

# Perpindahan panas secara konveksi pada magnetorheological fluid: Review

Zeluyvenca Avista<sup>1</sup>, Ubaidillah<sup>1</sup>, Zainal Arifin<sup>1</sup>, Indri Yaningsih<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret  
Jl. Ir. Sutami No. 33 Surakarta, Indonesia 57126  
Email korespondensi: ubaidillah\_ft@staff.uns.ac.id

## Abstrak

Magnetorheological fluid (MRF) merupakan cairan magnet yang mempunyai sifat dari cair menjadi hampir padat dibawah medan magnet eksternal. Bahan pembentuk MRF berupa fluida dasar, partikel padat, dan aditif. Review artikel ini difokuskan pada perpindahan panas konveksi yang terjadi dalam MRF. Kajian mengenai perpindahan panas konduksi pada MRF baik simulasi numerik maupun eksperimental sudah banyak dilakukan sebelumnya namun kajian pada perpindahan panas secara konveksi untuk MRF masih sangat jarang ditemukan. Sehingga pada review artikel ini akan dilakukan peninjauan pada ferrofluid, nano fluid dan elektrorheological fluid. Dengan peninjauan pada kajian konveksi di fluida magnet tersebut, maka pada hal serupa juga dapat diterapkan untuk studi mengenai perpindahan panas secara konveksi pada MRF.

**Kata kunci:** perpindahan panas, konveksi, magnetorheological fluid.

## Abstract

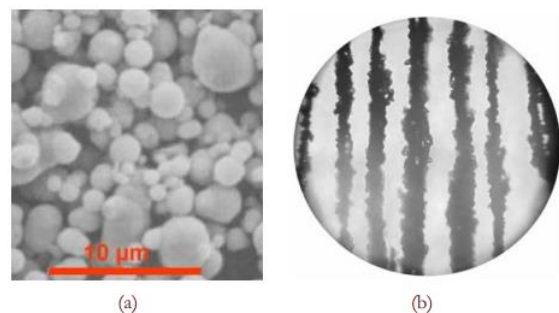
Magnetorheological fluid (MRF) is a magnetic fluid with the property of being liquid to almost solid under an external magnetic field. MRF forming materials are basic fluids, solid particles, and additives. This paper's review is focused on the convection heat transfer that occurs in the MRF. The works related with conduction heat transfer on MRF through numerical and experimental study were easily found in the literature, however, we found rarely for convection heat transfer method inside the MRF. Therefore, this review paper conducted a review on ferrofluid, nanofluid, and electrorheological fluid. Using this review for convection heat transfer mode in magnetic fluid, a similar way could be applied to convection heat transfer in MRF.

**Keywords:** heat transfer, convection, magnetorheological fluids.

## 1. Pendahuluan

Magnetorheological fluid (MRF) adalah bahan yang berinteraksi dengan medan magnet yang diterapkan dengan mekanisme perubahan perilaku reologi [1]. Cairan ini dikenal sebagai *smart fluid* karena sifat reologinya berubah secara substansial dalam skala waktu yang sangat singkat (dalam milidetik) ketika medan magnet eksternal diterapkan. Cairan ini adalah partikel suspensi magnetik berukuran mikron dalam cairan pembawa. MRF memiliki kapasitas untuk mengubah keadaannya antara cairan Newtonian yang mengalir bebas menjadi setengah padat saat terkena medan magnet eksternal [2][3]. Perubahan ini dapat dibalik dengan menghilangkan medan magnet yang diberikan sehingga fluida kembali ke keadaan reologi awalnya. Di bawah medan magnet, tegangan geser MRF dapat dikontrol secara kontinu dan akurat hanya dengan mengatur intensitas magnet. Fitur luar biasa ini telah memunculkan berbagai macam aplikasi rekayasa MRF di bidang transmisi torsi, kontrol getaran, pemolesan, dan penyerapan kejutan untuk meningkatkan efisiensi kerja dan mengurangi konsumsi energi [4][5]. Selain itu, suspensi ini dapat digunakan untuk meningkatkan teknik perpindahan

panas untuk pemanasan atau pendinginan di peralatan rumah tangga seperti lemari es dan oven [6].



**Gambar 1.** (a) Fotografi mikro MR fluid tanpa medan magnet, partikel tersebar secara acak. (b) Fotografi mikro MR fluid dengan medan magnet terapan dengan rantai paralel besi karbonil [7].

Partikel MRF secara tradisional berbentuk bola sedangkan tipikal ukuran partikel berada dalam kisaran mikrometer [2]. Ilustrasi fotografi mikro MRF ditunjukkan pada Gambar 1. Meskipun bentuk dan ukuran partikel terbukti mempengaruhi konduktivitas

termal dalam nanofluida, belum ada laporan yang menemukan dalam kajian mengenai MRF [8]. Namun demikian, mekanisme bentuk dan ukuran partikel dalam mempengaruhi termal tetap relevan dalam kasus MRF [9].

**Komponen Magnetorheological Fluid**

Suspensi padat adalah jenis fluida yang terdiri dari partikel kecil pada MRF dimana suspensi ini terdiri dari 3 elemen : partikel padat, fluida dasar dan aditif.

Partikel padat yang sering digunakan yaitu *carbonyl iron powder* (CIP). Namun, terdapat juga beberapa jenis partikel padat magnetik yang lain yang biasa digunakan pada MRF. Pemilihan partikel padat magnetik dapat mempengaruhi perilaku reologi MRF [10]. Secara umum, material dengan permeabilitas tinggi dan magnetisasi saturasi serta sisa magnetisasi dan koersivitas yang rendah merupakan kandidat yang baik untuk material partikulat MRF. Sebuk besi karbonil (CIP) banyak digunakan karena permeabilitas magnetisnya yang tinggi, magnetisasi sisa yang rendah, ukuran partikel halus, dan distribusi ukuran yang sempit, serta ketersediaan yang umum [11]. Tabel 1 menunjukkan magnetisasi saturasi (pada 20°C) dan suhu Curie beberapa bahan magnet.

**Tabel 1.** Magnetisasi saturasi (pada 20°C) dan suhu Curie beberapa magnet [10].

Material	Magnetisasi saturasi (T)	Suhu curie (°C)
Fe	2.15	770
Co	1.78	1331
Ni	0.605	484
Carbonyl iron	2.23	775
Fe <sub>3</sub> Al	0.625	500
Fe-Co alloy	2.4	970

Fluida dasar atau cairan pembawa juga merupakan komponen penting pada MRF. Fungsi dari fluida dasar adalah sebagai insulasi secara kontinu. Fluida dasar memiliki banyak jenis. Jenis dari non-magnetik meliputi minyak silikon, minyak mineral, toluena, minyak hidrokarbon, air, dan etilen glikol. Sedangkan untuk yang magnetik mengacu pada fluida magnet dengan partikel berukuran nano (biasanya sekitar 10 nm). Fungsi cairan pembawa harus non magnetis, tidak beracun, tidak korosif dan non reaktif [12]. Saat ini, fluida dasar yang sering digunakan yaitu minyak pada MRF karena memiliki rentang suhu operasi yang dan transparan. Minyak silikon banyak digunakan

lebar, kemampuan anti oksidan yang kuat, titik abu yang tinggi dan volatilitas yang rendah [10]. Pada Tabel 2 dapat dilihat beberapa cairan dasar dengan konduktivitas termal 300 K [11].

