



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

GLI SCRUBBER A UMIDO PER L'ABBATTIMENTO DEI FUMI ESAUSTI NELLE INDUSTRIE TESSILI DI PRATO

Relatore

Prof. Giacomo Antonioni

Presentata da

Giuseppe Puddu

Sessione Marzo 2026

Anno Accademico 2024/2025



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

GLI SCRUBBER A UMIDO PER L'ABBATTIMENTO DEI FUMI ESAUSTI NELLE INDUSTRIE TESSILI DI PRATO

Relatore

Prof. Giacomo Antonioni

Presentata da

Giuseppe Puddu

Sessione Marzo 2026

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

1. Introduzione	3
1.1 Il contesto dell'industria tessile pratese	3
1.1.1 Breve excursus storico del distretto	3
1.1.2 Le lavorazioni effettuate nel distretto	4
1.2 La lana e il processo di produzione	4
1.3 Le operazioni di finissaggio	6
1.3.1 L'asciugatura, stabilizzazione, termofissaggio	7
1.3.2 La rameuse	7
1.4 La problematica da affrontare	10
1.4.1 Gli alchilbenzeni e gli oli di filatura	11
2. Le tecnologie di abbattimento	16
2.1 Normativa di riferimento e BAT di settore	16
2.1.1 BAT Tessile	17
2.2 Lo scrubber	20
2.2.1 Le tipologie di scrubber a umido	23
2.2.2 La progettazione di uno scrubber a umido	30
2.2.3 Rendimento di uno scrubber a umido	46
3. Caso applicativo: la rimozione degli alchilbenzeni	50
3.1 Stima del reintegro dell'acqua di lavaggio	51
3.1.1 Simulazione	51
3.1.2 Incidenza della variazione dei fattori principali nel calcolo svolto	61
3.1.3 Casi reali di due aziende del settore tessile	64
4. Conclusioni	67
Bibliografia	73

1. Introduzione

1.1 Il contesto dell'industria tessile pratese

1.1.1 Breve excursus storico del distretto

Le radici della lavorazione tessile nella zona pratese possono essere ricercate già nel X secolo, quando tra le pianure ricche d'acqua tra Firenze e Pistoia, nelle terre precedentemente occupate e già bonificate dai romani, si reinsediano alcune comunità abitative che in tale contesto si dedicano alla pastorizia, e principalmente all'allevamento ovino. In questo contesto iniziano ad affermarsi le prime attività di lavorazione della lana, prodotta come conseguenza del pascolo delle pecore.

Le origini dell'industria tessile pratese possono essere collocate nel Medioevo, infatti nel XII secolo la produzione tessile era già regolamentata e praticata dalla "Corporazione dell'Arte della Lana".

Una spinta importante alla lavorazione della lana viene data dai monasteri benedettini, a cui vengono attribuite le prime gualchiere, macchinari che sfruttavano l'energia dei corsi d'acqua presenti in abbondanza per effettuare la follatura della lana. I ricchi possidenti ne estesero l'operato investendo in queste attività dando avvio all'attività tessile in un ambito non più di dimensione rurale e domestica ma di grado più elevato, capace di acquisire nel tempo sempre più importanza per il territorio. Nell'epoca comunale, con la nascita delle corporazioni comunali nacque e si affermò tra quelle più importanti la corporazione dell'Arte della Lana che contribuì ulteriormente allo sviluppo e all'affermazione di tale arte regolandone l'attività e tutto il suo indotto.

Nel corso dei secoli l'industria tessile ha attraversato ed è stata influenzata dai vari accadimenti geo-politici italiani ed europei, affrontando periodi di crescita in cui il distretto pratese si è posto come riferimento globale nell'economia di settore, sia periodi di crisi in cui è stato fondamentale il sapersi reinventare nel tempo, introducendo nuove tipologie di lavorazioni e tecnologie, come quando nella seconda metà dell'Ottocento si affermò la lavorazione della "lana meccanica" o "lana rigenerata", ossia la produzione della lana dal riciclo degli "stracci".

Al giorno d'oggi il distretto tessile di Prato conta oltre 7000 imprese attive (comprese di moda e abbigliamento), di cui oltre 2500 si occupano di tessile in senso stretto, e quasi 43000

lavoratori, per un giro d'affari di oltre 2 miliardi di euro di export all'anno e una produzione tessile che rappresenta il 3% di quella europea (Prisma, 2025).

1.1.2 Le lavorazioni effettuate nel distretto

La specialità del distretto è sicuramente quella del riciclo e della rigenerazione delle fibre di lana usata e/o scarti di lavorazione, effettuata tramite processi meccanici. Considerando tutta la produzione mondiale di tessuti, il riciclo interessa appena l'uno per cento di tutta la produzione, ma di questo, il 15% è prodotto a Prato, rendendola di fatto il polo di riferimento in tale ambito (Outoffashion, 2023).

Il riciclo non è però l'unica lavorazione svolta, ma si effettua anche la filatura, che trasforma le fibre in filato, la tessitura, che è l'operazione di intrecciatura dei filati a costituire il tessuto vero e proprio, la tintura, la finitura, che consiste in tutte quelle lavorazioni post tessitura che consentono al tessuto di ottenere le caratteristiche finali volute e che a Prato costituiscono le attività principalmente svolte, tra tutte quelle effettuate, considerando i valori assoluti. A differenza di altri poli, anche italiani poi, quello pratese si distingue per la poco significativa presenza di lanifici a ciclo completo, con le lavorazioni svolte prevalentemente in ditte di dimensioni medio-piccole a carattere artigianale.

Infine, nel distretto si trovano anche aziende che operano nell'ambito del confezionamento dei capi d'abbigliamento e del commercio e del "pronto moda" (sviluppato soprattutto negli ultimi decenni sotto la spinta della crescente comunità cinese insediatasi a Prato). Il contesto commerciale del "pronto moda" stesso, con la caratteristica di concludere cicli lavorativi in archi temporali ristretti, porta a favorire il carattere artigianale delle lavorazioni, con poco spazio per l'ottimizzazione e l'espansione dei procedimenti.

Le lavorazioni sono effettuate sia in conto lavoro ma anche in conto terzi, con la lavorazione (soprattutto finitura) di tessuti provenienti anche dai mercati esteri.

1.2 La lana e il processo di produzione

Nel distretto pratese sono numerose le tipologie di fibre trattate al giorno d'oggi, dal cotone al nylon, ma tutt'oggi la fibra principalmente lavorata rimane la lana.

La lana è una fibra proteica di tipo cheratinico che si ottiene dalla tosatura delle pecore, può essere di differenti colorazioni, dal bianco all'avorio, dal marrone al nero, di lunghezze variabili tra i 40 e i 350 mm circa.

Anche il diametro della fibra può essere differente e in base al valore si hanno differenti tipologie di qualità di lana, si va dai 16/17 micron di diametro ai 40/50 micron o oltre. All'aumentare del diametro diminuisce la qualità della lana ricavata, e con esso variano le proprietà del prodotto finale ottenuto e le applicazioni per il quale può essere impiegato, ad esempio tra le più fini e pregiate lane troviamo la "lana merinos", una tipologia di lana che ha la caratteristica, a differenza delle altre, di non scaldare e di mantenere la temperatura corporea, rendendola idonea anche all'utilizzo nelle stagioni calde.

Le quantità di lana ricavabile da ciascun capo sono variabili e possono andare dai 0.5 ai 7 kg annui, a seconda di vari fattori come la razza e l'età dell'animale. Questa quantità ha però al suo interno numerose impurità, come terra, sudore, materia vegetale ed è impregnata da sostanze secrete dalle ghiandole sebacee dell'animale, note come "grasso di lana" (o anche detta "lanolina" e che conferiscono alla lana il suo forte odore caratteristico in assenza di trattamento), e perciò in questa fase viene chiamata "lana sucida". Previa purificazione si otterrà la "lana grezza" e a seconda del caso questa costituirà percentuali che vanno dal 45% al 90% della lana tosata inizialmente. Talvolta si agisce preventivamente all'eliminazione di tali impurità lavando l'animale prima della tosatura con rese di lana grezza maggiori del 15%, in tale caso si parla di "lana saltata".

Il processo di lavorazione della lana consiste, per prima cosa nell'effettuare una cernita delle fibre, con la separazione delle diverse regioni del vello, non da tutte le zone si ottengono fibre della stessa qualità. Attraverso varie batterie di lavaggio si effettua la rimozione delle impurità, terriccio, grasso (sgrassatura) e residui vegetali (carbonizzazione). Nell'ultima fase di pulitura, chiamata "battitura della lana", si lubrificano le fibre con un'emulsione di oli (chiamata ensimaggio) col fine di facilitare i processi successivi di filatura. A seconda della lunghezza della fibra si avrà una "filatura pettinata", se le fibre sono più lunghe, e questo consentirà di ottenere articoli più fini e più leggeri, oppure una filatura "cardata" se le fibre sono più corte, con ottenimento di filati più grossi e pesanti (Sapere.it, n.d.).

Successivamente si procede con la tessitura sui telai e con le operazioni di finissaggio, tra cui sono comprese operazioni come candeggio, bruciapelo o gasatura, termofissazione e lavaggio, che hanno il compito di conferire al tessuto le particolari proprietà desiderate, come morbidezza o aspetto, o per migliorare le lavorazioni successive, quindi alcune possono essere svolte in momenti differenti a seconda della necessità. La tintura, come le operazioni di finissaggio, può essere svolta in momenti differenti, può essere eseguita dopo la carbonizzazione, dopo la pettinatura, dopo la filatura oppure dopo la fase di tessitura.

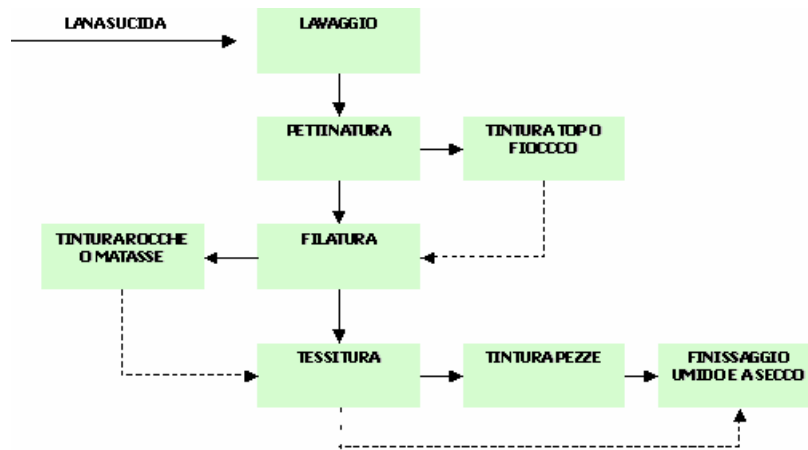


Figura 1 Processo di lavorazione dell' lana (ARPA Piemonte, n.d.)

1.3 Le operazioni di finissaggio

Col termine finissaggio si comprendono tutte quelle operazioni che vengono effettuate al fine di conferire al tessuto particolari proprietà fisiche, meccaniche o anche solo puramente estetiche. Tramite le operazioni di finissaggio si possono migliorare proprietà fisiche come la resistenza agli strappi, ai lavaggi, migliorare l'elasticità o la traspirabilità, oppure si possono migliorare l'aspetto e la sensazione al tatto del tessuto, in pratica le operazioni di finissaggio possono essere suddivise in due categorie, quella delle operazioni con finalità più estetica e la categoria di operazioni volte a migliorare le proprietà fisiche. Tali processi possono essere svolti con azioni meccaniche, sostanze chimiche, resine, siliconi o combinazioni di più metodologie.

Le operazioni effettuabili sono di svariate tipologie, possiamo trovare ad esempio il processo di calandratura che permette di ottenere un effetto lucido, liscio e compatto utilizzando il calore o la goffratura che utilizza il vapore per "incidere" disegni e decorazioni sul tessuto.

Certe operazioni di finissaggio possono anche essere utilizzate per preparare il tessuto alle lavorazioni successive, come il candeggio, che spesso è usato per preparare il tessuto alla tintura eliminando le impurità presenti, a meno di non volere un bianco puro come risultato finale (Texcene, Cosa fa il finissaggio tessuti, 2018).

1.3.1 L'asciugatura, stabilizzazione, termofissaggio

Numerosi procedimenti consistono nell'immergere i tessuti in bagni di sostanze utili a conferire le apposite proprietà che si vogliono conferire, in uscita diventa quindi fondamentale asciugare le stoffe che dovranno essere asciutte per i successivi trattamenti o anche semplicemente per essere avviate alle fasi finali del processo e poter uscire dalla fabbrica.

Spesso però, l'eliminazione dell'acqua non ha solo il fine pratico di asciugare il tessuto ma costituisce un trattamento a sé stante che permette di realizzare diversi tipi di trattamento, fissando i legami instaurati tra le fibre e i reagenti o conferendo, grazie al calore o all'azione meccanica utilizzate in certe macchine, alterazioni nella struttura del tessuto che vanno a nobilitare lo stesso.

Le operazioni di asciugatura possono essere svolte con differenti macchinari, i quali possono fornire differenti prestazioni anche in relazione a quale vuole essere il risultato finale di nobilitazione del tessuto. Tra questi macchinari troviamo la "centrifuga industriale" che sfrutta un'intensa forza centrifuga per separare l'acqua dal tessuto, il "tumbler" che utilizza un potente flusso d'aria e la "rameuse" che sfrutta il calore, anche come getto d'aria calda, per rimuovere l'acqua (Texcene, 2021).

1.3.2 La rameuse

La "rameuse", chiamata anche "ramosa" o "stenter machine" nei paesi anglofoni, è una macchina che sfrutta l'effetto del calore per asciugare i tessuti dopo i lavaggi e che consente di svolgere contemporaneamente determinate attività di finissaggio sugli stessi. Esistono più tipologie di ramosse, di varie dimensioni e potenza, possono consentire passaggi singoli o multipli delle stoffe in piani paralleli tra loro, e possono lavorare in verticale o orizzontale, ma tutte sono accumulate dalla stessa tipologia di struttura e dagli stessi principi di funzionamento. Il macchinario è formato da una o più strutture metalliche che costituiscono le camere termiche in cui viene fatta passare la stoffa e in cui verrà portata velocemente a temperature elevate, per rimuovere l'acqua e svolgere i trattamenti desiderati. La rameuse consente un controllo ottimale delle temperature e una loro gestione efficiente e omogenea sul tessuto, permettendo di trattare varie tipologie di stoffe, anche le più delicate come il lino. Il processo di stentering, così denominato come derivazione dal termine anglofono, consente, oltre all'asciugatura, anche di effettuare tutti quei trattamenti di nobilitazione che

vengono eseguiti mediante il calore e la stabilizzazione i trattamenti precedentemente effettuati consolidando i legami tramite polimerizzazione.

In ingresso alla macchina, il tessuto bagnato è steso grazie ad appositi sistemi tenditori e la stabilizzazione consente di "assicurarne la stabilità dimensionale, imprigionando queste fibre in una forma e una lunghezza specifiche al fine di prevenire il restringimento dopo i lavaggi garantendo però la conservazione dell'elasticità del tessuto" (Texcene, 2023).

Le ramose asciugano i tessuti lavorando a temperature generalmente comprese tra i 90°C e i 140°C a seconda del tipo di tessuto e dell'effetto finale che si vuole ottenere (ARPA Piemonte, n.d.), mentre per le operazioni termiche di finissaggio si raggiungono temperature intorno ai 190°C e saltuariamente anche superiori ai 200°C. Il calore può essere somministrato da appositi radiatori attraverso due modalità principali, indiretto, tramite serpentine ad olio diatermico, che riscaldano il tessuto con controllo maggiore sulla temperatura di processo, oppure con modalità diretta, insufflando aria riscaldata dalle fiamme di appositi bruciatori.

Una rameuse genera una portata di fumi esausti che può essere variabile a seconda della lavorazione e dalla tipologia di macchinario stesso tra i 5000 e i 15000 Nmc/h (Regione Toscana, 1987).

In uscita dalla rameuse, i fumi costituiti dall'aria calda in uscita dalle camere, ricca dell'umidità e delle eventuali sostanze presenti nel tessuto dai passaggi precedenti, dovranno essere convogliati e trattati prima di poter essere emessi in atmosfera. Tra le sostanze che possono essere presenti nei fumi di scarico infatti possiamo trovare oleanti, tensioattivi oltre ai prodotti di degradazione termica, i quali possono generare importanti problematiche ambientali.

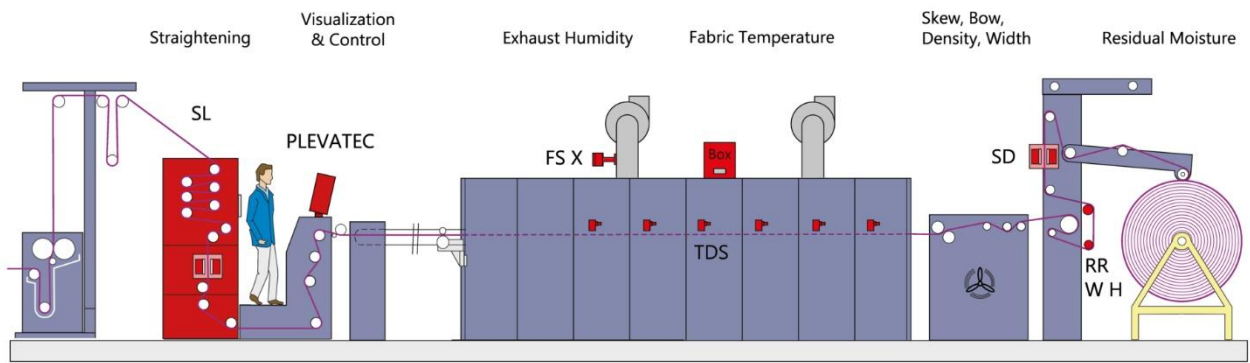


Figura 2 Schema di funzionamento di una rameuse (Pleva, n.d.)



Figura 3 Rameuse, si vede la testa del macchinario, dove il tessuto asciugato entra per poter essere asciugato (Santexrimar, n.d.)

1.4 La problematica da affrontare

La necessità di affrontare l'argomento nasce dalla volontà di voler approfondire la gestione dei sistemi di abbattimento dei flussi gassosi in uscita dai trattamenti termici (asciugatura e termofissaggio) delle stoffe, quindi in particolare il trattamento delle emissioni in uscita dalle rameuse.

I sistemi di abbattimento per le correnti gassose provenienti dai trattamenti termici sono obbligatori, infatti, nei casi in cui, per l'asciugatura, si superino i 150°C durante il processo e sempre obbligatori quando si hanno operazioni di termofissaggio. Mentre non sono obbligatori se, nel corso dell'operazione di asciugatura, non vengono mai, nemmeno istantaneamente, superati i 150°C di temperatura di esercizio (Regione Toscana, 2024).

L'attenzione in questi flussi è posta in particolare all'emissione degli alchilbenzeni, sostanze che sono largamente utilizzati nella produzione dei tessuti facendo parte dei cosiddetti oli di ensimaggio utilizzati a monte della produzione tessile, ricoprendo un ruolo importante nelle fasi di lavorazione, e per i quali le normative impongono determinati limiti alle concentrazioni emesse in atmosfera.

La problematica principale nello studio delle emissioni nel caso in esame è la difficoltà nel reperire dati riguardanti le sostanze contenute nelle stoffe trattate, che poi saranno presenti nei gas esausti in uscita ai trattamenti termici. Infatti la natura stessa delle lavorazioni effettuate nella maggior parte delle attività lavorative, e cioè la lavorazione in conto terzi, caratterizzata dal trattamento di lotti di stoffe differenti tra loro, per natura, per trattamenti precedentemente subiti, (in una stessa giornata lavorativa si possono effettuare lavorazioni su differenti lotti), per provenienza (si possono avere vari luoghi di produzione, anche esteri e con differenti normative riguardanti le sostanze utilizzabili per effettuare le produzioni), non consentono di ottenere dati rappresentativi e utilizzabili al fine di caratterizzare le emissioni e di poter utilizzarle nella progettazione degli impianti di abbattimento.

Nello specifico non si sono mai registrati casi problematici di evidenti superamenti dei limiti alle emissioni, se non episodi sporadici e isolati di segnalazioni dovute a problemi odorigeni, rilevati nelle vicinanze degli impianti e riconducibili ipoteticamente a momentanee concentrazioni elevate o all'accumulo in pozze evaporanti di queste sostanze oleose, che hanno, tra i problemi possibili, proprio quella dei fastidi odorigeni.

La tecnologia di abbattimento più utilizzata nell'area è quella dello scrubber a umido, una torre di lavaggio in controcorrente dei flussi di gas esausti, installati in loro più varianti, sia come unica soluzione sia in accoppiamento a ulteriori tecnologie di abbattimento.

L'obbiettivo è quindi, quello di capire se lo scrubber a umido rappresenta una soluzione efficace come tecnologia di abbattimento e quali possono essere le principali caratteristiche da attenzionare durante la fase operativa del processo di abbattimento, eventualmente se in aggiunta ai sistemi esistenti sono da aggiungere ulteriori tecnologie e/o alternative.

