

**Η ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ- ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ
ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΓΝΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

ΠΑΘΙΑΚΗΣ ΠΕΡΙΚΛΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 145101

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΛΙΑΔΗΜΑ ΑΘΑΝΑΣΙΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η έρευνα στην εκπαίδευση των επιστημών έχει αναγνωρίσει τη σημασία της ιστορίας και της φιλοσοφίας της επιστήμης. Δεδομένης αυτής της προοπτικής, η παρούσα εργασία εκπονήθηκε με σκοπό την εξακρίβωση και την μελέτη ενός πλαισίου για την εξέταση του τρόπου με τον οποίο τα σχολικά βιβλία τόσο της χημείας όσο και της φυσικής περιγράφουν την κινητική θεωρία και τα σχετικά ζητήματα και κατά πόσο αυτές οι θεωρίες γίνονται αντιληπτές από τους μαθητές.

Οι μαθητές εφαρμόζουν έναν δικό τους τρόπο τόσο για να προσεγγίζουν και όσο και για να απαντήσουν στα προβλήματα φυσικής. Θα μπορούσαν να κάνουν τα πάντα για να λύσουν ένα πρόβλημα που τους δίνεται. Ένα από τα υποκεφάλαια της φυσικής ήταν η αποτελεσματική ταχύτητα των αερίων. Περιλαμβάνεται στην Κινητική Θεωρία των Αερίων. Ήταν μια από τις πιο δύσκολες επιστημονικές θεωρίες για αποδοχή.

Η παρούσα ανάλυση που πραγματοποιείται και στην συγκεκριμένη εργασία αφορά τόσο την απόδοση των μαθητών στην Κινητική Μοριακή Θεωρία (ΚΜΤ) των αερίων όσο και την προσέγγιση τους από τους εκπαιδευτικούς. Η παρούσα διπλωματική υλοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η έκταση της κατανόησης αυτών των εννοιών της χημείας σε τρεις τρόπους αναπαράστασης, δηλαδή μακροσκοπικό, μικροσκοπικό και συμβολικό.

Λέξεις Κλειδιά: Κινητική Θεωρία Αερίων, Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση, Φυσική, Εκπαιδευτικοί, Μαθητές

SUMMARY

Research in science education has recognized the importance of the history and philosophy of science. Given this perspective, the present study was designed to identify and study a framework for examining how both chemistry and physics textbooks describe kinetic theory and related issues and how well these theories are made. perceived by students.

Students apply their own way to both approach and answer physics problems. They could do anything to solve a problem given to them. One of the sub-chapters of physics was the efficient velocity of gases. Included in the Kinetic Theory of Gases. It was one of the most difficult scientific theories to accept.

The present analysis that started in this work concerns both the performance of students in the Kinetic Molecular Theory (KMT) of gases and their approach by teachers. This dissertation was implemented to determine the extent of understanding of these concepts of chemistry in three modes of representation, namely macroscopic, microscopic and symbolic.

Keywords: Kinetic Theory of Gases, Secondary Education, Physics, Teachers, Students

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στους γονείς μου

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : Η ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ	9
1.1. Γενικά Στοιχεία	10
1.2. Ιστορική Αναδρομή.....	11
1.3. Το μοντέλο	14
1.4. Κινητική ερμηνεία της θερμοκρασίας.....	16
1.5. Παραγωγή του Νόμου για το Ιδανικό Αέριο	17
1.6. Μοριακή Φύση Της Ύλης.....	21
1.7. Συμπεριφορά Αερίων	23
1.8. Επίλυση της εξίσωσης και η εμφάνιση ορισμένων προβληματισμών	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Η ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	34
2.1. Ανάλυση της Κατανόησης της Κινητικής Θεωρίας Μεταξύ των Μαθητών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης	34
2.1.1. Το χημικό Τρίγωνο.....	35
2.1.2. Ανασκόπηση των μέχρι τώρα ευρημάτων από τις βιβλιογραφικές πηγές	38
2.1.3 Μελέτη Περίπτωσης.....	40
Συμπέρασμα, Συστάσεις και Περιορισμοί	52
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	53
Παράρτημα Α.....	58
Παράρτημα Β.....	59

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αέρια: Μικρά μόρια σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, τα οποία βρίσκονται σε τυχαία θέση και συγκρούονται συχνά.....	10
Εικόνα 2: Όταν ένα μόριο συγκρούεται με ένα άκαμπτο τοίχωμα, το συστατικό της ορμής του που είναι κάθετο στο τοίχωμα αντιστρέφεται. Μια δύναμη ασκείται έτσι στον τοίχο, δημιουργώντας πίεση.....	15
Εικόνα 3	18
Εικόνα 4	27
Εικόνα 5: Το χημικό τρίγωνο.....	36
Εικόνα 6: Ροή του IMMSA.....	41
Εικόνα 7: Δείγματα απαντήσεων από τον μαθητή E13 σε μακροσκοπικές ερωτήσεις: (1) όγκος και (2) θερμοκρασία	44
Εικόνα 8: Δείγματα εικονογραφήσεων του Μαθητή E11 σε μικροσκοπικές ερωτήσεις: (α) όγκος, (β) θερμοκρασία και (γ) πίεση.....	46
Εικόνα 9: Δείγμα απεικόνισης της διαχυσιμότητας όπως κατασκευάστηκε από τον Μαθητή E7.....	47
Εικόνα 10: Δείγμα- απόσπασμα από το τεστ του Μαθητή E8 σε συμβολικές ερωτήσεις	49
Εικόνα 12: Μια αλληλεπίδραση μεταξύ Μάκρο-Μίκρο- Συμβολική περιγραφή πώς λειτουργεί μια χύτρα ταχύτητας.....	51

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα στο πεδίο της γνωστικής ψυχολογίας καθώς και σε αυτές της γνωσιολογίας και της κοινωνιολογίας της επιστήμης έφερε στο φως το γεγονός ότι η γνώση δεν είναι μόνο μια προσωπική επεξεργασία αλλά και μια κοινωνική και ιστορικά τοποθετημένη επεξεργασία. Επιπλέον, η έρευνα στον τομέα της διδακτικής δείχνει την έκταση της εργασίας που απαιτείται για την ατομική οικοδόμηση της γνώσης και την απόλυτη αναγκαιότητα για αιτιολόγηση αυτής της εργασίας (Fensham et al. 1994, Larochelle and Berdnaz 1994). Είναι δυνατόν να αναζητήσουμε μια τέτοια δικαίωση στην καθημερινή ζωή. Τέτοιες επιλογές έγιναν τη δεκαετία του εβδομήντα, στην ανάπτυξη προγραμμάτων σπουδών σε διάφορες χώρες, από μια περισσότερο ή λιγότερο διεπιστημονική προσέγγιση και περιλάμβαναν τεχνολογικά και κοινωνικοοικονομικά ζητήματα (Fensham 1988). Φαίνεται ωστόσο ότι οι επιλογές που διέπουν τη σύλληψη αυτών των προγραμμάτων σπουδών δεν δοκιμάστηκαν καλά. Ωστόσο, η αξιολόγηση του PLON (ένα ολλανδικό ακρωνύμιο για το Physics Curriculum Development Project) οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, παρόλο που αυτή η «πλαισίωση» της επιστημονικής μάθησης σε σχέση με προβλήματα της καθημερινής ζωής μπορεί να αυξήσει τα κίνητρα των μαθητών, δεν τους βοηθά να ξεπεράσουν μερικές αντιλήψεις κοινής λογικής και τρόπους συλλογισμού (Eijkelhof και Lijnse 1988). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργικότητα του συλλογισμού κοινής λογικής σε σχέση με προβλήματα της καθημερινής ζωής (Solomon 1983, Meheut et al. 1986, Klaasen et al. 1990).

Ένα άλλο είδος αιτιολόγησης προκύπτει από την επίλυση γνωστικών ή κοινωνικογνωστικών συγκρούσεων. Το πρόβλημα είναι να βάλουμε τους μαθητές σε μια θέση όπου ανιχνεύουν μια αντίφαση μεταξύ των προβλέψεών τους και των παρατηρήσεών τους ή μια αντίφαση μεταξύ τους (βλ. για παράδειγμα Scott et al. 1992). Όσον αφορά τα μοντέλα σωματιδίων, που εξετάζονται εδώ, φαίνεται ότι ακόμη και ενώ τα γεγονότα συμφωνούν με μια διακριτή άποψη της ύλης, μια συνεχής άποψη για την ύλη δεν μπορεί να αντικρουστεί. Το πρόβλημα είναι περισσότερο η συνύπαρξη δύο τρόπων ερμηνείας των εμπειρικών γεγονότων, που μπορούν να ενσωματωθούν μόνο με την υπέρβαση αυτής της «αντίφασης» στο πλαίσιο της κβαντικής φυσικής. (Posner et al. 1982) και von Glaserfeld (1994).

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην κατανόηση της Κινητικής Θεωρίας από τους μαθητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Θίγονται ζητήματα όπως κατά πόσο η εισαγωγή της από τους εκπαιδευτικούς γίνεται με ορθό τρόπο και κατά δεύτερον κατά πόσο εύκολα γίνεται αντιληπτή από τους μαθητές.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση της κινητικής θεωρίας των αερίων, τα γενικά χαρακτηριστικά της και γενικότερα όλα τα βασικά στοιχεία που την απαρτίζουν.

Κατόπιν στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται μία περιπτωσιολογική μελέτη η οποία αποσκοπεί στην κατανόηση της στάσης των μαθητών και στην διδασκαλία της κινητικής θεωρίας των αερίων στην δευτεροβάθμια εκπαίδευση.

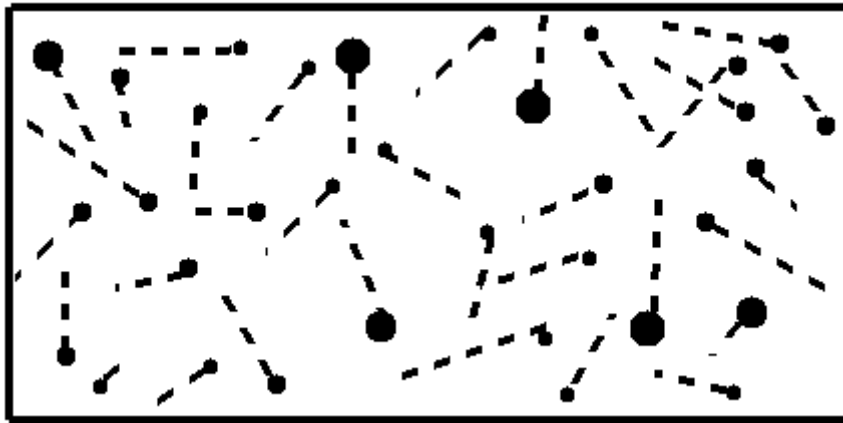
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Η ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Η κατάσταση ενός αερίου, που ρέει μεταξύ δύο παράλληλων πλακών, αναλύεται από την άποψη της κινητικής θεωρίας. Όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι απείρως μεγαλύτερη από την απόσταση μεταξύ των πλακών, η ακριβής λύση δείχνει ότι η συνάρτηση κατανομής είναι ασυνεχής σε ταχύτητα. Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των μορίων που προσκρούουν σε ένα πάτο και αυτών που φεύγουν. Διερευνούμε το πρόβλημα της εύρεσης μιας θεωρίας έγκυρης για αυθαίρετο λόγο της μέσης ελεύθερης διαδρομής προς την απόσταση της πλάκας και της ταχύτητας της πλάκας προς την ταχύτητα ήχου. Αυτό επιτυγχάνεται πιο εύκολα με τον διαχωρισμό της συνάρτησης κατανομής στα προαναφερθέντα μέρη και την επέκταση κάθε τμήματος σε πολυώνυμα στο χώρο ταχύτητας, τα οποία είναι ορθογώνια πάνω από το μισό εύρος ταχυτήτων. Σε κάθε προσέγγιση, δίνεται ακριβής απολογισμός

- (1) τις μικροσκοπικές οριακές συνθήκες,
- (2) τους νόμους διατήρησης,
- (3) η συμπεριφορά στην περιοχή χαμηλής πίεσης. (Fensham, P., et al.,1994)

Η μέθοδος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στην εξίσωση Boltzmann, αναπτύσσεται εδώ για το κινητικό μοντέλο των Bhatnager, Gross και Krook. Οι αρχές της μεταβλητότητας δηλώνονται σημειώνοντας την ομοιότητα της γραμμικοποιημένης εκδοχής αυτής της θεωρίας με την εξίσωση Milne της μεταφοράς ακτινοβολίας. Για τη μη γραμμική περίπτωση υψηλής ταχύτητας, υποδεικνύεται μια νέα προσέγγιση στην περιοχή χαμηλής πίεσης. Συζητείται η σχέση με εναλλακτικές μεθόδους. Όταν η συνάρτηση κατανομής επεκτείνεται σε ορθογώνια πολυώνυμα πλήρους εύρους, είναι απαραίτητο να μεταβείτε σε υψηλή τάξη για να λάβετε μια επαρκή αναπαράσταση της περιοχής χαμηλής πίεσης και του οριακού στρώματος. Πολύ απλές συναρτήσεις διανομής μισού εύρους δίνουν μια ακριβή περιγραφή της κατάστασης του αερίου. (Fensham, P., et al.,1994)

1.1. Γενικά Στοιχεία



Εικόνα 1: Αέρια: Μικρά μόρια σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, τα οποία βρίσκονται σε τυχαία θέση και συγκρούονται συχνά

Τα αέρια μπορούν να μελετηθούν λαμβάνοντας υπόψη τη δράση μικρής κλίμακας μεμονωμένων μορίων ή εξετάζοντας τη δράση μεγάλης κλίμακας του αερίου στο σύνολό του. Μπορούμε άμεσα να μετρήσουμε, ή να αντιληφθούμε, τη μεγάλης κλίμακας δράση του αερίου. Για να μελετήσουμε όμως τη δράση των μορίων, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα θεωρητικό μοντέλο. Το μοντέλο, που ονομάζεται κινητική θεωρία των αερίων, υποθέτει ότι τα μόρια είναι πολύ μικρά σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των μορίων. Τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή, τυχαία κίνηση και συχνά συγκρούονται μεταξύ τους και με τα τοιχώματα οποιουδήποτε δοχείου. (Fensham, P., et al., 1994)

Τα μεμονωμένα μόρια διαθέτουν την τυπική φυσική ιδιότητα της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Η πυκνότητα ενός αερίου είναι απλώς το άθροισμα της μάζας των μορίων διαιρούμενο με τον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο. Η πίεση ενός αερίου είναι ένα μέτρο της γραμμικής ορμής των μορίων. Καθώς τα μόρια του αερίου συγκρούονται με τα τοιχώματα ενός δοχείου, τα μόρια προσδίδουν ορμή στα τοιχώματα, παράγοντας μια δύναμη που μπορεί να μετρηθεί. Η δύναμη διαιρούμενη με την περιοχή ορίζεται ως η πίεση. Η θερμοκρασία ενός αερίου είναι ένα μέτρο της μέσης κινητικής ενέργειας του αερίου. Τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση και υπάρχει μια ενέργεια (μάζα x τετράγωνο της ταχύτητας) που σχετίζεται με αυτή την κίνηση. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση. (Klaasen, C, et al., 1990)

Σε ένα στερεό, η θέση των μορίων μεταξύ τους παραμένει σχεδόν σταθερή. Αλλά σε ένα αέριο, τα μόρια μπορούν να κινούνται και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους με διαφορετικούς τρόπους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχει πάντα μια τυχαία συνιστώσα της μοριακής κίνησης. Ολόκληρο το ρευστό μπορεί να κινηθεί επίσης με διατεταγμένη κίνηση (ροή). Η διατεταγμένη κίνηση υπερτίθεται ή προστίθεται στην κανονική τυχαία κίνηση των μορίων. Σε μοριακό επίπεδο, δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ του τυχαίου συστατικού και του διατεταγμένου συστατικού. Μετράμε την πίεση που παράγεται από το τυχαίο συστατικό ως στατική πίεση. Η πίεση που παράγεται από τη διατεταγμένη κίνηση ονομάζεται δυναμική πίεση. Και η εξίσωση του Bernoulli μας λέει ότι το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής πίεσης είναι η συνολική πίεση που μπορούμε επίσης να μετρήσουμε. (Klaasen, C, et al., 1990)

1.2. Ιστορική Αναδρομή

Η κινητική θεωρία των αερίων προήλθε από την αρχαία ιδέα ότι η ύλη αποτελείται από μικροσκοπικά αόρατα άτομα σε γρήγορη κίνηση. Τον 17ο αιώνα αυτή η ιδέα αναβίωθηκε και χρησιμοποιήθηκε για να εξηγήσει, μεταξύ άλλων φαινομένων, τις ιδιότητες των αερίων.

Ο Βρετανός χημικός και φυσικός Robert Boyle (1627-1691), βασιζόμενος στο έργο πολλών άλλων επιστημόνων του 17ου αιώνα, έδειξε ότι ο αέρας είναι «ελαστικός»: ανθίσταται στη συμπίεση και διαστέλλεται για να γεμίσει τον διαθέσιμο χώρο. Η μηχανική πίεση P που ασκείται από μια δεδομένη ποσότητα αερίου σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον όγκο V του δοχείου του, μια σχέση που τώρα είναι γνωστή ως «Νόμος του Boyle». (Stephen G. Brush ,2004)

Ο Boyle ανέφερε δύο εναλλακτικές ατομικιστικές εξηγήσεις για την πίεση του αέρα:

(1) ο αέρας αποτελείται από σωματίδια που απωθούν το ένα το άλλο, όπως κουλουριασμένα κομμάτια μαλλί ή ελατήρια

(2) ο αέρας αποτελείται από στροβιλιζόμενα σωματίδια που σπρώχνουν το ένα το άλλο μακριά από κρούσεις. (Stephen G. Brush ,2004)

Η πρώτη υπόθεση υιοθετήθηκε από τον Issac Newton, ο οποίος απέδειξε μαθηματικά ότι εάν η πίεση του αέρα οφείλεται στην απώθηση γειτονικών σωματιδίων, τότε η απωστική δύναμη πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογη με τις αποστάσεις τους.

Η δεύτερη υπόθεση, την οποία ο Boyle συσχέτισε με τις αιθερικές δίνες του Descartes, δεν είχε ποσοτική βάση τον 17ο αιώνα, αν και κέρδισε ποιοτική υποστήριξη από την κοινή ιδέα ότι η θερμότητα σχετίζεται με την ατομική κίνηση και από την παρατήρηση ότι η πίεση του αέρα αυξάνεται με τη θερμοκρασία.

