

Nuove metodologie di testing a supporto dello sviluppo di oli lubrificanti “energy-saving” per applicazioni industriali

Davide Massocchi*, Marco Lattuada†, Giulio Assanelli†, Paolo Pennacchi, Steven Chatterton

Alla luce degli obiettivi che la comunità internazionale si sta ponendo in termini di Sostenibilità futura, il miglioramento dell’efficienza energetica e la riduzione delle emissioni di CO₂ sono attualmente diventati, nel comparto industriale, i driver fondamentali che spingono l’attività di ricerca e sviluppo verso l’ottimizzazione di tutti gli elementi delle macchine rotanti, con speciale enfasi sui sistemi lubrificanti.

Per affrontare le numerose e impegnative sfide del futuro Eni e PoliMI hanno deciso di intraprendere un percorso di crescita comune del proprio know how tramite un accordo di dottorato congiunto sul tema specifico delle Metodologie Tribologiche a servizio dello sviluppo dei lubrificanti, soprattutto in funzione del rapporto formulazione sistemi lubrificanti/prestazioni finali.

La presente memoria riporta gli step che verranno affrontati nell’attività di ricerca, che ha lo scopo di mettere a punto nuove metodologie di testing, tribologiche e test rig, a supporto dello sviluppo di nuovi lubrificanti con caratteristiche “energy saving” [1] (cioè con caratteristiche di risparmio energetico) utilizzati in applicazioni industriali.

In una prima fase l’attenzione sarà posta sull’acquisizione dei principali aspetti formulativi di un lubrificante e i corrispondenti test prestazionali e tribologici. Una seconda fase prevederà l’ottimizzazione dell’impiego delle apparecchiature tribologiche individuando le modalità di testing e le tipologie di contatto che siano quanto più predittive di applicazioni reali o meglio discriminino le prestazioni di una serie di lubrificanti. Infine, le caratteristiche “energy saving” dei lubrificanti verranno testate su un banco prova (in fase di progettazione presso il Dipartimento di Meccanica) e opportunamente validate tramite analisi dei dati con un modello TEHD. La parte iniziale di questa memoria presenta una breve descrizione dell’argomento; nella seconda, il focus è incentrato sul laboratorio tribologico di Eni ove vengono mostrate e sinteticamente descritte le principali apparecchiature impiegate; nell’ultimo capitolo, sono riportate le attività in fase di svolgimento presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano e il Centro Ricerche Eni di Bolgiano.

Keywords: prove tribologiche, energy saving, banco prova, spessore film olio

1. Introduzione

La crescente attenzione verso le tematiche di riduzione delle emissioni di CO₂ e il progressivo miglioramento dell’efficienza energetica nel settore industriale, sta spingendo i costruttori a sviluppare macchine con prestazioni sempre più elevate, caratterizzate da minori perdite di potenza e consumi energetici, con indubbi vantaggi in termini economici e di emissioni di CO₂.

Anche il lubrificante può fornire un contributo significativo all’efficienza energetica, tanto che i costruttori tendono sempre più a considerarlo come parte integrante della macchina, un elemento chiave già in sede di progettazione.

A supporto di tale evoluzione risulta fondamentale individuare e utilizzare lubrificanti con caratteristiche viscosimetriche e chimico-fisiche opportunamente selezionate, combinate con adeguate additivazioni; non solo, ma un’altra leva importante per conferire al lubrificante un minore impatto ambientale, è quella di impiegare componenti derivanti da fonti rinnovabili.

La sperimentazione tribologica si configura come uno strumento estremamente importante nel contribuire ad avvalorare le prestazioni energy saving di oli lubrificanti garantendo altresì il soddisfacimento di alcuni target prestazionali tradizionali. In questo ambito si colloca la presente attività di dottorato, che ha il seguente duplice obiettivo: da un lato, individuare e ottimizzare test tribologici allo scopo di discriminare al meglio i

lubrificanti con caratteristiche “energy saving” prima di passare a testarli su campo; dall’altro, acquisire know-how sui meccanismi che stanno alla base di accoppiamenti tribologici più o meno semplici, cercando correlazioni tra meccanica (strumentazione tribologica), chimica (olio lubrificante e sua additivazione) e materiale, individuando modalità di esecuzione del test quanto più predittive possibili di reali applicazioni industriali.

