

Εγγενής Ασφάλεια Διεργασιών

9.1 Εισαγωγή

Το 1-ναφθυλο-μεθυλοκαρβαμίδιο ή carbaryl ήταν το κύριο συστατικό του εντομοκτόνου Sevin. Η εταιρεία Union Carbide παρήγαγε το συγκεκριμένο υλικό μέσα από μια διεργασία που περιελάμβανε το τοξικό ισοκυανικό μεθύλιο (MIC – methyl isocyanate) ως ενδιάμεσο προϊόν (μεθυλαμίνη + φωσγένιο → MIC και μετά MIC + α-ναφθόλη → carbaryl) . Άλλες εταιρείες παρασκεύαζαν το ίδιο υλικό με διαφορετικούς τρόπους που δεν περιελάμβαναν σχηματισμό MIC, αν και με ελαφρώς μεγαλύτερο κόστος.

Στο εργοστάσιο της εταιρείας στην Ινδική πόλη Bhopal υπήρχαν αποθηκευμένες μεγάλες ποσότητες από MIC. Στις 3 Δεκεμβρίου 1984 ένα ατύχημα στις δεξαμενές του εργοστασίου προκάλεσε απελευθέρωση 42 τόννων MIC μαζί με άλλες τοξικές ουσίες όπως φωσγένιο, υδροκυάνιο, υδροχλώριο, οξείδια του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα κ.ά. Από το ατύχημα βρήκαν το θάνατο 2259 άνθρωποι την ίδια μέρα και άλλοι 8 έως 10,000 τις επόμενες μέρες, ενώ οι συνέπειες στην υγεία όσων επέζησαν από τις 500000 που εκτέθηκαν, είναι ανυπολόγιστες.

Γιατί συνέβη αυτό το ατύχημα και πώς μπορούσε να αποφευχθεί; Η διαρροή συνέβη όταν νερό που χρησιμοποιούνταν στον καθαρισμό εξοπλισμού, εισήλθε στη δεξαμενή του MIC ενώ δεν έπρεπε. Τότε άρχισε μια ανεξέλεγκτη αντίδραση (runaway reaction) που οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας και τη δημιουργία ατμών σε μεγάλη πίεση που τελικά διέφυγαν στην ατμόσφαιρα. Οι σχετικές έρευνες αποκάλυψαν ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων, όπως πλημμελή συντήρηση του εξοπλισμού, συστήματα ελέγχου εκτός λειτουργίας, ανεπαρκή εκπαίδευση και ελλιπή ενημέρωση του προσωπικού (τα σχετικά εγχειρίδια ήταν γραμμένα στα αγγλικά που δε γνώριζαν οι ντόπιοι) και πολλά άλλα. Ωστόσο, από τη σκοπιά του αντικειμένου της παρούσας ενότητας, αυτό που ενδιαφέρει πιο πολύ είναι οι *προϋποθέσεις* για τον κίνδυνο της συγκεκριμένης διαρροής. Από όσα αναφέραμε, εύκολα διακρίνουμε τα εξής σημεία:

- υπήρχε η δυνατότητα να μπει νερό στη δεξαμενή μέσω των σωληνώσεων που καθαρίζονταν, ενώ δεν έπρεπε,
- υπήρχε μια πολύ μεγάλη ποσότητα του επικίνδунου τοξικού αποθηκευμένη,
- αλλά πάνω από όλα, υπήρχε το ίδιο το τοξικό υλικό, που όπως είπαμε, δεν ήταν απολύτως απαραίτητο. Το σχετικό οικονομικό όφελος από τη συγκεκριμένη μέθοδο παρασκευής, προκάλεσε ανυπολόγιστο κόστος.

Η τελευταία παρατήρηση μας εισάγει στην ουσία της προσέγγισης της **εγγενούς ασφάλειας** την οποία εισήγαγε ο Trevor Kletz τη δεκαετία του 1970. Σύμφωνα με αυτή, η πρώτη μας σκέψη κατά το σχεδιασμό ασφαλών χημικών διεργασιών, πρέπει να είναι πώς να *αποφύγουμε* τον πιθανό κίνδυνο *εκ των προτέρων* παρά το πώς να τον περιορίσουμε εκ των υστέρων. Ή, όπως είπε ο ίδιος ο Kletz: “ο,τι δεν έχεις δε μπορεί να διαρρεύσει” (what you don't have, can't leak).

Μέχρι τώρα είδαμε ότι ο σχεδιασμός ανάγεται σε ένα πρόβλημα δεσμευμένου ακρότατου ή αριστοποίησης υπό περιορισμούς. Οι περιορισμοί που μελετήσαμε ως εδώ, είναι τεχνολογικής και φυσικοχημικής προέλευσης. Τώρα, θα μελετήσουμε μια ειδική κατηγορία περιορισμών που αφορούν επίσης το ανθρώπινο στοιχείο και τον αντίκτυπο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον. Αυτοί οι περιορισμοί αποκλείουν υποψήφιες δομικές λύσεις (διαγράμματα ροής) που

εγκυμονούν κινδύνους και απειλούν την υγεία και τη ζωή των εργαζόμενων και των περιοίκων και προκρίνουν τη χρήση λύσεων χωρίς ή με ελάχιστες ρυπογόνες εκπομπές έναντι άλλων πιο επιβαρυντικών για το περιβάλλον και τη ζωή και υγεία των ανθρώπων.

Θα περίμενε κανείς ότι η εισαγωγή και νέων περιορισμών θα καταστήσει το πρόβλημα του σχεδιασμού πολυπλοκότερο και ενδεχομένως να καθιστούσε ορισμένες επενδύσεις όχι και τόσο συμφέρουσες, αν π.χ. συνυπολογίσουμε τα πάγια και λειτουργικά κόστη για την επεξεργασία αποβλήτων. Αντίθετα, θα δείξουμε ότι η απαίτηση για πρόληψη στους τομείς της υγιεινής και ασφάλειας, καθώς και της προστασίας του περιβάλλοντος όπου θα αναφερθούμε στην επόμενη ενότητα, μπορεί να απλουστεύσει το σχεδιασμό παρά να τον κάνει πιο πολύπλοκο, και μάλιστα να οδηγήσει και σε λύσεις περισσότερο συμφέρουσες. Αλλά, ποιο μπορεί να είναι το “μυστικό” που επιτρέπει κάτι τέτοιο;