**Tabel 2.** Konduktivitas termal dari beberapa partikel suspensi padat pada 300 K [11].

Cairan dasar	Konduktivitas termal, k (W/m K)
Slilicone oil	0.14
Deionized water	0.607
Ethylene glycol	0.255
Engine oil	0.145

Zat tambahan lain yang digunakan pada MRF adalah aditif. Tambahan aditif pada MRF berfungsi untuk meningkatkan kinerja material dengan cara interaksi dengan fluida pembawa dan partikel. Persentase aditif dari suspensi MRF adalah yang paling sedikit yaitu kurang dari 5% dari keseluruhan komponen. Pemilihan aditif fluida harus mempertimbangkan dua hal berikut: (i) *intermiscibility* yang baik dengan fluida pembawa dan kedekatan yang kuat dengan partikel MRF, sehingga diperoleh stabilitas anti-sedimentasi yang baik; (ii) kisaran suhu operasi yang luas dan stabilitas termal yang tinggi untuk menghindari dekomposisi termal. Adapun aditif yang sering digunakan pada MRF yaitu *oleic acid, polyethylene glycol, polysorbate 80, silica gel, coupling agent, nano-sized magnesium lithium silicate*, dan zat aditif *nonionic* lainnya [10]. Aditif yang digunakan dalam MRF dijelaskan pada Tabel 3 [13].

**Perpindahan Panas pada Magnetoreological Fluid**

Perpindahan panas pada MRF telah banyak dipelajari. Yildirir dan Genc telah mempelajari sifat perpindahan panas MRF untuk fraksi volume yang berbeda dan intensitas medan magnet dalam interval suhu yang berbeda [6]. Mereka telah menemukan bahwa perpindahan panas konduktif lebih efektif pada suhu yang lebih tinggi (Tabel 4).

Disimpulkan juga bahwa persentase peningkatan konduktivitas termal lebih besar untuk fraksi volume yang lebih kecil sehubungan dengan persentase peningkatan konduktivitas untuk fraksi volume partikel terdispersi yang lebih besar. Alasannya adalah untuk fraksi volume yang lebih kecil, partikel berada pada jarak yang lebih jauh satu sama lain dalam

**Tabel 3.** Aditif yang digunakan dalam FMR[13].

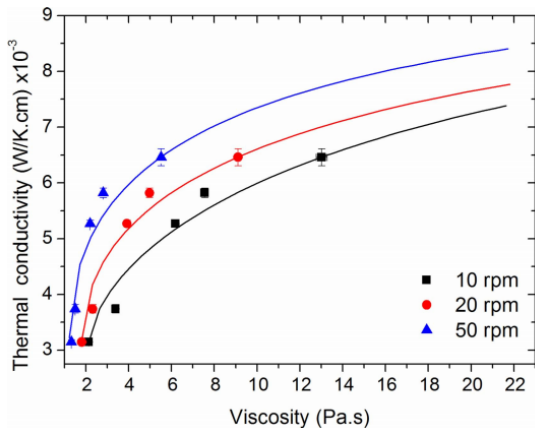
<b>Aditif</b>	<b>% Aditif</b>	<b>Tujuan</b>
Guar gum [14], poly (methyl methacrylate) [15], carboxymethyl cellulose, polyethylene oxide, synthetic hectorite, xanthan gum [16]	0,5-1% volume	Pelapisan partikel besi untuk mengurangi kepadatan akibatnya mengurangi sedimentasi
Polyvinyl butyral [17]	0.5-1% volume	Pelapisan partikel besi untuk mengurangi densitas dan meningkatkan karakteristik anti korosi
Tetramethylammonium hydroxide [18], fibrous carbon [12], Aerosil 200, arabic gum [19]	0.25-1% berat	Surfaktan untuk melapisi partikel besi dan selanjutnya mengurangi aglomerasi partikel
Olefin polymer emulsifier, Tween-60 and Tween-80, Span-60 and Span-80 [20]	1-2% berat	Pengemulsi digunakan untuk meningkatkan stabilitas sedimentasi cairan MR.
Grease [21], colloidal clay [22];[23];[24], fumed silica [25]	3-5% berat	Pengental digunakan untuk mengurangi sedimentasi partikel magnet
Lecithin [26]	2% berat	Surfaktan memitigasi laju pengendapan partikel magnetik
Oleic acid [27], zinc dialkyldithiophosphate, organo molybdenum [25], sodium nitrite [16]	1-3% volume	Aditif anti gesekan dan anti aus untuk mengurangi erosi
Magnetic nanoparticles [28], iron naphthalate, iron oleate [29]	1-6% volume	Dispersan digunakan untuk menyebarkan partikel magnet pada fluida pembawa
Stearic acid [18], sodium stearate, lithium stearate [29]	1-3% berat	Aditif thixotropic untuk meningkatkan densitas fluida pembawa dan stabilitas sedimentasi
Cholesteryl chloroformate [30]	1-3% berat	Meningkatkan stabilitas termal dan stabilitas sedimentasi MRF
Polystyrene [31]	1-2% berat	Pelapisan partikel besi untuk mengurangi aglomerasi dan meningkatkan stabilitas sedimentasi
N-glucose ethylenediamine triacetic acid (GED3A) [32], polyvinylpyrrolidone [33], aluminum distearate, thiophosphorus, thiocarbamate [12]	0.25-2% berat	Meningkatkan stabilitas sedimentasi

**Tabel 4.** Rasio peningkatan konduktivitas termal MRF dengan medan magnet yang diterapkan H = 24 G [6].

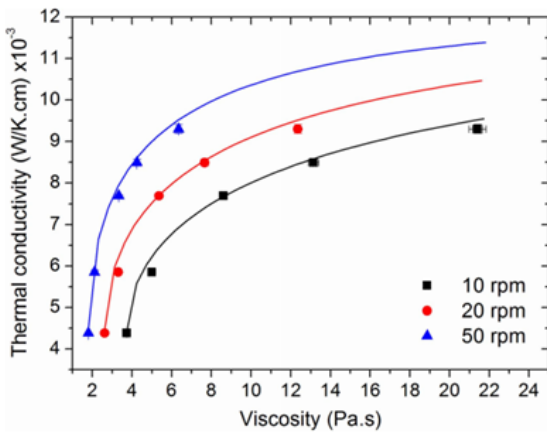
	<b>0-50°C pada 24 G</b>		<b>50-100°C pada 24 G</b>	<b>-20-0°C pada 24 G</b>	
	<b>ΔT = 35 K (%)</b>	<b>ΔT = 20 K (%)</b>	<b>ΔT = 15 K (%)</b>	<b>ΔT = 20 K (%)</b>	<b>ΔT = 15 K (%)</b>
40SM	6	10	100	-35	-2
40SQ	8	6	31	-24	-7
20SM	9	2	147	-20	-3
20SQ	18	22	29	-7	-13
5SM	20	17	68	-20	-7
5SQ	16	16	56	-23	-9

pembentukan rantai partikel karena medan magnet diterapkan yang mempengaruhi konduktivitas termal relatif menjadi lebih mudah diakses [6].