2. Sala tribologica di Eni

Eni dispone di una sala tribologica (Fig. [1]) che conta più di 20 apparecchiature, impiegate per valutare un range molto ampio di lubrificanti, passando da quelli per applicazioni industria, grassi, trazione e marina fino a comprendere anche i fluidi di perforazione e i carburanti, oli lubrificanti.



Fig. 1 Sala tribologica Centro Ricerche Eni Bolgiano

* D. Massocchi, P. Pennacchi, S.Chatterton
Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica, Via La Masa
1, 20156 Milano, ITALY, davide.massocchi@polimi.it

† M. Lattuada, † G. Assanelli
Eni SpA, R&D downstream, Via Felice Maritano 26, 20097 San
Donato Milanese, ITALY, marco.maria.flavio.lattuada@eni.com,
giulio.assanelli2@eni.com

Queste strumentazioni presentano diversi tipi di accoppiamenti (sfera su disco, ruota/pignone, cilindro/anello) e si prestano ad essere utilizzate sia per l'esecuzione di test standard, cioè secondo le norme ASTM e DIN, sia per test «in-house», ove le condizioni operative del test sono modificate dall'utente per specifiche esigenze.

Eni dispone inoltre del banco prova FZG, sito in una cella dedicata, per la valutazione delle proprietà di load carrying capacity, antiusura ed estreme pressioni (EP) di Nell'ottica di garantire la massima qualità e robustezza dei dati forniti, Eni partecipa a diversi gruppi di lavoro su test tribologici, di cui fanno parte numerosi operatori del settore lubrificanti, costruttori di apparecchiature e componenti meccaniche e membri di laboratori indipendenti deputati all'esecuzione di test tribologici.

Anche Eni sta valutando la possibilità di offrire i propri servizi di testing a potenziali clienti, contando su un ampio parco apparecchiature e su competenze e know-how consolidati.

2.1. SRV

L'SRV (Fig. [2]) è un'apparecchiatura molto versatile, atta alla misura del coefficiente di attrito e delle caratteristiche antiusura ed EP di oli lubrificanti e grassi in svariate condizioni operative.

Grazie al suo design modulare, è possibile configurare il test con accoppiamenti di diversa geometria e materiale, testandoli sia in modalità oscillatoria-traslatoria che rotazionale

Oltre all'esecuzione dei test standard, infatti, tale apparecchiatura ben si presta alla messa a punto di test in house al fine di simulare, su scala di laboratorio, condizioni operative che spesso si verificano nell'esercizio di macchinari/componenti/circuiti.

Eni dispone di due SRV, di cui una è la versione più recente (SRV 5).

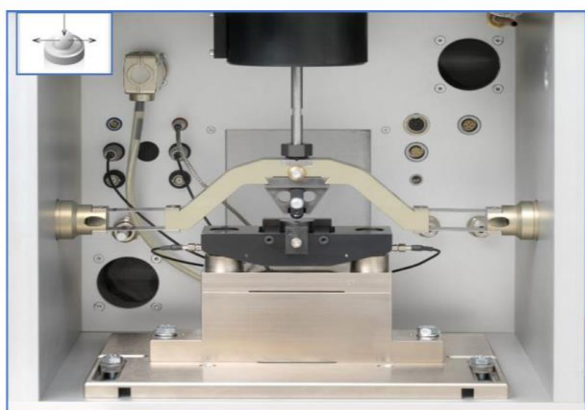


Fig. 2 SRV

2.2. KRL (Shear stability test) CEC L-45-99

Tale test valuta la stabilità meccanica al taglio di un olio lubrificante intesa come perdita di viscosità permanente causata da sollecitazioni meccaniche in condizioni rappresentative delle applicazioni reali, tanto da essere considerata dai costruttori come una prova rigorosa e ben correlabile con le evidenze di campo. Questa prova è indicata soprattutto per oli idraulici, oli trazione, fluidi per smorzatori e per trasmissioni automatiche ma ben si adatta anche alla valutazione di componenti dell'olio, quali i viscosity modifier.

