

Η χημική βιομηχανία

3. Βιομηχανική παραγωγή NH_3 , HNO_3 , H_2SO_4



Αμμωνία

Η αμμωνία είναι ένα από τις πιο υψηλά παραγόμενες ανόργανες χημικές ουσίες. Υπάρχουν πολυάριθμες μονάδες παραγωγής αμμωνίας μεγάλης κλίμακας σε όλο τον κόσμο, που παράγουν συνολικά 144 εκ. τόνων αζώτου (175 εκ. τόνους αμμωνίας) το 2016.

Η Κίνα παρήγαγε το 31,9% της παγκόσμιας παραγωγής, ακολουθούμενη από τη Ρωσία με 8,7%, η Ινδία με 7,5% και οι Ηνωμένες Πολιτείες με 7.1%.

Το 80% ή περισσότερο της παραγόμενης αμμωνίας χρησιμοποιείται για τη λίπανση γεωργικών καλλιεργειών.

Η αμμωνία χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή πλαστικών, ινών, εκρηκτικών, νιτρικού οξέος (διεργασία Ostwald) και ενδιάμεσων προϊόντων για βαφές και φαρμακευτικά προϊόντα.

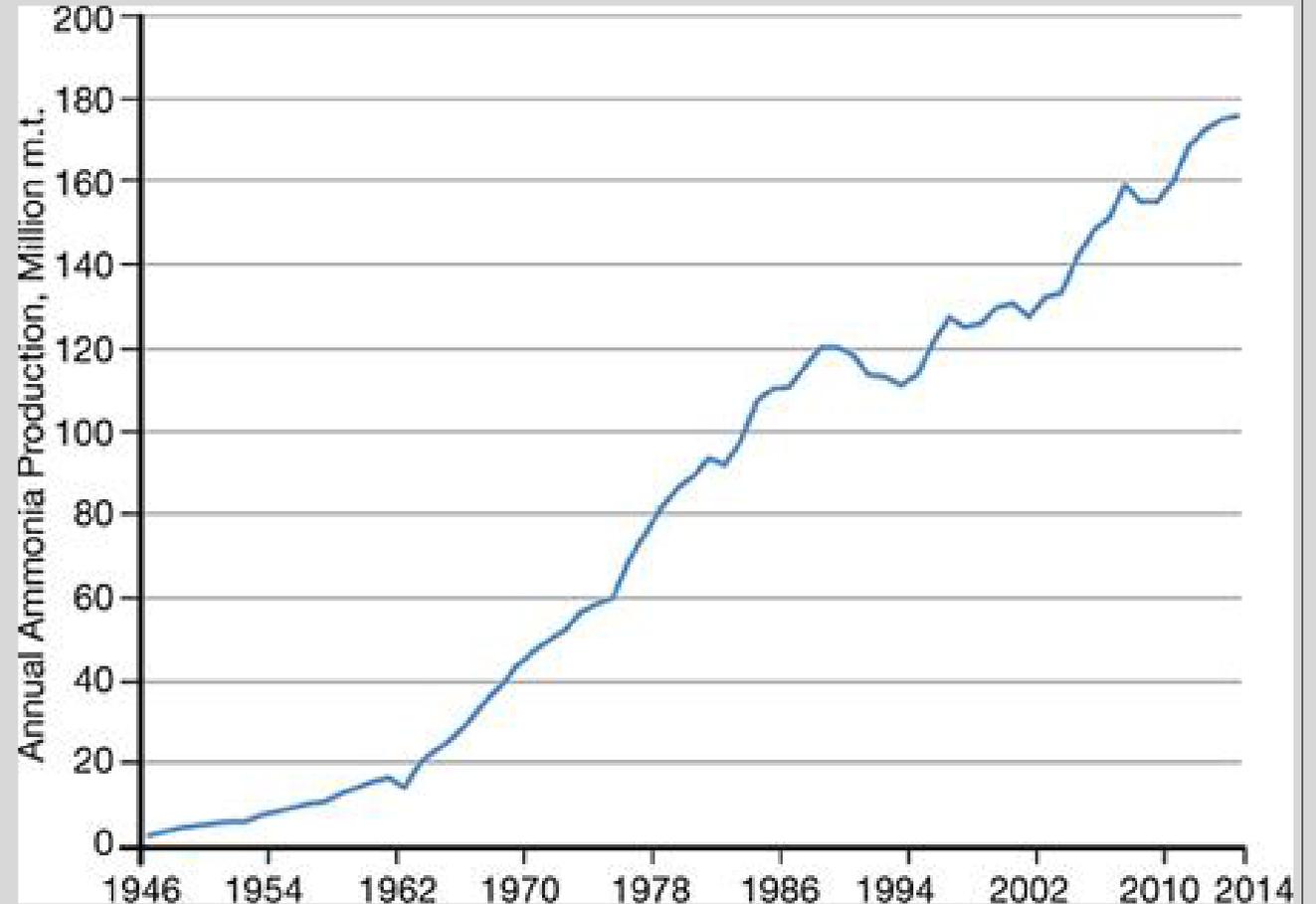


<https://www.youtube.com/watch?v=wiwl4eoHbig&t=8s>

Παγκόσμιοι ρυθμοί παραγωγής

Χωρίς την απόδοση της καλλιέργειας με βάση τα αμμωνιακά λιπάσματα και τα χημικά προϊόντα, ο παγκόσμιος πληθυσμός θα ήταν τουλάχιστον δύο έως τρία δισεκατομμύρια λιγότερος από ό,τι είναι σήμερα.

Η παραγωγή αμμωνίας έχει αυξηθεί σταθερά από το 1946, και εκτιμάται ότι η ετήσια παραγωγή αμμωνίας αξίζει περισσότερα από 100 δισεκατομμύρια δολάρια, με κάποια εργοστάσια να παράγουν περισσότερα από 3.000 τόνους/ημέρα NH_3 .