1.4.1 Gli alchilbenzeni e gli oli di filatura

Con il termine alchilbenzene ci si riferisce a una classe di composti organici aromatici, costituiti quindi da un anello benzenico, formato da sei atomi di carbonio con doppi legami coniugati (se prendiamo il solo anello benzenico otteniamo il benzene, il quale è quindi alla base dei composti aromatici), a cui sono legati uno o più gruppi alchilici, cioè delle catene di atomi di carbonio e idrogeno.

La formula generale di un alchilbenzene è quindi C_6H_5-R , dove R rappresenta il gruppo alchilico. Il più semplice degli alchilbenzeni è il toluene ($C_6H_5CH_3$), il quale è formato dalla catena carbonio-idrogeno più breve possibile (figura 4).

Vi sono poi le sostanze con più catene carbonio e idrogeno, quindi gli esempi di xilene ($C_6H_4(CH_3)_2$ in figura 5), nelle sue varie forme, e mesitilene ($C_6H_3(CH_3)_3$ in figura 6), che sono formati rispettivamente da due e tre catene, fino a un massimo di sei, e gli alchilbenzeni formati da catene più lunghe, ad esempio l'etilbenzene ($C_6H_5CH_2CH_3$ in figura 7).

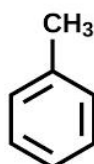


Figura 4 Toluene

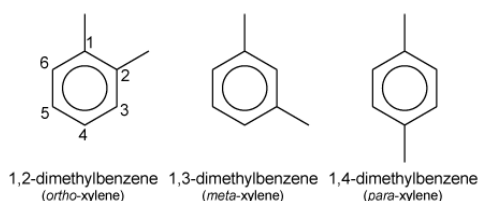


Figura 5 Xilene

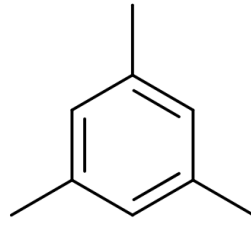


Figura 6 Mesitylene

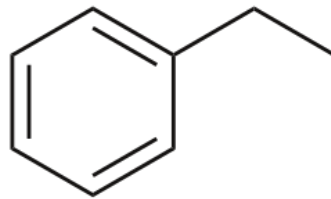


Figura 7 Etilbenzene

Le catene alchiliche possono raggiungere differenti dimensioni, anche fino a oltre i venti atomi di carbonio, andando a costituire svariate tipologie di sostanze differenti tra loro.

Queste sostanze sono classificabili come composti organici volatili (VOC), ma soprattutto quelli di dimensione maggiore, quindi quelli con catene più lunghe, sono identificabili nella sottocategoria dei composti organici semivolatili (SVOC). Questi si distinguono dai VOC per la loro ridotta volatilità e l'elevata persistenza, dunque non hanno la tendenza a vaporizzare. La caratteristica comune tra questi composti è l'elevata temperatura di ebollizione, troviamo infatti che il boiling point di questa classe di sostanze varia tra i 240°C e i 400°C, oltre questa temperatura di ebollizione le sostanze possono essere classificate come particolato organico (POM - particulate organic matter). Quindi le caratteristiche degli alchilbenzeni possono essere considerate intermedie tra VOC e POM (Fkv, n.d.) (Gev-emicode, n.d.) (EPA, 2025).

La grande varietà di sostanze che compongono la famiglia degli alchilbenzeni non consente uno studio agevole e approfondito di tutte le caratteristiche e di tutte le problematiche che queste sostanze possono creare per la salute umana e per l'ambiente, nel caso dell'industria tessile poi si fa uso di miscele di queste sostanze, il che rende ancora più difficile determinare i problemi che possono sorgere una volta sversati in atmosfera.

In linea generale si può comunque affermare che soprattutto a determinate concentrazioni una delle problematiche principali è quella odorigena, essendo questa una delle caratteristiche delle sostanze aromatiche. Inoltre una volta in atmosfera queste molecole

sono soggette a degradazioni e reazioni, le quali possono anche portare a originare sostanze inquinanti secondarie danneggiando l'ambiente indirettamente. Vi possono poi essere problemi di bioaccumulo per quelli più persistenti che entrano nella catena alimentare accumulandosi nei tessuti degli organismi viventi.

Gli ensimages

A conclusione del processo di lavaggio si effettua il processo di ensimaggio, alle fibre sono addizionati gli "olii di filatura" "ensimages" miscele di sostanze che sono utilizzate principalmente per preparare alla fase di filatura e hanno la funzione, nel caso di trattamento della lana già privata del proprio grasso naturale (lanolina) ma non ancora filata, di rendere più lavorabili le fibre nelle fasi seguenti del processo, filatura e tessitura. Questi oli di filatura possono essere applicati, talvolta, sotto forma di soluzioni acquose per consentirne una migliore distribuzione sulle fibre (ARPA Piemonte, n.d.).

Con il termine olii di filatura si intendono un insieme di sostanze di natura differente tra loro, tra queste possiamo trovare:

- Acidi grassi vegetali (oleine)
- Olii vegetali
- Olii minerali
- Miscele varie di questi prodotti

La tipologia più utilizzata è quella degli olii minerali, in quanto, quelli vegetali, seppur più facilmente eliminabili, in quanto meno persistenti, hanno una più alta tendenza all'irrancidimento che ne rende difficoltoso l'immagazzinamento. Una volta irrancidito l'olio non è più utilizzabile e deve essere buttato.

L'ensimages minerale è costituito dal cosiddetto "alchilato denaturato", nella guida tecnica "emissioni in atmosfera da processi di asciugatura tessuti", del Servizio Ambiente della Regione Toscana emanata nel 1987, si fa riferimento alla composizione tipo

la cui composizione è opportunamente determinata come segue:

"su 100 kg di alchilbenzoli vanno aggiunti 5 kg di emulgatore non ionico (NONILFENOLO 6 moli) ed inoltre è necessaria la presenza dell'1% di BETANAFTOLO sciolto in alcool butilico o in butildiglicole (2,5 per mille) come RILEVATORE.

In pratica l'alchilato ha la seguente composizione:

- miscela di alchilbenzeni con catena di atomi di C superiore a 12.....94%
- tensioattivo non ionico5%
- oleina bidistillata.....1%
- betanaftolo (rilevatore).....0,1%

Il fabbricante di ensimages da questo prodotto base prepara l'oleante, la cui composizione indicativa può essere la seguente:

- alchilato denaturato dal 30% al 60%
- tensioattivo non ionico dal 10% al 15%
- glicoli da 0 al 10%
- acqua dal 5% al 40%”

Generalmente la composizione tipica dell'alchilato, cioè la miscela di alchilbenzeni utilizzati, è invece la seguente:

- decilbenzene ($C_{16}H_{26}$) 2-5% (MM = 218.38 g/mol)
- dodecilbenzene ($C_6H_5(CH_2)_{11}CH_3$) 10-25% (MM = 246.4 g/mol)
- pentadecilbenzene ($C_{21}H_{36}$) 70-80% (MM = 288.5 g/mol)
- esadecilbenzene ($C_{22}H_{38}$) + octodecilbenzene ($C_{24}H_{42}$) 15-20% (MM = 302.5 g/mol e MM = 330.6 g/mol rispettivamente)

(Regione Toscana, 1987)

La provenienza varia dei lotti di lavorazione non consente tuttavia una omogeneizzazione dei dati riguardanti le composizioni formanti gli ensimages e dei loro quantitativi presenti sul tessuto, per differenza di normative e/o difficoltà di controllo, specialmente sui lotti provenienti dall'estero, ad esempio dai mercati asiatici, che costituiscono spesso un'importante fetta di mercato delle lavorazioni operate.

Generalmente una ramosa lavora a temperature che variano tra i 170°C e 190°C, a seconda del tipo di processo e del tipo di tessuto trattato. Queste sono temperature decisamente inferiori rispetto quelle a cui di verifica la distillazione degli ensimages, il cui processo inizia a temperature superiori i 280-290°C, e per il quale completamento si può dover arrivare a superare anche i 380°C. Dunque questo dovrebbe scongiurare di per sé la presenza di

queste sostanze nei fumi esausti in uscita dai macchinari, le particolari condizioni di umidità e temperatura operative tuttavia provocano la presenza degli alchilbenzeni nei fumi.

All'interno del sistema di abbattimento gli alchilbenzeni si presentano come goccioline di olio finissime con distribuzione non uniforme. Questo stato richiede particolari tecniche di campionamento per poterne determinare le effettive concentrazioni nei gas di scarico e particolari tecnologie per abatterle efficientemente (Regione Toscana, 1987).

2. Le tecnologie di abbattimento

2.1 Normativa di riferimento e BAT di settore

La normativa di riferimento per quanto riguarda i limiti alle emissioni e le azioni da intraprendere nei vari casi specifici è il “Piano Regionale per la Qualità dell’Aria Ambiente” della regione Toscana, emanato nel Dicembre 2024. Questo prevede, per quanto riguarda l’emissione degli alchilbenzeni in atmosfera a seguito delle operazioni di asciugatura e termofissaggio, i seguenti valori limite di concentrazione:

Tabella 1 Limiti normativi di emissione alchilbenzeni (Regione Toscana, 2024)

Fase di lavoro	Inquinanti	Valore di emissioni espresso in concentrazione	NOTE
Asciugatura tessuti	Alchilbenzeni	50 mg/Nm ³	Qualora l'attività di asciugatura sia svolta a temperatura non superiore a 150°C, potrà non essere previsto un sistema di abbattimento delle emissioni. Dovrà, tuttavia, essere installato un sistema di registrazione delle temperature atte a dimostrare il rispetto di tale temperatura in ogni momento della suddetta lavorazione.
	Sostanze organiche volatili - SOV	Si applicano i valori limiti stabiliti al Capitolo 7 Tabella A1 e D	
Termofissaggio	Alchilbenzeni	30 mg/Nm ³	Deve essere prevista l'installazione di idoneo impianto di abbattimento.
	Sostanze organiche volatili - SOV	Si applicano i valori limiti stabiliti al Capitolo 7 Tabella A1 e D	

Per quanto riguarda l'operazione di asciugatura il sistema di abbattimento è obbligatorio solo nei casi in cui le operazioni siano effettuate, sempre, a temperature non superiori a 150°C, mentre diventa obbligatorio oltre tale temperatura. Per quanto riguarda le operazioni di termofissaggio, che comunque avvengono sempre a temperature elevate, il sistema di abbattimento dei fumi deve sempre essere previsto (Regione Toscana, 2024).

Per quanto riguarda la scelta dei sistemi di abbattimento, la normativa (P.R.Q.A.) non specifica quali determinate tecnologie installare per ridurre le concentrazioni che è possibile emettere.

Le tecnologie da utilizzare per effettuare l'abbattimento dei fumi in uscita dai trattamenti termici sono definite avendo come riferimento le "Conclusioni sulle BAT", come è previsto dall'articolo 29-bis del D.lgs. n°152/2006, nell'ambito del rilascio dell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), con cui si verifica la compatibilità ambientale delle attività lavorative.

Le BAT, abbreviazione di "Best Available Techniques", anche "Migliori Tecniche Disponibili" in italiano, sono una raccolta di tecnologie e pratiche operative, gestionali e di controllo, utili a migliorare il controllo e a ridurre l'impatto ambientale delle attività industriali. Le BAT vengono determinate dalla Commissione Europea e sono riportate nei Brefs (BAT Reference Documents), in cui sono indicati tutti i riferimenti necessari alle tecnologie utilizzabili. Esistono vari Brefs, specifici per categorie di attività, per quanto riguarda le attività tessili vi è dunque un documento Brefs specifico, che conterrà le BAT di settore.

Queste tecnologie sono quegli strumenti (tecnicamente realizzabili) che consentono di raggiungere un elevato (e migliore) livello di protezione dell'ambiente, attraverso bassi livelli di emissioni inquinanti e/o ottimizzazione delle quantità di materia e dei processi utilizzati, garantendo contemporaneamente un'elevata prevenzione dagli incidenti e la sostenibilità economica a fronte della loro realizzazione.

2.1.1 BAT Tessile

Il TXT BREF, Reference Document for the Textiles Industry, è un documento redatto nell'ambito della Direttiva sulle emissioni industriali (Industrial Emissions Directive, IED 2010/75/UE), che definisce le migliori tecniche disponibili (BAT) utili a limitare l'inquinamento e i consumi nel settore industriale tessile.

Questo documento trova la sua applicazione specificamente nelle operazioni di pretrattamento, quindi lavaggio, candeggio, tintura e finissaggio in generale, indicando le migliori tecniche utili al trattamento dei fumi esausti prodotti nel corso delle operazioni e al trattamento delle acque reflue generate, limitatamente a quelle acque non coperte dalla Direttiva sulle acque reflue (91/271/CEE) e il cui carico inquinante sia dovuto ai processi tessili.

All'interno del TXT BREF non viene citata, specificatamente, la classe degli alchilbenzeni come sostanze presenti nei flussi gassosi in uscita dai trattamenti termici e richiedenti particolari azioni di abbattimento. Si fa invece riferimento unicamente alle sostanze organiche, di cui, come abbiamo visto, gli alchilbenzeni fanno parte (European Commission, 2023).

Per quanto concerne il controllo delle emissioni in atmosfera e in particolare quelle di sostanze organiche, il documento prevede una serie di BAT a riguardo. Nello specifico del caso di interesse, quindi della gestione degli alchilbenzeni a seguito delle operazioni di trattamento termico, ricoprono un ruolo importante la BAT 22 e la BAT 26.

La BAT 22 prevede il convogliamento e l'avvio a trattamento degli scarichi gassosi contenenti sostanze inquinanti, comprese le sostanze organiche volatili, anche se non limitatamente a esse:

“BAT 22. In order to reduce diffuse emissions to air (e.g. VOCs from the use of organic solvents), BAT is to collect diffuse emissions and send the waste gases to treatment.”

La BAT 26 introduce invece le tecnologie utili a operare l'abbattimento dei composti organici nelle emissioni a seguito, tra gli altri, dei trattamenti termici:

BAT 26. In order to prevent or reduce channelled emissions of organic compounds to air from singeing, thermal treatment, coating and lamination, BAT is to use one or a combination of the techniques given below.

Le tecnologie riportate possono essere utilizzate sia come unica scelta, sia come combinazione tra di esse.

Come mostrato nella tabella seguente, oltre alla tecnica preventiva di limitazione dell'uso delle miscele contenenti composti organici o della scelta di quelle miscele il cui utilizzo comporta una loro riduzione, tra le tecniche di abbattimento sono riportate la condensazione, l'ossidazione termica, il lavaggio a umido e l'adsorbimento.

Tabella 2 Tecnologie di abbattimento per le sostanze organiche in correnti gassose

Technique		Typical pollutants target	Description
Prevention techniques			
a.	Selection and use of mixtures of chemicals ('recipes') leading to low emissions of organic compounds	Organic compounds	Mixtures with low emissions of organic compounds are selected and used taking into consideration product specifications (see BAT 14, BAT 17, BAT 50, BAT 51). As an example, emission factors may be used for selection (see Section 5.12.1).
Reduction techniques			
b.	Condensation	Organic compounds excluding formaldehyde	See Section 5.12.2.
c.	Thermal oxidation	Organic compounds	
d.	Wet scrubbing	Organic compounds	
e.	Adsorption	Organic compounds excluding formaldehyde	

La BAT 26 fornisce inoltre riferimenti riguardanti le concentrazioni raggiungibili in seguito all'utilizzo delle tecnologie di riferimento, indicando per i composti organici un intervallo di concentrazione compreso tra i 3 e i 40 mg/Nm³.

Tabella 3 Concentrazioni di sostanza organica raggiungibili con l'applicazione delle tecnologie di abbattimento

Substance/Parameter	Activities / Processes (including associated thermal treatments)	BAT-AEL (Average over the sampling period) (mg/Nm ³)
Formaldehide	Coating ⁽¹⁾	1–5 ⁽²⁾ ⁽³⁾
	Flame lamination	
	Printing ⁽¹⁾	
	Singeing	
	Finishing ⁽¹⁾	
TVOC	Coating	3–40 ⁽²⁾ ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾
	Dyeing	
	Finishing	
	Lamination	
	Printing	
	Singeing	
	Thermofixation or heat-setting	
<p>⁽¹⁾ The BAT-AEL only applies when formaldehyde is identified as relevant in the waste gas stream based on the inventory of inputs and outputs mentioned in BAT 2.</p> <p>⁽²⁾ For activities listed under points 3 and 9, Part 1 of Annex VII to the IED, the BAT-AEL ranges only apply to the extent that they lead to lower emission levels than the emission limit values in Parts 2 and 4 of Annex VII to the IED.</p> <p>⁽³⁾ For finishing processes with easy-care agents, water-/oil-/soil-repellents and/or flame retardants, the higher end of the BAT-AEL range may be higher and up to 10 mg/Nm³.</p> <p>⁽⁴⁾ The lower end of the BAT-AEL range is typically achieved when using thermal oxidation.</p> <p>⁽⁵⁾ The BAT-AEL does not apply when the TVOC mass flow is below 200 g/h for emission point(s) where:</p> <ul style="list-style-type: none"> - abatement techniques are not used, and - no CMR substances are identified as relevant in the waste gas stream based on the inventory of inputs and outputs mentioned in BAT 2. 		

2.2 Lo scrubber

La tecnologia di abbattimento per le correnti gassose provenienti dai trattamenti termici e contenenti, tra le altre sostanze, gli alchilbenzeni, maggiormente diffusa nel contesto industriale tessile pratese è lo scrubber a umido.

Come abbiamo visto precedentemente le BAT di settore contemplano, al “punto d” della BAT 26, l’utilizzo delle torri di lavaggio per effettuare la rimozione delle sostanze organiche dalle correnti gassose. Nelle “BAT conclusion” la tecnica di lavaggio a umido è definita come:

“Eliminazione degli inquinanti gassosi o del particolato da un flusso di scarichi gassosi mediante il trasferimento massico all’acqua o a una soluzione acquosa. Può comportare una reazione chimica (ad esempio in uno scrubber con soluzione acida o alcalina).”

(European Commission, 2022).

Le Bref, al paragrafo “4.1.8.2 Wet scrubbing”, riguardo l’utilizzo dello scrubber come tecnologia adatta a rimuovere sostanze organiche da flussi gassosi dice nello specifico:

“Il lavaggio o assorbimento è ampiamente utilizzato come tecnica di recupero di materie prime e/o prodotti per la separazione e purificazione di flussi gassosi contenenti alte concentrazioni di COV (Composti Organici Volatili), in particolare composti solubili in acqua come alcoli, acetone o formaldeide. L'uso dell'assorbimento come tecnica principale di controllo per i vapori organici dipende dalla disponibilità di un solvente adatto, con alta solubilità per il gas, bassa pressione di vapore e bassa viscosità.”

(European Commission, 2023).

Lo scrubber a umido o torre di lavaggio, chiamato anche depolveratore a umido è una tecnologia che consiste nel far passare il flusso d’aria contenente sostanze indesiderate, all’interno di una camera in cui si fa avvenire il contatto tra un flusso gassoso e un flusso liquido di lavaggio in controcorrente, solitamente acqua (e a questa ci riferiremo principalmente d’ora in avanti se non diversamente specificato), col fine di ottenere il trasferimento degli inquinanti alla fase liquida, evitandone l’immissione in atmosfera. Quest’acqua talvolta può essere anche addizionata di eventuali sostanze utili a ottimizzare il processo.

L’acqua contenente le sostanze indesiderate sarà successivamente allontanata e trattata appositamente. Il liquido utilizzato per il lavaggio delle correnti gassose viene ricircolato più volte per consentire sia un risparmio della risorsa acqua, sia perché dopo un primo passaggio, a meno di correnti gassose particolarmente ricche di inquinanti, il liquido ha ancora il potere di poter rimuovere ulteriore sostanza inquinante. L’acqua di lavaggio è contenuta in un apposito serbatoio, esterno alla torre, da cui viene pescata per poter essere immessa nella torre, con un percorso dall’alto verso il basso, e in cui ritorna al termine del passaggio nella camera di lavaggio. Qui, tra i vari ricircoli, l’acqua ha la possibilità di decantare e di potersi liberare, almeno in parte, delle sostanze raccolte durante il percorso, periodicamente dovrà poi essere totalmente sostituita da acqua nuova.

Il diagramma successivo riporta lo schema di funzionamento generale di uno scrubber a umido, l’aria sporca viene incanalata nella torre dove entra dal basso e percorre la camera verso l’alto. L’acqua viene immessa in un serbatoio, da cui viene poi pescata e immessa nella torre dall’alto e lasciata cadere verso il basso in controcorrente rispetto al gas, ritorna

al serbatoio in cui decanta e dove viene successivamente ricircolata. Il gas lavato sarà poi immesso in atmosfera tramite i camini apposti.