Η κεντρική ιδέα είναι αυτή που αναφέραμε και πιο πάνω: είναι καλύτερο, απλούστερο, και μάλιστα αποδοτικότερο και με την οικονομική έννοια, να αποκλείουμε *από πριν* την εμφάνιση του προβλήματος παρά να προσπαθούμε εκ των υστέρων να διορθώσουμε τις συνέπειές του. Αυτό κωδικοποιείται στις έννοιες της **εγγενούς ασφάλειας** και της **καθαρής τεχνολογίας**, που σημαίνει να υιοθετούμε λύσεις οι οποίες από τη φύση τους είναι ελάχιστα επικίνδυνες και φιλικές προς το περιβάλλον. Έτσι, αποφεύγουμε όλο τον κόπο για να σχεδιάσουμε και όλο το κόστος για να υλοποιήσουμε τις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες και προστατευτικά μέτρα που συνοδεύουν τη χρήση ή εκροή εύφλεκτων, τοξικών ή ρυπογόνων ουσιών. Μάλιστα, μερικές από αυτές τις ασφαλέστερες και καθαρότερες λύσεις, θα δούμε ότι περιλαμβάνουν πρακτικές οι οποίες ελαττώνουν τη μία ή την άλλη κατηγορία εξόδων¹.

9.2 Υγιεινή και ασφάλεια

Η βασική αρχή της εγγενούς ασφάλειας είναι να αποφεύγουμε εκ των προτέρων τους πιθανούς κινδύνους. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε ακολουθούνται κάποιες αρχές για τον περιορισμό τους. Πιο συγκεκριμένα:

- Κατά το σχεδιασμό αποφεύγουμε την ανάγκη χρήσης επικίνδυνων υλικών επιλέγοντας άλλες μεθοδολογίες ή ουσίες.

Αν το προηγούμενο δεν είναι εφικτό, τότε:

¹ Σε αυτό το σημείο μπορεί να διερωτηθεί κανείς: Αν είναι τόσο ωραία τα πράγματα, γιατί δε διαδίδεται αμέσως αυτή η πρακτική στη βιομηχανία; Η απάντηση είναι ότι διαδίδεται αλλά με σχετικά αργούς ρυθμούς γιατί, όπως έχουμε δει, τα επενδυτικά σχέδια έχουν χρονικό ορίζοντα της τάξης των δεκαετιών. Το κόστος αναθεώρησης του διαγράμματος ροής στη φάση του σχεδιασμού δεν είναι πάνω από 5-10% της επένδυσης, ενώ μπορεί να τη διπλασιάσει αν γίνει σε επόμενα στάδια, ιδίως αν η μονάδα έχει τεθεί σε λειτουργία. Επομένως, είναι απίθανο να προβεί κανείς στα μισά της διαδρομής σε έναν μεγάλης κλίμακας ανασχεδιασμό, δηλαδή ουσιαστικά, να φτιάξει τη μονάδα από την αρχή, εκτός αν ορισμένα πράγματα αλλάζουν με μικρότερες παρεμβάσεις. Άρα, η εφαρμογή αυτών των αρχών αφορά κυρίως νέες μονάδες, και σε μικρότερο βαθμό τις ήδη υπάρχουσες.

Αλλά αυτό δεν είναι το μόνο εμπόδιο: κάθε νέα τεχνολογία που δεν είναι ήδη δοκιμασμένη ευρέως γίνεται αντιμέτωπη με δισταγμό και σκεπτικισμό. Χωρίς υποστήριξη “απ’ έξω” (π.χ. νομικό και θεσμικό πλαίσιο), οι περισσότεροι υπεύθυνοι των επιχειρήσεων δε θα αναλάβουν εύκολα την ευθύνη για οτιδήποτε μοιάζει με τολμηρή καινοτομία. Επιπλέον, οι αντιστάσεις αυξάνονται επειδή οι διακηρύξεις για ασφαλή και καθαρή παραγωγή υιοθετούνται επιδερμικά για λόγους διαφήμισης ή χρησιμοποιούνται για άσκηση πίεσεων προς τον Χ ανταγωνιστή (επιχείρηση ή χώρα) παρά από αληθινό και άδολο ενδιαφέρον για τους ανθρώπους και το περιβάλλον.

Αλλά το κυριότερο πρόβλημα είναι η πολυδιάσπαση της ανθρώπινης οικονομικής δραστηριότητας σε επιμέρους μονάδες οι οποίες έχουν τους δικούς τους σχεδιασμούς και προσανατολισμούς, ενώ απουσιάζει μια κοινή κατεύθυνση. Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, η τέλεια και ολοκληρωμένη αξιολόγηση μιας τεχνολογίας από την άποψη της “καθαρότητας”, απαιτεί μια συνολική οπτική που περιλαμβάνει τη γνώση όλων των μετατροπών που υφίστανται τα υλικά από το στάδιο της πρώτης ύλης μέχρι αυτό του τελικού προϊόντος, καθώς και της χρησιμοποιούμενης ενέργειας σε κάθε στάδιο. Αυτό αντικειμενικά μας οδηγεί να συλλάβουμε την ανθρώπινη παραγωγική δραστηριότητα ως μια ενιαία ολότητα και τούτο είναι κάτι που δε μπορούμε να περιμένουμε ότι θα το αναλάβει ακόμη και η μεγαλύτερη σε μέγεθος, μεμονωμένη επιχείρηση.

- χρησιμοποιούμε όσο το δυνατό μικρότερες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών,
- τις χρησιμοποιούμε σε χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις ή
- τις αραιώνουμε με τη βοήθεια αδρανών υλικών.

Η εφαρμογή των παραπάνω καθιστά μη αναγκαία τη χρήση περίπλοκων συστημάτων ασφάλειας. Αυτό όχι μόνο απλουστεύει το πρόβλημα του σχεδιασμού και μειώνει το κόστος του έργου, αλλά εξαλείφει και πιθανές πηγές κινδύνων και προβλημάτων αφού όσο πιο μεγάλη και πολύπλοκη είναι μια εγκατάσταση τόσο περισσότερο αυξάνονται οι πιθανότητες να πάει κάτι λάθος, π.χ. λόγω βλάβης μετρητικού ή ρυθμιστικού οργάνου, αστοχίας εξοπλισμού κλπ.

Τα παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν στις *βασικές αρχές της εγγενούς ασφάλειας* που είναι οι εξής:

- **Ελάττωση** του κινδύνου.
- **Αντικατάσταση** του κινδύνου, π.χ. με χρήση λιγότερο επικίνδυνων υλικών ή μεθόδων και τεχνικών που είναι από τη φύση τους πιο ασφαλείς.
- **Εξασθένηση** του κινδύνου.
- **Απλοποίηση** του σχεδιασμού.