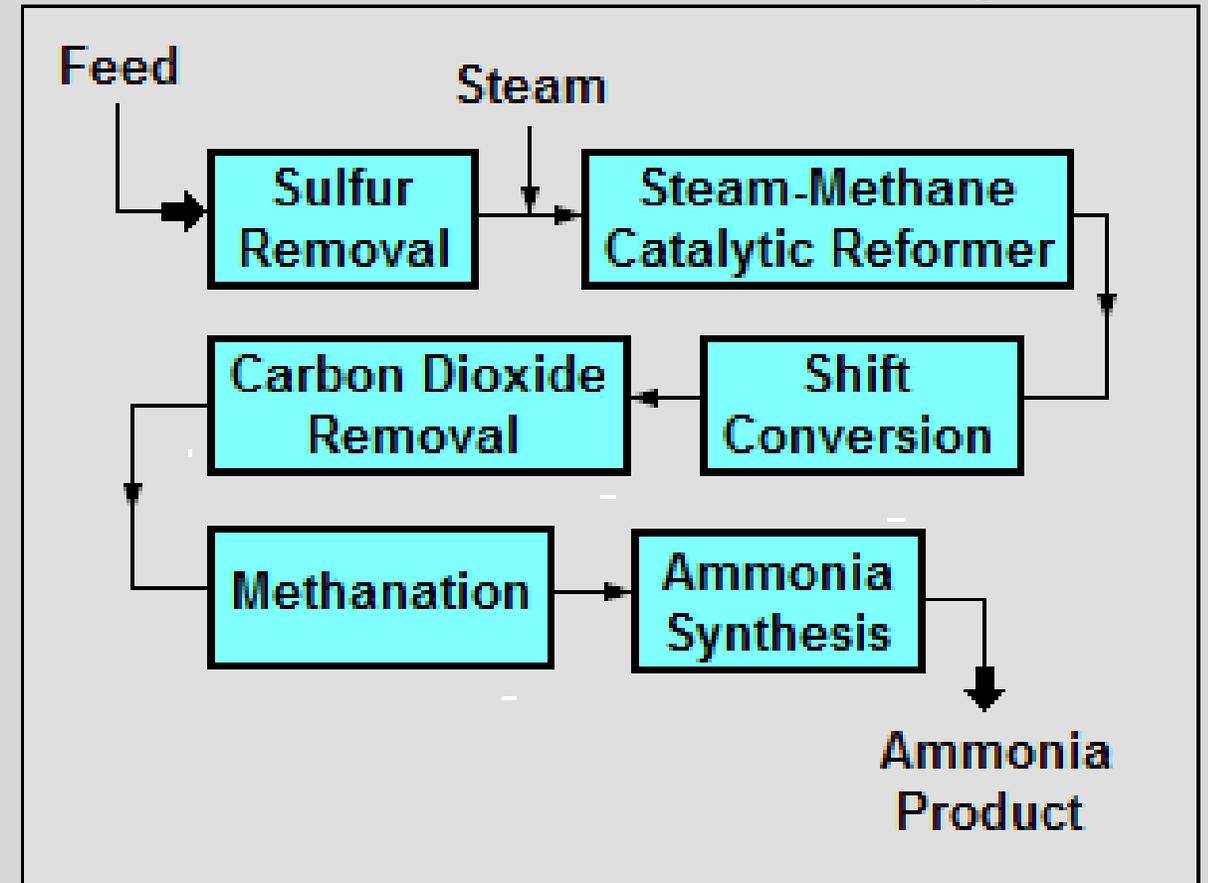


Σύγχρονες μονάδες παραγωγής αμμωνίας - NH_3

Μια τυπική σύγχρονη μονάδα παραγωγής αμμωνίας μετατρέπει πρώτα φυσικό αέριο, υγροποιημένο αέριο πετρελαίου, ή πετρελαϊκή νάφθα σε αέριο υδρογόνο.

Η μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου από υδρογονάνθρακες είναι γνωστή ως αναμόρφωση με ατμό.

Το υδρογόνο στη συνέχεια συνδυάζεται με άζωτο για την παραγωγή αμμωνίας μέσω της διεργασίας **Haber-Bosch**.



<https://www.youtube.com/watch?v=wiwl4eoHbig&t=8s>

<https://www.youtube.com/watch?v=5mXS-MTjSiv>

<https://www.youtube.com/watch?v=qlidmH4C0pM>

Ξεκινώντας από πρώτη ύλη φυσικό αέριο, οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του υδρογόνου είναι:

Το πρώτο βήμα της διεργασίας είναι η απομάκρυνση των ενώσεων του θείου από την πρώτη ύλη επειδή το θείο απενεργοποιεί τους καταλύτες που χρησιμοποιούνται στα επόμενα στάδια. Η απομάκρυνση του θείου απαιτεί καταλυτική υδρογόνωση για τη μετατροπή των ενώσεων του θείου σε αέριο υδρόθειο:



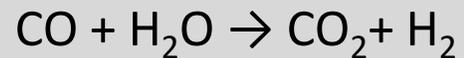
Το αέριο υδρόθειο στη συνέχεια προσροφάται και απομακρύνεται περνώντας το μέσα από κλίνες οξειδίου του ψευδαργύρου όπου μετατρέπεται σε στερεό θειούχο ψευδάργυρο:



Καταλυτική αναμόρφωση με ατμό της πρώτης ύλης χωρίς θείο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για το σχηματισμό υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα:



Το επόμενο βήμα χρησιμοποιεί καταλυτική μετατροπή για τη μετατροπή του μονοξειδίου του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και περισσότερο υδρογόνο:



Στη συνέχεια, το διοξείδιο του άνθρακα απομακρύνεται είτε με απορρόφηση σε υδατικά διαλύματα αιθανολαμίνης ή με προσρόφηση σε προσροφητήρες εναλλαγής πίεσης (PSA) με τη χρήση στερεών προσροφητών.

Το τελικό βήμα για την παραγωγή υδρογόνου είναι η καταλυτική μεθανοποίηση για την απομάκρυνση τυχόν μικρών υπολειπόμενων ποσοτήτων μονοξειδίου του άνθρακα ή διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο:



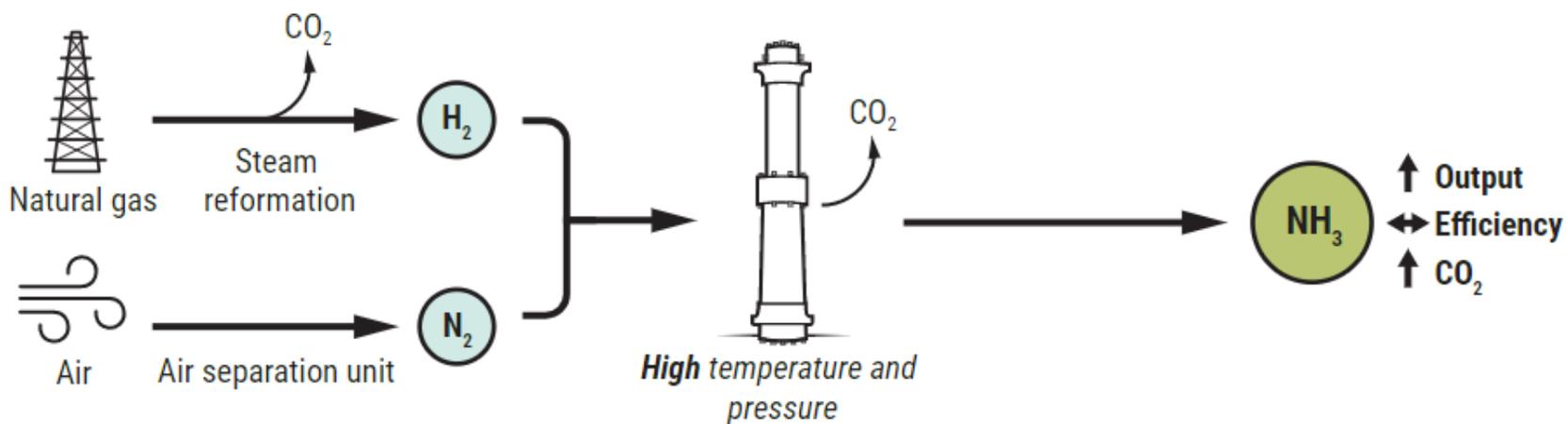
Για την παραγωγή του επιθυμητού αποτελέσματος, προϊόν αμμωνίας, το υδρογόνο στη συνέχεια αντιδρά καταλυτικά με άζωτο (που προέρχεται από τον αέρα της διεργασίας) για να σχηματιστεί άνυδρη υγρή αμμωνία. Το στάδιο αυτό είναι γνωστό ως σύνθεση αμμωνίας (αναφέρεται επίσης ως διεργασία Haber-Bosch):