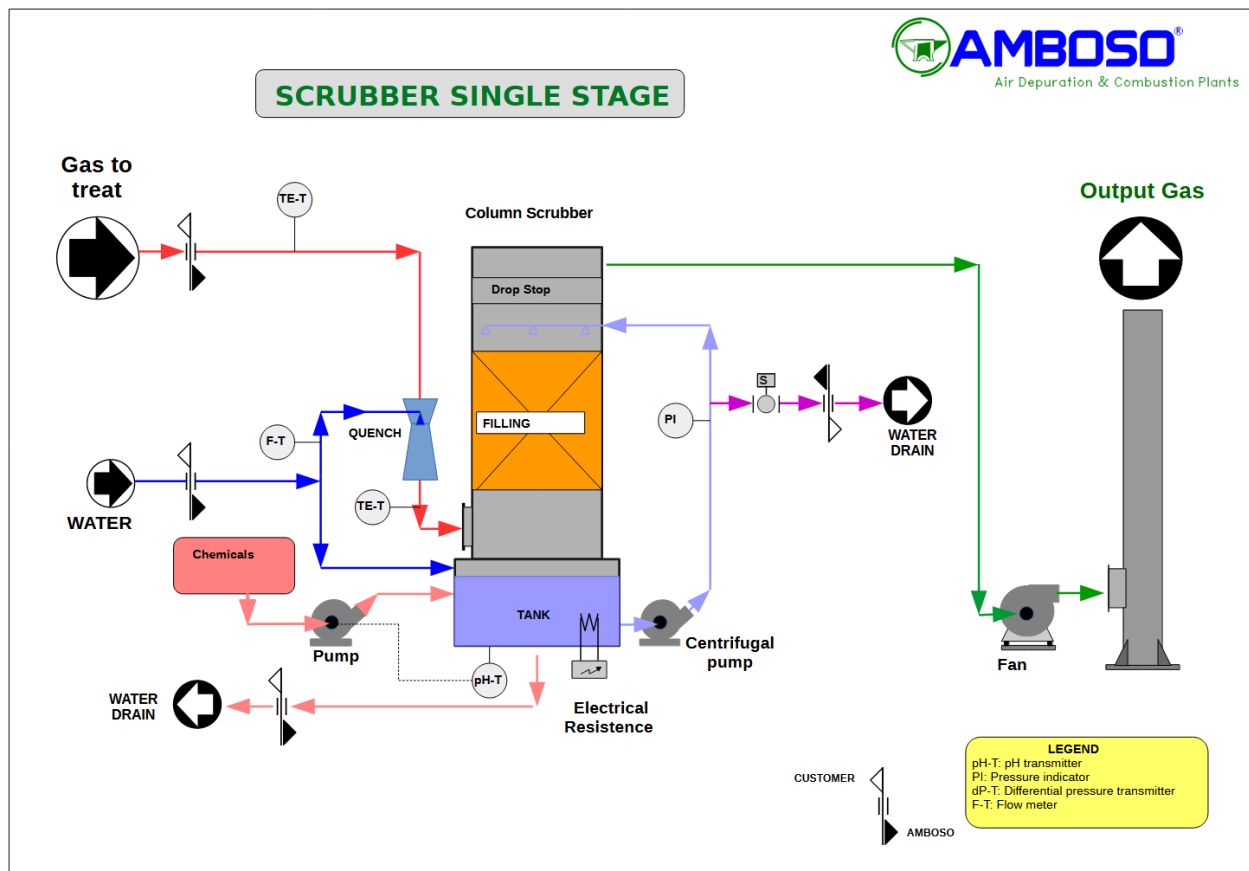


Figura 8 Schema funzionamento impianto scrubber (Ventilazione, n.d.)

Lo scrubber a umido presenta sia vantaggi che svantaggi nel suo utilizzo (Don W. Green, 2018), tra i vantaggi possono essere citate:

1. non si hanno fonti secondarie di polvere, a differenza di processi a secco,
2. la possibilità di avere un impianto di ingombro relativamente ridotto,
3. capacità di gestire sostanze gassose e particolato in un unico processo di rimozione,
4. capacità di gestire flussi di gas ad alta temperatura e umidità elevata,
5. costi di investimento per la tecnologia bassi, a meno di casi speciali,
6. capacità di gestire flussi ad alta pressione, con vantaggi sul fronte delle cadute di pressione ed energetici,
7. elevate efficienze di raccolta su particolato e gas acidi (SO₂),
8. possibilità di utilizzo anche nel caso di gas contenenti sostanze infiammabili o esplosivi.

Tra gli svantaggi di tale tecnologia si possono citare:

1. difficoltà nello smaltimento dei reflui,
2. problemi di corrosione più rilevanti rispetto ai sistemi a secco,
3. trascinarsi di goccioline nel pennacchio potenzialmente problematici,
4. caduta di pressione e potenze necessarie possono essere elevati,
5. costi di manutenzione potenzialmente elevati,
6. temperature basse del gas in uscita riducono la dispersione del pennacchio di scarico.

Le principali applicazioni dei processi di lavaggio nel trattamento dei gas di scarico sono: rimozione di inquinanti gassosi e rimozione di polveri.

Il lavaggio può essere di tipo fisico, chimico o chimico-fisico, nel caso del primo si ha il semplice trasferimento della sostanza da rimuovere al liquido di lavaggio, mentre nel secondo caso si assiste a una reazione chimica che abbatte la sostanza tramite trasformazione e successiva rimozione della stessa. Si può poi avere il caso intermedio tra le due principali tipologie di lavaggio.

Se l'inquinante è una sostanza solubile nel liquido di lavaggio, la rimozione può avvenire per assorbimento fisico della sostanza, altrimenti, come nel caso di polveri e particolato, la rimozione è del tipo meccanico, quindi può avvenire per impatto inerziale, diffusione browniana o per intercettazione.

Nel nostro caso dunque, volendo studiare la rimozione degli alchilbenzeni tramite questa tecnologia, i quali si presentano sotto forma di finissime goccioline di sostanza oleosa, e avendo queste sostanze una solubilità praticamente nulla, possiamo dire che la rimozione è del tipo meccanico. Le goccioline di olio possono quindi essere assimilate a particelle di particolato nello studio del fenomeno e nel seguito ci riferiremo dunque al caso di rimozione di particolato contenuto in una corrente gassosa.

2.2.1 Le tipologie di scrubber a umido

Come si è visto lo scrubber è una tecnologia che consente di rimuovere sostanze e/o particelle indesiderate da un flusso gassoso effettuando un lavaggio con un flusso liquido in controcorrente all'interno di una camera apposita.

Il contatto tra le due fasi può essere effettuato sfruttando differenti modalità, dalla semplice pioggia le cui gocce incontrano il gas nella camera, allo sfruttare corpi inseriti nella camera, le camere stesse possono avere varie e differenti caratteristiche, al fine di sfruttare

particolari design aerodinamici con lo scopo di migliorare questa interazione. Questo determina l'esistenza di varie tipologie di scrubber che, pur essendo anche molto differenti tra loro, sono accumulati dagli stessi principi di funzionamento.

Di seguito possiamo vedere un elenco di tipologie di scrubber a umido esistenti (Richards, 2000) (non per forza esaustivo), il quale evidenzia che anche tra le varie tipologie vi siano poi alcune sottocategorie ulteriori con caratteristiche tra loro distinte:

1. *Spray tower scrubbers*
2. *Mechanically aided scrubbers*
3. *Packed bed scrubbers (a corpi di riempimento):*
 - a. *Vertical packed bed*
 - b. *Crossflow packed bed*
 - c. *Woven fiber bed*
 - d. *Mesh fiber bed*
 - e. *Wet-ionizing*
4. *Tray Tower scrubbers (scrubber a Piatti):*
 - a. *Impingement tray*
 - b. *Sieve tray*
 - c. *Froth tower*
 - d. *Catenary grid*
 - e. *Moving bed*
5. *Gas-atomized, tra cui:*
 - a. *Fixed throat venturi*
 - b. *Adjustable throat venturi*
 - c. *Rod deck*
 - d. *Collision*
 - e. *Orifice*

6. Liquid atomized

7. Condensation growth

a. Venturi scrubber

b. Ejector

Le principali tipologie maggiormente diffuse sono lo “scrubber Venturi”, che utilizza una sezione stretta per accelerare il flusso d’aria e favorire il mescolamento con le goccioline d’acqua, lo “scrubber a letto impaccato” o “a corpi di riempimento” (Packed bed scrubbers, figura 11), in cui l’acqua scorre sui corpi di riempimento della camera creando una vasta superficie in cui può avvenire il contatto con l’aria da depurare, lo “scrubber a vassoi” o “a piatti” (Tray Tower scrubbers, figura 10), in cui l’aria passa su una serie di vassoi impilati in cui si trova l’acqua per catturare gli inquinanti, che scorre o viene spruzzata su di essi, lo “scrubber a ciclone”, che combina, all’effetto dell’acqua anche un effetto rotatorio (effetto ciclone), lo “scrubber a pozzetto”, in cui l’aria gorgoglia attraverso uno strato d’acqua.

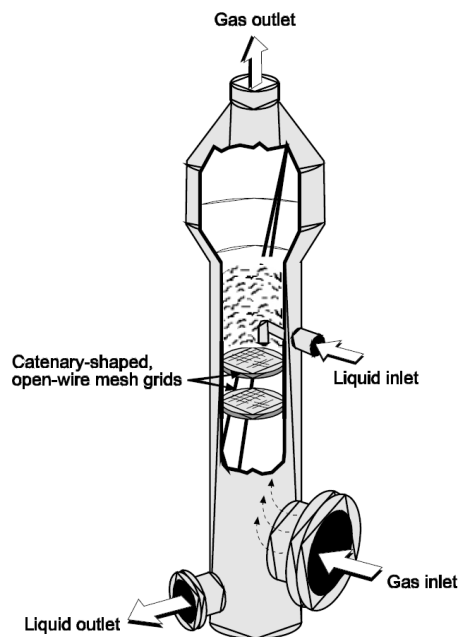


Figura 9 Catenary grid scrubber

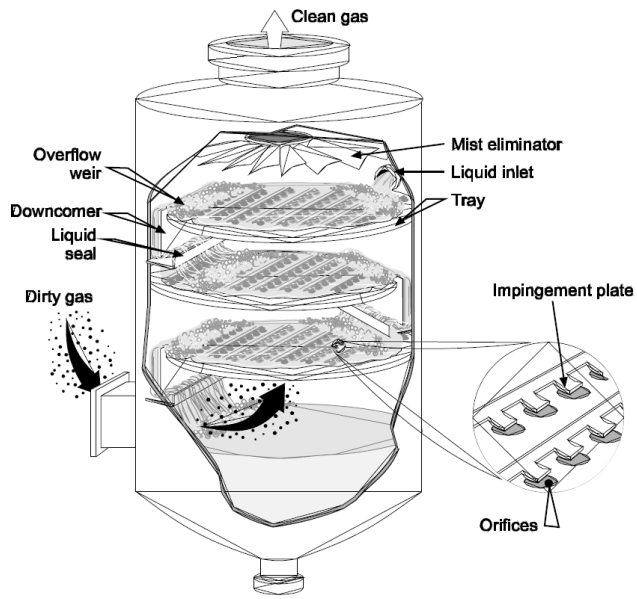


Figura 10 Impingement tray scrubber

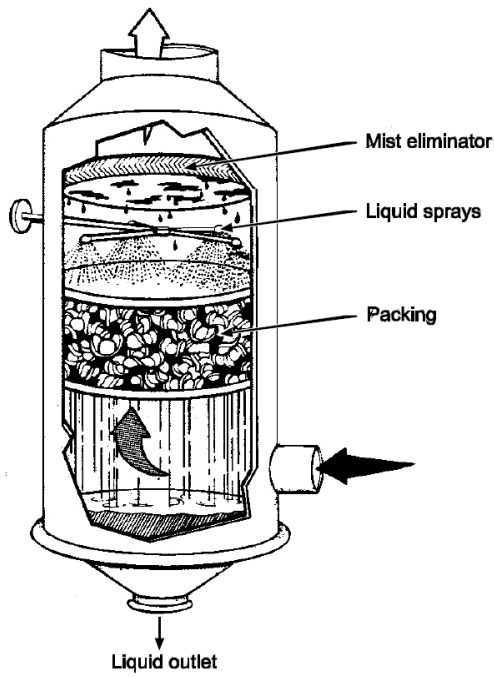
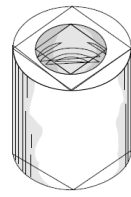


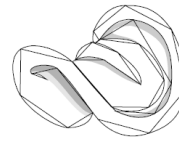
Figura 11 Vertical packed bed scrubber system



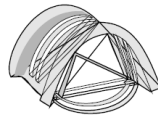
Raschig Ring



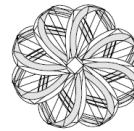
Pall Ring



Berl Saddle



Intalox Saddle



Tellerette

Figura 12 Tipologie comuni di corpi di riempimento per i packed scrubbers

Sistemi in uso nel distretto di Prato

Per approfondire la conoscenza dei sistemi di abbattimento dei fumi nel distretto tessile pratese, sono state effettuate diverse visite presso aziende rappresentative del comparto. Nello specifico si sono svolte le visite nelle aziende che utilizzano lo scrubber a umido come tecnologia di abbattimento e per tutte l'attenzione principale era sull'abbattimento degli alchilbenzeni dai flussi gassosi. L'obiettivo era osservare direttamente le soluzioni tecnologiche adottate per il trattamento delle emissioni in atmosfera, conoscere le specificità, le criticità e le differenze che hanno portato ad adottare, da un'azienda all'altra, differenti soluzioni, combinazioni di tecnologie o particolarità.

Nel complesso sono state visitate cinque aziende operanti nel territorio pratese e specializzate nel campo delle operazioni di finissaggio tessile. Tutte svolgevano operazioni di lavaggio, asciugatura e trattamenti termici con ramosa.

La prima azienda visitata è stata la "Rifinizione ZH" che si occupa di asciugatura, termofissaggio e garzatura delle stoffe. Per il trattamento delle emissioni, con portate dell'ordine dei 15.000-20.000 Nm³/h, derivanti dai trattamenti termici è installato uno scrubber a umido a corpi di riempimento ("Packed bed scrubbers"), la cui colonna è riempita di sfere cave. La manutenzione ordinaria è svolta mensilmente e consta nella sostituzione dell'intero volume delle acque di lavaggio.

La seconda azienda visitata è stata la "Rifimode S.r.l.", che si occupa di calandrature, decatizzi e vaporizzi liberi (operazioni di termofissaggio con il tessuto non in tensione) su

cotone, lana, seta, lino e fibre sintetiche. Per le loro lavorazioni termiche utilizzano tre ramose, con portate complessive dell'ordine dei 30.000 Nm³/h, e tutta la portata è gestita da un unico impianto di abbattimento. L'impianto di abbattimento è costituito dalla combinazione di più tecnologie, uno scrubber a umido a corpi di riempimento (corpi di riempimento costituiti da sfere cave), un demister in cui l'acqua in eccesso uscente dallo scrubber viene raccolta e allontanata, e a valle un impianto di abbattimento a coalescenza, che trattiene le particelle submicroniche che superano l'impianto ferma-gocce con efficienze anche prossime al 100% sulle particelle di dimensione superiore ai 3 micron e del 98,5% per le particelle con dimensione uguale o inferiore ai 3 micron di diametro.

La terza azienda visitata è stata la "Rifinizione Saturno S.r.l.", che si occupa di molteplici tecniche di finissaggio, tra cui l'asciugatura e il bruciapelo, che richiedono il trattamento delle emissioni derivanti. Entrambe le lavorazioni, svolte con macchine ramosa e bruciapelo rispettivamente, sono sottoposte a due stadi di abbattimento, il primo distinto per lavorazione e il secondo comune. Il primo stadio del bruciapelo è un ciclone a umido, mentre il flusso uscente dalla ramosa è trattato con uno scrubber a umido a corpi di riempimento (costituiti da sfere cave) seguito dal ferma-gocce. Il secondo stadio, come detto comune ai due impianti, è uno scrubber a piatti ("Impingement tray scrubber") seguito da una seconda torre che svolge la funzione di ferma-gocce. La manutenzione riguardante i sistemi scrubber comprendono, una pulizia delle tubazioni di adduzione con frequenza trimestrale, la pulizia della vasca e la sostituzione della soluzione di lavaggio tramite svuotamento totale con frequenza settimanale, la pulizia dei sistemi ferma-gocce con cadenza bimestrale, mentre il ciclone del primo stadio di abbattimento per il bruciapelo è lavato con acqua dell'impianto con cadenza settimanale.

La quarta azienda visitata è stata la "Rifinizione Santo Stefano S.p.A.", specializzata nello svolgimento delle lavorazioni di preparazione, tintoria, asciugatura e finissaggio tessuti di varia natura e composizione per conto terzi. Le portate di fumi trattati tramite scrubber a umido sono, in totale, dell'ordine dei 90.000 Nm³/h e provengono dalle lavorazioni di asciugatura, termofissaggio con ramose e stampa digitale e marcatrice laser. Sono presenti due scrubber progettati per il trattamento di rispettivamente 30.000 Nm³/h e 60.000 Nm³/h, gli scrubber sono della tipologia "scrubber a piatti" e sono seguiti nella sezione successiva a quella di lavaggio dal ferma-gocce per eliminare l'eccesso di umidità nell'aria in uscita, costituito da cilindri di plastica forata in cui l'umidità ricondensa e viene trattenuta sotto forma di gocce. La manutenzione del sistema di abbattimento avviene attraverso la pulizia delle

tubazioni di adduzione con frequenza annuale, la pulizia della vasca e la sostituzione della soluzione di lavaggio tramite svuotamento totale con frequenza mensile, la pulizia delle piastre forate (costituenti i “piatti” dello scrubber in cui avviene la rimozione dell’inquinante) è effettuata con cadenza annuale e infine il ferma-gocce è pulito con cadenza annuale.

L’ultima azienda visitata è stata la “Tessiltoschi Industrie Tessili Spa”, specializzata nella produzione di tessuti tecnici, utili alla produzione di tomaie per scarpe, quali scarpe antinfortunistica, solette, tessuti per borsetteria, abbigliamento, arredamento e tessuti ortopedici. Utilizza un impianto di abbattimento, scrubber a umido a corpi di riempimento, costituiti da sfere cave (figura 13). Nelle foto realizzate presso l’azienda si può notare la struttura dell’impianto di abbattimento, con la condotta che immette il flusso gassoso nella parte bassa dello scrubber e la cisterna contenente l’acqua di lavaggio (figura 13a) e la condotta di uscita del flusso gassoso che esce dalla parte alta della colonna di abbattimento (figura 13b).



Figura 13a Impianto scrubber dell’azienda Tessiltoschi



Figura 13b Impianto scrubber dell'azienda Tessiltoschi

2.2.2 La progettazione di uno scrubber a umido

La progettazione complessiva deve tener conto, oltre della progettazione strutturale anche della manutenzione, della resistenza alla corrosione dei materiali e del trattamento del liquido esausto.

La progettazione di uno scrubber a umido è nel concetto generale abbastanza semplice come processo, ogni diversa tipologia però richiede le proprie specificità.

Per la progettazione strutturale si possono comunque determinare una serie di parametri generali che, orientativamente, possono essere validi per la progettazione di ogni tipologia di scrubber a umido, parametri riguardanti dimensioni, portate e distribuzioni granulometriche del particolato. I principali parametri sono allora:

- Rapporto Liquido/Gas (L/G)

Che rappresenta il volume di liquido iniettato nella camera di lavaggio per volume di gas trattato. Il rapporto L/G influisce sull'efficienza di rimozione che aumenta al crescere di L/G, questo poiché al crescere del volume d'acqua immesso, per una data sezione trasversale della torre avremo una densità maggiore e quindi una probabilità migliore di far avvenire il contatto tra le due fasi. Considerando che è opportuno aumentarne il valore al crescere del carico di particolato, come mostrato in figura 13, tuttavia superato un determinato valore del rapporto, l'efficienza smetterà di aumentare determinandone un valore ottimale, il cui valore è compreso tra 0,94 e 1,34 litri/m³ (7 e 10 galloni/1000 piedi³). Il rapporto L/G influisce però anche sui costi operativi, infatti all'aumentare sarà maggiore il consumo di liquido di lavaggio ed energetico per permettergli di essere circolato, perciò potrebbe essere necessario trovare un compromesso tra efficienza e costo.

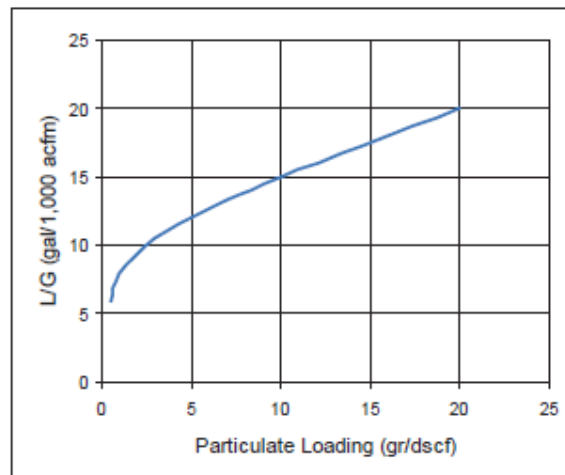


Figura 14 Liquid to Gas Ratio as a Function of Particle Loading (EPA, 2002)

- Velocità del gas e caduta di pressione

La velocità relativa del gas rispetto alle gocce di liquido incrementa la quantità di moto del particolato, questo consente di raccogliere anche le particelle più piccole tramite l'impatto tra le due fasi. Per aumentare la velocità relativa si può agire restringendo la sezione della torre, iniettare il liquido in controcorrente contribuisce già di per se a questo obiettivo. Di contro così facendo si vanno ad aumentare le perdite di carico, quindi della domanda energetica e infine dei costi di gestione.

