

Panah Waktu: Sebuah Tinjauan Epistemologi pada Entropi

Marfuatun¹

¹Prodi Pendidikan Kimia, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia
E-mail: afu@uny.ac.id¹



This is an open-access article under the [CC BY-SA](#) license.
Copyright © XXXX by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

Diterima: 24-12-2021

Direview: 24-12-2021

Publikasi: 30-04-2023

Abstrak

Panah waktu merupakan pandangan asimetris terhadap waktu atau waktu hanya punya satu arah saja. Segala sesuatu yang telah dialami menjadi masa lalu yang bersifat tetap dan tidak dapat diubah, serta hanya dapat diakses melalui memori atau dokumentasi yang tertulis. Penjelasan panah waktu dapat dijelaskan melalui pendekatan kimia, yaitu dengan hukum kedua termodinamika. Pada artikel ini penulis mengkaji kaitan antara panah waktu dan entropi dalam tataran epistemologi melalui pendekatan termodinamika, kosmologis, dan psikologis. Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah kajian pustaka dengan menggunakan dokumen, serta artikel jurnal yang relevan. Hasil kajian menunjukkan bahwa berdasarkan hukum kedua termodinamika, waktu menuju kondisi tertentu yang bersifat tidak dapat balik dan hanya menuju masa depan. Berdasarkan pendekatan kosmologis, panah waktu dikaitkan dengan alam semesta yang mengembang seiring waktu. Pada pendekatan psikologis, panah waktu berkaitan dengan penjelasan bahwa manusia mampu mengingat masa lalu dengan baik, namun tidak mampu memprediksi masa depan dengan tepat. Ketiga pandangan panah waktu tersebut dijelaskan melalui konsep entropi bahwa dalam ruang tertutup, entropi akan selalu meningkat sehingga sangat sulit untuk kembali ke kondisi awal yang derajat entropinya lebih kecil.

Kata Kunci: panah waktu; termodinamika; kosmologis; psikologis; entropi

Abstract

The arrow of time is an asymmetric view of time which has only one direction. Everything that has been lived in the past is permanent, so people cannot change and only accessed them through memory or written documentation. The arrow of time can be explained through a chemical approach that is the second law of thermodynamics. This study aims to examines the relationship between the arrow of time and entropy at the epistemological including thermodynamic, cosmological, and psychological approaches. The method is library research, in which data collected from relevant documents and journal articles. The results of the study show, based on the second law of thermodynamics, time leads to certain conditions that are irreversible and only towards the future. Based on the cosmological approach, the arrow of time is associated with the universe expanding over time. In the psychological approach, the arrow of time is related to the explanation that humans can remember the past well but cannot predict the future correctly. The three views of the arrow of time are explained through the concept of entropy that in a closed space the entropy will always increase so it is very difficult to return to the initial condition which has low degree of entropy.

Keyword: time's arrow; thermodynamics; cosmology; psychology; entropy

1. Pendahuluan

Pada tahun 1854, dunia sains gempar dengan pernyataan dari Hermann von Helmholtz, seorang fisikawan Jerman yang mengungkapkan bahwa alam semesta sedang sekarat. Prediksinya tersebut didasarkan pada hukum kedua termodinamika terkait entropi, yaitu bahwa segala sesuatu di alam sedang berjalan ke satu arah menuju keadaan gangguan total atau entropi maksimum (Davies, 2004). Kondisi peningkatan maksimum tersebut diamati dari

kejadian sehari-hari yang menuju ke arah kerusakan. Manusia menjadi semakin tua, perkaratan besi, dan proses pembusukan bahan-bahan organik. Matahari dan bintang-bintang semakin berkurang energinya dan pada titik tertentu akan mengalami kematian dan pada saat itu alam semesta mengalami kehancuran.

Siklus kehidupan selalu sama, lahir, tumbuh, dan akhirnya mati atau muncul kemudian hilang atau rusak. Meskipun pada hukum kimia dinyatakan bahwa materi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan hanya mengalami transformasi bentuk saja. Kenyataannya sangat sedikit reaksi kimia di alam yang prosesnya reversibel. Sebagian besar perubahan di alam merupakan proses irreversibel. Saat kita menyemprotkan parfum, kita tidak bisa mengumpulkan kembali partikel-partikel yang telah menyebar ke dalam botolnya. Saat kita mengamati air secangkir kopi panas, maka lama-lama keduanya akan mencapai suhu kamar dan tidak secara otomatis berlaku sebaliknya. Proses tidak dapat balik tersebut merupakan konsep utama dalam panah waktu.

Panah waktu merupakan pandangan asimetris terhadap waktu atau waktu hanya punya satu arah saja. Segala sesuatu yang telah dijalani menjadi masa lalu yang bersifat tetap dan tidak dapat kita ubah, serta hanya dapat diakses melalui memori atau dokumentasi yang tertulis. Di sisi lain, masa depan terbentang di depan kita dan kita tidak mampu mengaturnya secara tepat. Jikalau kita mampu memprediksinya, hanya sampai batas waktu tertentu dan tidak punya bukti yang mendasarinya. Mayoritas manusia tidak mampu membayangkan arah pergerakan waktu berjalan terbalik menuju masa lalu ataupun berjalan dua arah. Aliran waktu secara unik dan selalu sama menuju ke arah masa depan.

Gagasan tentang panah waktu pertama kali dieksplorasi dan dikembangkan oleh Sir Arthur Eddington, astronom dan fisikawan Inggris pada tahun 1928. Istilah panah waktu pertama kali muncul pada salah bagian buku Eddington (Price, 2013), yaitu sebagai berikut.

“Panah Waktu. Hal yang hebat tentang waktu adalah bahwa ia terus berjalan. Tetapi ini adalah aspek yang kadang-kadang tampaknya cenderung diabaikan oleh fisikawan. Di dunia empat dimensi, peristiwa masa lalu dan masa depan terbentang di hadapan kita seperti di peta. Peristiwa-peristiwa itu ada dalam hubungan spasial dan temporal yang tepat; tetapi tidak ada indikasi bahwa mereka menjalani apa yang digambarkan sebagai "formalitas berlangsung" dan pertanyaan tentang melakukan atau membatalkan tidak muncul. Kita melihat di peta jalan dari masa lalu ke masa depan atau dari masa depan ke masa lalu; tetapi tidak ada papan nama untuk menunjukkan bahwa itu adalah jalan satu arah. Sesuatu harus ditambahkan ke dalam konsepsi geometris yang ada di dunia Minkowski sebelum menjadi gambaran lengkap dunia seperti yang kita kenal”.