Ένας πράσινος τρόπος παραγωγής αμμωνίας

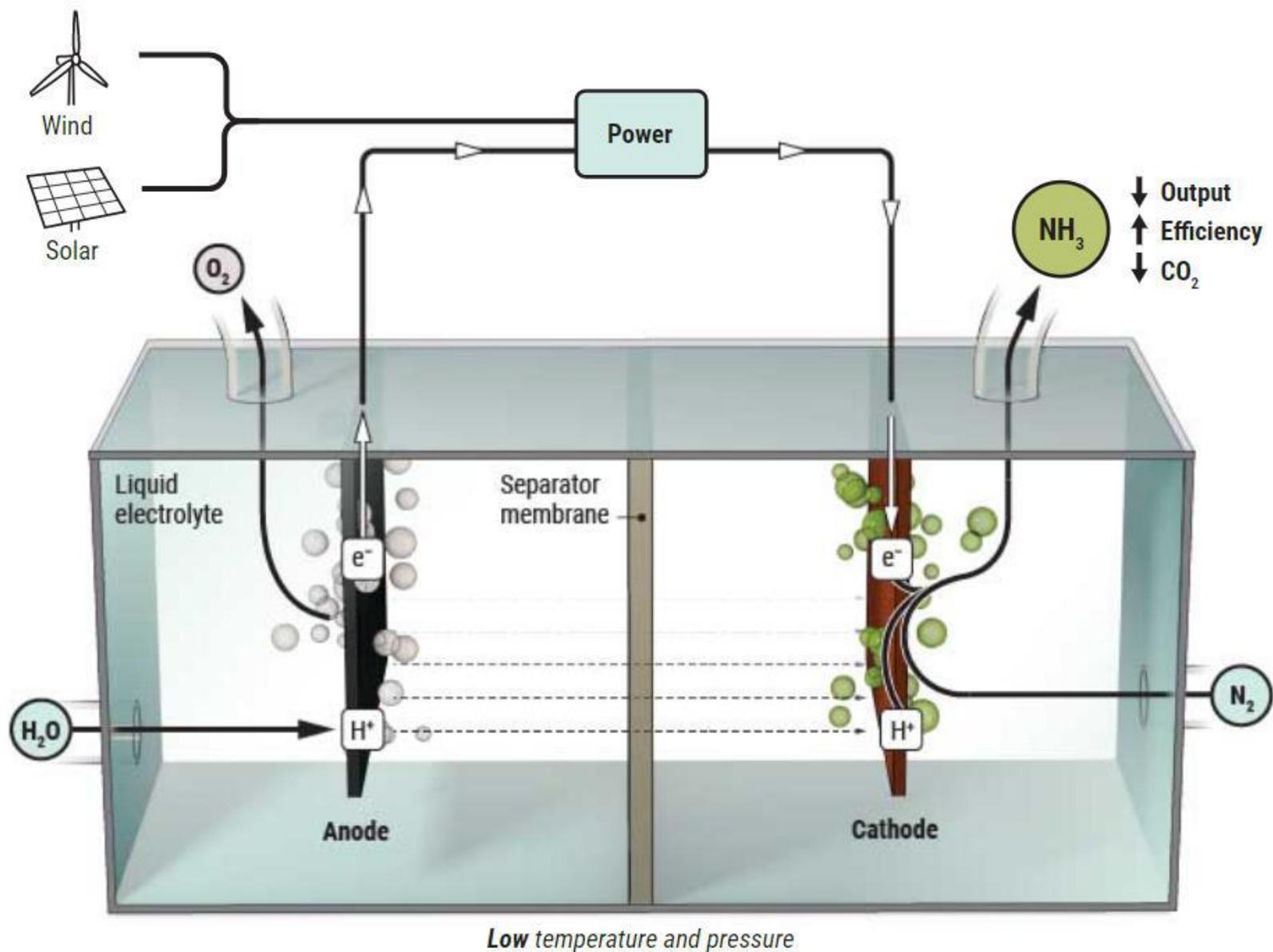
Οι αντίστροφες κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν ανανεώσιμη ενέργεια για την παραγωγή αμμωνίας από αέρα και νερό, μια πολύ πιο φιλική προς το περιβάλλον τεχνική από την βιομηχανική διαδικασία Haber-Bosch.

Η ανανεώσιμη αμμωνία θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως λίπασμα -ο παραδοσιακός ρόλος της αμμωνίας- ή ως ένα πυκνό σε ενέργεια καύσιμο.



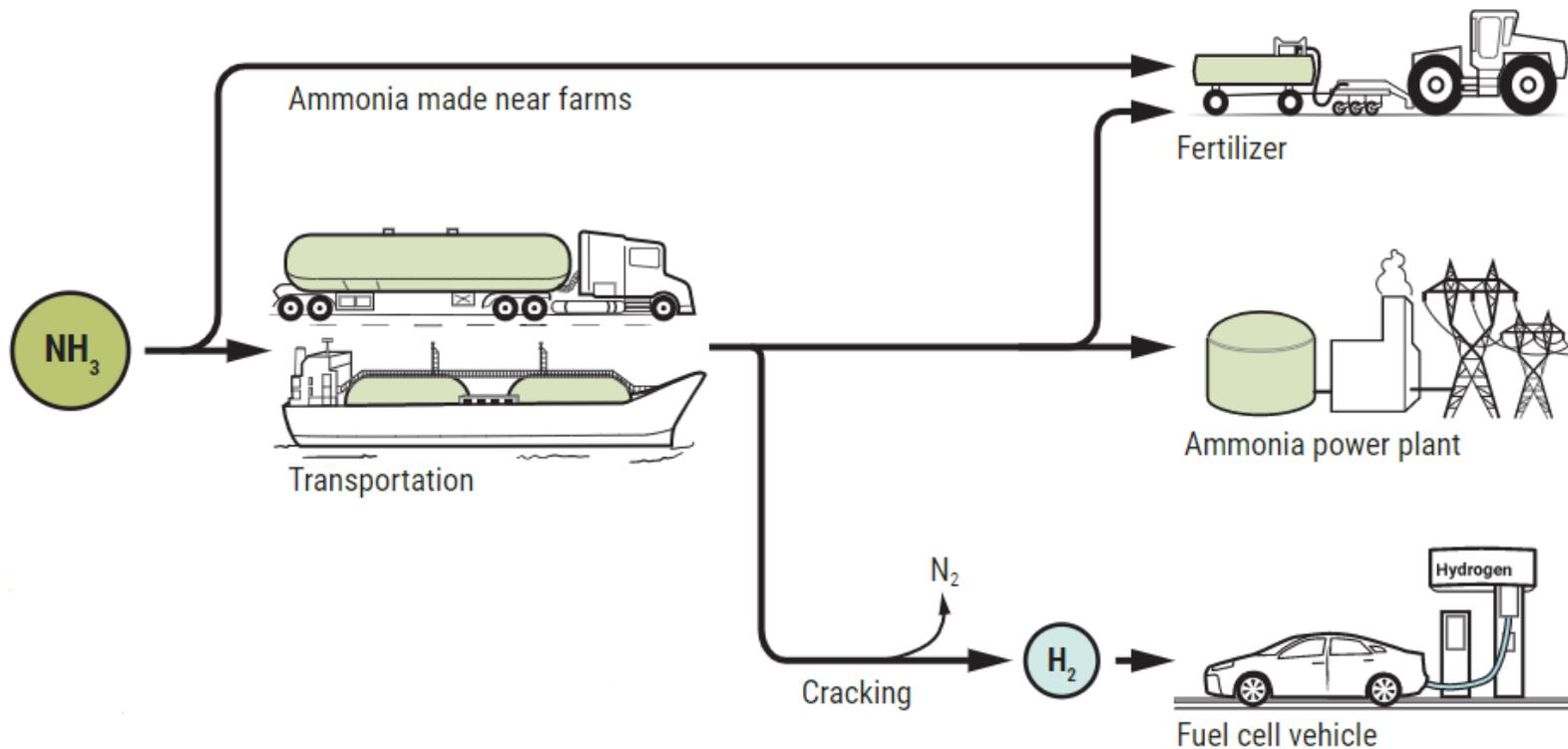
Βιομηχανική αμμωνία

Το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αμμωνία συντίθεται με τη χρήση της Haber-Bosch, μιας διαδικασίας ενός αιώνα, η οποία είναι γρήγορη και αρκετά αποτελεσματική. Αλλά τα εργοστάσια εκπέμπουν τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα.



Πιο ήπιες αντιδράσεις

Μια αντίστροφη κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια για μια χημική αντίδραση που παράγει αμμωνία. Το νερό αντιδρά στην άνοδο για να παράγει ιόντα υδρογόνου (H^+), τα οποία μεταναστεύουν στην κάθοδο όπου αντιδρούν με το άζωτο (N_2) σχηματίζοντας αμμωνία. Η αντίδραση είναι αποτελεσματική, αλλά αργή.



Στην αγορά

Η αμμωνία είναι περισσότερο από λίπασμα. Το αέριο υγροποιείται εύκολα υπό ελαφρά πίεση και ψύξη και μπορεί να μεταφερθεί σε εργοστάσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς άνθρακα. Μπορεί επίσης να «σπάσει» σε H_2 , μια πολύτιμη ενεργειακή πηγή για οχήματα κυψέλης καυσίμου.

<https://www.science.org/content/article/ammonia-renewable-fuel-made-sun-air-and-water-could-power-globe-without-carbon>

<https://youtu.be/eLMfRZGagfE>

Παραγωγή νιτρικού οξέος

<https://www.youtube.com/watch?v=Flxz7biilG0>

Το 1991, υπήρχαν περίπου 65 εργοστάσια νιτρικού οξέος (HNO_3) στις Η.Π.Α. με συνολική δυναμικότητα 11 εκατομμυρίων τόνων HNO_3 ετησίως. Το μέγεθος των εργοστασίων κυμαίνεται από 6.000 έως 700.000 τόνους ετησίως.

Περίπου το 70% του παραγόμενου νιτρικού οξέος καταναλώνεται ως ενδιάμεσο προϊόν για την παρασκευή νιτρικού αμμωνίου (NH_4NO_3), το οποίο με τη σειρά του χρησιμοποιείται σε λιπάσματα. Η πλειονότητα των μονάδων παραγωγής νιτρικού οξέος βρίσκονται σε γεωργικές περιοχές, όπως οι μεσοδυτικές, οι νοτιοκεντρικές και οι Πολιτείες του Κόλπου, λόγω της υψηλής ζήτησης λιπασμάτων στις περιοχές αυτές.

