

STUDENTS' UNDERSTANDING OF FUNDAMENTAL CONCEPTS OF MECHANICAL WAVE

PEMAHAMAN MAHASISWA TENTANG KONSEP-KONSEP DASAR GELOMBANG MEKANIK

Sutopo

Jurusan Fisika Universitas Negeri Malang, Indonesia

Diterima: 12 Oktober 2015. Disetujui: 28 Desember 2015. Dipublikasikan: Januari 2016

ABSTRAK

Kontras dengan topik gaya dan gerak, kesulitan siswa terkait konsep-konsep yang melandasi fenomena perambatan gelombang masih kurang mendapatkan perhatian para peneliti pendidikan fisika. Artikel ini mengangkat kesulitan umum yang dialami mahasiswa dalam memecahkan masalah konseptual terkait fenomena perambatan gelombang. Subjek penelitian terdiri atas 128 mahasiswa tahun pertama jurusan fisika UM yang mengikuti perkuliahan Fisika Dasar II tahun akademik 2013/2014. Analisis dilakukan berdasarkan jawaban mahasiswa terhadap soal pilihan ganda dan tingkat keyakinan mahasiswa terhadap ketepatan jawabannya. Penelitian menyimpulkan bahwa konsep-konsep fundamental yang meliputi representasi matematis tentang karakteristik umum gelombang berjalan, gerakan partikel medium saat dilewati gelombang, dan hubungan $v = \lambda f$, belum dipahami dengan baik oleh sebagian besar mahasiswa; bahkan banyak mahasiswa yang terindikasi mengalami miskonsepsi. Disarankan untuk dilakukan penelitian lanjutan untuk mengeksplorasi lebih dalam dan lebih outentik penyebab kesulitan tersebut, misalnya menggunakan teknik *think aloud* atau interview klinis.

ABSTRACT

Contrast to force and motion concepts, students' difficulties related to physics concepts underlying mechanical wave propagation has getting less attention in physics education research. This study exposed common students' difficulties in solving conceptual problems related to mechanical wave propagation. Subject consisted of 128 first-year students in physics department of UM, enrolling the Introductory Physics II in 2013/2014 academic year. Data was gathered using two-tier, multiple choices test with Confidence Scale Rating. The study concluded that some fundamental concepts of wave such as general mathematical representation of wave propagation, motion of medium particles, and the relationship of $v = \lambda f$, were not well understood by most students; even many students hold misconceptions. The study suggested further research to explore the causes of student's difficulties more authentically, for example, using think aloud or clinical interview methods.

© 2016 Jurusan Fisika FMIPA UNNES Semarang

Keywords: misconception, conceptual understanding, mechanical wave propagation.

PENDAHULUAN

Salah satu tujuan penting pembelajaran fisika adalah mengantarkan siswa memahami secara mendalam konsep-konsep dasar dalam fisika sehingga mampu menerapkannya untuk

memecahkan masalah. Oleh karena itu, selama beberapa dekade terakhir banyak peneliti pendidikan fisika yang mecurahkan perhatiannya pada upaya tersebut. Secara umum, penelitian dalam bidang ini dikelompokkan menjadi tiga topik besar, yaitu mengidentifikasi miskonsepsi yang sering terjadi di kalangan siswa, mengembangkan dan mengevaluasi pembelajaran untuk mengatasi miskonsepsi,

*Alamat Korespondensi:
Jl. Semarang No 5 Malang
E-mail: sutopo.fisika@um.ac.id

dan menjelaskan struktur pengetahuan dalam memori siswa (Dockett & Mestre, 2014). Di antara ketiga topik tersebut, penelitian tentang miskonsepsi, atau pemahaman konseptual siswa secara umum, merupakan yang paling banyak dilakukan. Namun demikian, sebagian besar penelitian pada area ini difokuskan dalam bidang mekanika Newtonian. Sebagian peneliti mengungkap kesulitan siswa tentang kinematika (Trowbridge & McDermott, 1980, 1981; McDermott et al., 1987, Sutopo et al., 2012) atau mekanika (Halloun & Hestenes, 1985, 1985a, Rosenblatt & Heckler, 2011), sebagian lainnya mengembangkan instrumen untuk mengungkap pemahaman siswa, seperti *Force Concept Inventory* (Hestenes et al., 1992), *Mechanics Baseline Test* (Hestenes & Wells, 1992), dan *Force and Motion Conceptual Evaluation* (Sokoloff & Thornton, 1998).

Besarnya perhatian para peneliti pada bidang mekanika Newtonian didasari oleh pemikiran bahwa mekanika Newtonian merupakan cabang fisika yang sangat esensial sekaligus sebagai dasar mempelajari cabang fisika lainnya. Dalam konteks ini, Hestenes & Well (1992) mengklaim jika siswa telah menguasai mekanika Newtonian dengan baik maka mereka akan mudah mempelajari cabang fisika lainnya; sebaliknya siswa yang banyak mengalami miskonsepsi tentang mekanika Newtonian hampir dipastikan akan mengalami kesulitan dalam mempelajari topik-topik fisika lanjut.

Kontras dengan penelitian pada topik mekanika Newtonian, penelitian pada topik gelombang masih kurang menjadi perhatian peneliti. Barangkali belum banyak yang menyadari bahwa kokohnya pemahaman siswa tentang konsep-konsep gelombang sama pentingnya dengan pemahaman siswa dalam bidang mekanika. Penguasaan yang baik atas konsep-konsep gelombang sangat diperlukan untuk mempelajari topik-topik fisika lainnya seperti bunyi, cahaya, listrik-magnet, dan mekanika kuantum. Bahkan konsep-konsep gelombang juga diperlukan untuk mempelajari spektroskopi dan seismologi. Oleh karena itu, penguasaan siswa terhadap konsep-konsep gelombang perlu mendapatkan perhatian para pendidik dan peneliti sebagaimana terhadap konsep-konsep dalam mekanika.

Meskipun penelitian terkait topik gelombang mekanik belum banyak dilakukan, beberapa penelitian di bidang ini telah menghasilkan sumbangan pengetahuan penting antara lain sebagai berikut. Wittmann et al. (1999)

mengungkap kesulitan siswa dalam menentukan besaran apa yang nilainya bergantung pada cara suatu gelombang dibangkitkan dan besaran apa yang nilainya bergantung pada karakteristik medium di mana gelombang merambat. Caleon dan Subramaniam (2010) mengembangkan tes diagnostik untuk mengungkap pemahaman siswa tentang karakteristik gelombang berjalan. Tongchai et al. (2009, 2011) mengembangkan instrumen *Mechanical Waves Conceptual Survey* untuk mengungkap pemahaman siswa sekaligus miskonsepsi yang umum dialami siswa terkait gelombang mekanik. Kryjevskaja et al. (2011, 2012) menyelidiki pemahaman siswa tentang perilaku gelombang ketika menjumpai permukaan batas antara dua medium yang berbeda, termasuk hubungan antara frekuensi, panjang gelombang, dan cepat rambat gelombang. Peneliti tersebut juga menyelidiki bagaimana siswa menerapkan hubungan $v = \lambda f$ untuk memecahkan persoalan interferensi gelombang, baik pada interferensi dari dua sumber gelombang maupun interferensi pada lapisan tipis (Kryjevskaja et al., 2013). Terkait pembelajaran gelombang, Fazio et al. (2008) merancang dan mengevaluasi pembelajaran perambatan gelombang mekanik dan peranan medium dalam perambatan gelombang; Zeng et al. (2014) mengembangkan bahan ajar yang dilengkapi ilustrasi gerakan partikel udara untuk membantu siswa memahami fenomena gelombang diam di dalam pipa.