Ο Ελβετός μαθηματικός φυσικός Daniel Bernoulli (1700-1782) διατύπωσε μια ποσοτική κινητική θεωρία στο βιβλίο του για την υδροδυναμική. Εξήγαγε τον νόμο του Boyle για την πίεση αερίου υπολογίζοντας τη δύναμη που ασκείται σε ένα κινητό έμβολο από τις κρούσεις n σωματιδίων που κινούνται με ταχύτητα u , σε έναν κλειστό χώρο συνολικού όγκου V . Εάν το V είναι μικρότερο, η πίεση θα είναι μεγαλύτερη επειδή τα σωματίδια χτυπούν το έμβολο πιο συχνά. Εάν ο χώρος που καταλαμβάνουν τα ίδια τα σωματίδια είναι μικρός σε σύγκριση με τον όγκο V , η πίεση P πρέπει να είναι αντιστρόφως ανάλογη του V . Έτσι, όπως δηλώνεται από το νόμο του Boyle, το γινόμενο PV είναι σταθερό (βλ. Bernoulli, 1738). Ο Bernoulli έδειξε επίσης ότι η πίεση θα είναι ανάλογη με την κινητική ενέργεια των σωματιδίων ($\frac{1}{2}nmv^2$, όπου m είναι η μάζα ενός μόνο σωματιδίου) αφού η συχνότητα των κρούσεων είναι ανάλογη με την ταχύτητα u και η δύναμη κάθε κρούσης είναι ανάλογη με την ορμή mv . (Stephen G. Brush ,2004)

Αυτό, παρατήρησε, εξήγησε το παρατηρούμενο γεγονός ότι οι αυξήσεις της πίεσης που προκύπτουν από ίσες αυξήσεις της θερμοκρασίας είναι ανάλογες με την πυκνότητα και πρότεινε ότι η ίδια η θερμοκρασία θα μπορούσε να οριστεί ως η πίεση του αέρα σε μια τυπική πυκνότητα. (Stephen G. Brush ,2004)

Αν και άλλοι επιστήμονες δεν είχαν ακόμη αποδεχτεί την έννοια της απόλυτης κλίμακας θερμοκρασίας, η θεωρία του Bernoulli εισήγαγε την ιδέα ότι η θερμότητα ή η θερμοκρασία θα μπορούσαν να ταυτιστούν με την κινητική ενέργεια των σωματιδίων σε ένα ιδανικό αέριο.

Πειραματικές εργασίες στα αέρια γύρω στο 1800 επιβεβαίωσαν την απλή σχέση μεταξύ πίεσης, όγκου και θερμοκρασίας που υπέθεσε ο Bernoulli. Ο Γάλλος χημικός Joseph GayLussac (1778-1850) και άλλοι έδειξαν ότι η πίεση αυξάνεται αναλογικά με τη θερμοκρασία εάν ο όγκος διατηρείται σταθερός ή ο όγκος αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία εάν η πίεση διατηρείται σταθερή.

Αυτές οι σχέσεις μπορούν να συνοψιστούν στην εξίσωση $PV = NR(t+273)$, όπου το N είναι ανάλογο με τη συνολική μάζα του αερίου που υπάρχει, t είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (εκατόβαθμοι) και R είναι μια καθολική σταθερά.

Αλλά δεν ήταν ακόμη γνωστό εάν η εξίσωση θα ίσχυε σε θερμοκρασίες τόσο χαμηλές ώστε $(t + 273)$ να είναι μηδέν, ή εάν όλα τα αέρια θα συμπυκνωθούν πριν φτάσει σε αυτό το σημείο "απόλυτου ψύχους", οπότε η εξίσωση δεν θα ισχύει πλέον.

Η κινητική θεωρία δεν έγινε ευρέως αποδεκτή τον 18ο αιώνα. Οι περισσότεροι επιστήμονες προτίμησαν τη Νευτώνεια θεωρία απώθησης, η οποία ήταν συμβατή με την ιδέα ότι η θερμότητα είναι ένα ρευστό, «θερμιδικό», παρά με την ενέργεια της ατομικής κίνησης. Θεωρήθηκε μερικές φορές ότι το θερμιδικό υλικό αποτελείται από σωματίδια που απωθούν το ένα το άλλο και έλκονται από τα άτομα της συνηθισμένης ύλης. Έτσι η πίεση του αερίου αυξάνεται με τη θερμοκρασία επειδή το αέριο αποκτά περισσότερο από το αυτοαπωθητικό θερμιδικό υγρό. Η ίδια η θερμοκρασία θα μπορούσε να οριστεί ως η πυκνότητα των θερμίδων (ποσότητα του θερμιδικού υγρού διαιρεμένη με όγκο). (Stephen G. Brush ,2004)

Με αυτόν τον ορισμό της θερμοκρασίας, η θερμιδική θεωρία θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί η συμπίεση μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία ενός αερίου ακόμα κι αν δεν προστίθεται θερμότητα από το εξωτερικό (η ίδια ποσότητα θερμίδων συγκεντρώνεται σε μικρότερο όγκο) ή η διαστολή μπορεί να μειώσει τη θερμοκρασία ακόμα και αν δεν χάνεται θερμότητα (η ίδια ποσότητα θερμίδων κατανέμεται σε μεγαλύτερο όγκο). Υπήρχε όμως μια ανώμαλη παρατήρηση, η σημασία της οποίας δεν εκτιμήθηκε παρά πολύ αργότερα: ο Gay Lussac ανακάλυψε ότι στην ελεύθερη διαστολή ενός αερίου (στο κενό αντί για την ώθηση ενός εμβόλου) δεν υπάρχει πρακτικά καμία αλλαγή στη θερμοκρασία. (Stephen G. Brush ,2004)

Η θερμιδική θεωρία θα μπορούσε επίσης να εξηγήσει φαινόμενα όπως η λανθάνουσα θερμότητα των μεταπτώσεων φάσης (στερεό σε υγρό ή υγρό σε αέριο) και τη

θερμότητα που απορροφάται ή απελευθερώνεται στις χημικές αντιδράσεις, υποθέτοντας ότι ορισμένες θερμίδες είναι «δεσμευμένες» στα μεμονωμένα άτομα ή ενώσεις. Οι συνήθεις σχέσεις πίεσης-όγκου των αερίων καθορίζονται από την αδέσμευτη ή «ελεύθερη» θερμίδα που γεμίζει το χώρο μεταξύ των σωματιδίων.

Η κινητική θεωρία φαινόταν να μην προσφέρει καμία εύλογη περιγραφή αυτών των φαινομένων, και επιπλέον η υπόθεσή της ότι τα άτομα κινούνται με σταθερή ταχύτητα μεταξύ των συγκρούσεων φαινόταν ασυμβίβαστη με τη γενικά αποδεκτή ιδέα ότι όλος ο χώρος είναι γεμάτος με ένα αιθέριο ρευστό.

Τέλος, η θερμιδική θεωρία απέκτησε αξιοπιστία στις αρχές του 19ου αιώνα από τη χρήση της από τον Laplace για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου στα αέρια, επιλύοντας μια μακροχρόνια ασυμφωνία μεταξύ θεωρίας και παρατήρησης και υποστηρίχθηκε έμμεσα από την αποδοχή της σωματιδιακής θεωρίας του φωτός, αφού το φως και η θερμότητα θεωρούνταν ευρέως ως ποιοτικά πανομοιότυπα φαινόμενα. (Stephen G. Brush ,2004)

1.3. Το μοντέλο

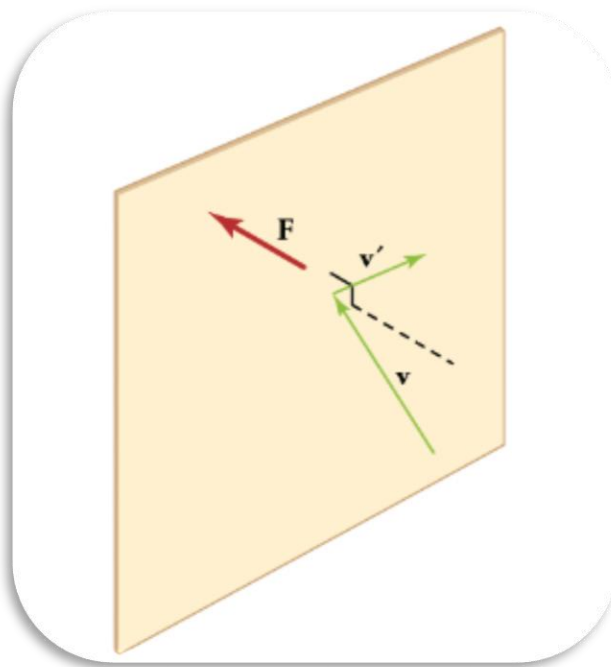
Οι πέντε βασικές αρχές της κινητικής-μοριακής θεωρίας είναι οι εξής:

1. Ένα αέριο αποτελείται από μόρια που χωρίζονται από μέσες αποστάσεις που είναι πολύ μεγαλύτερες από τα μεγέθη των ίδιων των μορίων. Ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια του αερίου είναι αμελητέος σε σύγκριση με τον όγκο του ίδιου του αερίου.
2. Τα μόρια ενός ιδανικού αερίου δεν ασκούν ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους ή στα τοιχώματα του δοχείου.
3. Τα μόρια βρίσκονται σε συνεχή τυχαία κίνηση, και ως υλικά σώματα, υπακούουν στους νόμους κίνησης του Νεύτωνα. Αυτό σημαίνει ότι τα μόρια κινούνται σε ευθείες γραμμές (δείτε την εικόνα επίδειξης στα αριστερά) μέχρι να συγκρουστούν μεταξύ τους ή με τα τοιχώματα του δοχείου.
4. Οι συγκρούσεις είναι απόλυτα ελαστικές, όταν δύο μόρια συγκρούονται, αλλάζουν τις κατευθύνσεις και την κινητική τους ενέργεια, αλλά η συνολική κινητική ενέργεια διατηρείται. Οι συγκρούσεις δεν είναι «κολλώδεις».
5. Η μέση κινητική ενέργεια των μορίων του αερίου είναι ευθέως ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία. Παρατηρήστε ότι ο όρος "μέσος όρος" είναι πολύ σημαντικός εδώ. οι ταχύτητες και οι κινητικές ενέργειες των μεμονωμένων μορίων θα καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τιμών, και μερικά θα έχουν ακόμη και

μηδενική ταχύτητα σε μια δεδομένη στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι κάθε μοριακή κίνηση θα σταματούσε εάν η θερμοκρασία μειωνόταν στο απόλυτο μηδέν. (2.6: Kinetic Theory of Gases)

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το μεγαλύτερο μέρος του όγκου που καταλαμβάνεται από ένα αέριο είναι κενός χώρος. Αυτό είναι το κύριο χαρακτηριστικό που διακρίνει τα αέρια από τις συμπυκνωμένες καταστάσεις της ύλης (υγρά και στερεά) στις οποίες γειτονικά μόρια βρίσκονται σε συνεχή επαφή. Τα μόρια αερίου βρίσκονται σε γρήγορη και συνεχή κίνηση. σε συνηθισμένες θερμοκρασίες και πιέσεις οι ταχύτητες τους είναι της τάξης των 0,1-1 km/sec και κάθε μόριο υφίσταται περίπου 10^{10} συγκρούσεις με άλλα μόρια κάθε δευτερόλεπτο. (2.6: Kinetic Theory of Gases)

Εάν τα αέρια στην πραγματικότητα αποτελούνται από ευρέως διαχωρισμένα σωματίδια, τότε οι παρατηρήσιμες ιδιότητες των αερίων πρέπει να είναι εξηγήσιμες από την άποψη της απλής μηχανικής που διέπει τις κινήσεις των μεμονωμένων μορίων. Η κινητική μοριακή θεωρία καθιστά εύκολο να δούμε γιατί ένα αέριο πρέπει να ασκεί πίεση στα τοιχώματα ενός δοχείου. Οποιαδήποτε επιφάνεια έρχεται σε επαφή με το αέριο βομβαρδίζεται συνεχώς από τα μόρια. (2.6: Kinetic Theory of Gases)



Εικόνα 2: Όταν ένα μόριο συγκρούεται με ένα άκαμπτο τοίχωμα, το συστατικό της ορμής του που είναι κάθετο στο τοίχωμα αντιστρέφεται. Μια δύναμη ασκείται έτσι στον τοίχο, δημιουργώντας πίεση

Σε κάθε σύγκρουση, ένα μόριο που κινείται με ορμή mv χτυπά με την ίδια ταχύτητα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Αυτή η μεταβολή στην ταχύτητα Δv ισοδυναμεί με επιτάχυνση a όπου σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, μια δύναμη $f = ma$ ασκείται έτσι στην επιφάνεια της περιοχής A ασκώντας πίεση $P = f/A$. (2.6: Kinetic Theory of Gases)

1.4. Κινητική ερμηνεία της θερμοκρασίας

Σύμφωνα με την κινητική μοριακή θεωρία, η μέση κινητική ενέργεια ενός ιδανικού αερίου είναι ευθέως ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία. Η κινητική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα λόγω της κίνησής του:

$$KE = \frac{mv^2}{2}$$

Καθώς η θερμοκρασία ενός αερίου αυξάνεται, η μέση ταχύτητα των μορίων θα αυξάνεται. διπλασιασμός της θερμοκρασίας θα αυξήσει αυτή την ταχύτητα κατά τέσσερις φορές. Οι συγκρούσεις με τα τοιχώματα του δοχείου θα μεταφέρουν περισσότερη ορμή, και επομένως περισσότερη κινητική ενέργεια, στα τοιχώματα. Εάν τα τοιχώματα είναι ψυχρότερα από το αέριο, θα ζεσταθούν, επιστρέφοντας λιγότερη κινητική ενέργεια στο αέριο και αναγκάζοντάς το να κρυώσει μέχρι να επιτευχθεί θερμική ισορροπία. Επειδή η θερμοκρασία εξαρτάται από τη μέση κινητική ενέργεια, η έννοια της θερμοκρασίας ισχύει μόνο για ένα στατιστικά σημαντικό δείγμα μορίων.

Θα έχουμε περισσότερα να πούμε για τις μοριακές ταχύτητες και τις κινητικές ενέργειες παρακάτω. . (2.6: Kinetic Theory of Gases)

- Κινητική εξήγηση του νόμου του Boyle: Ο νόμος του Boyle εξηγείται εύκολα από την κινητική μοριακή θεωρία. Η πίεση ενός αερίου εξαρτάται από τον αριθμό των φορών ανά δευτερόλεπτο που τα μόρια χτυπούν στην επιφάνεια του δοχείου. Εάν συμπιέσουμε το αέριο σε μικρότερο όγκο, ο ίδιος αριθμός μορίων ενεργούν τώρα σε μικρότερο εμβαδόν επιφάνειας, οπότε ο αριθμός που χτυπά ανά μονάδα εμβαδού, και επομένως η πίεση, είναι τώρα μεγαλύτερος.

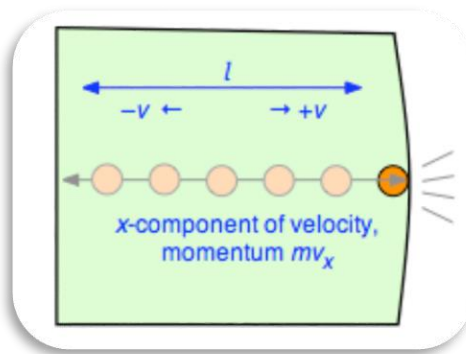
- Κινητική εξήγηση του νόμου του Charles: Η κινητική μοριακή θεωρία δηλώνει ότι μια αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων. Εάν τα μόρια κινούνται πιο γρήγορα αλλά η πίεση παραμένει η ίδια, τότε τα μόρια πρέπει να μείνουν πιο μακριά, έτσι ώστε η αύξηση του ρυθμού με τον οποίο τα μόρια συγκρούονται με την επιφάνεια του δοχείου να αντισταθμίζεται από μια αντίστοιχη αύξηση στην περιοχή αυτή την επιφάνεια καθώς το αέριο διαστέλλεται.
- Κινητική εξήγηση του νόμου του Avogadro: Αν αυξήσουμε τον αριθμό των μορίων αερίου σε ένα κλειστό δοχείο, περισσότερα από αυτά θα συγκρουστούν με τα τοιχώματα ανά μονάδα χρόνου. Εάν η πίεση παραμένει σταθερή, ο όγκος πρέπει να αυξάνεται αναλογικά, έτσι ώστε τα μόρια να χτυπούν τα τοιχώματα λιγότερο συχνά και σε μεγαλύτερη επιφάνεια.
- Κινητική εξήγηση του νόμου του Dalton: «Κάθε αέριο είναι ένα κενό σε κάθε άλλο αέριο». Αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο ο Dalton δήλωσε αυτό που σήμερα γνωρίζουμε ως νόμο των μερικών πιέσεων του. Σημαίνει απλώς ότι κάθε αέριο που υπάρχει σε ένα μείγμα αερίων δρα ανεξάρτητα από τα άλλα. Αυτό είναι λογικό λόγω μιας από τις θεμελιώδεις αρχές της θεωρίας ΚΜΤ ότι τα μόρια αερίου έχουν αμελητέους όγκους. Έτσι το Αέριο Α σε μείγμα Α και Β ενεργεί σαν να μην υπήρχε καθόλου το Αέριο Β. Το καθένα συνεισφέρει τη δική του πίεση στη συνολική πίεση μέσα στο δοχείο, σε αναλογία με το κλάσμα των μορίων που αντιπροσωπεύει. . (2.6: Kinetic Theory of Gases)

1.5. Παραγωγή του Νόμου για το Ιδανικό Αέριο

Ένας από τους θριάμβους της κινητικής μοριακής θεωρίας ήταν η εξαγωγή του νόμου των ιδανικών αερίων από την απλή μηχανική στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα. Αυτό είναι ένα όμορφο παράδειγμα του πώς οι αρχές της στοιχειώδους μηχανικής μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα απλό μοντέλο για να αναπτυχθεί μια χρήσιμη περιγραφή της συμπεριφοράς της μακροσκοπικής ύλης. Ξεκινάμε υπενθυμίζοντας ότι η πίεση ενός αερίου προκύπτει από τη δύναμη που ασκείται όταν τα μόρια συγκρούονται με τα τοιχώματα του δοχείου. Αυτή η δύναμη μπορεί να βρεθεί από το νόμο του Νεύτωνα:

$$f = ma = m \frac{dv}{dt}$$

στο οποίο v είναι η συνιστώσα της ταχύτητας του μορίου στην κατεύθυνση κάθετη προς το τοίχωμα και m είναι η μάζα του. (kinetic theory of gases)



Εικόνα 3

Για να αξιολογήσετε την παράγωγο, που είναι η μεταβολή της ταχύτητας ανά μονάδα χρόνου, θεωρήστε ένα μόνο μόριο αερίου που περιέχεται σε ένα κυβικό κουτί μήκους l .

