSL2591 (ψηφιακός, 16-bit), ο οποίος μπορεί να ανιχνεύσει φωτεινή ένταση σε εύρος τιμών αρκετά μεγαλύτερο από τους προηγούμενους. Επιπλέον, κατασκευάστηκε ειδική σταθερή θήκη για την κυψελίδα, βελτιώνοντας τη γεωμετρία και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Παράλληλα, βελτιστοποιήθηκε περαιτέρω η θωράκιση του οπτικού συστήματος (ελαχιστοποίηση εισόδου περιβάλλοντος φωτός).

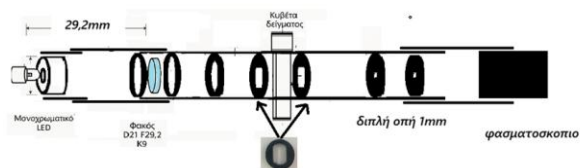
Κάθε διάταξη βαθμονομήθηκε πριν τις μετρήσεις, ρυθμίζοντας την ένταση του LED έτσι ώστε η αρχική ισχύς P_0 (με διαλύτη στην κυψελίδα) να αξιοποιεί ~80–90% του δυναμικού εύρους του εκάστοτε ανιχνευτή, αποφεύγοντας τον κορεσμό. Επίσης διασφαλίστηκε η σταθερή ευθυγράμμιση όλων των οπτικών στοιχείων (LED, φακοί, κυψελίδα, ανιχνευτής) εντός του οπτικού σωλήνα.



Σχήμα 1: Η διάταξη του φασματοφωτόμετρου 3.

Πειραματικές μετρήσεις: Και τα τρία φασματοφωτόμετρα δοκιμάστηκαν με την ίδια διαδικασία: μετρήθηκε η απορρόφηση A (ως $A = \log(P_0/P)$) διαλυμάτων της κόκκινης χρωστικής Allura Red AC σε σειρά γνωστών συγκεντρώσεων (περίπου 1×10^{-6} έως 3×10^{-5} M, σε υδατικό διάλυμα). Για κάθε όργανο λήφθηκαν πολλαπλές μετρήσεις ανά συγκέντρωση ώστε να εκτιμηθεί η επαναληψιμότητα. Από τα δεδομένα κάθε διάταξης χαράχθηκε η καμπύλη βαθμονόμησης (διάγραμμα απορρόφησης A συναρτήσει συγκέντρωσης c) και υπολογίστηκε ο συντελεστής μοριακής απορροφητικότητας ϵ (από την κλίση της ευθείας κατά Beer–Lambert). Επίσης, καταγράφηκαν τυχόν αποκλίσεις από τη γραμμικότητα (ένδειξη κορεσμού ή σφαλμάτων) και συγκρίθηκαν οι δυναμικές περιοχές των τριών οργάνων. Επιπλέον, αξιολογήθηκαν οι κύριες πηγές σφάλματος (π.χ. διάχυτο φως, θερμική αστάθεια LED, η γεωμετρία της κυψελίδας) που επηρέαζαν τις μετρήσεις κάθε πρωτοτύπου.

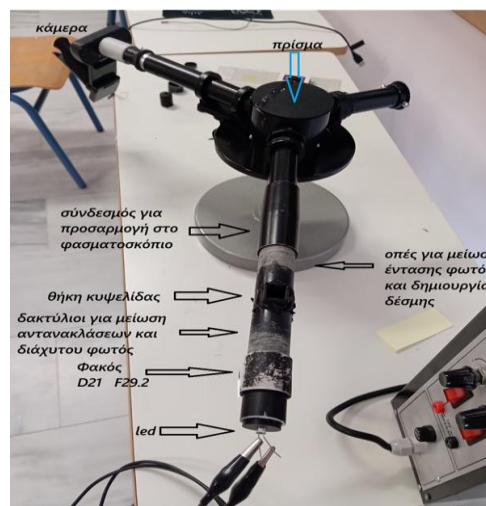
Τροποποίηση φασματοσκοπίου & διδακτικό σενάριο:



Εικόνα 2: Τροποποίηση της διάταξης για ενσωμάτωση στο σχολικό φασματοσκόπιο.