I valori tipici di velocità massima raggiunta in uno scrubber Venturi sono, in corrispondenza della "gola", tra 45 e 150 m/s, con conseguenti cadute di pressione

comprese tra 25,4 e 203,2 cm di colonna d'acqua (cm c.a.) (ossia 10–80 in w.c. se espressi in pollici oppure 2.5 – 20 kPa), già oltre i 114 cm c.a. (circa 50 in w.c.), non si hanno però aumenti di efficienza rilevanti.

- Distribuzione granulometrica e carico del particolato

Questo fattore influisce in larga misura sulle prestazioni di uno scrubber a umido. Una particella solida può essere catturata attraverso i meccanismi di impatto inerziale, intercettazione o diffusione, il meccanismo predominante viene determinato dalla distribuzione dimensionale. Solitamente la modalità più rilevante è quella di impatto inerziale, mentre le particelle più piccole di 0,1 µm ($1,0 \times 10^{-7}$ m) vengono catturate tramite diffusione. L'efficienza cala esponenzialmente al diminuire delle dimensioni delle particelle, come si può notare dalla figura seguente:

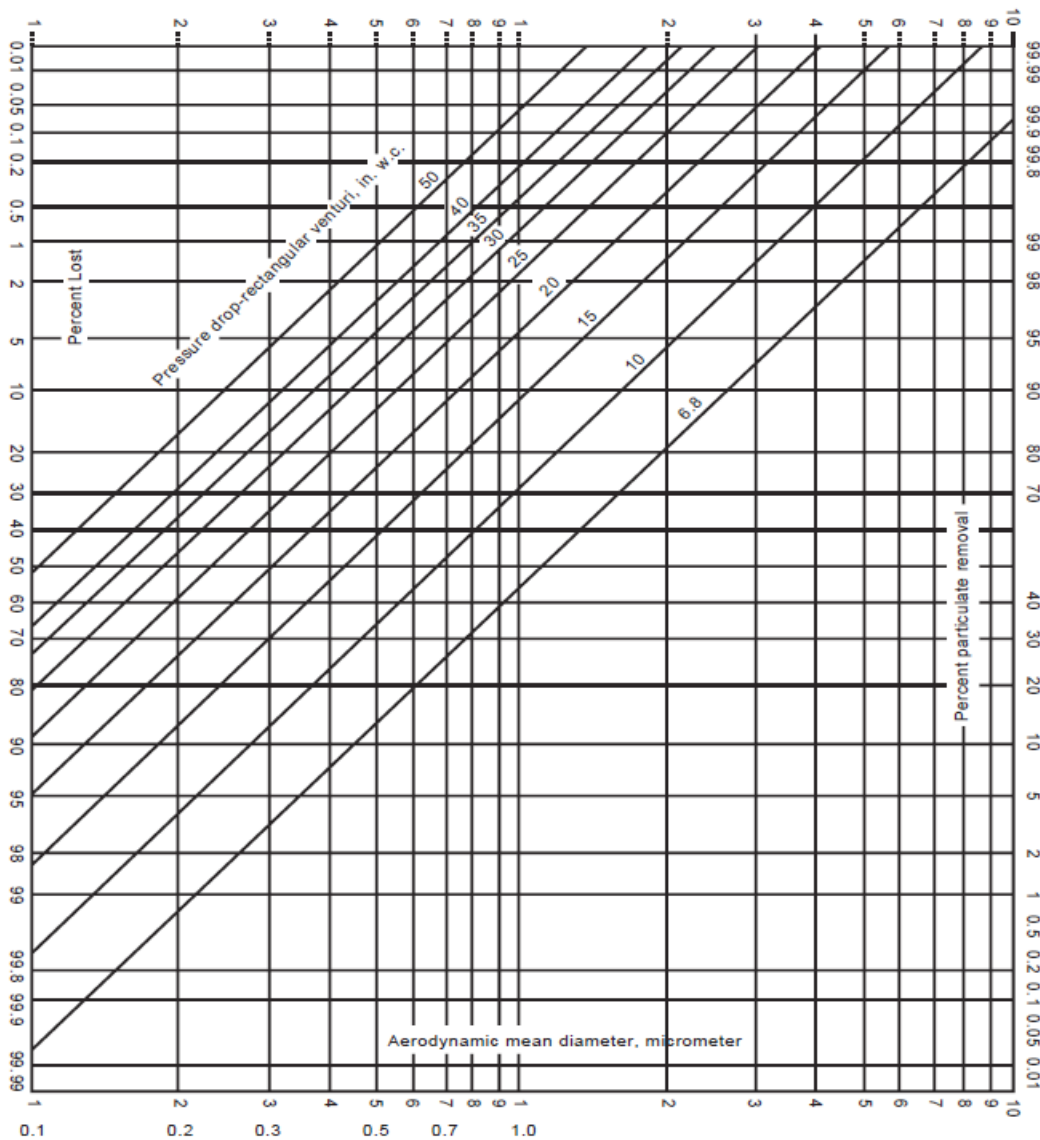


Figura 15 (EPA, 2002)

Un aumento delle concentrazioni da trattare comporterà un aumento delle concentrazioni nel liquido di lavaggio, che quando ricircolato offrirà efficienze di cattura inferiori e comportando un maggior utilizzo di acqua fresca con aumento dei costi operativi, in termini energetici, di aumento di liquido di lavaggio e del suo trattamento una volta uscito dal sistema, oltre alla maggior manutenzione richiesta all'aumentare dei carichi.

- **Portata di gas**

La portata di gas da trattare rappresenta probabilmente il parametro più importante per il dimensionamento della torre, maggiore è la portata da trattare e maggiore dovrà essere il volume della camera. La portata di gas ha inoltre influenza diretta sul volume di liquido di lavaggio necessario a parità di rapporto L/G.

- **Temperatura e umidità del gas**

La temperatura e l'umidità del gas sono importanti perché, passando nella camera, l'aria calda fa evaporare una parte di acqua, andando ad aumentare l'umidità e diminuendo la temperatura del flusso gassoso. Questo effetto è influenzato dai valori di temperatura e umidità posseduti in ingresso e quando l'evaporazione aumenta si deve aumentare il valore del rapporto L/G.

Le temperature raggiungibili dagli scrubber, quando l'obiettivo è la rimozione del particolato sono solitamente comprese tra i 100 e i 370 °C circa e solitamente si rende necessario raffreddare il flusso in ingresso se le temperature sono troppo elevate.

- **Tempo di residenza**

Il tempo di residenza rappresenta il tempo che, un volume di aria da trattare, impiega ad attraversare la camera di trattamento e quindi, influisce sul tempo di contatto tra le due fasi e sulla probabilità che le particelle possano essere rimosse.

Per agire sul tempo di residenza, si può agire modificando la lunghezza della camera, siccome lunghezze eccessive influiscono sulle perdite di carico dovrà essere trovato un ottimo. Solitamente è raccomandato un rapporto minimo lunghezza e larghezza di 3:1 ma per sistemi ad alta energia anche di 4:1.

- Dimensione delle gocce

La dimensione delle gocce con cui si effettua la depurazione della corrente d'aria hanno un ruolo rilevante, perché più la goccia sarà piccola, più questa avrà una superficie specifica (rapporto superficie/volume) maggiore, il che favorisce il contatto tra le fasi e aumenta l'efficienza di rimozione. Se la goccia è troppo piccola però, subirà l'effetto della quantità di moto del gas, portando a diminuire la velocità relativa e inficiando l'efficienza di raccolta.

Le dimensioni delle particelle possono essere controllate tramite gli ugelli degli spruzzatori e le condizioni operative. Negli scrubber "dinamici" si possono usare la velocità del rotore, il rapporto L/G e la velocità del gas come mezzi di controllo (EPA, 2002).

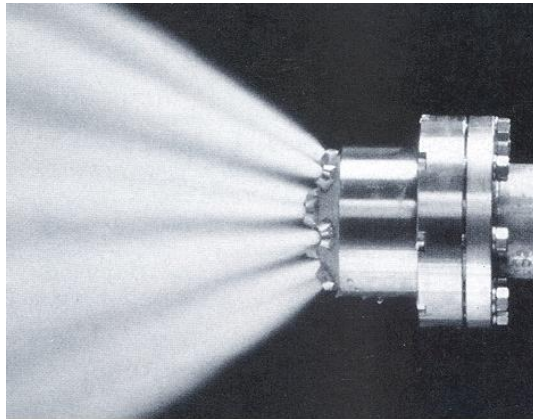


Figura 16 Atomizzazione del liquido tramite ugello in uno scrubber ad alta energia

- Controllo della deriva liquida

Un fattore importante della progettazione riguarda il controllo della deriva liquida, che consiste in quella parte di gocce di liquido di lavaggio che vengono trascinate dal moto del flusso d'aria e che sarebbero immesse in atmosfera se non rimosse, portando con loro le sostanze che hanno catturato all'interno della camera di rimozione e che invece si volevano rimuovere.

Si possono distinguere due tipologie di gocce, quelle più piccole dovute alla condensazione del vapore acqueo nella zona saturata di gas dello scrubber, con dimensioni comprese tra i 0.1 e 10 micrometri, e quelle più grandi, dovute all'atomizzazione del liquido spruzzato dagli ugelli, le dimensioni di questa tipologia variano tra i 20 e i 1000 micrometri.

Le prime sono sostanzialmente prive, o comunque contengono pochissimo, materiale rimosso, le seconde sono invece quelle gocce generate appositamente per effettuare la rimozione e dunque saranno cariche delle sostanze.

Per evitare dunque di immettere queste gocce contenenti le sostanze inquinanti in atmosfera si possono installare i demister (o separatori di gocce o separatori di nebbia).

I separatori di gocce

Lo scopo dei separatori di gocce è quello di catturare le gocce, contenenti le sostanze indesiderate, prima del loro scarico in atmosfera. Inoltre queste sostanze possono danneggiare o creare problemi anche alle strutture presenti tra lo scrubber e la sezione d'uscita, come tubazioni, ventole o altro, si possono verificare accumuli che intasano o corrodono.

Vi sono diverse tipologie di demister (Richards, 2000), tra cui:

- vasi ciclonici, che sfruttano la forza centrifuga per rimuovere le gocce, funzionano quindi come un vero e proprio ciclone;
- profili a chevron (chevrons), i quali sono costituiti da una serie di deflettori che sono posti a formare un percorso a zig-zag in cui viene incanalato il flusso di gas. Questo percorso fa compiere brusche deviazioni al flusso e aumenta la probabilità di impatti per le gocce. Nell'immagine 17 si può vedere uno schema della struttura;
- cuscinetti a rete (mesh pads), costituiti da fibre metalliche intrecciate, attraverso cui viene fatto passare il flusso d'aria e in cui, tramite impatto, sono raccolte le goccioline presenti (in figura 18 un esempio di cuscinetti a rete);
- palette radiali (radial vanes), composti da un singolo strato di deflettori sovrapposti, che funzionano deviando il flusso d'aria attraverso una serie di palette, le gocce presenti nel gas invece non riescono a deviare la loro traiettoria, impattando sulle palette e ricadendo in basso nel flusso gassoso;
- cuscinetti intrecciati (woven pads), concettualmente uguali ai cuscinetti a rete, ma in questo caso, le fibre non sono metalliche ma sintetiche.

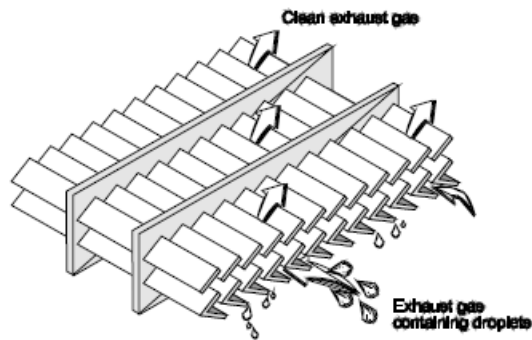


Figura 17 Schema di funzionamento di un demister chevron

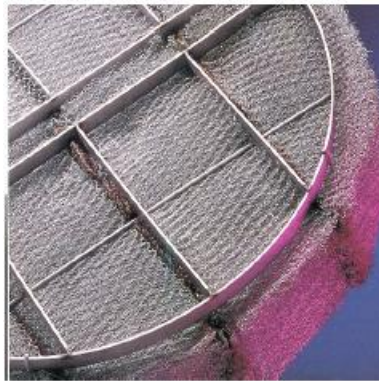


Figura 18 esempio di cuscinetto a rete

Nella progettazione di un separatore di gocce è importante considerare la velocità del flusso, che dovrà avere un valore ottimale, se troppo elevata potrebbe causare infatti ritrascinamento delle gocce rimosse.

È poi utile gestirne il dimensionamento al fine di evitare un'eccessiva caduta di pressione per consentire il passaggio dei flussi senza intasamento, valutando cicli di pulizia per eventuali intasamenti nei casi di deposito di sostanze solide e/o colloidali.

Un separatore di nebbia può essere costituito da più stadi di elementi filtranti e può raggiungere un'efficienza di rimozione della frazione liquida dalla colonna d'aria del 99,5% quando le gocce presenti hanno dimensioni comprese tra i 0,5 e i 3 μm . Per dimensioni maggiori delle gocce l'efficienza può raggiungere anche il 100%, mentre al calare delle dimensioni, sotto i 0,5 μm , l'efficienza cala (Forain, n.d.).

La progettazione di uno scrubber ha la finalità di garantire una determinata efficienza di raccolta, questa dipende dal valore del rapporto L/G, dalla velocità a cui viaggia il gas nello scrubber e dalle perdite di carico del sistema. La progettazione non avviene con un

approccio diretto ma vi è la necessità di un approccio iterativo che consenta di collimare le necessità di progetto. Ad esempio, nel caso di uno scrubber Venturi, la correlazione tra le grandezze che concorrono a determinare l'efficienza può essere mostrato nel grafico a figura 19:

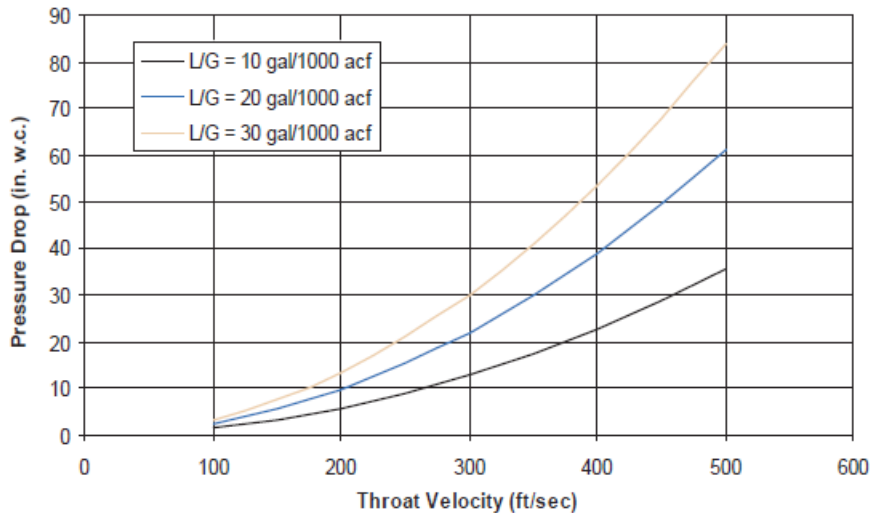


Figura 19 Relazione tra caduta di pressione, velocità nella gola e rapporto L/G (EPA, 2002)

In cui le perdite di carico sono espresse in “pollici di colonna d’acqua” (in.w.c.), la velocità in “piedi al secondo” (ft/sec) e il rapporto L/G in “galloni per 1000 piedi cubi in condizioni effettive” (gal/1000 acf).

Per stimare il rapporto L/G è necessario calcolare il quantitativo di acqua necessario a rimuovere le concentrazioni presenti nel flusso gassoso, per la caduta di pressione e la velocità del gas invece esistono svariate tipologie di metodi.

Stima della caduta di pressione

Vi sono differenti modalità di stimare la caduta di pressione, le modalità principali prevedono l'utilizzo di equazioni apposite, l'utilizzo della teoria della potenza di contatto, le curve di performance e il metodo del diametro di taglio.

- **Equazioni**

Le equazioni per la stima delle perdite di carico in uno scrubber Venturi sono della forma:

$$\Delta P = k \cdot \rho_g \cdot v^2 \cdot \frac{L}{G}$$

dove:

- ΔP è la perdita di carico attraverso lo scrubber,

- ρ_g è la densità del gas,
- k è un fattore di correlazione specifico del design dello scrubber
- v è la velocità del gas nello scrubber
- $\frac{L}{G}$ è il rapporto liquido/gas

Calvert ha proposto una variante in cui k assume il valore $4,5 \cdot 10^{-4}$ e il rapporto L/G è elevato a 0,4, diventando:

$$\Delta P = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_g \cdot v^2 \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,4}$$

Molto usata è anche la relazione di natura sperimentale sviluppata da Hesketh:

$$\Delta P = 0.0023 \cdot \rho_g \cdot Av^{0.56} \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0.125} + 0.133 \left(\frac{L}{G}\right)^2$$

In cui Av è l'area della sezione della gola dello scrubber Venturi.

- **Teoria della potenza di contatto (contacting power)**

La teoria della potenza di contatto, sviluppata da Lapple e Kamack inizialmente e Semrau poi, definisce la potenza di contatto come l'energia dissipata per unità di volume di gas trattato.

Questa teoria afferma che tutti gli scrubber forniscono lo stesso grado di raccolta a parità di livello di potenza fornita, indipendentemente dalle modalità di erogazione, ed è paria a:

$$P_T = P_G + P_L + P_{mech}$$

Dove:

- P_G è la potenza dovuta alla perdita di carico del gas,
- P_L è la potenza dovuta all'atomizzazione del liquido,
- P_{mech} è la potenza assorbita dai dispositivi meccanici.

Nella maggioranza dei casi la potenza dovuta alle perdite di carico del gas è dominante nel processo ed è calcolabile come:

$$P_G = 0.157 \cdot \Delta P$$

La potenza fornita per atomizzare il liquido è invece:

$$P_L = 0.583 \cdot p_L \cdot \frac{L}{G}$$

Dove p_L è la pressione di ingresso del liquido di lavaggio.

- **Curve di performances**

Le curve di performances rappresentano l'andamento dell'efficienza di raccolta in funzione del diametro delle particelle a una determinata caduta di pressione.

Prendendo l'efficienza generale di raccolta, comprensiva di tutti i diametri da rimuovere presenti nel flusso gassoso, esprimendola come penetrazione, tra cui Hesketh ha sperimentalmente dimostrato la correlazione, si può determinare e graficare la correlazione tra penetrazione e caduta di pressione, come nell'esempio di figura sotto.

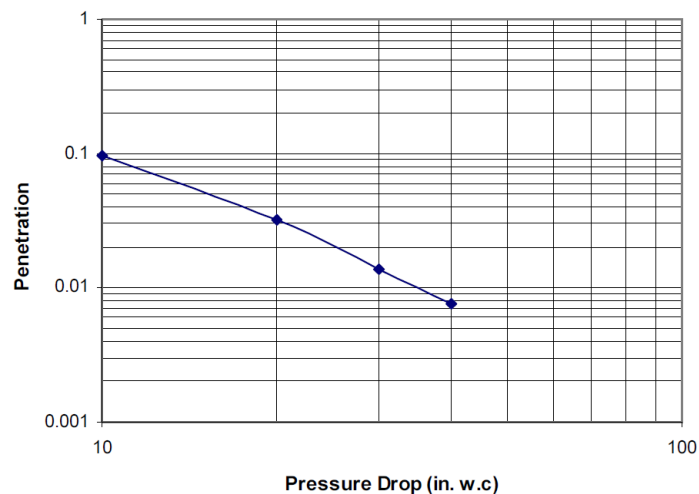


Figura 20 Curva di performance Penetrazione vs Caduta di pressione (EPA, 2002)

Nota la penetrazione o l'efficienza si potrà dunque ottenere il valore di caduta di pressione nella torre.

- **Metodo del diametro di taglio**

Il diametro di taglio (d_{cut}) è quel diametro delle particelle per il quale lo scrubber ha un'efficienza di rimozione del 50%, è quindi una caratteristica del sistema. Di conseguenza, per diametri maggiori l'efficienza sarà maggiore, mentre diminuirà per diametri inferiori.

La determinazione del diametro di taglio avviene tenendo conto del rapporto L/G, della velocità del gas, della dimensione delle gocce generate, della densità e della viscosità del gas.

Conoscendo la granulometria delle particelle da rimuovere si potrà capire quindi quale sarà l'efficienza del sistema e confrontando con il diametro di taglio con le curve di performance apposite (figura 21) si risale alla caduta di pressione correlata.