Για απλότητα, υποθέστε ότι το μόριο κινείται κατά μήκος του άξονα x που είναι κάθετος σε ένα ζεύγος τοιχωμάτων, έτσι ώστε να αναπηδά συνεχώς εμπρός και πίσω μεταξύ του ίδιου ζεύγους τοιχωμάτων. Όταν το μόριο μάζας m χτυπήσει το τοίχωμα με ταχύτητα $+v$ (και επομένως με ορμή mv) θα αναπηδήσει ελαστικά και θα καταλήξει να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση με $-v$. Η συνολική μεταβολή της ταχύτητας ανά σύγκρουση είναι επομένως $2v$ και η μεταβολή της ορμής είναι $2mv$. (kinetic theory of gases)

Μετά τη σύγκρουση το μόριο πρέπει να διανύσει μια απόσταση l στο απέναντι τοίχωμα και μετά να επιστρέψει σε αυτήν την ίδια απόσταση πριν συγκρουστεί ξανά με το εν λόγω τοίχωμα. Αυτό καθορίζει το χρόνο μεταξύ των διαδοχικών συγκρούσεων με έναν δεδομένο τοίχο. Ο αριθμός των συγκρούσεων ανά δευτερόλεπτο θα είναι $v/2l$. Η

δύναμη F που ασκείται στον τοίχο είναι ο ρυθμός μεταβολής της ορμής, που δίνεται από το γινόμενο της μεταβολής της ορμής ανά σύγκρουση και τη συχνότητα σύγκρουσης:

$$F = \frac{d(mv_x)}{dt} = (2mv_x) \times \left(\frac{v_x}{2l}\right) = \frac{mv_x^2}{l}$$

Η πίεση είναι δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, οπότε η πίεση P που ασκεί το μόριο στο τοίχωμα της διατομής l^2 γίνεται

$$P = \frac{mv^2}{l^3} = \frac{mv^2}{V}$$

στο οποίο V είναι ο όγκος του κουτιού. (kinetic theory of gases)

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, οποιοδήποτε δεδομένο μόριο θα κάνει περίπου τον ίδιο αριθμό κινήσεων προς τη θετική και την αρνητική κατεύθυνση, επομένως η λήψη ενός απλού μέσου όρου θα έδινε μηδέν. Για να αποφύγουμε αυτή την αμηχανία, τετραγωνίζουμε τις ταχύτητες προτού τις υπολογίσουμε κατά μέσο όρο

$$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + v_4^2 \dots v_N^2}{N} = \frac{\sum_i v_i^2}{N}$$

και μετά παίρνουμε την τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι γνωστό ως ρίζα μέση τετραγωνική ταχύτητα (rms).

$$v_{rms} = \sqrt{\bar{v}^2}$$

Έχουμε υπολογίσει την πίεση που οφείλεται σε ένα μόνο μόριο που κινείται με σταθερή ταχύτητα σε κατεύθυνση κάθετη σε τοίχο. Αν τώρα εισάγουμε περισσότερα μόρια, πρέπει να ερμηνεύσουμε το v^2 ως μια μέση τιμή που θα συμβολίσουμε με \bar{v} . Επίσης, δεδομένου ότι τα μόρια κινούνται τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις, μόνο το ένα τρίτο της συνολικής ταχύτητάς τους θα κατευθυνθεί κατά μήκος οποιοδήποτε καρτεσιανού άξονα, οπότε η συνολική πίεση που ασκείται από τα N μόρια γίνεται:

$$P = \frac{N}{3} \frac{m\bar{v}^2}{V}$$

Υπενθυμίζοντας ότι το $m\bar{v}^2/2$ είναι η μέση μεταφορική κινητική ενέργεια ϵ , μπορούμε να ξαναγράψουμε την παραπάνω έκφραση ως

$$PV = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} N \epsilon$$

Ο παράγοντας $2/3$ της αναλογικότητας αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι συνιστώσες της ταχύτητας σε καθεμία από τις τρεις κατευθύνσεις συμβάλλουν $1/2$ kT στην κινητική ενέργεια του σωματιδίου. Η μέση μεταφορική κινητική ενέργεια είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασίας:

$$\epsilon = \frac{3}{2} kT$$

στην οποία η σταθερά αναλογικότητας k είναι γνωστή ως σταθερά Boltzmann.

Τώρα αναπροσαρμόζοντας τις άνωθεν εξισώσεις έχουμε:

$$PV = \left(\frac{2}{3} N\right) \left(\frac{3}{2} kT\right) = NkT$$

Η σταθερά του Boltzmann k είναι απλώς η σταθερά του αερίου ανά μόριο. Για n mole σωματιδίων η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$PV = nRT$$

Που είναι και ο νόμος ιδανικών αερίων. (kinetic theory of gases)

1.6. Μοριακή Φύση Της Ύλης

Ο Richard Feynman, ένας από τους μεγάλους φυσικούς του 20ου αιώνα, θεωρεί πολύ σημαντική την ανακάλυψη ότι «η ύλη αποτελείται από άτομα». Η ανθρωπότητα μπορεί να υποστεί αφανισμό (λόγω πυρηνικής καταστροφής) ή εξαφάνιση (λόγω περιβαλλοντικών καταστροφών) εάν δεν ενεργήσουμε με σύνεση. Εάν συμβεί αυτό, και όλη η επιστημονική γνώση καταστρεφόταν, τότε ο Feynman θα ήθελε η «Ατομική Υπόθεση» να κοινοποιηθεί στην επόμενη γενιά πλασμάτων στο σύμπαν. Ατομική Υπόθεση: Όλα τα πράγματα αποτελούνται από άτομα - μικρά σωματίδια που κινούνται σε αέναη κίνηση, έλκονται το ένα το άλλο όταν βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, αλλά απωθούνται όταν συμπιέζονται το ένα μέσα στο άλλο. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Η εικασία ότι η ύλη μπορεί να μην είναι συνεχής, υπήρχε σε πολλά μέρη και πολιτισμούς. Ο Δημόκριτος στην Ελλάδα είχε προτείνει ότι η ύλη μπορεί να αποτελείται από αδιαίρετα συστατικά. Η επιστημονική «Ατομική Θεωρία» συνήθως πιστώνεται στον John Dalton. Πρότεινε την ατομική θεωρία για να εξηγήσει τους νόμους ορισμένων και πολλαπλών αναλογιών που υπακούουν τα στοιχεία όταν συνδυάζονται σε ενώσεις.

Ο πρώτος νόμος λέει ότι κάθε δεδομένη ένωση έχει μια σταθερή αναλογία κατά μάζα των συστατικών της. Ο δεύτερος νόμος λέει ότι όταν δύο στοιχεία σχηματίζουν περισσότερες από μία ενώσεις, για μια σταθερή μάζα ενός στοιχείου, οι μάζες των άλλων στοιχείων είναι σε αναλογία μικρών ακεραίων. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Για να εξηγήσει τους νόμους ο Dalton πρότεινε, περίπου 200 χρόνια πριν, ότι τα μικρότερα συστατικά ενός στοιχείου είναι άτομα. Τα άτομα ενός στοιχείου είναι πανομοιότυπα αλλά διαφέρουν από αυτά των άλλων στοιχείων. Ένας μικρός αριθμός ατόμων κάθε στοιχείου συνδυάζεται για να σχηματίσει ένα μόριο της ένωσης. Ο νόμος του Gay Lussac, που δόθηκε επίσης στις αρχές του 19ου αιώνα, δηλώνει: Όταν τα αέρια

συνδυάζονται χημικά για να δώσουν ένα άλλο αέριο, οι όγκοι τους είναι σε αναλογίες μικρών ακεραίων. Ο νόμος (ή η υπόθεση) του Avogadro λέει: Ίσοι όγκοι όλων των αερίων σε ίση θερμοκρασία και πίεση έχουν τον ίδιο αριθμό μορίων.

Ο νόμος του Avogadro, όταν συνδυάζεται με τη θεωρία του Dalton εξηγεί το νόμο του Gay Lussac. Δεδομένου ότι τα στοιχεία έχουν συχνά τη μορφή μορίων, η ατομική θεωρία του Dalton μπορεί επίσης να αναφέρεται ως η μοριακή θεωρία της ύλης. Η θεωρία είναι πλέον καλά αποδεκτή από τους επιστήμονες. Ωστόσο, ακόμη και στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα υπήρχαν διάσημοι επιστήμονες που δεν πίστευαν στην ατομική θεωρία. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Από πολλές παρατηρήσεις, τον τελευταίο καιρό γνωρίζουμε πλέον ότι τα μόρια (που αποτελούνται από ένα ή περισσότερα άτομα) αποτελούν την ύλη. Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια και τα μικροσκόπια σάρωσης σήραγγας μας δίνουν τη δυνατότητα να τα δούμε ακόμη και το μέγεθος ενός ατόμου είναι περίπου ένα Angstrom (10^{-10}m).

Στα στερεά, τα οποία είναι σφιχτά συσκευασμένα, τα άτομα απέχουν περίπου μερικά Angstroms (2\AA) μεταξύ τους. Στα υγρά ο διαχωρισμός μεταξύ των ατόμων είναι επίσης περίπου ο ίδιος. Στα υγρά τα άτομα δεν είναι τόσο άκαμπτα όπως στα στερεά και μπορούν να κινηθούν.

Αυτό επιτρέπει σε ένα υγρό να ρέει. Στα αέρια οι διατομικές αποστάσεις είναι σε δεκάδες Angstroms. Η μέση απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα μόριο χωρίς σύγκρουση ονομάζεται μέση ελεύθερη διαδρομή. Η μέση ελεύθερη διαδρομή, στα αέρια, είναι της τάξης των χιλιάδων Angstroms. Τα άτομα είναι πολύ πιο ελεύθερα σε αέρια και μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις χωρίς σύγκρουση. Εάν δεν είναι κλειστά, τα αέρια διασκορπίζονται. Στα στερεά και τα υγρά η εγγύτητα καθιστά σημαντική τη διατομική δύναμη. Η δύναμη έχει έλξη μεγάλης εμβέλειας και απόκρουση μικρής εμβέλειας. Τα άτομα έλκονται όταν βρίσκονται σε λίγα Angstroms αλλά απωθούνται όταν πλησιάζουν.

Η στατική εμφάνιση ενός αερίου είναι παραπλανητική. Το αέριο είναι γεμάτο δραστηριότητα και η ισορροπία είναι δυναμική. Σε δυναμική ισορροπία, τα μόρια συγκρούονται και αλλάζουν την ταχύτητά τους κατά τη σύγκρουση. Μόνο οι μέσες ιδιότητες είναι σταθερές. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Η ατομική θεωρία δεν είναι το τέλος της αναζήτησής μας, αλλά η αρχή. Τώρα γνωρίζουμε ότι τα άτομα δεν είναι αδιαίρετα ή στοιχειώδη. Αποτελούνται από πυρήνα και ηλεκτρόνια.

Ο ίδιος ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια αποτελούνται πάλι από κουάρκ. Ακόμη και τα κουάρκ μπορεί να μην είναι το τέλος της ιστορίας. Μπορεί να υπάρχουν στοιχειώδεις οντότητες σαν συμβολοσειρά. Η φύση πάντα μας έχει εκπλήξει, αλλά η αναζήτηση της αλήθειας είναι συχνά απολαυστική και οι ανακαλύψεις όμορφες.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα περιοριστούμε στην κατανόηση της συμπεριφοράς των αερίων (και λίγο στερεών), ως μια συλλογή κινούμενων μορίων σε αδιάκοπη κίνηση. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

1.7. Συμπεριφορά Αερίων

Οι ιδιότητες των αερίων είναι πιο κατανοητές από αυτές των στερεών και των υγρών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι σε ένα αέριο, τα μόρια είναι μακριά το ένα από το άλλο και οι αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις τους είναι αμελητέα, εκτός από την περίπτωση που δύο μόρια συγκρούονται.

Τα αέρια σε χαμηλές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες πολύ πάνω από αυτήν στην οποία υγροποιούνται (ή στερεοποιούνται) ικανοποιούν κατά προσέγγιση μια απλή σχέση μεταξύ της πίεσης, της θερμοκρασίας και του όγκου τους που δίνεται από

$$PV = KT$$

για ένα δεδομένο δείγμα αερίου. Εδώ T είναι η θερμοκρασία σε kelvin ή (απόλυτη) κλίμακα. Το K είναι μια σταθερά για το δεδομένο δείγμα αλλά ποικίλλει ανάλογα με τον όγκο του αερίου. Αν τώρα φέρουμε την ιδέα των ατόμων ή των μορίων, τότε το K είναι ανάλογο με τον αριθμό των μορίων, (ας πούμε) N στο δείγμα. Μπορούμε να γράψουμε $K = Nk$. Η παρατήρηση μας λέει ότι αυτό το k είναι ίδιο για όλα τα αέρια. Ονομάζεται σταθερά Boltzmann και συμβολίζεται με k_B . (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Όπως και

$$\frac{P_1 V_1}{N_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{N_2 T_2}$$

Όπου η παραπάνω σχέση ισούται με το k_B δηλαδή είναι σταθερό.

Εάν τα P , V και T είναι ίδια, τότε το N είναι επίσης ίδιο για όλα τα αέρια. Αυτή είναι η υπόθεση του Avogadro, ότι ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου είναι ο ίδιος για όλα τα αέρια σε μια σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Ο αριθμός σε 22,4 λίτρα οποιουδήποτε αερίου είναι $6,02 \times 10^{23}$.

Αυτός είναι γνωστός ως αριθμός Avogadro και συμβολίζεται με N_A . Η μάζα 22,4 λίτρων οποιουδήποτε αερίου είναι ίση με το μοριακό του βάρος σε γραμμάρια σε S.T.P (τυπική θερμοκρασία 273 K και πίεση 1 atm).

Αυτή η ποσότητα ουσίας ονομάζεται mole (βλ. Κεφάλαιο 2 για πιο ακριβή ορισμό). Ο Avogadro είχε μαντέψει την ισότητα των αριθμών σε ίσους όγκους αερίου σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση από χημικές αντιδράσεις. Η κινητική θεωρία δικαιολογεί αυτή την υπόθεση. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Η εξίσωση του τέλει αερίου μπορεί να γραφτεί ως

$$PV = nRT$$

Όπου μ είναι ο αριθμός των moles και $R = N_A k_B$ είναι μια καθολική σταθερά. Η θερμοκρασία T είναι απόλυτη θερμοκρασία. Επιλέγοντας κλίμακα Κέλβιν για απόλυτη θερμοκρασία, $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Εδώ

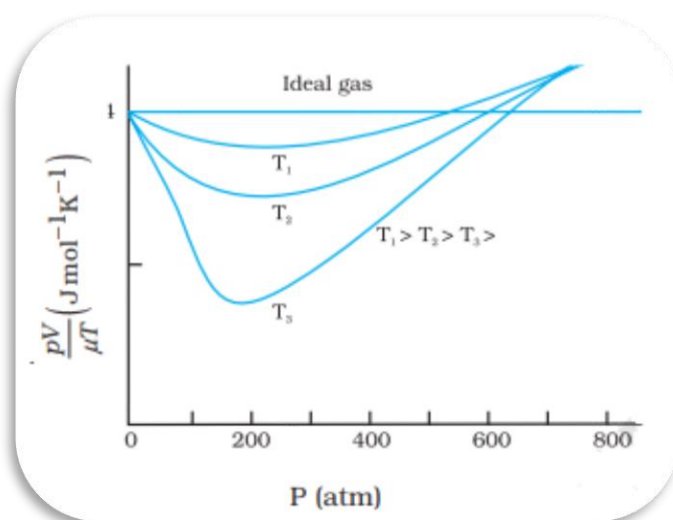
$$n = \frac{M}{M_o} = \frac{N}{N_A}$$

όπου M είναι η μάζα του αερίου που περιέχει N μόρια, M_o είναι η μοριακή μάζα και N_A ο αριθμός του Avogadro.

Άρα η καταστατική εξίσωση μπορεί επίσης να γραφεί και ως εξής:

$$PV = k_B NT \quad \text{or} \quad P = k_B nT$$

Παρακάτω απεικονίζεται διαγραμματικά και η συμπεριφορά των ιδανικών αερίων



Διάγραμμα 1: Τα πραγματικά αέρια προσεγγίζουν την ιδανική συμπεριφορά αερίου σε χαμηλές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες.

όπου n είναι η πυκνότητα του αριθμού, δηλαδή ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου. Το k_B είναι η σταθερά Boltzmann που εισήχθη παραπάνω. Η τιμή του σε μονάδες SI είναι $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Έτσι μία άλλη μορφή της καταστατικής εξίσωσης είναι και η εξής:

$$P = \frac{\rho RT}{M_0}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα μάζας του αερίου.

Ένα αέριο που ικανοποιεί την βασική μορφή της καταστατικής εξίσωσης ακριβώς σε όλες τις πιέσεις και θερμοκρασίες ορίζεται ως ιδανικό αέριο. Ένα ιδανικό αέριο είναι ένα απλό θεωρητικό μοντέλο ενός αερίου. Κανένα πραγματικό αέριο δεν είναι πραγματικά ιδανικό.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά αερίου για ένα πραγματικό αέριο σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Παρατηρούμε ότι όλες οι καμπύλες προσεγγίζουν την ιδανική συμπεριφορά αερίου για χαμηλές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Σε χαμηλές πιέσεις ή υψηλές θερμοκρασίες τα μόρια απέχουν πολύ μεταξύ τους και οι μοριακές αλληλεπιδράσεις είναι αμελητέες. Χωρίς αλληλεπιδράσεις το αέριο συμπεριφέρεται σαν ιδανικό.