2.3. Reichert test

L'installazione è molto semplice, consta di un blocco cilindrico in acciaio a contatto con un anello di acciaio montato su un albero rotante che gira ad una velocità sufficiente da trascinare l'olio contenuto nella vaschetta nell'area di contatto tra blocco e anello.

Attraverso questo test è possibile valutare numerose caratteristiche di oli lubrificanti, quali la load carrying capacity, il deterioramento delle proprietà del film d'olio e la protezione dall'usura (sia in termini di velocità di attivazione dell'additivazione che di durata nel tempo).

2.4. Tester 4 sfere (wear ed EP)

La prova 4 sfere, sia nella modalità wear che in quella EP, è una strumentazione tribologica tradizionale in cui una sfera di acciaio in rotazione viene caricata sopra altre tre sfere di acciaio tenute fisse da una flangia e immerse in olio lubrificante. Viene frequentemente impiegata per l'esecuzione di test standard ASTM per valutare le caratteristiche antiwear ed EP di oli per applicazioni industria e grassi.

2.5. MTM (Mini Traction Machine)

Attraverso la strumentazione MTM è possibile valutare il coefficiente di attrito di un olio lubrificante in tutti i regimi di lubrificazione (dall'idrodinamico al limite) della curva di Stribeck.



Fig. 3 MTM

L'MTM si basa su accoppiamento di tipo sfera/disco, disponibile in materiali diversi, quali acciaio, dlc, grafite. Tra le sue principali applicazioni, rientrano la valutazione delle caratteristiche di fuel economy [2] di oli motore nonché quella di nuovi additivi riduttori di attrito di varie tipologie (polimerici, nanostrutturati o i più tradizionali organici e metallo-organici). I valori sperimentali dei coefficienti di attrito possono essere inoltre oggetto di correlazione con quelli teorici attraverso le più moderne tecniche di calcolo computazionale.

2.6. EHD film thickness measurement

Eni dispone anche di un'apparecchiatura per la misurazione dello spessore del film d'olio attraverso interferometria ottica (approfondita alla sezione 3) che la rende utile per valutare, per esempio, “la surface competition” degli additivi presenti in olio (se accoppiata con spettroscopia Raman) oppure per correlare con modelli matematici che riportano lo spessore di film d'olio di un lubrificante in una specifica configurazione meccanica.

Ulteriori evidenze tribologiche possono essere ricavate anche impiegando le seguenti strumentazioni disponibili nella sala tribologica di Eni: **Timken OK Load**, **Almen Wieland Friction & Wear**, **Pin on disk**, **Block on ring**, **Stick-Slip**, **Low Velocity Friction Apparatus (LVFA)**, **Pin & Vee Block**, oltre al **rugosimetro Mahr** per la rilevazione del profilo di usura.

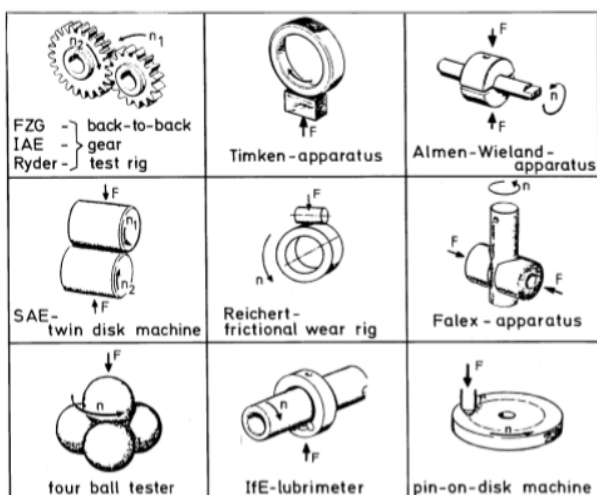


Fig. 4 Accoppiamenti tribologici tipici delle apparecchiature disponibili nei laboratori Eni