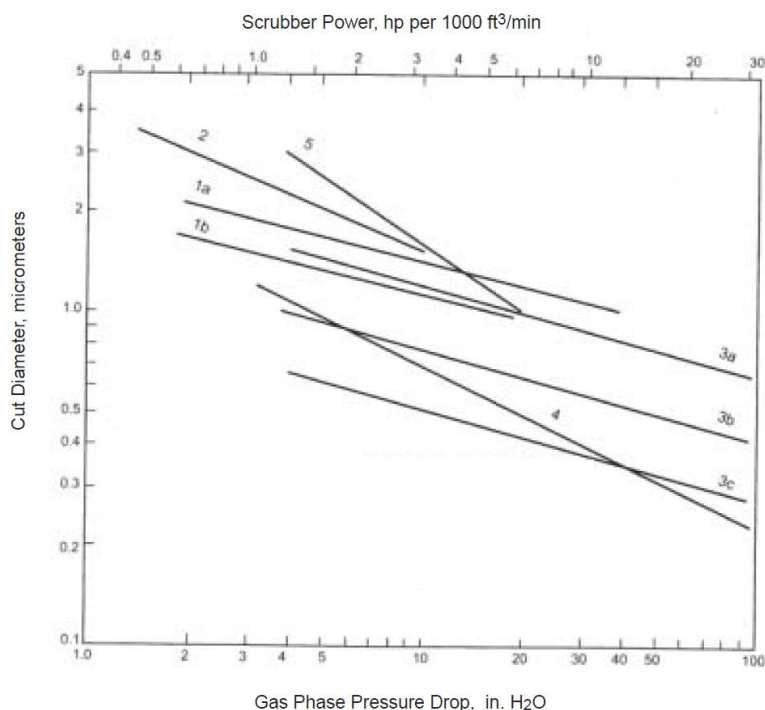


Figura 21 Correlazione tra diametro di taglio e caduta di pressione (EPA, 2002)

In fase di progetto posso quindi determinare la caduta di pressione che mi garantisce l'efficienza di rimozione desiderata (EPA, 2002).

Stima della velocità del gas nello scrubber

La velocità del gas all'interno dello scrubber dipende direttamente dal valore delle perdite di carico, oltre che dal rapporto L/G, dalla turbolenza nella camera di lavaggio, e dalla miscela gas-liquido e del particolato attraverso la torre. Un limite al valore della velocità può essere dato dalla capacità di trattamento delle apparecchiature a valle dello scrubber, come l'eliminatore di nebbia.

Solitamente la velocità è determinata sperimentalmente, ma può essere usata una versione modificata dell'equazione di Bernoulli:

$$v_t = \frac{C \cdot Q_m}{A_t \cdot \rho_{sat} \cdot \Delta P}$$

Dove A_t è l'area della sezione trasversale della gola, Q_m la portata volumetrica massima effettiva dell'aria, ρ_{sat} la densità del gas a saturazione e C una costante dipendente dalla tipologia di scrubber e funzione del rapporto L/G.

Tale equazione permette quindi di determinare anche la geometria della sezione dello scrubber, definendo l'area.

Un aumento della velocità comporterà dei miglioramenti nelle efficienze di raccolta, una diminuzione viceversa (EPA, 2002).

Stima del quantitativo d'acqua necessario

Lo scrubber a umido utilizza, per la purificazione delle correnti gassose dalle sostanze indesiderate, principalmente acqua, talvolta addizionata di sostanze che facilitano il processo di rimozione, questa miscela in generale è definibile come liquido di lavaggio.

Solitamente questo liquido di lavaggio non viene usato per un solo ciclo ma viene ricircolato, al fine di massimizzare l'efficienza di raccolta di un determinato volume e per limitarne il consumo, con conseguente risparmio di risorsa ma anche di investimento economico.

Questo liquido, solitamente contenuto in un apposito bacino, può essere cambiato completamente ciclicamente (una volta alla settimana o al mese a seconda delle necessità), oppure può essere integrato in continuo, spurgando una parte di liquido "esausto" e procedendo al reintegro di "liquido fresco".

Considerando il caso in continuo, con spurgo parziale del liquido esausto e reintegro parziale, il quantitativo di liquido fresco da utilizzare è direttamente influenzato dalle concentrazioni da trattare, che in uno scrubber venturi per il trattamento di particolato possono raggiungere al massimo il 20-30%, e al crescere aumenterà la quantità da spurgare.

Si può determinare la portata massica di particolato che entra nel liquido (m_{PM}) con la formula:

$$m_{PM} = \eta \cdot L_{PM,IN} \cdot Q_i$$

Dove η è il rendimento complessivo di raccolta del sistema, $L_{PM,IN}$ è la concentrazione di PM in ingresso e Q_i è la portata del gas in ingresso.

Usando la densità dell'acqua e la concentrazione di solidi si può determinare il tasso di spurgo del liquido (Q_{bleed}):

$$Q_{bleed} = \frac{\dot{m}_{PM}}{\rho_{H2O} \cdot f_{solids}}$$

In cui f_{solids} è la frazione massica di solidi nell'acqua di ricircolo.

La portata totale di acqua richiesta dal sistema (Q_t) è la somma dell'acqua di spurgo e dell'acqua evaporata (che vedremo successivamente come può essere stimata) (EPA, 2002):

$$Q_t(H2O) = Q_{evap} + Q_{bleed}$$

Nel caso in cui l'operatività del processo sia svolta in ciclo chiuso, e quindi il processo avvenga utilizzando una quantità predefinita di acqua che viene ricircolata per un determinato lasso temporale prima di essere sostituita con un nuovo volume di "acqua fresca", si ha che la frazione di sostanza rimossa, che poi sarà contenuta nell'acqua di ricircolo, f_{solids} , non è più costante nel tempo ma varia. Nello specifico, il contenuto di solidi che sono presenti in essa, variano da un minimo, che rappresenta la situazione iniziale in cui nell'acqua non è presente la sostanza rimossa (e dove la concentrazione assume quindi un valore pari a $f_{solids} = 0$), a un massimo, che rappresenta la quantità massima che potrebbe essere contenuta all'interno del volume d'acqua ($f_{solids} = \max$).

Contemporaneamente, considerando l'acqua presente nel serbatoio, in cui arriva l'acqua di lavaggio carica di sostanza raccolta e da cui sarà pescata l'acqua di ricircolo per effettuare un nuovo lavaggio, avremmo un andamento crescente della concentrazione del tempo. Nella realtà potremmo avere un valore massimo di accumulo che potrebbe essere anche molto elevato, dal momento che, parlando di sostanze, oleose non solubili, queste tendono a stratificarsi per via dell'insolubilità e della differente densità con l'acqua. La concentrazione di sostanza presente nel serbatoio sarà la stessa presente nell'acqua di ricircolo e rappresenterà la frazione di sostanza che non ha fatto in tempo a stratificare, per la differenza di densità, nel tempo che ha trascorso nella vasca prima di essere pescata nuovamente. Per poter svolgere i calcoli si può tuttavia semplificare questa dipendenza dalla variazione di concentrazione nel tempo e utilizzare un valore medio per la frazione di sostanza che è contenuta nell'acqua di lavaggio e che viene poi ricircolata. Anche nel caso di lavaggio in continuo possiamo quindi utilizzare la stessa f_{solids} , la determinazione dell'acqua necessaria sarà quindi data dall'integrale nell'intervallo di tempo dell'equazione

di Q_{bleed} vista prima, essendo f_{solids} costante nel tempo, al posto del calcolo dell'integrale si potrà procedere moltiplicando la quantità di spurgo per l'intervallo di tempo che intercorre tra due pulizie del serbatoio. Il reintegro non sarà quindi continuativo nel tempo ma periodico e sarà costituito dal quantitativo da spurgare, che possiamo vedere come una velocità con cui il volume di acqua si sporca, per il tempo che intercorre tra due pulizie del serbatoio.

$$Q_{bleed,tot} = Q_{bleed} \cdot \Delta t$$

Il calcolo del quantitativo di acqua evaporata invece non ha differenze tra il caso in continuo e il caso in ciclo chiuso, ma essendo l'acqua evaporata un quantitativo che si andrà poi a disperdere in atmosfera, questo andrà ad abbassare nel tempo il livello nella vasca.

Proprietà del gas da trattare e determinazione delle portate

La progettazione dello scrubber necessita di conoscere le informazioni riguardanti portata volumetrica (Q), temperatura (T), pressione (P) e contenuto di umidità dell'aria, sia in entrata che in uscita dal sistema. Le proprietà del gas possono essere misurate in ingresso al sistema, mentre quelle in uscita variano in funzione del tasso di evaporazione del liquido di lavaggio.

L'evaporazione di una parte dell'acqua all'interno dello scrubber fa sì che si abbia una riduzione della temperatura, con conseguente riduzione del volume del gas e l'aumento dell'umidità, totale e specifica.

Generalmente si considera, ai fini progettuali, che le condizioni del gas di scarico all'uscita sia al punto di saturazione e l'evaporazione viene modellata come un processo di raffreddamento evaporativo diretto (processo di saturazione adiabatica).

In questo processo l'aria non satura (secca) viene raffreddata tramite il trasferimento del calore sensibile dall'aria al vapore acqueo come calore latente, l'entalpia totale, e quindi l'energia totale, dell'aria si assume che rimanga costante. Si assume inoltre che la massa si conservi e che il gas si comporti come ideale.

Sotto queste ipotesi:

- La portata massica di aria secca rimane costante nel sistema,
- La differenza tra la massa di vapore acqueo all'ingresso e all'uscita corrisponde alla massa evaporata nello scrubber.

La valutazione può avvenire analiticamente, graficamente con l'utilizzo di un diagramma psicometrico, o tramite l'utilizzo di opportuni software che calcolano direttamente le variabili del diagramma.

- **Il diagramma psicometrico e la stima della portata evaporata**

Il diagramma psicometrico (un esempio in figura 22), chiamato anche “diagramma di Mollier”, o “diagramma dell'aria umida” è una rappresentazione grafica delle proprietà termodinamiche dell'aria umida, consente di comprendere e analizzare le trasformazioni che l'aria subisce durante processi come il condizionamento e l'essiccamento.

È un grafico bidimensionale, che viene tracciato a pressione costante, mostra le relazioni tra grandezze come la temperatura, l'entalpia, l'umidità relativa e l'umidità specifica, permettendo di determinare tutte le caratteristiche di una miscela aria-vapore conoscendone solo due.

Nello specifico, il diagramma è così costituito:

- L'asse delle ascisse indica la temperatura del bulbo secco, cioè la temperatura dell'aria col vapore che può essere misurata con un termometro,
- L'asse delle ordinate che indica l'umidità specifica, o rateo di umidità (ω),
- Le curve di saturazione, che indicano il grado di saturazione del volume d'aria considerato (le curve rosse), quindi l'umidità relativa (%),
- Le linee inclinate (rosa) che indicano i livelli costanti dei valori di entalpia,
- Le linee inclinate (verdi) che indicano i livelli costanti dei valori di volume specifico dell'aria.

Nella progettazione di uno scrubber a umido il grafico psicometrico può essere utilizzato per conoscere le caratteristiche dell'emissione all'uscita della camera, supposte in condizioni di saturazione, e per poter stimare la quantità di acqua che evapora durante il processo al fine di poterla reintegrare.

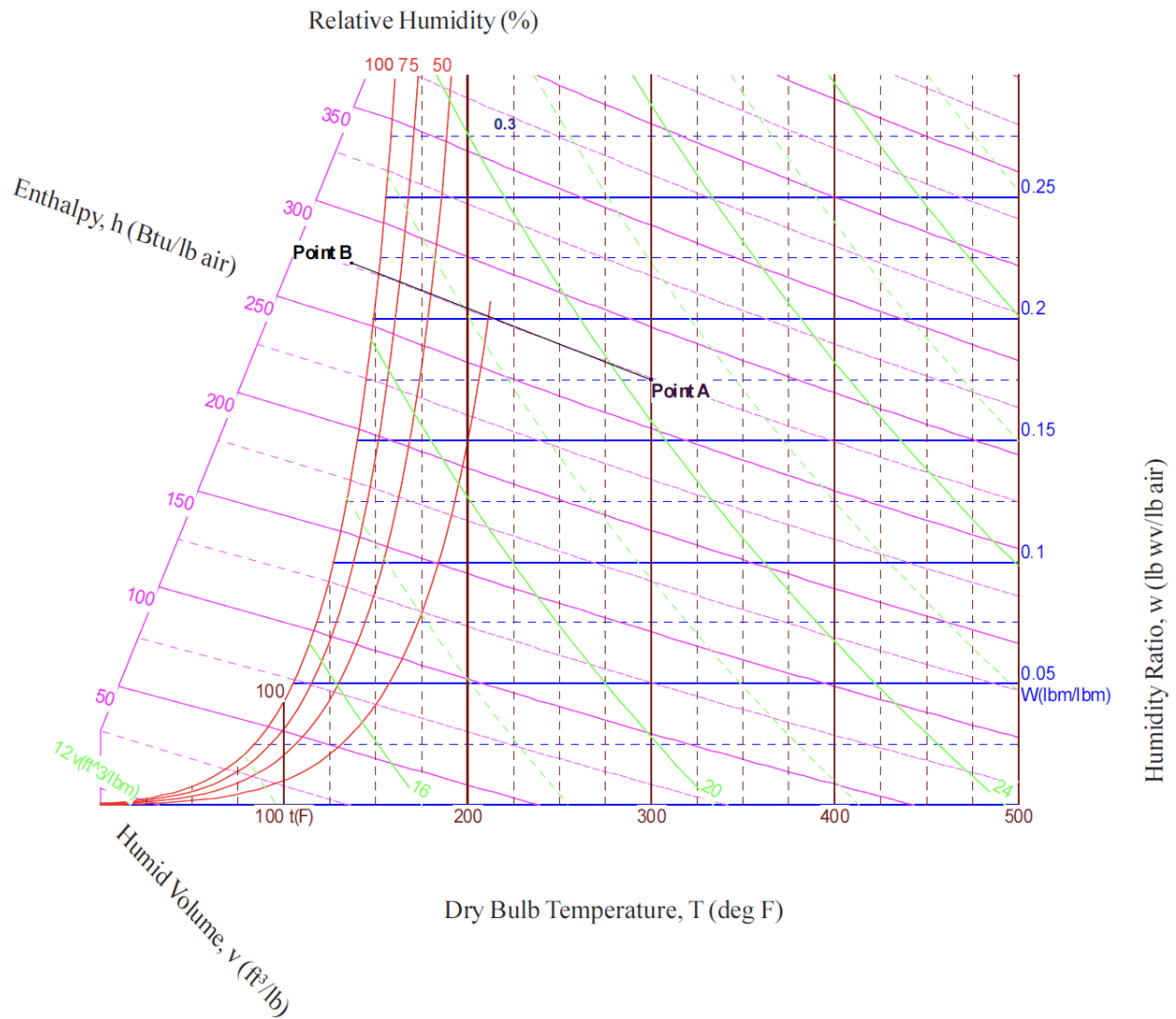


Figura 22 Diagramma psicometrico (EPA, 2002)

Per determinare le condizioni in uscita dallo scrubber si individua sul grafico il punto a temperatura e rapporto di umidità ($\omega_{(in)}$) all'ingresso, che dovranno essere noti quindi.

Si esegue una trasformazione adiabatica (in figura 22, la trasformazione adiabatica è quella compiuta andando dal punto A al punto B), effetto di un raffreddamento dovuto all'evaporazione dell'aria. Tale raffreddamento raggiungerà il punto di saturazione seguendo la linea di entalpia costante (linea rosa) fino alla curva di saturazione con umidità relativa del 100% (la curva rossa più a sinistra), perché l'evaporazione continua fino a raggiungere la saturazione completa.

Questo nuovo punto individuato rappresenterà le condizioni di uscita del gas, con una nuova temperatura più bassa, un nuovo volume specifico, e quindi, considerando che la massa di aria secca rimane costante, sarà possibile determinare il volume di gas in uscita su cui dimensionare il sistema (EPA, 2002).

Per determinare la portata volumetrica del gas di scarico all'uscita dello scrubber $Q_{m(out)}$ si utilizza la portata massica dell'aria secca (\dot{m}_{air}) e il volume specifico dell'aria umida ($v_{aria(out)}$) letto sul diagramma nel punto di uscita, quindi saturo.

$$Q_{m(out)} = \dot{m}_{air} \cdot v_{aria(out)}$$

Il rapporto di umidità all'uscita ($\omega_{(out)}$), determinato tramite il grafico psicometrico, può essere utilizzato per calcolare la portata massica di vapore acqueo nel gas di scarico all'uscita ($\dot{m}_{wv(out)}$) dello scrubber con la seguente formula:

$$\dot{m}_{wv(out)} = \omega_{(out)} \cdot \dot{m}_{air}$$

La massa di acqua che evapora attraverso lo scrubber $\dot{m}_{wv(evap)}$ può essere calcolata determinando la differenza tra l'umidità in ingresso $\dot{m}_{wv(in)}$ e in uscita dal sistema del gas di scarico:

$$\dot{m}_{wv(evap)} = \dot{m}_{wv(out)} - \dot{m}_{wv(in)}$$

Infine dividendo per la densità del liquido si potrà quindi ottenere la portata volumetrica evaporata $Q_{wv(evap)}$, che rappresenterà dunque il quantitativo da reintegrare:

$$Q_{wv(evap)} = \frac{\dot{m}_{wv(evap)}}{\rho_{H2O}}$$

e che potrà poi essere sommato a quello di spurgo per ottenere il quantitativo totale che permette al sistema di funzionare efficacemente.

2.2.3 Rendimento di uno scrubber a umido

Il rendimento di abbattimento di uno scrubber a umido misura la quota parte di sostanza inquinante rimossa, rispetto alla quantità di sostanza complessivamente contenuta all'interno del flusso gassoso entrante al sistema. Come visto anche precedentemente l'efficienza di rimozione dipende principalmente dall'energia dissipata nel contatto gas-liquido, detta contacting power, e quindi è fortemente influenzata dalla caduta di pressione. Dunque, a parità di particolato, scrubber di tipo diverso ma con la stessa potenza di contatto mostrano efficienze comparabili (Don W. Green, 2018).

L'efficienza di raccolta può essere espressa in modalità differenti:

- come efficienza di raccolta di una singola goccia, esprimendo quanto una singola goccia riesce a raccogliere rapportando l'area attraversata rispetto all'area della sezione trasversale della goccia,

- come efficienza di raccolta sulla base delle masse, in entrata e in uscita, di sostanza da rimuovere,
- come efficienza di raccolta in funzione della distribuzione granulometrica delle particelle, cioè l'efficienza di raccolta cumulativa per ciascun intervallo granulometrico.

L'efficienza di raccolta in basata sulla massa è generalmente superiore all'efficienza di raccolta in base alle particelle. Questo perché le particelle di dimensioni maggiori, che sono generalmente più massicce, tendono a essere raccolte con efficienze maggiori rispetto alle particelle di diametro inferiore. Solitamente è più comune esprimere l'efficienza in base alle dimensioni aerodinamiche delle particelle piuttosto che in base alla massa, infatti uno dei metodi per determinare la caduta di pressione, e conseguentemente l'efficienza di rimozione, è il metodo del diametro di taglio (cut diameter).

Come abbiamo visto le tipologie di scrubber a umido sono differenti, ognuna con le proprie peculiarità e con le proprie caratteristiche utili a migliorare il processo di rimozione, determinare un valore di abbattimento univoco è dunque, già in questi termini, un'operazione di difficile attuazione, seppur i valori possano essere comparabili tra le diverse tipologie.

Considerando poi gli obiettivi e le sostanze specifiche da abbattere, in mancanza di appositi studi e misurazioni diventa ancora più arduo da determinare. I rendimenti di abbattimento sono infatti differenti nel caso di abbattimento di sostanze gassose, e variano a seconda della loro elevata o meno solubilità, o nel caso della rimozione meccanica di polveri e particolato.

Essendo caduta di pressione ed efficienza correlati tra loro, si può effettuare una classificazione delle varie tipologie dei sistemi scrubber basata sulla classe energetica e suddividendo in tre livelli, bassa energia, media energia e alta energia (Don W. Green, 2018), nella tabella successiva si può vedere tale classificazione rapportata alla caduta di pressione e all'efficienza tipica, con l'esempio di quali tipologie di scrubber fanno parte di tale categoria.

Tabella 4 Confronto tra classe energetica degli scrubber e loro caratteristiche

Classe	Caduta di pressione (kPa)	Efficienza tipica (%)	Esempio
Bassa energia	0.25-1.5	40-70	Spray / Tower
Media energia	1.5-4.5	70-90	Impingement / Orifice
Alta energia	>4.5	95-99	Venturi

Tipicamente per i sistemi scrubber, nell'ambito dell'industria tessile, si possono registrare rendimenti generici, inteso come abbattimento rispetto a tutto ciò che può essere contenuto in un flusso gassoso uscente dai trattamenti di lavorazione e non a specifiche sostanze, con valori che oscillano tra il 40% e il 70% e che in casi specifici, con adeguati flussi d'acqua e pressione di vapore, con sostanze idrosolubili, possono raggiungere valori del 90% di abbattimento (European Commission, 2023).

Confrontando dunque i valori tipici riscontrabili nei sistemi di abbattimento per il comparto tessile si può concludere che i sistemi tipicamente utilizzati siano quelli a bassa e media energia il che spiegherebbe i valori ridotti di efficienza di abbattimento riportati in letteratura per il settore.

Avendo inoltre nel nostro caso sostanze non idrosolubili, gli alchilbenzeni hanno infatti una solubilità praticamente nulla, i rendimenti di abbattimento difficilmente possono raggiungere i valori elevati che si potrebbero ottenere nel caso di solubilizzazione.

Nel caso dell'abbattimento meccanico di sostanze solide, polvere e particolato, il rendimento può raggiungere valori elevati, pur muovendosi all'interno di range di valori ampi. In questo caso diventano importanti le dimensioni delle particelle, che influiscono sul rendimento.