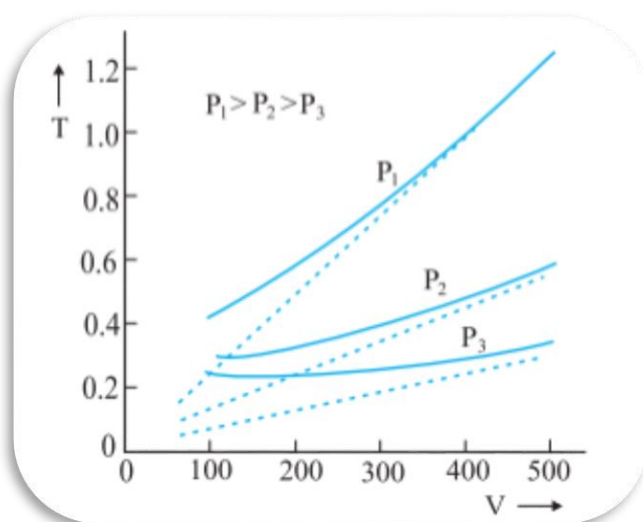
Αν διορθώσουμε τα μ και T στην βασική μορφή της καταστατικής εξίσωσης, παίρνουμε

$$PV = \text{σταθερό}$$

Τέλος, θεωρούμε ένα μείγμα ιδανικών αερίων που δεν αλληλεπιδρούν: n_1 γραμμομόρια αερίου 1, n_2 γραμμομόρια αερίου 2 κ.λπ. σε δοχείο όγκου V σε θερμοκρασία T και πίεση P . Στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι η εξίσωση της κατάστασης του το μείγμα είναι:

$$\begin{aligned} PV &= (n_1 + n_2 + \dots)RT \\ &= P_1 + P_2 + \dots \end{aligned}$$

Σαφώς $P_1 = n_1 R T / V$ είναι η πίεση που θα ασκούσε το αέριο 1 στις ίδιες συνθήκες όγκου και θερμοκρασίας εάν δεν υπήρχαν άλλα αέρια. Αυτό ονομάζεται μερική πίεση του αερίου. Έτσι, η συνολική πίεση ενός μείγματος ιδανικών αερίων είναι το άθροισμα των μερικών πιέσεων. Αυτός είναι ο νόμος του Dalton για τις μερικές πιέσεις. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

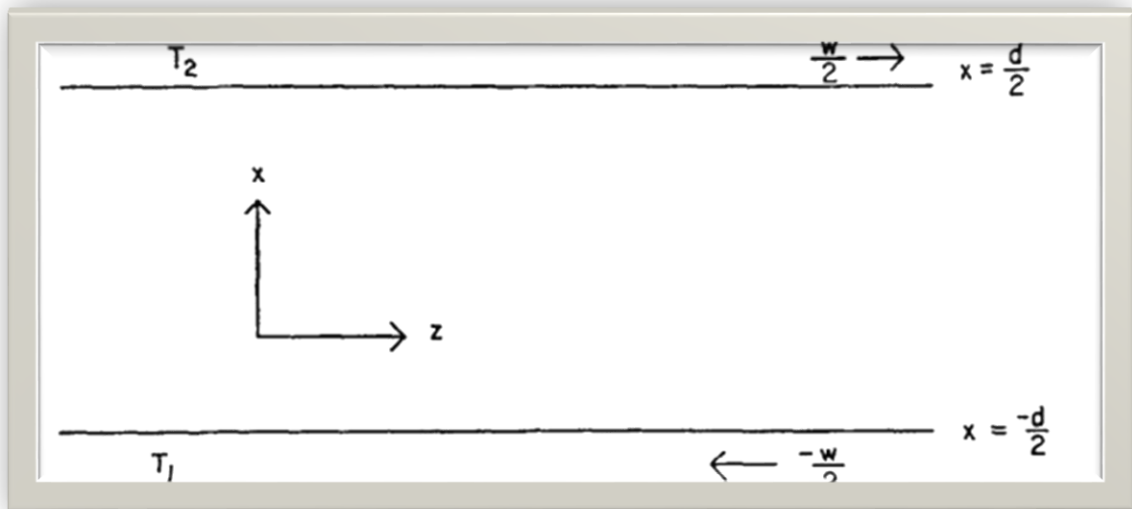


Διάγραμμα 2: Πειραματικές καμπύλες $T-V$ (συμπαγείς γραμμές) για το CO_2 σε τρεις πιέσεις σε σύγκριση με τον νόμο του Charles (διακεκομμένες γραμμές). Το T είναι σε μονάδες 300 K και το V σε μονάδες $0,13$ λίτρων.

1.8. Επίλυση της εξίσωσης και η εμφάνιση ορισμένων προβληματισμών

Η κατάσταση ενός ρέοντος μονοατομικού αερίου κοντά σε ένα στερεό όριο απασχολούσε ήδη τους πρώτους εργάτες της κινητικής θεωρίας των αερίων. Ο Maxwell έκανε αυτό που έβλεπε ως μια δοκιμαστική θεωρητική ανάλυση του προβλήματος και ουσιαστικά δεν υπήρξε περαιτέρω πρόοδος μέχρι πολύ πρόσφατα. Συζήτησε τα φαινόμενα της ταχύτητας και της ολίσθησης της θερμοκρασίας και ανέπτυξε οριακές συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τις υδροδυναμικές εξισώσεις μεταφοράς που διέπουν τη ροή του αερίου. Το ενδιαφέρον για αυτό το είδος προβλήματος έχει ανανεωθεί, εν μέρει επειδή η θεωρία έχει καθυστερήσει στην παροχή καθοδήγησης για απόδοση σε υψηλή ταχύτητα και μεγάλο υψόμετρο μετά από βία. (Grad, Harold 1949)

Για να διορθωθούν ιδέες, θα συζητηθεί το πρόβλημα της οριακής τιμής για μια συγκεκριμένη περίπτωση απλής γεωμετρίας. Θεωρήστε ένα μονοατομικό αέριο ανάμεσα σε δύο άπειρες επίπεδες πλάκες σε απόσταση d μεταξύ τους (Εικόνα. 1).



Εικόνα 4

Η επάνω πλάκα κινείται με ταχύτητα $w/2$ και η κάτω πλάκα με ταχύτητα $-w/2$. Θα υποθέσουμε ότι λαμβάνει χώρα μια σταθερή, χρονικά ανεξάρτητη ροή. Τότε, το πρόβλημα μπορεί να εξιδανικευτεί ως εξής. Τα μόρια περιγράφονται στατιστικά από

για μια συνάρτηση κατανομής ενός σωματιδίου $f(\mathbf{v}, \mathbf{x}, t)$. Στο σώμα του αερίου και απουσία εξωτερικών δυνάμεων (όπως η βαρύτητα), η f ικανοποιεί την εξίσωση Boltzmann όπως φαίνεται και παρακάτω. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f = \frac{\delta f}{\delta t}$$

Η μερική παράγωγος είναι το ολοκλήρωμα σύγκρουσης και δεν χρειάζεται να διευκρινιστεί λεπτομερώς σε αυτό το σημείο. Υπάρχουν, φυσικά, οριακές συνθήκες στους τοίχους. Αυτές αναφέρονται ως «μικροσκοπικές» οριακές συνθήκες, επειδή αφορούν τη συνάρτηση κατανομής, δηλαδή την κατάσταση των μορίων με αυθαίρετη ταχύτητα \mathbf{v} . Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις συνθήκες της υδροδυναμικής θεωρίας που περιλαμβάνουν πυκνότητα, ταχύτητα ροής και θερμοκρασία. Πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των μορίων που έρχονται προς έναν τοίχο και εκείνων που τον εγκαταλείπουν. Διαχωρίζουμε τη συνάρτηση διανομής σε αυτές τις δύο «ροές».

$$\begin{aligned} f(\mathbf{v}, \mathbf{x}) &= f^+(\mathbf{v}, \mathbf{x}) && \text{for } v_x > 0 \\ f(\mathbf{v}, \mathbf{x}) &= f^-(\mathbf{v}, \mathbf{x}) && \text{for } v_x < 0 \end{aligned}$$

Ας λάβουμε υπόψη, για παράδειγμα, την κάτω πλάκα. Η επίδραση αυτού του τοιχώματος σε ένα εισερχόμενο μόριο ταχύτητας \mathbf{v} δίνεται από έναν πυρήνα σκέδασης $P(\mathbf{v}, \mathbf{v}')$ έτσι ώστε $P(\mathbf{v}, \mathbf{v}') d\mathbf{v}'$ να είναι η πιθανότητα ότι το μόριο είναι διασκορπισμένο σε μια περιοχή $\mathbf{v}', \mathbf{v}' + d\mathbf{v}'$. Δεν θέλουμε να συζητήσουμε λεπτομερώς τις προϋποθέσεις που πληροί το P . Εν συντομία, η οριακή συνθήκη είναι ότι το ρεύμα των εξερχόμενων μορίων μιας δεδομένης ταχύτητας \mathbf{v} πρέπει να προέρχεται από την ενσωμάτωση σε όλα τα εισερχόμενα μόρια με τον πυρήνα σκέδασης και άλλα. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

$$v_x f^+(\mathbf{v}, \mathbf{x} = -d/2) = \int_{v_x' < 0} P(\mathbf{v}, \mathbf{v}') v_x' f(\mathbf{v}', -d/2) d\mathbf{v}'$$

Στη σταθερή κατάσταση δεν υπάρχει συσσώρευση μορίων στο εμπορικό κέντρο και το συνολικό ρεύμα είναι

$$\int_{>0} v_x f^+ d\mathbf{v} + \int_{<0} f^- v_x d\mathbf{v} = 0.$$

Αυτό ικανοποιείται εάν

$$\int P(\mathbf{v}, \mathbf{v}') d\mathbf{v} = 1.$$

Γενικά μπορεί κανείς να αριθμήσει $P(\mathbf{v}, \mathbf{v}') = k'(\mathbf{v}, \mathbf{v}')$ κύπελλο $(-mv^2/2kT)$, όπου T , είναι η θερμοκρασία του τοίχου, οι ταχύτητες μετρώνται σε ένα πλαίσιο αναφοράς που κινείται με τον τοίχο, και το $I(\mathbf{v}, \mathbf{v}')$ είναι μια συμμετρική συνάρτηση των \mathbf{v} και \mathbf{v}' .

Υπάρχουν δύο σχετικές αδιάστατες παράμετροι στο πρόβλημά μας. Το ένα είναι η αναλογία της μέσης ελεύθερης διαδρομής των μορίων προς την απόσταση μεταξύ των πλακών. Το άλλο είναι η σχετική ταχύτητα διαιρούμενη με την ταχύτητα του ήχου. Ωστόσο, μια βασική πτυχή του προβλήματος αναδύεται αν κοιτάξει κανείς την ακραία περιοχή Knudsen, που ορίζεται ως η περιοχή όπου η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με την απόσταση της πλάκας. Δεν είναι απαραίτητο να κάνετε κανέναν περιορισμό στην ταχύτητα της πλάκας. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούμε υποκινούνται από τις ιδιότητες της λύσης στην περιοχή Knudsen. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Επιπλέον, προκύπτει μεγάλη απλοποίηση εάν υποθέσει κανείς (όπως είναι συνήθως η κατάσταση, ιόν) ότι υπάρχει πλήρης απώλεια μνήμης όταν τα μόρια προσκρούουν σε ένα μέρος. Τότε το $P(\mathbf{v}, \mathbf{v}')$ είναι ανεξάρτητο του \mathbf{v}' . Τα αναδυόμενα μόρια λαμβάνονται για να έχουν μια Μαξγουελιανή κατανομή ταχυτήτων που χαρακτηρίζεται από τη θερμοκρασία του τοιχώματος και επικεντρώνεται γύρω από την ταχύτητα του τοιχώματος. Έτσι

$$\begin{aligned} v_x > 0 \quad f^+(\mathbf{v}, x = -d/2) \\ &= 2n^+(-d/2) \left(\frac{\beta_1}{\pi}\right)^{3/2} \exp[-\beta_1\{v_x^2 + v_y^2 + (v_z + w/2)^2\}] \\ v_x < 0 \quad f^-(\mathbf{v}, x = d/2) \\ &= 2n^-(d/2) \left(\frac{\beta_2}{\pi}\right)^{3/2} \exp[-\beta_2\{v_x^2 + v_y^2 + (v_z - w/2)^2\}] \end{aligned}$$

με $\beta_i = m/2kT_i$. Η μορφή της αναδυόμενης διασταύρωσης προδιαγράφεται, αλλά οι συντελεστές κλίμακας $n^{+/-}$ δεν είναι γνωστοί, και στην πραγματικότητα καθορίζονται στην αιτία επίλυσης του προβλήματος.

Στην περιοχή Knudsen, οι συγκρούσεις μεταξύ μορίων αερίου μπορούν να αγνοηθούν και οι κατανομές είναι ανεξάρτητες από το διάστημα. Η εξίσωση δίνει έτσι την πλήρη κατανομή ως συνάρτηση του χώρου. Έχει κανείς, λοιπόν, μόνο το δεύτερο μέρος της οριακής συνθήκης: να μην υπάρχει καθαρή ροή μερών, παγίδων προς την κατεύθυνση x . Με αυτό προσδιορίζει κανείς n^\pm και μάλιστα $n^+ \sqrt{\beta_2} = n^- \sqrt{\beta_1}$, όπου n^\pm αντιπροσωπεύει τη συνολική πυκνότητα του αριθμού των σωματιδίων στα ρεύματα $+$ και $-$, έτσι ώστε $n^+ + n^- = N$, με N την πυκνότητα του αερίου. Τότε $n^+ = N \sqrt{\beta_1} / (\sqrt{\beta_1} + \sqrt{\beta_2})$, και η συνάρτηση κατανομής προσδιορίζεται πλήρως. Σχηματίζοντας κατάλληλες ροπές ταχύτητας, βρίσκουμε τα άλματα ταχύτητας και θερμοκρασίας, την οπισθέλκουσα στις πλάκες, τη ροή θερμότητας κ.λπ. (Kinetic Molecular Theory of Gases)

Σχεδιάστηκε η παραπάνω γνωστή ακολουθία της εξίσωσης για να εστιάσουμε την προσοχή σε πολλά χαρακτηριστικά.

1. Η ανάγκη για διαχωρισμό της συνάρτησης διανομής σε θετικές και αρνητικές ροές. Γενικά η συνάρτηση έχει ενικό χαρακτήρα στο $v_x = 0$. Όταν $T_1 \neq T_2$, η f έχει ασυνέχεια στο $v_x = 0$. Υπό ορισμένες συνθήκες (όπως για τη γραμμική θεωρία καθαρής διατμητικής ροής) η συνάρτηση είναι συνεχής αλλά η πρώτη της παράγωγος είναι ασυνεχής. (Grad, Harold 1949)
2. Η λύση θα εμπλέκεται ακόμη και στην περιοχή του Knudsen εάν η $P(v, v')$ είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση. Βρίσκονται απλά αποτελέσματα για πλήρη απώλεια μνήμης, μερική απώλεια μνήμης και μερική κατοπτρική ανάκλαση ή όταν το P μπορεί να αναπαρασταθεί καλά ως το άθροισμα μερικών συναρτήσεων. Για παράδειγμα, η λειτουργική μορφή της f^+ στην κάτω πλάκα μπορεί να είναι Μαξουγουελιανή επί ενός πολυωνύμου χαμηλής τάξης ταχύτητας.
3. Η ροή θερμότητας και η ιξώδης ροή δεν είναι, γενικά, πρόσθετα ακόμη και στην περιοχή Knudsen. Για τη γραμμική μορφή, δηλαδή $T_2 - T_1 \ll T_1$ και T_2 , και $w \ll \sqrt{kT_i/m}$, η κατανομή είναι

$$f^- \rightarrow f^+ \left(1 + \frac{n^- - n^+}{n^+} + 2v_z w \beta_1 + \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1} \left(v^2 \beta_1 - \frac{3}{2} \right) \right)$$

Εδώ οι λύσεις των προβλημάτων καθαρής ροής θερμότητας ($w = 0$) και καθαρής διάτμησης ($T_1 = T_2$) προστίθενται για να δώσουν μια λύση του γενικότερου προβλήματος. Η αποτυχία αυτής της ιδιότητας στο μη γραμμικό πρόβλημα σημαίνει ότι τα δύο φαινόμενα είναι αδιαχώριστα και περιπλέκει πολύ την ανάλυση όταν η μέση ελεύθερη διαδρομή είναι πεπερασμένη. Σημειώνουμε επίσης ότι ο όρος που είναι υπεύθυνος για διάτμηση στην παραπάνω εξίσωση είναι ο όρος γραμμικός στο v . Αυτός ο όρος θα έδινε μηδενική διάτμηση εάν κάποιος δεν είχε τον χαρακτήρα δύο ρευμάτων στην πρώτη Μαξγουελιανή εξίσωση. (Grad, Harold 1949)

Στην ακόλουθη εργασία έχουμε λάβει υπόψη ότι, για να επιτευχθεί ένας απλός, ακριβής απολογισμός της μετάβασης από την περιοχή Knudsen στις υψηλές πιέσεις, πρέπει να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι που ενσωματώνουν ρητά αυτά τα χαρακτηριστικά σε χαμηλές πιέσεις. (Grad, Harold 1949)

Αντίθετα, υπενθυμίζουμε τις ιδέες της θεωρίας της ολίσθησης του Maxwell, ότι η πιο κατάλληλη είναι σε υψηλές πιέσεις. Η συνάρτηση κατανομής στο σώμα του αερίου είναι «πλήρης εμβέλεια», δηλαδή συνεχής σε ταχύτητα. Η συγκεκριμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση μιας τέτοιας κατανομής δεν είναι σημαντική. Λαμβάνουμε μια τοπικά Maxwellian συνάρτηση πολλαπλασιασμένη με ένα πολυώνυμο χαμηλού βαθμού στις συνιστώσες της ταχύτητας. Εξετάστε, για παράδειγμα, την κατανομή ταχύτητας της μεθόδου Enskog-Chapman για την περίπτωση μορίων που απωθούνται σύμφωνα με τον αντίστροφο πέμπτο νόμο. (Grad, Harold 1949)

$$f = f_{eq}(1 + \Phi); \quad \Phi = -\frac{A_i}{n} \frac{\partial \log T}{\partial x_i} - \frac{B_{ij}}{n} \frac{\partial q_j}{\partial x_i}$$

Όπου

$$\mathbf{A} = a_1(\mathbf{v} - \mathbf{q}) \left\{ \frac{m}{2kT} (\mathbf{v} - \mathbf{q})^2 - \frac{5}{2} \right\}$$

$$B_{ij} = b_1 \frac{m}{2kT} \left\{ (v_i - q_i)(v_j - q_j) - \frac{(\mathbf{v} - \mathbf{q})^2}{3} \delta_{ij} \right\}$$

$$f_{e\mathbf{q}} = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left\{ - \frac{m}{2kT} (\mathbf{v} - \mathbf{q})^2 \right\}$$

Το $b_1 = 4a_1/3$ και το a_1 είναι μια σταθερά που χαρακτηρίζει τη δύναμη της αλληλεπίδρασης. Τα $n(x)$, $q(x)$, $T(x)$ είναι η πυκνότητα, η ταχύτητα ροής και η θερμοκρασία. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα, όλα τα μεγέθη εξαρτώνται μόνο από το z , και $q_x = q_y = 0$. Για να προσδιοριστεί η χωρική εξάρτηση των n , q , T , λύνονται οι εξισώσεις Navier-Stokes. Από την παρούσα άποψη, αυτές είναι μόνο εξισώσεις ροπών που σχηματίζονται από την εξίσωση Boltzmann, με του τανυστή τάσης (δεύτερη στιγμή) και η ροή θερμότητας που προσδιορίζονται με την παραπάνω συνάρτηση κατανομής. Ωστόσο, χρειάζεται οριακές συνθήκες για αυτές τις εξισώσεις. Ο Maxwell προχωρά ουσιαστικά ως εξής. Οι εξισώσεις Xavier Stokes για το παρόν πρόβλημα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int \{v_x, v_x^2, v_x v_z, v_x v^2\} f d\mathbf{v} = 0$$

Δηλαδή ορισμένες ροπές ταχύτητας είναι σταθερές στο χώρο. Αλλά αυτές οι ροπές, στη σταθερή κατάσταση, πρέπει να είναι ίσες με τις τιμές που μεταφέρονται από τα μόρια στον τοίχο. Πρέπει τώρα να ξεπεράσουμε τη δυσκολία ότι γνωρίζουμε τη μορφή κατανομής μόνο των μορίων που αναδύονται από το τοίχωμα (εκτός από έναν παράγοντα). Ο Maxwell υποστηρίζει ότι η εξάρτηση από την ταχύτητα του εισερχόμενου ρεύματος είναι ίδια σε λιγότερο από μια μέση ελεύθερη διαδρομή από τον τοίχο όπως είναι στο σώμα του αερίου. (Grad, Harold 1949)

Παίρνοντας ως παράδειγμα την περίπτωση καθαρής διατμητικής ροής στη γραμμική προσέγγιση $w \ll \sqrt{\kappa T i / m}$.