Upaya untuk menjelaskan dengan argumen fisik bukti panah waktu dipaparkan dalam kajian di berbagai bidang, terutama berdasarkan pengamatan empiris (Quantum Rubino). Ada tiga hal terkait pengertian panah waktu, yaitu entropi di alam semesta meningkat (panah waktu termodinamika), alam semesta mengembang (panah waktu kosmologis), yang menyebabkan selalu mendahului efeknya (panah waktu kausal).

Panah waktu merupakan pandangan secara makroskopik tentang dunia kita. Fakta menunjukkan bahwa segala sesuatu di dunia menuju ke arah ketidakteraturan dan bukan sebaliknya. Sejauh ini urutan peristiwa irreversibel tersebut berjalan sangat konsisten. Salah satu cara untuk memikirkan panah kosmik waktu adalah dengan menganggap alam semesta sebagai jam raksasa yang perlahan-lahan turun. Jika kita ingin mengubahnya, maka diperlukan energi dan kerja yang besar. Ada dua sifat penting dari irreversibilitas, yaitu pertama, ketika sebuah sistem jauh dari keseimbangan, irreversibilitas mendorong sistem itu maju untuk mengembangkannya seiring berjalannya waktu. Kedua, konsep irreversibilitas dipahami sebagai proses nonlinier, artinya setiap kali suatu sistem berubah menjadi bentuk lain tidak pernah kembali ke keadaan semula di masa depan.

Prinsip yang mendasari proses irreversibel adalah hukum kedua termodinamika yang mengandung dua unsur dasar, negatif dan positif. Pada unsur dasar negatif menyatakan bahwa proses-proses tertentu adalah mustahil (misal, bahwa panas mengalir dari sumber yang panas menuju yang dingin, tidak pernah sebaliknya) dan yang kedua (positif), menyatakan bahwa entropi adalah ciri yang niscaya dari semua sistem yang terisolasi. Pernyataan kedua secara ringkas menyatakan bahwa entropi sistem yang terisolasi tetap konstan atau meningkat seiring

waktu (Hemmo & Shenker, 2016). Hukum kedua ini bisa dibidang hukum yang paling dapat terkenal dalam bidang kimia dan fisika.

Definisi entropi bervariasi. Beberapa definisi menyatakan bahwa entropi mensyaratkan bahwa mesin panas melepaskan sejumlah energi pada suhu yang lebih rendah untuk melakukan pekerjaan. Definisi lain dari entropi adalah ukuran ketidaktersediaan energi sistem untuk melakukan pekerjaan. Yang lain lagi mengatakan entropi adalah ukuran ketidakteraturan; semakin tinggi entropi, semakin besar ketidakteraturan sistem. Definisi entropi yang ketiga inilah yang banyak dipahami oleh khalayak luas. Saat membahas tentang entropi, kita tidak akan terlepas dari bahasan terkait waktu karena semua proses fisik berlangsung dalam suatu rentang waktu tertentu. Keteraturan berubah menjadi ketidakteraturan seiring dengan berjalannya waktu.

Pertanyaan mendasar tentang waktu sendiri adalah terkait keberadaan waktu. Apakah waktu itu memang ada. Ada berbagai pandangan pada kaitan antara panah waktu dan entropi. Kadang kala pandangan terhadap entropi terlihat seperti fokus yang mencerminkan kurangnya pengetahuan tentang keseluruhan sistem. Pada artikel ini, dikaji kaitan antara panah waktu dan entropi dalam tataran epistemologi. Bahasan meliputi fenomena panah waktu, kajian perkembangan entropi, serta keterkaitan panah waktu dan entropi.

2. Metode

Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah penelitian kepustakaan (*library research*). Data kajian berupa data kepustakaan yang membahas terkait konsep panah waktu, serta entropi. Data diperoleh berdasarkan studi literatur yang berupa artikel jurnal, majalah, dan buku yang diperoleh baik secara daring maupun luring. Objek material dari kajian ini adalah pemikiran-pemikiran tentang panah waktu dan entropi. Adapun objek formalnya, sudut pandang kefilosofan, khususnya filsafat sains. Data dianalisis melalui interpretasi dan analisis wacana kritis. Selanjutnya, hasil-hasil analisis disintesis sehingga memberikan informasi terkait proses pemaknaan konsep waktu dari sudut pandang hukum termodinamika, khususnya entropi.

3. Hasil dan Pembahasan

a. Panah Waktu: Hubungan Sains dan Filsafat

Hakikat filsafat dimaknai dalam berbagai pandangan (Firman, 2019). Socrates mendefinisikan filsafat sebagai proses mempertanyakan tentang hakikat alam dan berupaya menjawabnya dengan menggunakan logos/rasio ketimbang mitos. Plato mendefinisikan filsafat sebagai kajian tentang sebab-musabab yang hakiki dari segala sesuatu yang ada. Aristoteles memaknai filsafat sebagai upaya mencari prinsip-prinsip dan penyebab-penyebab bagi berbagai realita yang ada. Cara berpikir filsafat sama dengan cara berpikir sains, perbedaannya hanya pada kegiatan eksperimen. Filsafat tidak melakukan eksperimen, eksplanasi terhadap suatu fenomena dilakukan dengan memformulasi teori umum.

Menurut Aristoteles, filsafat terdiri atas empat cabang ilmu (Djajadi, 2019), yaitu logika sebagai ilmu yang dianggap mendahului filsafat, filsafat teoritis yang mencakup ilmu fisika, matematika dan ilmu metafisika, filsafat praktis yang mencakup ilmu etika dan ilmu ekonomi, dan filsafat poetika (ilmu kesenian). Filsafat dibagi dalam dua buah pertanyaan utama, pertanyaan pertama adalah persoalan tentang sains dan kedua adalah persoalan tentang duduk perkara ilmu yang itu tidak terjawab pada persoalan yang pertama. Berdasarkan hal tersebut, maka hubungan antara filsafat dan sains sangat erat.