Nel grafico della figura seguente è possibile vedere come può variare l'efficienza di rimozione del particolato al variare del diametro delle particelle. Si può notare come più curve si riferiscano a varie condizioni operative di uno scrubber Venturi, e come le efficienze varino tra valori del 20% a oltre il 99% di rimozione (Don W. Green, 2018).

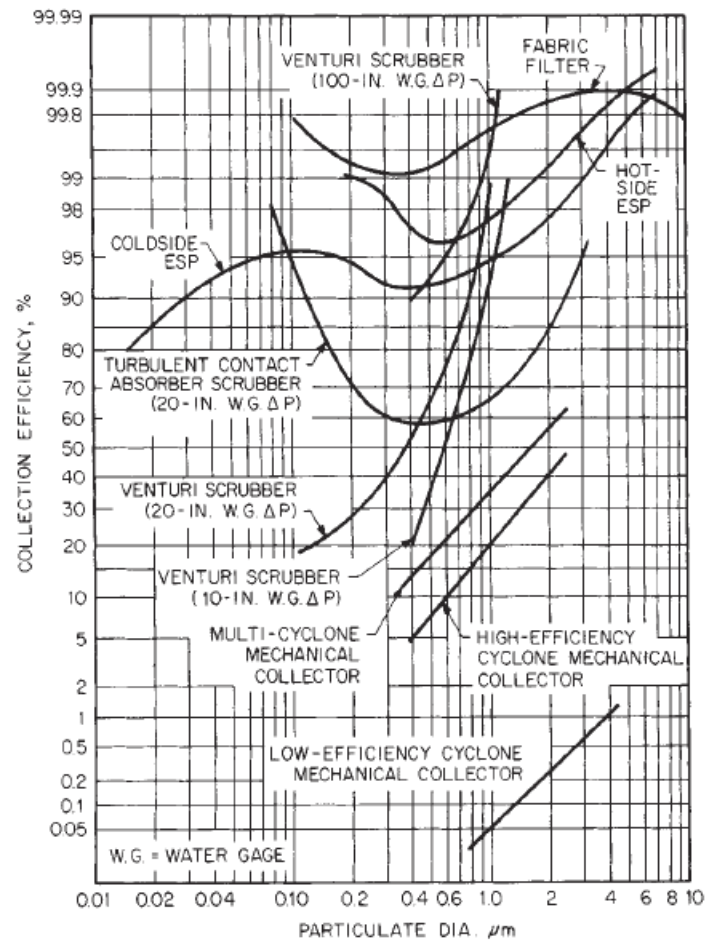


Figura 23 efficienza di rimozione al variare del diametro (Don W. Green, 2018)

In conclusione, l'efficienza della rimozione dipende principalmente dal contatto tra le due fasi, e per ottimizzarlo si devono considerare in particolare:

- Tipologia di scrubber
- Dimensione e distribuzione del particolato
- Portata del gas e del liquido
- Caduta di pressione

3. Caso applicativo: la rimozione degli alchilbenzeni

Finora, nella sezione relativa alla progettazione è stato trattato il caso di rimozione di particelle solide, perché, come abbiamo visto, la natura degli alchilbenzeni rende le goccioline che si formano nella corrente da trattare, assimilabili a particelle di particolato. Questo in quanto non essendo possibile operarne la solubilizzazione, per lo meno in assenza dell'utilizzo di opportuni additivi all'acqua come liquido di lavaggio, la rimozione avviene per via meccanica, grazie all'impatto tra le goccioline di alchilbenzeni e le gocce di liquido che si muovono in contro corrente.

Gli alchilbenzeni, sono presenti nei fumi esausti in quanto utilizzati negli olii di filatura durante i processi di lavorazione delle fibre tessili. Questi sono ancora presenti, almeno in parte, in seguito alle varie lavorazioni che fibre e tessuti subiscono, perciò durante il passaggio in ramosa, in cui si effettuano le lavorazioni di asciugatura e di termofissaggio, in conseguenza delle particolari condizioni di temperatura e umidità, sono trascinati nelle correnti calde che poi fluiscono nei fumi di scarico.

Potendo quindi assimilare le goccioline di olio alle particelle di particolato possiamo utilizzare la trattazione vista finora per valutare la progettazione del sistema di abbattimento.

Le formule utilizzate saranno dunque le stesse e per coerenza possiamo cambiare i pedici dei fattori:

- La portata massica di particolato che entra nel liquido, m_{PM} diventerà m_{alch} , la portata massica di alchilbenzeni che entra nel liquido;
- L_{PM} , la concentrazione di PM in ingresso, diventerà $L_{alch,IN}$, la concentrazione di alchilbenzeni in ingresso;
- Infine, la frazione massica di solidi nell'acqua di ricircolo f_{solids} diventerà la frazione massica di alchilbenzeni presenti nell'acqua di ricircolo f_{alch} .

Le due equazioni interessate dal cambio dei pedici dei fattori diventeranno allora:

$$m_{alch} = \eta \cdot L_{alch,IN} \cdot Q_i$$

$$Q_{bleed} = \frac{m_{alch}}{\rho_{H2O} \cdot f_{alch}}$$

L'applicazione e la struttura rimangono identiche.

3.1 Stima del reintegro dell'acqua di lavaggio.

Ai fini della gestione operativa dello scrubber è importante riuscire a stimare il quantitativo di acqua necessario a garantire il corretto funzionamento del sistema. Come abbiamo visto precedentemente, nel calcolo del quantitativo d'acqua necessario bisogna tenere conto di due termini, uno riguardante l'acqua che opera la rimozione delle particelle inquinanti presenti nel flusso gassoso, e uno riguardante il quantitativo d'acqua che evapora durante il processo e che viene poi espulsa dal sistema attraverso la sezione di uscita e che, se non trattata con i separatori di gocce (demister), finisce in atmosfera.

3.1.1 Simulazione

Per poter svolgere una prima simulazione della valutazione del quantitativo di acqua utile a garantire l'efficienza del processo, non essendo stato possibile raccogliere dati reali presso le aziende visitate ci si è riferiti a una condizione di concentrazione limite in uscita mentre è stato necessario procedere con la simulazione dei dati utili.

Calcolo acqua necessaria per il lavaggio della corrente gassosa

La tipologia di scrubber su cui svolgere la simulazione è lo scrubber Venturi, in quanto rappresenta la tipologia di scrubber più semplice e più studiata, a cui fa riferimento la maggior parte della letteratura disponibile.

Per poter determinare il rendimento del nostro scrubber, non essendo noto, lo ricaviamo ipotizzando una velocità del gas nella camera dello scrubber di circa "45 m/s", che corrisponde al limite inferiore del range tipico di velocità nella gola di uno scrubber Venturi, ottengo quindi una caduta di pressione di circa "10 in w.c.", cioè "25,4 cm c.a." corrispondenti a "2,5 kPa".

Ipotizzando che le goccioline di olio da raccogliere abbiano dimensioni comprese tra 0,5 μm e 1 μm , prendendo un valore intermedio di "0,7 μm ", con il grafico di figura 15, otteniamo un rendimento di abbattimento, in tali condizioni di caduta di pressione e dimensioni delle gocce, del "52%" (figura 24), che, come abbiamo visto, corrisponde a un valore del rendimento intermedio tra il minimo e il massimo atteso nel caso dell'utilizzo degli scrubber a umido nel settore industriale tessile.

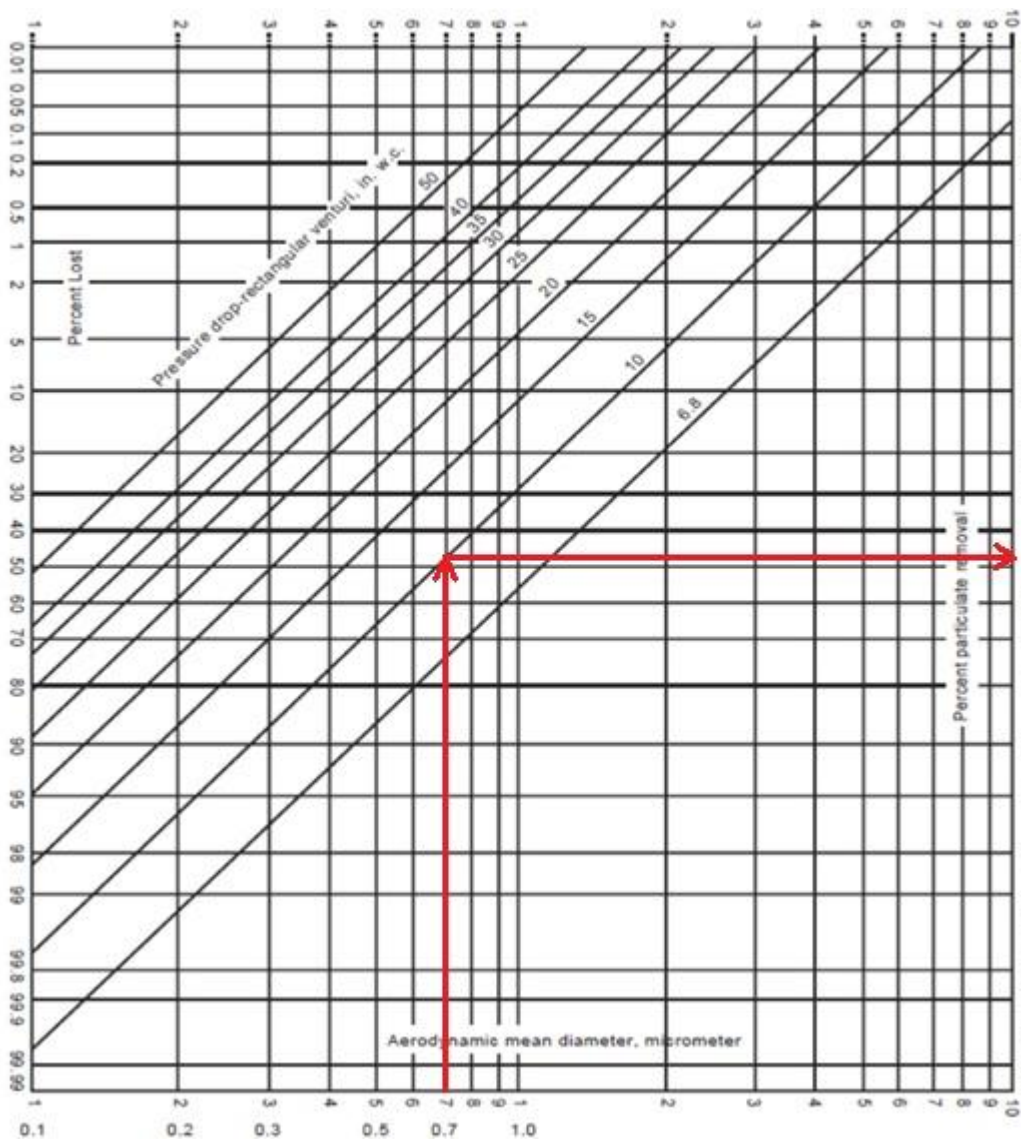


Figura 24 Processo di determinazione del rendimento

Supponiamo una portata da trattare (Q_{IN}) di 30.000 Nm³/h di fumi secchi, a una temperatura di 177 °C, corrispondenti a 350 °F.

Per quanto riguarda le concentrazioni di alchilbenzeni, per effettuare la simulazione è necessario riferirsi ai valori entranti al sistema di abbattimento, come è già stato fatto presente però, tale valore non è facilmente determinabile, sia per mancanza di punti di campionamento, sia perché non sono obbligatori per legge i prelievi in ingresso. Possiamo allora risalire a tale valore prendendo un valore tipico a valle del trattamento di abbattimento, e tenendo conto del rendimento di abbattimento, risalire a quello in entrata.

Supponiamo una concentrazione di alchilbenzeni pari al limite massimo consentito dalla normativa, e quindi un valore pari a 30 mg/Nm^3 , allora il valore di concentrazione in ingresso al sistema risulta essere:

$$L_{alch,IN} = \frac{L_{alch,OUT}}{1 - \eta} = \frac{30 \text{ mg/Nm}^3}{1 - 0,52} = 62,5 \text{ mg/Nm}^3$$

Possiamo così, seguendo le equazioni viste nel capitolo 2, determinare la portata massica di alchilbenzeni rimossi:

$$\dot{m}_{alch} = Q_{IN} \cdot L_{alch,IN} \cdot \eta = 30.000 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 62,5 \text{ mg/Nm}^3 \cdot 52\% = 975000 \text{ mg/h}$$

Ossia:

$$\dot{m}_{alch} = 975 \text{ g/h} = 0,975 \text{ kg/h}$$

Si ipotizza poi la massima frazione massica di alchilbenzeni ammissibile nell'acqua di ricircolo f_{alch} , con un valore pari al 10%.

Con i dati di densità del liquido di lavaggio, semplicemente acqua nel nostro caso, possiamo determinare la portata di spurgo:

$$Q_{bleed} = \frac{\dot{m}_{alch}}{\rho_{H_2O} \cdot f_{alch}} = \frac{0,975 \text{ kg/h}}{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10\%} = 0,00975 \text{ m}^3/\text{h}$$

Che rappresenta un consumo orario di acqua, se si considera di sostituire il liquido nella vasca settimanalmente o mensilmente, considerando giornate lavorative di funzionamento del sistema di 24 ore al giorno, per 5 giorni alla settimana e 20 giorni al mese di lavorazione, otteniamo dei consumi di acqua, per la sola rimozione degli alchilbenzeni, rispettivamente di:

$$Q_{bleed,w} = Q_{bleed} \cdot \Delta t_w = 0,010 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 5 \text{ d/w} = 1,17 \text{ m}^3/\text{w}$$

$$Q_{bleed,m} = Q_{bleed} \cdot \Delta t_m = 0,010 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 20 \text{ d/m} = 4,68 \text{ m}^3/\text{m}$$

Dunque per ottenere una concentrazione uscente di 30 mg/Nm^3 in tali condizioni si dovranno sostituire $1,17 \text{ m}^3$ alla settimana o $4,68 \text{ m}^3$ al mese per il solo lavaggio.

È da notare come la portata di liquido necessaria al "lavaggio" della corrente non sia influenzata da temperatura e dalla pressione, ma solamente dalla concentrazione di alchilbenzeni in ingresso e dalla pulizia e dalla densità del liquido di lavaggio.

Una parte di acqua verrà però persa per evaporazione e trascinata al di fuori del sistema dalla corrente uscente.

Calcolo dell'acqua evaporata durante il processo

L'acqua entrante al sistema di abbattimento possiede, come abbiamo visto, una certa quantità di umidità, perché trasporta con sé parte dell'acqua contenuta nelle stoffe soggette ad asciugatura nelle ramose.

Per effettuare la valutazione del quantitativo di acqua che evapora durante il processo si può utilizzare il grafico psicometrico. Per poter essere utilizzato si suppone che il flusso di aria all'interno della camera sia a pressione atmosferica e che all'uscita si trovi in condizioni di saturazione.

Per entrare nel grafico servono le coordinate di temperatura e di umidità specifica $\omega_{(IN)}$ in ingresso.

$$T_{(IN)} = 177^{\circ}C = 350^{\circ}F$$

$$\omega_{(IN)} = 0.225$$

Individuando il punto sul grafico psicometrico possiamo subito leggere il valore del volume specifico $v_{aria(IN)}$ dell'aria umida a tali coordinate (punto P_{IN}, figura 25), indicato dalle curve verdi del grafico psicometrico:

$$v_{aria(IN)} = 27,5 \text{ ft}^3/\text{lb} = 1,72 \text{ m}^3/\text{kg}$$

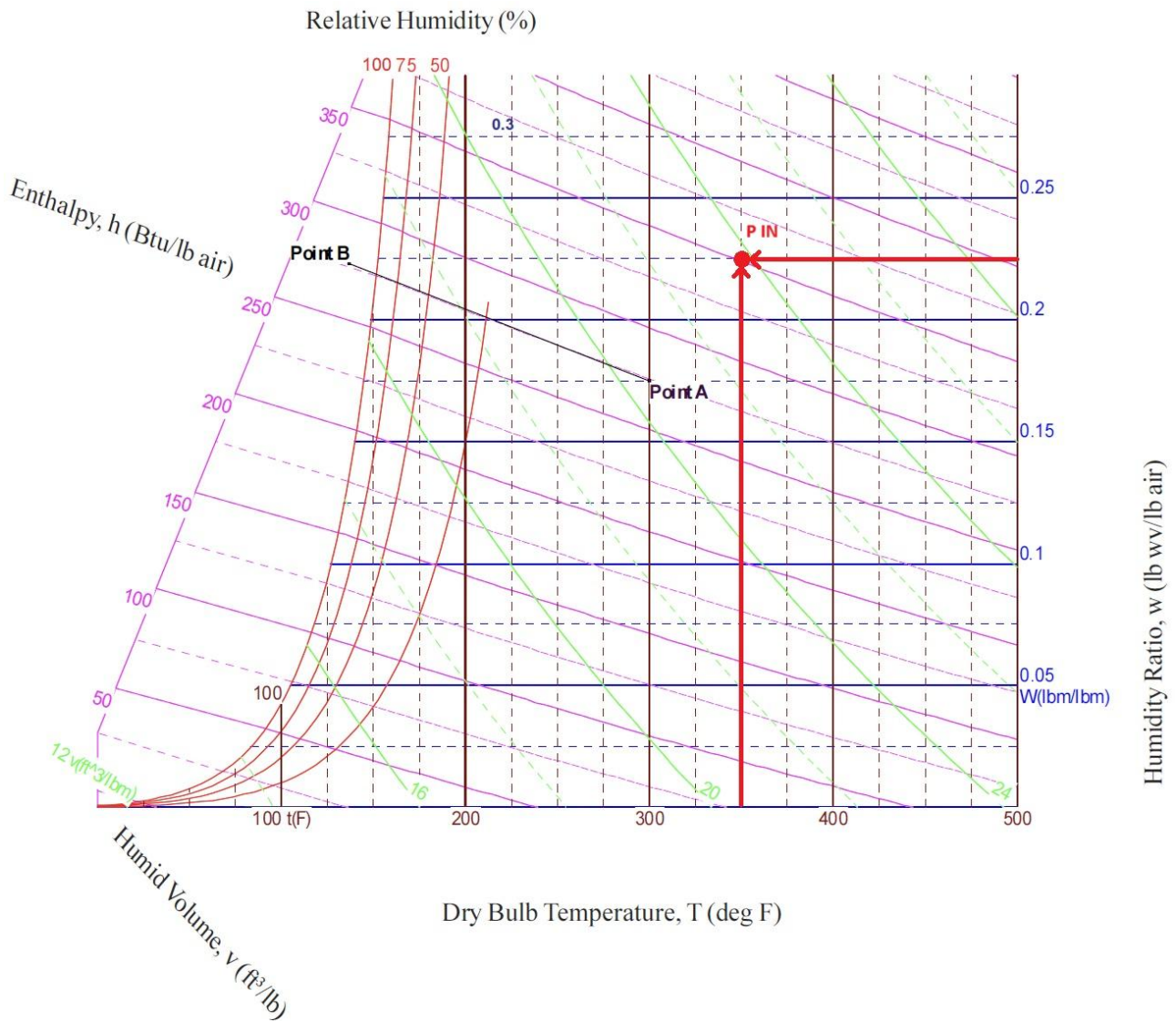


Figura 25 Definizione delle coordinate di ingresso dell'aria nello scrubber

Determinate le condizioni di ingresso dell'aria umida, questa una volta all'interno dello scrubber subirà un raffreddamento, dovuto principalmente all'evaporazione dell'acqua in essa contenuta, e quindi al trasferimento del calore sensibile dall'aria al vapore acqueo come calore latente.

Questo raffreddamento porta con sé una riduzione del volume del gas e l'aumento dell'umidità, sia specifica che relativa.

Per poter procedere alla progettazione si considera che il gas sia a pressione atmosferica e che le condizioni in uscita raggiungano la condizione di saturazione, e perciò il processo è modellato come una trasformazione adiabatica (freccia blu in figura 26), è infatti chiamato anche processo di saturazione adiabatica.

Per poter applicare questa condizione si deve ipotizzare che l'aria si comporti come gas ideale e che conservi quindi l'entalpia totale, l'energia totale e la massa

Sotto queste ipotesi:

- La portata massica di aria secca rimane costante nel sistema,
- La differenza tra la massa di vapore acqueo all'ingresso e all'uscita corrisponde alla massa evaporata nello scrubber.