Konduktivitas termal dan viskositas suspensi *magnetorheological fluid* yang terdiri dari CIP yang direndam dalam minyak silikon telah diteliti oleh Sandoval dkk. [34]. Mereka menemukan bahwa penambahan CIP dikombinasikan dengan medan magnet dapat menginduksi pembentukan rantai yang meningkatkan konduktivitas termal dan viskositas. Ketergantungan fungsional antara konduktivitas dan viskositas menunjukkan bahwa ketika viskositas dapat terus meningkat, konduktivitas termal mencapai nilai stabil maksimum. Pada Gambar 2 dapat dilihat grafik konduktivitas termal dengan viskositas.



(a)

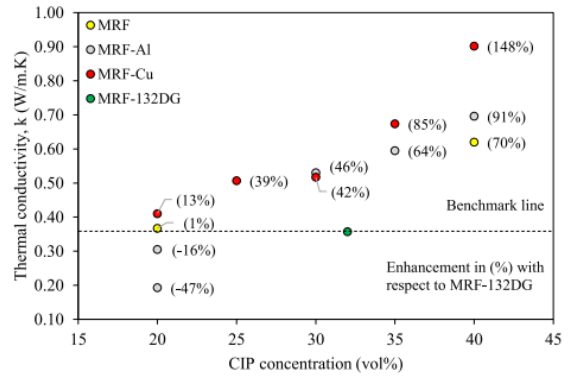


(b)

**Gambar 2.** Konduktivitas termal untuk suspensi MR sebagai fungsi dari viskositas, selama (a) 15% dan (b) 20% dengan nilai laju geser yang berbeda [34].

Karakteristik dari konduktivitas termal yang ditinjau dari material yang digunakan pada MRF juga telah diteliti. Sampel cairan berupa CIP dan oli hidrolik, kemudian ditambahkan partikel tembaga (Cu) berukuran nano, aluminium (Al), dan silika (SiO<sub>3</sub>). Pengukuran konduktivitas termal dengan alat analisa sifat termal dan sedimentasi MRF dilakukan dengan

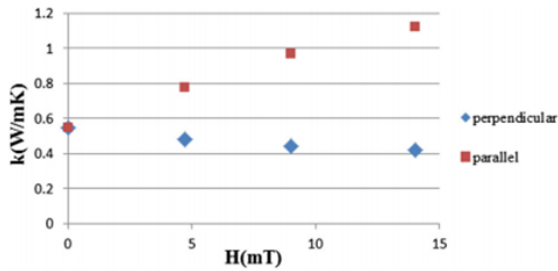
menggunakan tabung kaca tanpa eksitasi dalam waktu lama [35]. Hasil pengukuran konduktivitas termal kemudian dibandingkan dengan model teoritis Maxwell pada berbagai konsentrasi CIP. Hasil yang didapat adalah konduktivitas MRF dapat meningkat akibat penambahan dua aditif berukuran nano (Gambar 3). Aditif Cu memberikan konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada Al. Pada pengujian laju sedimentasi MRF ditemukan bahwa laju sedimentasi dapat dikurangi dengan menggunakan aditif tambahan Cu dan Al [35].



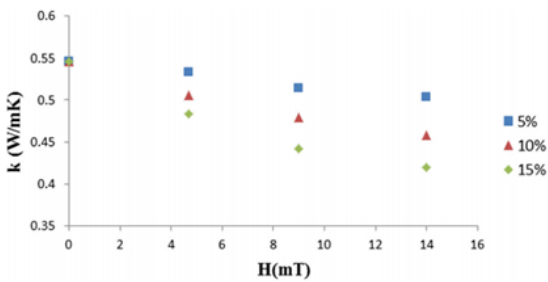
**Gambar 3.** Konduktivitas termal semua sampel MRF dan peningkatan konduktivitas termal dalam (%) sehubungan dengan MRF-132DG [35].

Simulasi numerik dan metode eksperimental telah dilakukan untuk meneliti parameter yang mempengaruhi variasi anisotropik dalam konduktivitas termal MRF [36]. Pengaturan eksperimental dilakukan dengan menggunakan pendekatan *Transient Hot Wire* untuk mengukur konduktivitas termal fluida [37][38]. Metode ini digunakan untuk meneliti konduktivitas termal MRF partikel besi berbentuk serpihan. Di bawah medan magnet, konduktivitas termal berada ditingkatkan sebesar 20% dibandingkan dengan fluida MR komersial berbentuk bola yang memiliki fraksi volume hampir 20% lebih tinggi partikel besi. Upadhyay dkk. mempelajari pengaruh konduktivitas termal dan memvariasikan fraksi berat magnet nanopartikel magnetik dengan ukuran 6,5 nm ditambahkan ke MRF [39]. Sedangkan simulasi dilakukan menggunakan model *Discrete Phase* untuk mensimulasikan pengaruh parameter yang mempengaruhi konduktivitas termal MRF. Model ini digunakan untuk pelacakan partikel dalam aliran multiphase. Hasil dari model ini mampu memprediksi gerakan partikel dalam pendekatan Lagrangian berdasar konsep yang diturunkan dari hukum Newton gerak kedua [40].

Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa saat medan magnet luar sejajar dengan gradien suhu, rantai partikel magnet bertindak sebagai fasilitator konduksi panas sehingga meningkatkan konduktivitas termal. Saat arah medan magnet tegak lurus dengan arah gradien suhu, rantai partikel terdispersi dengan demikian mengurangi konduktivitas termal [36].



Gambar 4. Variasi konduktivitas termal MRF medan magnet intensitas dalam dua kasus arah paralel dan tegak lurus medan magnet dan gradien suhu [36].



Gambar 5. Variasi konduktivitas termal versus intensitas medan magnet dan tersebar fraksi volume partikel saat medan magnet tegak lurus gradien suhu [36].

**Perpindahan Panas Konveksi pada Fluida Magnet**

Berbagai kajian tentang perpindahan panas pada MRF telah banyak dilakukan. Namun, belum ada yang menganalisa tentang perilaku perpindahan panas secara konveksi pada MRF, sedangkan beberapa studi kasus perpindahan panas konveksi yang terjadi pada fluida magnet lainnya telah dilakukan. Pada Tabel 5 dijelaskan perbedaan MRF dengan *electrorheological fluid* (ERF), sedangkan pada Tabel 6 dijelaskan perbedaan MRF dengan *ferrofluid*. Akhir-akhir ini nanofluida semakin banyak digunakan dalam aplikasi konveksi alami untuk area yang luas [41]. Contoh pemanfaatan *ferrofluid* dalam pengaplikasian konveksi alami yaitu pada loudspeaker dimana cairan ferro di sekitar kumparan dapat meningkatkan kualitas speaker dengan merdam resonansi yang tidak diinginkan [42]. Aplikasi lain dari *ferrofluid* yaitu kemampuannya menjadi pompa termomagnetik [43]. Hal serupa juga dapat dilihat pada ERF dimana cairan elektro reologi termasuk dalam kelas suspensi koloid yang menunjukkan perubahan besar yang dapat dibalik dalam perilaku reologisnya ketika terkena medan listrik eksternal [44]. Produk MRF memiliki antara 20 dan 50 kali efek kontrol lebih tinggi daripada produk ERF yang setara. Teknologi MRF saat ini stabilitas yang lebih baik terkait kontaminan. Semua keuntungan teknologi MRF ini telah menciptakan tingkat minat yang sangat tinggi untuk memperkenalkan produk berbasis teknologi MRF selama beberapa tahun terakhir [45]. Dengan demikian perpindahan panas secara konveksi alami

pada MRF dapat ditinjau dari kajian yang telah ada pada fluida magnet lainnya.