3. Attività prevista e azioni in corso

Il titolo di questo paper, cioè l'ottimizzazione di test tribologici e bench test a supporto della messa a punto di lubrificanti con caratteristiche “energy saving” coincide con lo scopo dell'attività di dottorato dell'ing. Massocchi da svolgersi presso le facilities Eni, descritte nella

sezione precedente, e il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

Vista la vastità di argomenti trattati, qui di seguito vengono riportate le principali linee di attività in corso.

In primis, per un approccio quanto più rapido e profittevole all'ottimizzazione del testing, l'attenzione e lo sforzo vengono focalizzati sull'acquisizione dei principali aspetti formulativi del lubrificante (basi lubrificanti, additivazione) e i corrispondenti test chimico-fisici e prestazionali impiegati per la sua valutazione.

A valle di questo, il passo successivo risulta quello di valutare i risultati tribologici ottenuti in prove standard nel senso di comprendere quale sia il tipo di impatto o contributo che fornisce il lubrificante e, più specificatamente, il singolo componente dell'olio; parallelamente, comprendere che tipo di evidenza prestazionale possa fornire la strumentazione tribologica. Appurato questo, l'attività sperimentale prosegue ad un livello superiore, cioè quello di cercare di modificare e/o inasprire le condizioni operative del test oppure creando nuove procedure, allo scopo di poter meglio evidenziare e/o discriminare le caratteristiche prestazionali di un olio lubrificante. I risultati del test tribologico possono poi essere correlati con bench test o con evidenze riscontrate nell'esercizio reale.

Per citare un esempio che meglio faccia comprendere quanto sopra riportato, è in corso una valutazione tribologica più approfondita a riguardo dell'inserimento di un nuovo viscosity modifier (cioè un modificatore dell'indice di viscosità, solitamente di natura polimerica) nella formulazione di alcuni oli idraulici presenti nel portafoglio prodotti di Eni.

Lubrificanti di questo tipo vengono impiegati per soddisfare le esigenze dei moderni impianti idraulici per macchinari mobili ed industriali che operano nelle condizioni più severe. Per questo, debbono presentare elevata stabilità termica, ossidativa ed idrolitica, nonché garantire l'operabilità in un ampio intervallo di temperature.

Oltre alle sopracitate, una caratteristica fondamentale degli oli idraulici è la resistenza al taglio durante l'esercizio, valutabile in tribologia attraverso il già citato KRL (*Tapered Roller Bearing test*) test. A livello procedurale, un campione di olio lubrificante viene fatto scorrere per 20 ore su di un cuscinetto a rulli conici, a velocità e carico costanti, misurando poi la diminuzione di viscosità percentuale dell'olio alla fine del test rispetto al valore originale. Una delle possibili modifiche è quella di inasprire il test andando ad aumentare il numero di ore; allo stesso modo, è possibile ricavare da questo test altre caratteristiche importanti, quali quelle termiche e di dissipazione del calore, andando a monitorare l'incremento di temperatura dell'olio in un tempo sufficientemente accettabile (con opportune modifiche al sistema di regolazione e controllo della temperatura dell'olio stesso). Dati più precisi per misurare le grandezze fondamentali alla base delle dissipazioni