Στη συνέχεια, θα έχουμε την ευκαιρία να συζητήσουμε την εφαρμογή των παραπάνω γενικών αρχών σε πιο συγκεκριμένους τομείς και κατηγορίες κινδύνων.

Για την αποφυγή κάθε κινδύνου πρέπει να γνωρίζουμε τις πιθανές αιτίες του ή τους όρους ή προϋποθέσεις εμφάνισής του. Αλλά, ποιοι ακριβώς είναι οι κίνδυνοι που αντιμετωπίζουμε σε ένα χημικό εργοστάσιο; Ένας θεωρητικός ορισμός του κινδύνου θα μπορούσε να είναι ο εξής: η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός ή μία ακολουθία γεγονότων που να καταλήξει σε απώλεια ζωών ή βλάβες στην υγεία, ζημία στο περιβάλλον και τον έμβιο πληθυσμό και καταστροφή υποδομών, εξοπλισμού, περιουσιών κλπ. Το μέγεθος του κινδύνου είναι ανάλογο με την πιθανότητα να συμβεί το γεγονός που θα έχει τις παραπάνω συνέπειες και με την έκταση και βαρύτητα αυτών. Επομένως, κατά το σχεδιασμό επιδιώκουμε να καταλήξουμε σε μια παραγωγική διαδικασία όπου οι πιθανότητες να εμφανιστούν προβλήματα είναι μικρές και οι συνέπειες αυτών θα είναι επίσης περιορισμένες.

Σε πιο πρακτικό επίπεδο, οι κυριώτεροι κίνδυνοι σε ένα χημικό εργοστάσιο μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- **φωτιά,**
- **έκρηξη,**
- αποδέσμευση **τοξικών** ουσιών.

Εξετάζουμε στη συνέχεια, κατά σειρά αυξανόμενης σπουδαιότητας, αυτούς τους παράγοντες ως προς τις προϋποθέσεις εμφάνισής τους:

9.2.1 Φωτιά

Για να εκδηλωθεί φωτιά, πρέπει να συντρέχουν οι εξής παράγοντες:

- Ύπαρξη **εύφλεκτου** υλικού,
- ύπαρξη **οξειδωτικού**,
- **πηγή ανάφλεξης** ή, εναλλακτικά, θερμοκρασία πάνω από το όριο **αυτανάφλεξης**.

Τα εύφλεκτα υλικά μπορεί να είναι σε οποιαδήποτε κατάσταση (αέρια ή ατμοί, υγρά, στερεά – κυρίως σε μορφή λεπτής σκόνης). Ως οξειδωτικό συνήθως δρα το οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Για την αξιολόγηση της πιθανότητας να εκδηλωθεί φωτιά βάσει των ανωτέρω προϋποθέσεων, πρέπει να εξετάσουμε τους εξής παράγοντες:

i Για ατμούς και αέρια.

i.1 Θερμοκρασία αυτανάφλεξης: είναι η θερμοκρασία στην οποία ένας ατμός ή αέριο θα αναφλεγεί αυθόρμητα στον ατμοσφαιρικό αέρα χωρίς εξωτερική πηγή ανάφλεξης.

i.2 Όρια ανάφλεξης ή ευφλεκτότητας: είναι το εύρος των συστάσεων ενός μίγματος ατμού ή αερίου με ατμοσφαιρικό αέρα που επιτρέπει την ανάφλεξη. Σε συγκεντρώσεις μικρότερες από το *κάτω όριο ανάφλεξης*, το μίγμα είναι πολύ αραιό ή το αέριο δε φτάνει για να διαδοθεί η φωτιά. Σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από το *άνω όριο ανάφλεξης*, το μίγμα είναι πολύ πυκνό και δεν επαρκεί το οξειδωτικό για να το κάψει.

Συνήθως, το πιο εύφλεκτο μίγμα είναι αυτό που αντιστοιχεί στη στοιχειομετρική αναλογία των συστατικών που συμμετέχουν στην αντίδραση καύσης. Μια καλή προσέγγιση για το εύρος ευφλεκτότητας είναι οι συστάσεις μεταξύ του μισού και του διπλάσιου της παραπάνω αναλογίας. Ωστόσο, σε πιέσεις διαφορετικές από την ατμοσφαιρική το εύρος αυτό διαφοροποιείται. Αν ελαττώσουμε την πίεση, τότε οι κρούσεις των μορίων που οδηγούν στην αντίδραση της καύσης μειώνονται και έτσι το άνω και κάτω όριο ανάφλεξης πλησιάζουν μέχρι να ταυτιστούν και κάτω από μία πίεση δεν υπάρχει ανάφλεξη. Αντίθετα, αύξηση της πίεσης επιφέρει διεύρυνση των ορίων ανάφλεξης και άρα ύπαρξη του σχετικού κινδύνου σε περισσότερες συστάσεις. Υπάρχουν ωστόσο και μίγματα όπου η επίδραση της πίεσης είναι αντίστροφη και πρέπει να έχουμε συγκεκριμένα στοιχεία για τη συμπεριφορά κάθε μίγματος πριν αξιολογήσουμε την κατάσταση.

Παρόμοια, η αύξηση της θερμοκρασίας διευρύνει τα όρια ανάφλεξης λόγω της αυξημένης κινητικότητας των μορίων που μπορεί να αντισταθμίσει και την επίδραση της χαμηλής πίεσης.

Με βάση τα παραπάνω, προϋποθέσεις ανάφλεξης ενός αερίου είναι το μίγμα του με τον αέρα να βρίσκεται στα όρια ανάφλεξης και είτε η θερμοκρασία να είναι πάνω από το όριο αυτανάφλεξης είτε να υπάρχει πηγή ανάφλεξης. Αλλά και στην τελευταία περίπτωση, πρέπει να συντρέχει άλλη μία προϋπόθεση:

i.3 Ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου: τα όρια ανάφλεξης καθορίζονται από την αναλογία του αερίου με το οξυγόνο. Αλλά αν το οξυγόνο είναι και το ίδιο κάτω από μια ελάχιστη συγκέντρωση, η ενέργεια από την αντίδραση δεν επαρκεί για τη διάδοσή της. Αυτό το εκμεταλλευόμαστε αυξάνοντας την ποσότητα κάποιου αδρανούς συστατικού (άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα ή ατμό) για να αποτρέψουμε την ανάφλεξη.

ii Για υγρά.