Dalam kajian mengenai ERF, Yoshikawa dkk. menyelidiki konveksi termal dalam lapisan fluida dielektrik antara dua plat paralel di bawah situasi *microgravity* dengan medan listrik bolak-balik dan gradien suhu. Mereka menunjukkan bahwa ketidakseragaman gravitasi listrik yang timbul dari variasi finit dan permitivitas juga mempengaruhi parameter kritis Rayleigh number elektrik dan wavenumber sebagai fungsi dari variasi termal permitivitas listrik [46]. Siddheshwar dkk. meneliti pengaruh variabel viskositas dan modulasi suhu pada Rayleigh linier dan stabilitas elektro-konvektif Benard dari cairan dielektrik Newtonian. Mereka mengemukakan bagaimana pengaruh variabel viskositas mengontrol timbulnya konveksi, dan disimpulkan bahwa cairan dielektrik untuk sistem telah didestabilisasi untuk nilai frekuensi modulasi yang lebih kecil [47]. Hal serupa mengenai pengaruh pembentukan atau penyerapan panas internal pada Rayleigh konveksi Bernad dalam fluida dielektrik *non-Newtonian* dengan *Heat Fluxes Maxwell Cattaneo* telah diselidiki oleh Mahanthesh dkk. Ditemukan bahwa semakin tinggi kekuatan medan listrik, semakin kurang stabil sistem karena peningkatan destabilisasi energi elektrostatis ke sistem. Kehadiran medan listrik memfasilitasi perpindahan panas secara lebih efektif dan karenanya mempercepat terjadinya elektrokonveksi pada nilai yang lebih rendah dari bilangan Rayleigh [48].

Wang dan Mujumdar [49] mengkaji studi terbaru tentang konveksi pada nanofluida dan disimpulkan bahwa telah banyak kajian tentang aliran fluida namun perhatian lebih ke konduktivitas termal dari pada karakteristik perpindahan panas nanofluida dalam gaya paksa dan konveksi bebas mengalir. Polidori dkk. [50] menggunakan integral pendekatan formalisme untuk menyelidiki transfer panas konveksi alami nanofluida Newtonian dalam lapisan batas luar laminar. Studi tersebut mencatat bahwa peningkatan perpindahan panas konveksi pada nanofluida tidak hanya dari konduktivitas termal, tetapi ada faktor lain yang berkontribusi. Yang dkk. [51] menyelidiki koefisien perpindahan panas konvektif dari grafit nanofluida yang diukur di bawah aliran laminar dalam tabung horizontal penukar panas. Hasil menunjukkan bahwa nanopartikel grafit meningkatkan koefisien perpindahan panas dari sistem fluida aliran laminar.

Sunil dkk. menyelidiki secara teoritis tentang pengaruh viskositas pada konveksi termal fluida feromagnetik yang tergantung pada medan magnet dengan adanya partikel tersuspensi. Metode yang digunakan yaitu menggunakan analisis stabilitas linier dan metode analisis mode normal. Mereka mengamati bilangan Rayleigh termal magnetik kritis berkurang

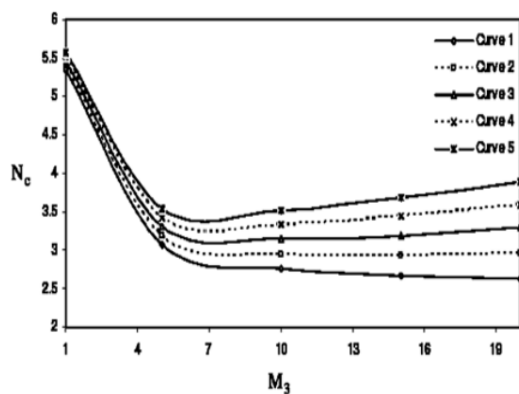
**Tabel 5.** MRF Versus ERF [45], [52], [53].

Fitur	MRF	ERF
Tegangan Maksimum	50-100 kPa	2-5 kPa
Sumber Daya Listrik	2-24 V @ 1-2 A	2-5 Kv @ 1-10 Ma
Waktu Merespon	Beberapa milidetik	Beberapa milidetik
Bidang Operasional	~250 kA/m	~4 kV/mm
Kepadatan Energi	0,1 J/cm <sup>3</sup>	0,001 J/cm <sup>3</sup>
Stabilitas	Bagus	Buruk
Suhu Operasional	-40°C sampai +150°C	-25°C sampai +125°C

**Tabel 6.** MRF Versus Ferrofluid [45], [52], [53].

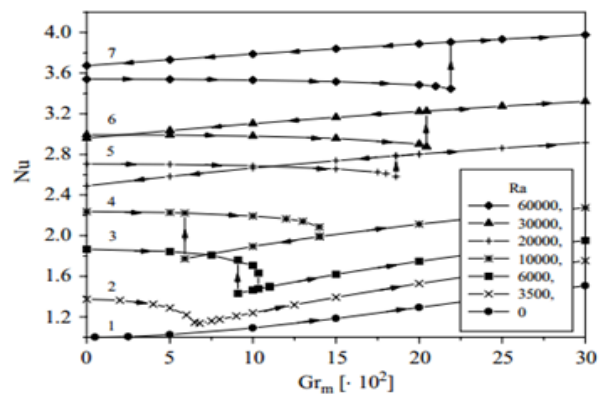
Fitur	MRF	Ferrofluid
Faktor energi $\lambda$	>1	<1
Tegangan Maksimum	100 kPa	10 kPa
Ukuran Partikel	Beberapa $\mu\text{m}$	Beberapa mm
Bahan Partikel	Besi karbonil	Oksida besi
Fraksi dari Volume	Sampai 50%	Sampai 10%
Stabilitas	Sedang	Bagus
Kegunaan	Kontrol tegangan geser	Kontrol aliran fluida

berkurang semata-mata karena kapasitas panas cairan bersih ditambah dengan partikel debu [54]. Gambar 6 menunjukkan parameter stabilitas kritis,  $N_c$  berkurang dengan adanya partikel debu karena kapasitas panas fluida bersih ditambah dengan partikel tersuspensi (debu).