Το σχολικό φασματοσκόπιο τροποποιήθηκε ώστε να είναι δυνατή η λήψη φασμάτων διαλυμάτων. Για τον

σκοπό αυτό αξιοποιήθηκε η διάταξη του Φασματοφωτόμετρου 3, με δύο τροποποιήσεις: στη θέση του δεύτερου φακού τοποθετήθηκαν δύο οπές διαμέτρου 1 mm, ενώ ο ανιχνευτής αφαιρέθηκε (Σχήμα 2). Η διάταξη αυτή προσαρμόστηκε στο σχολικό φασματοσκόπιο (Σχήμα 3). Στον προσοφθάλμιο φακό τοποθετήθηκε κάμερα USB, η οποία συνδέθηκε με υπολογιστή εξοπλισμένο με το λογισμικό Theremino Spectrometer, το οποίο μετατρέπει το οπτικό σήμα της κάμερας σε φάσμα έντασης φωτός.

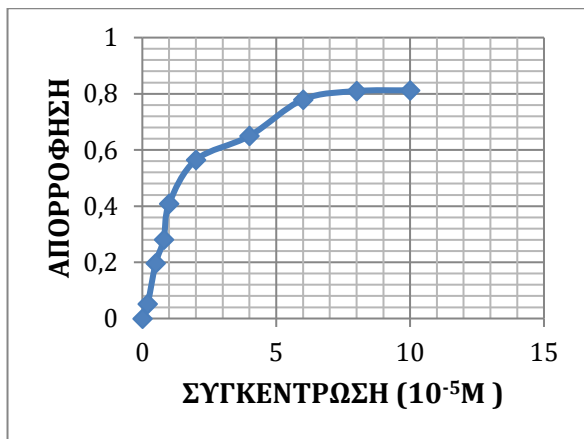


Σχήμα 3: Τελική διάταξη τροποποιημένου σχολικού φασματοσκοπίου.

Τέλος, σχεδιάστηκε ένα αναλυτικό διδακτικό σενάριο 2 ωρών που ενσωματώνει τις παραπάνω διατάξεις: στην πρώτη ώρα οι μαθητές παρατηρούν τα φάσματα διαφόρων έγχρωμων διαλυμάτων, ενώ στη δεύτερη ώρα χρησιμοποιούν το φασματοφωτόμετρο για ποσοτικές μετρήσεις (λήψη δεδομένων A - c , κατασκευή γραφήματος βαθμονόμησης, εξαγωγή συμπερασμάτων για άγνωστα δείγματα και αξιολόγηση της ακρίβειας).

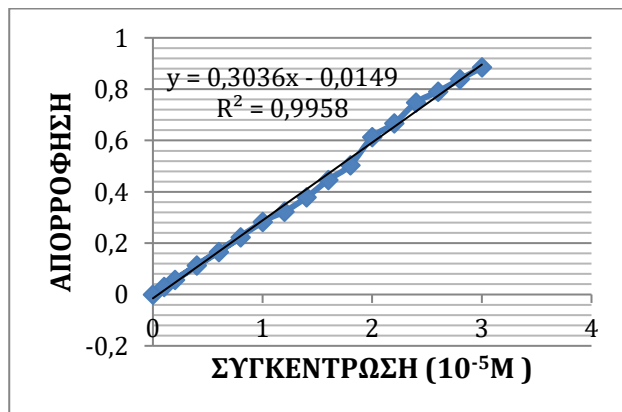
III. Επιλεγμένα Αποτελέσματα

Φασματοφωτόμετρο 1 — Βασική αναφορά απόδοσης: Το Φασματοφωτόμετρο 1, με ανιχνευτή Light Sensor 2.1, εμφάνισε γρήγορο κορεσμό και στενή γραμμική περιοχή ($R^2 \approx 0,986$). Η παρουσία σημαντικού παρεισφρέοντος φωτός και η μη σταθερή γεωμετρία της κυψελίδας επηρέασαν την ακρίβεια, οδηγώντας σε $RSD \approx 5$ –7% για $A < 0,5$. Η κλίση της ευθείας είχε μεγάλη αβεβαιότητα και η συσκευή κρίθηκε ακατάλληλη για ακριβή ποσοτικοποίηση πέραν πολύ αραιών διαλυμάτων.



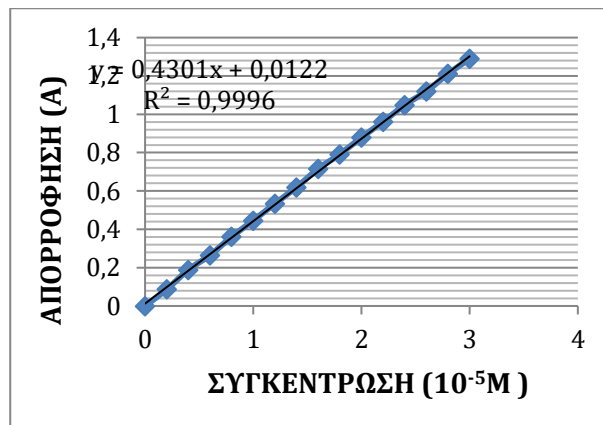
Σχήμα 4: Μετρήσεις από το Φασματοφωτόμετρο 1.