Berdasarkan paparan di depan, pemahaman siswa tentang hubungan $v = \lambda f$ merupakan isu yang banyak diperhatikan para peneliti. Ini mengindikasikan bahwa hubungan tersebut sangat penting untuk dipahami dengan baik oleh siswa. Namun, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa hubungan tersebut sering dipahami secara salah oleh sebagian besar siswa. Dalam konteks Indonesia, hal itu selaras dengan pengalaman penulis selama mengampu matakuliah fisika dasar serta berinteraksi dengan para guru. Pada umumnya, siswa maupun guru dapat menyebutkan rumusan tersebut dengan cepat dan benar. Namun, setelah diajukan pertanyaan lanjutan, pada umumnya siswa/guru kurang memahami rumusan tersebut dengan baik. Mereka belum memiliki pemahaman yang benar bahwa frekuensi gelombang ditentukan oleh cara gelombang dibangkitkan (besarnya sama dengan frekuensi getaran sumber gelombang), cepat rambat gelombang hanya ditentukan oleh ka-

rakteristik medium, dan panjang gelombang ditentukan oleh keduanya sehingga memenuhi hubungan $v = \lambda f$. Salah satu tujuan artikel ini adalah untuk mendeskripsikan pemahaman siswa tentang hubungan itu.

Selain hubungan $v = \lambda f$, artikel ini juga akan mengungkapkan pemahaman siswa tentang bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan, yaitu: jika bentuk gelombang pada $t = 0$ dapat dinyatakan dengan fungsi $f(x)$, maka bentuk gelombang pada sebarang $t > 0$ adalah $y(x, t) = f(x \mp vt)$ dengan v menyatakan cepat rambat gelombang dan tanda $(-/+)$ digunakan jika gelombang merambat ke (kanan/kiri) (Serway & Jewett, 2010). Sejauh ini pemahaman siswa tentang representasi tersebut belum mendapatkan perhatian para peneliti. Di pihak lain, representasi tersebut penting dipahami siswa agar dapat memahami konsep gelombang secara lengkap sehingga dapat membedakan gelombang berjalan dengan gelombang stasioner, misalnya.

Pemahaman siswa tentang gerakan partikel medium juga belum banyak menjadi perhatian peneliti sebelumnya. Sebagaimana diketahui, ada dua macam gerak (berarti juga dua macam kecepatan) dalam perambatan gelombang mekanik, yaitu kecepatan rambatan gelombang dan kecepatan gerakan partikel medium saat dilalui gelombang. Oleh sebab itu, penting mengetahui sejauh mana mahasiswa memahami kedua macam kecepatan tersebut.

Isu lain yang belum mendapat perhatian peneliti sebelumnya adalah kemampuan siswa menggunakan multi representasi untuk mendeskripsikan perambatan gelombang. Kemampuan menggunakan multi representasi dipandang sebagai kunci dalam memahami konsep fisika (Kohl et al., 2007). Beberapa peneliti mengklaim bahwa pemahaman siswa tentang suatu konsep atau prinsip hanya dapat dikatakan kuat jika siswa mampu memahami berbagai representasi tentang konsep/prinsip tersebut, mampu mengubah satu bentuk representasi ke bentuk representasi lainnya, serta mampu menggunakan multi representasi secara koordinatif (Hubber et al., 2010; Prain et al., 2009; Sutopo & Waldrip, 2014). Kemampuan representasi siswa dapat diungkap dengan menggunakan soal-soal yang dikemas dalam format representasi yang berbeda.

Artikel ini dimaksudkan untuk mengungkapkan pemahaman mahasiswa tentang konsep-konsep fundamental pada topik gelombang mekanik sebagaimana telah disinggung di depan, meliputi bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan, gerakan partikel medium saat dilewati gelombang, dan hu-

ubungan $v = \lambda f$. Khusus tentang hubungan $v = \lambda f$, pemahaman mahasiswa diungkap dengan menggunakan soal yang disajikan dalam beberapa konteks dan format representasi yang berbeda-beda.

METODE

Subjek penelitian ini adalah mahasiswa S-1 tahun pertama Jurusan Fisika FMIPA UM yang sedang menempuh matakuliah Fisika Dasar II pada tahun akademik 2013/2014. Salah satu topik yang dibahas pada perkuliahan ini adalah gelombang mekanik. Sesuai kurikulum yang berlaku di Jurusan Fisika UM, pembahasan topik gelombang pada matakuliah Fisika Dasar II ditekankan pada aspek kualitatif di mana matematika digunakan lebih sebagai alat bantu untuk merepresentasikan hasil pengamatan atau penalaran mahasiswa tentang fenomena gelombang dalam bentuk persamaan matematis; bukan untuk menurunkan persamaan gelombang dengan pendekatan formal-matematis, misalnya dengan menggunakan kalkulus (persamaan diferensial). Pendekatan formal-matematis tersebut diterapkan pada matakuliah lanjut yang khusus mendalami gelombang, yaitu matakuliah Gelombang dan Optik.

Jumlah responden sebanyak 128 mahasiswa yang terdiri atas 64 mahasiswa program studi fisika dan 64 mahasiswa program studi pendidikan fisika. Mereka tersebar dalam empat kelas perkuliahan yang dibina oleh tiga dosen berbeda. Ketiga dosen tersebut menggunakan buku Serway & Jewett (2010) sebagai acuan utama namun dengan strategi mengajar yang tidak harus sama, sesuai gaya mengajarnya masing-masing. Ada dosen yang menggunakan PheT (<https://phet.colorado.edu>) dan animasi grafik dengan bantuan Excel dalam menjelaskan perilaku gelombang. Selain melalui perkuliahan di kelas, mahasiswa juga mempelajari topik gelombang melalui kegiatan praktikum di laboratorium. Salah satu topik praktikumnya adalah percobaan Melde.

Data yang dibahas pada artikel ini diperoleh melalui ujian dalam semester yang dilakukan setelah semua kelas selesai membahas topik gelombang dan bunyi. Soal ujian terdiri atas 15 pertanyaan bentuk pilihan ganda dan empat pertanyaan bentuk esay. Namun demikian, artikel ini hanya membahas jawaban mahasiswa terhadap pertanyaan-pertanyaan yang sesuai dengan fokus penelitian ini sebagaimana telah disebutkan di depan. Butir-butir soal yang dimaksud dipaparkan pada bagian selanjutnya.