Definisi sains merujuk pada kumpulan pengetahuan yang terorganisasi secara sistematis tentang alam fisik dan aktivitas penggalan pengetahuan dengan menggunakan observasi dan eksperimentasi terhadap fenomena alam (Firman, 2019). Filsafat sains menjelaskan tentang bagaimana sains disusun dan dikembangkan. Ada dua hal yang merupakan kajian dasar dalam diskusi ilmiah, yaitu apa itu sains dan bagaimana sains itu disusun dan dikembangkan. Pertanyaan terkait apa dijawab oleh filsafat, sedangkan pertanyaan yang kedua dijawab oleh kajian filsafat sains (Djajadi, 2019).

Ada berbagai pandangan para ahli (filsuf) terkait pengertian filsafat sains (Djajadi, 2019). Menurut Robert Ackerman, filsafat sains adalah suatu tinjauan kritis tentang pendapat-pendapat ilmiah dewasa ini dengan perbandingan terhadap kriteria-kriteria yang dikembangkan dari pendapat-pendapat. Menurut Lewis White Beck, filsafat sains mengkaji dan mengevaluasi metode-metode pemikiran ilmiah, serta mencoba menemukan nilai dan pentingnya upaya ilmiah sebagai suatu keseluruhan. Menurut Cornelius, cabang pengetahuan filsafat yang merupakan telaah sistematis mengenai sains, khususnya metode, konsep, dan praduga, serta letaknya

dalam kerangka umum cabang-cabang pengetahuan intelektual. Menurut Peter Caws, filsafat ilmu adalah bagian dari filsafat yang berusaha melakukan bagi ilmu pengetahuan apa yang dilakukan filsafat pada umumnya untuk seluruh pengalaman manusia. Filsafat melakukan dua macam hal: di satu sisi, ia membangun teori tentang manusia dan alam semesta, dan menawarkannya sebagai dasar untuk kepercayaan dan tindakan; di sisi lain, ia memeriksa secara kritis segala sesuatu yang mungkin ditawarkan sebagai dasar untuk keyakinan atau tindakan, termasuk teorinya sendiri dengan maksud untuk menghilangkan inkonsistensi dan kesalahan.

Terkait dengan waktu, berbagai filsuf mencoba untuk mendefinisikan waktu (Adji, 2010). Pemikiran tentang waktu dipelopori oleh Heraklitos (500 SM) yang menyatakan bahwa garis waktu adalah garis yang terdiri dari momen-momen peristiwa, satu peristiwa akan berbeda dari peristiwa sebelum dan sesudahnya. Artinya, garis waktu bergerak lurus ke depan, tidak pernah berhenti ataupun berbalik. Kemudian, Aristoteles (384 – 348 SM) mengembangkan konsep waktu sebagai ukuran suatu gerakan. Pendapat Aristoteles dilengkapi oleh Rene Descartes yang menyatakan bahwa waktu adalah kesempatan untuk penciptaan kembali. Emmanuel Kant memperkuat pendapat Heraklitos, yaitu peristiwa-peristiwa dalam kehidupan terletak berderet di dalam garis waktu, yang satu terletak sebelum yang lain dan yang lain terletak sesudah yang satu. Hal ini juga diperkuat oleh Gottfried Leibniz yang menganggap bahwa runtutan peristiwa itulah yang disebut dengan waktu. Pada tahun 1924, Hans Reichenbach mendefinisikan waktu menurut hukum sebab akibat, yaitu peristiwa A terjadi sebelum peristiwa B, jika peristiwa A dapat mengakibatkan peristiwa B dan peristiwa B tidak dapat menyebabkan peristiwa A. Berdasarkan pandangan para filsuf tersebut, dapat disimpulkan bahwa waktu bersifat satu arah dan tidak dapat kembali (*irreversible*).

Pandangan terhadap panah waktu berusaha mengungkap apa yang terjadi saat waktu terus menerus berjalan dan bagaimana alam semesta pada satu titik tertentu. Pada dasarnya, hukum alam menyatakan bahwa suatu fenomena simetris dengan waktu, membalikkan waktu dalam persamaan gerak dinamis akan memberikan segala sesuatu yang berjalan mundur. Namun, hal tersebut tidak berlaku dalam hukum kedua termodinamika yang menyatakan bahwa entropi tidak pernah mengalami penurunan, kecuali hanya dalam hitungan statistik dan terjadi secara singkat. Entropi menyatakan bahwa proses di alam berkembang dari keteraturan ke kekacauan. Entropi meningkat dalam sistem irreversibel dan sifat dasar alam ini dapat dijelaskan dengan panah waktu (Altekar, 1998).

Fakta kehidupan menunjukkan bahwa kita memang hidup di alam semesta yang asimetris, mayoritas kejadian hidup menuju ke satu arah, yaitu ke depan dan tidak dapat memutar kembali waktu yang lampau. Hidup bersifat irreversibel, sesuatu yang telah terjadi tidak dapat kita ulangi kembali secara persis seperti kondisi sebelumnya. Hal ini membawa kita ke suatu kajian untuk mencari asal mula "panah waktu" dalam hubungan antara subjek dan dunia. Argumentasi antropik menyatakan bahwa anak panah waktu menunjukkan kondisi kemungkinan munculnya dan terpeliharanya kehidupan di alam semesta (Uzan, 2007).

Pendekatan kosmologis dapat membantu untuk memberikan penjelasan yang benar tentang panah waktu (Uzan, 2007). Menurut aliran pemikiran astrofisika, asal-usul irreversibilitas dalam semua proses lokal serta semua asimetri waktu yang diamati di alam, dapat ditelusuri kembali ke kondisi batas yang memunculkan perluasan alam semesta secara keseluruhan. Dengan demikian, asal mula irreversibilitas bukanlah dalam hukum dinamika simetris, tetapi dalam kondisi batas atau kondisi awal. Menurut kosmologis, panah waktu dikaitkan dengan alam semesta yang mengembang seiring waktu (Altekar, 1998). Pandangan ini dikaitkan dengan teori ledakan (Big Bang), yaitu teori yang menyatakan bahwa alam semesta terus mengembang dan akhirnya terjadi ledakan (Uies, 2016).