Τότε $T_1 = T_2 = T_0$ δεν υπάρχουν διακυμάνσεις θερμοκρασίας και η μόνη διακύμανση του χώρου είναι προς την κατεύθυνση x . Η διανομή Enskog-Chapman είναι

$$f = f_0 \left\{ 1 + \frac{m}{kT} v_z q_z(x) - b_1 \frac{m}{2kT} \frac{v_x v_z}{n} \frac{\partial q_z}{\partial x} \right\}$$

$$f_0 = n \left(\frac{\beta_0}{\pi} \right)^{3/2} e^{-\beta_0 v^2}$$

Το σύνολο Navier-Stokes ανάγεται στην απλή εξίσωση που εκφράζει τη σταθερότητα της τάσης $p_{xz} = (1/n) m \int v_x v_x V_z dv$. Εισάγοντας τη συνάρτηση κατανομής βρίσκουμε $\partial q_z / \partial x = A$ ή $q_z = Ax + B$. Η εκτέλεση της μεθόδου του Maxwell για την εύρεση των συνθηκών ολίσθησης είναι ως εξής: (Grad, Harold 1949)

$$\frac{\partial q_z}{\partial x} (x = \pm d/2) = \lambda (w/2 \mp q_z(\pm d/2))$$

Όπου

$$\lambda = \frac{4n}{b_1} \sqrt{\beta_0 / \pi}$$

Αυτές οι δύο συνθήκες καθορίζουν τις σταθερές A και B . έτσι μπορούμε να βρούμε ότι:

$$q_z = \frac{\lambda w}{2 + \lambda d} x$$

$$f = f_0 \left\{ 1 + 2\beta v_z q_z - \beta v_x v_z \frac{\lambda w b_1}{2 + \lambda d} \right\}$$

$$p_{xz} = -\frac{b_1}{4\beta_0} \frac{\lambda w}{2 + \lambda d}$$

Η διανομή έχει πλέον χαρακτήρα πλήρους εύρους, αλλά έχει έναν όρο που εξαρτάται από το $v_x v_z$ που δεν υπάρχει στο όριο Knudsen. Το σύρσιμο p_{xz} είναι ανάλογη με την ταχύτητα της πλάκας w και εξαρτάται από τον λόγο της μέσης ελεύθερης διαδρομής προς το d . Εάν τα αποτελέσματα προεκταθούν τυπικά ώστε να σημαίνουν ελεύθερες διαδρομές μεγαλύτερες από το d , η οπισθέλκουσα γίνεται μεγαλύτερη από την τιμή της ελεύθερης μοριακής ροής.

Θα μπορούσε κανείς να ενώσει αυτές τις θεωρίες κατά προσέγγιση στη μέση ελεύθερη διαδρομή $\sim d$. Σημειώνουμε επίσης ότι σε υψηλές πιέσεις $d \gg b_1 \sqrt{\beta_0}$ όρος στο $v_x v_z$, μειώνεται σε σημασία σε σύγκριση με τον όρο στο v_z . Η κατανομή είναι τότε μια γραμμική τοπικά Maxwellian συνάρτηση, κατάλληλη για ένα τέλειο ρευστό σε κίνηση.

Είναι σαφές ότι μια ανάλυση ροής ολίσθησης του παραπάνω τύπου δεν είναι μια συστηματική ανάλυση της ολοκληρωτικής διαφορικής εξίσωσης Boltzmann συν οριακές συνθήκες. Η παραπάνω συζήτηση μπορεί φυσικά να γίνει για την ολίσθηση της θερμοκρασίας, και επιπλέον δεν είναι απαραίτητο να γραμμικοποιήσουμε το πρόβλημα όπως κάναμε. Για τη μη γραμμική περίπτωση πρέπει να λυθούν οι εξισώσεις Navier-Stokes υπάρχει και πάλι αλληλεπίδραση θερμικής αγωγιμότητας και ιξώδους. (Grad, Harold 1949)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2º: Η ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

2.1. Ανάλυση της Κατανόησης της Κινητικής Θεωρίας Μεταξύ των Μαθητών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης

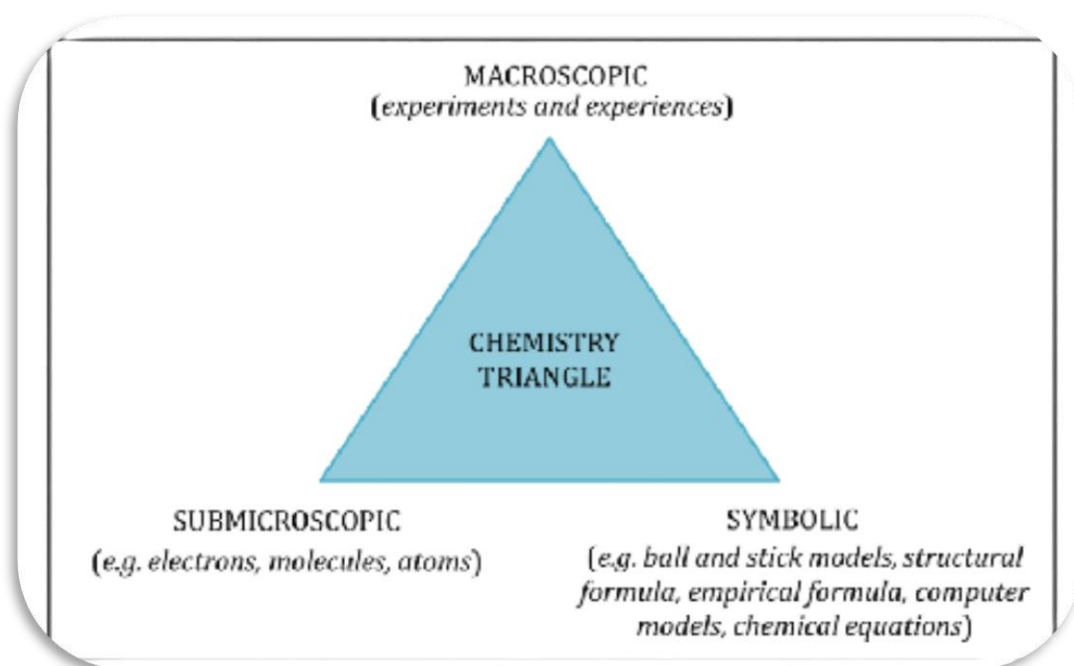
Η κατανόηση των χημικών εννοιών και διαδικασιών είναι ένας από τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόκτηση επιστημονικών, τεχνολογικών και

περιβαλλοντικών γνώσεων από τους μαθητές (Department of Education, 2016; Royal Society of Chemistry, 2011), καθώς και την προετοιμασία τους για την τριτοβάθμια εκπαίδευση (Royal Society of Chemistry, 2011). Η κατανόηση αυτών των εννοιών και διαδικασιών περιλαμβάνει την απόκτηση χημικής γνώσης όπως οι ιδιότητες της ύλης και η συμπεριφορά των υποατομικών σωματιδίων, καθώς και η εφαρμογή της στην καθημερινή ζωή, τη βιομηχανία και το περιβάλλον. Ωστόσο, οι μαθητές δυσκολεύονται να αποκτήσουν και να εφαρμόσουν τη χημική γνώση, η οποία αποδίδεται στην έλλειψη άμεσης παρατήρησης (Yakmaci-Gucel and Adadan, 2013· Nelson, 2002), στην εσφαλμένη οπτικοποίηση του ατόμου (Towns et al., 2012· Wuand Shah, 2004· Harrison και Treagust, 2003) και η αδυναμία εξαγωγής νοήματος από χημικά σύμβολα και εξισώσεις (Taskin and Bernholt, 2014· Marais and Jordaan, 2000). Λόγω αυτής της δυσκολίας, οι εκπαιδευτικοί της χημείας ενσωματώνουν διάφορους τρόπους αναπαράστασης με βάση το πλαίσιο που αναπτύχθηκε από τον Johnstone (1982), που ονομάζεται Τρίγωνο Χημείας (Santos and Arroio, 2016· Towns et al., 2012· Talanquer, 2011· Gilbert, 2009).

2.1.1. Το χημικό Τρίγωνο

Το χημικό τρίγωνο παρέχει μια επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο τα χημικά φαινόμενα θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν σε τρεις στενά συνδεδεμένους τρόπους αναπαράστασης, οι οποίοι αντιστοιχούν στις τρεις κορυφές του πλαισίου, δηλαδή μακροσκοπικούς, υπομικροσκοπικούς και συμβολικούς τρόπους (Fahmy, 2016, Talanquer 2011, Gilbert και Treagust, 2009, Johnstone, 1982). Η χρήση αυτών των πολλαπλών τρόπων αναπαράστασης υποστηρίζει την εκμάθηση διαφορετικών πτυχών των χημικών φαινομένων και βοηθά στη βαθύτερη κατανόηση τέτοιων φαινομένων (Santos and Arroio, 2016 και Ainsworth, 2007). Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες σχετικά με τη χρήση των τριών χημικών τρόπων αναπαράστασης στη χημεία. Πειραματικές μελέτες όπως αυτές που πραγματοποιήθηκαν από τους Sanchez (2017), Wood (2013) και Jaber and Boujaoude (2012) επιβεβαίωσαν την αποτελεσματική φύση της ολοκληρωμένης χρήσης των τρόπων για την ενίσχυση της εννοιολογικής κατανόησης των μαθητών. Επιπλέον, έρευνες όπως αυτές που έγιναν από τους Sanchez (2018), Brandiet (2014), Li και Arshade (2014) και Wood (2013) έδειξαν ότι η ικανότητα των μαθητών να συνδέονται από τον έναν τρόπο στον άλλο δημιουργεί μια καλύτερη σχεσιακή κατανόηση της χημείας. Ωστόσο, υπάρχουν μόνο λίγες μελέτες (π.χ. Sanchez, 2017; Franco, 2005), οι οποίες εξέτασαν την έκταση της κατανόησης

των μαθητών για κάθε τρόπο αναπαράστασης, καθώς και μια χούφτα, που ασχολείται με την Κινητική Μοριακή Θεωρία (ΚΜΤ) των αερίων .



Εικόνα 5: Το χημικό τρίγωνο

Η κινητική θεωρία των αερίων είναι μια γενική θεωρία που αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό από τους Clausius, Maxwell και Boltzmann όπως περιγράφηκε και παραπάνω. Η θεωρία περιγράφει τη συμπεριφορά των σωματιδίων αερίου σε θερμομοριακό επίπεδο και εξηγεί τις παρατηρήσιμες ιδιότητες των αερίων όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Ιδιότητες	Έννοιες
Διαχυτικότητα	Τα σωματίδια αερίου βρίσκονται σε συνεχή κίνηση. Έτσι, διαθέτουν κινητική ενέργεια.
Πίεση	Τα σωματίδια αερίου συγκρούονται μεταξύ τους και χτυπούν τα τοιχώματα ενός δοχείου. Καθένα από τα σωματίδια αερίου εφαρμόζεται καθώς τα σωματίδια χτυπούν το ένα το άλλο.
Αόριστο Σχήμα και Όγκος	Υπάρχει λιγότερη ελκτική δύναμη μεταξύ των σωματιδίων αερίου.
Επεκτασιμότητα και Συμπιεστότητα	Τα σωματίδια αερίου είναι πολύ μικρά και απέχουν πολύ το ένα από το άλλο. Τα κενά μεταξύ τους είναι πολύ μεγάλα σε σύγκριση με το μέγεθος κάθε σωματιδίου.
Ο όγκος αυξάνεται με τη θερμοκρασία	Η κίνηση των σωματιδίων του αερίου αυξάνεται, η θερμοκρασία αυξάνεται. Η μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων αερίου είναι ευθέως ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία.

Πίνακας 1: Η Κινητική Μοριακή Θεωρία των Αερίων

Η διδασκαλία της ΚΘΑ είναι ζωτικής σημασίας καθώς εξηγεί και εξηγεί αρκετά σημαντικά καθημερινά φαινόμενα (Rhode, 1992). Αρκετές μελέτες που ενσωματώνουν τη διδασκαλία του ΚΜΤ περιλαμβάνουν λανθασμένες αντιλήψεις για το ΚΜΤ (Erceg et al., 2016; Jauhariyah et al., 2018) και την εφαρμογή στρατηγικών όπως η προσανατολισμένη στο πείραμα προσέγγιση (Wiseman, 1979) και η χρήση λογισμικού υπολογιστών (Govender et al. . 2016). Ωστόσο, υπάρχει ένα κενό στη βιβλιογραφία. Υπήρξαν ελάχιστες ή καθόλου μελέτες που να διερευνούν την κατανόηση της ΚΘΑ σε διαφορετικούς τρόπους αναπαράστασης που μας οδήγησαν να διερευνήσουμε την έκταση της κατανόησης της ΚΘΑ από τους μαθητές σε τρεις χημικούς τρόπους αναπαράστασης.

Τα αποτελέσματα της μελέτης θα μπορούσαν να δώσουν πληροφορίες για το πώς αυτοί οι τρόποι αναπαράστασης ενισχύουν την κατανόηση των μαθητών στο ΚΜΤ και γενικά στη χημεία. Λαμβάνοντας υπόψη την έκταση των μαθητών θα μπορούσε να προσφέρει μια καλύτερη εξέταση της χρήσης του Τριγώνου της Χημείας στην αρένα διδασκαλίας-μάθησης του 21ου αιώνα.

2.1.2. Ανασκόπηση των μέχρι τώρα ευρημάτων από τις βιβλιογραφικές πηγές

Στο Τρίγωνο της Χημείας, οι χημικές αναπαραστάσεις αναπαρίστανται ως κορυφές του Τριγώνου: οι μακροσκοπικοί, μικροσκοπικοί και συμβολικοί τρόποι αναπαράστασης (Fahmy, 2016· Talanquer, 2011· Gilbert and Treagust, 2009· Johnstone, 1982).

Ο μακροσκοπικός τρόπος αναπαράστασης παρέχει στους εκπαιδευόμενους την περιγραφή της ύλης και των διαδικασιών της με βάση τις ιδιότητές τους και μπορεί να εφαρμοστεί μέσω πρακτικής εργασίας όπου υποβάλλονται σε διαδικασία επιστημονικής έρευνας και ενισχύει τη μάθηση της επιστήμης (Gilbert, 2008· Millar, 2004). Η υπομικροσκοπική λειτουργία εξηγεί πώς εμφανίζονται παρατηρήσιμα φαινόμενα σε μικροσκοπικό επίπεδο και μπορεί να αποδοθεί μέσω δομικών και εικονικών αναπαραστάσεων, φωτογραφιών, διαγραμμάτων και γραφημάτων, που επιτρέπει στους μαθητές να οπτικοποιήσουν την αλληλεπίδραση των σωματιδίων και να δημιουργήσουν νοητικά μοντέλα (Santos and Arroio, 2016; Sunyuno et al. ., 2015· Tasker and Dalton, 2006· Gilbert, 2008).

Ο συμβολικός τρόπος αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα χρησιμοποιώντας χημικά σύμβολα, εκφράσεις τύπου και εκφράσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη σύνταξη χημικών εξισώσεων και την επίλυση προβλημάτων (Schoenfeld, 2013; Gilbert, 2008). Η χρήση αυτών των πολλαπλών χημικών αναπαραστάσεων υποστηρίζει τη μάθηση των μαθητών, περιορίζει την περαιτέρω ερμηνεία και οδηγεί σε μια βαθύτερη κατανόηση των χημικών εννοιών (Santos and Arroio, 2016· Ainsworth, 2007).

Οι εκπαιδευτικοί ερευνητές έχουν μελετήσει τους μακροσκοπικούς, μικροσκοπικούς και συμβολικούς τρόπους διδασκαλίας και εκμάθησης της χημείας. Ο Sanchez (2017) ενσωμάτωσε τους τρεις τρόπους σε μία προσέγγιση και διαπίστωσε ότι αυτή η προσέγγιση είναι πιο αποτελεσματική από τη συμβατική μέθοδο διάλεξης. Ο Wood (2013) ανέλυσε την εκπαιδευτική χρήση των τριών τρόπων και την επιρροή τους στην εννοιολογική κατανόηση της χημείας. Η μελέτη σημείωσε την επίδραση του μακροσκοπικού τρόπου στην κατανόηση του επιπέδου των σωματιδίων και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα μικροσκοπικά μοντέλα της ύλης είναι απαραίτητα για την

κατανόηση των μαθητών. Οι Jaber και Boujaoude (2012) ερεύνησαν τη μετατόπιση μεταξύ των τριών τρόπων κατά την εκμάθηση χημικών εννοιών και αποκάλυψαν ότι η σχεσιακή κατανόηση μπορεί να ενισχυθεί δίνοντας ρητά έμφαση στην πολυαναπαραστατική φύση της χημικής γνώσης. Οι μελέτες τους επιβεβαίωσαν την αποτελεσματική φύση της ολοκληρωμένης χρήσης των τρόπων για την ενίσχυση της εννοιολογικής κατανόησης της χημείας από τους μαθητές.

Έχουν διεξαχθεί επίσης μελέτες σχετικά με την ικανότητα των μαθητών να χρησιμοποιούν τις λειτουργίες και να αλλάζουν από τη μια λειτουργία στην άλλη. Ο Sanchez (2018) διερεύνησε τις μεταφραστικές δεξιότητες των μαθητών και ανακάλυψε ότι η ενοποίηση των τριών τρόπων οδήγησε σε αμφίδρομες μεταφράσεις κατά την εξήγηση του χημικού φαινομένου. Ο Brandiet (2014) επικεντρώθηκε στη χρήση των τριών τρόπων για την εξήγηση των διαφορετικών προοπτικών των χημικών αντιδράσεων και γενίκευσε ότι οι μαθητές συνδέουν τη μακροσκοπική με έναν συμβολικό τρόπο πιο συχνά από άλλες συνδέσεις όπως μακροσωματιδιακούς και συμβολικούς-σωματιδιακούς συνδέσμους. Οι Li και Arshade (2014) αποκάλυψαν ότι υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα κατανόησης σε διαφορετικούς τρόπους και ότι οι συμμετέχοντες έδωσαν έμφαση στον μακροσκοπικό τρόπο, μετά στον συμβολικό και στον υπομικροσκοπικό. Ο Wood (2013) δηλώνει ότι η γνώση που αποκτήθηκε με τη μακροσκοπική λειτουργία συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση σε μικροσκοπικό επίπεδο. Γενικά, αυτές οι μελέτες έδειξαν ότι η δυνατότητα σύνδεσης ενός τρόπου λειτουργίας με έναν άλλο δημιουργεί μια καλύτερη σχεσιακή χημεία κατανόησης.