Tabel 1. Rubrik tingkat pemahaman siswa berdasarkan ketepatan jawaban dan tingkat keyakinan

Ketepatan jawaban	Tingkat pemahaman berdasarkan skor keyakinan			
	3	2	1	0
Benar	Sangat baik	cukup	lemah	lemah
Salah	miskonsepsi	lemah	lemah	lemah

(diadaptasi dari Potgieter et al. (2010))

Dalam menjawab pertanyaan pilihan ganda, mahasiswa juga diminta memberikan skor tingkat keyakinan akan ketepatan jawaban yang diberikan dengan menggunakan skala Likert 0 sampai 3. Skor 0 menyatakan sangat tidak yakin (sekedar menebak), sedangkan skor 3 menyatakan sangat yakin akan ketepatan jawabannya. Skor 1 dan 2 menyatakan tingkat keyakinan di antara dua ekstrim tersebut. Kombinasi antara ketepatan jawaban dan tingkat keyakinan atas ketepatan jawaban tersebut selanjutnya digunakan untuk menyatakan tingkat pemahaman mahasiswa terhadap konsep-konsep yang melandasi suatu pertanyaan (lihat Tabel 1). Sebagai contoh, mahasiswa yang menjawab benar dengan skor keyakinan 3 dimaknai telah memahami dengan baik konsep yang mendasari pertanyaan tersebut. Sebaliknya mahasiswa yang menjawab salah tetapi memberikan skor 3 (sangat yakin) akan ketepatan jawabannya dimaknai terindikasi mengalami miskonsepsi. Metode *two-tier* seperti itu telah digunakan oleh beberapa peneliti sebelumnya untuk mengungkap pemahaman konseptual siswa; misalnya Chang et al. (2007) dan Potgieter et al. (2010).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemahaman Mahasiswa tentang Bentuk Umum Representasi Matematis Gelombang Berjalan

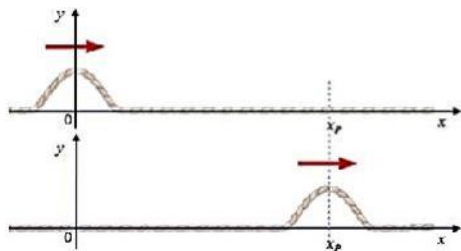
Butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan disajikan pada Gambar 1. Distribusi jawaban mahasiswa beserta tingkat pemahamannya disajikan pada Tabel 2. Jawaban yang tepat atas pertanyaan ini adalah pilihan C. Berdasarkan data tersebut, hanya 1,6% mahasiswa yang memiliki pemahaman sangat baik tentang bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan. Sebagian besar pemahaman mahasiswa dalam kategori lemah (81%), bahkan 14% mahasiswa terindikasi mengalami miskonsepsi.

Untuk dapat menjawab dengan benar pertanyaan tersebut, mahasiswa dituntut (1) mampu mengaktifasi pengetahuan mereka tentang definisi kecepatan dan mengguna-

kannya untuk menentukan cepat rambat gelombang berdasarkan grafik yang diberikan, yaitu $v = x_p/t'$ ke kanan; (2) mampu mengaktifasi pengetahuan tentang bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan, yaitu $y(x,t) = y(x \mp vt, 0)$ dengan tanda (-) dan (+) masing-masing harus digunakan untuk gelombang yang merambat ke kanan dan ke kiri. Seperti ditunjukkan pada Tabel 2, hanya sekitar 19% mahasiswa yang jawabannya benar; itupun hanya 1,6% mahasiswa yang yakin atas ketepatan jawabannya.

Mahasiswa yang memilih A berarti tidak menggunakan kedua pengetahuan prasarat sebagaimana dikemukakan di depan. Merujuk pada teori *resource* (Docktor & Mestre, 2014; Hammer, 2000), ada beberapa kemungkinan penyebabnya. Pertama, mereka mengetahui bahwa soal yang dihadapinya terkait dengan gelombang berjalan, tetapi gagal mengaktifasi pengetahuannya tentang bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan dari memori jangka panjangnya. Kedua, mereka telah berhasil mengaktifasi pengetahuan itu namun tidak dapat menerapkannya. Kedua kemungkinan tersebut menyebabkan mereka ragu akan kebenaran jawabannya. Sebab ketiga, alih-alih mengaktifasi bentuk umum representasi matematis, mereka mengaktifasi pengetahuan lain yang dia yakini cocok dengan persoalan ini. Mereka hanya mengganti x pada fungsi $y(x,0) = Ae^{-\alpha x^2}$ dengan x_p . Karena pemikiran itu menghasilkan jawaban yang tersedia di pilihan, mereka yakin bahwa cara tersebut tepat untuk memecahkan persoalan ini.

Mahasiswa yang memilih D dan E telah berhasil mengaktifasi bentuk umum representasi matematis gelombang berjalan, namun tidak dapat menerapkannya dengan benar, khususnya dalam menentukan besarnya cepat rambat pulsa. Khusus yang memilih D berarti juga salah dalam menggunakan tanda kecepatan (+/-). Mahasiswa yang menjawab B berarti sudah dapat mengaktifasi pengetahuan yang diperlukan dan telah mampu menentukan kecepatan rambatan pulsa, namun salah dalam menentukan tanda kecepatan. Diduga kuat bahwa mahasiswa yang salah dalam



Gambar di samping menunjukkan gerakan pulsa pada seutas tali yang dibentangkan.

Atas: bentuk tali pada saat pengamatan dimulai ($t = 0$ s).

Bawah: bentuk tali beberapa saat kemudian (pada $t = t'$ s), yaitu ketika puncak pulsa tepat sampai di x_p .

Jika pada $t = 0$ s bentuk pulsa dinyatakan sebagai fungsi $y(x, 0) = Ae^{-\alpha x^2}$ dengan A dan α suatu tetapan positif, maka bentuk pulsa pada $t = t'$ s dinyatakan sebagai fungsi

- A. $y(x, t') = Ae^{-\alpha(x+x_p)^2}$
- B. $y(x, t') = Ae^{-\alpha(x-x_p)^2}$
- C. $y(x, t') = Ae^{-\alpha(x-x_p)^2}$
- D. $y(x, t') = Ae^{-\alpha(x+vt')^2}$, dengan v belum bisa ditentukan berdasarkan informasi yang tersedia
- E. $y(x, t') = Ae^{-\alpha(x-vt')^2}$, dengan v belum bisa ditentukan berdasarkan informasi yang tersedia
- F. Bukan yang disebut di pilihan A sampai E

Gambar 1. Butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang representasi matematis gelombang berjalan

Tabel 2. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa terkait pertanyaan pada Gambar 1

Pilihan	Distribusi jawaban		Mahasiswa yang miskonsepsi (N)	Distribusi tingkat pemahaman		
	Keseluruhan mahasiswa N	%		Tingkat pemahaman	N	(%)
A	14	10,9	3	bagus	2	1,6
B	24	18,8	4	cukup	4	3,1
C*	23	18,0	-	lemah	104	81,2
D	21	16,4	2	miskonsepsi	18	14,1
E	37	28,9	9			
F	6	4,7				
kosong	3	2,3				
Total	128	100	18		128	100

*Kunci jawaban

menentukan tanda kecepatan tersebut akibat telah mendalamnya pengetahuan mereka tentang tanda kecepatan dalam kinematika partikel, yaitu (+) menyatakan ke kanan dan (-) menyatakan ke kiri. Seperti terlihat pada Tabel 2, sebagian siswa yang memilih B, D, maupun E merasa yakin atas ketepatan pemikirannya.