Ένα άλλο 5 έως 10 % του παραγόμενου νιτρικού οξέος χρησιμοποιείται για οξείδωση οργανικών στην παραγωγή αδιπικού οξέος. Το νιτρικό οξύ χρησιμοποιείται επίσης στην οξείδωση οργανικών για την παρασκευή τερεφθαλικού οξέος και άλλων οργανικών ενώσεων.

Η κατασκευή εκρηκτικών υλών χρησιμοποιεί νιτρικό οξύ για την οργανική νιτροποίηση. Νιτρικό οξύ χρησιμοποιείται για την παραγωγή νιτροβενζολίου, δινιτροτολουολίου και άλλων χημικών ενδιάμεσων προϊόντων.

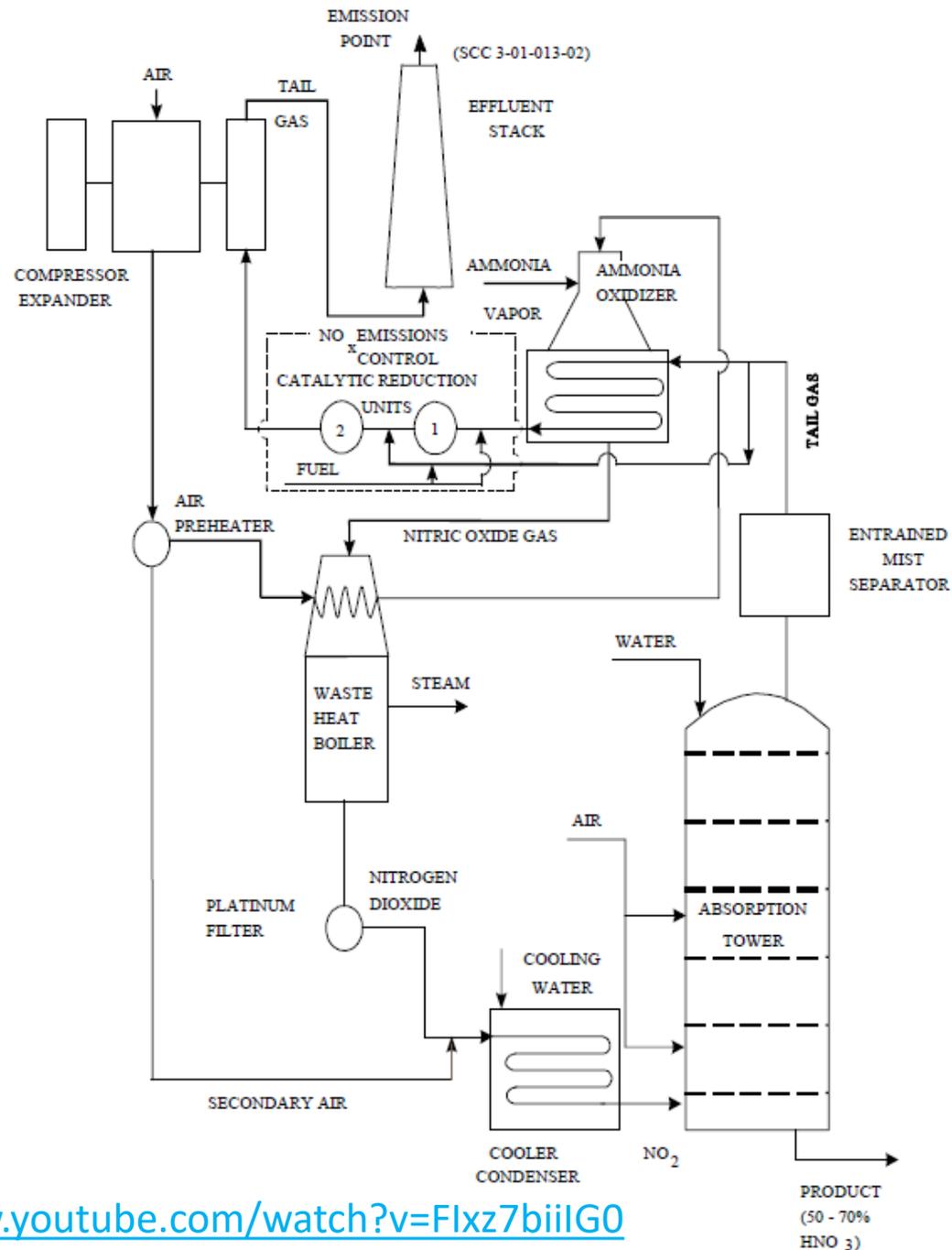
Άλλες τελικές χρήσεις του νιτρικού οξέος είναι ο διαχωρισμός χρυσού και αργύρου, τα πυρομαχικά, η πάχυνση χάλυβα και ορείχαλκου, η φωτογράφιση και η οξίνιση φωσφορικών πετρωμάτων.

Περιγραφή διεργασίας

Το νιτρικό οξύ παράγεται με 2 μεθόδους:

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί οξείδωση, συμπύκνωση και απορρόφηση για την παραγωγή ενός ασθενούς νιτρικού οξέος. Το **ασθενές νιτρικό οξύ** μπορεί να έχει συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 30 έως 70 % σε νιτρικό οξύ.

Η δεύτερη μέθοδος συνδυάζει αφυδάτωση, λεύκανση, συμπύκνωση και απορρόφηση για την παραγωγή ενός νιτρικού οξέος υψηλής ισχύος από ένα ασθενές νιτρικό οξύ. Το **νιτρικό οξύ υψηλής ισχύος** περιέχει γενικά περισσότερο από 90 % νιτρικό οξύ.



Παραγωγή ασθενούς νιτρικού οξέος

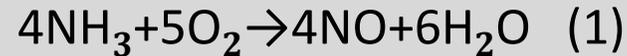
Σχεδόν όλο το νιτρικό οξύ που παράγεται στις Η.Π.Α. παρασκευάζεται από την καταλυτική μέθοδο υψηλής θερμοκρασίας οξείδωσης της αμμωνίας όπως φαίνεται σχηματικά στο σχήμα. Η διαδικασία αυτή αποτελείται συνήθως από 3 στάδια:

- (1) οξείδωση της αμμωνίας,
- (2) οξείδωση του οξειδίου του αζώτου, και
- (3) απορρόφηση.

Κάθε βήμα αντιστοιχεί σε μια ξεχωριστή χημική αντίδραση.

Οξείδωση αμμωνίας

Πρώτον, ένα μείγμα αμμωνίας/αέρα 1:9 οξειδώνεται σε θερμοκρασία 749 έως 799°C καθώς διέρχεται από έναν καταλυτικό μετατροπέα, σύμφωνα με την ακόλουθη αντίδραση:



Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος καταλύτης αποτελείται κατά 90 % από πλατίνα και κατά 10 % από γάζα ροδίου κατασκευασμένη από τετράγωνα λεπτά σύρματα. Υπό αυτές τις συνθήκες η οξείδωση της αμμωνίας σε μονοξείδιο του αζώτου (NO) εξελίσσεται σε μια εξώθερμη αντίδραση με απόδοση από 93 έως 98 %.

Το μονοξείδιο του αζώτου θεωρείται ρύπος και είναι γνωστό ότι είναι ένα αέριο που προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη.

Οξείδωση του μονοξειδίου του αζώτου

Το οξείδιο του αζώτου που σχηματίζεται κατά την οξείδωση της αμμωνίας πρέπει να οξειδωθεί. Το ρεύμα της διεργασίας διέρχεται από έναν ψύκτη/συμπυκνωτή και ψύχεται στους 38 °C ή λιγότερο, σε πιέσεις έως και 8 bar. Το οξείδιο του αζώτου αντιδρά μη καταλυτικά με το υπολειπόμενο οξυγόνο για να σχηματίζει διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και το υγρό διμερές, το τετροξείδιο του αζώτου:



Αυτή η αργή, ομογενής αντίδραση έχει υψηλή εξάρτηση από θερμοκρασία και πίεση. Λειτουργώντας σε χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις προωθεί τη μέγιστη παραγωγή NO₂ σε ελάχιστο χρόνο αντίδρασης.