Φασματοφωτόμετρο 2 — Η γραμμικότητα επεκτάθηκε μέχρι $\approx 3 \times 10^{-5}$ M με $R^2 \approx 0,996$ (Σχήμα 5). Το σήμα χαμηλού επιπέδου σταθεροποιήθηκε ($RSD \approx 2-3\%$ για $A < 0,5$). Σε υψηλές απορροφήσεις παρέμειναν μικρές αποκλίσεις από τη γραμμικότητα λόγω υπολειπόμενου διάχυτου φωτός, μικρών σφαλμάτων ευθυγράμμισης και μη σταθερής γεωμετρίας της κυψελίδας.

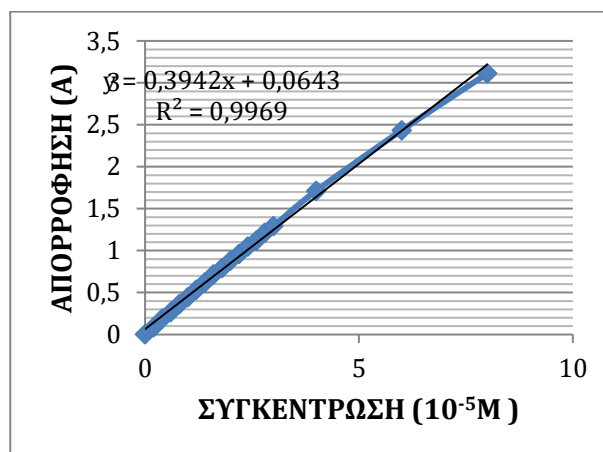


Σχήμα 5: Μετρήσεις από το Φασματοφωτόμετρο 2.

Φασματοφωτόμετρο 3 — Βέλτιστη επίδοση: Ο TSL2591 προσέφερε πολύ μεγάλο δυναμικό εύρος και χαμηλό θόρυβο. Η βαθμονόμηση στο κύριο εύρος ($0-3 \times 10^{-5}$ M) έδωσε $y = 0,4301 \cdot x + 0,0122$ με $R^2 = 0,9996$ (Σχήμα 6), ενώ για υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκε ελαφρά μείωση της κλίσης ($y = 0,3942 \cdot x + 0,0643$, $R^2 = 0,9969$ (Σχήμα 7) που αποδίδεται σε φαινόμενα διάχυτου φωτός και μη μονοχρωματικής ακτινοβολίας του LED (Σχήμα 7). Η επαναληψιμότητα ήταν ιδιαίτερα καλή ($RSD \approx 1-1,5\%$ για $A < 1$), χωρίς ενδείξεις κορεσμού στο κύριο εύρος.



Σχήμα 6: Μετρήσεις από το φασματοφωτόμετρο 3 (γραμμικότητα).

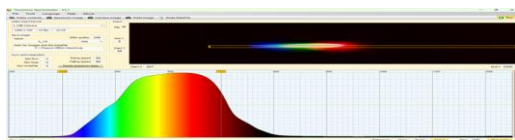


Σχήμα 7: Μετρήσεις από το φασματοφωτόμετρο 3 σε υψηλότερες συγκεντρώσεις.

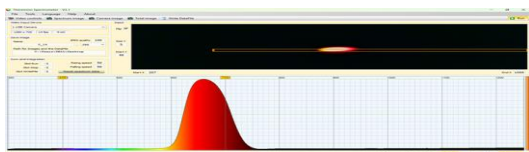
Οι τιμές αυτές επαρκούν για σχολικά πειράματα με διαδοχικές αραιώσεις και επιτρέπουν ανίχνευση πολύ αραιών διαλυμάτων.

Ανάλυση σφαλμάτων: Οι κυριότερες πηγές ήταν (α) διάχυτο/παράσιτο φως, (β) θερμική αστάθεια LED, (γ) σφάλματα λόγω μη σταθερής γεωμετρίας της κυψελίδας, (δ) μη μονοχρωματικότητα του LED. Η βελτιωμένη θωράκιση και η σταθερή θήκη κυψελίδας μείωσαν τα (α),(γ). Για το (β) εφαρμόστηκε χρόνος προθέρμανσης, ενώ για το (δ) επιλέχτηκε χρωστική με μέγιστο απορρόφησης στο μήκος κύματος του LED.