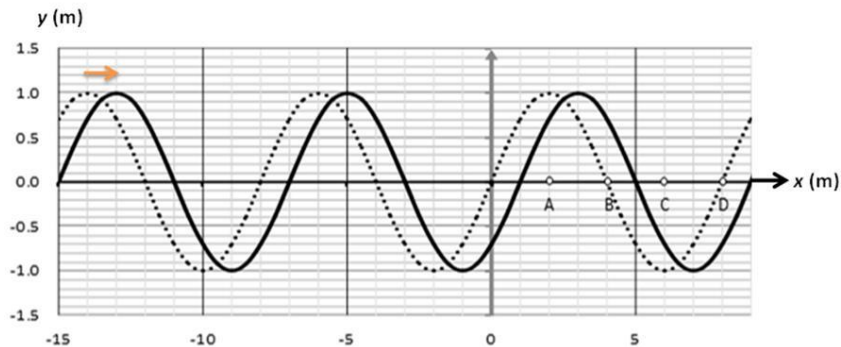
Pemahaman Mahasiswa tentang Gerakan Partikel Medium

Pertanyaan untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang gerakan partikel medium saat dilalui gelombang transversal disajikan pada Gambar 2. Distribusi jawaban mahasiswa beserta tingkat pemahamannya disajikan pada Tabel 3. Jawaban yang tepat atas pertanyaan ini adalah pilihan B. Berdasarkan data tersebut tampak bahwa hanya sekitar 6% mahasiswa yang memiliki pemahaman sangat baik tentang gerakan partikel medium. Sebagian besar pemahaman mahasiswa dalam kategori lemah ($\approx 51\%$), bahkan

35% mahasiswa terindikasi mengalami miskonsepsi.

Untuk dapat menjawab dengan benar pertanyaan tersebut, mahasiswa dituntut mampu (1) mengaktivasi pengetahuan mereka tentang hakekat gelombang mekanik, yaitu perpindahan energi mekanik melalui suatu medium tanpa diikuti perpindahan partikel-partikel medium, (2) mengaktivasi pengetahuan bahwa dalam perambatan gelombang mekanik ada dua macam kecepatan, yaitu kecepatan perambatan gelombang dan kecepatan gerakan partikel medium, (3) mengaktivasi dan menerapkan konsep kecepatan sebagai perubahan posisi, atau mengaktivasi pengetahuan empirik tentang gerakan partikel medium, dan (4) membaca representasi grafik gelombang berjalan. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel3, hanya sekitar 19% mahasiswa yang pilihannya benar, itupun hanya sekitar 1/3-nya yang yakin atas jawabannya. Bahkan, sebagian besar mahasiswa (35%) terindikasi mengalami miskonsepsi, dengan jawaban yang tersebar di semua pilihan yang salah.

Gambar di bawah menyatakan foto sesaat, masing-masing pada $t = 0$ s (kurva titik-titik) dan $t = 0,5$ s (kurva tebal), keadaan tali yang dilewati gelombang transversal berjalan ke kanan.



Di antara empat titik pada tali yang ditandai dengan A, B, C, dan D, titik manakah yang pada $t = 0$ s sedang bergerak ke atas dengan kelajuan paling besar?

A. A B. B C. C D. D E. tidak ada, semuanya bergerak ke kanan dengan laju yang sama

Gambar 2. Butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang gerakan partikel medium

Tabel 3. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa terkait pertanyaan pada Gambar 2

Pilihan	Distribusi jawaban			Distribusi tingkat pemahaman		
	Keseluruhan mahasiswa		Mahasiswa yang miskonsepsi (N)	Tingkat pemahaman	N	(%)
	N	%				
A	19	14,8	3	Bagus	8	6,3
B*	24	18,8	-	Cukup	9	7,0
C	20	15,6	12	Lemah	66	51,5
D	31	24,2	17	miskonsepsi	45	35,3
E	33	25,8	13			
kosong	1	0,8				
Total	128	100	45	Total	128	100

*Kunci jawaban

Pilihan jawaban salah E paling banyak dipilih mahasiswa (33 dari 128 mahasiswa, atau sekitar 26%); bahkan 13 di antaranya sangat yakin dengan jawabannya. Ini menunjukkan bahwa sebagian besar mahasiswa berfikir semua partikel medium bergerak bersama-sama dengan arah dan besar kecepatan yang sama dengan perambatan gelombang. Dengan kata lain, mereka gagal mengaktifkan pengetahuan mereka bahwa gelombang merupakan fenomena perambatan energi yang tidak disertai dengan perpindahan medium, atau bahkan mengalami miskonsepsi bahwa semua partikel dalam medium akan bergerak mengikuti gerakan gelombang.

Porsi jawaban salah terbanyak kedua adalah pilihan salah D, yaitu 31 dari 128 mahasiswa (sekitar 24%); bahkan 17 (sekitar 55%) di antaranya sangat yakin dengan jawabannya. Ada beberapa kemungkinan penyebabnya. Pertama, mereka menerapkan

konsep kecepatan sebagai gradien kurva dalam konteks yang salah. Berdasarkan grafik yang diberikan, gradien kurva di titik D memang bertanda positif dengan nilai paling besar. Namun, mahasiswa gagal mengaktifkan pengetahuan tentang kapan definisi operasional kecepatan tersebut diberlakukan, yaitu pada grafik posisi terhadap waktu. Kemungkinan kedua, perhatian mahasiswa tertuju pada titik-titik di kanan D dan mendapati bahwa titik-titik tersebut berada di atas titik D. Karena mereka berfikir bahwa gelombang bergerak ke kanan, maka partikel di titik D akan naik. Jika pemikiran ini yang digunakan, berarti mahasiswa tersebut berpikir bahwa partikel-partikel medium bergerak mengikuti arah gerakan gelombang, bukan naik-turun di sekitar posisinya. Kemungkinan ketiga, mereka telah mengaktifkan pengetahuan bahwa partikel-partikel medium berosilasi naik-turun di sekitar posisi setimbangnya, serta mengetahui bahwa titik D

berada di posisi setimbang; karena itu kecepatannya paling besar sebagaimana yang terjadi pada gerak osilasi. Namun, mahasiswa tersebut ragu ke arah mana gerakan titik D saat itu, sedang naik atau turun.