Απορόφηση

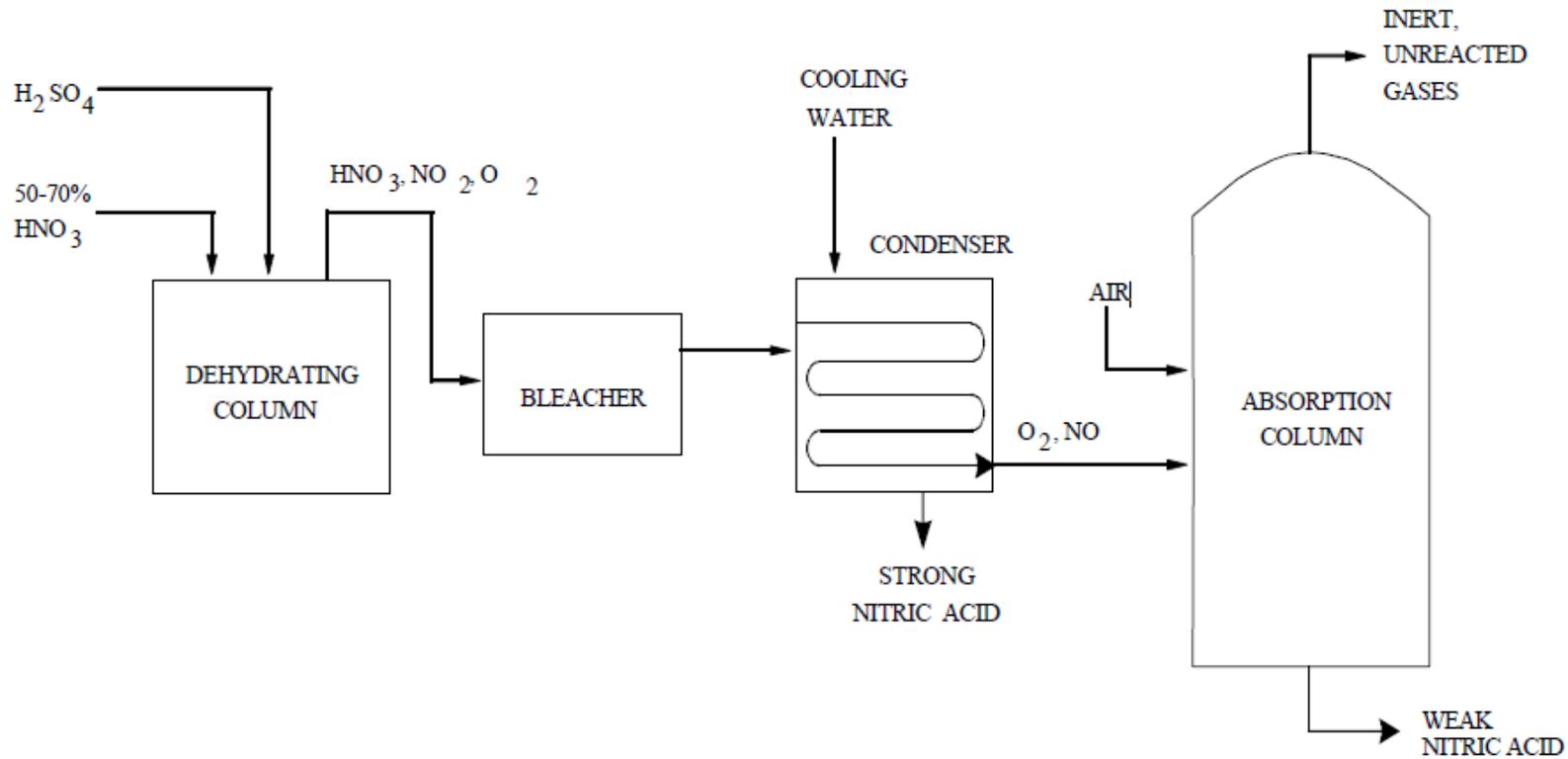
Το τελικό στάδιο εισάγει το μείγμα διοξειδίου του αζώτου/διμερούς σε μια διαδικασία απορρόφησης μετά την ψύξη. Η εξώθερμη αντίδραση λαμβάνει χώρα ως εξής:



Ένα δευτερεύον ρεύμα αέρα εισάγεται στη στήλη για να οξειδώσει εκ νέου το NO που σχηματίζεται στην αντίδραση 3. Αυτός ο δευτερεύων αέρας απομακρύνει επίσης το NO₂ από το οξύ του προϊόντος. Ένα υδατικό διάλυμα 55 έως 65 % νιτρικού οξέος αποσύρεται από τον πυθμένα του πύργου.

Η συγκέντρωση του οξέος μπορεί να κυμαίνεται από 30 έως 70 % σε νιτρικό οξύ.

Η συγκέντρωση του οξέος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση, τον αριθμό των βαθμίδων απορρόφησης και τη συγκέντρωση των οξειδίων του αζώτου που εισέρχονται στον απορροφητή.



Παραγωγή ισχυρού νιτρικού οξέος

Διάγραμμα ροής παραγωγής ισχυρού νιτρικού οξέος από ασθενές νιτρικό οξύ.

Το ισχυρό νιτρικό οξύ (98 έως 99 %) μπορεί να ληφθεί συμπυκνώνοντας το ασθενές νιτρικό οξύ (30 έως 70 %) χρησιμοποιώντας εκχυλιστική απόσταξη.

Η διαδικασία συμπύκνωσης νιτρικού οξέος συνίσταται στην τροφοδοσία ισχυρού θειικού οξέος και νιτρικού οξέος 55 έως 65 % στην κορυφή μιας στήλης αφυδάτωσης σε περίπου ατμοσφαιρική πίεση.

Οι ατμοί του συμπυκνωμένου οξέος εξέρχονται από τη στήλη και οδηγούνται σε έναν λευκαντήρα (bleacher) και ένα σύστημα συμπυκνωτή αντίθετου ρεύματος για να επηρεάσει τη συμπύκνωση του ισχυρού νιτρικού οξέος και το διαχωρισμό του οξυγόνου και των παραπροϊόντων οξειδίων του αζώτου (NO_x).

Αυτά τα παραπροϊόντα στη συνέχεια ρέουν σε μια στήλη απορρόφησης όπου το οξείδιο του αζώτου αναμιγνύεται με βοηθητικό αέρα για να σχηματίσει NO_2 , το οποίο ανακτάται ως ασθενές νιτρικό οξύ.

Παραγωγή θειικού οξέος (βιτριόλι)

<https://www.youtube.com/watch?v=mym1rRPX6F4>

<https://chemicalengineeringworld.com/sulphuric-acid-manufacturing-process/>

Το θειικό οξύ, επίσης γνωστό ως βιτριόλι, είναι ένα ορυκτό οξύ που αποτελείται από τα στοιχεία θείο, οξυγόνο και υδρογόνο, με μοριακό τύπο H_2SO_4 . Είναι ένα άχρωμο και παχύρρευστο υγρό που αναμιγνύεται με το νερό σε όλες τις συγκεντρώσεις.

Το οξύ σε καθαρή μορφή είναι εξαιρετικά διαβρωτικό προς άλλα υλικά, καθώς είναι οξειδωτικό και ισχυρής όξινης φύσης.

Το οξύ σε καθαρή μορφή είναι ιδιαίτερα αφυδατικό, το οποίο σημαίνει ότι αφαιρεί το νερό από οποιοδήποτε ουσία με την οποία έρχεται σε επαφή. Είναι επίσης υγροσκοπικό, απορροφώντας εύκολα υδρατμούς από τον αέρα.



- Κατά την προσθήκη θειικού οξέος σε νερό (αυτό δεν πρέπει να αντιστρέφεται), απελευθερώνεται πολλή θερμότητα.
- Κατά την επαφή, το καθαρό θειικό οξύ μπορεί να προκαλέσει σοβαρά χημικά εγκαύματα και ακόμη και δευτερογενή θερμικά εγκαύματα λόγω αφυδάτωσης- ακόμη και μικρές ποσότητες καθαρού οξέος είναι επικίνδυνες.
- Το διάλυμα του θειικού οξέος σε νερό είναι σημαντικά λιγότερο επικίνδυνο- οι οξειδωτικές και αφυδατωτικές ιδιότητες είναι παρούσες μόνο στο καθαρό οξύ, αν και το διάλυμα του οξέος σε νερό θα είναι πολύ όξινο, και επομένως θα πρέπει να εξακολουθεί να αντιμετωπίζεται με προσοχή.