ii.1 Σημείο ανάφλεξης: για να αναφλεγεί ένα υγρό πρέπει να εξατμιστεί ένα μέρος του για να σχηματίσει αναφλέξιμο μίγμα με τον αέρα. Η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία το υγρό δίνει αρκετό ατμό για αναφλέξιμο μίγμα είναι το σημείο ανάφλεξης και αυξάνεται με την πίεση.

iii. Για στερεά σε μορφή σκόνης.

iii.1 Οριακή συγκέντρωση οξυγόνου: τα στερεά σε μορφή νέφους αιωρούμενης σκόνης, μπορούν όχι μόνο να αναφλεγούν αλλά και να οδηγήσουν σε έκρηξη. Αυτό απαιτεί μια ελάχιστη συγκέντρωση οξυγόνου σε μίγμα με αδρανές αέριο όπως άζωτο, για τη διάδοση της συγκέντρωσης.

iii.2 Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης: Παρόμοια, υπάρχει μια ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης νέφους στερεάς σκόνης, που είναι σημαντική για την εκτίμηση κινδύνου από επαφή σκόνης με θερμές επιφάνειες. Η θερμοκρασία αυτή μειώνεται αντίστροφα ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων σκόνης και την υγρασία τους.

Όσον αφορά την κατάσταση των εύφλεκτων υλικών, τα υγρά θεωρούνται πιο επικίνδυνα, ιδιαίτερα όταν αποθηκεύονται υπό πίεση και σε θερμοκρασίες πάνω από το σημείο ζέσεως, γιατί πιθανή διαρροή από άνοιγμα δεδομένου μεγέθους οδηγεί σε αποδέσμευση μεγαλύτερης

ποσότητας που κατόπιν εξατμίζεται, απ' ο,τι στην περίπτωση των αερίων, λόγω της μικρότερης πυκνότητας των τελευταίων σε σχέση με τα υγρά.

9.2.2 Πρόληψη πυρκαϊάς

Όταν μια διεργασία περιλαμβάνει αναγκαστικά υλικά που μπορεί, σε ορισμένες συνθήκες, να αναφλεγούν, θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι αυτά δε θα σχηματίσουν αναφλέξιμα μίγματα. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής:

- Αλλάζουμε τις συνθήκες της διεργασίας ώστε τα αέρια μίγματα να είναι εκτός ορίων ανάφλεξης και τα μίγματα με στερεά σκόνη κάτω από την οριακή συγκέντρωση οξυγόνου.
- Αν το προηγούμενο δεν είναι δυνατό, εισάγουμε αδρανές υλικό όπως άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα ή ατμό.
- Αποφεύγουμε χρήση εύφλεκτων υγρών υπό πίεση και σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο ζέσεως σε ατμοσφαιρική πίεση. Προτιμώνται υπόψυκτα υγρά ή ατμοί σε ατμοσφαιρική πίεση.
- Εξαλείφουμε, όπου είναι δυνατό, τις πηγές ανάφλεξης (φλόγες, σπινθήρες από ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, στατικό ηλεκτρισμό, κρούσεις ή τριβές κλπ).
- Γείωση όλων των αγώγιμων στοιχείων για την εξάλειψη σπινθήρων λόγω συσσωρευμένου στατικού ηλεκτρισμού – ιδιαίτερα όπου αποθηκεύονται στερεά σε μορφή σκόνης.
- Αποφυγή χρήσης πλαστικών σωληνώσεων ή άλλων υλικών εξοπλισμού με ηλεκτρομονωτικές ιδιότητες, όπου υπάρχει κατεργασία υλικών σε λεπτή διαμέριση (σκόνη), για να αποφευχθεί συσσώρευση στατικού ηλεκτρισμού.
- Εξασφάλιση υψηλής σχετικής υγρασίας μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή συσσώρευσης στατικών φορτίων σε στερεές σκόνες.

9.2.3 Εκρήξεις

Η έκρηξη θεωρείται σημαντικότερος κίνδυνος από τον κίνδυνο πυρκαϊάς. Ως έκρηξη ορίζουμε την αιφνίδια και βίαιη αποδέσμευση ενέργειας.

Ταξινόμηση των εκρήξεων

Η ενέργεια μπορεί να έχει τις παρακάτω μορφές:

i. **Χημική ενέργεια.** Αυτή προέρχεται από μια εξώθερμη χημική αντίδραση ή ανάφλεξη εύφλεκτων μιγμάτων. Οι εκρήξεις λόγω χημικών αντιδράσεων μπορεί να είναι **ομοιόμορφες**, όπως σε ένα δοχείο, ή **διαδιδόμενες**, όπως σε μία σωλήνωση. Για τα **στερεά σε σκόνη** ορίζεται η **ελάχιστη εκρηκτική συγκέντρωση** σε $g\ m^{-3}$ που θα προκαλέσει διάδοση της φλόγας με την ανάφλεξη.

ii. **Φυσική ενέργεια.** Αυτή μπορεί να προέρχεται από:

- πίεση ενός αερίου
- θερμική ενέργεια
- μηχανική τάση σε μεταλλικά στοιχεία
- ηλεκτρική ενέργεια.

Παράδειγμα έκρηξης λόγω αποδέσμευσης μηχανικής ενέργειας είναι η διάρρηξη ενός δοχείου που περιέχει αέριο σε υψηλή πίεση.

Η θερμική ενέργεια συνήθως είναι σπουδαιότερη επειδή δημιουργεί τις συνθήκες έκρηξης παρά ως πηγή ενέργειας για την ίδια την έκρηξη, π.χ. κατά την εξάτμιση πεπιεσμένου υγρού που εκτονώνεται σε ατμοσφαιρική πίεση λόγω διαρροής.

Ανάλογα με τον τρόπο αποδέσμευσης της ενέργειας, οι εκρήξεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- **Εξάπλωση** (deflagration) και
- **εκτόνωση** (detonation).

Στην πρώτη περίπτωση έχουμε σχετικά πιο αργή διάδοση του μετώπου της φλόγας. Οι πιέσεις που παρατηρούνται μπορούν να φτάσουν τα 10 bar. Στη δεύτερη υπάρχει ένα κρουστικό κύμα ακολουθούμενο από ένα κύμα ανάφλεξης που δίνει την ενέργεια για τη συντήρηση του κρουστικού κύματος. Στην εκτόνωση, η διάδοση του μετώπου γίνεται πιο γρήγορα από την ταχύτητα του ήχου στο αντιδρόν μίγμα και η πίεση φτάνει τα 20 bar. Προφανώς, η εκτόνωση είναι πιο καταστροφική από την εξάπλωση, αλλά μια έκρηξη τύπου εξάπλωσης μπορεί να μετατραπεί σε εκτόνωση αν κινείται κατά μήκος μεγάλων σωληνώσεων.