Jawaban salah yang dipilih mahasiswa dengan porsi terbesar berikutnya adalah C. Mahasiswa yang memilih jawaban ini diduga kuat telah menggunakan intuisi yang salah bahwa titik-titik yang berada di puncak/lembah gelombang memiliki kecepatan paling besar karena posisinya paling jauh dari titik setimbangnya. Mereka berpikir bahwa semakin jauh posisi partikel dari titik setimbangnya, semakin keras usahanya untuk dapat kembali ke posisi setimbangnya dengan segera. Dugaan ini diperkuat oleh data bahwa 12 dari 20 mahasiswa yang memilih jawaban C sangat yakin dengan jawabannya. Pemikiran mahasiswa yang memilih jawaban A kurang lebih juga serupa. Bedanya, mahasiswa yang memilih D berfikir bahwa titik D berada posisi teratas, berarti saat itu baru saja bergerak ke atas dengan kecepatan paling besar.

Berdasarkan paparan tersebut disimpulkan bahwa pemahaman mahasiswa tentang gerakan partikel medium masih sangat lemah. Terutama jika persoalan tersebut dihadirkan dalam format representasi grafik seperti yang digunakan pada penelitian ini.

Pemahaman Mahasiswa tentang $v = \lambda f$

Ada tiga butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang hubungan antara frekuensi, panjang gelombang, dan kecepatan rambat gelombang. Butir pertama diberikan dalam konteks perambatan gelombang bunyi dari udara ke air dan dikemas dalam format representasi verbal (Gambar 3). berbeda yang disambung, satu butir soal dikemas dalam format representasi gambar-

verbal (Gambar 4) dan lainnya dalam format representasi gambar-matematis (Gambar 5). Dua butir lainnya diberikan dalam konteks perambatan gelombang melalui dua utas tali

Agar dapat menjawab dengan benar ketiga butir soal tersebut, mahasiswa perlu memiliki pengetahuan-pengetahuan berikut, mampu mengaktivasinya, dan mampu menggunakannya secara tepat. Pengetahuan yang dimaksud adalah (1) frekuensi f , panjang gelombang λ , dan kecepatan rambat gelombang v memenuhi hubungan $\lambda f = v$; (2) frekuensi gelombang ditentukan oleh frekuensi sumber, kecepatan rambat gelombang ditentukan oleh medium, dan panjang gelombang ditentukan oleh frekuensi dan kecepatan rambat gelombang menurut hubungan $\lambda f = v$; (3) kecepatan rambat gelombang mekanik di air lebih besar daripada di udara; dan (4) secara grafik, panjang gelombang merupakan periode spasial, yaitu periode fungsi simpangan y terhadap posisi partikel x ; sedangkan periode temporal, atau biasa disebut periode gelombang, merupakan periode pada grafik simpangan terhadap waktu yang diasosiasikan dengan gerakan partikel medium di suatu titik. Berikut dipaparkan respon mahasiswa terhadap masing-masing butir soal tersebut.

Perambatan bunyi dari udara ke air

Butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang besaran-besaran gelombang apa yang berubah atau tetap ketika gelombang bunyi mengalami pembiasan dari udara ke air disajikan pada Gambar 3. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa disajikan pada Tabel 4. Jawaban yang tepat atas pertanyaan ini adalah pilihan B.

Manakah pernyataan berikut yang benar ketika gelombang bunyi merambat dari udara ke air?

- A. Frekuensinya berkurang dan panjang gelombangnya bertambah panjang.
- B. Frekuensinya tetap dan panjang gelombangnya bertambah panjang.
- C. Frekuensinya tetap dan panjang gelombangnya menjadi lebih pendek.
- D. Freuensinya bertambah dan panjang gelombangnya berkurang.
- E. Frekuensi dan panjang gelombangnya bertambah besar.
- F. Frekuensinya berkurang dan panjang gelombangnya tetap.

Gambar 3. Butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang hubungan dalam konteks perambatan bunyi dari udara ke air

Tabel 4. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa terkait pertanyaan pada Gambar 3

Pilihan	Distribusi jawaban			Distribusi tingkat pemahaman		
	Keseluruhan mahasiswa		Mahasiswa yang miskonsepsi (N)	Tingkat pemahaman	N	(%)
	N	%				
A	42	32,8	17	Bagus	2	1,6
B*	10	7,8	-	Cukup	4	3,1
C	35	27,3	18	Lemah	78	60,9
D	19	14,8	5	miskonsepsi	44	34,4
E	3	2,3	1			
F	15	11,7	3			
kosong	4	3,1	-			
Total	128	100	44		128	100

*Kunci jawaban

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4, hanya 7,8% mahasiswa yang jawabannya benar, itu pun hanya 1,6% yang yakin dengan jawabannya. Lebih dari 60% mahasiswa menunjukkan pemahaman yang lemah, bahkan 44 mahasiswa (sekitar 34%) terindikasi mengalami miskonsepsi. Di antara 44 mahasiswa yang terindikasi mengalami miskonsepsi tersebut, 18 mahasiswa memilih C, 17 mahasiswa memilih A, dan 5 mahasiswa memilih D.

Hanya 45 mahasiswa (sekitar 35%) yang berpendapat bahwa frekuensi gelombang tidak mengalami perubahan pada fenomena tersebut. Itu pun hanya 10 mahasiswa yang menggunakan pengetahuan bahwa panjang gelombang bunyi bertambah besar karena kecepatan rambat bunyi di air lebih besar daripada di udara. Lebih lanjut, hanya dua mahasiswa yang yakin dengan kevalidan argumentasi tersebut. Selain itu, dari 45 mahasiswa yang berpendapat frekuensi gelombang tidak mengalami perubahan, 35 mahasiswa (yang memilih C) berpendapat bahwa kecepatan rambat bunyi di udara lebih besar daripada di air, bahkan lebih dari separohnya (18 mahasiswa) yakin atas kebenaran pengetahuannya tersebut. Dapat diduga bahwa ke-35 mahasiswa tersebut telah melakukan *over-generalization* (Sutopo, 2013), atau salah menerapkan prinsip serupa yang berlaku pada perambatan cahaya, yaitu kecepatan cahaya akan berkurang jika merambat dari udara ke air.

Sebanyak 61 mahasiswa (sekitar 48%), yaitu mahasiswa yang memilih A atau D, berpendapat bahwa kecepatan rambat bunyi tidak mengalami perubahan ketika merambat dari udara ke air. Di antara 61 mahasiswa tersebut, 22 mahasiswa sangat yakin atas pandangan ini. Lebih lanjut, di antara 22 mahasiswa tersebut, 17 mahasiswa sangat yakin bahwa frekuensi gelombang berkurang dan

panjang gelombangnya bertambah; sedangkan 5 mahasiswa lainnya berpandangan sebaliknya, yaitu frekuensinya bertambah dan panjang gelombangnya berkurang.