Ερμηνεία φασμάτων από το τροποποιημένο σχολικό φασματοσκόπιο: Η σύγκριση των φασμάτων του λευκού LED με διαλύτη και με διάλυμα Allura Red (Σχήματα 8–9) δείχνει σαφή ελάττωση της έντασης στην περιοχή απορρόφησης της χρωστικής στο ορατό ($\approx 400-580$ nm). Η διαφορά αυτή εξηγεί το ερυθρό χρώμα του διαλύματος και συνδέεται ποσοτικά με τις μετρήσεις απορρόφησης, γεφυρώνοντας ποιοτική και ποσοτική προσέγγιση.



Σχήμα 8: Φάσμα του λευκού LED μέσα από καθαρό διαλύτη.



Σχήμα 9: Φάσμα του λευκού LED μέσα από διάλυμα Allura Red.

IV. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, παρουσιάστηκε η κατασκευή τριών εκδοχών φασματοφωτόμετρου χαμηλού κόστους και η επιτυχής εφαρμογή τους στον νόμο Beer–Lambert. Το τρίτο πρωτότυπο (TSL2591) επέδειξε γραμμικότητα $R^2 \sim 0,9996$ και ανίχνευση έως 10^{-6} M. Κρίσιμοι παράγοντες για την επίδοση ήταν η θωράκιση από παράσιτο φως και η σταθερή ευθυγράμμιση της οπτικής διαδρομής. Η προτεινόμενη διδακτική προσέγγιση καθιστά τη φασματοσκοπία προσιτή και λειτουργική στο σχολικό εργαστήριο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bevziuk, K. C., et al. (2017). Spectrophotometric and theoretical studies of the protonation of Allura Red AC and Ponceau 4R. *Journal of Molecular Structure*, 1130, 216–224.
- Bruininks, B. D., et al. (2022). An inexpensive 3D-printed periscope-type smartphone-based spectrophotometer for emission, absorption, and fluorescence spectrometry. *Journal of Chemical Education*, 99(7), 2168–2174.
- Grasse, E. K., & O'Brien, A. G. (2016). 3D Printed Smartphone Spectrophotometer for Education and Outreach. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 146–151.
- Abdul Halim, A. S. (2023). Development of a home-built UV–Visible spectrophotometer employing Arduino microcontroller system for chemical analysis. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 27(5), 935–945.
- Baker, M. J. (2015). The shoe box spectrophotometer: A simple, low-cost instrument for teaching absorption spectroscopy. *Journal of Chemical Education*, 92(1), 178–182.
- Bruininks, B. D., et al. (2022). An inexpensive 3D-printed periscope-type smartphone-based spectrophotometer for emission, absorption, and fluorescence spectrometry. *Journal of Chemical Education*, 99(7), 2168–2174.
- DelMonache, G. (2025). Multipurpose DIY spectrophotometer for teaching analytical chemistry. *Journal of Chemical Education*. Advance online publication.
- Grasse, E. K., & O'Brien, A. G. (2016). 3D printed smartphone spectrophotometer for education and outreach. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 146–151.
- Kolesnichenko, P. V., et al. (2023). Viking spectrophotometer: A home-built, simple, and cost-efficient absorption and fluorescence spectrophotometer for education in chemistry. *Journal of Chemical Education*, 100(3), 1128–1137.
- Kuntzleman, T. (2015). Build your own spectrophotometer with a smartphone. *Journal of Chemical Education*, 92(10), 1690–1694.
- Kvittingen, E. V., et al. (2016). Simple and inexpensive UV-photometer using LEDs as both light source and detector. *Journal of Chemical Education*, 93(1), 159–164.
- Laganovska, K. B., et al. (2020). Portable low-cost open-source wireless spectrophotometer for fast and reliable measurements. *HardwareX*, 8, e00149.
- Moll, J. (2014). Building a simple spectroscope for the classroom. *Physics Education*, 49(5), 577–583.
- Poh, S. C., Wu, D., Goh, J. X., Tan, C. Y., & Gan, S. K.-E. (2021). Portable Arduino-based UV–Vis spectrophotometer for chemistry education. *Journal of Chemical Education*, 98(2), 623–629.
- Widiatmoko, D., & Wibowo, A. (2011). Design of a low-cost spectrophotometer using cardboard and CD as diffraction grating. *Indonesian Journal of Physics Education*, 7(1), 23–28.
- Veras, G. (2009). Low-cost spectrophotometer using DVD as diffraction grating. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(4), 4501.