termiche, quali calore specifico e conducibilità termica, sono ricavabili impiegando altre apparecchiature disponibili in Eni, come il conduttimetro termico LAMBDA. Tali caratteristiche sono strettamente correlate alla tipologia di base lubrificante impiegata, quali basi minerali, polialfaolefine (PAO) oppure esteri di diversa natura. A tal proposito, gli sforzi della ricerca sono orientati anche all'introduzione di basi lubrificanti da fonte rinnovabili in sostituzione di quelle tradizionali da fonte fossile che prevede, accanto alla valutazione attraverso test prestazionali e tribologici, anche quella del profilo ambientale del prodotto attraverso specifiche prove (test di biodegradabilità, di bioaccumulabilità ecc.) Nella linea di oli idraulici di Eni, ad esempio, è stato recentemente inserito un nuovo lubrificante “energy saving” formulato con un estere sintetico biodegradabile e classificato come EAL (*Environmentally Accepted Lubricant*).

Accanto al KRL test, un altro test standard per la valutazione degli oli idraulici è il metodo DIN 51834 P2, che impiega l'SRV in modalità oscillante.

La prova in oggetto consiste nell'applicazione di un carico costante al fine di provare le prestazioni antiusura dell'olio e il coefficiente di attrito.

L'usura viene misurata al microscopio dall'operatore per entrambi i provini (disco e sfera) mentre il coefficiente d'attrito viene fornito direttamente dall'apparecchiatura. Anche in questo caso vi è la possibilità di inverte il test modificando opportunamente la procedura tradizionale.

Per validare le prestazioni del lubrificante per una applicazione industriale, dopo la sperimentazione di laboratorio e tribologica precedentemente indicata, segue una valutazione su installazioni di scala superiore, quali i banchi prova, e, da ultimo, è necessaria l'esecuzione di una o più prove sul campo. Individuare o mettere a punto un test di laboratorio che possa aiutare il formulatore nella valutazione del lubrificante più idoneo per una determinata applicazione può essere uno strumento sicuramente importante, che accelererebbe il processo di validazione dell'olio e consentirebbe un risparmio significativo di risorse economiche.

In linea con questo modus operandi, infatti, si sta cercando di simulare attraverso un test di laboratorio, l'SRV, un test al banco, cioè l'FZG (Fig. [5]).

Il test FZG A/8,3/90, condotto secondo metodo ISO 14635-1, è riconosciuto come uno dei banchi prova più diffusamente utilizzati per la valutazione di oli lubrificanti per applicazioni industriali.

La macchina FZG prende il nome dal centro di ricerca dove è stata ideata: *Forschungsstelle fur Zahnrad und Getriebebau*; si tratta di un banco prova a ricircolo di potenza costituito da due coppie di ruote dentate (una coppia campione e una di banco) connesse da due alberi paralleli distanziati di 91,5mm [4].

Un albero è diviso in due parti da un giunto fisso dove è possibile applicare un momento torcente utilizzando una leva alla quale vengono opportunamente posizionate delle masse.

I banchi con questa configurazione vengono detti four square e vengono utilizzati sia per la valutazione del lubrificante che per le prestazioni dei materiali costituenti le ruote dentate; tra i fenomeni di usura studiati rientrano scuffing, pitting e micropitting.

Nel test FZG A/8,3/90 la scatola contenente gli ingranaggi di prova è immersa per metà nell'olio, in condizioni di piena lubrificazione. La procedura di prova è costituita da una successione di diversi stadi, a carico crescente, della durata di 15 minuti ciascuno; al termine di ogni stadio, a partire dal quarto, l'operatore effettua una ispezione visiva: se la somma delle usure riscontrate su tutti i denti del pignone è minore dell'area di un singolo dente, si passa allo step successivo; altrimenti il test viene interrotto in corrispondenza di quello stadio che viene riconosciuto come lo stadio di danno.

Un altro aspetto valutato è la perdita di peso, post test, della ruota dentata.

A seconda della tipologia di olio, è richiesto il superamento del dodicesimo stadio dell'FZG; non solo, ma nel caso della valutazione di pitting e micropitting, la procedura di prova prevede una lunga durata, in alcuni casi anche superiore alle 400 ore.