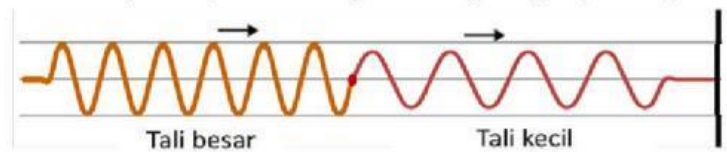
Berdasarkan paparan tersebut disimpulkan bahwa hubungan $\lambda f = v$ belum dipahami dengan baik oleh hampir semua mahasiswa yang terlibat dalam penelitian ini. Sekitar 64% mahasiswa memiliki pemahaman yang sangat lemah, bahkan banyak mahasiswa yang terindikasi mengalami miskonsepsi (34,4%).

Perambatan gelombang melalui dua utas tali yang disambung

Dalam penelitian ini, pemahaman mahasiswa tentang hubungan $\lambda f = v$ juga diungkap melalui butir soal yang dikemas dalam konteks perambatan gelombang melalui dua utas tali berbeda yang disambung (Gambar 4). Kunci jawaban soal ini adalah pilihan B. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa disajikan pada Tabel 5.

Untuk menjawab butir soal ini dengan benar, selain harus memahami dengan baik hubungan $\lambda f = v$, mahasiswa juga harus memahami prinsip-prinsip berikut. (1) Ketika menjumpai medium yang berbeda, gelombang mekanik mengalami pemantulan sebagian, yaitu sebagian dipantulkan dan sebagian diteruskan. (2) Pada peristiwa tersebut, energi yang dibawa gelombang datang harus sama dengan jumlah energi yang dibawa oleh gelombang pantul dan gelombang yang diteruskan. Sebagai konsekuensinya, gelombang yang diteruskan memiliki amplitudo lebih kecil daripada gelombang datang. Selain itu, mahasiswa harus memahami ciri-ciri gelombang teredam dan mampu mengambil informasi dari representasi grafik gelombang berjalan.

Dua utas tali yang berbeda massa jenisnya disambung kemudian dibentangkan dengan tegangan tertentu. Setelah ujung bebas tali besar digetarkan secara sinusoidal beberapa saat, terbentuk gelombang dengan pola seperti pada gambar.



Jika tegangan kedua tali sama besar, manakah pernyataan berikut yang paling sesuai dengan fenomena tersebut?

- Frekuensi gelombang pada tali besar lebih tinggi daripada pada tali kecil.
- Cepat rambat gelombang di tali besar lebih cepat daripada di tali kecil.
- Gelombang mengalami redaman ketika melalui tali kecil.
- Semua pernyataan A, B, dan C benar.
- Pernyataan A dan B benar, sedangkan C salah.
- Pernyataan A dan C benar, sedangkan B salah.

Gambar 4. Butir soal tentang perambatan gelombang melalui dua utas tali yang disambung

Tabel 5. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa terkait pertanyaan pada Gambar 4

Pilihan	Distribusi jawaban			Distribusi tingkat pemahaman		
	Seluruh mahasiswa N	%	Mahasiswa yang miskonsepsi (N)	Tingkat pemahaman	N	(%)
A	18	14,1	4	Bagus	12	9,4
B*	24	18,8	-	Cukup	11	8,6
C	18	14,1	1	Lemah	74	57,8
D	13	10,2	6	miskonsepsi	31	24,2
E	26	20,3	9			
F	26	20,3	11			
kosong	3	2,3	-			
Total	128	100	31	Total	128	100

*Kunci jawaban

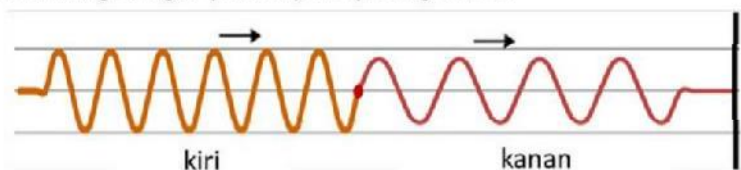
Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5, hanya 24 mahasiswa (sekitar 19%) yang memilih jawaban benar; itu pun hanya separohnya yang yakin dengan ketepatan jawabannya. Sebanyak 31 mahasiswa (sekitar 24%) terindikasi mengalami miskonsepsi tentang konsep-konsep fisika yang melatarbelakangi persoalan yang disajikan.

Delapan puluh tiga mahasiswa (sekitar 65%), yaitu jumlah mahasiswa yang memilih A, D, E atau F, berpendapat bahwa frekuensi gelombang berubah ketika melalui tali yang berbeda, yaitu frekuensi di tali besar lebih tinggi daripada frekuensi di tali kecil. Angka tersebut konsisten dengan jumlah mahasiswa yang menerapkan pemikiran serupa ketika menjawab pertanyaan sebelumnya (Gambar 3), lihat Tabel 4. Di antara ke-83 mahasiswa tersebut, 30 mahasiswa sangat yakin dengan pemikirannya. Selain memiliki pemahaman yang salah bahwa frekuensi gelombang

bergantung medium, mahasiswa tersebut diduga juga salah dalam menafsirkan gambar yang diberikan. Lebih rapatnya rentetan gelombang pada tali besar dibandingkan pada tali kecil dimaknai bahwa gelombang di tali besar memiliki frekuensi lebih tinggi daripada di tali kecil. Mereka lupa, atau tidak memahami, bahwa gambar tersebut merupakan grafik simpangan terhadap posisi, sehingga harus dimaknai bahwa panjang gelombang di tali besar lebih pendek daripada di tali kecil.

Hal lain yang terungkap melalui soal ini adalah adanya sejumlah mahasiswa yang memiliki pemahaman salah tentang pengertian gelombang teredam. Sebanyak 44 mahasiswa (18 memilih C dan 26 memilih F), atau sekitar 34%, memaknai berkurangnya amplitudo gelombang ketika melalui tali kecil menandakan bahwa gelombang mengalami peredaman. Bahkan, 12 dari 44 mahasiswa tersebut sangat yakin dengan pemikirannya itu (Lihat Tabel 5).

Dua utas tali yang berbeda disambung kemudian dibentangkan dengan tegangan tertentu. Ujung bebas tali kiri kemudian digetarkan secara sinusoidal sehingga terjadi gelombang dengan pola seperti pada gambar.



Jika tali kiri diganti dengan tali lain dan percobaan diulang dengan cara yang sama, panjang gelombang baru di tali kiri berubah menjadi 1,5 kali semula. Bagaimana panjang gelombang di tali kanan pada percobaan baru tersebut?