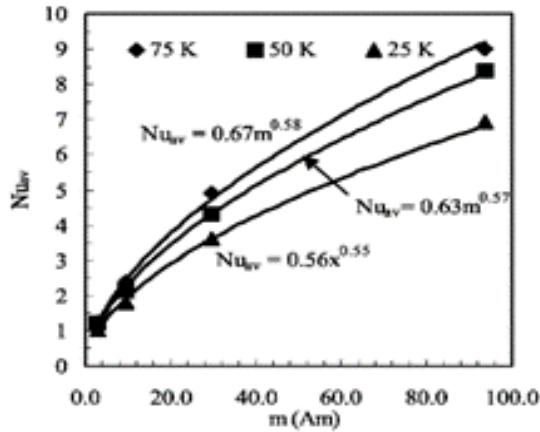
**Gambar 6.** Variasi kritis bilangan Rayleigh magnetik ( $N_c$ ) dengan parameter magnetisasi ( $M_3$ ) untuk  $h_1 = 3$ ;  $\delta = 0,01$  untuk kurva 1,  $\delta = 0,03$  untuk kurva 2,  $\delta = 0,05$  untuk kurva 3,  $\delta = 0,07$  untuk kurva 4,  $\delta = 0,09$  untuk kurva 5 [54].

Eksperimen teoritis tentang konduktivitas termal telah dilaporkan. Krakov dkk menyelidiki pengaruh orientasi relatif dari gradien suhu dan medan magnet pada konveksi termomagnetik dalam rongga persegi [55]. Gambar 7 menjelaskan ketergantungan perpindahan panas (Nusselt number) pada intensitas medan magnet (Grashoff number).

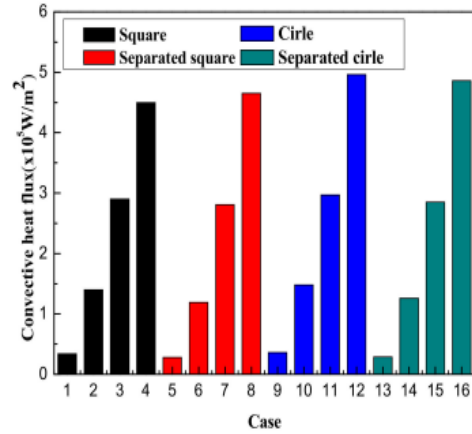


**Gambar 7.** Ketergantungan perpindahan panas pada intensitas medan magnet ( $Gr_m$ ) [55].

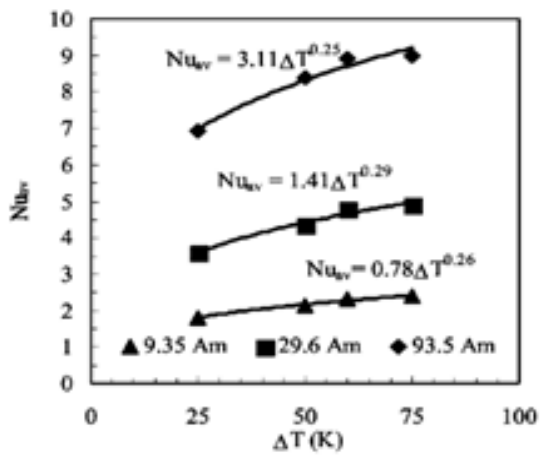




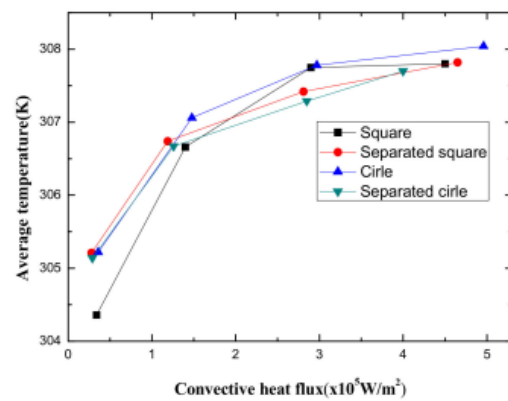
(a)



(a)



(b)



(b)

**Gambar 8.**  $Nu_{av}$  diplot sehubungan dengan (a) kekuatan dipol magnet (tiga kurva sesuai dengan kasus saat  $\Delta T=75$ , 50 dan 25 K) dan (b) perbedaan suhu di seluruh rongga (tiga kurva sesuai tiga set kekuatan dipol magnet  $m=9.35$ , 29.6, dan 93.5 A m). Untuk semua kasus,  $h=4$  cm dan  $\eta=0,007$  N s/ m<sup>2</sup> [56].

**Gambar 9.** (a) Konveksi *Heat Flux*s dalam Semua Kasus dan (b) Suhu Rata-Rata Akibat Konveksi *Heat Flux*s dalam Semua Kasus [57].

Ganguly dkk. mensimulasikan konveksi termomagnetik bebas dan paksa dengan mempertimbangkan medan magnet dua dimensi yang mirip dengan yang dibuat oleh sumber garis dipole praktis. Gambar 8 menunjukkan bahwa perpindahan panas konvektif berhubungan dengan posisi relatif dari *dipole* dan meningkat dengan intensitas medan magnet [56].

penutup dan medan magnet mempengaruhi karakteristik konveksi termodinamika dari fluida besi. Hal ini mewujudkan kinerja perpindahan panas yang efektif melalui medan magnet dan desain saluran [57].

Karakteristik konveksi termomagnetik zat besi ( $Fe_3O_4$ ) pada magnet permanen di saluran penutup diteliti secara numerik oleh Lee dkk [57]. Mereka menemukan bahwa konveksi termomagnetik dari fluida bergantung pada medan magnet internal dilakukan secara numerik dengan mengubah saluran penutup. Gaya magnetoforetik (MAP) memainkan peran penting dalam mempromosikan perpindahan panas dengan membentuk daerah resirkulasi. Saat kekuatan MAP meningkat, ukuran pusaran me ningkat. Melalui studi ini, dipastikan bahwa saluran

Gambar 9 (a) menunjukkan konveksi *heat flux* untuk semua kasus. Panas di tengah saluran selungkup disebarkan oleh kekuatan MAP. Oleh karena itu, aliran panas konvektif meningkat dengan meningkatnya kekuatan medan magnet. *Heat flux* konvektif tertinggi diperoleh jika bentuk aluran adalah lingkaran. Suhu rata-rata saluran menurut aliran panas konveksi ditunjukkan pada Gambar 9 (b). Saat fluks panas konvektif meningkat, suhu rata-rata meningkat.

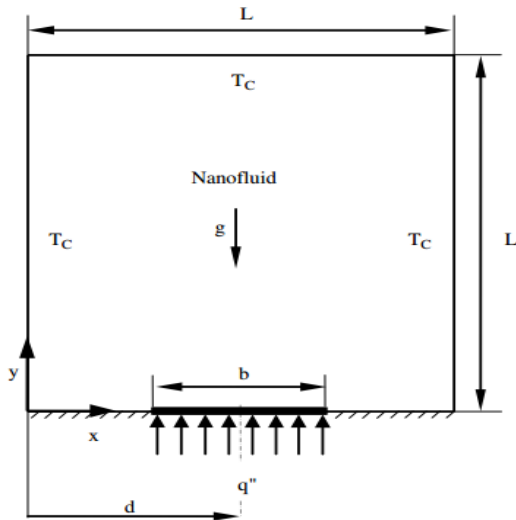
Studi secara numerik tentang konveksi campuran ferrofluid dalam selungkup persegi yang digerakkan tutup yang dipanaskan sebagian telah dipelajari oleh Selimefendigil dkk. [58]. Perasamaan yang mengatur elemen hingga sisa tertimbang diselesaikan dengan metode Galerkin. Pengaruh angka Richardson (antara 0,01 dan 100), lokasi pemanas (antara 0,25H dan 0,75H), kekuatan dipol magnet (antara 0 dan 4), dan

lokasi horizontal sumber dipol magnet (antara -2H dan 0,5H) pada aliran fluida dan perpindahan panas diselidiki secara numerik.