Οι εκρήξεις ταξινομούνται επίσης, ανάλογα με τις συνθήκες όπου συμβαίνουν. Έτσι, διακρίνουμε:

- Εκρήξεις **σε κλειστό χώρο**, όπως δοχεία, σωληνώσεις ή στο εσωτερικό κτιρίων. Οι συνθήκες ανάφλεξης που μελετήσαμε στην προηγούμενη υποενότητα μπορούν να οδηγήσουν σε έκρηξη τύπου εξάπλωσης που μπορεί να μετατραπεί σε εκτόνωση αν συμβεί σε σωλήνωση, αν και αυτό είναι απίθανο αν συμβεί σε δοχείο.
- Εκρήξεις **σε ανοιχτό χώρο**. Συμβαίνουν συνήθως όταν διαρρέει εύφλεκτος ατμός από διεργασίες που περιλαμβάνουν εκτόνωση υγρού σε ατμοσφαιρική πίεση και θεωρούνται ως πολύ σοβαρός κίνδυνος στη βιομηχανία. Αυτό οφείλεται όχι μόνο στην καταστροφική ικανότητα του φαινομένου αλλά και στο γεγονός ότι η ελεύθερη μετακίνηση του ατμού σε ανοιχτό χώρο μπορεί να προκαλέσει έκρηξη σε απρόβλεπτο σημείο σχετικά μακριά από τη διαρροή.

Οι εκρήξεις σε ανοιχτό χώρο αποδίδουν ως ενέργεια κρουστικού κύματος, μόνο ένα μικρό ποσοστό της ενέργειας από την ανάφλεξη του ατμού, το οποίο ορίζει και την *αποτελεσματικότητα* της έκρηξης και κυμαίνεται από 3 έως 10%.

9.2.4 Πρόληψη εκρήξεων

Αφού η έκρηξη συνήθως ξεκινά με ανάφλεξη κάποιου μίγματος, η πρακτική του ασφαλούς σχεδιασμού κινείται στην ίδια γραμμή όπως και για την πρόληψη του κινδύνου πυρκαϊάς, αποφεύγοντας τις συνθήκες που θα επιτρέψουν σχηματισμό εύφλεκτων μιγμάτων αερίου με αέρα:

- Αλλάζουμε τις συνθήκες ώστε τα μίγματα να είναι εκτός των συνθηκών ανάφλεξης,
- προσθέτουμε αδρανή υλικά,
- εξαλείφουμε πηγές ανάφλεξης, πράγμα που αν γινόταν από μόνο του δε θα ήταν αρκετό (δεδομένης π.χ. και της δυνατότητας αυτανάφλεξης).

9.3 Αποδέσμευση τοξικών

Μεγαλύτερος από τους τρεις κύριους κινδύνους είναι η αποδέσμευση τοξικών χημικών αφού μπορεί να αφορά μεγάλο αριθμό ανθρώπων και να έχει χρόνιες επιπτώσεις. Μπορούμε να διακρίνουμε δύο άκρα στο φάσμα των πιθανών κινδύνων από απελευθέρωση τοξικών ουσιών:

- **Βραχυχρόνια έκθεση** μεγάλου αριθμού ατόμων σε υψηλές συγκεντρώσεις του επικίνδυνου υλικού.
- **Μακροχρόνια έκθεση**, π.χ. στο περιβάλλον εργασίας, σε χαμηλές συγκεντρώσεις τοξικών, με διάφορες συνέπειες στην υγεία.

Υπάρχουν τρεις τρόποι ή οδοί μέσω των οποίων μία χημική ουσία μπορεί να επηρεάσει την υγεία:

- στοματική οδός,
- επαφή με το δέρμα,
- εισπνοή.

Το πιο εύκολο, επομένως και το πρώτο που πρέπει να αποφύγουμε, είναι η εισπνοή τοξικών

ουσιών. Αυτή μπορεί να οφείλεται σε αποδέσμευση ουσιών στην ατμόσφαιρα από ατύχημα ή σε διαρροές που γίνεται με αργούς ρυθμούς από βαλβίδες, σωληνώσεις, φλάντζες κλπ. Επίσης, άνοδος της στάθμης σε δεξαμενές που περιέχουν υγρό σε ισορροπία με τοξικούς ατμούς μπορεί να προκαλέσει διαφυγή μέρους των τελευταίων στην ατμόσφαιρα.

9.3.1 Δείκτες κινδύνου τοξικότητας

Για να αξιολογήσουμε ποσοτικά τον κίνδυνο έκθεσης σε τοξικά, χρησιμοποιούμε την έννοια της **δόσης** ή του **χρόνου έκθεσης**, ανάλογα με το αν μιλάμε για βραχυχρόνια ή μακροχρόνια έκθεση. Για **βραχεία έκθεση** σε υλικό που μεταφέρεται στον αέρα, ορίζεται η **θανατηφόρος συγκέντρωση** ως η συγκέντρωση τοξικού υλικού που επιφέρει το θάνατο στο 50% σε χρόνο τεσσάρων ωρών. Συμβολίζεται ως LC_{50} και προσδιορίζεται με δοκιμές σε πειραματόζωα (δυστυχώς!). Αντίστοιχα, για υλικό που δε μεταφέρεται με τον αέρα, ορίζεται η **θανατηφόρος δόση**, LD_{50} , ως η δόση που αν χορηγηθεί σε δοκιμαστικό πληθυσμό επιφέρει το θάνατο στο 50%. Ως μια κριτική στη χρήση πειραματόζωων για τον προσδιορισμό των παραπάνω δεικτών, αναφέρουμε ότι η προεκβολή των πειραματικών αποτελεσμάτων στον άνθρωπο είναι δύσκολη και επισφαλής, με ένα τρόπο εκτίμησης να αποτελεί η εξίσωση της αναλογίας του βάρους ανθρώπου-πειραματόζωου με την αναλογία της δόσης ή συγκέντρωσης που επιφέρει το θάνατο.