In uscita l'aria raggiunge quindi le condizioni del punto P_{OUT} in figura 26

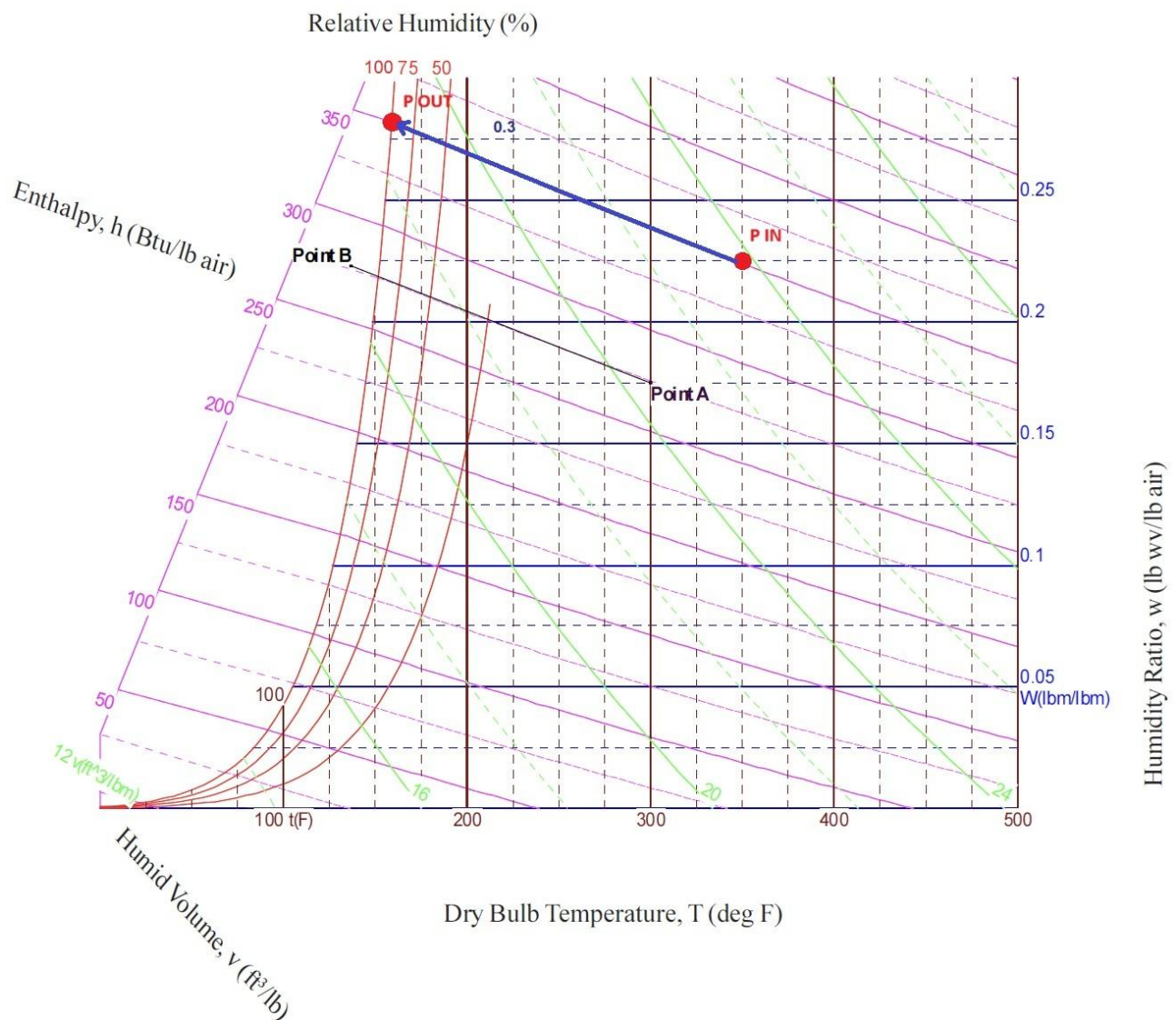


Figura 26 Trasformazione adiabatica

Una volta determinato il punto alle condizioni di uscita si possono leggere i valori in uscita di temperatura $T_{(OUT)}$, umidità specifica $\omega_{(OUT)}$ e volume specifico $v_{aria(OUT)}$ (figura 27).

$$T_{OUT} = 160^{\circ}F = 71^{\circ}C$$

$$\omega_{(OUT)} = 0.280$$

$$v_{aria(OUT)} = 23 \text{ ft}^3/\text{lb} = 1,44 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Attraverso tali dati sarà possibile stimare il quantitativo di acqua evaporata durante il processo.

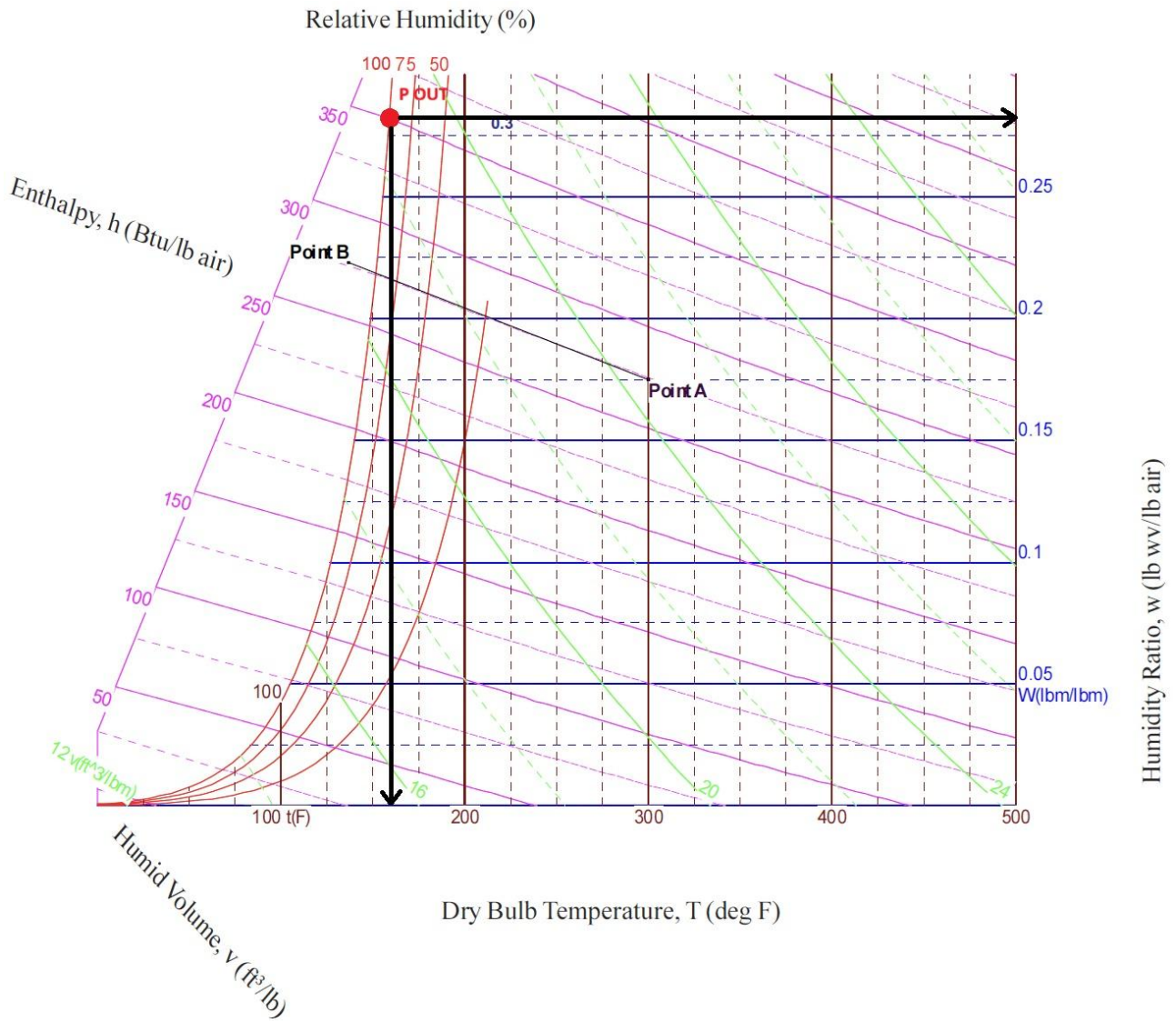


Figura 27 coordinate psicometriche in uscita

Per determinare la quantità di acqua evaporata durante il processo completiamo come segue.

Convertiamo la portata dalle condizioni normali ($T = 0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ }^{\circ}\text{K}$ e $P = 101325\text{ Pa}$) alle condizioni effettive ($T_{(IN)} = 177\text{ }^{\circ}\text{C} = 450,15\text{ }^{\circ}\text{K}$ e $P = 101325\text{ Pa}$), supponendo sempre pressione atmosferica e conservazione della massa. Otteniamo:

$$Q_{fumi,eff,IN} = Q_N \times \frac{(T_{eff} \cdot P_N)}{(T_N \cdot P_{eff})} = 30.000\text{ Nm}^3/\text{h} \times \frac{(450,15\text{ }^{\circ}\text{K} \cdot 101325\text{ Pa})}{(273,15\text{ }^{\circ}\text{K} \cdot 101325\text{ Pa})} = 49.440\text{ m}^3/\text{h}$$

Determiniamo la portata massica di aria e vapore

$$\dot{m}_{air} = \frac{Q_{eff}}{v_{aria,IN}} = \frac{49.440\text{ m}^3/\text{h}}{1,72\text{ m}^3/\text{kg}} = 28.797\text{ kg}/\text{h} = 480\text{ kg}/\text{min} = 1.058\text{ lib}/\text{min}$$

$$\dot{m}_{vap,IN} = \frac{Q_{eff}}{v_{aria,IN}} \cdot \omega_{IN} = \frac{49.440\text{ m}^3/\text{h}}{1,72\text{ m}^3/\text{kg}} \times 0,225 = 6.479\text{ kg}/\text{h} = 108\text{ kg}/\text{min} = 238\text{ lib}/\text{min}$$

Possiamo dunque calcolare la portata volumetrica di fumi uscenti come il prodotto tra la portata massica di aria, costante nel processo, e il volume specifico dei fumi in uscita:

$$Q_{fumi,eff,OUT} = \dot{m}_{air} \cdot v_{aria(OUT)} = 28.797\text{ kg}/\text{h} \cdot 1,44\text{ m}^3/\text{kg} = 41.349\text{ m}^3/\text{h} = 689\text{ m}^3/\text{min}$$

La portata massica di vapore uscente sarà data dal prodotto tra la portata massica di aria, considerata costante, e il rateo di umidità nelle condizioni di uscita.

$$\dot{m}_{vap,OUT} = \dot{m}_{air} \cdot \omega_{(OUT)} = 28.797\text{ kg}/\text{h} \cdot 0,280 = 8.063\text{ kg}/\text{h} = 134\text{ kg}/\text{min} = 58\text{ lib}/\text{min}$$

La massa di acqua evaporata attraverso il processo sarà data dalla differenza tra l'umidità in ingresso e in uscita dal sistema:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{vap,evap} &= \dot{m}_{vap,OUT} - \dot{m}_{vap,IN} = 8.063\text{ kg}/\text{h} - 6.479\text{ kg}/\text{h} = 1.584\text{ kg}/\text{h} = 26\text{ kg}/\text{min} \\ &= 58\text{ lib}/\text{min} \end{aligned}$$

Infine dividendo per la densità del liquido si potrà quindi ottenere la portata volumetrica evaporata:

$$Q_{vap,evap} = \frac{\dot{m}_{vap,evap}}{\rho_{H2O}} = \frac{1.584\text{ kg}/\text{h}}{1000\text{ kg}/\text{m}^3} = 1,58\text{ m}^3/\text{h}$$

Se vogliamo determinare il quantitativo di acqua evaporata, e quindi consumata e da reintegrare, settimanalmente o mensilmente, moltiplichiamo il quantitativo evaporato ogni ora, per il tempo di lavoro settimanale e mensile (24 ore al giorno, per 5 giorni alla settimana e 20 giorni al mese):

$$Q_{vap,evap,w} = Q_{vap,evap} \cdot \Delta t_w = 1,6 \text{ m}^3/h \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 5 \text{ d/w} = 190,06 \text{ m}^3/w$$

$$Q_{vap,evap,m} = Q_{vap,evap} \cdot \Delta t_m = 1,6 \text{ m}^3/h \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 20 \text{ d/m} = 760,25 \text{ m}^3/m$$

L'acqua totale necessaria al sistema, tra rimozione e evaporazione sarà data dal totale dei due termini:

$$Q_{acq,tot} = Q_{vap,evap} + Q_{bleed} = 1,58 \text{ m}^3/h + 0,010 \text{ m}^3/h = 1,59 \text{ m}^3/h$$

Considerando gli intervalli di tempo di lavoro giornaliero, settimanale e mensile, otteniamo:

$$Q_{wat,tot,d} = Q_{vap,evap} \cdot \Delta t_d = 1,59 \text{ m}^3/h \cdot 24 \text{ h/d} = 38,25 \text{ m}^3/d$$

$$Q_{wat,tot,w} = Q_{vap,evap} \cdot \Delta t_w = 1,59 \text{ m}^3/h \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 5 \text{ d/w} = 191,23 \text{ m}^3/w$$

$$Q_{wat,tot,m} = Q_{vap,evap} \cdot \Delta t_m = 1,59 \text{ m}^3/h \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 20 \text{ d/m} = 764,93 \text{ m}^3/m$$

Si nota come nel computo totale, il consumo di acqua sia influenzato quasi esclusivamente dal processo di evaporazione, mentre è marginale il consumo dovuto alla rimozione, poiché l'acqua si sporca lentamente e poiché è ammessa una elevata concentrazione di oli (alchilbenzeni) nella vasca.

Considerate le quantità d'acqua evaporate e che queste sarebbero trascinate in atmosfera senza dispositivi che trattengano l'acqua in uscita, ricoprono allora un ruolo fondamentale i sistemi ferma-gocce (chiamati anche demister) e la loro progettazione. Le dimensioni tipiche delle cisterne sono infatti di qualche m^3 , e come abbiamo visto questi volumi sarebbero esauriti in poco tempo. I dispositivi ferma-gocce infatti permettono al vapore di ricondensare, ci troviamo infatti in una condizione al limite (sulla curva rossa che indica il grado di umidità relativa al 100%) per il quale in uscita dal sistema, con anche un minimo calo della temperatura, il vapore ricondensa immediatamente, potendo quindi essere rimosso dal separatore di nebbia e non essere liberato in atmosfera.

Il ruolo di questa operazione è duplice, in primis evita che, con il vapore, vengano trascinate in atmosfera anche delle gocce di alchilbenzeni, poi può portare a evitare un consumo

eccessivo di acqua se il vapore una volta fermato può essere ricondotto alla cisterna contenente il liquido di lavaggio.

Se nella valutazione ipotizziamo la presenza di un separatore di nebbie, considerando un valore di efficienza di trattenuta delle particelle liquide pari al 99,5%, otteniamo che la quantità di vapore che sfugge al sistema cala drasticamente fino al valore di:

$$Q_{vap,emess} = 0,0079 \text{ m}^3/h$$

che rappresenta lo 0,5% del quantitativo prima calcolato.

Il quantitativo totale di acqua totale necessaria al sistema, tra rimozione e evaporazione sarà allora

$$Q'_{acq,tot} = 0,0177 \text{ m}^3/h$$

Tale quantitativo si rifletterebbe su un consumo di acqua giornaliero, settimanale e mensile di:

$$Q'_{wat,tot,d} = 0,42 \text{ m}^3/d$$

$$Q'_{wat,tot,w} = 2,12 \text{ m}^3/w$$

$$Q'_{wat,tot,m} = 8,48 \text{ m}^3/m$$

Considerando i quantitativi, la frazione ricircolata nel sistema che partecipa attivamente alla rimozione rappresenta il 55,18%, mentre il quantitativo che viene emesso in atmosfera e dunque perso rappresenta il 44,82%.

Ipotizzando di avere un serbatoio di 2 m³ a servizio dell'impianto, questo vorrebbe dire che la manutenzione della vasca e la sostituzione dell'acqua, con relativa pulizia dovrebbe essere effettuata circa ogni 5 giorni, quindi una volta a settimana considerando che è il quantitativo di tempo che corrisponde a una settimana lavorativa.

3.1.2 Incidenza della variazione dei fattori principali nel calcolo svolto

Si possono poi effettuare nuovamente i calcoli con differenti valori per le differenti variabili del processo.

Operando con rendimenti di abbattimento differenti dello scrubber, considerando un abbattimento del 40% prima e del 70% poi, otteniamo i seguenti quantitativi di acqua utili al processo:

Tabella 5

η	Q_{bleed}	$Q_{vap, evap}$	$Q_{acq, tot}$	$Q_{vap, emess}$	$Q'_{acq, tot, necess}$	% Q_{bleed}	% $Q'_{vap, emss}$
52%	0,00975 m3/h	1,584 m3/h	1,594 m3/h	0,0079 m3/h	0,0177 m3/h	55,18%	44,82%
40%	0,00600 m3/h	1,584 m3/h	1,590 m3/h	0,0079 m3/h	0,0139 m3/h	43,11%	56,89%
70%	0,02100 m3/h	1,584 m3/h	1,605 m3/h	0,0079 m3/h	0,0289 m3/h	72,62%	27,38%

In particolare le colonne della tabella sopra indicano rispettivamente:

- La colonna Q_{bleed} rappresenta la quantità di acqua necessaria al processo di rimozione degli oli dalla colonna d'aria;
- La colonna $Q_{vap, evap}$ rappresenta la quantità di acqua che evapora durante il processo;
- La colonna $Q_{acq, tot}$ rappresenta la somma dei termini precedenti;
- La colonna $Q_{vap, emess}$ rappresenta la quantità di acqua evaporata e che attraversa il separatore di nebbie, per finire poi emessa in atmosfera;
- La colonna $Q'_{acq, tot, necess}$ rappresenta la quantità finale di acqua totale, necessaria al funzionamento del sistema, ridotto rispetto alla colonna $Q_{acq, tot}$, perché tiene conto del quantitativo fermato dal demister;
- E infine, le ultime due colonne rappresentano in percentuale quanto incidono sui consumi finali le voci Q_{bleed} e $Q_{vap, emess}$.

Da cui si può notare come un'efficienza di abbattimento maggiore richieda maggiori consumi di acqua a causa del maggior sporco della stessa, infatti incide sulla voce Q_{bleed} , mentre rimangono invariate le altre voci. Nel consumo totale finale, successivo al passaggio nel ferma-gocce, il peso del consumo d'acqua Q_{bleed} sale invece al 72,62%.

Il quantitativo d'acqua Q_{bleed} è direttamente proporzionale al rendimento di abbattimento dello scrubber.

Tuttavia, il quantitativo totale di acqua da reintegrare è poco influenzato dall'efficienza richiesta (a meno di non voler operare con efficienze elevatissime e probabilmente

irraggiungibili per la rimozione degli alchilbenzeni) in quanto, per buona parte dipende dal quantitativo evaporato (a meno di quello trattenuto dal demister).

Se invece decidiamo di operare con livelli differenti di frazione massica di alchilbenzeni nell'acqua di ricircolo, otteniamo per valori di f_{alch} del 5% e del 20% i seguenti risultati:

Tabella 6

f_{alch}	Q_{bleed}	$Q_{vap, evap}$	$Q_{acq, tot}$	$Q_{vap, emess}$	$Q'_{acq, tot}$	% Q_{bleed}	% $Q'_{vap, emss}$
10%	0,00975 m3/h	1,584 m3/h	1,594 m3/h	0,0079 m3/h	0,0177 m3/h	55,18%	44,82%
5%	0,01950 m3/h	1,584 m3/h	1,603 m3/h	0,0079 m3/h	0,0274 m3/h	71,12%	28,88%
20%	0,00488 m3/h	1,584 m3/h	1,589 m3/h	0,0079 m3/h	0,0128 m3/h	38,10%	61,90%

Vediamo che anche la frazione massica presente nell'acqua di ricircolo ha un impatto sulla Q_{bleed} , mentre non influisce sul processo di evaporazione.

L'impatto è inversamente proporzionale, infatti al crescere della f_{alch} diminuisce la Q_{bleed} perché accettiamo di utilizzare un'acqua con contenuti massici maggiori e che perciò impiegherà più tempo a raggiungere tale limite, con conseguente minore necessità della frequenza di ricambio.

La Q_{bleed} inoltre è direttamente proporzionale alla portata e alla concentrazione della colonna d'aria trattata. Un loro aumento comporta quindi un aumento dell'acqua necessaria a svolgere il procedimento.

Sulla quantità di acqua evaporata durante il processo invece, agiscono come fattori influenzanti la temperatura dell'aria in ingresso e la quantità di umidità specifica. La relazione non è lineare per entrambi i fattori, ma dipende dalle curve del grafico psicometrico.

In generale, rispetto al caso ipotizzato, temperature in ingresso più basse comportano temperature più basse in uscita, ma con una dipendenza che varia rispetto all'inclinazione della curva dell'umidità relativa al 100%. Dove la curva sarà più pendente la differenza riguardo la temperatura di uscita sarà meno evidente rispetto a dove la curva ha meno pendenza. Per quanto riguarda l'evaporazione, una temperatura inferiore consente di

individuare un punto più a sinistra nel grafico e perciò per raggiungere la curva di umidità relativa del 100% dovrà essere compiuto un lavoro minore e perciò la differenza di umidità tra ingresso e uscita sarà minore. Viceversa, all'aumentare della temperatura, aumenterà il percorso lungo la retta isoentalpica, quindi il lavoro per raggiungere la curva di umidità relativa del 100%, e la differenza di umidità tra ingresso e uscita, indicando una maggiore evaporazione.

Per quanto riguarda l'umidità specifica, per determinare l'evaporazione finale è importante la differenza tra l'umidità specifica entrante e uscente. Variare il valore entrante dell'umidità specifica significa seguire una differente retta ad entalpia costante nel percorso di raffreddamento, essendo sostanzialmente parallele tra loro, la differenza tra ω_{IN} e ω_{OUT} resterà costante indicando che, a parità di temperatura, l'evaporazione è indipendente dalla ω_{IN} .