Sebuah ilustrasi untuk argumen bahwa alam semesta mengembang adalah bahwa alam semesta memiliki kapasitas tak terbatas untuk menelan panas dan semua energi yang diemisikan tampaknya tidak membawanya ke arah keseimbangan termodinamika yang nyata. Sifat esensial yang dimiliki alam semesta adalah jelas bahwa langit itu gelap dan akan menyerap radiasi tanpa batas (Uzan, 2007). Sebagai akibatnya, gerakan alam semesta dalam skala yang menyebabkan adanya fenomena panah waktu. Hal ini dikaitkan dengan pemancaran radiasi yang bersifat asimetris, yaitu radiasi hanya dipancarkan dan tidak ada yang diserap sehingga terjadi degradasi energi spontan dari alam seperti yang ada dalam hukum termodinamika kedua.

Kajian terhadap sifat waktu sudah lama dilakukan dan berhubungan dengan sifat waktu yang sulit dipahami, yaitu terkait dengan apa itu waktu, bagaimana merekamnya, dan

bagaimana waktu mampu mengatur kehidupan. Pemahaman tentang waktu berkembang melalui sejarah pengamatan dalam budaya, fisika, penjaga waktu, dan biologi (Flack, 2020). Perkembangan kajian waktu ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Perkembangan Konsep Waktu

Tahun	Bidang Kajian	Kajian tentang Waktu
50.000 SM	Budaya	Nenek moyang masyarakat Aborigin menganut pandangan alam yang abadi (<i>timeless</i>), masa kini dan masa lalu terkait erat. Roh nenek moyang yang sudah lama meninggal misalnya, dipercaya mendiami yang masih hidup.
600 SM	Budaya	Sejumlah peradaban, termasuk di Iran kuno serta Yunani dan Roma mewujudkan waktu dalam dewa, yang sering disebut Chronos. Chronos sering digambarkan sebagai ular bersayap, meskipun di Roma ia mengambil bentuk yang lebih manusiawi. Filsuf Pythagoras, pada abad ke-6 SM menggambarkan dewa Chronos sebagai "jiwa" alam semesta.
500 SM	Budaya	Sementara budaya Barat telah memahami konsepsi linear tentang waktu, banyak budaya lain berfokus pada siklus waktu yang berulang. Hinduisme dan Buddha misalnya, mengadopsi pandangan siklus waktu yang menyarankan kembalinya dunia ke keadaan semula; tidak ada yang permanen dan bahkan kematian hanyalah jalan menuju kelahiran kembali dan pembaruan.
350 SM	Fisika	Dalam Fisika, pemikir Yunani, Aristoteles menguraikan definisi waktu yang terdengar cukup modern sebagai "ukuran gerak yang dapat dihitung sehubungan dengan sebelum dan sesudah." Gagasan waktu sebagai rangkaian peristiwa yang tetap ini tetap bertahan dengan hanya sedikit modifikasi hingga karya Einstein di awal abad ke-20. Apakah waktu memiliki permulaan? Aristoteles menolak keras gagasan itu, alih-alih melihat waktu sebagai tidak terbatas.
100 SM	Budaya-Penjaga Waktu	Suku Maya di Amerika Tengah mengembangkan kalender kompleks yang melacak tidak hanya musim yang berlalu dan fase bulan, tetapi juga kapan planet Venus akan muncul di langit, pagi atau sore. Suku Maya melihat waktu sebagai sesuatu yang organik dan percaya bahwa umat manusia sangat terlibat dalam perjalanan waktu. Menjaga waktu pada jalurnya dipandang sebagai tanggung jawab komunal.
1687 M	Fisika	Waktu yang mutlak, benar, dan matematis, dengan sendirinya dan sifatnya sendiri, mengalir secara seragam," tulis Isaac Newton dalam karya besarnya, <i>Principia</i> . Newton berargumen bahwa, bahkan jika jam kita mungkin tidak sempurna, waktu nyata mengalir dengan kecepatan tetap, berfungsi sebagai semacam jam master untuk alam semesta. Definisi Newton menyatu dengan kesan akal sehat kita tentang waktu — bahwa waktu berlalu dengan kecepatan yang sama untuk semua orang.
1729 M	Biologi	Siklus harian tanaman, saat mereka membuka dan menutup kelopak dan bunganya diketahui oleh orang Yunani kuno, tetapi astronom abad ke-18, Jean-Jacques d'Ortous de Mairan, yang menunjukkan bahwa tanaman melakukan lebih dari sekadar menanggapi sinar matahari. Mairan menempatkan tanaman mimosa di ruangan yang gelap selama beberapa hari dan memperhatikan bahwa perilaku siklus mereka bertahan "seolah-olah tanaman dapat merasakan matahari."
1824 M	Fisika	Ilmuwan Prancis, Sadi Carnot membuktikan ada batas atas efisiensi mesin apa pun. Aturan Carnot, seperti yang sekarang