- A. 1,5 kali semula
 B. 2/3 kali semula
 C. Tetap seperti semula
 D. Tidak bisa dipastikan

Gambar 5. Butir soal untuk mengungkap pemahaman mahasiswa tentang hubungan dalam konteks perambatan gelombang melalui dua tali yang disambung

Tabel 6. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa terkait pertanyaan pada Gambar 5

Pilihan	Distribusi jawaban			Distribusi tingkat pemahaman		
	Keseluruhan mahasiswa N	%	Mahasiswa yang miskonsepsi (N)	Tingkat pemahaman	N	(%)
A	37	28,9	6	bagus	4	3,1
B	51	39,8	13	cukup	10	7,8
C*	23	18,0	-	lemah	92	71,9
D	10	7,8	3	miskonsepsi	22	17,2
kosong	7	5,5	-			
Total	128	100	22		128	100

*Kunci jawaban

Ada dua hal yang mungkin menyebabkan mahasiswa berpikir seperti itu. Pertama, mereka lupa, atau tidak memiliki pengetahuan, bahwa suatu gelombang dikatakan teredam jika amplitudonya semakin lama (atau semakin jauh merambat) semakin berkurang; bukan seperti yang ditunjukkan pada soal ini. Kedua, mereka lupa, atau tidak memiliki pengetahuan, bahwa berkurangnya amplitudo ketika gelombang berpindah ke tali kecil merupakan konsekuensi dari prinsip kekekalan energy.

Berdasarkan paparan di depan dapat disimpulkan bahwa sebagian besar mahasiswa (sekitar 65%) belum memiliki pemahaman yang baik tentang hubungan $\lambda f = v$. Temuan ini konsisten dengan respon mahasiswa ketika menjawab persoalan serupa yang disajikan dalam konteks pembiasan gelombang bunyi dari udara ke air, sebagaimana telah dipaparkan pada bagian sebelumnya.

Butir soal kedua terkait konteks perambatan gelombang melalui dua tali yang disam-

bung disajikan pada Gambar 5. Kunci jawaban soal tersebut adalah pilihan C. Distribusi jawaban dan tingkat pemahaman mahasiswa disajikan pada Tabel 6. Seperti pada kedua soal sebelumnya, agar dapat menjawab pertanyaan ini dengan benar, mahasiswa harus memahami dengan baik hubungan $\lambda f = v$ serta menyadari bahwa kedua percobaan dilakukan dengan frekuensi yang sama dan keadaan tali kanan tidak mengalami perubahan apapun selama percobaan.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 6, hanya 23 mahasiswa (18%) yang memberikan jawaban benar, itu pun hanya 4 mahasiswa yang yakin dengan jawabannya. Banyaknya mahasiswa yang menjawab benar hampir sama dengan pada soal sebelumnya (Tabel 5). Lebih dari 80% mahasiswa menunjukkan pemahaman yang kurang baik, sedangkan 17,2% mahasiswa terindikasi mengalami miskonsepsi.

Sebanyak 88 mahasiswa (68,8%) berpendapat bahwa panjang gelombang di tali kanan akan berubah jika tali kiri diganti dengan tali lain. Di antara 88 mahasiswa tersebut, 19 mahasiswa sangat yakin dengan pendapatnya. Tiga puluh tujuh mahasiswa (sekitar 29%) berpendapat bahwa panjang gelombang di tali kanan ikut bertambah sesuai dengan pertambahan panjang gelombang di tali kiri. Tampaknya mahasiswa tersebut berpendapat bahwa kecepatan rambat gelombang di tali kanan harus selalu sama dengan kecepatan di tali kiri. Mereka lupa, atau tidak memahami, bahwa kecepatan rambat gelombang pada suatu medium hanya ditentukan oleh karakteristik medium itu sendiri; jika karakteristiknya tidak berubah maka kecepatan rambat gelombang di dalamnya juga tidak berubah. Di pihak lain, 51 mahasiswa (39,8%) berpendapat sebaliknya, yaitu panjang gelombang di tali kanan harus berkurang untuk mengimbangi pertambahan panjang gelombang di tali kiri. Mereka berpikir bahwa karena percobaan dilakukan dengan cara yang sama maka kecepatan rambat gelombang melalui kedua tali tersebut harus sama pada kedua percobaan tersebut. Konsekuensinya, jika panjang gelombang di tali kiri berubah menjadi $3/2$ kali semula (berarti kecepatannya bertambah menjadi $3/2$ kali semula), panjang gelombang di tali kanan harus berkurang menjadi $2/3$ dari semula sehingga kecepatannya berkurang menjadi $2/3$ semula.

Berdasarkan analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa sebagian besar mahasiswa kurang memahami hubungan $\lambda f = v$ bahkan banyak yang terindikasi mengalami miskonsepsi, sehingga kesulitan dalam menerapkan konsep tersebut untuk memecahkan persoalan. Kesulitan mahasiswa juga bergantung pada konteks persoalan dan format representasi yang digunakan. Soal dengan konteks perambatan bunyi dari udara ke air dan disajikan dalam representasi verbal tampaknya lebih sulit bagi mahasiswa daripada soal dengan konteks perambatan gelombang melalui dua tali yang disambung dan disajikan dalam representasi gambar. Pada tipe soal yang disebut pertama, hanya 10 dari 128 mahasiswa yang menjawab benar, itupun hanya dua mahasiswa yang yakin dengan jawabannya. Di pihak lain, pada tipe soal kedua ada 23-24 mahasiswa yang menjawab benar dengan 4-12 mahasiswa yakin dengan jawabannya.

PENUTUP

Berdasarkan paparan hasil dan pembahasan sebagaimana diuraikan di depan, dapat disimpulkan bahwa konsep-konsep fundamental terkait fenomena perambatan gelombang, meliputi representasi matematis tentang karakteristik umum gelombang berjalan, gerakan partikel medium saat dilewati gelombang, dan hubungan $\lambda f = v$ merupakan konsep-konsep yang sulit dipahami oleh mahasiswa. Meskipun mereka telah mempelajari konsep-konsep tersebut sejak SMP, terutama tentang gerakan partikel medium dan hubungan $\lambda f = v$, juga telah membahasnya kembali melalui perkuliahan fisika dasar di universitas, sebagian besar mahasiswa masih mengalami kesulitan dalam memecahkan persoalan yang dilandasi konsep-konsep tersebut.

Ada beberapa kemungkinan penyebab kegagalan siswa dalam memecahkan persoalan konseptual seperti yang digunakan pada penelitian ini. Pertama, mereka mengalami miskonsepsi dalam arti memahami suatu konsep secara salah namun yakin bahwa konsepsinya (yang salah) tersebut benar. Kedua, mereka telah memiliki semua konsep sains yang berkaitan dengan persoalan yang dipecahkan, namun saat mencoba memecahkan persoalan tersebut mereka gagal mengaktivasi pengetahuan sains yang paling relevan ke dalam *working memory*-nya. Ketiga, mereka berhasil mengaktivasi potongan-potongan pengetahuan sains ke dalam *working memory* namun gagal memilih pengetahuan yang paling relevan dengan persoalan, atau gagal menggunakan pengetahuan-pengetahuan tersebut untuk membuat kesimpulan yang tepat. Keempat, mereka tidak memiliki pengetahuan sains yang relevan sehingga hanya mengandalkan intuisi naifnya.