Dari kajian yang didapatkan, diketahui bahwa perpindahan panas lokal dan rata-rata menurun dengan meningkatnya bilangan Ricardson dan kekuatan dipol magnet. Bidang aliran dan karakteristik termal sensitif terhadap kekuatan sumber dipol magnet dan posisinya serta lokasi pemanasnya [58].

**Model Matematika**

Dalam menentukan perpindahan panas secara konveksi pada MRF dapat ditinjau dari mekanisme perhitungan pada *nanofluid*. Gambar 10 menampilkan diagram skematik dua dimensi. Sumber panas terletak di dinding bawah selungkup yang di isolasi secara termal. Selungkup dinding vertikal dan dinding atas horizontal dipertahankan pada suhu yang relatif rendah ( $T_c$ ).



**Gambar 10.** Diagram skematik.

Persamaan kontinuitas, momentum dan energi untuk konveksi alami laminar dan kondisi stabil pada tempat dua dimensi dapat ditulis dalam bentuk dimensi sebagai berikut [59]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] \tag{2}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{nf} g (T - T_c) \right] \tag{3}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \tag{4}$$

di mana, kerapatan efektif nanofluida diberikan sebagai

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \tag{5}$$

dan  $\phi$  adalah fraksi volume padat nanopartikel. Difusivitas termal dari nanofluida adalah:

$$\alpha_{nf} = k_{nf}/(\rho C_p)_{nf} \tag{6}$$

dimana, kapasitas panas dari nanofluida yang diberikan adalah:

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \tag{7}$$

Koefisien muai panas nanofluida dapat ditentukan dengan

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \tag{8}$$

Viskositas dinamis efektif dari nanofluida yang diberikan oleh Brinkman [60] adalah:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \tag{9}$$

Dalam Persamaan (6),  $k_{nf}$  adalah konduktivitas termal dari nanofluida, yang untuk nanopartikel sperikal, menurut Maxwell, adalah:

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{(k_p + 2k_f) + 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) - \phi(k_p - k_p)} \right] \tag{10}$$

dimana,  $k_p$  adalah konduktivitas termal dari nanopartikel terdispersi dan  $k_f$  adalah konduktivitas termal dari fluida murni.

Persamaan (1)-(4) dapat diubah menjadi bentuk non-dimensi, menggunakan parameter non-dimensi berikut:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{uL}{\alpha_f}, V = \frac{vL}{\alpha_f}, p = \frac{pL^2}{\alpha_f^2 \rho_{nf}}, \tag{11}$$

$$V = \frac{T - T_c}{\Delta T}, Ra = \frac{g\beta_f L^3 \Delta T}{\nu_f \alpha_f}, \Delta T = \frac{q'' L}{k_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}$$

Persamaan kontinuitas non-dimensi, momentum dan energi ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{12}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \tag{13}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_{nf}} Ra Pr \theta \tag{14}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \tag{15}$$

Kondisi batas yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan (12)-(15) adalah sebagai berikut:

$$U = V = 0 \text{ dan } \theta = 0 \text{ untuk } X = 0 \text{ dan } 0 \leq Y \leq 1$$

$$U = V = 0 \text{ dan } \theta = 0 \text{ untuk } X = 1 \text{ dan } 0 \leq Y \leq 1$$



$$U = V = 0 \text{ dan } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \text{ untuk } Y = 0$$

$$\text{dan } 0 \leq X < (D - 0.5B)$$

$$U = V = 0 \text{ dan } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{k_f}{k_{nf}} \text{ untuk } Y = 0$$

$$\text{dan } (D - 0.5B) \leq X \leq (D + 0.5B)$$

$$U = V = 0 \text{ dan } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \text{ untuk } Y = 0$$

$$\text{dan } (D + 0.5B) \leq X < 1$$

$$U = V = 0 \text{ dan } \theta = 0 \text{ untuk } Y = 1$$

$$\text{dan } 0 \leq X \leq 1 \tag{16}$$

Nusselt number lokal pada permukaan sumber panas dapat didefinisikan sebagai:

$$Nu_s(X) = \frac{hL}{k_f} \tag{17}$$

dimana, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi:

$$h = \frac{q''}{T_s - T_c} \tag{18}$$

Menyusun ulang Nusselt number lokal dengan menggunakan dimensi parameter (Persamaan (11)) menghasilkan:

$$Nu_s(X) = \frac{1}{\theta_s(X)} \tag{19}$$

dimana,  $\theta_s$  adalah suhu sumber panas tak berdimensi. Rata-rata bilangan Nusselt ( $Nu_m$ ) ditentukan dengan mengintegrasikan  $Nu_s$  di sepanjang sumber panas.

$$Nu_m = \frac{1}{B} \int_{D-0.5B}^{D+0.5B} Nu_s(x) dX \tag{20}$$

### Diskusi dan Prospek ke depan

Sebagai *smart material* yang sifat fisiknya dapat dengan mudah dikontrol, MRF menarik lebih banyak perhatian lebih banyak belakangan ini. Banyak kajian telah dilaporkan yang berkonsentrasi pada mekanisme dan aplikasi MRF. Berbagai materi MRF bertujuan untuk praktik aplikasi pengembangan, yang menunjukkan potensi aplikasi yang besar [61]. Hal ini membuat MRF harus dapat dimengerti sifat dan mekanismenya, terutama mengenai karakteristik perpindahan panas secara konveksi. Namun, kajian mengenai perpindahan panas secara konveksi belum banyak dilakukan. Sedangkan pada fluida magnet lainnya seperti *electrorheological fluid*, *ferrofluid*, dan *nanofluid* telah banyak dilakukan penelitian mengenai perpindahan panas secara konveksi.

Dalam berbagai studi yang membandingkan antara MRF dengan fluida magnet lainnya, ternyata keduanya memiliki sifat yang hampir sama. Untuk itu, dapat dimengerti bahwa kajian mengenai perpindahan panas secara konveksi pada MRF dapat dilakukan.

Mekanisme studi perpindahan panas secara konveksi dapat dilakukan seperti pada *nanofluid* dimana sumber panas terletak di bawah dan sumber dingin terletak di atas. Dengan demikian hal ini dapat menjadi kesempatan bagi peneliti untuk melakukan kajian serupa, seperti pada fluida magnet lainnya mengenai perpindahan panas secara konveksi.