Ωστόσο, μόνο μερικές έρευνες επικεντρώθηκαν στη χρήση των χημικών τρόπων αναπαράστασης και στην κατανόηση της ΚΘΑ. Ο Sanchez (2017) χρησιμοποίησε την ενσωμάτωση των τριών τρόπων και ανακάλυψε ότι αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση βελτίωσε την κατανόηση της ΚΘΑ από τους μαθητές. Ο Franco (2005) έδωσε έμφαση στη χρήση των τρόπων για την εξήγηση των διαφορετικών εννοιών της ΚΘΑ. Οι μαθητές χρησιμοποιούσαν με συνέπεια το ίδιο σύνολο υποθέσεων από την ΚΘΑ, αλλά απέτυχαν να κατανοήσουν συγκεκριμένες διαδικασίες, όπως η διάχυση και η διάλυση, υποδεικνύοντας ασυνέπειες που δεν εξηγούν τόσο τον μακροσκοπικό όσο και τον μικροσκοπικό τρόπο λειτουργίας. Επομένως, υπάρχει διακύμανση στην έκταση της κατανόησης της χημείας σε κάθε τρόπο αναπαράστασης.

2.1.3 Μελέτη Περίπτωσης

Η μελέτη που επιλέχθηκε για ανάλυση στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποίησε έναν σχεδόν πειραματικό σχεδιασμό για να προσδιορίσει την έκταση της κατανόησης της ΚΘΑ από τους μαθητές.

Ο σχεδιασμός μιας οιονεί πειραματικής έρευνας είναι ένας τύπος πειραματικού σχεδιασμού όπου υπάρχει μόνο μία ομάδα (η πειραματική ομάδα). Αυτή η ομάδα εκτίθεται σε μια διδακτική-μαθησιακή παρέμβαση που ονομάζεται Ολοκληρωμένη Μάκρο-Μικρο-Συμβολική Προσέγγιση (IMMSA), μετρώντας έτσι μόνο την απόδοση μετά τη δοκιμή.

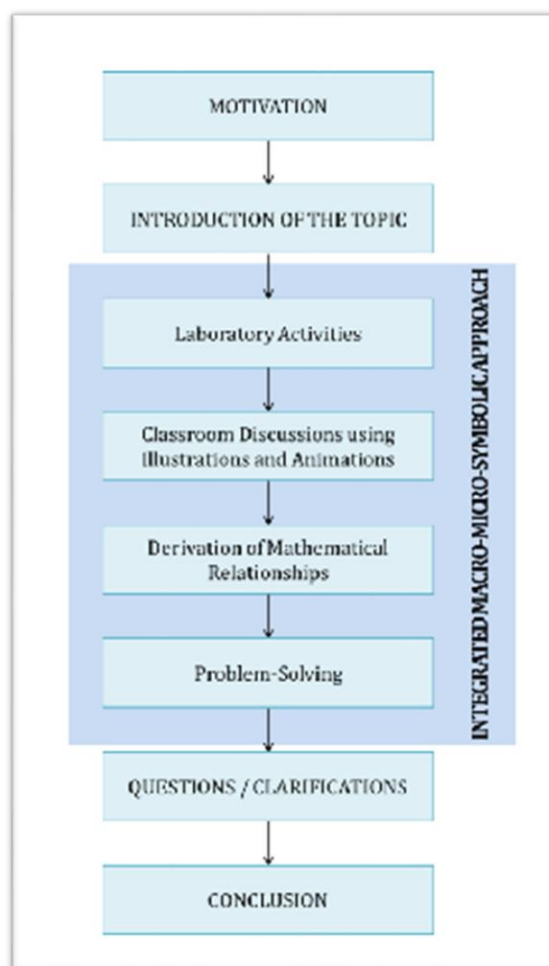
Η ομάδα που εκτέθηκε στο IMMSA αποτελούνταν από 30 τυχαία επιλεγμένους μαθητές της δέκατης τάξης (N=45 μαθητές) από ένα ίδρυμα δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης στο Cebu City των Φιλιππίνων ως συμμετέχοντες σε αυτή τη μελέτη. Αυτοί οι συμμετέχοντες επιλέχθηκαν τυχαία μέσω της μεθόδου fish-bowl και είχαν ήδη ένα μάθημα χημείας στην προηγούμενη τάξη τους. Όλοι οι συμμετέχοντες στη μελέτη κωδικοποιήθηκαν με ένα E, όπως E1, E13, κ.λπ.

2.1.3.1 Διαδικασία Έρευνας

Πριν από τη διεξαγωγή ενός τέτοιου πειράματος που αναλύθηκε και παραπάνω ζητήθηκε πρώτα άδεια από τον διευθυντή του σχολείου της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και ενημερωμένη συγκατάθεση από τους συμμετέχοντες. Σε αυτόν τον πειραματισμό, το IMMSA χρησιμοποιήθηκε στη διδασκαλία του KMT για ένα μήνα. Το IMMSA όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα είναι μια προσέγγιση που ενσωματώνει μακροσκοπικούς, μικροσκοπικούς και συμβολικούς τρόπους αναπαράστασης στη διδασκαλία μιας χημικής έννοιας ή διαδικασίας (Sanchez, J. M. 2017)

Στο IMMSA, το μάθημα ξεκινά με μια ενδιαφέρουσα δραστηριότητα για τα κίνητρα και στη συνέχεια παρουσιάζεται το θέμα της ΚΘΑ. Μετά από αυτή τη φάση, υλοποιούνται εργαστηριακές εργασίες. Αυτές οι εργασίες περιλαμβάνουν πειράματα που σχετίζονται με τις ιδιότητες των αερίων, δηλαδή διάχυση, πίεση, όγκο, συμπιεστότητα/διαστολή και θερμοκρασία. Οι δραστηριότητες στην τάξη ακολουθούν τις εργαστηριακές εργασίες που περιλαμβάνουν συζητήσεις με εικόνες και κινούμενα σχέδια και κατασκευή διαγραμμάτων που δείχνουν τη συμπεριφορά των αερίων σε επίπεδο σωματιδίων, ατόμων και μορίων. Οι σχέσεις μεταξύ των ιδιοτήτων αερίου συνάγονται και οι μαθηματικές σχέσεις προκύπτουν σύμφωνα με τα εργαστηριακά

πειράματα και τις κατασκευαστικές δραστηριότητες που είχαν οι μαθητές. Από αυτή την εξαγωγή, υλοποιούνται εργασίες επίλυσης προβλημάτων. Στη συνέχεια, γίνονται διευκρινίσεις και γίνεται μια γενίκευση σχετικά με το θέμα της ΚΘΑ.



Εικόνα 6: Ροή του IMMSA

Μετά την περίοδο του πειραματισμού, οι συμμετέχοντες έκαναν το post-test. Ακολούθησε ανάλυση του post-test μετά τον έλεγχο του εργαλείου αξιολόγησης.

2.1.3.1 Εργαλείο έρευνας και ανάλυση

Το ερευνητικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ήταν το post-test. Πριν από τη χορήγηση κατά τη διάρκεια του πειραματισμού, τέσσερις ειδικοί στην εκπαίδευση των επιστημών και της χημείας επικύρωσαν το ερευνητικό εργαλείο. Οι ειδικοί έλεγξαν τα στοιχεία δοκιμής για να δουν αν αντιστοιχούν στις ικανότητες στον πίνακα προδιαγραφών καθώς και το κλειδί απάντησης για να δουν αν είναι σωστά, αξιολόγησαν εάν τα στοιχεία μετρούν τη μάθηση και αξιολόγησαν εάν η ονομαστική αξία και ο χρόνος δοκιμής του εργαλείου είναι κατάλληλοι για την ηλικία των μαθητών

και τον ρυθμό απάντησης. Αξιολόγησαν το εργαλείο με υψηλή εγκυρότητα κατασκευής και περιεχομένου με μερικά μικρά σχόλια. Αυτά τα σχόλια εφαρμόστηκαν και το εργαλείο ήταν έτοιμο για πιλοτική δοκιμή. Στην πιλοτική δοκιμή, το εργαλείο χορηγήθηκε σε μια συγκρίσιμη ομάδα μαθητών της δέκατης τάξης, υποβλήθηκαν σε τεστ αξιοπιστίας και λήφθηκε συντελεστής αξιοπιστίας ίσος με 0,843, που υποδεικνύει μια καλή, πάνω από την αποδεκτή αξιοπιστία. Το εργαλείο αποτελείται από 30 στοιχεία, τα οποία χωρίζονται σε πέντε μέρη. Αυτά τα μέρη αντιστοιχούν στα πέντε αξιώματα της κινητικής θεωρίας των αερίων, δηλαδή τη διαχυσιμότητα, την πίεση, τον όγκο, τη συμπιεστότητα/διαστολή και τη θερμοκρασία. Κάθε ένα από αυτά τα αξιώματα αξιολογήθηκε μέσω μιας ανάλυσης καταστάσεων όπου οι μαθητές εξηγούν την κατάσταση με όρους μακροσκοπικών λέξεων, κατασκευάζουν μια απεικόνιση που δείχνει τη συμπεριφορά των σωματιδίων σε μικροσκοπικό επίπεδο και συμπεραίνουν τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών και λύνουν την άγνωστη μεταβλητή. Με αυτόν τον τρόπο, το εργαλείο αποτελείται από ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής, ανοιχτού τύπου και σχεδίασης που αποτυπώνουν τις πολλαπλές αναπαραστάσεις των εννοιών που μαθαίνονται στη χημεία.

Για να μετρήσει την έκταση της κατανόησης των μαθητών σε καθένα από τα πέντε μέρη του εργαλείου, ο ερευνητής έδωσε έναν βαθμό για κάθε σωστή απάντηση στα στοιχεία πολλαπλής επιλογής και έδωσε δύο βαθμούς ($\text{min}=0$, $\text{max}=2$) για τις ερωτήσεις ανοιχτού τύπου:

- 0 βαθμός για καμία ή λανθασμένη απάντηση,
- 1 βαθμός για μια απάντηση που είναι σωστή αλλά δεν έχει την πτυχή που μπορεί να εξηγήσει την απάντησή τους και
- 2 βαθμούς για μια σωστή απάντηση που παρέχει μια καλά στρογγυλεμένη απάντηση.

Για να αναλύσει τις απαντήσεις των συμμετεχόντων, η μελέτη χρησιμοποίησε την επικυρωμένη ρουμπρίκα βαθμολόγησης με βάση τον μέσο όρο των βαθμολογιών των μαθητών: 0,00-0,75 (Κακή, P). 0,76-1,50 (Μέτρια, F); 1,51-2,25 (Καλό, G); 2.26-3.00 (Πολύ Καλό). Αυτή η ρουμπρίκα χρησιμοποιήθηκε ως το εργαλείο μετά τη δοκιμή αποτελούσαν από πέντε μέρη, το καθένα με τρία υποτιμήματα. Η μακροσκοπική και η μικροσκοπική λειτουργία είχαν 3 σημεία ενώ η συμβολική λειτουργία είχε 2 πόντους.

Η κατανόηση των διαφορετικών τρόπων αναπαράστασης από τους μαθητές προέκυψε από τις επιδόσεις μετά τη δοκιμή των μαθητών που εκτέθηκαν στο IMMSA. Η

στατιστική ανάλυση της δηλωμένης απόδοσης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα έτσι όπως έχει μελετηθεί από την δημοσίευση, ο οποίος χωρίζεται ανάλογα με θέματα και τρεις τρόπους αναπαράστασης.

Topic	Mode	Macroscopic [†]		Microscopic [†]		Symbolic [†]	
		Mean*	SD	Mean*	SD	Mean*	SD
Diffusibility		1.13 (F)	1.30	1.47 (F)	1.06	1.07 (G)	0.59
Pressure		1.53 (G)	1.25	1.60 (G)	0.91	1.87 (VG)	0.52
Volume		2.80 (VG)	0.56	1.60 (G)	1.06	1.27 (G)	0.80
Compressibility/ Expansibility		2.00 (G)	1.31	1.27 (F)	1.22	1.33 (G)	0.82
Temperature		2.53 (VG)	0.52	1.80 (G)	0.77	1.80 (VG)	0.56
Overall		2.00 (G)	0.99	1.55 (G)	1.00	1.47 (VG)	0.66

* VG (Very Good), G (Good), F (Fair), P (Poor)

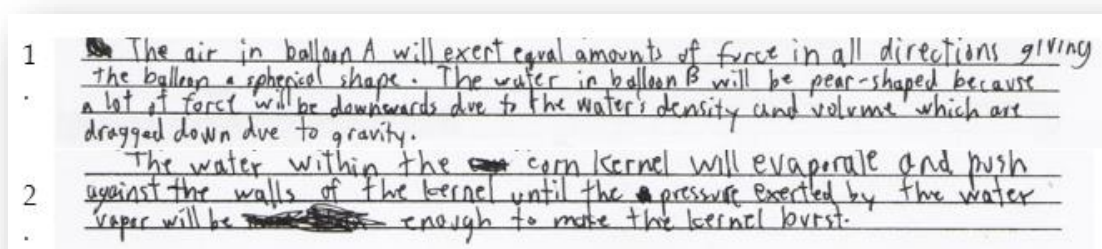
Πίνακας 2: Έκταση της κατανόησης των μαθητών όσον αφορά την κινητική θεωρία των αερίων

Τα αποτελέσματα (Πίνακας 2) δείχνουν ότι ο βαθμός κατανόησης της διαχυσιμότητας και της πίεσης από τους μαθητές είναι υψηλότερος σε συμβολικό επίπεδο, ενώ στον όγκο, ο υψηλότερος είναι στο μακροσκοπικό επίπεδο. Τόσο η συμπίεστικότητα/επεκτασιμότητα όσο και η θερμοκρασία έχουν την υψηλότερη έκτασή τους σε μικροσκοπικό επίπεδο. Αυτό υποδηλώνει ότι ορισμένα θέματα στη χημεία θα μπορούσαν να γίνουν καλύτερα κατανοητά χρησιμοποιώντας έναν τρόπο αναπαράστασης, π.χ., η διάχυση διδάσκεται καλύτερα χρησιμοποιώντας τον συμβολικό τρόπο. Ωστόσο, η χρήση άλλων τρόπων εμπλουτίζει τη μάθηση της χημείας και προσφέρει πιο αποτελεσματικό μέσο κατανόησης εννοιών και αρχών από διαφορετικές οπτικές γωνίες (Jaber and Boujaoude, 2012· Ainsworth, 2007).

2.1.3.2 Μακροσκοπική λειτουργία

Η Πολύ Καλή κατανόηση των θεμάτων για τον όγκο και τη θερμοκρασία και η Καλή κατανόηση της πίεσης και της συμπίεστικότητας/διαστολής θα μπορούσε να είναι επειδή οι δεδομένες καταστάσεις ήταν καθημερινά σενάρια, τα οποία ήταν εφαρμογές των αξιώσεων του KMT που συζητήθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης. Σημειώθηκε ότι οι όροι που χρησιμοποιήθηκαν από τους μαθητές για την εξήγηση διαφόρων φαινομένων ήταν επιστημονικοί όροι που εισήχθησαν για πρώτη φορά κατά τις

εργαστηριακές συνεδρίες της μελέτης. Μερικοί από αυτούς τους όρους φαίνονται στις απαντήσεις του E13 στην εικόνα 6.



Εικόνα 7: Δείγματα απαντήσεων από τον μαθητή E13 σε μακροσκοπικές ερωτήσεις: (1) όγκος και (2) θερμοκρασία

Με βάση την εικόνα 6, οι όροι που χρησιμοποιούνται από τον μαθητή για να εξηγήσουν τον όγκο και τη θερμοκρασία του δεδομένου φαινομένου περιλαμβάνουν δύναμη, πυκνότητα, όγκο, βαρύτητα, εξάτμιση, πίεση, υδρατμούς και έκρηξη. Η συσχέτιση αυτών των όρων από τις εργαστηριακές εμπειρίες ήταν σύμφωνη με τη μελέτη του Brandiet (2014), η οποία σημείωσε ότι οι μαθητές προέβλεψαν χημικά φαινόμενα προσπαθώντας να χρησιμοποιήσουν τις εμπειρίες τους στο εργαστήριο. Υπονοήθηκε ότι οι μαθητές θυμούνται περισσότερο όταν ασχολούνται με πρακτικές δραστηριότητες στο εργαστήριο επιστημών.

Ωστόσο, στην περίπτωση του θέματος για τη διάχυση, οι μαθητές απέκτησαν μόνο μια δίκαιη κατανόηση χρησιμοποιώντας τη μακροσκοπική λειτουργία. Η χαμηλή κατανόηση αυτού του στοιχείου μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικές αντικαθεστωτικές παρατηρήσεις που είχαν οι μαθητές αφού τείνουν να μην εκτίθενται στα φαινόμενα της πραγματικής ζωής. Κατά τη διεξαγωγή της μελέτης, ένα ανέκδοτο θα μπορούσε να εξηγήσει γιατί οι μαθητές είχαν μια δίκαιη εννοιολογική κατανόηση της δυνατότητας διάχυσης του αρώματος. Κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής εργασίας, το πείραμα απαιτούσε να χρησιμοποιήσουν άρωμα. Παραδόξως, δεν κατάφεραν να το κάνουν επειδή υποστήριζαν ότι, με τα δικά τους λόγια, «Ποιος θα φέρει άρωμα σε ένα σχολείο αποκλειστικά για αγόρια;» Αυτό σημαίνει ότι είχαν ελάχιστη ή καθόλου εμπειρία από το φαινόμενο από πρώτο χέρι ή το είχαν από δεύτερο χέρι. Η μάθηση μέσω της άμεσης εμπειρίας θα πρέπει να περιλαμβάνει τη διαβίωση των πραγμάτων για την απόκτηση μακροπρόθεσμης

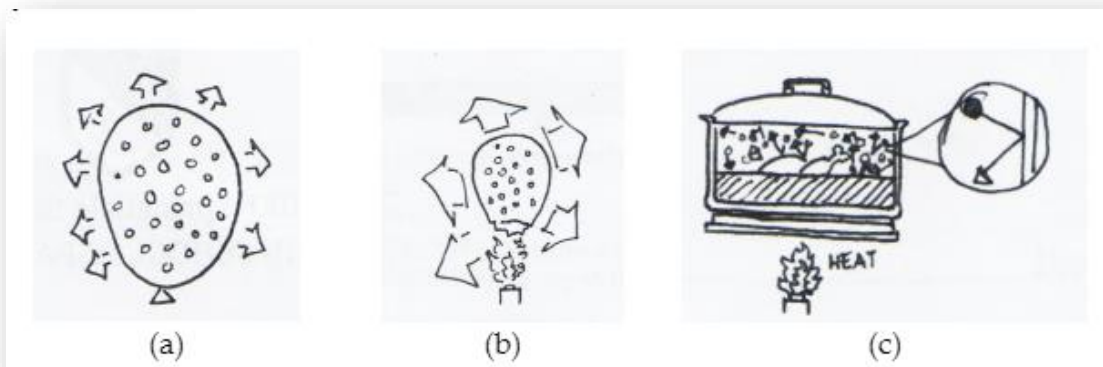
γνώσης. Αν και, οι μαθητές εξακολουθούν να εξήγησαν το φαινόμενο χρησιμοποιώντας τις προϋποθέσεις του ΚΜΤ όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Δεδομένου ότι δεν εκτίθενται σε αυτό ή εκτίθενται αντικαθιστατικά σε αυτό, τείνουν να έχουν διαφορετικές αντιλήψεις και να χρησιμοποιούν διαφορετικές προϋποθέσεις μιας θεωρίας για να το εξηγήσουν (Franco, A. 2005).