Per quanto riguarda il quantitativo di acqua evaporato ed emesso, questo come visto, è un quantitativo che si ottiene successivamente al passaggio attraverso un separatore di nebbie. Diventa allora fondamentale capire l'impatto dell'efficienza del separatore di nebbia, supponendo di variare il valore di efficienza del 99,5% inizialmente supposto, otteniamo come valori quelli nella seguente tabella:

Tabella 7

$\eta_{demister}$	Q_{bleed}	$Q_{vap, evap}$	$Q_{acq, tot}$	$Q_{vap, emess}$	$Q'_{acq, tot}$	% Q_{bleed}	% $Q'_{vap, emss}$
95,00%	0,00975 m3/h	1,584 m3/h	1,594 m3/h	0,0792 m3/h	0,0889 m3/h	55,18%	44,82%
98,50%	0,00975 m3/h	1,584 m3/h	1,594 m3/h	0,0335 m3/h	0,0433 m3/h	10,96%	89,04%
99,50%	0,00975 m3/h	1,584 m3/h	1,594 m3/h	0,0079 m3/h	0,0177 m3/h	29,10%	70,90%
99,90%	0,00975 m3/h	1,584 m3/h	1,594 m3/h	0,0016 m3/h	0,0113 m3/h	86,03%	13,97%

Si nota ancora una volta come non ci sia impatto sulla Q_{bleed} , essendo questo un quantitativo semplicemente ricircolato.

All'aumentare dell'efficienza diminuisce la portata di vapore emesso tendendo a 0 all'avvicinarsi del 100% di efficienza.

3.1.3 Casi reali di due aziende del settore tessile

Quanto visto fino ad ora può essere ricollegato a due casi reali di aziende operanti nel settore tessile, che sfruttano il lavaggio a umido per abbattere il contenuto di alchilbenzeni dai fumi esausti delle lavorazioni termiche dei tessuti.

Chiameremo le due aziende “azienda A” e “azienda B”.

Azienda A

Sappiamo che l'azienda A utilizza in contemporanea tre ramose, per un totale di 30.000 Nm³/h di fumi secchi.

Le rilevazioni delle concentrazioni di alchilbenzeni all'uscita del camino in atmosfera in differenti periodi sono:

$L_{alch,out}$
7,4 mg/Nm ³
6,6 mg/Nm ³
6,1 mg/Nm ³
5,4 mg/Nm ³

Il cui valore medio risulta quindi essere:

$$L_{alch,out} = 6,38 \text{ mg/Nm}^3$$

Sappiamo inoltre che l'azienda utilizza inoltre un separatore di nebbie con un'efficienza del 98,5%.

Ipotizzando i restanti dati, utilizzando i valori utilizzati nella simulazione precedente, e in particolare quelli di:

- rendimento dello scrubber: 52%
- frazione massica di alchilbenzeni nell'acqua di ricircolo (f_{alch}): 10%
- temperatura in ingresso: 177 °C
- umidità specifica in ingresso: 0,225

otteniamo i seguenti dati finali riguardanti il consumo d'acqua:

$$Q_{bleed} = 0,0021 \text{ m}^3/h$$

$$Q_{vap,evap} = 1,5839 \text{ m}^3/h$$

$$Q_{vap,evap,emess} = 0,0238 \text{ m}^3/h$$

Per un totale di acqua da reintegrare, tenuto conto di quella trattenuta dal separatore di gocce, pari a:

$$Q_{acq,tot} = 0,0258 \text{ m}^3/h$$

Con tali risultati, ipotizzando un serbatoio per l'acqua di ricambio di 2 m³, il ricambio dovrà quindi essere effettuato con una frequenza di circa una volta ogni 3 giorni lavorativi.

Azienda B

L'azienda B ha una produzione variabile nel tempo e sono noti i dati di concentrazione uscente e di portata massica uscente di alchilbenzeni:

L_{alch,out}	ṁ_{Alch}
5,6 mg/Nm ³	100,2 g/h
5,8 mg/Nm ³	129,7 g/h
6,9 mg/Nm ³	103,5 g/h
6,1 mg/Nm ³	94,6 g/h
4,9 mg/Nm ³	73,5 g/h
3 mg/Nm ³	63,7 g/h
1,4 mg/Nm ³	18,6 g/h
1,1 mg/Nm ³	23,9 g/h

Dal quale si possono ottenere i diversi dati di portata, con risultati:

Q
17893 Nm ³ /h
22362 Nm ³ /h
15000 Nm ³ /h
15508 Nm ³ /h
15000 Nm ³ /h
21233 Nm ³ /h
13286 Nm ³ /h
21727 Nm ³ /h

I valori medi di concentrazione di alchilbenzeni emessi in atmosfera e il valore medio di portata sarà allora:

$$L_{alch,out} = 4,35 \text{ mg/Nm}^3$$

$$Q = 1800 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Ipotizzando i restanti dati, utilizzando i valori utilizzati nella simulazione precedente, e in particolare quelli di:

- rendimento dello scrubber: 52%
- frazione massica di alchilbenzeni nell'acqua di ricircolo (f_{alch}): 10%
- temperatura in ingresso: 177 °C
- umidità specifica in ingresso: 0,225
- efficienza separatore di nebbie: 99,5%

otteniamo i seguenti dati finali riguardanti il consumo d'acqua:

$$Q_{bleed} = 0,00085 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{vap,evap} = 0,950 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{vap,evap,emess} = 0,00475 \text{ m}^3/\text{h}$$

Per un totale di acqua da reintegrare, tenuto conto di quella trattenuta dal separatore di gocce, pari a:

$$Q_{acq,tot} = 0,0056 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con tali risultati, ipotizzando un serbatoio per l'acqua di ricambio di 2 m³, il ricambio potrà essere effettuato con una frequenza di circa una volta ogni 15 giorni lavorativi, quindi una volta ogni tre settimane lavorative circa.

I dati riguardante le due aziende evidenziano come le portate e le concentrazioni uscenti, e quindi di conseguenza entranti, a parità di altre condizioni, influiscano linearmente sul consumo di acqua, in particolare mostrano come si riducano i valori riferiti alla Q_{bleed} , evidenziando come concentrazioni più basse sporchino meno l'acqua di lavaggio.

Un altro dato evidenziato è come l'efficienza del separatore di nebbie influisca sul quantitativo finale di acqua emessa in atmosfera, comportando risparmi con differenze di alcuni ordini di grandezza, pur rimanendo quantitativi preponderanti rispetto a quelli riferiti alla Q_{bleed} .

4. Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo, quello di analizzare e valutare l'efficacia dei sistemi di abbattimento delle emissioni gassose, generate dai trattamenti termici nel settore tessile, in particolare in riferimento alla rimozione degli alchilbenzeni presenti nei fumi in uscita dalle operazioni di asciugatura e termofissaggio, operate con l'ausilio delle rameuse.

L'area di studio ha compreso il contesto produttivo del distretto tessile di Prato, caratterizzato da una forte frammentazione aziendale, elevata variabilità delle lavorazioni caratterizzate da operatività in conto terzi. La particolarità di ogni azienda e di ogni lavorazione svolta rende quindi difficile uniformare i tentativi di trattazione e di raccolta dati, alla luce del fatto che lo stesso sistema di abbattimento per fumi esausti può essere progettato, sviluppato e condotto in molteplici tipologie operative.

La problematica affrontata nasce dalla necessità di garantire il rispetto dei limiti emissivi previsti dalla normativa, in un quadro produttivo in cui la composizione dei tessuti trattati e degli ensimaggi utilizzati risulta spesso non pienamente tracciabile. Tale variabilità rende complessa la caratterizzazione e, di conseguenza, il dimensionamento ottimale dei sistemi di abbattimento.

Si è quindi voluto studiare nello specifico la tecnica di abbattimento tramite scrubber a umido, che rappresenta la soluzione tecnologica più diffusa tra le aziende del polo. L'obiettivo è stato quello di capire se questa tecnologia rappresenti una valida soluzione per contenere le emissioni, coerentemente con quanto affermato nel TXT BREF, Reference Document for the Textiles Industry, che indica le migliori tecniche disponibili per il settore tessile (BAT – Best Available Techniques). Contemporaneamente si è cercato di comprendere come i principali parametri progettuali e gestionali, e come il consumo idrico, influenzino le prestazioni del sistema e la sua gestione operativa.

Il quadro normativo evidenzia come i limiti emissivi previsti siano coerenti con gli intervalli di prestazione indicati nelle BAT del settore. L'assenza di indicazioni specifiche riguardo la specifica tecnologica da adottare lascia alle aziende libertà progettuale riguardo la tecnologia da installare, con l'unica prescrizione del rispetto dei valori limite emessi.

Le BAT assumono dunque un ruolo centrale come riferimento tecnico per la scelta della tecnologia e per la valutazione in sede autorizzativa. Tuttavia la particolare configurazione

del comparto tessile, caratterizzato da lavorazioni in conto terzi con provenienza eterogenea, porta a incertezza strutturale nella caratterizzazione delle emissioni e la variabilità nella composizione degli ensimaggi con la difficoltà nel tracciamento della loro formulazione, ciò rende complesso poter sfruttare tali dati nella progettazione dell'impianto di abbattimento.

Per superare tale criticità sarebbe necessario quindi il rafforzamento della tracciabilità a monte delle sostanze utilizzate nei vari processi, pur consapevoli della difficoltà di attuazione in un quadro lavorativo variegato come quello pratense.

In seguito all'analisi effettuata si è evidenziato come gli alchilbenzeni presenti nei fumi di scarico provenienti dalle rameuse non si comportino prevalentemente come composti organici volatili in fase gassosa, ma come gocce finissime di natura oleosa, disperse nel flusso aeriforme. Tale comportamento consente di assimilare il fenomeno di rimozione a quello della cattura del particolato, rendendo applicabili modelli teorici tipici dei sistemi di abbattimento meccanico.

Secondo tale interpretazione, lo scrubber a umido appare essere una tecnologia efficace e coerente, che consente l'intercettazione delle goccioline attraverso fenomeni di impatto inerziale e intercettazione. L'efficienza complessiva del sistema dipende in maniera significativa da vari parametri progettuali, in particolare dal rapporto liquido/gas (L/G), la velocità del flusso nella camera di rimozione, la caduta di pressione e la distribuzione granulometrica delle particelle da rimuovere.

È emerso come l'incremento del rapporto L/G e della velocità relativa tra le fasi migliori l'efficienza di raccolta, ma allo stesso tempo generi un aumento dei consumi energetici e delle perdite di carico, rendendo necessario un compromesso progettuale tra prestazioni ambientali e sostenibilità economica. Contemporaneamente il controllo del trascinamento delle gocce, tramite appositi sistemi ferma-gocce, ricopre un ruolo fondamentale, sia per evitare il rilascio in atmosfera di frazioni liquide contenenti l'inquinante precedentemente raccolto, sia per effettuare una gestione ottimale dei consumi idrici durante il processo.

La difficoltà nel raccogliere dati reali dei vari casi aziendali non ha permesso di svolgere uno studio approfondito su casi reali, tuttavia i pochi dati disponibili hanno mostrato che, pur in assenza di superamenti sistematici dei limiti normativi, le prestazioni effettive degli impianti possono variare sensibilmente in funzione della manutenzione, della frequenza di

sostituzione del liquido di lavaggio e della presenza di eventuali stadi aggiuntivi (ad esempio sistemi di abbattimento a coalescenza).

Nel complesso, i risultati sembrano indicare che lo scrubber a umido rappresenti una soluzione tecnicamente idonea e coerente con le indicazioni delle BAT di settore per la riduzione delle emissioni di composti organici derivanti da trattamenti termici dei prodotti tessili, purché adeguatamente dimensionati e gestiti in funzione delle specifiche condizioni di esercizio.

Le realtà aziendali analizzate mostrano eterogeneità impiantistica, legate a differenze nelle portate trattate, sia per le differenti specificità produttive. Sono presenti soluzioni a singolo stadio (principalmente scrubber a corpi di riempimento o a piatti) e soluzioni multistadio che integrano sistemi di abbattimento a coalescenza o separatori di nebbie ad alta efficienza. Ciò conferma come sia difficile generalizzare un discorso riguardante il dimensionamento e come i sistemi debbano essere calibrati in funzione delle condizioni effettive di esercizio.

Dal punto di vista della gestione operativa l'operazione principale svolta dalle aziende è la sostituzione del liquido di lavaggio, con relativa pulizia della vasca di raccolta e manutenzione. Tale operazione è svolta con diverse frequenze a seconda delle varie necessità e varia da frequenze settimanali a frequenze di pulizia mensili a seconda dell'azienda. Questo aspetto ricopre un ruolo rilevante, in quanto la teoria evidenzia che l'aumento della concentrazione di inquinante nel liquido di lavaggio ricircolato, comporti una riduzione dell'efficienza di cattura delle sostanze inquinanti dalla colonna d'aria. Va tenuto poi conto del fatto che non sempre si utilizza semplicemente solo acqua come liquido di lavaggio, ma spesso questa è addizionata di composti che possono migliorare l'efficienza di raccolta, pur alterando i meccanismi e quindi modificando i risultati ottenuti in questo studio.

I principali punti di forza della tecnologia scrubber a umido sono la relativa semplicità costruttiva, i costi di investimento contenuti rispetto ad altre tecnologie (come l'ossidazione termica) e nella capacità di trattare contemporaneamente anche altre frazioni presenti nel flusso trattato (come ad esempio la rimozione dei pelucchi trascinati dalle correnti in seguito all'asciugatura del tessuto). Ciò rappresenta un vantaggio vista la struttura produttiva del distretto tessile pratese, costituito principalmente da imprese di dimensioni medio-piccole.

Un'ulteriore criticità è rappresentata dalla gestione del refluo liquido, che comporta oneri ambientali ed economici legati allo smaltimento o al trattamento e che, pur non essendo strettamente oggetto dello studio sono da tenere in considerazione in un'ottica più ampia di gestione del sistema di abbattimento e della sostenibilità economica e ambientale globale del processo. Lo scrubber rappresenta quindi una soluzione tecnicamente valida ma non priva di limiti che devono essere valutati attentamente in un'ottica sistemica che consideri anche gli impatti indiretti.

Il metodo, utilizzato nella simulazione effettuata, ha consentito di stimare le quantità volumetriche di liquido di lavaggio necessarie al garantire l'operatività del sistema al variare dei vari parametri operativi. Tale simulazione si pone quindi come strumento utile per poter valutare la corretta operatività del sistema e stimare i tempi di ricambio e pulizia della cisterna contenente il liquido di lavaggio degli scrubber a umido.

Per poter svolgere e affinare tale simulazione però sono necessari vari dati operativi e progettuali, come le concentrazioni entranti, l'efficienza di rimozione stimata, la quantità di oli ammessi nell'acqua ricircolata e utilizzata per il lavaggio e le dimensioni dei serbatoi contenenti il liquido da ricircolare. Diventa importante allora l'accesso ai vari dati, non sempre facilmente determinabili e per i quali sarebbe necessario effettuare misurazioni e campionamenti appositi.

Nell'effettuare lo studio, alcune difficoltà non hanno consentito di approfondire alcuni aspetti e limitano i risultati ottenuti.

In primo luogo, l'analisi si è basata quasi esclusivamente su dati di letteratura, documentazione tecnica e osservazioni impiantistiche, senza la possibilità di poter svolgere campagne sperimentali dirette di campionamento e di caratterizzazione delle emissioni e dei flussi entranti al sistema, rendendo incerti i risultati ottenuti nelle simulazioni e nelle stime delle efficienze di abbattimento.

Un ulteriore limite è rappresentato dalla forte variabilità dei diversi lotti produttivi, ognuna caratterizzata da differenze compositive degli ensimaggi, rendendo complessa una modellizzazione generale delle concentrazioni in ingresso agli impianti di abbattimento.

Limite che è intrinseco della filiera tessile pratense e quindi difficilmente eliminabile senza modifiche strutturali del comparto.

Infine un limite è rappresentato dalla forte variabilità della tecnologia di abbattimento utilizzata, infatti, se è vero che le caratteristiche di un impianto scrubber sono generalizzabili, le differenze tecnologiche tra le varie tipologie possono portare a importanti differenze nell'efficacia dell'abbattimento finale. Inoltre, mentre la letteratura propone un ampio studio in particolare della tipologia "scrubber Venturi", si è visto come nelle aziende visitate le tipologie utilizzate siano principalmente lo "scrubber a corpi di riempimento" e lo "scrubber a piatti", che presentano peculiarità proprie del quale sarebbe utile tener conto.

Tali limiti suggeriscono come soluzione uno studio più approfondito e specifico dei vari casi, con studi mirati alla determinazione della distribuzione dimensionale delle goccioline oleose presenti nella colonna di fumi esausti, e delle reali dinamiche di raccolta in presenza di differenti tipologie tecnologiche di scrubber e di addizionamento di ulteriori sostanze al liquido di lavaggio per capire le reali efficienze dei sistemi di raccolta e della loro gestione, al fine di poter calibrare in maniera più accurata i modelli previsionali.

In conclusione, il lavoro svolto evidenzia come lo scrubber a umido costituisca una tecnologia coerente e tecnicamente idonea per la rimozione degli alchilbenzeni dai fumi esausti provenienti dai trattamenti termici delle industrie tessili, purché adeguatamente dimensionato e correttamente gestito. L'efficacia dell'abbattimento non dipende esclusivamente dalla scelta tecnologica, ma dall'integrazione tra progettazione, manutenzione, controllo operativo e conoscenza delle caratteristiche del flusso da trattare.

Bibliografia

- ARPA Piemonte. (n.d.). ANALISI DEL CICLO PRODUTTIVO DEL SETTORE TESSILE LANIERO. *ANALISI DEL CICLO PRODUTTIVO DEL SETTORE TESSILE LANIERO*.
- Don W. Green, M. Z. (2018). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (9th ed.).
- EPA. (2002). *EPA AIR POLLUTION CONTROL COST MANUAL* (6th ed.).
- EPA. (2025, 09 08). *Technical Overview of Volatile Organic Compounds*. Tratto il giorno 10 22, 2025 da Epa.gov: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>
- European Commission. (2022, 12 20). *COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2022/2508*. Tratto il giorno 10 22, 2025 da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32022D2508&qid=1671517820694>
- European Commission. (2023). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Textiles Industry.
- Fkv. (n.d.). *Composti Organici Semivolatili (SVOC)*. Tratto il giorno 10 22, 2025 da <https://fkv.it/strumentazione/laboratorio/glossario/composti-organici-semi-volatili-svoc/>
- Forain. (n.d.). *Filtri separatori*. Tratto da <https://forain.it/products/filtrazione-separazione/filtri-separatori/#:~:text=applicazioni,tempi%20di%20pulizia%20e%20manutenzione>.
- Gev-emicode. (n.d.). *Domande e risposte*. Tratto da Emicode.com: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.emicode.com/wp-content/uploads/pdfs/30_Questions_and_Answers_it.pdf
- Outoffashion. (2023, 03 14). *Cosa succederebbe se potessimo immaginare il futuro per orientare le scelte nel presente?* (P. Baronio, A cura di) Tratto il giorno 10 21, 2025 da Outoffashion: <https://outoffashion.connectingcultures.it/il-distretto-di-prato-sostenibilita-da-oltre-un-secolo/>
- Pleva. (n.d.). Tratto da <https://www.pleva.org/en/stenter-frame.html>
- Prisma. (2025, 06 02). *Prato Textile District - Chi siamo*. Tratto il giorno 10 21, 2025 da Prisma - PRato Industrial SMart Accelerator: <https://www.prismaprato.it/it/Prato->

Textile-District/pagina8138.html#:~:text=District%20%2D%20Chi%20siamo-
,Prato%20Textile%20District%20%2D%20Chi%20siamo,economica%20e%20social
e%20del%20territorio

Regione Toscana. (1987, 12). Guida tecnica: Emissioni in atmosfera da processi di asciugatura tessuti.

Regione Toscana. (2024, 12). Piano regionale per la qualità dell'aria ambiente (P.R.Q.A.), Parte I - Allegato 5.

Richards, J. R. (2000). *Control of Particulate Matter Emissions - Student Manual - APTI Course 413* (3rd ed.).

Santexrimar. (n.d.). Tratto da <https://www.santexrimar.com/brands/santex/machinery/santaframe/>

Sapere.it. (n.d.). *Lana*. Tratto il giorno 10 21, 2025 da Sapere.it: <https://www.sapere.it/enciclopedia/lana.html>

Texcene. (2018, 06 25). *Cosa fa il finissaggio tessuti*. Tratto il giorno 10 21, 2025 da Texcene.com: <https://www.texcene.com/cosa-fa-finissaggio-tessuti/>

Texcene. (2021, 04 30). Tratto il giorno 10 21, 2025 da <https://www.texcene.com/come-vengono-asciugati-i-tessuti-nel-finissaggio/>

Texcene. (2023, 08 31). Tratto il giorno 10 21, 2025 da <https://www.texcene.com/effetto-del-calore-sui-tessuti-con-la-rameuse/>

Ventilazione. (n.d.). *Srubber*. Tratto da <https://www.ventilazioneindustriale.it/it/prodotti/scrubber/>