Tahun	Bidang Kajian	Kajian tentang Waktu
1895	Budaya-Fisika	kita sebut, adalah pernyataan pertama dari apa yang kemudian dikenal sebagai hukum kedua termodinamika. Hukum menyatakan secara kasar, bahwa dalam sistem tertutup, entropi (jumlah ketidakteraturan) harus selalu meningkat. Fakta bahwa segala sesuatunya menjadi lebih tidak teratur - tetapi tidak pernah sebaliknya - tampaknya memberi arah pada waktu. Penulis Inggris, H.G. Wells menerbitkan <i>The Time Machine</i> yang sering digambarkan sebagai kisah perjalanan waktu modern pertama. Meskipun diterbitkan satu dekade penuh sebelum teori relativitas Einstein, buku ini memperlakukan waktu sebagai dimensi keempat, terlepas dari tiga dimensi ruang, mirip dengan bagaimana ia dipahami dalam fisika Einstein. Sang protagonis melakukan perjalanan ribuan dan bahkan jutaan tahun ke masa depan, hanya melakukan perjalanan kembali ke masa lalu untuk kembali secara singkat ke titik keberangkatannya di Inggris, Victoria.
1907	Fisika	Dalam teori relativitas khususnya, Albert Einstein menunjukkan bahwa tidak mungkin ada "jam master" untuk alam semesta, seperti yang dibayangkan Newton. Sebaliknya, pengukuran waktu tergantung pada gerakan masing-masing pengamat. Pengecualian adalah kecepatan cahaya yang dianggap memiliki nilai yang sama oleh semua orang (sekitar 300.000 km per detik). Teori ini juga menyiratkan bahwa kecepatan cahaya adalah batas kecepatan tertinggi untuk alam semesta.
1915	Fisika	Dalam teori relativitas umumnya, Einstein menunjukkan bahwa ruang dan waktu dapat dibelokkan oleh gravitasi (pada kenyataannya, teori tersebut menggambarkan gravitasi sebagai pembelokan ruang-waktu). Sementara, relativitas khusus hanya berlaku untuk objek yang bergerak dengan kecepatan konstan, relativitas umum juga mencakup objek yang dipercepat. Teori tersebut memprediksi keberadaan gelombang gravitasi dan lubang hitam — keduanya kini telah dikonfirmasi oleh pengamatan.
1916	Fisika	Beberapa bulan setelah Einstein mengerjakan persamaan untuk relativitas umum, fisikawan Jerman, Karl Schwarzschild memecahkan persamaan untuk kasus tertentu: massa bola yang tidak berputar. Tetapi solusi Schwarzschild memiliki implikasi yang mengejutkan: Jika semua massa suatu objek dapat dikompresi ke dalam radius kritis (disebut radius Schwarzschild), ia akan mengalami keruntuhan yang dahsyat dan tak terbendung, menciptakan objek yang medan gravitasinya begitu kuat sehingga tidak ada yang — bahkan tidak ringan — bisa melarikan diri. Kami sekarang menyebut benda-benda seperti itu lubang hitam.
1928	Fisika	Mengapa waktu tampak mengalir hanya dalam satu arah? Dalam <i>The Nature of the Physical World</i> , fisikawan Inggris, Arthur Eddington menyebut ini "panah waktu". Dia percaya bahwa itu entah bagaimana terhubung ke entropi. Eddington menulis: "Jika saat kita mengikuti panah, kita menemukan semakin banyak elemen acak dalam keadaan dunia, maka panah itu menunjuk ke masa depan; jika elemen acak berkurang, panah menunjuk ke arah masa lalu. Itulah satu-satunya perbedaan yang diketahui dalam fisika."
1929	Fisika	Menggunakan pengamatan dari teleskop 100 inci di luar Los Angeles, astronom AS, Edwin Hubble dan Milton Humason menunjukkan bahwa semakin jauh sebuah galaksi dari Bumi,

Tahun	Bidang Kajian	Kajian tentang Waktu
1954	Biologi	semakin cepat ia menjauh dari kita. Penemuan ini membuka jalan bagi apa yang sekarang kita sebut model kosmologi Big Bang — gagasan bahwa semua materi dan energi yang kita lihat di sekitar kita pernah terkonsentrasi di ruang yang jauh lebih kecil. Implikasinya adalah bahwa alam semesta — dan mungkin waktu itu sendiri — memiliki permulaan. Ahli zoologi Jerman, Gustav Kramer berhipotesis bahwa banyak hewan dan tumbuhan memiliki semacam jam internal yang mengatur ritme biologis mereka. Dia berpendapat bahwa ini terkait dengan "kompas matahari" yang tampaknya digunakan burung dan lebah untuk navigasi. Eksperimen lebih lanjut oleh rekan senegarannya, Klaus Hoffmann menunjukkan bahwa "ritme sirkadian" ini dengan periode sekitar 24 jam, sebenarnya membantu burung dalam navigasi.
1964	Fisika	Dua ilmuwan AS — fisikawan, Arno Penzias dan astronom radio, Robert Wilson — menemukan cahaya misterius di seluruh langit menggunakan antena radio di Bell Labs di Holmdel, New Jersey. Radiasi ini segera dikenal sebagai "latar belakang gelombang mikro kosmik", kadang-kadang digambarkan sebagai gema Big Bang. Apakah Big Bang harus dianggap sebagai permulaan waktu masih diperdebatkan. Beberapa ahli kosmologi menyarankan bahwa alam semesta berjalan melalui siklus ekspansi dan kontraksi.
1971	Fisika	Relativitas diuji ketika pesawat komersial yang membawa jam atom identik diterbangkan ke seluruh dunia dua kali — pertama ke timur dan kemudian ke barat — dan hasilnya dibandingkan dengan jam identik yang tersisa di darat. Perbedaan yang dihasilkan, yang dikenal sebagai dilatasi waktu, sangat kecil (kurang dari sepersejuta detik) tetapi dapat diukur dengan jam dan hasilnya sesuai dengan teori relativitas khusus dan umum Einstein.
1972	Biologi	Dua kelompok ilmuwan yang dipimpin oleh Robert Moore dan Victor Eichler di Chicago dan oleh Friedrich Stephan dan Irving Zucker di Berkeley menemukan wilayah otak yang mengatur ritme sirkadian. Struktur kuncinya adalah nukleus suprachiasmatic atau SCN yang memproses informasi dari retina tentang terang dan gelap. Studi selanjutnya, pada tikus ditemukan bahwa kerusakan pada SCN menghancurkan ritme hewan — dan transplantasi SCN dapat memulihkannya.
1988	Fisika-Budaya	Fisikawan Inggris, Stephen Hawking menerbitkan <i>A Brief History of Time</i> , sebuah buku populer tentang ruang, waktu, dan alam semesta yang menjadi buku terlaris yang mengejutkan. Hawking mengidentifikasi tiga "panah waktu" yang berbeda: panah psikologis (mendukung ingatan kita tentang masa lalu dan bagaimana kita membayangkan masa depan), panah termodinamika (arah di mana entropi meningkat), dan panah kosmologis (arah di mana ukuran alam semesta meningkat).
1989	Biologi	Seorang wanita Italia bernama Stefania Follini muncul dari sebuah gua di New Mexico, di mana dia telah menghabiskan 130 hari tanpa kontak dengan dunia luar — dan tanpa jam. Segera setelah percobaan dimulai, siklus tidur-bangunnya berubah dari 24 menjadi 25 jam; pada akhirnya itu hingga 36 jam. Setelah 130 hari, dia memperkirakan sekitar 60 hari telah berlalu. Masih banyak yang harus dipelajari tentang bagaimana tubuh kita melacak waktu, tetapi eksperimen semacam itu menunjukkan bahwa jam internal kita bukan sekadar ekuivalen biologis dari jam mekanis dan jam tangan.