Παρά το γεγονός ότι είχαν μια δίκαιη βαθμολογία στη διάχυση, οι μαθητές απέκτησαν καλή κατανόηση της μακροσκοπικής λειτουργίας. Αυτή η καλή κατανόηση θα μπορούσε να είναι αποτέλεσμα της διδασκαλίας της χημείας στο IMMSA, η οποία θεμελιώνεται έντονα από αυτό που παρατηρείται από τις αισθήσεις κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών πειραμάτων. Αυτή η ισχυρή βάση για τον μακροσκοπικό τρόπο υποστηρίχθηκε από τους Jaber και Boujaoude (2012), οι οποίοι δήλωσαν ότι οι μαθητές τείνουν να ερμηνεύουν τα χημικά φαινόμενα περισσότερο σε μακροσκοπικό επίπεδο. Οι έννοιες της χημείας πρέπει να έχουν τις ρίζες τους στην πραγματική καθημερινή ζωή για να έχουν μια υγιή εμπειρία πριν προχωρήσουν σε πιο αφηρημένες και σύνθετες έννοιες.

Η συμπερίληψη εργαστηριακών δραστηριοτήτων στο IMMSA στη διδασκαλία της Χημείας μπορεί να λύσει την έλλειψη έκθεσης των μαθητών στη μακροσκοπική λειτουργία. Είναι μέσα από την έκθεση που οι μαθητές αποκτούν ενδιαφέρον και απόλαυση, ενισχύουν τη μάθηση επιστημονικών εννοιών και δεξιοτήτων, αποκτούν γνώσεις για την επιστημονική μέθοδο και αναπτύσσουν τεχνογνωσία και επιστημονικές στάσεις (Gilbert, 2008· Millar, 2004). Έτσι, η χημεία απόδοσης θα μπορούσε να βελτιωθεί και να αναπτυχθεί μεγαλύτερη εκτίμηση για το θέμα.

2.1.3.2 Μικροσκοπική λειτουργία

Το καλό επίπεδο κατανόησης της πίεσης, του όγκου και της θερμοκρασίας από τους μαθητές χρησιμοποιώντας τη μικροσκοπική λειτουργία μπορεί να οφείλεται στο ότι είχαν ήδη έκθεση σε μακροσκοπικό επίπεδο και είχαν ιδέες για τη συμπεριφορά της ύλης σε επίπεδο ατόμων και μορίων. Αυτό οδήγησε σε καλύτερη κατανόηση των θεμάτων καθώς κατασκευάζουν την οπτικοποίησή τους από τα δεδομένα φαινόμενα. Η εικόνα 7 δείχνει δείχνει δειγματοληπτικές απεικονίσεις σχετικά με τις καταστάσεις πίεσης, όγκου και θερμοκρασίας που κατασκευάστηκαν από τον Μαθητή E11.



Εικόνα 8: Δείγματα εικονογραφήσεων του Μαθητή E11 σε μικροσκοπικές ερωτήσεις: (α) όγκος, (β) θερμοκρασία και (γ) πίεση.

Σημειώνεται στην εικόνα 7 ότι οι εικόνες συμπληρώνουν τις απαντήσεις των μαθητών σε μακροσκοπική λειτουργία. Για παράδειγμα, ο μαθητής E11 δήλωσε χρησιμοποιώντας τη μακροσκοπική λειτουργία: «Επειδή η θερμότητα θα προκαλέσει τα μόρια του νερού μέσα στους πυρήνες να διαστέλλονται, με αποτέλεσμα οι πυρήνες να έχουν μεγαλύτερη πίεση στο εσωτερικό του από το εξωτερικό του. Κάνοντας τελικά τους πυρήνες να σπάσουν και να σκάσουν.» Αυτή η δήλωση ενσωματώθηκε στην κατασκευή της εικονογράφησης και έδωσε περισσότερο νόημα καθώς περιλάμβανε τη συμπεριφορά των μορίων στο υπομικροσκοπικό επίπεδο. Αυτό καθιστά τον μικροσκοπικό τρόπο πιο περίπλοκο και ημι-αφηρημένο επειδή οι μαθητές εισήχθησαν σε ορισμένες συμβάσεις, οι οποίες περιελάμβαναν την αναπαράσταση των μορίων ως στρογγυλά σωματίδια και την κατεύθυνση της μοριακής κίνησης ως βέλη και τη συμπερίληψη των συνθηκών για συγκεκριμένα φαινόμενα. Αυτή η συνάρτηση του μικροσκοπικού επιπέδου συνάδει με τον ισχυρισμό του Ainsworth (2007) ότι διάφοροι τρόποι αναπαράστασης φαινομένων υποστηρίζουν τη μάθηση συμπληρώνοντας ο ένας τον άλλον με πολλαπλές προοπτικές.

Στην περίπτωση της διαχυσιμότητας και της συμπιεστότητας/επεκτασιμότητας, οι μαθητές απέκτησαν μόνο μια δίκαιη κατανόηση. Αυτό μπορεί να οφείλεται εν μέρει στην ασαφή εμπειρία στο μακροσκοπικό επίπεδο που η απεικόνιση μιας τέτοιας εμπειρίας οδηγεί σε εσφαλμένη, εσφαλμένη εικονική αναπαράσταση. Αυτό ήταν σύμφωνο με τη μελέτη των Jaber and Bougaoude (2012), η οποία υποστήριξε ότι το κύριο εμπόδιο στην εννοιολογική κατανόηση θα μπορούσε να αποδοθεί στην

ακατάλληλη εφαρμογή μακροσκοπικού συλλογισμού από τους μαθητές για να εξηγήσουν φαινόμενα σε μικροσκοπικό επίπεδο. Επιπλέον, μπορεί επίσης να είναι ότι οι συμβάσεις είναι πολύ απλές ότι ξέχασαν να τα χρησιμοποιήσουν ή είναι πολύ περίπλοκα που δυσκολεύονται να τα χρησιμοποιήσουν. Ένα δείγμα απεικόνισης από τον Μαθητή E7 που παρουσιάζεται στην εικόνα 9 δείχνει ορισμένα προβλήματα με τη χρήση συμβάσεων.



Εικόνα 9: Δείγμα απεικόνισης της διαχυσιμότητας όπως κατασκευάστηκε από τον Μαθητή E7.

Με βάση την εικόνα 9, οι μαθητές είχαν απεικονίσει τη συμπεριφορά της λιναλοόλης (Η λιναλοόλη αποτελεί το 6% του αιθέριου ελαίου κάνναβης) και της οξικής λιναλόλης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διάχυσης χρησιμοποιώντας ένα διχοτομικό κλειδί χρώματος για να διαφοροποιήσουν τους δύο τύπους μορίων αερίου: το πρώτο μόριο είναι λευκό και το δεύτερο είναι μαύρο. Επιπλέον, η εικόνα δεν απεικονίζει βέλη που δείχνουν την κίνηση των μορίων, αλλά οι γραμμές που προέρχονται από το μπουκάλι του αρώματος μπορεί να υποδηλώνουν την κατεύθυνση της κίνησης. Τέλος, σημειώθηκε ότι η απεικόνιση δεν έλαβε υπόψη το μέγεθος των μορίων, καθώς υπήρχαν μικρά και μεγάλα μόρια λιναλοόλης και οξικού λιναλυλεστέρα. Αυτή η ατελής απεικόνιση της συμπεριφοράς των μορίων μπορεί να οφείλεται στο ότι το υπομικροσκοπικό επίπεδο κατανόησης δεν μπορεί να φανεί άμεσα και είναι προσβάσιμο μόνο με τη φαντασία. Αυτό κάνει τη μικροσκοπική λειτουργία δύσκολη τόσο για τους μαθητές όσο και για τους δασκάλους (Touli et al., 2012; Nelson, 2002).

Ο σχετικά χαμηλότερος μέσος όρος του μικροσκοπικού τρόπου λειτουργίας από τον μακροσκοπικό τρόπο υποβάθμισε τα αποτελέσματα του Wood (2013). Στη μελέτη της, μόνο ένας εκπαιδευτής είχε παράγει σημαντικό μέσο κέρδος από την προ-δοκιμή έως τη μετα-δοκιμή, και αυτή η καθηγήτρια ήταν η μόνη που χρησιμοποίησε σημαντικά τη μικροσκοπική λειτουργία τόσο σε διαλέξεις όσο και σε εργαστηριακές μορφές. Αυτή

η παρατήρηση υπονοούσε ότι η ενσωμάτωση των περιγραφών του «πώς» και του «γιατί» των αλληλεπιδράσεων σωματιδίων βοήθησε τους μαθητές να έχουν καλύτερη σύνδεση μεταξύ των τριών τρόπων αναπαράστασης. Μια τέτοια ενσωμάτωση οδήγησε σε καλύτερη κατανόηση σε συμβολικό επίπεδο. Έτσι, η χημική κατανόηση έχει αποδειχθεί ότι έχει βελτιωθεί. Με αυτό, θα μπορούσαν να αποφευχθούν παρανοήσεις σε αυτό το υπομικροσκοπικό επίπεδο.

Ωστόσο, οι μαθητές απέκτησαν μια συνολική ποιοτική βαθμολογία Καλής κατανόησης χρησιμοποιώντας τη μικροσκοπική λειτουργία, η οποία ήταν η ίδια για τη μακροσκοπική λειτουργία. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι ασχολούνταν πρώτα με εργαστηριακές δραστηριότητες. Από τέτοιες δραστηριότητες, έγιναν πιο ενεργοί μαθητές καθώς συμμετείχαν στην κατασκευή μιας απεικόνισης που δείχνει τη συμπεριφορά των αερίων και ανέπτυξαν πιο σύνθετες δεξιότητες. Αυτό συμφωνεί με τον υπονοούμενο του McDermott (2009) ότι η ενσωμάτωση εικονογραφήσεων στην επικοινωνία επιστημονικών πληροφοριών οδηγεί σε καλύτερο επίπεδο απόδοσης. Οι Davidowitz και Chittleborough (2009) πρόσθεσαν ότι η κατασκευή των εικονογραφήσεων και των διαγραμμάτων είναι συνεπής με τον κονστρουκτιβισμό που απαιτεί από τους μαθητές να δείξουν την κατανόησή τους και να λάβουν ανατροφοδότηση. Έτσι, αυτές οι εικονικές αναπαραστάσεις γίνονται ένα ενεργό εργαλείο μάθησης. Οι μαθητές που εκτέθηκαν σε αυτόν τον τρόπο μετέφρασαν τις μακροσκοπικές δραστηριότητες σε μια διαδικασία στην οποία συμμετέχουν στην κατασκευή και ανάπτυξη της κατανόησης, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια υψηλότερη κατανόηση στον επόμενο συμβολικό τρόπο (Kincheloe and Horn, 2007).

2.1.3.3 Συμβολική λειτουργία

Οι μαθητές είχαν πολύ καλή κατανόηση της πίεσης και της θερμοκρασίας και πολύ καλή κατανόηση της διαχυσιμότητας, του όγκου και της συμπιεστότητας/διαστολής. Αυτό έδειξε ότι είχαν πολύ καλή χημική κατανόηση σε αφηρημένο επίπεδο. Αυτό θα μπορούσε να σημαίνει ότι η υψηλή απόδοση σε αυτό το επίπεδο οφειλόταν στη σταδιακή διαδικασία που επέφερε το IMMSA. Δεδομένου ότι έχουν ήδη εκτεθεί στα εργαστηριακά πειράματα και τις κατασκευαστικές δραστηριότητες εικονογράφησης, απέκτησαν γνώση των φαινομένων και επέκτειναν τη συγκεκριμένη και εικονική φύση της αναπαράστασης στην πιο αφηρημένη. Στην εικόνα 10 φαίνεται ένα δείγμα απόσπασμα του συμβολικού τρόπου όπως απάντησε ο μαθητής Ε8.

23. What is the relationship between pressure and volume of gases?
 A. no relationship at all
 B. directly proportional
 C. inversely proportional
 D. exponentially proportional
24. If at a pressure of 1 atm, the volume of gases in the lungs is around 22.4 L. Jefferson decided not to go up directly, but to swim further at 66 feet where the pressure is 2 atm. What is the volume of the gases in his lungs at this depth?

- A. 11.2 L
 B. 22.4 L
 C. 33.6 L
 D. 44.8 L

$$\frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{P_2 V_2}{P_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2}$$

$$V_2 = \frac{(1 \text{ atm})(22.4 \text{ L})}{(2 \text{ atm})}$$

$$V_2 = 11.2 \text{ L}$$

Εικόνα 10: Δείγμα- απόσπασμα από το τεστ του Μαθητή Ε8 σε συμβολικές ερωτήσεις

Στην εικόνα 10 αντιπροσωπεύει έναν από τους μαθητές που απάντησε σωστά σε συμβολικές ερωτήσεις. Σημειώνεται ότι ο μαθητής απάντησε σωστά στην αντίστροφη σχέση πίεσης και όγκου και το πρόβλημα που αναφέρθηκε μετά. Η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών προσδιορίστηκε από τους μαθητές όταν εκτέθηκαν στις εργαστηριακές και εικονογραφικές δραστηριότητες, όπου επαγωγικά συμπεραίνουν την άμεση, αντίστροφη και καμία σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Στη συνέχεια, άντλησαν τον τύπο με βάση τη σχέση που αποκτήθηκε, έδωσαν νόημα στα χρησιμοποιούμενα σύμβολα και έλυσαν το πρόβλημα. Εκτός από αυτό, σημειώνεται επίσης ότι οι μαθητές έδειξαν μια ολοκληρωμένη λύση, καθώς έγραψε τον τύπο, εξήγαγε τον τύπο της ζητούμενης ποσότητας, αντικατέστησε τις αντίστοιχες ποσότητες, χρησιμοποίησε σωστή ακύρωση μονάδας, λύνει την απάντηση και τοποθετεί την τελική απάντηση. Αυτό δείχνει ότι οι μαθητές που εκτέθηκαν στο IMMSA δημιούργησαν έναν ουσιαστικό συσχετισμό μέσω συμβόλων και χρησιμοποίησαν μια συστηματική σύμβαση για να ξεπεράσουν κάποιες ελλείψεις, που εμφανίζονται σε συμβολικό επίπεδο. Αυτό είναι σύμφωνο με το συμπέρασμα των Marais and Jordaan (2000) που δήλωνε ότι οι μαθητές θα πρέπει να βυθίζονται στο ενσωματωμένο σύμβολο που σημαίνει κατασκευή και να διδάσκονται σκόπιμα με συμβολισμούς.

Η συνολική Πολύ Καλή κατανόηση των μαθητών στο συμβολικό επίπεδο αντανάκλυνε τον αποτελεσματικό ρόλο του IMMSA στη διδασκαλία της χημείας καθώς οι μαθητές πέτυχαν ανώτερη χρήση της μάθησης στο υψηλότερο επίπεδο του

μοντέλου μάθησης τριών επιπέδων (Sanchez, J. M. 2017). Η ανώτερη χρήση της μάθησης αντικατοπτρίζεται όταν επιτρέπουν στις έννοιες να συμπιέζονται στο μυαλό τους, με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδουν σύμβολα που μπορούν να αντιπροσωπεύουν τη μάθησή τους. Η ανάθεση συμβόλων, όπως το P για την πίεση και το K ως μονάδα για τη θερμοκρασία, σημαίνει μαεστρία στη μάθηση (Kincheloe and Horn, 2007).


2.1.3.4 Αλληλεπίδραση των Τριών Τρόπων Χημικής Αναπαράστασης

Η αλληλεπίδραση των μακροσκοπικών, μικροσκοπικών και συμβολικών τρόπων αναπαράστασης υποδεικνύει την έκταση του τρόπου με τον οποίο οι μαθητές μετακινούνται από τον έναν τρόπο στον άλλο. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να παραδειγματιστεί στην εικόνα 12.

Macroscopic Mode

I think that it will cook faster due to it being pressurized. The amount of collisions between the molecules increases, and the air cannot escape, meaning it will cook faster.

↓ **Microscopic Mode**



← The molecules cannot escape, thereby increasing the number of collisions.

↓ **Symbolic Mode**

At a pressure of 3.0 atm, the number of collisions among steam molecules inside a pressure cooker is approximately 2.0×10^3 collisions. If the cooker is opened, the pressure is reduced to 1.5 atm. How many collisions are there then?

A. 1.0×10^3 collisions
B. 2.0×10^3 collisions
C. 3.0×10^3 collisions
D. 4.0×10^3 collisions

εικόνα 11: Μια αλληλεπίδραση μεταξύ Μάκρο-Μίκρο- Συμβολική περιγραφή πώς λειτουργεί μια χύτρα ταχύτητας

Η εικόνα 12 δείχνει την αλληλεπίδραση τριών τρόπων αναπαράστασης καθώς ο μαθητής Ε9 απάντησε πώς λειτουργεί μια χύτρα ταχύτητας. Πρώτον, περιέγραψε ότι η χύτρα ταχύτητας λειτουργεί λόγω της έννοιας της πίεσης και της σύγκρουσης. Στη συνέχεια, κατασκεύασε μια εικονογράφιση, η οποία δείχνει πώς η πίεση επηρεάζει το μαγείρεμα στην κουζίνα. Τέλος, απάντησε σε μια ερώτηση βασισμένη στο πρόβλημα στην οποία χρησιμοποίησε τη σχέση μεταξύ της πίεσης και του αριθμού των συγκρούσεων στη μικροσκοπική λειτουργία για να την απαντήσει. Αυτό έδειξε ότι η αλληλεπίδραση είναι πλήρης, αλλά μόνο μονόδρομη αλληλεπίδραση που προέρχεται από το μακροσκοπικό τερματικό, συνιστώντας έτσι περαιτέρω μελέτες που θα λάμβαναν υπόψη τα άλλα τερματικά προέλευσης, δηλαδή τα μακροσκοπικά και συμβολικά τερματικά.