Da lavori presenti in letteratura emerge che sono state effettuate prove di screening con l'SRV del FZG [5]: il carico sull'SRV viene opportunamente selezionato per riprodurre la pressione hertziana del contatto ruota-pignone della prova, stadio per stadio.

Allo stadio in corrispondenza del quale il coefficiente di attrito misurato all'SRV presenta un andamento con diversi picchi ravvicinati (microgrippaggi) fino a raggiungere, in molti casi, un massimo ben definito (grippaggio), viene assegnato lo stadio di danno.

In seguito si confronta quest'ultimo con quello dell'FZG.

A fine test, inoltre, si misura l'usura dei provini (disco e cilindro) al microscopio. È allo studio la possibilità di creare in questo modo un ranking fra più prodotti, correlando i risultati dei due test (oppure discriminando ulteriormente due o più prodotti che all'FZG, ad esempio, riportavano il medesimo stadio di danno).

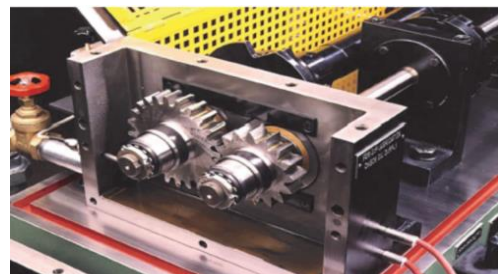


Fig. 5 FZG rig

Un test scalato di questo tipo possiede i seguenti vantaggi:

- è economico
- ha tempi più brevi
- crea un ranking

- è meno operatore-dipendente.

Un'altra misura molto importante in fase di progettazione e valutazione delle prestazioni è l'altezza del film d'olio tra le parti meccaniche in movimento.

Questa misura viene spesso rilevata indirettamente nei banchi prova e nelle misure su campo.

In Fig. [6] è rappresentato lo schema di funzionamento del EHD. Il suo maggior punto di forza è la capacità di misurare con buona accuratezza lo spessore del meato, che è, tra l'altro, un importante parametro nella valutazione delle prestazioni energetiche. Il principio di funzionamento si basa sull'equazione [6] costituita da tre gruppi adimensionali mostrata nell'Eq. (1):

$$\frac{h}{R'x'} = k \left(\frac{U\eta}{E'R'} \right)^a (\alpha E')^b \left(\frac{W}{E'R'^2} \right)^c \quad (1)$$

dove U è la velocità di superficie media delle due superfici, R' è il raggio ridotto delle due superfici, E' è il modulo di Young ridotto, W è il carico applicato, η è la viscosità dinamica dell'olio a pressione atmosferica ed α è il coefficiente di pressione-viscosità dell'olio (legge di Barus). Le due incognite sono lo spessore del film e l'esponente α della legge di Barus.

Lo spessore del film d'olio viene misurato con una buona accuratezza dall'interferometro mentre l'esponente α si ottiene analiticamente per confronto con un olio di riferimento con esponente noto.

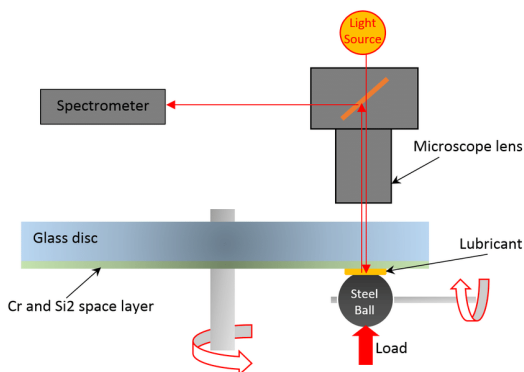


Fig. 6 Schema interferometro

È in fase di valutazione la possibilità di riprodurre un test da scala magro-grande (applicazioni reali) a scala di laboratorio.