Tahun	Bidang Kajian	Kajian tentang Waktu
2009	Fisika	Dalam sebuah makalah yang berpengaruh, Noah Linden, Sandu Popescu, Tony Short, dan Andreas Winter berpendapat bahwa panah waktu dapat dijelaskan dalam kerangka keterjeratan mekanika kuantum. Saat sistem fisik menjadi terjerat dengan lingkungannya, ia bergerak lebih dekat ke keseimbangan — dan evolusi satu arah ini menentukan panah waktu. Pekerjaan tim dibangun di atas ide-ide yang diajukan Seth Lloyd dalam tesis doktoralnya pada tahun 1988.
2013	Fisika	Para peneliti yang menyelidiki kemungkinan teori gravitasi kuantum mulai mencurigai bahwa baik ruang maupun waktu bukanlah properti fundamental alam semesta. Ide kunci, yang dikembangkan oleh fisikawan Juan Maldacena dan Leonard Susskind pada tahun 2013, mengemukakan kesetaraan antara belitan kuantum dan lubang cacing. Idenya kadang-kadang disebut ER = EPR, setelah dua makalah diterbitkan oleh Einstein dan rekan penulisnya pada tahun 1935. Jika benar, itu akan menyiratkan bahwa interaksi kuantum menyatukan struktur ruang-waktu.
2018	Biologi	Sebuah tim ilmuwan Norwegia yang dipimpin oleh Albert Tsao menemukan jaringan sel di dalam otak yang tampaknya memainkan peran penting dalam menghubungkan kesadaran akan perjalanan waktu dengan pembentukan ingatan. Studi yang dilakukan pada tikus menunjukkan bahwa kelompok sel tertentu dalam wilayah otak yang dikenal sebagai korteks entorhinal lateral, yang berdekatan dengan hipokampus, mengkodekan memori episodik dengan “memungkinkan hipokampus untuk menyimpan representasi terpadu tentang apa, di mana, dan kapan.”

Berdasarkan tabel 1, dapat dilihat bahwa perkembangan konsep waktu merupakan suatu evolusi. Interpretasi evolusi menggambarkan perkembangan dan modifikasi suatu gagasan ilmiah melalui proses sinambung, melalui penyempurnaan secara bertahap berdasarkan observasi lebih cermat, pengujian-pengujian, dan koreksi atau penggantian dengan yang lebih baik (Firman, 2019). Menurut Karl Popper, perkembangan dalam sains dapat dicapai melalui falsifikasi terhadap teori-teori yang tidak benar sehingga teori-teori baru yang muncul semakin dekat dengan kebenaran.

b. Perkembangan Konsep Entropi

Pada tahun 1824, Sadi Carnot telah memformalkan hukum kedua termodinamika sambil menangani kerja yang bersifat terapan murni, tanpa ada kaitannya dengan sains. Dia telah menemukan bahwa proses kerja mesin uap tidak dapat diubah (irreversibel) – sejumlah energi selalu hilang selama operasinya. Kemudian, pada tahun 1867, Rudolf Clausius menciptakan istilah entropi dari kata Yunani *entropiein* untuk transformasi dan perubahan (Martin et al., 2013). Ide transformatif ini muncul saat mempelajari interaksi refrigerasi (suatu proses untuk menghasilkan dan menjaga suatu beban dalam ruangan yang dikondisikan agar selalu dalam kondisi dingin), mesin kalor, dan perpindahan kalor (Q) di antara keduanya. Selain itu, ide tersebut didasarkan pada pernyataan, yang suatu fakta bahwa panas tidak pernah bisa berpindah dari tubuh yang lebih dingin ke tubuh yang lebih hangat. Proses sebaliknya terjadi, yaitu pemerataan suhu dalam waktu, yang tidak dapat diubah. Artinya, tubuh yang lebih dingin tidak akan menjadi lebih dingin, tetapi hanya lebih panas selama interaksi antara kedua kondisi tersebut.

Kesimpulan Clausius adalah bahwa kalor berubah, sedangkan jumlah perbandingan kalor terhadap suhu, T, tetap sama. Kesimpulan ini mengarah pada definisi pertama yang menggambarkan perubahan entropi (dS).

$$dS = \frac{dQ}{dT}$$

Clausius menyatakan, setiap sistem tubuh memiliki entropi tertentu di setiap keadaan. Entropi sistem yang terisolasi tetap konstan atau bertambah seiring waktu. Entropi adalah besaran spesifik: jumlah panas dibagi dengan suhu tubuh. Entropi mencapai maksimum ketika suhu menyamakan (keseimbangan). Definisi Clausius tentang entropi mengarah langsung ke pernyataan matematis dari hukum kedua termodinamika.

$$\frac{dS}{dT} \geq \frac{dQ}{T}$$

Perubahan entropi terhadap waktu akan selalu lebih besar atau sama dengan perubahan panas dibagi suhu atau perubahan entropi terhadap waktu akan selalu lebih besar atau sama dengan entropi awal. Namun, pertanyaannya adalah apakah kuantitas dari entropi ini? Definisi Clausius tidak menyatakan apa itu entropi, tetapi hanya bagaimana entropi berubah sebagai fungsi panas dan suhu. Entropi memiliki kaitan dengan degradasi energi yang dapat digunakan menjadi bentuk yang tidak dapat digunakan. Meskipun pada faktanya, banyak ilmuwan yang berhasil menggunakan konsep entropi dan tidak peduli dengan maknanya. Entropi adalah kuantitas yang berguna dalam termodinamika kimia dan rekayasa, terlepas dari apa artinya pada tingkat molekuler (Ben-Naim, 2020).

Entropi kemudian didefinisikan oleh Boltzmann dalam bentuk jumlah total keadaan mikro yang dapat diakses dari suatu sistem yang terdiri dari sejumlah besar partikel, tetapi dicirikan oleh parameter makroskopik energi E , volume V , dan jumlah partikel N (Ben-Naim, 2020). Idenya mengidentifikasi entropi sebagai jumlah keadaan sistem mikroskopis yang tidak dapat dibedakan dari sudut pandang makroskopik. Boltzmann mendalilkan hubungan yang sekarang dikenal sebagai entropi Boltzmann:

$$S = K_B \log W$$

K_B adalah konstanta, sekarang dikenal sebagai konstanta Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ J/K), dan W adalah jumlah keadaan mikro yang dapat diakses dari sistem. Secara sepintas, entropi Boltzmann tampaknya benar-benar berbeda dari entropi Clausius. Namun demikian, pada penerapannya, perhitungan entropi melalui persamaan Clausius dan Boltzmann memperoleh nilai yang hampir sama.