## 2. Kesimpulan

MRF yang terdiri dari partikel padat, fluida dasar dan aditif merupakan suatu fluida magnet yang dapat diuji perpindahan panas. Berbagai kajian tentang perpindahan panas pada MRF berupa konduktivitas termal telah banyak dilakukan, namun dalam hal ini belum banyak kajian tentang perpindahan panas secara konveksi pada MRF. Sedangkan disisi lain untuk fluida magnet lainnya seperti *ferrofluid*, *nanofluid*, maupun ERF telah banyak melakukan kajian tentang perpindahan panas secara konveksi. Perbandingan berbagai fitur dari MRF dengan ERF maupun ferrofluid menunjukkan bahwa MRF lebih unggul. Mekanisme perhitungan perpindahan panas secara konveksi pada *nanofluid* disajikan sebagai mekanisme perhitungan pada MRF. Hal ini untuk menunjukkan bahwa jika pada *ferrofluid*, *nanofluid*, maupun ERF dapat dilakukan studi tentang perpindahan panas secara konveksi, maka pada MRF juga dapat dilakukan kajian yang sama.

### Daftar Pustaka:

- [1] J. Wang and G. Meng, "Magnetorheological fluid devices: Principles, characteristics and applications in mechanical engineering," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 215, no. 3, pp. 165–174, 2001, doi: 10.1243/14644200111545012.
- [2] J. De Vicente, D. J. Klingenberg, and R. Hidalgo-Alvarez, "Magnetorheological fluids: A review," *Soft Matter*, vol. 7, no. 8, pp. 3701–3710, 2011, doi: 10.1039/c0sm01221a.
- [3] B. J. Park, F. F. Fang, and H. J. Choi, "Magnetorheology: Materials and application," *Soft Matter*, vol. 6, no. 21, pp. 5246–5253, 2010, doi: 10.1039/c0sm00014k.
- [4] K.-I. Jang, E. Nam, C.-Y. Lee, J. Seok, and B.-K. Min, "Mechanism of synergetic material removal by electrochemomechanical magnetorheological polishing," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 70, pp. 88–92, 2013, doi: 10.1016/j.ijmactools.2013.03.011.
- [5] H. H. Sim, S. H. Kwon, and H. J. Choi, "Xanthan gum-coated soft magnetic carbonyl iron composite particles and their magnetorheology," *Colloid Polym. Sci.*, vol. 291, no. 4, pp. 963–969, 2013, doi: 10.1007/s00396-012-2816-6.
- [6] G. Yildirim and S. Genc, "Experimental study on heat transfer of the magnetorheological fluids," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 8, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/8/085001.
- [7] A. Spaggiari, "Properties and applications of

- magnetorheological fluids,” *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 23, pp. 57–61, 2012, doi: 10.3221/IGF-ESIS.23.06.
- [8] E. V. Timofeeva, J. L. Routbort, and D. Singh, “Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids,” *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 1, 2009, doi: 10.1063/1.3155999.
- [9] M. S. A. Rahim and I. Ismail, “Review of magnetorheological fluids and nanofluids thermal behaviour,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 100, no. 1, pp. 1–10, 2015, doi: 10.1088/1757-899X/100/1/012040.
- [10] D. Wang, B. Zi, Y. Zeng, Y. Hou, and Q. Meng, “Temperature-dependent material properties of the components of magnetorheological fluids,” *J. Mater. Sci.*, vol. 49, no. 24, pp. 8459–8470, 2014, doi: 10.1007/s10853-014-8556-x.
- [11] Ashour. O.; Rogers. C. A.; Kordonsky. W, “Ashour1996.Pdf,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 7. pp. 123–130, 1996.
- [12] V. K. Sukhwani and H. Hirani, “SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF LOW COST MAGNETORHEOLOGICAL ( MR ) FLUIDS,” vol. 6526, pp. 1–12, 2007, doi: 10.1117/12.720870.
- [13] J. S. Kumar, P. S. Paul, G. Raghunathan, and D. G. Alex, “A review of challenges and solutions in the preparation and use of magnetorheological fluids,” 2019.
- [14] S. Materials and W. Wu, “The strengthening effect of guar gum on the yield stress of magnetorheological fluid,” no. August 2006, 2014, doi: 10.1088/0964-1726/15/4/N04.
- [15] M. S. Cho, S. T. Lim, I. B. Jang, H. J. Choi, and M. S. Jhon, “Encapsulation of Spherical Iron-Particle With PMMA and Its Magnetorheological Particles,” vol. 40, no. 4, pp. 3036–3038, 2004.
- [16] F. M. B. Dearth, “( 12 ) United States Patent,” vol. 1, no. 12, 2002.
- [17] I. B. Jang *et al.*, “Role of organic coating on carbonyl iron suspended particles in magnetorheological fluids Role of organic coating on carbonyl iron suspended particles in magnetorheological fluids,” vol. 912, no. 2005, pp. 8–11, 2014, doi: 10.1063/1.1853835.
- [18] F. Mrfs, “Experimental Study of Stearic Acid Effect on Stabilization of Magnetorheological Experimental Study of Stearic Acid Effect on Stabilization of Magnetorheological Fluids ( MRFs ),” no. February, 2014.
- [19] R. Turczyn and M. Kciuk, “Preparation and study of model magnetorheological fluids,” no. April, 2008.
- [20] O. Access, “Effect of seven different additives on the properties of MR fluids Effect of seven different additives on the properties of MR fluids,” 2009, doi: 10.1088/1742-6596/149/1/012086.
- [21] S. E. Premalatha, R. Chokkalingam, and M. Mahendran, “Magneto Mechanical Properties of Iron Based MR Fluids,” vol. 2, no. 4, pp. 50–55, 2012, doi: 10.5923/j.ajps.20120204.01.
- [22] R. Hills and S. M. Yurgelevic, “( 12 ) United States Patent -A- WITHOUT ADDITIVES,” vol. 2, no. 12, 2003.
- [23] M. J. Hato, H. J. Choi, H. H. Sim, B. O. Park, and S. S. Ray, “Magnetic Carbonyl Iron Suspension with Organoclay Additive and Its Magnetorheological Properties,” pp. 1–33.
- [24] R. Cited and P. E. Bonner, “United States Patent (19),” no. 19, 1997.
- [25] R. T. Foister, “( 12 ) United States Patent,” vol. 1, no. 12, 2002.
- [26] L. A. Powell and N. M. Wereley, “Journal of Intelligent Material Systems and,” no. June, 2013, doi: 10.1177/1045389X13476153.
- [27] C. Sarkar and H. Hirani, “Synthesis and Characterization of Antifriction Magnetorheological Fluids for Brake,” vol. 63, no. 4, pp. 408–412, 2013, doi: 10.14429/dsj.63.2633.
- [28] M. A. Portillo and G. R. Iglesias, “Magnetic Nanoparticles as a Redispersing Additive in Magnetorheological Magnetic Nanoparticles as a Redispersing Additive in,” no. January, 2017, doi: 10.1155/2017/9026219.
- [29] A. Grunwald and A. G. Olabi, “Sensors and Actuators A: Physical Design of magnetorheological ( MR ) valve,” vol. 148, pp. 211–223, 2008, doi: 10.1016/j.sna.2008.07.028.
- [30] M. Mrlík, M. Ilčíková, V. Pavlínek, J. Mosnáček, P. Peer, and P. Filip, “Improved thermooxidation and sedimentation stability of covalently-coated carbonyl iron particles with cholesteryl groups and their influence on magnetorheology,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 396, pp. 146–151, 2013, doi: 10.1016/j.jcis.2013.01.027.
- [31] F. F. Fang, M. S. Yang, and H. J. Choi, “Novel magnetic composite particles of carbonyl iron embedded in polystyrene and their magnetorheological characteristics,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11 PART 2, pp. 4533–4536, 2008, doi: 10.1109/TMAG.2008.2001665.
- [32] H. B. Cheng, L. Zuo, J. H. Song, Q. J. Zhang, and N. M. Wereley, “Magnetorheology and sedimentation behavior of an aqueous suspension of surface modified carbonyl iron particles,” *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 9, pp. 3–6, 2010, doi: 10.1063/1.3358613.
- [33] R. U. S. A. Data, “United States Patent ( 19 ),” vol. M, no. 5, pp. 56–63, 1999.
- [34] I. Y. Forero-Sandoval, A. Vega-Flick, J. J. Alvarado-Gil, and R. A. Medina-Esquivel, “Study of thermal conductivity of magnetorheological fluids using the thermal-