Αντίστοιχα, για μακροχρόνια έκθεση, ορίζονται **οριακές τιμές κατωφλίου**, δηλαδή μέγιστες αποδεκτές ή ανεκτές συγκεντρώσεις στο χώρο εργασίας. Αυτές οι τιμές υποδιαιρούνται σε τρεις κατηγορίες:

- **Χρονικά σταθμισμένη έκθεση.** Αυτή δεν είναι παρά η χρονικά σταθμισμένη μέση τιμή της συγκέντρωσης του τοξικού παράγοντα στο χώρο εργασίας για 8-ωρη απασχόληση και εργάσιμη εβδομάδα των 40 ωρών, στην οποία όλοι οι εργαζόμενοι μπορούν να εκτεθούν χωρίς δυσμενή αποτελέσματα. Επιτρέπονται υπερβάσεις του ορίου αν αντισταθμίζονται από αντίστοιχες αποκλίσεις προς τα κάτω. Αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι τα όποια αποτελέσματα στη φυσική κατάσταση είναι πλήρως αναστρέψιμα, επομένως μόνο με αυτή την προϋπόθεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η χρονική στάθμιση της έκθεσης.
- **Βραχυπρόθεσμη έκθεση.** Αυτή είναι η μέγιστη συγκέντρωση στην οποία μπορεί να εκτεθεί ο εργαζόμενος επί 15 λεπτά χωρίς:
 - ανυπόφορο ερεθισμό,
 - χρόνια ή αναντίστρεπτη ζημιά ιστών,
 - υπνηλία που να οδηγεί σε αυξημένη ροπή για ατυχήματα, μειωμένη ικανότητα αυτοβοήθειας ή σημαντική μείωση της απόδοσης.

Τα παραπάνω συνδυάζονται με την απαίτηση να μην παρατηρηθεί αυτού του είδους έκθεση πάνω από 4 φορές σε μια μέρα, να μεσολαβούν τουλάχιστον 60 λεπτά μεταξύ δύο εκθέσεων και να μην υπάρχει υπέρβαση της ημερήσιας χρονικά σταθμισμένης τιμής.

- **Έκθεση οροφής.** Αυτή είναι η συγκέντρωση η οποία δεν πρέπει να ξεπεραστεί ποτέ, ούτε καν στιγμιαία.

9.3.2 Πρόληψη έκθεσης σε τοξικές ουσίες.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, το καλύτερο είναι να μη γίνεται καν χρήση τοξικών ουσιών. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε πρέπει πρωτίστως να αποφεύγεται η αποθήκευση και επεξεργασία τοξικών ουσιών σε κατάσταση υγρού υπό πίεση για τους λόγους που εξηγήθηκαν ήδη πιο πάνω.

Υπάρχει κατάλληλος μηχανολογικός εξοπλισμός που περιορίζει τις διαρροές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περίπτωση τοξικών, εκρηκτικών και εύφλεκτων συστατικών. Ανεξάρτητα από το είδος του εξοπλισμού πρέπει να γίνεται τακτικός έλεγχος και συντήρηση των μονώσεων και λοιπών "ύποπτων" σημείων. Ένα επιπλέον μέτρο ασφαλείας μπορεί να είναι η τοποθέτηση του εξοπλισμού σε ειδικό κλειστό αεριζόμενο χώρο από όπου ο απομακρυνόμενος αέρας υφίσταται

ειδική κατεργασία πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα.

Τέλος, σε περίπτωση αποθηκευμένων μιγμάτων σε δεξαμενές μεριμνούμε για να εμποδίσουμε την ενδεχόμενη διαφυγή τοξικών ατμών που είναι σε ισορροπία με το υγρό, ιδιαίτερα όταν η στάθμη ανεβαίνει. Αυτό γίνεται με ειδική κατεργασία των ατμών, χρήση κινητής οροφής ή ημιπερατών μεμβρανών στην οροφή.

9.4 Εντατική χρήση των επικίνδυνων υλικών

Όπως είδαμε, η πιο βασική αρχή σχεδιασμού για την ελάττωση των βασικών κινδύνων, είναι η πλήρης απομάκρυνσή τους από το διάγραμμα ροής. Αν αυτό είναι εφικτό, το πλεονέκτημα είναι διπλό επειδή, εκτός από τον κίνδυνο, γλιτώνουμε και από την αντιμετώπιση του μέσω ενός συστήματος ασφαλείας που καθιστά το σχεδιασμό πολυπλοκώτερο και επιβαρύνει τον προϋπολογισμό του έργου.

Ένας τρόπος αποφυγής του κινδύνου είναι η αποφυγή χρήσης επικίνδυνων ουσιών. Αν αυτό δε γίνεται να το αποφύγουμε, τότε επιδιώκουμε να ελαχιστοποιήσουμε τον κίνδυνο μειώνοντας τα αχρησιμοποίητα αποθέματα αυτών των ουσιών μέσω της εντατικότερης χρήσης τους. Κυρίως πρέπει να αποφεύγεται η συσσώρευση αποθέματος εύφλεκτων ή τοξικών ουσιών υπό πίεση. Στη συνέχεια συζητείται η εφαρμογή αυτής της τεχνικής στα διάφορα μέρη της παραγωγικής διαδικασίας.

9.4.1 Αντιδραστήρες

Η πιο μεγάλη πηγή κινδύνου είναι η περίπτωση να έχουμε εξώθερμη αντίδραση που παράγει θερμότητα με ρυθμό ταχύτερο από αυτόν που προλαβαίνει να απομακρύνει το ψυκτικό σύστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να έχουμε προσωρινή μείωση ή διακοπή παροχής του ψυκτικού ρευστού λόγω βλάβης σε κάποια αντλία. Επειδή ο ρυθμός της αντίδρασης αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία ενώ ο ρυθμός ψύξης είναι γραμμική συνάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας, η ανεπάρκεια του ψυκτικού θα προκαλέσει επιτάχυνση της αντίδρασης, της παραγωγής θερμότητας, εξάτμιση μέρους του υγρού και υπερπίεση στον αντιδραστήρα.

Η αρχή της ελάττωσης του κινδύνου επιβάλλει μικρότερη ποσότητα να είναι παρούσα κάθε χρονική στιγμή στον αντιδραστήρα και αυτό σημαίνει ότι μεταξύ αντιδραστήρων διαλείποντος έργου και συνεχούς λειτουργίας προτιμάμε σαφώς τους δεύτερους. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και αντιδραστήρες ημιδιαλείποντος έργου όπου το ένα από τα δύο ή περισσότερα αντιδρώντα προστίθεται σταδιακά και μπορούμε να διακόψουμε την παροχή του και άρα την αντίδραση σε περίπτωση όπου οι συνθήκες αποκλίνουν από τις αποδεκτές τιμές τους. Όσον αφορά τους συνεχείς αντιδραστήρες, προτιμούμε το σχεδιασμό τύπου εμβολικής ροής από αυτόν της πλήρους ανάμιξης, εφόσον αυτός ο τύπος απαιτεί λιγότερο όγκο για την ίδια μετατροπή. Άρα, ο κανόνας εγγενούς ασφάλειας που μπορούμε να διατυπώσουμε για την επιλογή αντιδραστήρα είναι ο εξής:

Οι αντιδραστήρες συνεχούς και ημισυνεχούς λειτουργίας είναι προτιμώτεροι. Αν επιλεγεί συνεχής αντιδραστήρας, προτιμάται ο σχεδιασμός τύπου εμβολικής ροής.