Boltzmann menjelaskan hukum kedua termodinamika sebagai hukum probabilistik (Ben-Naim, 2020). Boltzmann menyatakan bahwa sebuah sistem ketika dibiarkan sendiri, berpeluang tinggi untuk bergerak cepat melanjutkan ke keadaan yang tidak teratur. Kata peluang atau probabilistik menjadi perdebatan di kalangan ilmuwan. Probabilitas benar-benar asing bagi penalaran fisik. Fisika dibangun di atas dasar hukum deterministik dan absolut, tidak ada ketentuan untuk pengecualian. Pada pandangan determinisme, dunia adalah sebuah automaton, bergerak otomatis sesuai hukum-hukum alam, dan segala kegiatan dan interaksi manusia merupakan hasil dari *clinamen* (penyimpangan arah atom secara mendadak dan tak terprediksi) yang merupakan bagian dari alam.

Rumusan secara makroskopis hukum kedua termodinamika itu mutlak, tidak pernah ada satu pun pelanggaran terhadap hukum tersebut. Pada sisi lain, Boltzmann bersikeras bahwa hukum kedua hanya bersifat statistik, entropi meningkat sebagian besar waktu, tidak sepanjang waktu. Penurunan entropi bukanlah suatu kemustahilan, tetapi hanya sangat tidak mungkin. Mengingat bahwa domain terkecil dari fisik (mikroskopis) dapat dibalik, mengapa semua peristiwa makroskopik memiliki arah waktu yang tertentu?

c. Panah Waktu dan Entropi

Entropi dalam bidang fisika maupun kimia dipelajari dalam topik termodinamika. Termodinamika mempelajari energi dan kerja pada suatu sistem. Kajian termodinamika berkaitan erat dengan mekanika statistika yang memberikan gambaran akan pergerakan materi atau partikel dalam sistem akibat energi dan kerja yang diberikan atau diambil. Entropi secara spesifik dinyatakan dalam Hukum II Termodinamika yang pernyataan awalnya terkait aliran kalor, yaitu kalor mengalir secara spontan dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah dan tidak dapat berjalan sebaliknya secara spontan. Boltzmann menjelaskan hukum kedua termodinamika sebagai hukum probabilistik (Ben-Naim, 2020). Boltzmann menyatakan bahwa ketika sebuah sistem dibiarkan sendiri, berpeluang tinggi untuk bergerak cepat melanjutkan ke keadaan yang tidak teratur. Entropi memberikan interpretasi matematis dari 'keteraturan' di alam semesta, sedangkan mekanika statistika memberikan pandangan

dalam tidak simetrisnya waktu dari suatu proses fisik (Djajadi, 2019). Ada beberapa teorema tentang entropi, diantaranya Clausius, Boltzmann, dan Shannon. Clausius menyatakan bahwa setiap sistem tubuh memiliki entropi tertentu di setiap keadaan (Martin et al., 2013). Entropi sistem yang terisolasi tetap konstan atau bertambah seiring waktu. Definisi dari Clausius ini belum dapat menjelaskan secara khusus dari entropi, hanya sebatas proses perubahan entropi sebagai fungsi suhu dan panas. Oleh karena itu, entropi kemudian didefinisikan oleh Boltzmann sebagai jumlah total keadaan mikro yang dapat diakses dari suatu sistem yang terdiri dari sejumlah besar partikel, tetapi dicirikan oleh parameter makroskopik energi E , volume V , dan jumlah partikel N (Ben-Naim, 2020).

Terkait entropi, pernyataan Hukum II Termodinamika adalah setiap proses alami terjadi dengan arah yang akan menambah nilai entropi total; jumlah entropi dapat tetap atau tidak berubah hanya jika prosesnya bersifat reversibel (Rusli, 2019). Pernyataan inilah yang mendasari hubungan antara entropi dengan panah waktu, yaitu dengan adanya kesamaan bahwa waktu dan entropi mempunyai satu arah (maju) dan masih sulit untuk membuat kedua hal tersebut tetap ataupun berjalan sebaliknya. Ada dua pernyataan Eddington yang berhubungan dengan entropi dan panah waktu (Ben-Naim, 2017), yaitu sebagai berikut.

- 1) "Hukum bahwa entropi selalu meningkat, menurut saya, memegang posisi tertinggi di antara hukum-hukum Alam."
- 2) "Mari kita menggambar panah secara sewenang-wenang. Jika saat kita mengikuti panah kita menemukan semakin banyak elemen acak dalam keadaan dunia, maka panah itu menunjuk ke masa depan; jika elemen acak berkurang panah menunjuk ke arah masa lalu."

Konsekuensi pertama membawa akibat bahwa waktu akan membawa kita pada kondisi ketidakteraturan yang maksimum dan akan terjadi kehancuran alam semesta. Berbagai pandangan menyatakan bahwa alam semesta terbentuk sebagai akibat dari pelanggaran simetri, ketika berbagai interaksi (gravitasi, medan elektromagnetik) keluar dari interaksi umum awal (Karpenko, 2020). Keadaan awal ini, sebelum asal usul alam semesta, sepenuhnya simetris, derajat entropis relatif rendah karena semua masih berjalan secara teratur.

Konsep entropi memungkinkan kehidupan di bumi masih berlangsung sampai sekarang. Sumber energi utama bagi kehidupan di bumi adalah cahaya dari Matahari. Salah satu konsekuensi dari hukum kedua termodinamika adalah bahwa panas secara alami mengalir dari benda panas (Matahari) ke benda yang lebih dingin (Bumi). Jika proses tersebut selalu mengikuti hukum kedua, maka akan terjadi kekacauan di bumi karena kedua suhu sistem akan mencapai kesetimbangan satu sama lain. Faktanya, planet kita tidak memanas sampai mencapai suhu Matahari. Hal ini karena Bumi kehilangan panas dengan memancarkannya ke luar angkasa. Dan satu-satunya alasan ia dapat melakukannya adalah karena ruang angkasa jauh lebih dingin daripada Bumi. Karena Matahari adalah titik panas di langit yang sebagian besar dingin, Bumi tidak hanya memanas, tetapi juga dapat menyerap energi Matahari, memprosesnya, dan memancarkannya ke luar angkasa. Sepanjang perjalanan energi, entropi meningkat, namun energi radiasi masih lebih besar dibandingkan peningkatan entropi sehingga waktu menuju ke arah kesetimbangan masih jauh.