Το θειικό οξύ είναι ένα πολύ σημαντικό χημικό προϊόν και η παραγωγή θειικού οξέος ενός κράτους αποτελεί καλό δείκτη της βιομηχανικής του ισχύος.

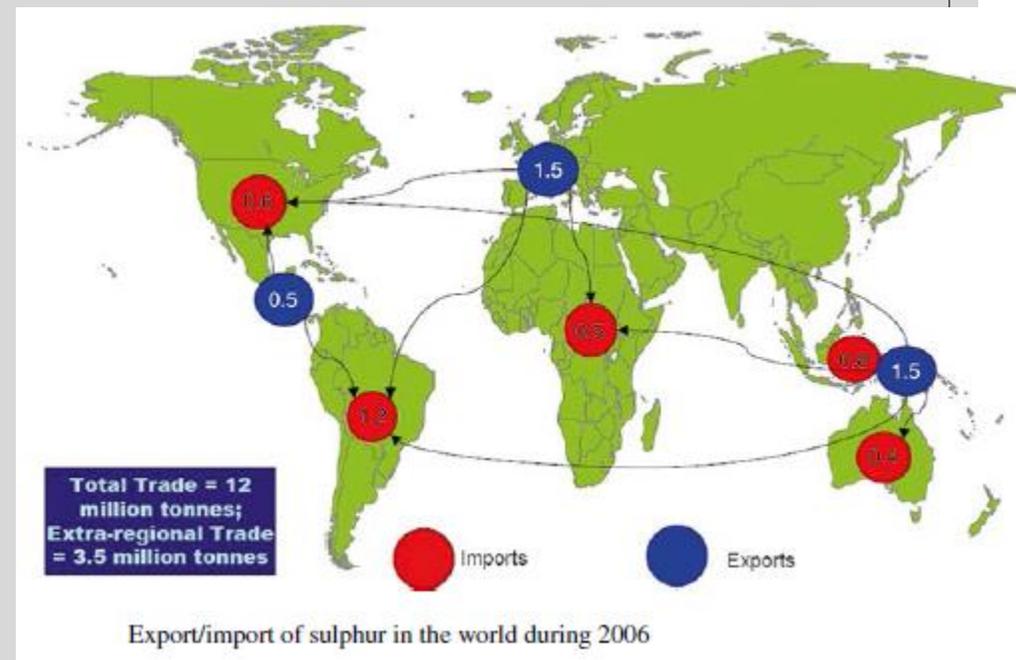
Παράγεται ευρέως με διάφορες μεθόδους, όπως η διεργασία επαφής, η διεργασία υγρού θειικού οξέος, η διεργασία θαλάμου μολύβδου και μέθοδοι.

Το θειικό οξύ αποτελεί επίσης βασική ουσία στη χημική βιομηχανία. Χρησιμοποιείται συνηθέστερα στην κατασκευή λιπασμάτων, αλλά είναι επίσης σημαντικό στην επεξεργασία ορυκτών, στη διύλιση πετρελαίου, στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων και στη χημική σύνθεση. Έχει ένα ευρύ φάσμα τελικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των οικιακών όξινων καθαριστικών αποχέτευσης, ως ηλεκτρολύτης σε μπαταρίες μολύβδου-οξέος, στην αφυδάτωση μιας ένωσης και σε διάφορα καθαριστικά μέσα.

Τρέχουσα κατάσταση της παραγωγής θειικού οξέος 'King of Chemicals'

Το θειικό οξύ παράγεται σχεδόν σε όλες τις χώρες του κόσμου με κυριότερους παραγωγούς τις ΗΠΑ, τη Ρωσία, την Κίνα, την Ιαπωνία, τη Φινλανδία, τη Βραζιλία, την Ινδία, τη Νότια Κορέα, την Αυστραλία, την Ινδονησία, τη Γερμανία, την Ισπανία, τη Γαλλία και το Βέλγιο. Οι τέσσερις τελευταίες χώρες αντιπροσωπεύουν το 70% της συνολικής ευρωπαϊκής παραγωγής. Οι ΗΠΑ και ο Καναδάς αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 40% της παραγωγής θειικού οξέος.

Τα θειικά οξέα καθαρότητας μπαταρίας, φαρμακευτικών, εργαστηριακών, καθώς και ηλεκτρονικών, είναι όλο και πιο καθαρές ποικιλίες του οξέος και έχουν συγκεκριμένες χρήσεις.



Κυριότερες χρήσεις του θειικού οξέος

1. Βρίσκει εφαρμογή ως αφυδατωτικός παράγοντας, καταλύτης, ενεργό αντιδραστήριο σε χημικές διεργασίες, διαλύτης και απορροφητικό.
2. Χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες διεργασιών από πολύ αραιές συγκεντρώσεις για τον έλεγχο του pH των αλατούχων διαλυμάτων έως ισχυρά καυσαέρια που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες χρωστικών, εκρηκτικών και φαρμακευτικών προϊόντων.
3. Παράγεται και παρέχεται σε ποιότητες με ακριβή καθαρότητα για τις βιομηχανίες μπαταριών αποθήκευσης, ρεγιόν, αλμών, βαφών και φαρμακευτικών προϊόντων, καθώς και σε ποιότητες με λιγότερο απαιτητικές προδιαγραφές για χρήση στις βιομηχανίες χάλυβα, βαρέων χημικών προϊόντων και υπερφωσφορικών και φωσφορικών λιπασμάτων.

- Το θειικό οξύ δεν είναι προϊόν μιας χρήσης. Μετά την αρχική χρήση σε ορισμένες φάσεις των βιομηχανιών εκρηκτικών υλών, πετρελαίου και βαφών, το θειικό οξύ ανακτάται σε μορφή συχνά ακατάλληλη για χρήση στην ίδια διεργασία, αλλά με αντοχή και ποιότητα απολύτως κατάλληλη για χρήση σε άλλες βιομηχανίες διεργασιών.
- Μεγάλες ποσότητες θειικού οξέος καταναλώνονται στην παραγωγή φωσφορικών λιπασμάτων, θειικού αμμωνίου κ.λπ. για κάθε τόνο P_2O_5 απαιτούνται 3 τόνοι 100% θειικού οξέος.

Διαδικασίες παρασκευής θειικού οξέος

Οι διεργασίες για την παρασκευή θειικού οξέος μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες:

- Στοιχειακό θείο
- Θειούχα μεταλλεύματα
- Χρησιμοποιημένο οξύ
- Αέρια όπως H_2S

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές για κάθε διεργασία που χρησιμοποιεί τις προαναφερθείσες πρώτες ύλες.

Επισκόπηση των τεχνικών που εφαρμόζονται στην παραγωγή θειικού οξέος

Sulfuric acid production processes for new plants

New plants	SO ₂ content in feed gas (vol.%)	Conversion achievable	With state of the art emission controller for new plants SO ₃ ^a
Single contact	6–10 ^b	98.5% ^c	0.4 kg.ton ^{-1d}
	3–6	97.5–98.5%	
Double contact	6–12 ^b	99.6%	0.1 kg.ton ^{-1d}
Wet contact process	0.05–7	98.0%	>10 ppmv SO ₃
Process based on NO _x ^e	0.05–8	nearly 100%	–
H ₂ O ₂ Process		>99.0%	Very low

Note: with tail gas scrubbing there are practically no emissions of sulfur dioxide in modern plants

^aSO₃ + H₂SO₄ expressed as SO₃

^bWhen sulfur burning

^cFor existing plants the conversion achievable is 98%

^dPer tonne of acid produced

^ePossible emissions of NO_x

Διεργασία απλής επαφής

Τα αέρια που περιέχουν SO₂, τα οποία έχουν καθαριστεί και ξηρανθεί προσεκτικά, οξειδώνονται σε τριοξείδιο του θείου παρουσία καταλυτών που περιέχουν οξείδια αλκαλίων και βανάδιου. Το τριοξείδιο του θείου απορροφάται από πυκνό θειικό οξύ σε απορροφητήρες, πριν από τους οποίους προηγούνται, εάν είναι απαραίτητο, απορροφητήρες ελαίου.

Στους απορροφητές, το τριοξείδιο του θείου μετατρέπεται σε θειικό οξύ από το υπάρχον νερό στο οξύ του απορροφητή. Το απορροφητικό οξύ διατηρείται στην επιθυμητή συγκέντρωση περίπου 99 % κ.β. με την προσθήκη νερού ή αραιού θειικού οξέος.