Συμπέρασμα, Συστάσεις και Περιορισμοί

Η χρήση των τριών διαφορετικών χημικών τρόπων αναπαράστασης στον κατάλληλο χρόνο και επίπεδα οδήγησε σε μεγάλο βαθμό κατανόησης των εννοιών στη χημεία, ειδικά στην κινητική θεωρία των αερίων. Η ενασχόληση με πρακτικές δραστηριότητες, οι εργαστηριακές δραστηριότητες παρέχουν ένα εφελκυστικό για την κατανόηση εννοιών και αρχών. Όταν αυτές οι δραστηριότητες μεταφράζονται σε μια διαδικασία κατασκευής εικονογράφησης, οι μαθητές συμμετέχουν στην ανάπτυξη της κατανόησης της συμπεριφοράς της ύλης σε υπομικροσκοπικό επίπεδο. Αυτό τελικά οδηγεί στην παραγωγή νοητικών σχέσεων και στην ανάθεση συμβόλων όπως το P και το K, αντανακλώντας πιο ενεργή μάθηση στη χημεία σε συμβολικό επίπεδο. Επομένως, η χρήση διαφορετικών τρόπων εμπλουτίζει την εκμάθηση της χημείας και προσφέρει ένα πιο αποτελεσματικό μέσο κατανόησης εννοιών και αρχών από διαφορετικές οπτικές γωνίες.

Η παρούσα εργασία προωθεί πρωτίστως στους εκπαιδευτικούς να ξεκινούν τη διδασκαλία σε μακροσκοπικό επίπεδο, όπου εφαρμόζουν μία εργαστηριακή άσκηση, να περιλαμβάνουν τη μικροσκοπική παιδαγωγική και να εισάγουν σύμβολα, τύπους και δραστηριότητες βασισμένες σε προβλήματα, αφού οι μαθητές κατανοήσουν τα φαινόμενα σε ατομικό, υποατομικό και μοριακό επίπεδο.

Η παρούσα εργασία ωστόσο υπόκειται και σε κάποιους περιορισμούς. Αυτή περιορίζεται στη διερεύνηση της χρήσης των μακροσκοπικών, μικροσκοπικών και συμβολικών τρόπων αναπαράστασης για την κατανόηση της κινητικής θεωρίας των αερίων μεταξύ των μαθητών της δέκατης τάξης. Με αυτό, τα αποτελέσματα της μελέτης ενδέχεται να παρέχουν βασικά δεδομένα για περαιτέρω μελέτες που θα ασχολούνται με τη χρήση των τρόπων σε άλλα επίπεδα χημείας ή σε άλλους τομείς της επιστημονικής εκπαίδευσης. Μια προ-δοκιμή-μετα-δοκιμή με σχεδιασμό ελέγχου συνιστάται για μελλοντικές μελέτες για να προσδιοριστεί πώς οι έννοιες στη χημεία και τις δεξιότητες επίλυσης προβλημάτων μπορούν να βελτιωθούν από κάθε τρόπο αναπαράστασης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Fensham, P., Gunstone, R. And White, R, (1994) *The Content of Science* (London: Falmer)

Larochelle, M. And Berdnaz, N, (1994) *Constructivism et éducation*, *Revue des Sciences de l'Education*, 20 (1)

Eijkelhof, H. And LIJNSE, P., (1988) *The role of research and development to improve STS education: experiences from the PLON Project*, *International Journal of Science Education*, vol. 10, pp. 464-74.

Fensham, P. J. (1988) *Approaches to the teaching of STS in science education*, *International Journal of Science Education*, vol.10, pp 346-56.

Méheut, M. (1982) *Combustions et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de sixième. Thèse de troisième cycle.*

Klaasen, C. W. J. M., Eijkelhof, H. M. C. And Lijnse, P. L., (1990) *Considering an alternative approach to teaching radioactivity*. In P. L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos and A. J. Waarlo (eds), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles* (Utrecht: CDB Press), pp 304-315

Solomon, J. (1983) *Learning about energy: how pupils think in two domains*, *European Journal of Science Education*, vol. 5, pp 49-59.

Scott, P., Asoko, H. And Driver, R. (1992) *Teaching for conceptual change: a review of strategies*. In R. Duit, F. Goldberg and H. Niedderer (eds), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies*, pp 310-329.

Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. And Gertzog, W. A. (1982) *Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change*, *Science Education*, vol. 66, pp 211-227.

Ainsworth, S. (2007). *The educational value of multiple representations when learning complex scientific concepts*. In: J. K. Gilbert, M. Reiner & M. Nakhleh (Eds.). *Visualization: Theory and Practice in Science Education* (Vol. 3, pp. 191-208). Springer.

Brandiet, A. (2014). Investigating students' understanding of the symbolic, macroscopic, and particulate domains of oxidation-reduction and the development of the redox concept inventory [Ph.D. Dissertation] Miami University.

Stephen G. Brush (2004), History of the Kinetic Theory of Gases, <https://terpconnect.umd.edu/~brush/pdf/ITALENC.pdf> (πρόσβαση 14 Οκτωβρίου 2021)

Davidowitz, B., & Chittleborough, G. (2009). Linking the macroscopic and sub-microscopic levels: Diagrams. In: J. K. Gilbert & D. Treagust (Eds.). Multiple Representations in Chemical Education (Vol. 4, pp. 169-191). Springer.

Department of Education. (2016). K to 12 Curriculum Guide – SCIENCE (Grades 3 to 10). Republic of the Philippines, Department of Education.

Erceg, N., Aviani, I., Mešić, V., Glunčić, M., & Žauhar, G. (2016). Development of the kinetic molecular theory of gases concept inventory: Preliminary results on university students' misconceptions. *Physical Review Physics Education Research*

España, R., & Apostol, J. (2004). *Science III- Chemistry (New Edition)*. Abiva Publishing House, Inc.

Fahmy, A. F. M. (2016). Uses of systemic approach and chemist's triangle in teaching and learning Chemistry: Systemic Chemistry triangle [SCT] as a teaching & learning strategy. *Journal of African Chemical Education*, 6(2), 69-95.

Franco, A. (2005). Secondary students' multiple representations relating to the structure of matter. *Royal Society of Chemistry: University of Cambridge*.

Gilbert, J. K. (2008). Visualization: An emergent field of practice and enquiry in Science education. In: J. K.

Gilbert, M. Reiner & M. Nakhleh, (Eds.). *Visualization: Theory and Practice in Science Education* (Vol. 3, pp. 3-24). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5267-5_1

Gilbert, J. K. & Treagust, D. (Eds.). (2009). *Multiple Representations in Chemical Education*. Springer.

Govender, N., Good, M. A., & Sibanda, D. (2016). Preservice teachers collaborative learning of gases and kinetic molecular theory (KMT) using CmapTools®: A variation theory analysis. *International Journal of Sciences and Research*, 72(12), 394-412. <http://doi.org/10.21506/j.ponte.2016.12.56>

Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2003). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. In: J. K. Gilbert, O. de Jong, R. Justin, D.F. Treagust and J. H. van Diel (Eds). *Chemical Education Towards Research-based Practice* (Vol. 17, pp. 189-212. Springer.

Jauhariyah, M. N. R., Suprpto, N., Suliyanah, Admoko, S., Setyarsih, W., Harizah, Z., & Zulfa, I. (2018). The students' misconceptions profile on chapter gas kinetic theory. *Journal of Physics: Conference Series*, 997, Article 012031. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/997/1/012031> (πρόσβαση 11 Απριλίου 2022)

Johnstone, A. (1982). Macro- and micro-chemistry. *School Science Review*, 64, 377-379.

Kincheloe, J., & Horn, R. (2007). *The Praeger handbook of education and psychology* (Vol. 1). Connecticut: Praeger Publishers

Li, W., & Arshad, M. (2014). Applications of multiple representation levels in redox reactions among tenth grade Chemistry teachers. *Journal of Turkish Science Education*, 11, 35-52.

Marais, P., & Jordaan, F. (2000). Are we taking symbolic language for granted?. *Journal of Chemical Education*, 78(10), 1355-1357. <https://doi.org/10.1021/ed077p1355> (πρόσβαση 11 Απριλίου 2022)

McDermott, M. (2009). The impact of embedding multiple modes of representation on the student construction of chemistry knowledge. University of Iowa. (Ph.D. Dissertation). University of Iowa. <https://www.mobt3ath.com/uplode/book/book-23735.pdf>

Millar, R. (2004). *The Role of Practical Work in the Teaching and Learning of Science*. Department of Educational Studies, The University of York. https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_073330.pdf

Nelson, P. (2002). Teaching Chemistry progressively: from substances, to atoms and molecules, to electrons and nuclei. *Chemical Education Research and Practice Europe*, 3(2), 215-228.

Rhodes, G. (1992). Does a one-molecule gas obey Boyle's Law? *Journal of Chemical Education*, 69(1), 16. <https://doi.org/10.1021/ed069p16> (πρόσβαση 8 Φεβρουαρίου 2022)

Rizk, L. (2011, August 13-18). Learning by doing: Toward an experiential approach to professional development. World Library and Information Congress, Puerto Rico.

Royal Society of Chemistry. (2011). Global framework for Chemistry education for 11-14 and 14-16 ages ranges.

http://www.rsc.org/images/DEVELOPING%20A%20GLOBAL%20FRAMEWORK%20FOR%20CHEMISTRY%20EDUCATION_tcm18-207914.pdf

Sanchez, J. M. (2017). Integrated macro-micro-symbolic approach in teaching secondary Chemistry. *Kimika*, 28(2), 22-29.

Sanchez, J. M. (2018). Translational skills of students in Chemistry. *Science Education International*, 29(4), 214-219.

Santos, V. C., & Arroio, A. The representational levels: Influences and contributions to research in chemical education. *Journal of Turkish Science Education*, 13(1), 3-18.

Schoenfeld, A. (2013). Reflections on problem solving theory and practice. *The Mathematics Enthusiast*, 10, 1-2.

Sunyuno, Yuanita, L., & Ibrahim, M. (2015). Supporting students in learning with multiple representation to improve student mental models on atomic structure concepts. *Science Education International*, 26(2), 104-125.

Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the Chemistry triplet. *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195. <https://doi.org/10.1080/09500690903386435>

Tasker, R., & Dalton, R. (2006). Research into practice: Visualization of the molecular world using animations. *Chemical Education Research and Practice*, 7, 141-159. <https://doi.org/10.1039/B5RP90020D>

Taskin, V., & Bernholt, S. (2014). Students' understanding of chemical formulae: A review of empirical research. *International Journal of Science Education*, 36(1), 157-185. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.744492>

Touli, E. H., Talbi, M., & Radid, M. (2012). Teaching-learning of chemistry: Analysis of representations of learners on the modeling of chemical transformation. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 46, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.05.065>

Towns, M., Raker, J., Becker, N., Harle, M., & Sutcliffe, J. (2012). The biochemistry tetrahedron and the development of the taxonomy of biochemistry external representations (TOBER). *Chemical Education Research and Practice*, 13, 296-306. <https://doi.org/10.1039/c2rp00014h>

Wiseman Jr., FL. (1979). An experiment-oriented approach to teaching the kinetic molecular theory. *Journal of Chemical Education*, 56(4), 233. <https://doi.org/10.1021/ed056p233>

Wood, L. (2013). Representing Chemistry: How instructional use of symbolic, microscopic and macroscopic modes influences student conceptual understanding in Chemistry. (Ph.D. Dissertation). Arizona State University. https://repository.asu.edu/attachments/114440/content/Wood_asu_0010E_13174.pdf

Wu, H. K., & Shah, P. (2004). Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. *Science Education*, 88(3), 465-492. <https://doi.org/10.1002/sce.10126> (πρόσβαση 2 Δεκεμβρίου 2021)

Yakmaci-Guzel, B., & Adadan, E. (2013). Use of multiple representations in developing preservice chemistry teachers' understanding of the structure of matter. *International Journal of Environmental and Science Education*, 8(1), 109-130

2.6: Kinetic Theory of Gases,

[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical and Theoretical Chemistry Textbook Maps/Map%3A Physical Chemistry for the Biosciences \(Chang\)/02%3A Properties of Gases/2.6%3A Kinetic Theory of Gases](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_for_the_Biosciences_(Chang)/02%3A_Properties_of_Gases/2.6%3A_Kinetic_Theory_of_Gases) (πρόσβαση 11 Μαρτίου 2022)

kinetic theory of gases, <https://www.britannica.com/science/kinetic-theory-of-gases>

Kinetic Molecular Theory of Gases,

<https://opentextbc.ca/introductorychemistry/chapter/kinetic-molecular-theory-of-gases/> (πρόσβαση 12 Μαρτίου 2022)

Παράρτημα Α

Δείγμα ροής IMMSA στη διδασκαλία της Δραστηριότητας Μάθησης Πίεσης και Όγκου

1: Εργαστηριακό πείραμα (2 ημέρες=1 ώρα και 40 λεπτά)1. Prelab: Οι μαθητές ερωτώνται για την πίεση και τον όγκο.

2. Κατάλληλο εργαστήριο: Δίνονται στους μαθητές τρία πειράματα σχετικά με την πίεση και όγκο και τα πειράματα σύριγγας Α και Β. Ενώ κάνουν τις πειραματικές διαδικασίες, πρέπει να παρατηρήσουν και να καταγράψουν τα αποτελέσματά τους σε μορφή πίνακα. Καθαρισμός της περιοχής εργασίας και επιστροφή της συσκευής ακολουθεί.

3. Postlab: Οι μαθητές πρέπει να απαντήσουν σε ερωτήσεις ανάλυσης και να γράψουν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του πειράματος.

Μαθησιακή Δραστηριότητα 2: Δραστηριότητα εικονογράφησης (2 ημέρες=1 ώρα και 40 λεπτά)

1. Προκατασκευή: Γίνονται ερωτήσεις στους μαθητές που σχετίζονται με το πειραματικό εργαστήριο.

2. Σωστή κατασκευή: Οι μαθητές χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες. Κάθε ομάδα ανατέθηκε να κατασκευάσει μια απεικόνιση από τα αποτελέσματα του πειράματος που έγινε. Για παράδειγμα, οι μαθητές θα απεικονίσουν τη συμπεριφορά των μορίων κατά την κατανάλωση από ένα καλαμάκι.

3. Μετά την κατασκευή: Ένας εκπρόσωπος από κάθε ομάδα εξηγεί την απεικόνιση με όρους της συμπεριφοράς των μορίων κατά τη διάρκεια τέτοιων διεργασιών.

Μαθησιακή δραστηριότητα 2: Επίλυση προβλημάτων (2 ημέρες=1 ώρα και 40 λεπτά)

1. Επίλυση προβλήματος: Οι μαθητές ερωτώνται για τη σχέση μεταξύ πίεσης και όγκου και θερμοκρασίας και όγκου. Αυτή η κύρια ερώτηση οδηγεί στην εξαγωγή του νόμου του Boyle και του νόμου του Charles.

2. Επίλυση προβλημάτων: Αφού συνάγουν τις παραπάνω σχέσεις και την εξαγωγή του νόμου του Graham, οι μαθητές πρέπει να απαντήσουν σε ένα ή δύο εννοιολογικά προβλήματα. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται δραστηριότητες επίλυσης προβλημάτων σε αυτά, όπου οι απαντήσεις τους ακολουθούν τη μορφή GAFSA (Δεδομένη, Ερωτηθείσα, Τύπος, Λύση και Απάντηση).

3. Επίλυση μετά το πρόβλημα: Ακολουθεί έλεγχος εγγράφων. Μετά από αυτό, ένας ή δύο μαθητές καλούνται να δημιουργήσουν καταστάσεις όπου θα μπορούσε να εφαρμοστεί ο νόμος του Boyle ή ο νόμος του Charles. Αυτό χρησιμεύει ως το στάδιο ολοκλήρωσης και επαλήθευσης του μαθήματος.

Παράρτημα Β

Δείγμα τμήματος του Εργαλείου Επικυρωμένης Έρευνας

Κατάσταση: Ο Jaime βάζει μια χούφτα κόκκους καλαμποκιού σε ένα ποτήρι ζέσεως με μικρή ποσότητα λαδιού.

1. Τι θα παρατηρήσει ο Copper αφού ζεστάνετε το ποτήρι ζέσεως που περιέχει κόκκους καλαμποκιού και λάδι; Α. Οι κόκκοι καλαμποκιού θα σκάσουν Β. Οι κόκκοι του καλαμποκιού θα συρρικνωθούν. Γ. Οι κόκκοι του καλαμποκιού θα αλλάξουν χρώμα. Δ. Τίποτα δεν θα συμβεί με τους κόκκους καλαμποκιού.

2. Γιατί πιστεύετε ότι η απάντησή σας είναι όχι. 1 θα συμβεί; (εποικοδομητική απάντηση)

3. Ποιο από τα παρακάτω είναι ΣΩΣΤΟ για τα μόρια του νερού που υπάρχουν στον πυρήνα κατά τη θέρμανση; Α. Τα μόρια του νερού χτυπούν τα τοιχώματα του πυρήνα του καλαμποκιού με μεγαλύτερο ρυθμό. Β. Τα μόρια του νερού χτυπούν τα τοιχώματα του πυρήνα του καλαμποκιού με μικρότερο ρυθμό. Γ. Τα μόρια του νερού χτυπούν τα τοιχώματα του πυρήνα του καλαμποκιού με ίσο ρυθμό. Δ. Τα μόρια του νερού δεν χτυπούν τα τοιχώματα του πυρήνα του καλαμποκιού όταν θερμαίνεται.

4. Πώς αντιπροσωπεύετε τη συμπεριφορά των μορίων στο αρ. 3; Εικονογραφήστε το παρακάτω. (κατασκευή απάντησης)

5. Ποια είναι η σχέση μεταξύ του όγκου του πυρήνα του καλαμποκιού και της θερμοκρασίας Α. καμία απολύτως σχέση Β. ευθέως ανάλογη Γ. αντιστρόφως ανάλογη Δ. εκθετικά ανάλογη

6. Σε θερμοκρασία 298,15 K, ο πυρήνας του καλαμποκιού έχει όγκο 3,0 mL. Μετά την αύξηση της θερμοκρασίας στους 323,15 K, ποιος είναι ο όγκος του πυρήνα; (απάντηση επίλυσης προβλήματος)