Pada penelitian ini, analisis terhadap kesulitan mahasiswa dalam memecahkan masalah dilakukan berdasarkan skor tingkat keyakinan mahasiswa terhadap kebenaran jawabannya kemudian dikombinasikan dengan pemikiran hipotetik peneliti saat menyusun pilihan (pengecoh). Oleh karena itu, perlu eksplorasi lebih mendalam dan lebih pasti penyebab kesulitan tersebut. Metode *think aloud* (Hull et al., 2013; Kustusich et al., 2014) atau interview klinis (diSessa, 2007; Russ et al., 2012) mungkin cocok untuk keperluan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Caleon, I. & Subramaniam, R. (2010). Development and application of a three-tier diagnostic test to assess secondary students' understanding of waves. *International Journal of Science Education*, 32 (7), 939–961.
- Chang, H., Chen, J., Guo, C., Chen, C., Chang, C., Lin, S., Su, W., Lain, K., Hsu, S., Lin, J., Chen, C., Cheng, Y., Wang, L., & Tseng, Y. (2007). Investigating primary and secondary students' learning of physics concepts in Taiwan. *International Journal of Science Education*, 29 (4), 465–482.
- diSessa, A. A. (2007). An interactional analysis of clinical interviewing. *Cognition and Instruction*, 25 (4), 523-565
- Docktor, J. L. & Mestre, J. P. (2014). Synthesis of discipline-based education research in physics. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 10, 020119
- Fazio, C., Guastella, I., Sperandeo-Mineo, R. M., & Tarantino, G. (2008). Modelling mechanical wave propagation: Guidelines and experimentation of a teaching-learning sequence. *International Journal of Science Education*, 30 (11), 1491–1530
- Halloun, I. B. & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, 53 (11), 1056-1065.
- Halloun, I. B. & Hestenes, D. (1985a). The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, 53 (11), 1043–1055.
- Hammer, D. (2000). Students resource for learning introductory physics. *American Journal of Physics*, *Physics Education Research Supplement*, 68 (S1), S52–S59.
- Hestenes, D. & Wells, M. (1992). A mechanics baseline test. *The Physics Teacher*, 30 (3), 159–166.
- Hestenes, D., Wells, M. & Schwackhammer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30 (3), 141–158.
- Hubber, P., Tytler, R. & Haslam, F. (2010). Teaching and learning about force with a representational focus: Pedagogy and teacher change. *Research in Science Education*, 40, 5–28.
- Hull, M. M., Kuo, E., Gupta, A. & Elby, A. (2013). Problem-solving rubrics revisited: Attending to the blending of informal conceptual and formal mathematical reasoning. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 9, 010105.
- Kohl, P. B., Rosengrant, D., and Finkelstein, N. D. (2007). Strongly and weakly directed approaches to teaching multiple representation use in physics. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 3, 010108.
- Kryjevskaja, M., Stetzer, M. R., & Heron, P. R. L. (2011). Student understanding of wave behavior at a boundary: The limiting case of reflection at fixed and free ends. *American Journal of Physics*, 75 (9), 508–516.
- Kryjevskaja, M., Stetzer, M. R., & Heron, P. R. L. (2012). Student understanding of wave behavior at a boundary: The relationships among wavelength, propagation speed, and frequency. *American Journal of Physics*, 80 (4), 339–347.
- Kryjevskaja, M., Stetzer, M. R., & Heron, P. R. L. (2013). Student difficulties measuring distances in terms of wavelength: Lack of basic skills or failure to transfer? *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 9, 010106.
- Kustus, M. B., Roundy, D., Dray, T., & Manogue, C. A. (2014). Partial derivative games in thermodynamics: A cognitive task analysis. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 10, 010101.
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L. & van Zee, E.H. (1987). Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics. *American Journal of Physics*, 55, 503–513.
- Potgieter, M., Malatje, E., Gaigher, E., & Venter, E. (2010). Confidence versus performance as an indicator of the presence of alternative conceptions and inadequate problem-solving skills in Mechanics. *International Journal of Science Education*, 32 (11), 1407–1429.
- Prain, V., Tytler, R. & Peterson, S. (2009). Multiple representation in learning about evaporation. *International Journal of Science Education*, 31 (6), 787–808.
- Rosenblatt, R. & Heckler, A. F. (2011). Systematic study of student understanding of the relationships between the directions of force, velocity, and acceleration in one dimension. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 7, 20112.
- Russ, R. S., Lee, V. R., & Sherin, B. L. (2012). Framing in cognitive clinical interviews about intuitive science knowledge: Dynamic student understandings of the discourse interaction. *Science Education*, 96 (4), 537–599.
- Serway, R. A. & Jewett, J. W. (2010). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (8th edition). Brooks and Cole.
- Sokoloff, D. R. & Thornton, R. K. (1998). Assessing student learning of Newton's laws: The force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula. *American Journal of Physics*, 66 (4), 338–352.

- Sutopo & Waldrip, B. (2014). Impact of representational approach on students' reason and conceptual understanding in learning mechanics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 12 (4), 741–765.
- Sutopo (2013). *Kecenderungan over-generalize penggunaan prinsip kolom udara/pipa organa dalam analisis frekuensi sumber bunyi*. Prosiding Seminar Nasional MIPA dan Pembelajarannya, FMIPA UM, 13 Oktober 2013. ISBN: 978-602-97895-6-0, hal. 824-831.
- Sutopo, Liliyasi, Waldrip, B., & Rusdiana, D. (2012). Impact of representational approach on the improvement of students' understanding of acceleration. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 8(2), 161-173.
- Tongchai, A., Sharma, M. M., Johnston, I. D., Arayathanikul, K., Soankwan, C. (2009). Developing, evaluating and demonstrating the use of a conceptual survey in mechanical waves. *International Journal of Science Education*, 31 (18), 2437–2457.
- Tongchai, A., Sharma, M.M., Johnston, I. D., Arayathanikul, K., Soankwan, C. (2011). Consistency of students' conceptions of wave propagation: Findings from a conceptual survey in mechanical waves. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 7, 020101.
- Trowbridge, D. E. & McDermott, L. C. (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American Journal of Physics*, 48 (12), 1020–1028.
- Trowbridge, D. E. & McDermott, L. C. (1981). Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension. *American Journal of Physics*, 49 (3), 242–253.
- Wittmann, M. C., Steinberg, R. N. & Redish, E. F. (1999). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *Physics Teacher*, 37 (1), 15–21.
- Zeng, L., Smith, C., Poelzer, G. H., Rodriguez, J., Corpuz, E., & Yanev, G. (2014). Illustrations and supporting texts for sound standing waves of air columns in pipes in introductory physics textbooks. *Physical Review Special Topics Physics Education Research*, 10, 020110