Penjelasan kedua adalah bahwa biosfer Bumi bukanlah tempat yang statis. Bumi menerima energi dari Matahari, namun energi tersebut tidak hanya digunakan untuk memanaskan planet kita. Bumi memanfaatkannya dan kemudian melepaskannya sebagai radiasi dengan entropi tinggi. Semua itu hanya mungkin karena alam semesta secara keseluruhan, dan tata surya khususnya, memiliki entropi yang relatif rendah saat ini sebagaimana kondisi entropi pada masa lalu. Kondisi entropi di Bumi yang masih cukup rendah bukan berarti bahwa Bumi bersifat statis. Sangat mungkin kondisi akan mengalami perubahan. Pada alam semesta banyak ruang untuk entropi meningkat sebelum mencapai keseimbangan dan semuanya terhenti.

Adapun pernyataan Eddington kedua, terkait hubungan ketidakteraturan dengan panah waktu dijelaskan dengan konsep entropi yang irreversibel. Bahwa entropi akan meningkat seiring berjalannya waktu dan tidak sangat kecil peluangnya untuk turun. Sehingga dalam entropi hanya ada satu arah mata panah. Hal ini dapat digunakan untuk menjelaskan panah waktu dalam pandangan psikologis. Pandangan tersebut berusaha menjawab pertanyaan tentang mengapa kita bisa mengingat masa lalu, namun tidak masa depan, karena entropi pada masa lalu cenderung lebih rendah. Kesadaran kita mempertahankan karakteristik tertentu, memori membekas dengan keadaan dengan entropi rendah, tetapi kita tidak tahu masa depan yang mempunyai entropi lebih tinggi. Masa depan sulit diprediksikan karena adanya gangguan yang semakin meningkat. Panah waktu menunjukkan bagaimana proses irreversibel membatasi

pengetahuan kita tentang dunia, kita tahu dunia hanya dengan satu cara (Altekar, 1998). Meskipun berbagai banyak pandangan menyetujui adanya hubungan antara panah waktu dan entropi, namun masih banyak pertanyaan yang perlu dijawab baik oleh filsuf maupun ilmuwan. Mengacu pada pernyataan Boltzmann tentang entropi, mengingat bahwa domain terkecil dari fisik (mikroskopis) dapat dibalik, mengapa semua peristiwa makroskopik memiliki arah waktu yang tertentu?

4. Simpulan dan Saran

Berdasarkan pemaparan pada kajian, maka dapat disimpulkan bahwa panah waktu merupakan suatu pandangan yang menyatakan bahwa fenomena di alam tidak selamanya simetris dengan waktu, atau dapat berjalan maju dan mundur. Penjelasan panah waktu berdasarkan hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa waktu menuju kondisi tertentu yang bersifat tidak dapat balik dan hanya menuju masa depan. Berdasarkan pendekatan kosmologis, panah waktu dikaitkan dengan alam semesta yang mengembang seiring waktu. Pada pendekatan psikologis, panah waktu berkaitan dengan penjelasan bahwa manusia mampu mengingat masa lalu dengan baik namun tidak mampu memprediksi masa depan dengan tepat. Ketiga pandangan panah waktu tersebut berkaitan erat dengan konsep entropi yang dapat digunakan untuk menjelaskan ketidaksimetrisan alam semesta. Berdasarkan hukum kedua termodinamika, dalam ruang tertutup, entropi akan selalu meningkat sehingga sangat sulit untuk kembali ke kondisi awal yang derajat entropinya lebih kecil. Berdasarkan kajian juga ditemukan bahwa masih ada satu rangkaian yang hilang, yaitu fenomena mikroskopik yang reversibel, meskipun secara makroskopik bersifat irreversibel dan hal tersebut perlu diteliti untuk memperkuat pandangan berkaitan ketidakteraturan alam semesta.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Harry Firman, M.Pd. dan Prof. Dr. Nahadi, M.Si., M.Pd. yang telah memberi saran dan masukan untuk kesempurnaan artikel kajian ini.

6. Daftar Pustaka

- Adji, H. (2010). Konsep Waktu Menurut Pandangan Barat dan Pandangan Timur dan Perjumpaannya dalam Kehidupan Orang Jawa Modern. *Mozaik Humaniora*, 1(8), 161.
- Altekar, E. V. (1998). Arrow of Time: Towards a New Epistemology of Science. *The Paideia Archive: Twentieth World Congress of Philosophy*, 45, 7–14.
- Ben-Naim, A. (2017). Is Entropy Associated with Time's Arrow? *ArXiv: Popular Physics*, 1–30.
- Ben-Naim, A. (2020). Entropy and Time. *Entropy*, 22(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/E22040430>.
- Djajadi, M. (2019). *Filsafat Sains*. Arti Bumi Intaran.
- Firman, H. (2019). *Pengantar Filsafat Ilmu Pengetahuan Alam*. SPS UPI.
- Flack, D. (2020). May. Arrows of Time. *Quanta Magazine*. <https://www.quantamagazine.org/what-is-time-a-history-of-physics-biology-clocks-and-culture-20200504/>.
- Karpenko, I. A. (2020). The Second Law of Thermodynamics in the Context of Contemporary Physical Research. *Epistemology & Philosophy of Science*, 57(3), 142–159.
- Martin, J. S., Smith, N. A., & Francis, C. D. (2013). Removing the Entropy from the Definition of Entropy: Clarifying the Relationship Between Evolution, Entropy, and the Second Law of Thermodynamics. *Evolution: Education and Outreach*, 6(1), 2–9. <https://doi.org/10.1186/1936-6434-6-30>.
- Rusli, A. (2019). Untuk Penyadaran Ilmu dan Ilmiah: Suatu Cara Memperkenalkan Konsep Entropi Berdasarkan Pernyataan Clausius, Hipotesis Boltzmann Tentang Interpretasi Molekularnya dan Suatu Catatan Metafisika Prosiding. *SNIPS*, 10–20.
- Uies, D. (2016). Penafsiran Teori Big Bang dalam Perspektif Al-Qur'an. *Jurnal Al-Fath*, 10(01), 57–80.

Uzan, P. (2007). The Arrow of Time and Meaning. *Foundations of Science*, 12(2), 109–137.
<https://doi.org/10.1007/s10699-006-0007-y>.