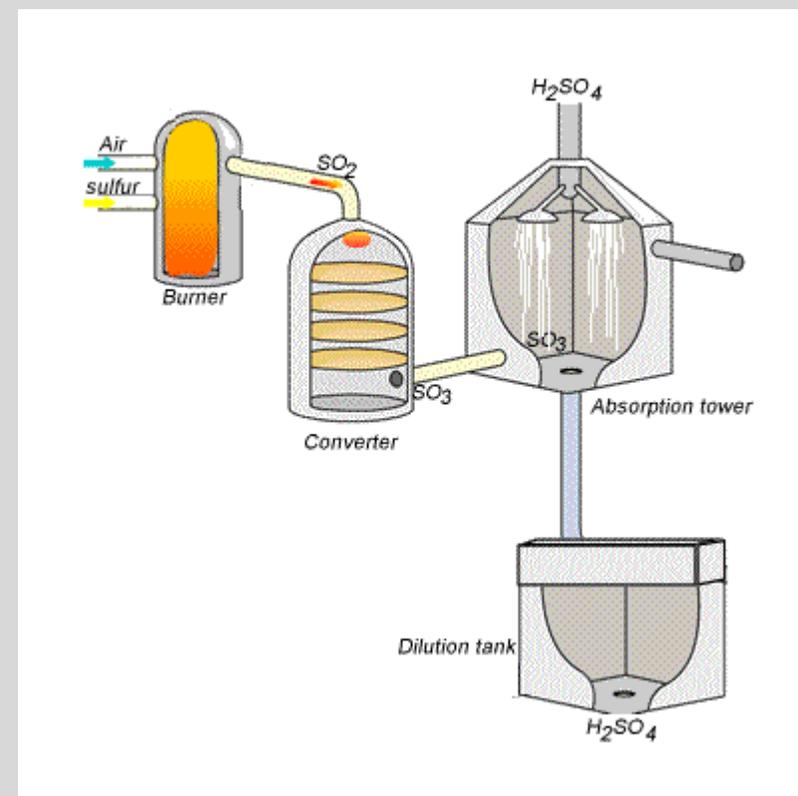
Η διεργασία απλής επαφής χρησιμοποιείται γενικά με περιεκτικότητα SO₂ στα αέρια εισόδου 6-10%- σε νέες εγκαταστάσεις, η απόδοση μετατροπής είναι περίπου 98,5% ως μέσος ημερήσιος όρος και μπορεί να αναβαθμιστεί σε 99,1% με καλό σχεδιασμό και χρήση ειδικά προσαρμοσμένου καταλύτη ντοπαρισμένου με Cs.

Σε υπάρχουσες μονάδες μονής μετατροπής με απλή απορρόφηση, είναι δύσκολο να επιτευχθεί καλύτερη μετατροπή από 98,0%- ωστόσο, σε ορισμένες υπάρχουσες μονάδες μπορεί να επιτευχθεί απόδοση μετατροπής 98,5% με μεγάλο φορτίο καταλύτη στο τελευταίο πέρασμα και λειτουργία σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη θερμοκρασία (410-415 °C).

- Το θειικό οξύ μπορεί να παραχθεί με απευθείας αντίδραση του τριοξειδίου του θείου με νερό σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

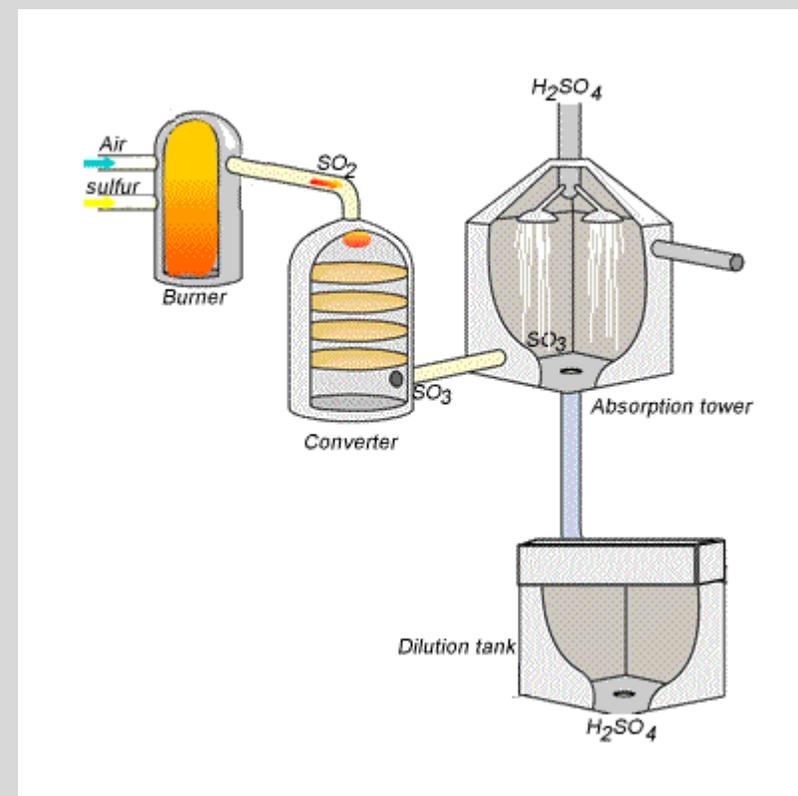


- Ωστόσο, απελευθερώνεται τόση θερμότητα που ο θάλαμος αντίδρασης γεμίζει με ομίχλη θειικού οξέος, η οποία είναι πολύ δύσκολο να συλληχθεί. Για το λόγο αυτό, το θειικό οξύ παράγεται σε διάφορα στάδια που είναι γνωστά ως διαδικασία επαφής.