Ottenuti un set di parametri quali le grandezze geometriche e le grandezze operative (carichi e velocità) da un'applicazione reale, mantenendo fisso il numero di Hersey (Eq. (2)), è possibile selezionare il carico desiderato per scalare il fenomeno.

$$H = \frac{\mu N}{P} \quad (2)$$

Dove μ è la viscosità dinamica, N è la velocità di rotazione e P è il carico per unità di lunghezza.

È infine in fase di progettazione un banco prova per validare oli energy saving per applicazioni industriali presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

Il banco sarà della tipologia a potenze circolanti (Fig. [7]): questi banchi hanno il grande vantaggio di riuscire a simulare grandi carichi con una piccola spesa energetica (si devono vincere solo le dissipazioni dovute agli attriti).

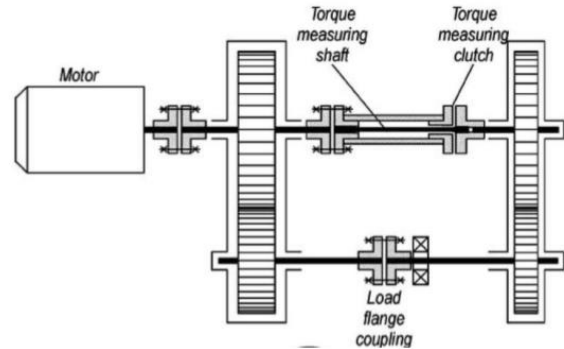


Fig.7 Esempio banco prova a potenze circolanti [7]

Insieme all'attività sperimentale verrà costruito un modello matematico del tipo TEHD (Termo-elasto-idrodinamica) per la caratterizzazione di prestazioni di sistemi meccanici: verrà valutata la potenza dissipata. Si ottimizzerà la curva di viscosità dinamica per ridurre la potenza persa e questa sarà utile a supporto dello sviluppo di nuovi prodotti “energy saving”.

In conclusione, dalle linee di attività sopra riportate emerge come l'importanza di ottimizzare le metodologie di testing, quali quelle tribologiche e i test rig, possa portare a numerosi benefici, sia lato sviluppo prodotto sia lato prestazione finale della macchina, configurandosi come uno strumento estremamente utile al costante miglioramento dell'efficienza energetica dei moderni sistemi industriali.

Bibliografia

- [1] Chatterton, S.; Pennacchi, P.; Vania, A.; De Luca, A.; & Dang, P. V. Tribo-design of lubricants for power loss reduction in the oil-film bearings of a process industry machine: Modelling and experimental tests. Tribology International, 130, 133-145, 2019.
- [2] Lattuada, M.; Manni, M. A new methodology for the experimental evaluation of organic antifriction additives, ISFL, International symposium on fuel and lubricants, New Delhi, 2016.
- [3] Ewen, J. P.; Gattinoni, C.; Morgan, N.; Spikes, H. A.; & Dini, D. Nonequilibrium molecular dynamics simulations of organic friction modifiers adsorbed on iron oxide surfaces. Langmuir, 32(18), 4450-4463, 2016.
- [4] Hoehn, B.-R.; Michaelis, K.; Oster, P. New Test Methods for the Evaluation of Wear, Scuffing and Pitting Capacity of Gear Lubricants. AGMA, 1998.

- [5] Baumann, C.; Patzer, G. Screening Engine Oils Using Piston Parts on a Translatory Oscillation Tribometer (SRV®). 한국윤활학회 학술대회, 75-76, 2018.
- [6] Van Leeuwen, H. The determination of the pressure—viscosity coefficient of a lubricant through an accurate film thickness formula and accurate film thickness measurements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 223.8: 1143-1163, 2009.
- [7] Cavallacci, A. Progettazione di un banco a ricircolo meccanico di potenza, Tesi di Laurea Ingegneria Meccanica, Università di Pisa, 2013.