Κλείνουμε αυτή τη συζήτηση με μια ενδιαφέρουσα συζήτηση για τη σχέση συνθηκών διεξαγωγής της αντίδρασης και μεγέθους του αντιδραστήρα. Η επιβολή ακραίων συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί να επιταχύνει την αντίδραση και επομένως μειώνεται ο απαιτούμενος όγκος αντιδραστήρα αφού το μίγμα μπορεί να αντικαθίσταται πιο γρήγορα. Αν η αντίδραση γίνει σε χαμηλή θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση, αυτό απαιτεί μεγαλύτερο όγκο αντιδραστήρα, αλλά η πιθανότητα διαρροών μειώνεται και η ποσότητα που μπορεί να διαρρεύσει θα είναι μικρότερη λόγω της χαμηλής πίεσης, ενώ η χαμηλή θερμοκρασία εξασφαλίζει ότι μόνο μικρό μέρος του υγρού θα γίνει ατμός. Βλέπουμε ότι κάθε περίπτωση έχει τα πλεονεκτήματά της. Μήπως θα μπορούσαμε να συμβιβάσουμε τις δύο αντιτιθέμενες τάσεις κατασκευάζοντας έναν

αντιδραστήρα με μέτριο όγκο και ενδιάμεσες συνθήκες λειτουργίας; Η απάντηση είναι **όχι** γιατί κάτι τέτοιο, πιθανότατα θα συνδύαζε τα χειρότερα αντί για τα καλύτερα χαρακτηριστικά των δύο ακραίων περιπτώσεων: το μέγεθος του αντιδραστήρα θα εξασφάλιζε ότι υπάρχει το δυναμικό για μια σοβαρή διαρροή ή έκρηξη, η πίεση θα ήταν αρκετή για να διαφύγει αρκετή ποσότητα σε σύντομο χρονικό διάστημα σε περίπτωση διαρροής και η θερμοκρασία θα προκαλούσε πιο εύκολα εξάτμιση μεγάλης ποσότητας υγρού οδηγώντας πιθανότατα σε σχηματισμό εύφλεκτου ή εκρηκτικού μίγματος.

9.4.2 Αποστακτικές στήλες

Εδώ είναι η συστοιχία των στηλών που επιλέγεται έτσι ώστε η συνολικά διακινούμενη ποσότητα να ελαχιστοποιείται. Στο διαχωρισμό πολυσυστατικών μιγμάτων, όπως γνωρίζουμε, διακρίνουμε τα συστατικά-κλειδιά ως το ζεύγος των συστατικών με γειτονικές πητικότητες που το ένα θα καταλήξει κυρίως στο απόσταγμα και το άλλο κυρίως στο υπόλειμμα. Εφόσον όλα τα συστατικά είναι το ίδιο επικίνδυνα, μπορούμε να επιλέξουμε διατάξεις που ελαχιστοποιούν την παροχή των άλλων συστατικών πλέον των συστατικών-κλειδιών. Αυτό ελαχιστοποιεί και τη συνολικά διακινούμενη ποσότητα. Προτιμώνται διατάξεις που εκτός από μικρότερη διακινούμενη ποσότητα έχουν και μικρότερο αριθμό μηχανολογικών στοιχείων, ελαττώνοντας την πιθανότητα αστοχίας και διαρροών.

9.4.3 Εναλλαγή θερμότητας

Το ρευστό εναλλαγής θερμότητας προφανώς είναι προτιμώτερο να μην είναι εύφλεκτο (νερό, τήγματα αλάτων). Αν χρησιμοποιήσουμε άλλου είδους ρευστά, προτιμώνται αυτά με υψηλότερο σημείο ζέσεως. Η αποφυγή εύφλεκτων υγρών ισχύει όχι μόνο για τη θέρμανση αλλά και για την ψύξη, όπου π.χ. χρησιμοποιείται το επικίνδυνο προπυλένιο ως ψυκτικό μέσο. Εδώ, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει αύξηση της πίεσης αν ο κίνδυνος διαρροής δεν είναι τόσο μεγάλος από πλευράς συνεπειών, εφόσον μπορεί να αντικατασταθεί το ψυκτικό ρευστό από άλλο πιο ασφαλές. Τέλος, αποφεύγουμε ανύψωση της θερμοκρασίας των βοηθητικών παροχών περισσότερο απ' όσο πραγματικά χρειάζεται κατά περίπτωση. Αυτή η υπόδειξη θα γίνει καλύτερα κατανοητή αν αναλύσουμε ένα πραγματικό περιστατικό, το ατύχημα σε εργοστάσιο του Seveso στην Ιταλία το 1976, που προκάλεσε διασπορά επικίνδυνων τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα.

Η αλληλουχία των γεγονότων που επέφερε το ατύχημα ήταν η εξής: αντίδραση που διεξαγόταν σε αναδεδυμένο αντιδραστήρα υγρής φάσης, διακόπηκε σε θερμοκρασία 160 °C που ήταν και το σημείο ζέσεως του μίγματος, επομένως δε μπορούσε να ξεπεραστεί χωρίς πλήρη εξάτμιση. Η ανάδευση σταμάτησε και διακόπηκε η παροχή υπέρθερμου ατμού που χρησίμευε στην παροχή της απαραίτητης θερμότητας για τον βρασμό. Αυτό εκ πρώτης όψεως ήταν ασφαλές γιατί η δευτερεύουσα παράλληλη αντίδραση που οδηγούσε σε σχηματισμό τοξικής διοξίνης, θα γινόταν ανεξέλεγκτη μόνο πάνω από τους 230 °C, λόγω της αδυναμίας απαγωγής της θερμότητας, όπως εξηγήσαμε σε προηγούμενη παράγραφο. Ωστόσο, ο ατμός της βοηθητικής παροχής είχε θερμοκρασία 300 °C και, αν και είχε διακοπεί η παροχή του, αυτό δεν ήταν χωρίς συνέπειες. Τα τοιχώματα του αντιδραστήρα, αν και μέχρι το ύψος της στάθμης του υγρού είχαν την ίδια θερμοκρασία με αυτό (160 °C), από εκεί και πάνω είχαν θερμοκρασία 300 °C. Τότε, με μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή από τα θερμότερα ανώτερα τοιχώματα στην επιφάνεια του υγρού, αυτή υπερθερμάνθηκε και άρχισε ανεξέλεγκτη αντίδραση η οποία μετά εύκολα διαδόθηκε και στο υπόλοιπο υγρό. Η εξάτμιση μέρους του προκάλεσε διαφυγή από τις βαλβίδες του αντιδραστήρα και διάχυση τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα και σε μεγάλη έκταση στη γύρω περιοχή. Το ατύχημα θα είχε αποφευχθεί αν ο ατμός είχε θερμοκρασία π.χ. 170 °C που δε θα ήταν ικανή να προκαλέσει εκκίνηση της δευτερεύουσας αντίδρασης.