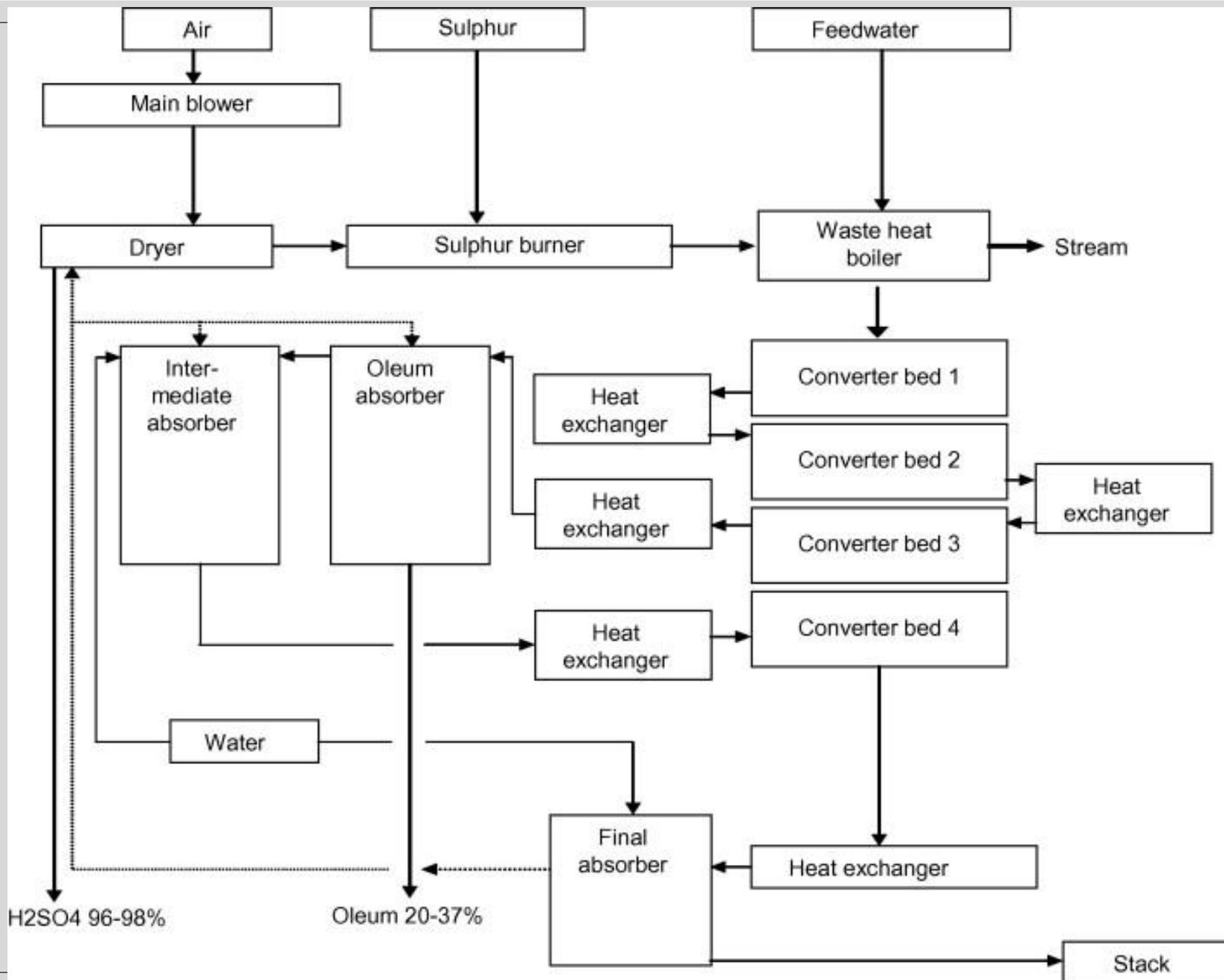


<http://www.dynamicscience.com.au/tester/solutions1/chemistry/sulfuricacid4.gif>

- **Πρώτο στάδιο** - Υγρό θείο ψεκάζεται στον καυστήρα όπου αντιδρά με τον ξηρό αέρα για να παράγει διοξείδιο του θείου (SO_2). Το νερό που μπορεί να υπάρχει σχηματίζει θειικό οξύ στον μετατροπέα και διαβρώνει το τοίχωμα. Ο αέρας ξηραίνεται με τη χρήση πυκνού θειικού οξέος
- **Δεύτερο στάδιο** - Το διοξείδιο του θείου οξειδώνεται σε τριοξείδιο του θείου με οξυγόνο χρησιμοποιώντας οξείδιο του βαναδίου (V) ως καταλύτη.
- **Τρίτο στάδιο** - Συμπυκνωμένο θειικό οξύ χρησιμοποιείται για τη διάλυση του τριοξειδίου του θείου όπου σχηματίζει δισουλφουρικό οξύ ($\text{oleum-H}_2\text{S}_2\text{O}_7$) σε πύργο απορρόφησης.
- **Στάδιο τέταρτο** - Στη συνέχεια, το δισουλφουρικό οξύ αναμιγνύεται με νερό για να ληφθεί θειικό οξύ.



<http://www.dynamicscience.com.au/tester/solutions1/chemistry/sulfuricacid4.gif>



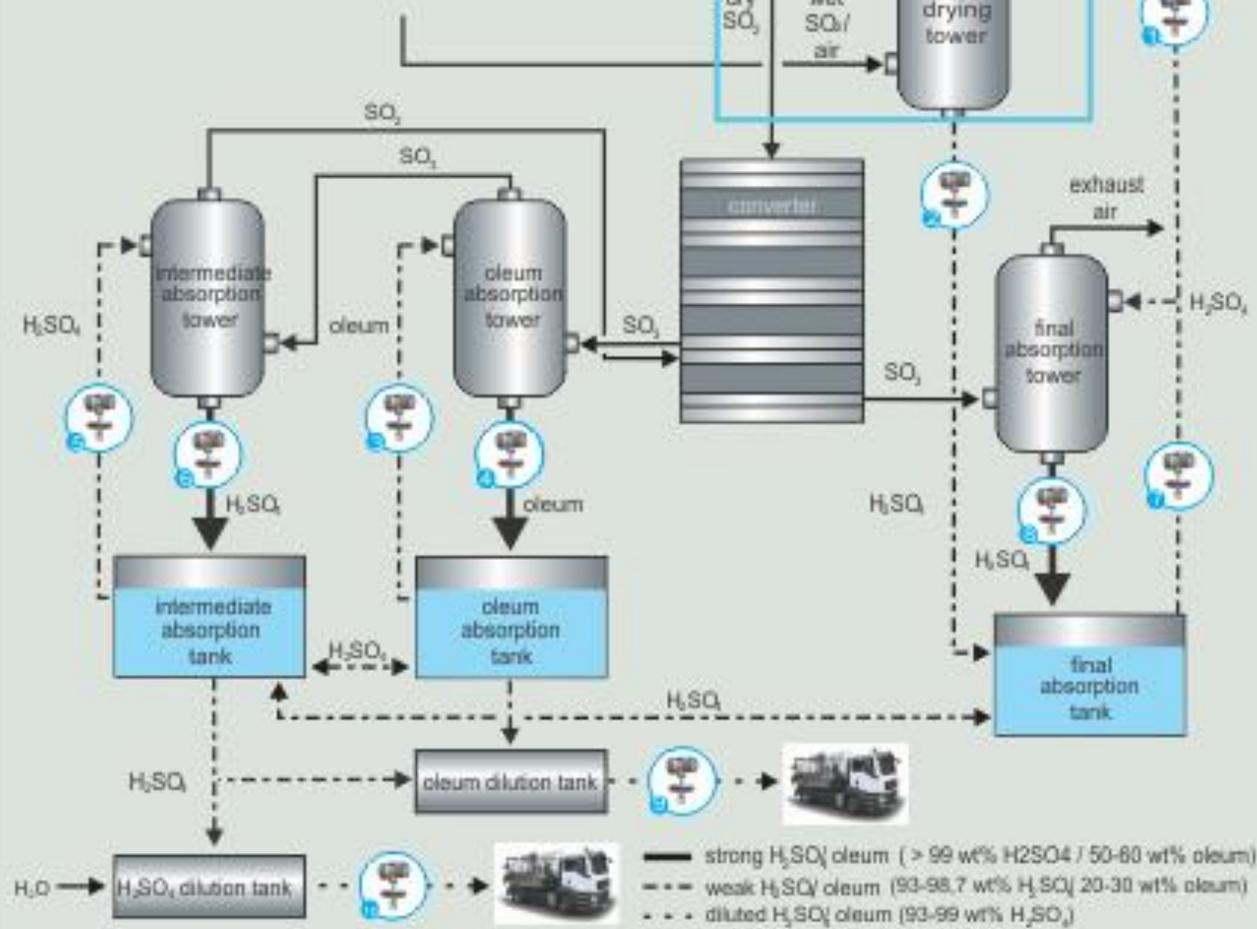
Διεργασία διπλής επαφής (διπλή απορρόφηση)

Στη διεργασία διπλής επαφής, ο βαθμός μετατροπής που επιτυγχάνεται είναι περίπου 99,5%, ανάλογα με τη διάταξη των κλινών επαφής και το χρόνο επαφής που προηγείται του ενδιάμεσου απορροφητή.

Μετά την ψύξη των αερίων στους 160-190 °C περίπου σε εναλλάκτη θερμότητας, το τριοξείδιο του θείου που έχει ήδη σχηματιστεί απορροφάται στον ενδιάμεσο απορροφητή σε θειικό οξύ με συγκέντρωση 98,5-99,5 % κ.β.. Πριν από τον ενδιάμεσο απορροφητή προηγείται απορροφητής ελαίου, εάν απαιτείται. Η απορρόφηση του τριοξειδίου του θείου επιφέρει σημαντική μετατόπιση της ισορροπίας της αντίδρασης προς το σχηματισμό SO₃, με αποτέλεσμα σημαντικά υψηλότερες συνολικές αποδόσεις μετατροπής όταν το υπολειπόμενο αέριο διέρχεται από μία ή δύο δευτερεύουσες κλίνες επαφής. Το τριοξείδιο του θείου που σχηματίζεται στο δευτερεύον στάδιο απορροφάται στον τελικό απορροφητή.

Γενικά, για τη διεργασία αυτή χρησιμοποιούνται αέρια τροφοδοσίας SO₂ που περιέχουν έως και 12 vol.% SO₂. Η απόδοση μετατροπής σε νέες εγκαταστάσεις μπορεί να φθάσει περίπου το 99,6% ως μέσο ημερήσιο όρο στην περίπτωση καύσης θείου.

raw materials:
 elemental sulfur
 exhaust SO₂ gas from metallurgical processes
 spent acid or sludge from alkylation process
 H₂S and SO₂ from various other chemical processes



A graphic featuring a central black circle surrounded by four concentric red rings of varying shades, creating a tunnel-like effect. The text "The End" is written in a white, elegant script font across the center of the rings.

The End