- wave resonant cavity and its relationship with the viscosity,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 2, 2017, doi: 10.1088/1361-665X/26/2/025010.
- [35] M. S. A. Rahim, I. Ismail, S. B. Choi, W. H. Azmi, and S. N. Aqida, “Thermal conductivity enhancement and sedimentation reduction of magnetorheological fluids with nano-sized Cu and Al additives.”
- [36] J. Maroofi and S. H. Hashemabadi, “Experimental and numerical investigation of parameters influencing anisotropic thermal conductivity of magnetorheological fluids,” *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 55, no. 10, pp. 2751–2767, 2019, doi: 10.1007/s00231-019-02618-w.
- [37] V. Sridhara and L. N. Satapathy, “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based nanofluids : a review,” pp. 1–16, 2011.
- [38] Y. H. Julia, J. F. Renaud, D. J. Ferrand, and P. F. Malbrunot, “Device for automatic thermal conductivity measurements,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 48, no. 12, pp. 1654–1657, 1977, doi: 10.1063/1.1134968.
- [39] R. V. Upadhyay, M. S. Pisuwala, K. Parekh, and K. Raj, “Thermal conductivity of flake-shaped iron particles based magnetorheological suspension: Influence of nano-magnetic particle concentration,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 503, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.jmmm.2020.166633.
- [40] A. Ghaffari, S. H. Hashemabadi, and M. Ashtiani, “A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids,” *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 26, no. 8, pp. 881–904, 2015, doi: 10.1177/1045389X14546650.
- [41] E. C. Nsofor, “Recent Patents on Nanofluids (Nanoparticles in Liquids) Heat Transfer,” *Recent Patents Mech. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 190–197, 2010, doi: 10.2174/1874477x10801030190.
- [42] G. H. R. Kefayati, “Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM,” *J. Mol. Liq.*, vol. 191, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1016/j.molliq.2013.11.021.
- [43] E. Aursand, M. A. Gjennestad, K. Y. Lervåg, and H. Lund, “Potential of enhancing a natural convection loop with a thermomagnetically pumped ferrofluid,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 417, no. May, pp. 148–159, 2016, doi: 10.1016/j.jmmm.2016.05.029.
- [44] A. Jadhav and T. Ashta, “ER,” no. February, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.35785.34407.
- [45] A. G. Olabi and A. Grunwald, “Materials & Design Design and application of magnetorheological fluid,” vol. 28, pp. 2658–2664, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.10.009.
- [46] H. N. Yoshikawa, M. Tadie Fogaing, O. Crumeyrolle, and I. Mutabazi, “Dielectrophoretic Rayleigh-Bénard convection under microgravity conditions,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 87, no. 4, pp. 1–7, 2013, doi: 10.1103/PhysRevE.87.043003.
- [47] P. G. Siddheshwar, D. Uma, and S. Bhavya, “Effects of variable viscosity and temperature modulation on linear rayleigh-bénard convection in newtonian dielectric liquid,” *Appl. Math. Mech. (English Ed.)*, vol. 40, no. 11, pp. 1601–1614, 2019, doi: 10.1007/s10483-019-2537-9.
- [48] B. Mahanthesh, S. S. Nagouda, and R. Keerthi, “Rayleigh-Bénard convection in a Rayleigh – B e non-Newtonian dielectric fluid with Maxwell – Cattaneo law under the effect of internal heat generation / consumption,” 2019, doi: 10.1108/MMMS-09-2019-0174.
- [49] X. Q. Wang and A. S. Mujumdar, “Heat transfer characteristics of nanofluids: a review,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–19, 2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010.
- [50] G. Polidori, S. Fohanno, and C. T. Nguyen, “A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 46, no. 8, pp. 739–744, 2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.11.009.
- [51] Y. Yang, Z. G. Zhang, E. A. Grulke, W. B. Anderson, and G. Wu, “Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 6, pp. 1107–1116, 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.09.038.
- [52] J. D. Carlson, “Journal of Intelligent Material Systems and Structures What Makes a Good MR Fluid?,” 2002, doi: 10.1106/104538902028221.
- [53] M. R. Jolly, J. W. Bender, J. D. Carlson, and Lord Drive, “Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids.”
- [54] Sunil, A. Sharma, and R. G. Shandil, “Effect of magnetic field dependent viscosity on ferroconvection in the presence of dust particles,” *J. Appl. Math. Comput.*, vol. 27, no. 1–2, pp. 7–22, 2008, doi: 10.1007/s12190-008-0055-2.
- [55] M. S. Krakov and I. V. Nikiforov, “To the influence of uniform magnetic field on thermomagnetic convection in square cavity,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 252, no. 1-3 SPEC. ISS., pp. 209–211, 2002, doi: 10.1016/S0304-8853(02)00653-4.
- [56] R. Ganguly, S. Sen, and I. K. Puri, “Thermomagnetic convection in a square enclosure using a line dipole,” *Phys. Fluids*, vol. 16, no. 7, pp. 2228–2236, 2004, doi: 10.1063/1.1736691.
- [57] M. Lee and Y. J. Kim, “Thermomagnetic convection of ferrofluid in an enclosure channel with an internal magnetic field,” *Micromachines*, vol. 10, no. 9, pp. 2–9, 2019, doi: 10.3390/mi10090553.
- [58] F. Selimefendigil and A. J. Chamkha,

- “Ferrofluid convection in a lid-driven cavity,” *Defect Diffus. Forum*, vol. 388, pp. 407–419, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.388.407.
- [59] S. M. Aminossadati and B. Ghasemi, “Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure,” *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 28, no. 5, pp. 630–640, 2009, doi: 10.1016/j.euromechflu.2009.05.006.
- [60] H. C. Brinkman, “The viscosity of concentrated suspensions and solutions,” *J. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 4, p. 571, 1952, doi: 10.1063/1.1700493.
- [61] Y. Xu, X. Gong, Q. Wan, T. Liu, and S. Xuan, “Magneto-sensitive smart soft material and magnetorheological mechanism,” *Adv. Mech.*, vol. 45, no. 1, pp. 461–495, 2015, doi: 10.6052/1000-0992-15-010.