9.4.4 Αποθήκευση

Πηγή κινδύνου μπορεί να αποτελέσουν επίσης οι αποθήκες πρώτων υλών καθώς και ενδιάμεσων

προϊόντων. Εδώ, τα μέτρα μείωσης των αποθεμάτων μπορεί να είναι τα εξής:

- τοποθέτηση των σημείων παραγωγής και κατανάλωσης σε κοντινές αποστάσεις ώστε το υλικό να μη χρειάζεται να μεταφέρεται ή αποθηκεύεται
- ευέλικτος σχεδιασμός με μεταβαλλόμενη δυναμικότητα, ώστε η παραγωγή να αυξομειώνεται κατάλληλα όταν υπάρχει έλλειψη ή καθυστέρηση παράδοσης πρώτων υλών κλπ,
- αποθήκευση εύφλεκτων (προπάνιο, αιθυλενοξειδίο κλπ) ή τοξικών (αμμωνία, χλώριο) αερίων σε χαμηλές θερμοκρασίες και ατμοσφαιρική πίεση,
- στην προηγούμενη περίπτωση και αν οι ποσότητες είναι μικρές, να προτιμηθεί η συμπίεση από την ψύξη του αερίου, αν ο ίδιος ο εξοπλισμός ψύξης αποτελεί πηγή κινδύνου λόγω εύφλεκτου ή τοξικού ψυκτικού ρευστού.

9.4.5 Συστήματα εκτόνωσης – βαλβίδες ασφαλείας

Προτιμούμε ένα δοχείο με ισχυρά τοιχώματα παρά ένα με σύστημα ελεγχόμενης αποδέσμευσης που απαιτεί και επιπλέον κατεργασία των αποδεσμευόμενων τοξικών.

9.4.6 Το συνολικό απόθεμα

Η συνολικά διακινούμενη ποσότητα υλικών μπορεί να αριστοποιηθεί γιατί αύξηση στη μία διεργασία μπορεί να συνεπάγεται μείωση στην άλλη. Μπορεί να σταθμιστεί και ανάλογα με την επικινδυνότητα κάθε διεργασίας.

9.5 Εξασθένιση κινδύνου

Αυτή συνίσταται στην εφαρμογή ηπιώτερων συνθηκών και χαμηλότερων συγκεντρώσεων για τα επικίνδυνα υλικά.

Υψηλή πίεση: Αυξάνει κίνδυνο διαρροών, εκρήξεων και σε συνδυασμό με ακραίες θερμοκρασίες διαβρώνει τα υλικά.

Χαμηλή πίεση: Αν και είναι λιγότερο επικίνδυνη, το κενό μπορεί να προκαλέσει εισροή αέρα που μπορεί να σχηματίσει εύφλεκτο μίγμα

Υψηλή θερμοκρασία: Εδώ ο κίνδυνος είναι παρόμοιος με την πίεση, συν προβλήματα του εξοπλισμού θέρμανσης (από καταπόνηση υλικών λόγω αυξομείωσης θερμοκρασίας μέχρι πιθανότητα έκρηξης).

Χαμηλή θερμοκρασία: ο κυριώτερος κίνδυνος συνδέεται με την απουσία της όταν θα έπρεπε να είναι παρούσα. Αν υπάρχει προσωρινή ανεπάρκεια ψύξης, το υγρό εξατμίζεται και αποτίθενται στερεά που εγκυμονούν κίνδυνο έκρηξης. Επίσης, επέρχεται καταπόνηση υλικών από τις ακραίες ή συχνά και ταχέως μεταβαλλόμενες συνθήκες .

9.6 Ποσοτικοί δείκτες εγγενούς ασφάλειας

Το πιο απλό μέτρο κινδύνου για **φωτιά** και **έκρηξη** είναι η **ενέργεια καύσης** στη φάση του ατμού. Για να εκτιμήσουμε ποσοτικά το σχετικό κίνδυνο, υπολογίζουμε το ποσοστό που θα εξατμιστεί από θερμικό ισοζύγιο και υποθέτουμε ότι καίγεται.

Υποθέτουμε τα δύο ακραία σενάρια: καταστροφική αστοχία εξοπλισμού και απελευθέρωση όλου του υλικού (πιο καταστροφικό) και διαρροή από συγκεκριμένη διατομή (πιο πιθανό).

Παρόμοια, για τα **τοξικά**, μέτρο κινδύνου είναι η **μάζα** του υλικού που θα διαρρεύσει.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9-1 Εκτίμηση κινδύνου φωτιάς.

1000 kmol βενζόλιο στους 100 και 150 βαθμούς για καταστροφική αστοχία. Σημείο βρασμού 80 βαθμοί, ενθαλπία εξατμίσης 31000kJ/kmol, ειδική θερμότητα 150kJ/kmol.K, θερμότητα καύσης 3,200,000 kJ/kmol. Να εκτιμηθεί ο κίνδυνος φωτιάς για κάθε θερμοκρασία.

Λύση:

θεωρούμε ότι η θερμότητα πάνω από το σημείο ζέσεως θα εξατμίσει μέρος του υγρού (ισοζύγιο), άρα $mC_p(T-T_{BP}) = m_V \Delta H_{vap} \Rightarrow m_V/m = C_p(T-T_{BP})/\Delta H_{vap}$ που είναι και η αναλογία των mol άρα αυτό είναι το ποσοστό των 1000 kmol που θα εξατμιστεί και από αυτό βρίσκουμε τη θερμότητα που εκλύεται με την καύση που τελικά δίνει 310 GJ στους 100 και 1085 GJ στους 150 βαθμούς, δηλαδή τριπλάσιο κίνδυνο στη δεύτερη περίπτωση.

